

國立交通大學

光電系統研究所

碩士論文

廣角口腔內視鏡設計與研究

Design and Study for Wide Angle Intraoral Camera

研究生：龔書正

指導教授：陳志隆 教授

張俊彥 教授

中華民國一百年七月

廣角口腔內視鏡設計與研究

Design and Study for Wide Angle Intraoral Camera

研究生：龔書正

Student: Kung, Shu-Cheng

指導教授：陳志隆 教授

Advisor: Prof. Chern, Jyh-Long

張俊彥 教授

Prof. Chang, Chun-Yen

國立交通大學

光電系統所

碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute of Photonic System

College of Photonics

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Institute of Photonic System

June 2011

Tainan, Taiwan, Republic of China

中華民國一百年七月

學生：龔書正

指導教授：陳志隆 教授

張俊彥 教授

國立交通大學光電系統研究所 碩士班

## 摘 要

本論文設計之廣角口腔內視鏡是為口腔檢查。近年來鏡頭模組製程技術突飛猛進，遠較過去輕薄短小，而價錢更是十分低廉。另一方面，立體攝影技術雖是一門古老的科學，但在 3D 系統於這一兩年形成風潮後被各國大力發展，成為顯示光學發展的顯學。

本研究希望能透過整合多個鏡頭模組，提供一個廣角而低畸變的視野，讓醫生在檢查紀錄病人口腔時更加方便。同時，透過整合多個鏡頭模組的特性，形成視差，可以設計口腔鏡的立體視覺。

希望這項技術能應用在口腔檢查、簡報、建檔記錄上，造福更多人類的健康。

Student : Kung, Shu-Cheng

Advisors : Dr. Chern, Jyh-Long

Dr. Chang, Chun-Yen

Institute of Photonic System

National Chiao Tung University

## **ABSTRACT**

The wide angle intraoral camera we designed is for oral examination. The fabrication technology of camera module has greatly improved, and the lens module is lighter, smaller, and cheaper as before. On the other hand, the stereo technology is an ancient knowledge, but it has been improved significantly the image application in recent years. The governments and companies in the world also focus on stereo systems development.

In this study, we use multiple lens modules to design a low wide angle view with low optical distortion. This result can let doctor observe the patients oral cavity more easily. And we can get a 3D oral image using multiple camera modules, which can produce stereo vision.

This technology is expected to be used in the oral examination, photography and record. We believe that this design can help more people with health.

## 致謝詞

這篇論文從開始提出實驗架構起，到今天論文完成，大約過了一整年的時間。若從接受老師的光學設計訓練開始算起，則也過了兩年的時間。

這些日子以來，書正感謝各位老師的教導，感謝我的指導教授，陳志隆教授，還有我的共同指導教授，張俊彥教授。在你們的指導下書正不但能在學識上獲益良多，更學習到做人處事的道理，還有對於你們前輩提携後輩的無限感激。感謝幫我口試的鄭竹明博士和許根玉教授，你們提供的意見和指導讓這篇論文能更完整，感激再三。感謝每個台南和新竹校區的老師，你們的指導讓書正茁壯，你們的言教身教更是書正的榜樣。感謝辛苦工作的璞玉小組工作人員們，你們在人力物力都極有限的情況下讓台南校區上軌道，日夜努力工作讓我們在新校區的學習生涯舒適順暢，書正十分感激。

感謝陪我度過在台南那段時間的每一個台南校區同學，我們一起念書，一起討論，一起玩樂，那段純樸簡單的日子，書正一輩子都不會忘記。感謝我們實驗室的同學，柏宇、偉宏、意雯，你們給我許多指導，在報告的時候聽到你們準備齊全的報告也敦促我不能懈怠。感謝實驗室的學弟妹們，紘瑋、進興、弘胤、品儀、國展、明憲、志庭，你們陪我度過在新竹的這段時間，因為你們做研究的日子不會孤單，生活不苦悶而有笑聲。感謝我的好朋友，冠佑和怡安，妳們在我不熟悉的 3D 部份給我許多意見，讓我可以完成將口腔內視鏡立體化的任務，萬分感激。

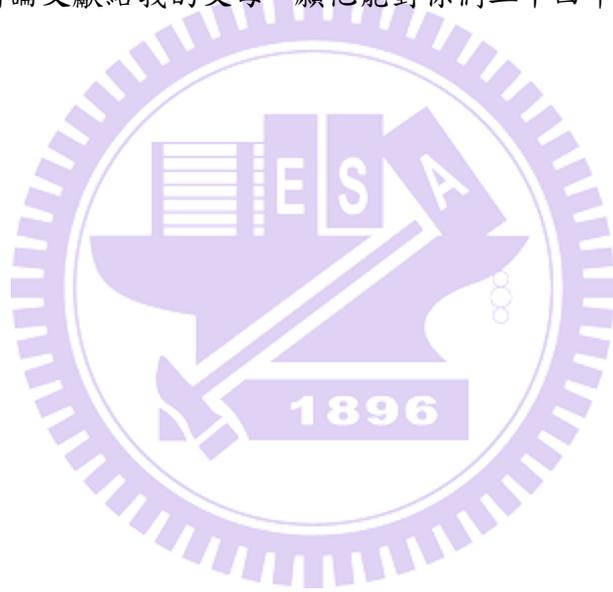
這篇論文要感謝的其他人太多了，感謝從小到大教育過我的師長，和陪我一起長大的同學朋友，沒有你們書正走不到今天。感謝我在台南那段日子裡，載我南北往返的客運、鐵路司機。感謝房東陳先生給我便宜又舒適的房間，感謝學校餐廳辛苦煮飯

的每個工作人員。或許正如陳之藩先生所言，要謝的人太多了，那我們就謝天吧。

最後，我最感謝的，是我的父母。感謝你們這二十年來無私無悔的犧牲，讓書正得以在衣食無缺的環境下長大。感謝你們的堅持，讓書正可以專心於課業上完成論文。

倘若這篇論文日後能有幸對人類起到一點貢獻，那這份榮耀是屬於每個曾經幫助過我的人，願你們在知道或不知道的情況下都能共享這份榮耀。

最後，僅將這篇論文獻給我的父母，願他能對你們二十四年來無悔的付出做為一點回報。



# 目錄

摘要 .....	i
ABSTRACT.....	ii
致謝詞 .....	iii
圖目錄 .....	vii
表目錄 .....	xi
第一章、緒論 .....	- 1 -
1.2 研究方法.....	- 4 -
第二章 規格定義 .....	- 8 -
2.1 物空間： 口腔.....	- 8 -
2.1.1 口腔規格制定 .....	- 9 -
2.1.2 人類顎骨量測方法： .....	- 10 -
2.2 光學空間： 透鏡.....	- 15 -
2-2.1 基礎光學原理(一階計算).....	- 15 -
第三章、設計 .....	- 33 -
3.1 訂出合理規格.....	- 34 -
3.1.1 景深估計： .....	- 42 -
3.1.2 MTF 計算： .....	- 44 -
3.2 設計起始.....	- 45 -
3.2.1 景深範圍為 30 到 40 公厘的相機模組 1 的優化結果： .....	- 51 -
3.2.2 景深範圍為 60 公厘到 110 公厘的相機模組 2 優化結果： .....	- 55 -
3.2.3 相機模組 1 與模組 2 討論： .....	- 59 -
3.3 公差分析.....	- 67 -
3.3.1 厚度公差分析 .....	- 68 -
3.3.2 曲率敏感度測試 .....	- 69 -

3.3.3 材料折射率分析.....	- 70 -
3.4 公差分析結論：.....	- 71 -
3.5 公差修正：.....	- 73 -
第四章：立體鏡頭設計.....	- 74 -
4.1 立體攝影原理：.....	- 74 -
4.2 立體攝影法：.....	- 79 -
4.2.1 立體影像重現.....	- 80 -
4.3 立體攝影於口腔內視鏡的應用：.....	- 81 -
4.4 口腔內視鏡設計布局：.....	- 82 -
4.5 立體感校正討論.....	- 90 -
4.6 相機模組 1 與 2 在立體攝影化後討論.....	- 95 -
第五章 結論.....	- 99 -
5.1 實現例分析.....	- 99 -
5.2 結論與願景.....	- 102 -
第六章、參考資料.....	- 103 -

## 圖目錄

圖 1 市售產品 VISTA CAM .....	- 3 -
圖 2 US Patent 5, 528. 432 中的口腔內視鏡光學結構.....	- 4 -
圖 3 多鏡頭口腔內視鏡設計示意圖 .....	- 7 -
圖 4 人眼兩眼視覺差異示意圖 .....	- 7 -
圖 5 人體口腔剖面結構示意圖 .....	- 9 -
圖 6 利用 X 光機拍攝的全口腔牙齒影像 .....	- 9 -
圖 7 上下顎骨寬度 .....	- 11 -
圖 8 口腔部位標定示意圖 .....	- 12 -
圖 9 鏡頭模組與視角關係示意圖 .....	- 14 -
圖 10 一個市售的成像鏡頭 AF-S Nikkor 50mm f/1.4G Lens.....	- 15 -
圖 11 成像的物像距關係圖 .....	- 15 -
圖 12 不同透鏡的屈光度與焦點表現 .....	- 16 -
圖 13 Snell' s Law 示意圖 .....	- 17 -
圖 14 球面像差示意圖 .....	- 18 -
圖 15 慧形象差示意圖 .....	- 19 -
圖 16 場曲示意圖 .....	- 19 -
圖 17 人眼構造圖 .....	- 20 -
圖 18 像散示意圖 .....	- 20 -
圖 19(a)原始圖型 (b) 枕狀畸變 (c) 桶形畸變 .....	- 21 -
圖 20 桶形畸變嚴重的魚眼鏡頭 .....	- 21 -
圖 21 色差示意圖 .....	- 21 -
圖 22 兩片透鏡組合示意圖 .....	- 23 -
圖 23 多鏡片組合等效焦距計算示意圖 .....	- 24 -

圖 24 庫克 三片式鏡頭設計 .....	- 25 -
圖 25 非球面示意圖 .....	- 26 -
圖 26 鏡頭規格示意圖 .....	- 27 -
圖 27 焦距與像高視角示意圖 .....	- 28 -
圖 28 彩色 CCD.....	- 30 -
圖 29 影像圈與影像元件 .....	- 31 -
圖 30 各種尺寸大小的影像元件 .....	- 31 -
圖 31 設計流程圖 .....	- 34 -
圖 32 口腔中各物距示意圖 .....	- 35 -
圖 33 傳統的口腔內視鏡(左)與單眼近距離攝影(右).....	- 35 -
圖 34 腫瘤與所需視野示意圖 .....	- 36 -
圖 35 口腔視區分佈 .....	- 37 -
圖 36 口腔內視鏡視野配置 .....	- 37 -
圖 37 OV7607 規格.....	- 38 -
圖 38 彩色 CCD Sensor 示意圖 .....	- 39 -
圖 39 1/4"VGA 規格表 .....	- 39 -
圖 40 影像元件大小示意圖 .....	- 40 -
圖 41 景深示意圖 .....	- 41 -
圖 42 1/6 英寸 VGA 手機鏡頭模組.....	- 45 -
圖 43 MTF .....	- 46 -
圖 44 畸變與角度關係示意圖 .....	- 46 -
圖 45 光斑大小 .....	- 47 -
圖 46 MTF V.S 視野 (60、80、100) lp/mm .....	- 47 -
圖 47 Code V 軟體內建的影像模擬(Image Simulation)功能 .....	- 47 -
圖 48 改變物距後影像品質下降 .....	- 48 -

圖 49 物距 35 公厘時的光斑大小 .....	- 48 -
圖 50 物距 35 公厘時的 MTF .....	- 49 -
圖 51 物距 3.5 公分時的畸變量 .....	- 49 -
圖 52 Code V 的優化選單介面.....	- 50 -
圖 53 相機模組 1 於物距 35 公厘聚焦情形 .....	- 51 -
圖 54 物距為 40 公厘、35 公厘、30 公厘的 MTF 圖 .....	- 52 -
圖 55 物距(a)40、(b)35、(c)30 公厘處 MTF 和視角作圖 .....	- 53 -
圖 56 物距為 32 公厘的 MTF 和視角作圖 .....	- 54 -
圖 57 影像模擬測試物 .....	- 54 -
圖 58 影像模擬結果：物距為 40、35、30 公厘 .....	- 55 -
圖 59 相機模組 2 在物距為 75 公厘時對焦情形 .....	- 56 -
圖 60 物距為(1)110、(2)75、(3)60 公厘處時的 MTF 圖 .....	- 57 -
圖 61 (a)80、(b)60、(c)40 lp/mm 的 MTF 強度與各視角關係圖.....	- 57 -
圖 62 物距為(a)110、(b)75、(c)60 公厘的模擬影像 .....	- 58 -
圖 63 相機模組 1 各物距光斑散佈情形 .....	- 61 -
圖 64 相機模組 2 各物距光斑散佈情形 .....	- 63 -
圖 65 相機模組各項公差測試目標示意圖 .....	- 67 -
圖 66 3D 視覺示意圖 .....	- 75 -
圖 67 人的視野與馬的視野比較 .....	- 75 -
圖 68 1838 年 Wheatstone 發明立體看片箱[21] .....	- 76 -
圖 69 具有兩個鏡頭的立體相機[22].....	- 76 -
圖 70 a.快門式立體眼鏡 b.偏光是立體眼鏡 c.紅藍立體眼鏡 d.頭戴式立體 眼鏡.....	- 77 -
圖 71 立體視覺示意圖 .....	- 79 -
圖 72 使用兩台相機進行立體攝影 .....	- 80 -

圖 73 (左)骨董立體相機(右)最新的富士立體數位相機.....	- 80 -
圖 74 立體視差示意圖 .....	- 81 -
圖 75 立體螢幕與立體視覺重建 .....	- 83 -
圖 76 最小視差角示意圖 .....	- 83 -
圖 77 非交錯視差於立體螢幕重建示意圖 .....	- 84 -
圖 78 水平與傾斜拍攝 3D 立體影像示意圖 .....	- 85 -
圖 79 收斂立體景深計算示意圖 .....	- 86 -
圖 80 人眼視差角示意圖 .....	- 87 -
圖 81 非收斂立體視覺範圍示意圖 .....	- 88 -
圖 82 立體視覺範圍節點示意圖 .....	- 88 -
圖 83 人眼視差示意圖 .....	- 90 -
圖 84 相機模組視差角示意圖 .....	- 91 -
圖 85 相機模組 1 立體視覺範圍計算圖 .....	- 92 -
圖 86 有限景深立體範圍計算 .....	- 94 -
圖 87 相機模組 1 的立體景深示意圖 .....	- 95 -
圖 88 相機模組 2 的立體景深示意圖 .....	- 96 -
圖 89 相機模組 1 的視野範圍 .....	- 96 -
圖 90 相機模組 2 的視野範圍 .....	- 97 -
圖 91 相機模組 .....	- 100 -

## 表目錄

表 1、市售口腔內視鏡分析 .....	- 1 -
表 2 新設計與傳統設計比較 .....	- 6 -
表 3 原始規格參數 .....	- 45 -
表 4 相機模組 1 鏡頭參數 .....	- 55 -
表 5 相機模組 2 鏡頭參數 .....	- 59 -
表 6、相機模組 1 詳細規格 .....	- 64 -
表 7、相機模組 2 詳細規格 .....	- 66 -
表 8 相機模組 1 的設計厚度公差分析 .....	- 68 -
表 9 相機模組 2 的厚度公差分析 .....	- 69 -
表 10 相機模組 1 的曲率公差分析 .....	- 69 -
表 11 相機模組 2 的曲率公差分析 .....	- 70 -
表 12 相機模組 1 的材料公差分析 .....	- 70 -
表 13 相機模組 2 的材料公差分析 .....	- 71 -
表 14、公差測試最敏感部分 .....	- 72 -
表 15、立體化後相機模組 1 改變參數 .....	- 98 -
表 16、立體化相機模組 2 改變參數 .....	- 98 -
表 17 相機模組 1 參數： .....	- 100 -
表 18 相機模組 2 參數： .....	- 100 -
表 19 S.W.O.T 分析列表 .....	- 101 -

## 第一章、緒論

口腔內視鏡是醫生檢查口腔病變的好幫手，它能夠伸入口腔內部的死角，並將影像傳到電腦螢幕，對病人展示病灶，以及拍照記錄。口腔內視鏡亦可用在自我口腔檢查上，方便個人或家人協助下進行口腔保健。

### 1.1 口腔內視鏡發展現況：

目前口腔內視鏡在市面上已經廣泛銷售，我收集一些市面上的產品，將其功能與規格列於下表：

表 1、市售口腔內視鏡分析

市售口腔內視鏡參數							
	物距變化 (mm)	系統大小 (mm <sup>2</sup> ) (L×W)	重量(g)	視角 (度)	照明	影像 元件 尺寸	單位畫素大小
<b>Sopro 595</b>	5~30	L: 198; l: 27; W: 18 mm	50	80	8LEDs,( Sen sor Sensitivity 2 lux)	1/3"	(752x582) PAL; (768x494) NTSC
<b>Duerr Dental Vistacam</b>	0.6~24	198mm× 27mm	130	90	6 LEDs	1/4"	410,000
<b>Sopro 617</b>	5~infinite	L. 205 mm x l. 28 mm x H. 24mm	55	80(10 5)	8LEDs,( Sen sor Sensitivity 2 lux)	1/4"	(752x582) PAL; (768x494) NTSC
<b>HK780 USB</b>	5~55	200mm	50	70	4 PC ceramic LED lamps+ 2 PC Ultraviolet		4M

					LED lamps		
<b>Sunshine</b>	5~50	N/A	N/A	70	6 pcs white LED(5600K)	1/4"	1.3M
<b>Sopro 717</b>	macro (1 to 5 mm),intra-oral (5 to 30 mm) and extra-oral (30 mm to infinity).	L.200 mm x l.28 mm x H.24mm	75	70	8LEDs, (Sensor Sensitivity 2 lux)	1/4"	(752x582) PAL;(768x494) NTSC
<b>Kodak 1500</b>	1mm~ infinite	N/A	N/A	80°	8 white LED	1/2.5"	Video: (640*480) Image: (1280*960)
<b>My Design</b>	30~50			180		1/6"	VGA*3

我們可以由表 1 發現目前的市售產品有以下特徵：視角大約在 70 到 90 度左右，只能看輕部分口腔區域。圖 1 和圖 2 可以看出市售產品的外觀、大小和內部光學結構。

除了兩個中國公司生產的產品使用百萬畫素的 CCD 外，大多使用 VGA 做為影像裝置。VGA(Video Graphics Array)是 IBM 於 1987 年提出的一個使用類比訊號的電腦顯示標準，目前 VGA 這個術語泛指解析度為為 640 × 480 個畫素。因為就目前的技術而言，VGA 擁有比百萬畫素 CCD 更快的傳輸率，而我們再使用口腔內視鏡時手常常在動，是動態影像，VGA 可以提供更流暢的畫面。(我們從感光元件大廠 Omnivision 的 1/4" 三百萬畫素 CCD OV3647 的 Frame Rate 為 15ftps，同樣 1/4" 的 VGA OV7211 的 Frame Rate 為 30ftps，掃描速度差為 1 倍！)[1]

但是 VGA 的鑑別率較差，該如何提升解析能力也是我們在這個研究所要進行的課題。目前的市售鏡頭的重量大約在 50 到 100 公克，所以我們的系統不可以超過這個重量。為了達成可以拍口腔又可以近拍牙齒表面，市售產品普遍使用自動對焦的變焦鏡頭，但這樣成本比較高，若使用定焦鏡頭則可降低成本。



圖 1 市售產品 VISTA CAM [2]

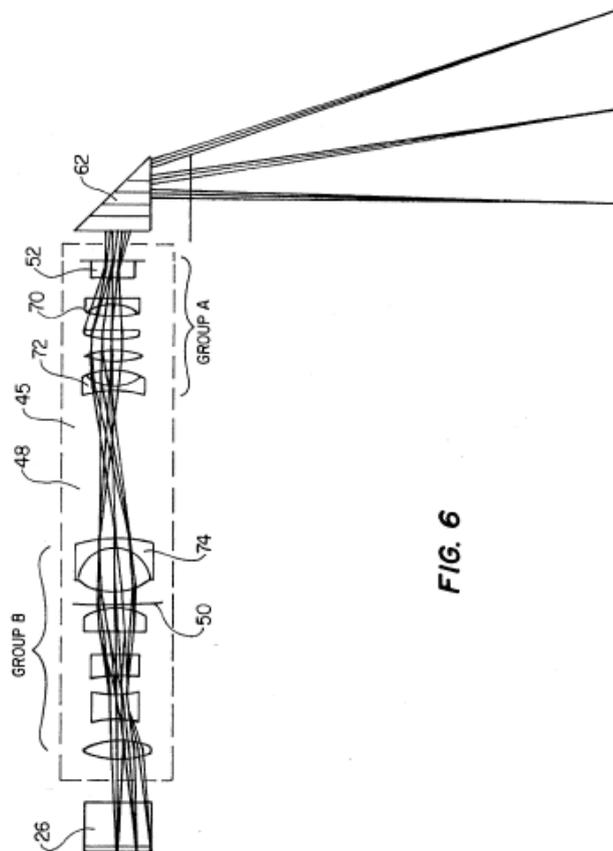


圖 2 US Patent 5,528.432 中的口腔內視鏡光學結構 [2]

## 1.2 研究方法

傳統設計在自我檢查上，會有死角的問題。同時，因為設計都是在看口腔側面，無法看到口腔內部咽喉的情況，在使用上侷限於牙醫使用，若能增大視野則可方便普通人在家中就可以進行自我檢查。

我們提出一個新的設計，一個更簡單、更容易的自我檢查設計，同時畫質亦可滿足專業醫療人員的需求。同時，這個設計的成本比傳統設計更低，機構也更加簡單。

然而在設計這樣的口腔鏡時會面臨幾個問題：

1. 廣角鏡頭會帶來很嚴重的畸變( distortion )，讓整個畫面看起來變得像球型。
2. 景深問題。口腔是個體積有限的半橢圓腔體，深度變化大，從嘴巴兩側到咽喉，涵蓋如此大的景深，對鏡頭設計是個很大的挑戰。
3. 系統體積、重量。口腔內視鏡因為是手持式的，體積和重量都很重要，需又輕又小。

為了達成目地，我們使用了新的設計，並且使用非球面鏡片來修正畸變和減少鏡片數量，使用塑膠鏡片來減輕重量。在先進的製程技術中，我們可以使用射出成型和模造玻璃的方法來大量生產非球面鏡片，壓低成本，完成輕巧又便宜的產品。

我們提出以下的系統構想：設計一個視角達到 180 度或超過的廣角鏡頭，又沒有畸變產生，是很困難的。但若是把 180 度的視野分成多等份，用多個較小的相機模組去看，每個相機模組的視野不用太廣，可以比較容易去修正畸變，而且相機模組設計起來也會比較簡單。

使用多個小相機模組還有一個好處，我們可以使用較小尺寸的 VGA 晶片，這樣即使畫素不到百萬，但上面的每個畫素都很小，就可以達到提高辨識率，而且可以保有 VGA 高速傳輸的特性，提供流暢的動態影像。

由於製程科技的進步，讓本來只在高階相機上使用的非球面鏡片也可以被大量使用，非球面鏡片可以有效的矯正像差，並可減少使用鏡片數量，達到輕量化的目地。

以一個VGA相機模組來說，只要使用兩片鏡片即可得到影像元件所需要的解析度。若以三個視角60°的相機模組獲得一個180°的廣角影像，只需要6片鏡片；若是以四個來獲得一個視野240°的超廣角影像，也只需要八片鏡片。這相對於傳統設計動輒需要十幾片鏡片來完成一個廣角鏡頭來說簡便許多。

同時我們將視野切成許多小區域後，景深的變化量減少，符合一個鏡頭可透過光學設計方法滿足的量。若這是一個不合理的景深，違背光學原理，那是無法透過光學設計的方法來克服的。如圖3所示，這是一個以三顆鏡頭組成的多鏡頭口腔內視鏡構想示意圖。相機Module A為觀查口腔兩側，Module B為看口腔深部咽喉的情況。

表 2 新設計與傳統設計比較

	傳統設計	新設計
鏡頭模組	一組變焦鏡	多顆定焦鏡
視野(FOV)	60°~90°	180°(全口腔拍攝能力)或超過
感光元件	一顆大尺寸VGA(1/4", 1/3")	多顆小尺寸VGA(1/6")
重量	50~100g	50~100g
鏡片	多片鏡片	使用非球面縮小體積
機構	變焦、自動對焦	定焦、使用泛焦拍攝

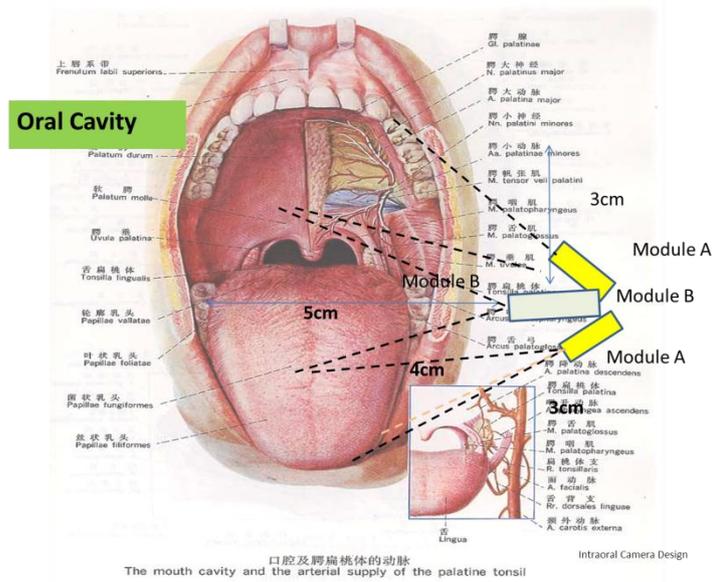


圖 3 多鏡頭口腔內視鏡設計示意圖[3]

3D 立體影像已經逐漸成為主流，而 3D 影像的產生，是因為於人眼分成左右兩邊，當我們一起看著同一個物體時，可以看到物體的不同面，在經過神經傳回腦部後，可以組合出一個 3D 影像，並讓我們感覺出遠近不同的距離感。

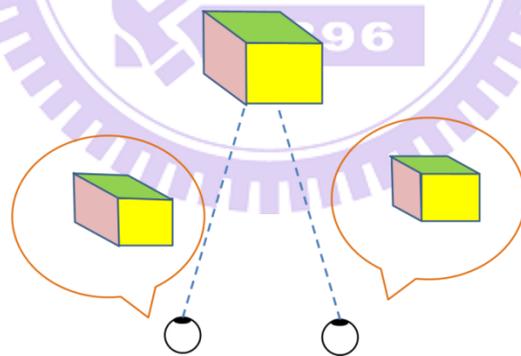


圖 4 人眼兩眼視覺差異示意圖

所以當我們需要看到立體影像時，我們至少需要兩個以上的鏡頭，我們的設計可以用增加鏡頭模組的方式，讓我們有建立全口腔立體影像的可能。

## 第二章 規格定義

在進行光學設計時，絕對不是天馬行空的憑設計者喜好進行設計，而是必須遵守規格。一份完整的規格可以分成物空間、光學空間、像空間。

物空間定義你要看到的是什麼？需要多大的視野和多遠的距離？光學空間定義鏡片的數量、材質、鏡片的形式、體積大小等。像空間則是定義系統所使用的影像元件規格，包括影像元件種類(底片、CCD、CMOS…)、尺寸大小、畫素大小等。

不符合規格的設計是不能用的，低於規格則無法滿足提出需求者，超過規格要求太多則會形成牛刀殺雞的浪費情形。認識規格在開始設計前是很重要的。

### 2.1 物空間：口腔

廣角口腔內視鏡的設計目的，是為了能夠簡易而快速的記錄下口腔全口影像，作為口腔內部各種病變的檢查與記錄。為了能定出合理的規格，我們得先分析我們口腔的各項規格。

口腔是人體的與外界接觸的器官之一，是個橢圓形的腔體，具有咀嚼、感受味道、言語情感表達等功能。主要組成有：唇、顎、口腔底、牙齒、舌等，口腔向上則與鼻腔相連，其構造如圖 5、圖 6 所示。

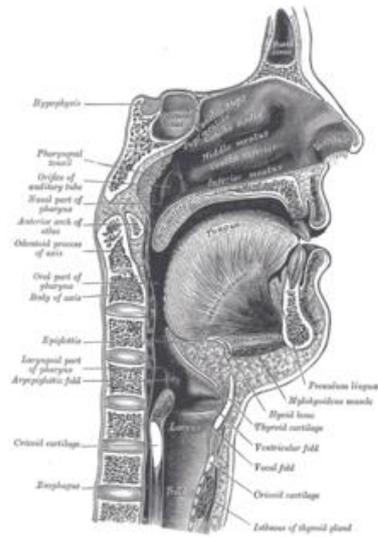


圖 5 人體口腔剖面結構示意圖



圖 6 利用 X 光機拍攝的全口腔牙齒影像[6]

### 2.1.1 口腔規格制定

口腔病變的病灶大多是可以透過肉眼直接發現的，腫塊和癬斑的大小從數公厘到

數公分不等。觀察者可以使用傳統的照相機直接從口腔外進行拍攝，將對焦範圍直接鎖定在病變處，這樣不需要很大的視角也可以記錄下病變分布的情形。

但我們口腔內視鏡發展的意義，在於能將影像帶到靠近病灶處，近距離拍攝全口影像並記錄，讓我們可以得到個完整而詳細的影像檔案。

由以上口腔疾病的分布來看，口腔病變分布的區域有：嘴唇、牙齦、口腔壁、咽喉處等地方，而口腔是個橢圓型的腔體，兩邊窄中間長，而詳細的大小因人而異，所以在定義物距時我們先設定被檢測的對象是成年人，成年男子的口腔長度與寬度以舌頭長度和顎骨寬度為計算標準。

舌長以從口咽開始計算，人類的平均長度是 100 公厘。[6]

顎骨可分為上顎骨和下顎骨兩部分，人類口腔寬度由外向內逐漸變寬，類似三角形。我們以牙醫使用的牙齦寬度為判斷依據，對口腔進行丈量。

### 2.1.2 人類顎骨量測方法：[7]

上下顎骨之電腦斷層切面為平行齒槽齦，切得影像為軸狀面(axial view)影像，經由重組而得全景面(panoramic view)與立體影像。齒間橫切面(cross section)影像選擇是由軸狀面及全景面影像互相符合的切面，左右正中門齒齒間標定位置 0 (position 0)，正中門齒遠心側標位置 1，以此類推，第二大白齒遠心側標定 7(圖 7)；齒間頰舌側牙齦寬度及皮質骨厚度的測量是以垂直齒槽齦作縱軸線，從牙齦往牙根尖方向 2 毫米起至距牙齦 11 毫米處每隔一毫米處，垂直縱軸線作出橫軸線，標定為高

度 2 (level 2)、高度 3 至高度 11(圖 8)。在此不同高度的橫軸線上頰舌側牙嵴寬度及頰舌側皮質骨厚度。

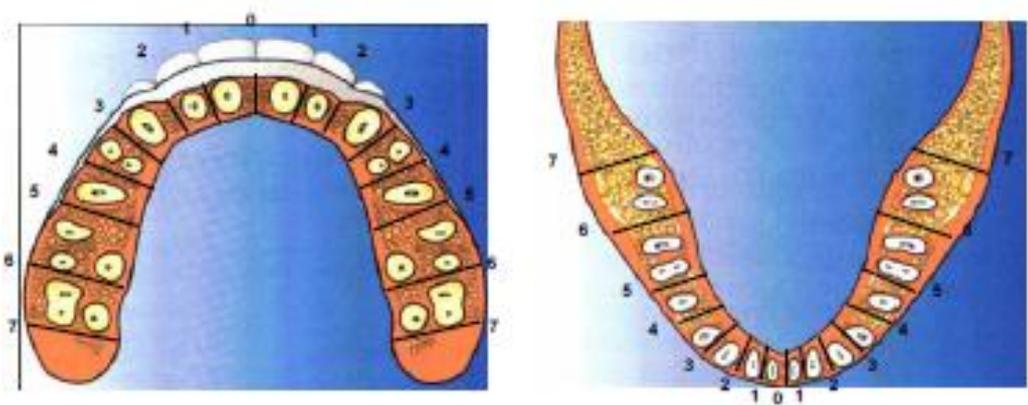


圖 7 上下顎骨寬度 [7]

上顎牙嵴寬度平均值為  $117.3 \pm 44.3$  公厘，下顎牙嵴寬度平均值則為  $115.1 \pm 42.4$  公厘，經變異數分析後發現兩者的差異並無統計學上的意義，但在不同位置及高度有統計學上顯著的差異且有交互作用。在不同位置方面，上下顎牙嵴寬度從位置 1 到位置 7 於左右對稱位置並無差異。由於左右對稱位置的牙嵴寬度沒有差異，故將左右的資料合併分析，發現上顎牙嵴寬度範圍從位置 0 到位置 7 為  $78.3 \pm 28.9 \sim 174.5 \pm 43.6$  公厘，下顎牙嵴寬度範圍從位置 0 到位置 7 則為  $89.4 \pm 32.6 \sim 158.7 \pm 39.88$  公厘，上下顎都是正中處最窄，愈往後牙愈寬，大白齒區顯著比前牙及小白齒區寬。在不同高度方面，從高度 2 到高度 11 上顎牙嵴寬度範圍為  $112.4 \pm 39.4 \sim 128.4 \pm 46.6$  公厘隨著高度增加有逐漸增加的趨勢，但無顯著差異；下顎牙嵴寬度從高度 2 到高度 11 的範圍為  $107.1 \pm 38.5 \sim 124.1 \pm 44.3$  公厘，隨著高度增加有逐漸增加的趨勢，高度 10、11 顯著比高度 2、3 寬。

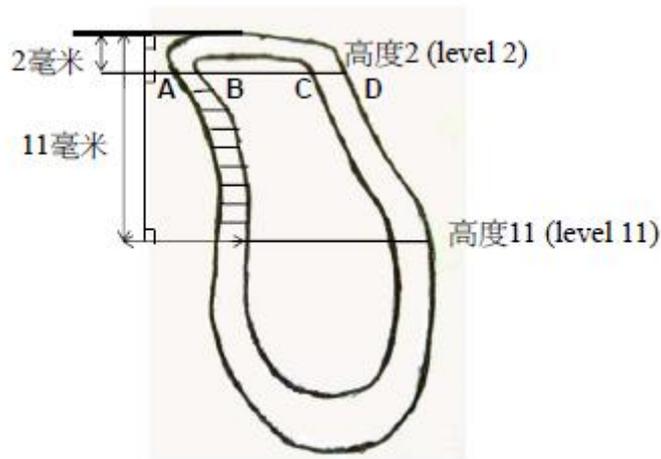


圖 8 口腔部位標定示意圖 [7]

下顎牙嵴之高度標定，如圖 8 所示。測量牙嵴頰舌側寬度及皮質骨厚度以垂直牙嵴頂骨(crestal bone)為軸線，離嵴頂(crest)2 毫米至 11 毫米處，以垂直此軸線每間隔 1 毫米畫出平行的 10 條線。牙嵴寬度：A-D，頰側皮質骨厚度：A-B，舌側皮質骨厚度：C-D。

所以，成人的口腔大小變化取平均值，變化範圍是 80 公厘到 180 公厘左右，深度是 100 公厘左右的空間。

從物空間的深度變化情形，我們可以知道口腔是個深度變化很大的空間。要讓鏡頭涵蓋這麼大的範圍是不容易的。但若是採用多個鏡頭模組，那每個模組對應到的深度變化範圍可以減小，那這樣我們就有機會以定焦鏡涵蓋所需的景深範圍，讓這設計成為可行的。

而口腔病變的大小我們以口腔癌腫瘤圍觀測對象，做物空間設定。而腫瘤大小，根據美國癌症醫學會最新的分期方式[8]，在原發腫瘤的分期方面可分為：

Tx：原發腫瘤情況不明

T0：無原發腫瘤

Tis：carcinoma in situ 原位癌

T1：原發腫瘤直徑小於 2 公分

T2：原發腫瘤直徑大於 2 公分但小於 4 公分

T3：原發腫瘤直徑大於 4 公分

T4：原發腫瘤侵犯到週遭其他組織，例如：顏面皮膚，顏面骨

T4a：原發腫瘤侵犯到週遭其他組織但仍可以手術切除乾淨，如侵犯到上顎竇或顏面皮膚

T4b：原發腫瘤侵犯到週遭其他組織且無法手術切除乾淨，例如侵犯到顱底或內頸動脈

在頸部淋巴結轉移方面可分為：

Nx：頸部淋巴結轉移狀況不明或無法評估

N0：沒有頸部淋巴結轉移

N1：在原發腫瘤同側有單顆轉移的淋巴結且直徑小於 3 公分

N2a：在原發腫瘤同側有單顆轉移的淋巴結且直徑大於 3 公分但小於 6 公分

N2b：在原發腫瘤同側有多顆轉移的淋巴結且直徑小於 6 公分

N2c：在原發腫瘤對側或兩側均有或多顆轉移的淋巴結且直徑小於 6 公分

N3：有直徑大於 6 公分的轉移的淋巴結

我們以 N3 以下腫瘤為觀察對象，定義出每個鏡頭模組所需要的視角，假設距離高度為 3 公分，那需要涵蓋 N3 也就是直徑大小為 6 公分的腫瘤，需要四 45 度的半視角，如圖 9 所示

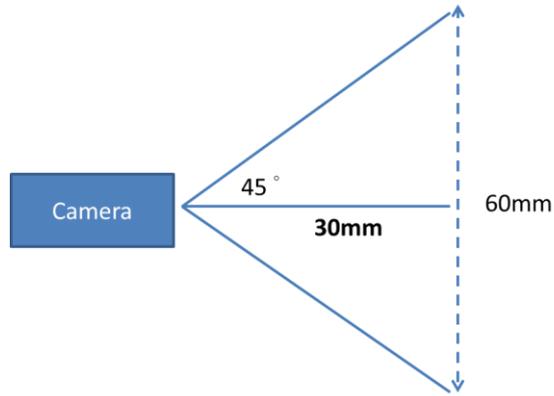


圖 9 鏡頭模組與視角關係示意圖

但視角超過六十度的鏡頭，很容易造成桶形畸變，而且我們的模組是固定的，所以並不需要單一鏡頭模組可以涵蓋整個腫瘤，我們需要另外一個模組協助。



## 2.2 光學空間：透鏡

### 2-2.1 基礎光學原理(一階計算)



圖 10 一個市售的成像鏡頭 AF-S Nikkor 50mm f/1.4G Lens [9]

在了解物空間的狀況後，我們需要對光學系統進行更進一步的設計。在這裡我們要討論光學系統的設計。物體能在像平面上清楚成像，靠的就是光學空間，也就是鏡頭來達成的。鏡頭包含許多不同的透鏡，例如圖 10 是一個典型的相機鏡頭。每個透鏡有他們個別的曲率和焦長，透過這些透鏡的組合來成像。

物體基本成像公式：

$$\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} ; s_0 \text{ 為物距, } s_i \text{ 為像距, } f \text{ 為透鏡焦距} \quad (1)$$

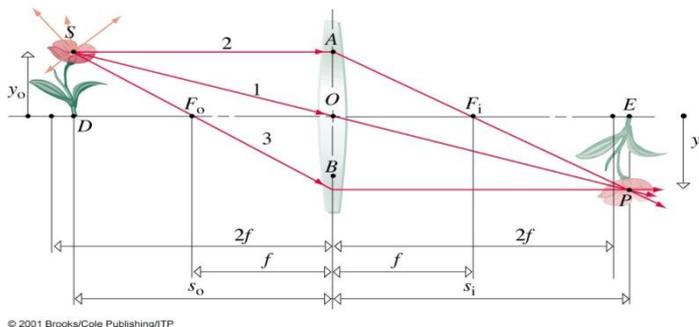


圖 11 成像的物像距關係圖 [10]

由成像關係圖可知，影響物體成像最基本的三個要素：物距、像距、焦距。光學空間的要素就是焦距。焦距能影響的不只是成像點的位置，還有影響影像的像高。像的高度和原始物體的高度的比值，稱為「放大率」。

$$M = \frac{y_i}{y_o} \quad ; y_i \text{ 為像高, } y_o \text{ 為物高} \quad (2)$$

根據相似三角型定理

$$M = \frac{y_i}{y_o} = \frac{s_i}{s_o} \quad (3)$$

可將放大率直接由物距和像距的比值看出。那透鏡的焦距該如何定義呢？在量測上，當光線從無限遠處，以平行光入射透鏡時，光線會匯聚在一點，稱之為焦點。光從鏡前無限遠(左)來時，光線在鏡後匯聚的點為後焦點；當光從鏡後(右)無限遠來時，光在鏡前匯聚的點稱為前焦點。這段匯聚的距離就是透鏡的焦距( $f$ )。而透鏡匯聚光線的能力，稱為屈光度(Optical Power,  $\Phi$ )，屈光度的定義為焦距的倒數，其物理意義是焦距越短，鏡片匯聚光線的能力越強。

$$\Phi = \frac{1}{f} \quad (4)$$

然而並不是所有的鏡片都可以讓光線匯聚，有些反而使光線發散，我們稱他的屈光力為負。

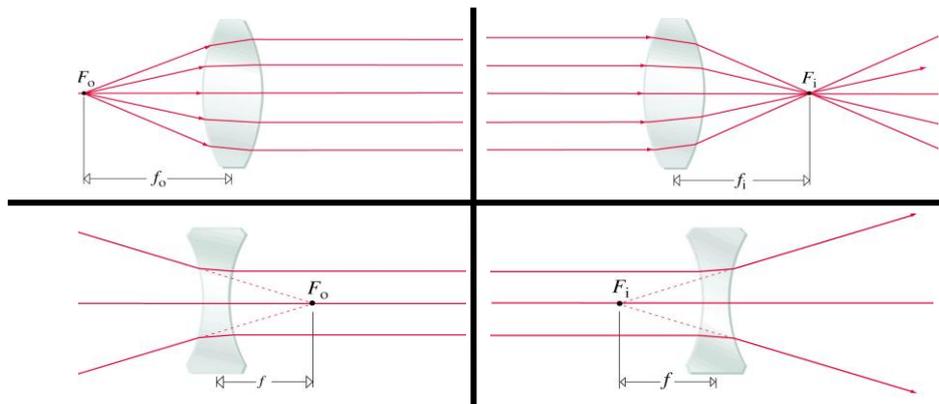


圖 12 不同透鏡的屈光度與焦點表現 [10]

透鏡能匯聚光線的原因，可以從斯乃爾定律(Snell' s Law)推導出。斯乃爾定律的物裡意義在於，光線在不同物質的介面上，為因為介質的折射率不同，而產生不同的偏角，如圖 13 所示。其關係為：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (5)$$

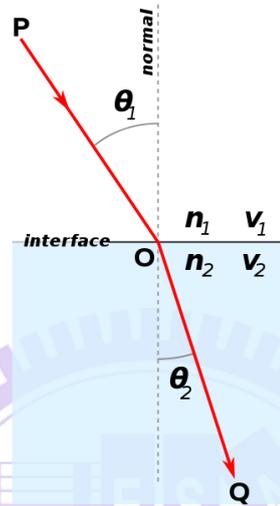


圖 13 Snell' s Law 示意圖 [10]

但在現實中物體一定有像高，不是點對點的成像，所以如果要在像平面上呈現具有物體高度的影像，我們必須要再考慮其他的光學因素，也就是所謂的像差 (Aberration)

### 2.2.2 光學像差

在理論計算中，我們的光應該是能夠正確的聚焦在焦點上，而不在光軸上的光應該是要能聚焦在像平面上，然而在實際例子中還得考量很多影響成像的因素。

像差主要可分為；球面像差、彗形像差、場曲、像散、畸變等五種，而若考慮不同顏色的色光，還得考慮色差的問題。

像差形成的原因，是因為光線折射後成的像有誤差，導致影像變形、模糊。任何真實世界中的光學系統都會有像差，但是我們可以藉由一些光學設計的方法，把它們控制到一個我們可以接受的程度。

### 球面像差

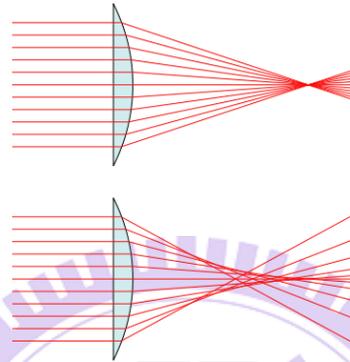
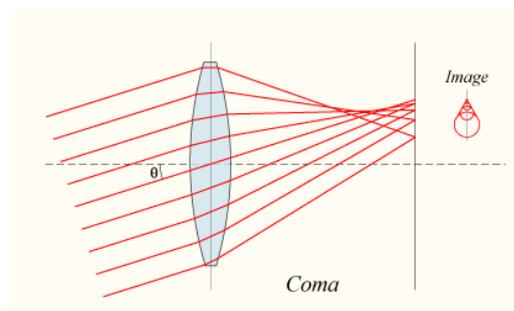


圖 14 球面像差示意圖[10]

當光能聚焦在一點，是因為透鏡折射的關係。然而透鏡因為要方便加工的關係，其表面通常選球面，表面上各點的曲率皆同。但當入射光線的光束變粗後，光線要從透鏡上各點折射到焦點上所需的折射量不同，而造成光線無法正確匯集，形成不同高度的光線距焦在不同點上的情形，肇因為球面鏡片，故稱之為球面像差，如圖 14 所示。

### 慧形像差



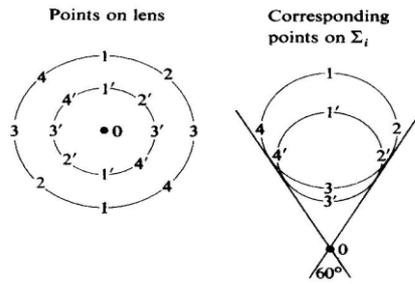


圖 15 慧形象差示意圖 [10]

慧形像差，如圖 15 所示，是因為光線在斜射( 偏離光軸 )時，光線因為透鏡設計缺陷，造成在像平面上的焦點位置偏離，而偏離的量，隨著離光軸越遠而有增加的現象，形狀類似彗星拖著長長的尾巴，稱為正彗形像差。而若是越偏靠近光軸越偏移的量越大，則為負彗形像差。

## 場曲

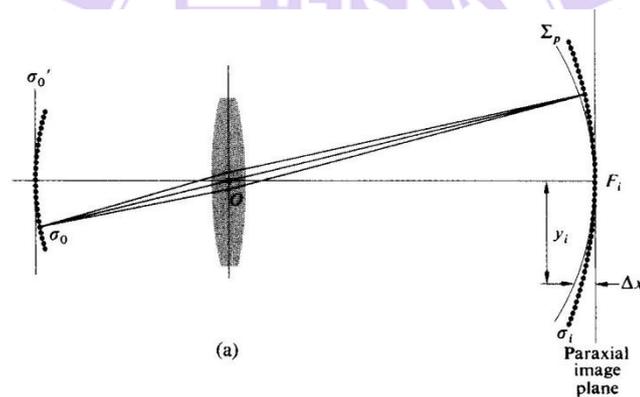


圖 16 場曲示意圖 [10]

場曲為系統的最清晰成像位置不是個平面，而是個曲面。人眼因為是網膜本身就是個曲面的關係(圖 17) ，所以巧妙得躲過這像光學限制，但在攝影系統的感光元件來說，如底片或 CCD，要將他們弄彎是很困難的。因此，在設計光學系統時，要考慮向平面彎曲的程度，若太彎，則在感光元件上看到的影像，離開光軸上的區域因為已經偏離最佳聚焦位置，所以會變得模糊不清。只有在場曲接近平面時，才能光軸上和離開光軸的光的正確聚焦位置都在像平面上，如圖 16 所示。

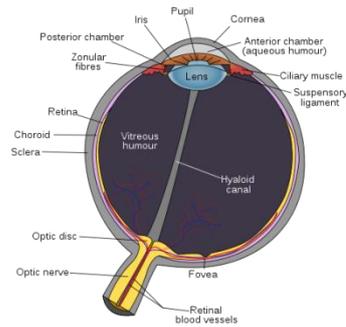


圖 17 人眼構造圖[11]

## 像散

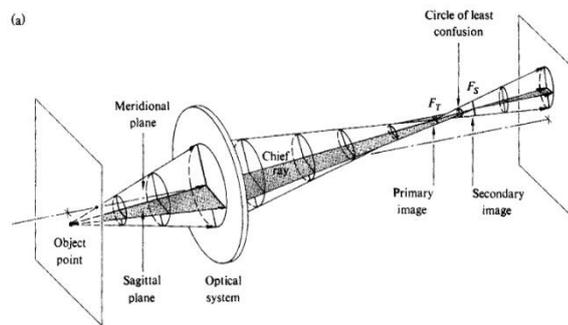


圖 18 像散示意圖 [10]

像散發生於光線經透鏡折射後，沒有在像平面上證確聚焦的現象。原來應該是一個點的焦點，變成像是一個鬆散的大斑點，這將導致影像模糊不清。像散方像分子午面(Tangential plane)和弧矢面(Sagittal plane)兩種，分別影響水平方向和垂直方向的成像能力，如圖 18 所示。

子午面和弧矢面的定義如下：

1. **Tangential plane (子午面)**：主光線(chief ray)與光軸(optical axis)所構成的平面。
2. **Sagittal plane (弧矢面)**：與子午面垂直且包含主光線的平面。

## 畸變

畸變為影像因透鏡的缺陷產生變形，越靠近邊緣的影像變形越嚴重。影像的變形可分為兩種，桶形畸變(Barrel Distortion)和枕狀畸變(Pincushion Distortion)。桶形畸變影像較原本的影像收縮，形狀偏圓，類似木桶的造型。枕狀畸變較原本圖形為大，形狀尖銳四角外擴。畸變情形如圖 19 所示。

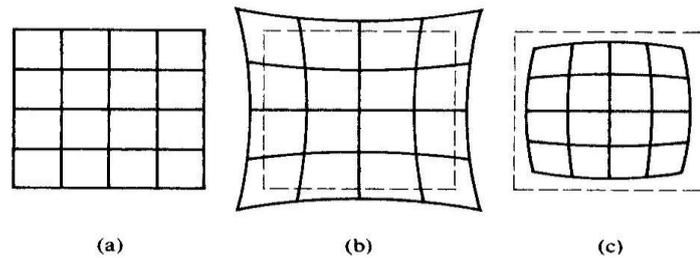


圖 19(a)原始圖型 (b) 枕狀畸變 (c) 桶形畸變

桶形畸變在超廣角的魚眼鏡頭的成像上由其常見，如圖 20 所示。



圖 20 桶形畸變嚴重的魚眼鏡頭[12]

## 色差

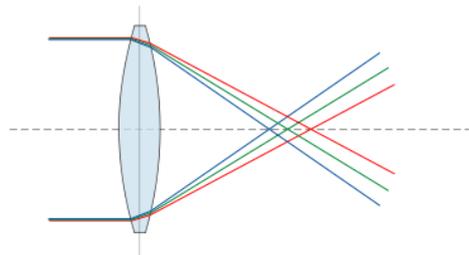


圖 21 色差示意圖[13]

白光是由許多波長的光所組成的，不同波長的光對同一個介質所對應的折射率不同，所以不同顏色得光在透過鏡片折射時會聚焦在不同的點上，讓焦點模糊，稱為色差。如圖 21 所示。

### 2.2.3 像差消除

像差的出現會影響成像品質，造成畫面不清。因此如何解決像差問題，是進階的光學設計相當重要的課題。

像差形成最重要的原因，是因為透鏡不能將光折射到正確的位置。要修正這種情況，可以使用以下幾種方法：

1. 將單片鏡片改為多鏡片組合
2. 改變透鏡形狀
3. 使用非球面
4. 縮小光圈
5. 消色差組合

我們在修正像差時，得找出對成像影響最敏感的那片鏡片，只要調整它就可以大幅改善品質。

#### 多鏡片組合：

多鏡片組合能夠矯正離軸向差，鏡片越多矯正能力越強，但也代表著成本的上升，

在成本與成像品質間取得平衡是光學工程師的重要課題。

一片透鏡的焦距可以等效成兩片以上的透鏡組合，兩片透鏡得等效公式為：

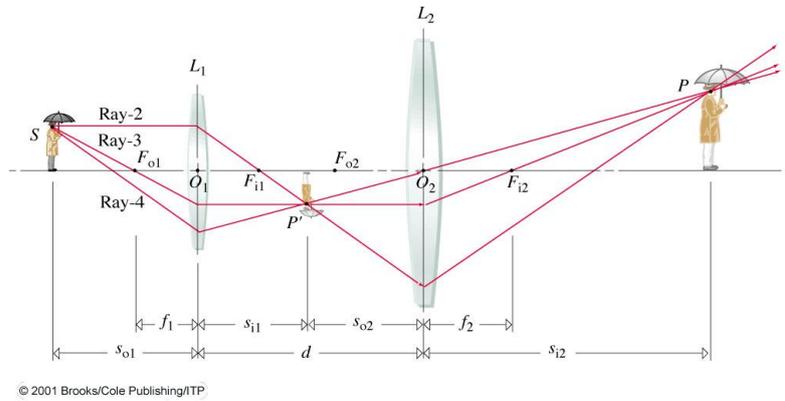


圖 22 兩片透鏡組合示意圖[10]

兩片透鏡組的放大率可寫成：

$$M = \frac{S_i}{S_o} = \left(\frac{S_{i1}}{S_{o1}}\right)\left(\frac{S_{i2}}{S_{o2}}\right); S_i \text{ 為透鏡系統像距, } S_o \text{ 為物距}$$

$$\text{當物在無窮遠時, } \begin{cases} S_{o1} = S_o = \infty, S_{i1} = f_1, S_{o2} = f \\ S_{o2} = (d - S_{i1}) \end{cases} \quad (6)$$

$$M = \frac{S_i=f}{S_o} = \frac{(S_{i1}=f_1)}{S_{o1}} \left(\frac{S_{i2}}{S_{o2}}\right) \rightarrow f = f_1 \frac{S_{i2}}{S_{o2}} \quad (7)$$

$$\text{又 } \frac{1}{S_{o2}} + \frac{1}{S_{i2}} = \frac{1}{f_2} \rightarrow \frac{1}{S_{i2}} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{S_{o2}} = \frac{S_{o2}-f_2}{f_2 S_{o2}} \quad (8)$$

$$f = f_1 \frac{S_{i2}}{S_{o2}} = f_1 \frac{f_2 S_{o2}}{S_{o2}(S_{o2}-f_2)}; S_{o2} = d - S_{i1}; S_{i1} = f_1 \quad (9)$$

$$f = f_1 \frac{f_2 S_{o2}}{S_{o2}(S_{o2}-f_2)} = \frac{f_2 f_1}{d-f_1-f_2}; \frac{1}{f} = \frac{d-f_1-f_2}{f_2 f_1} \quad (10)$$

$$\text{得公式； } \frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_2 f_1} \quad (11)$$

多透鏡的等效焦距可用多組兩片透鏡不斷等效算出，如下圖所示：

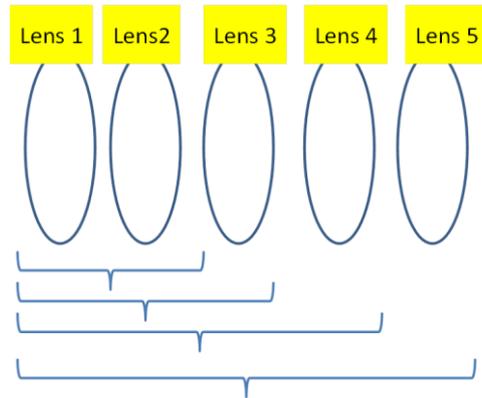


圖 23 多鏡片組合等效焦距計算示意圖

多鏡片系統可以把光路拉長，將光線的高度變化和和光線鏡心偏離的角度變化趨緩，綜合起來的像差就不會這麼嚴重。

而若以波動光學來看，光波透過透鏡改變波前，讓波前在鏡後聚焦。而比如我們採用對稱是得透鏡組，如庫克三片式鏡頭（Cooke Triplet lens），它採用屈光度：正—負—正 的布局，可以有效的把波前的變形在後面修正，就是一個經典的例子。

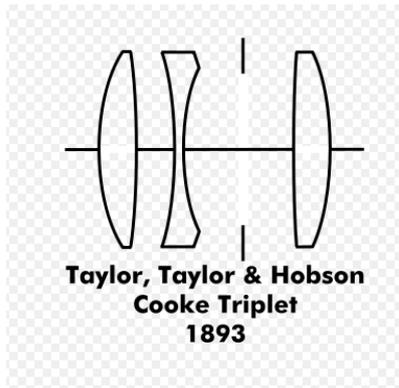


圖 24 庫克 三片式鏡頭設計 [14]

### 使用非球面：

由於現代的光學系統逐漸走向輕量化、微型化，但我們對於光學系統的品質要求仍然不變，因此在可運用鏡片的數量上必然有所限制。同時，在過去，由於非球面鏡片加工困難，只能由最有經驗的老師傅研磨，用在最頂級的鏡頭的某一面。然而隨著塑膠鏡片加工技術的精進，我們可以用射出成形法大量製造非球面鏡片，而玻璃材料也可以用模造玻璃法大量生產。因此，在光學設計上運用非球面來改善影像品質常用的選項了。

使用非球面係數的意義在於改變鏡片表面得曲率，讓透鏡變型，讓各視野光線可以折射到正確的地方，將原本成像品質不好的邊緣光修正。然而非球面是提升光學品質的萬靈丹嘛？其實非球面在光學設計上的意義應該是提升現有架構的效能，如果現有的光學架構太差，那非球面能改進的空間其實很有限。大量使用非球面也會讓加工的公差容忍度變低，在生產上也是不利的。

非球面公式如下[15]

$$z(r) = \frac{r^2}{R(1 + \sqrt{1 - (1+k)\frac{r^2}{R^2}})} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \dots \quad (12)$$

$r$  為距離光軸高度， $R$  是透鏡曲率半徑， $z$  是光軸上前進距離， $k$  是 conic constant，

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  ... 等是非球面修正係數。

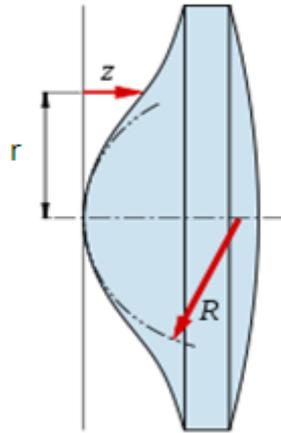


圖 25 非球面示意圖[15]

### 色差消除：

消色差鏡片(Achromatic lens)是被設計用來將色差減到最低的設計。消色差透鏡將兩片色散能力不同的鏡片膠合起來，讓一片的色差備另外一片彌補，最常見的設計就是把冕牌玻璃和燧石玻璃結合在一起。

折射率  $\geq 1.6$ ，

$V \geq 50$ ：冕牌玻璃

$V < 50$ ：燧石玻璃

折射率  $< 1.6$ ，

$V \geq 55$  : 冕牌玻璃

$V < 55$  : 燧石玻璃

$V$  的定義為：

$$V = \frac{n_d - 1}{n_f - n_c} \quad (13)$$

$n_d$ 、 $n_f$ 、 $n_c$  為該材料在 Fraunhofer 光譜 ( $d$  : 587.6nm、 $f$  : 486.1nm、 $c$  : 656.3nm)

照射下，所對應的折射率。低色散的材料，Abbe Number 高。

#### 2.2.4 鏡頭規格介紹

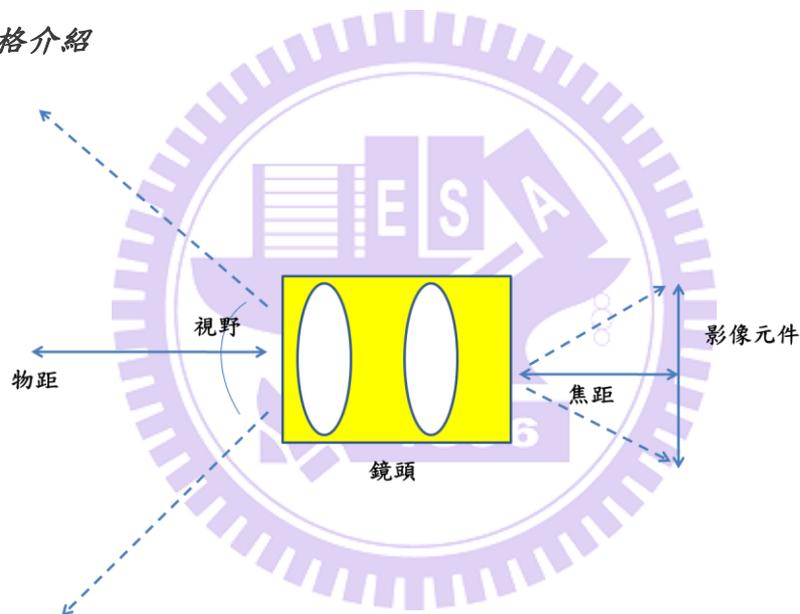


圖 26 鏡頭規格示意圖

通常設計是先決定物或是像空間，或是兩個都先被決定了。光學空間則是為了配合他們做出變動。

我們在定義一個鏡頭的時候通常會以這幾像規格為主：

1. **焦距長**：焦距長代表系統的大小，同時也和系統的視野有關。焦長和像高(Image Height)呈現  $\tan \theta$  的關係。在像高不變的情況之下，焦距越短時視野(FOV)也會變

大。在底片像機時期因為底片大小固定，所以常用焦長來表示鏡頭的視野，如 50 公厘代表標準鏡頭；16mm 的鏡頭視野很大，是廣角鏡頭；300mm 視野窄，能把影像放大，是望遠鏡頭等等。由於我們在設計時通常不會只用一片鏡片，所以鏡頭上標是的焦距大多是所有鏡片組等效出來的「有效焦長」(EFL, Effective Focal Length)

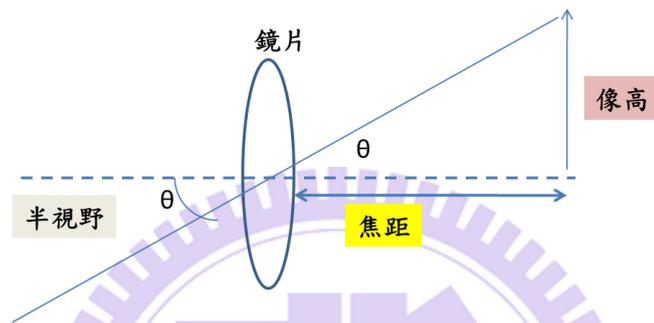
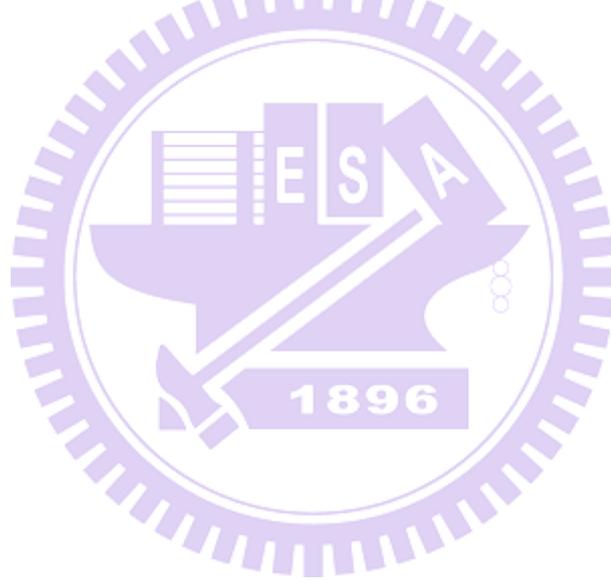


圖 27 焦長與像高視角示意圖

2. **光圈：** 光圈大小的單為是用 F-Number(F/#)， $F/\# = f/D$  (焦距/光圈直徑)。由於焦距是固定的，當 F/# 越小時，光圈直徑越大；F/# 越大時，光圈直徑越小。  
光圈的開口代表進光量，光圈開得越大進光量越大，畫面越亮，但是這也造成雜散光也越多，會影響影像品質，光圈開得越大成像越差。光圈也與景深有關，景深代表能清楚顯示的範圍，由於我們拍攝的物體是立體的，所以我們希望鏡頭能在我們需要的範圍內都能清楚成像，當光圈越小時景深也越長，雜散光越少，但是亮度也會下降。
3. **鏡片數量：** 鏡片數量越多，代表對光學像差的修正能力也會越強，但也要付出較高的製造成本與較大的體積重量。在製造技術進步後，可以大量使用非球面來增強每一片鏡片的像差修正能力，讓所需鏡片數大幅下降，同時兼顧光學品質。

4. **鏡片材質**：目前主要的光學材料可以分為塑膠和玻璃兩種。玻璃是歷史悠久的光學材料，目前已發展出豐富的產品種類。玻璃的重量重，加工較難且單價較高。但是玻璃很穩定，長時間使用下能維持一定的成像品質，適合應用在高單價和高精密的儀器上。塑膠則擁有廉價、輕巧和加工容易的特點，可以利用射出成形等加工方式大量生產，這在製造表面複雜的非球面上尤其容易。玻璃鏡片也可使用模造的方式製造非球面鏡片，但成本仍比塑膠鏡片高。塑膠鏡片目前大量應用於消費性電子產品鏡頭上，如手機鏡頭等。但塑膠鏡片較不穩定，容易受溫度影響，但現在也已經穩定的多，目前的產量遠高於玻璃鏡片。



## 2.3 像空間

### 2.3.1 簡介：

通常在設計鏡頭時，物空間和項空間都會在規格裡被定義，有時甚至指定要使用哪個廠牌的影像元件。就算沒有指定，那也會規定感光元件的大小。感光元件是由許多個像素組成，若同一尺寸的感光元件上像素(Pixel)越多，畫面也就越細緻，則辨別物體的能力也就越好。然而像素越高也就意味著成本上升，還有對光學空間的要求會更加嚴苛。

### 2.3.2 感光元件介紹：

目前市面上的感光元件可分為 CCD 和 CMOS 兩種，彩色 CCD 如下圖所示，每個彩色像素由 4 個像素所構成，分別感應紅、綠、藍三種顏色，因為這三種顏色是構成彩光的三原色，由這三種顏色的比重可以決定彩色像素的顏色，全部的彩色元素組成一個彩色畫面。

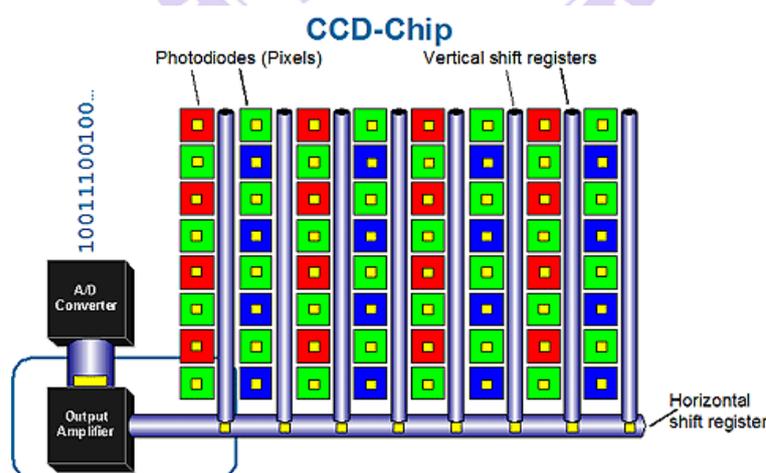


圖 28 彩色 CCD [17]

感應器的形狀是長方形的，但我們設計的鏡頭是圓的，所以影像出來也是圓形的，那該如何設定像高呢？一般來說，影像所呈的影像圈(image circle)是用影像元件的

對角線來估計的。如果說影像圈太小，那就會造成部分的感應器感受不到光，形成黑影，如圖 29 所示。

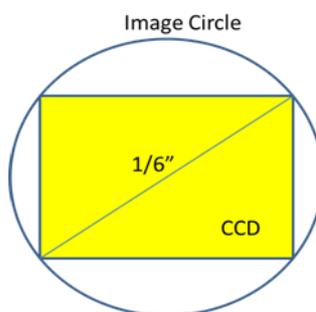


圖 29 影像圈與影像元件

Imager Sizes	Formats (Type)	~Diag.	Uses
	1/7" - 1.85 x 1.39mm	2.3	Cell phones, web cams, etc...
	1/6" - 2.15 x 1.61mm	2.7	Cell phones, web cams, etc...
	1/5" - 2.55 x 1.91mm	3.2	Cell phones, web cams, etc...
	1/4" - 3.2 x 2.4mm	4.0	Cell phones, web cams, etc...
	1/3.6" - 4.0 x 3.0mm	5.0	P&S DSC
	1/3.2" - 4.536 x 3.416mm	5.678	P&S DSC
	1/3" - 4.8 x 3.6mm	6.0	Casio QV-8000SX (1.2MP), Epson PhotoPC 700 (1.2MP)
	1/2.7" - 5.27 x 3.96mm	6.592	Canon PowerShot A20 (1.92MP), HP PhotoSmart C818 (1.92)
	1/2" - 6.4 x 4.8mm	8.0	Olympus C-2100Z (1.92MP), Epson PhotoPC 850Z (1.92)
	1/1.8" - 7.176 x 5.319mm	8.932	Nikon Coolpix 995 (3.14MP), Olympus C-4040Z (3.9MP), Canon PowerShot G2 (3.8MP), Sony DSC-S85 (3.8MP)
	2/3" - 8.8 x 6.6mm	11.0	Nikon Coolpix 5000 (4.92MP), Sony DSC-F707 (4.92MP), Olympus E-10 (3.7MP), Minolta DIMAGE 7 (4.92MP)
	1" - 12.8 x 9.8mm	16.0	Not used in DSCs. Used in some high-end video cameras
	Kodak KAF-5100CE CCD 17.8 x 13.4mm (4/3")	22.28	Olympus E1 - Four Thirds System 2560 x 1920 = 5.1MP - 6.8µm pixel 2.0x Focal Length Multiplier (35mm film)
	Foveon X3 F7-35X3-A25B 20.7 x 13.8mm	24.9	Sigma SD9 (X3) 2268 x 1512 = 3.43MP - 9.12µm pixel 1.74x Focal Length Multiplier (35mm film)
	Canon D30 CMOS 21.8 x 14.5mm	26.2	Canon D30 2160 x 1440 = 3.11MP - 10.1µm pixel 1.65x Focal Length Multiplier (35mm film)
	Canon D60 CMOS 22.7 x 15.1mm	27.3	Canon D60, 10D, Digital Rebel 3072 x 2048 = 6.3MP - 7.4µm pixel 1.58x Focal Length Multiplier (35mm film)
	Nikon D100 CCD Nikon D1x CCD 23.7 x 15.6mm	28.2	Nikon D100 - 3008 x 2000 = 6.1MP - 7.8µm pixel Nikon D1x - 4024 x 1324 = 5.24MP - 5.9 x 11.7µm pixel 1.52x Focal Length Multiplier (35mm film)
	APS Film 26.1 x 16.7mm	30.146	APS cameras 1.44x Focal Length Multiplier (35mm film)
	Canon EOS-1D CCD 27.0 x 17.8mm	32.3	Canon EOS-1D 2464 x 1648 = 4.06MP - 10.8µm pixel 1.34x Focal Length Multiplier (35mm Film)
	Kodak KAF-6303CE CCD 27.8 x 18.5mm	33.4	Kodak 760 3088 x 2056 = 6.35MP - 9.0µm pixel 1.30x Focal Length Multiplier (35mm film)
	35mm Film Canon 1Ds Kodak 14n 36.0 x 24.0mm	43.27	35mm film cameras Canon 1Ds - 4064 x 2704 = 10.99MP - 8.85µm pixel Kodak DCS Pro 14n - 4536 x 3024 = 13.7MP - 7.94µm pixel

圖 30 各種尺寸大小的影像元件 [18]

在影像元件的尺寸估計上，平時  $1 \text{ inch} = 2.54 \text{ cm} = 25.4 \text{ mm}$ ，而業界通用的規範就是 1 英吋 CCD Size = 長 12.8mm X 寬 9.6mm = 對角線為 16mm 之對應面積。這個裁切的原因和電視的尺寸定義一樣，是為了在一個圓形的範圍內取最大的長方形截面積。其各種尺寸大小關係如圖 30 所示。

然而我們在設計時，1 英吋的大小可以用 25.4 公厘來估計。雖然這樣會有一些影像範圍跑出我們的感光元件，但是這樣也可以增加系統的公差容忍度，避免日後因為製造失誤或機構架設等因素造成影像範圍不足而產生黑影。



### 第三章、設計

在認識各項規格後，開始設計的步驟如下：

1. 定出合理規格
2. 設計起始
3. 優化
4. 檢驗是否符合規格要求
5. 進行公差分析
6. 評估公差結果對生產是否可行

符合規格要求的設計才能說是完成的設計。而進行公差分析則是要探討在生產設備組裝失誤時，這個設計影像品質下降的程度是否在可接受的範圍內。要能符合生產設備公差要求的設計才能生產，否則良率會很低並增加成本。

在設計與公差分析時也要對規格進行檢討與修正，分析規格是否定義的太苛刻或超過合理範圍，在不斷的修正與妥協下完成最終產品。

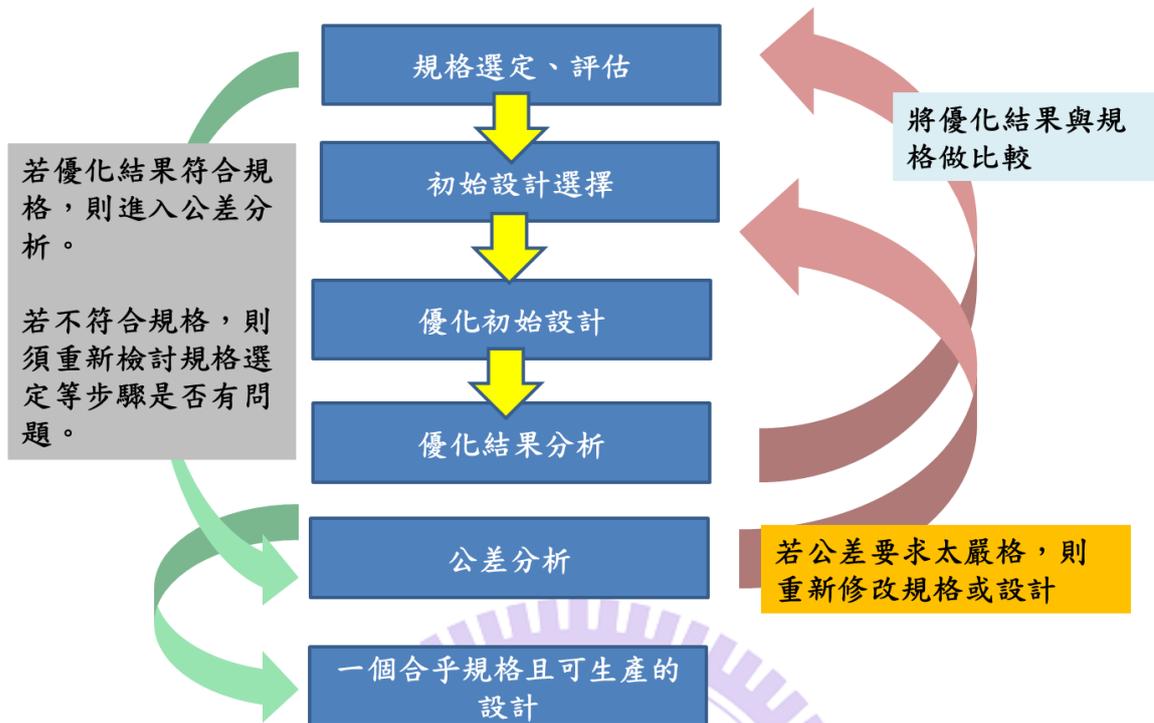


圖 31 設計流程圖

設計流程的起始點是規格的選擇，列出我們的需求與預期成本內的方案，並評估可行性有多少。接下來可以開始一個新的設計或選用現有的設計作為初始設計，並以現在強大且可靠的光學軟體進行成像優化。將優化的結果與規格進行評估，若不符合再重新檢討規格或重新設計，符合規格則進入公差分析。公差分析為評估該設計的量產可能，若無法量產則重新評估規格或重新設計，若可生產則我們可說，這是一個符合規格且可實際生產的設計。

### 3.1 訂出合理規格

訂出合理規格是光學設計中重要的啟始步驟，若是規格不合理則就算用很強的計算機輔助也沒辦法達到目標。

首先，我們定義物距。由“電腦斷層分析齒間牙齦寬度及皮質骨厚度—於矯正用

迷你骨釘之應用”一文中可以得到，人的口腔深度大約是 110 公厘左右，若我們把相機放在口腔前方，則若要拍到咽喉，所需半視角大約是 37.69 度，若要看到整個口腔，所需半視角為 63.43 度。

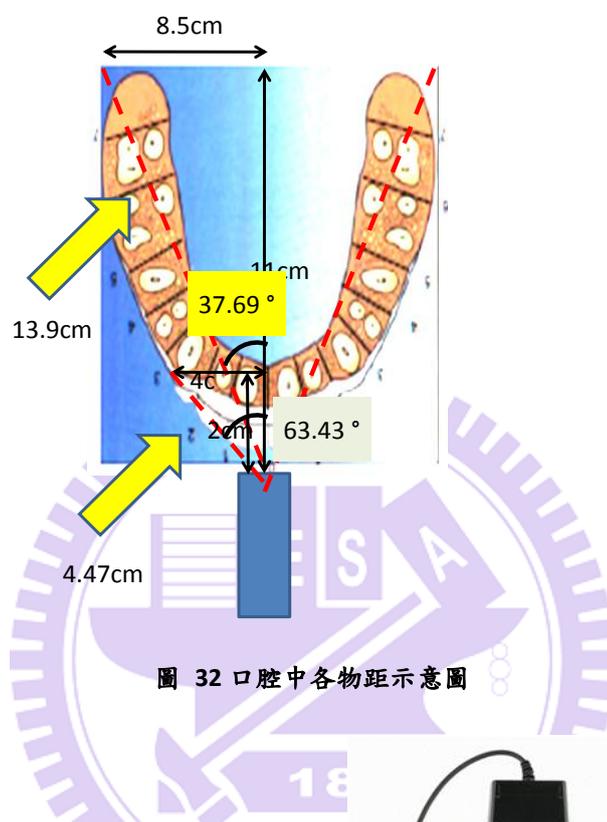


圖 32 口腔中各物距示意圖

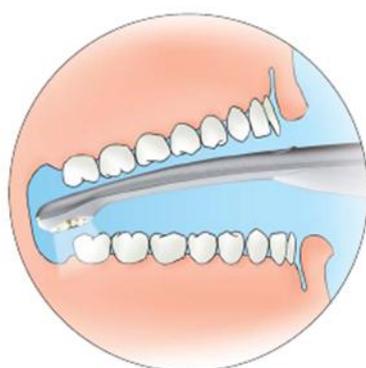


圖 33 傳統的口腔內視鏡(左)與單眼近距離攝影(右)

傳統口腔攝影除了使用口腔內視鏡之外，也有使用單眼相機加上近攝鏡頭來拍攝的，如圖 33 所示。放在口腔外拍攝咽喉的方式，傳統的單眼相機就可以做到。而如

果要強調我們的優勢，應該要把系統深入口腔，這是單眼所辦不到的。因此我設系統最大物距到 110 公厘，也就是整個工作範圍都在口腔裡面。

在決定了最長物距後，我們最小的範圍應該要看到哪裡呢？傳統的口腔內視鏡可以將工作範圍拉到只有 5 公厘到 10 公厘的近距離，方便拍攝牙齒表面的影像。不過我們強調得是廣角，近距離拍攝將會失去廣角鏡的意義，所以我們可以把拍攝距離定義得遠一點。

由 2.1.2 的部分可知，根據美國癌症醫學會的分期法，第一級的腫瘤大小為 2 公分，第二級的大小為 40 公釐以下。既然我們要強調我們的鏡頭是個整體的檢查效果，那腫瘤完整的樣貌與周邊組織得相對關係也必須在我們攝影的範圍內。

我們第二個要考慮的是變形的問題。在光學像差中，「畸變」(Distortion)在大視角中會變得很明顯。這樣的缺陷在醫療器材是不利的。一般來說，畸變在半視角小於 30 度時是比較好控制的，所以我把半視角設定在 30 度。

一個 40 公厘大的腫瘤，在半視角為 30 度時，所需高度為 35 公厘，景深變化估為 30 到 40 公厘 (考量腫瘤厚度)。

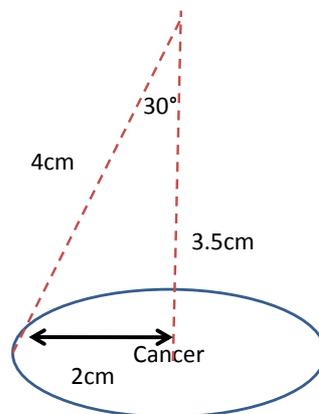


圖 34 腫瘤與所需視野示意圖

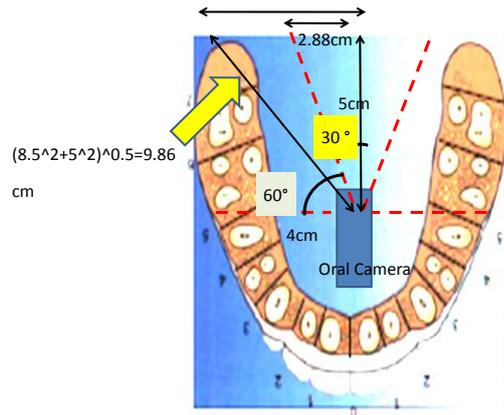


圖 35 口腔視區分佈

口腔兩側的深度變化從 40 到 100 公厘的景深變化，中央的區域(咽喉)則為 50 公厘到 100 公厘的景深變化。

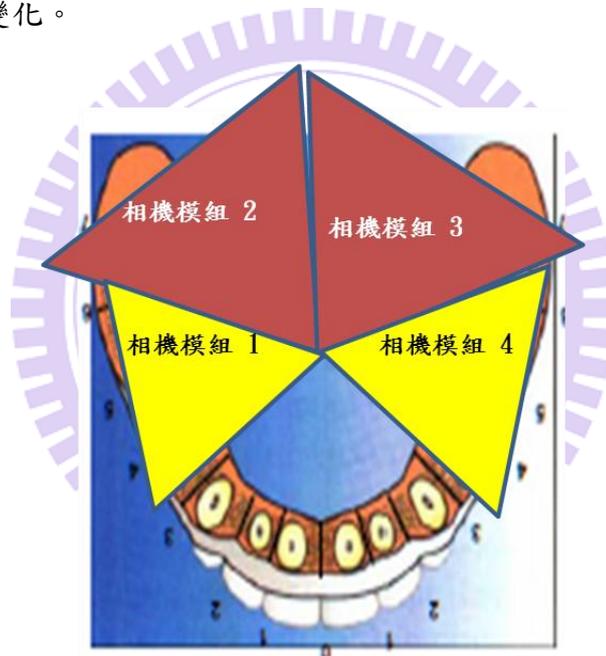
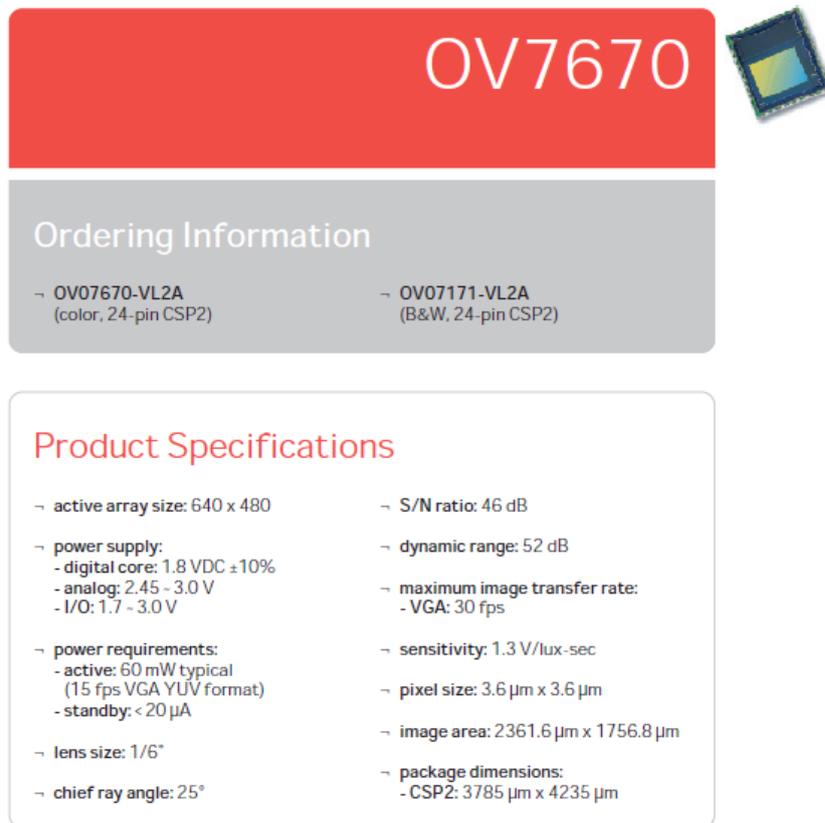


圖 36 口腔內視鏡視野配置

我們對於口腔內視鏡的視野配置如圖 36 所示，相機模組 1、4 分別看口腔兩側的情況，景深範圍 30 到 40 公厘；相機模組 2、3 是看口腔深處的情形，景深範圍是 50 到 100 公厘。相機模組 1 和 4 是對稱的，相機模組 2 和 3 是對稱的，因此我們只需設計相機模組 1 和相機模組 2，而此時口腔內視鏡的視野將超越 180 度！

在物空間被確定後，進行像空間的計算。我們選用目前業界常使用的 1/6 英吋大

小的 VGA 影像原件做為像空間目標。使用的 VGA 為影像元件大廠 Omnivision 的 OV7670。其規格如下：



The image shows a technical specification sheet for the OV7670 camera sensor. It features a red header with the model number 'OV7670' and a small image of the sensor chip. Below the header is a grey box for 'Ordering Information' and a white box for 'Product Specifications'. The specifications are listed in two columns.

### OV7670

**Ordering Information**

- OV07670-VL2A (color, 24-pin CSP2)
- OV07171-VL2A (B&W, 24-pin CSP2)

**Product Specifications**

- active array size: 640 x 480
- S/N ratio: 46 dB
- power supply:
  - digital core: 1.8 VDC  $\pm$ 10%
  - analog: 2.45 - 3.0 V
  - I/O: 1.7 - 3.0 V
- dynamic range: 52 dB
- maximum image transfer rate:
  - VGA: 30 fps
- power requirements:
  - active: 60 mW typical (15 fps VGA YUV format)
  - standby: < 20  $\mu$ A
- sensitivity: 1.3 V/lux-sec
- pixel size: 3.6  $\mu$ m x 3.6  $\mu$ m
- lens size: 1/6"
- image area: 2361.6  $\mu$ m x 1756.8  $\mu$ m
- chief ray angle: 25°
- package dimensions:
  - CSP2: 3785  $\mu$ m x 4235  $\mu$ m

圖 37 OV7670 規格

雖然目前的口腔內視鏡所使用的 VGA 元件都是 1/4 英吋的，但我們想要有更好的解析能力，需要更小的像素大小，所以我選用比較小的感測元件。

在像空間我們必須注意的地方，第一個是 pixel size，Pixel 是感應光線的最小單位，也是系統解吸力的極限。我們每道光線的光斑的最大的大小必須小於他，否則本來是點對點成像的影像會糊掉。但若光學系統的解析力強於影像元件太多，則會型成浪費。

由規格表我們可以知道一個 VGA 像素的大小是 3.6  $\mu$ m x 3.6  $\mu$ m，然而在彩色顯示器計算時，要把每個單位 pixel 的邊長乘以二，也就是要看彩色影像需要四個原來的

單位畫素。所以每個感光的單位畫素面積變為  $7.2 \mu\text{m} \times 7.2 \mu\text{m}$ 。

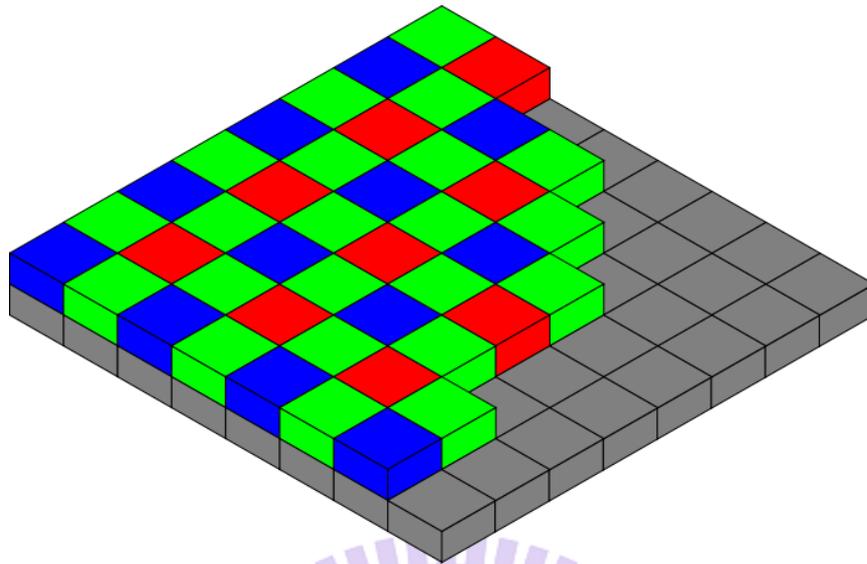


圖 38 彩色 CCD Sensor 示意圖

# OV7710



**ordering information**

<ul style="list-style-type: none"> <li>■ OV07710-C00A (color, CLCC-48)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ OV07211-C00A (b&amp;w, CLCC-48)</li> </ul>
---	---

**product specifications**

<ul style="list-style-type: none"> <li>■ array size: 656 x 492</li> <li>■ power supply analog: 3.3VDC <math>\pm</math> 10%</li> <li>■ power requirements active: 140 mW typical (30 fps VGA, YUV) standby: TBD</li> <li>■ output format 10-bit raw data 8-bit YUV/RGB</li> <li>■ max image transferrate VGA: 30 fps QVGA: 60 fps</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ minimum illumination (B000K): 0.04 Lux @ f/1.2</li> <li>■ S/N ratio: 50 dB</li> <li>■ dynamic range: 53 dB</li> <li>■ scan mode: progressive</li> <li>■ electronic exposure: up to 521:1 (for selected fps)</li> <li>■ pixel size: 6.0 <math>\mu\text{m}</math> x 6.0 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>■ fixed pattern noise: &lt; 0.03% of <math>V_{\text{max-to-max}}</math></li> <li>■ image area: 4.080 mm x 3.102 mm</li> <li>■ package dimensions: 14.22 mm x 14.22 mm</li> <li>■ temperature range: -40/+105 °C in CLCC</li> </ul>
---	---

圖 39 1/4"VGA 規格表

過去口腔內視鏡常使用的 VGA 是 1/4" 的，每個單位像素大小為  $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ ，

也就是在彩色功能下每個像素大小為  $12\ \mu\text{m}\times 12\ \mu\text{m}$ 。因為我們使用的 1/6" 的感光元件像素較小，所以我們預期它的分辨力較過去得好。

在規格定義完成後，我們要開始檢驗這個規格合不合理。

首先，計算焦距。我們的物距是 30 公厘到 40 公厘，半視角 30 度，所以目標物高是 17.32 公厘到 23 公厘。像高是 1/6 英吋。通常影像元件的尺寸大小是用它的對角線長度來表示，而我們在設計鏡頭時也以對角線長度為像高。雖然這樣看來我們的成像範圍會大於影像元件，但這樣才能完全利用到整片感光元件，避免畫面上出現圓形的邊界。而在製造時這種設計也對公差有利，把視野縮小容易，但若視野在加工時因為失誤變小，由小變大修正是很困難的。

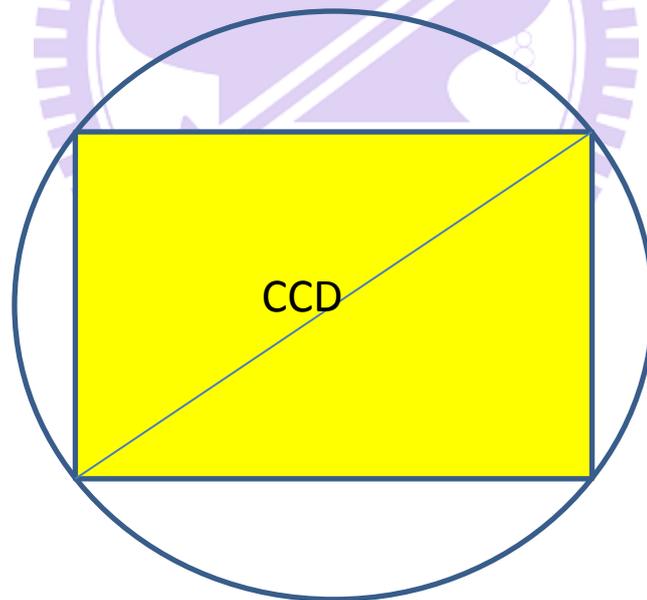


圖 40 影像元件大小示意圖

一英吋為 2.54 公分，所以半徑為  $2.54/6/2=0.21$  公分=2.1 公厘。我們在本設計中不打算使用自動對焦設計，所有的鏡頭組裝都是固定的。因此，我們希望鏡頭的景深變化可以涵蓋這個區域。

所謂景深，代表鏡頭在對焦區域前後，仍可符合「清晰成像」的範圍。雖然鏡頭未對教在該點，但仍可得可接受的像。在景深範圍外的物體，其影像則變得模糊，無法接受，如圖 41 所示。

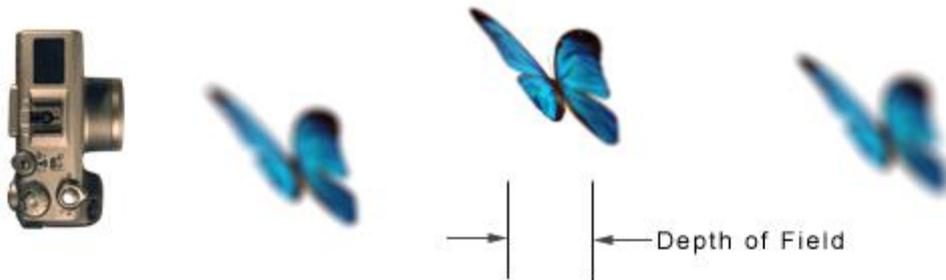


圖 41 景深示意圖

景深計算公式如下：

$$\begin{cases} D_N = \frac{HS_0}{H+S_0} \\ D_F = \frac{HS_0}{H-S_0} \end{cases} \quad (14)$$

$D_N$  為前景深， $D_F$  為後景深， $S_0$  為對焦的距離

$$H = \frac{f^2}{Nc} \quad (15)$$

$f$  為鏡頭焦距， $N$  為  $f/\#$ ， $c$  為焦點模糊大小。

焦距的估算，我們將系統對焦在 35 公厘處，所以  $S_0 = 35\text{mm}$ 。此時物高為

$$35 \times \tan(30^\circ) = 20.2\text{mm} ;$$

$$\text{放大率為 } M = \frac{2.1}{20.2} \cong 0.1036 = \frac{\text{像距}}{\text{物距}}$$

然後用一次光學公式估算：

$$\frac{1}{\text{物距}} + \frac{1}{\text{像距}} = \frac{1}{\text{焦距}} \quad (16)$$

$$\frac{1}{35} + \frac{1}{35 \times 0.1036} = \frac{1}{f}; f = 3.3\text{mm} \quad (17)$$

我們的模糊呈度最大為一個像素大，也就是  $7.2 \mu\text{m} \times 7.2 \mu\text{m}$ 。

F-Number 的公式是：

$$F - \text{Number} = \text{焦距}/\text{光圈直徑} \quad (18)$$

光圈開孔越小影像越好，但若太小又接近針孔了，光圈最小大小設為 1mm。

$$F - \text{Number} = \frac{3.3\text{mm}}{1\text{mm}} = 3.3$$

介於在光學系統中常用的 F-Number 值：F3.5、F2.8 之間，為了日後加工方便我們選用 F2.8 為計算目標。

### 3.1.1 景深估計：

$$H = \frac{(3.295 \times 10^{-3})^2}{2.8 \times 7.2 \times 10^{-6}} = 0.538543 \quad (19)$$

$$\begin{cases} D_N = \frac{HS_0}{H+S_0} = \frac{0.538543 \times 3.5 \times 10^{-2}}{0.538543 + 3.5 \times 10^{-2}} = 0.032864 = 32.86\text{mm} \\ D_F = \frac{HS_0}{H-S_0} = \frac{0.538543 \times 3.5 \times 10^{-2}}{0.538543 - 3.5 \times 10^{-2}} = 0.037443\text{m} = 37.34\text{mm} \end{cases} \quad (20)$$

景深範圍並未如我們所期望的，可以涵蓋 3cm~4cm 的範圍。但若以傳統的 1/4 英吋影像元件的像素大小  $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$  來計算景深

$$H = \frac{(3.295 \times 10^{-3})^2}{2.8 \times 12 \times 10^{-6}} = 0.323126 \quad (21)$$

$$\begin{cases} D_N = \frac{HS_0}{H+S_0} = \frac{0.323126 \times 3.5 \times 10^{-2}}{0.323126 + 3.5 \times 10^{-2}} = 0.031579 = 31.58\text{mm} \\ D_F = \frac{HS_0}{H-S_0} = \frac{0.323126 \times 3.5 \times 10^{-2}}{0.323126 - 3.5 \times 10^{-2}} = 0.039252\text{m} = 39.25\text{mm} \end{cases} \quad (22)$$

這樣的解析度雖然比我們期望的差，但已和目前所販售的版本解析度相同，所以仍是可接受的範圍。也就是說，我們預計對焦的地方是在 35 公厘處，但是在實際操作中人的手可能會有晃動，影像在 40 公厘和 30 公厘的地方雖然不若 35 公厘處清楚，

但仍是接受的範圍。

同時我們經由非球面鏡片等技巧，可以繼續提升解析度，會比一階計算的結果還要好，因此我們認為這個規格是可以做的。

第二個我們要估算的是從 100 公厘到 60 公厘的景深規格。對焦位置設定在 75 公厘處。

$$75 \times \tan(30^\circ) = 43.3\text{cm} ; \text{放大率為 } M = \frac{2.1}{43.3} \cong 0.0485 = \frac{\text{像距}}{\text{物距}}$$

$$\frac{1}{75} + \frac{1}{75 \times 0.0485} = \frac{1}{f} ; f = 3.469\text{mm} = 3.47\text{mm} \quad (23)$$

F-Number 計算：

$$F - \text{Number} = \frac{3.47}{1} = 3.47 \cong 3.5 \quad (24)$$

但同樣為了加工方便以 F2.8 來設計。

$$H = \frac{(3.469 \times 10^{-3})^2}{2.8 \times 7.2 \times 10^{-6}} = 0.358154 \quad (25)$$

$$\begin{cases} D_N = \frac{HS_0}{H+S_0} = \frac{0.358154 \times 7.5 \times 10^{-2}}{0.358154 + 7.5 \times 10^{-2}} = 0.062014\text{m} = 62.01\text{mm} \\ D_F = \frac{HS_0}{H-S_0} = \frac{0.358154 \times 7.5 \times 10^{-2}}{0.358154 - 7.5 \times 10^{-2}} = 0.094866\text{m} = 94.87\text{mm} \end{cases} \quad (26)$$

同樣的，景深計算依舊沒辦法涵蓋全部的區域，所以我們退一步來看，如果這些沒辦法涵蓋得區域解析度仍能保有市售系統的解析度，那還是具有競爭力的。

$$H = \frac{(3.469 \times 10^{-3})^2}{2.8 \times 12 \times 10^{-6}} = 0.288198 \quad (27)$$

$$\begin{cases} D_N = \frac{HS_0}{H+S_0} = \frac{0.288198 \times 7.5 \times 10^{-2}}{0.288198 + 7.5 \times 10^{-2}} = 0.062168\text{m} = 62.17\text{mm} \\ D_F = \frac{HS_0}{H-S_0} = \frac{0.288198 \times 7.5 \times 10^{-2}}{0.288198 - 7.5 \times 10^{-2}} = 0.11074\text{m} = 11.07\text{mm} \end{cases} \quad (28)$$

所以，這顆鏡頭可以涵蓋 60 公厘到 110 公厘的景深，它在景深兩端的解析能力最差也和過去的設計最好的解析能力一樣，因此我認為這個規格也是具有競爭力的。

在光學設計上，評斷鏡頭好壞的另一個標準是鏡片的數量。鏡片越少系統成本越低。目前市面上的 VGA 相機模組的鏡頭，大多是用兩片鏡片組成。因此我們以兩片鏡片來設計這個鏡頭。

鏡片的材料選擇上，塑膠鏡片雖有廉價和生產容易的特點，但是塑膠鏡片易受環境影響，而且在口腔中也需要防止霧氣的鍍膜，所以選用玻璃材料會比較好。因為有用到非球面，所以要使用模造玻璃製成。

玻璃的材料選用 BK-7，這是最常見的玻璃材料，折射率  $n=1.5168$ ， $V_d=64.2$ ，屬冕牌玻璃。

第二片鏡片選用壓克力材質(polycarbonate, PC)，這是常用在監視器的光學材料，對溫度敏感度較低，加工技術成熟， $n=1.6142$ ， $V_d=26$ 。

### 3.1.2 MTF 計算：

MTF 值的單位是：line pair/mm。分辨力最強是 1，最差是 0。人眼在 MTF 值大於

0.2 時都可以判讀出是兩條線。鏡頭的最高解析度以影像元件的像素大小計算，每個彩色像素大小是  $7.2\ \mu\text{m}$ ，要表達一黑一白的線段組合要用兩個像素，所以 MTF 判別力為  $\frac{1\text{mm}}{7.2\ \mu\text{m} \times 2} = 69.44\ \text{lp/mm} \approx 70\ \text{lp/mm}$ 。所以鏡頭在  $70\ \text{lp/mm}$  的地方 MTF 要大於 0.2。

### 3.2 設計起始

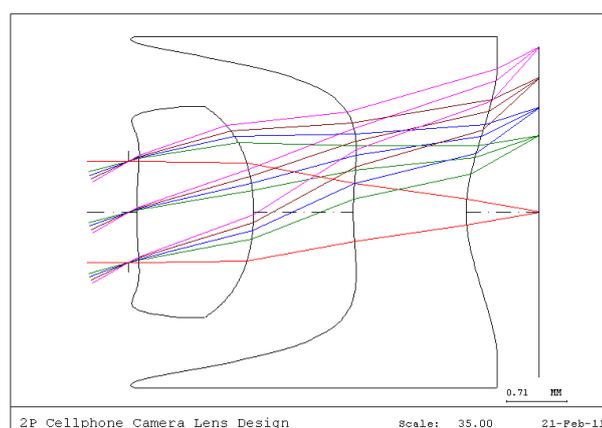


圖 42 1/6 英寸 VGA 手機鏡頭模組

這是一個也是給 1/6 英寸 CCD 使用的照相機鏡頭，總視角也是  $60^\circ$ 。但他所設計的物品是在無限遠的地方，因此我們要將它用在口腔內視鏡中需要做一些修改。以下是這顆鏡頭的資料：

表 3 原始規格參數

規格	參數
視角(Field of View)	$60^\circ$
焦距(Effective Focal Length)	3.44mm
MTF(Modulation Transfer Function)	$100\ \text{lp/mm} > 0.2$ at View Angle= $30^\circ$
畸變(Distortion)	$<1\%$

像素大小(Pixel Size)	7.2 $\mu$ m X 7.2 $\mu$ m
鏡片	N-BK7(前)、PC(後)

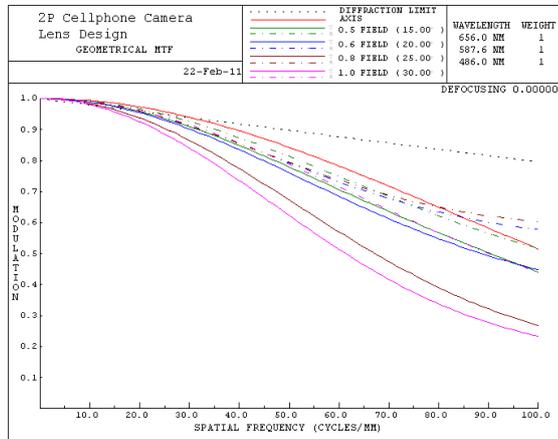


圖 43 MTF

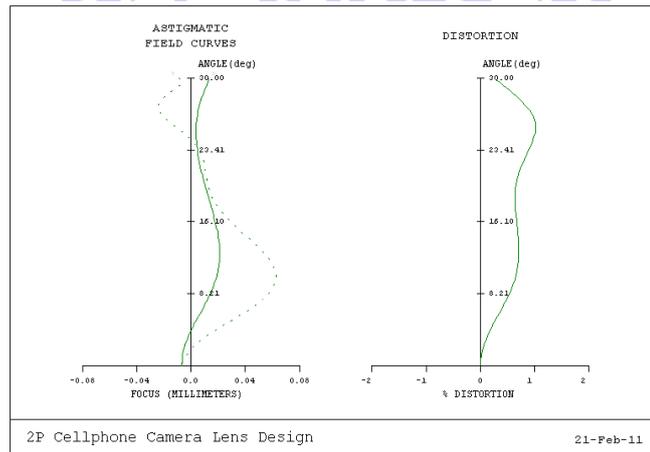


圖 44 畸變與角度關係示意圖

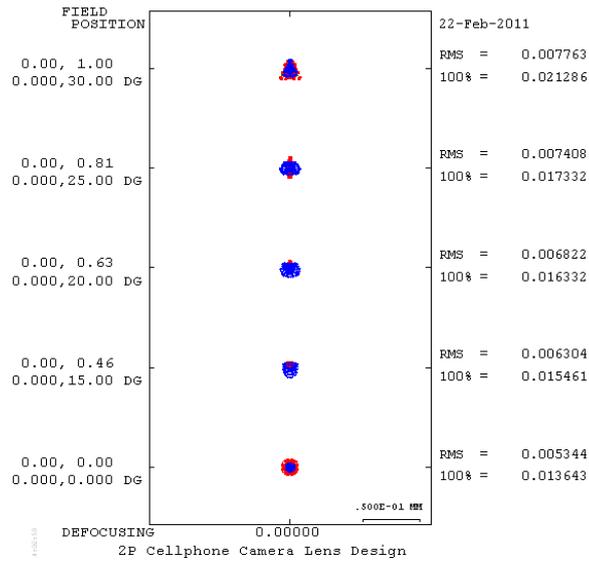


圖 45 光斑大小

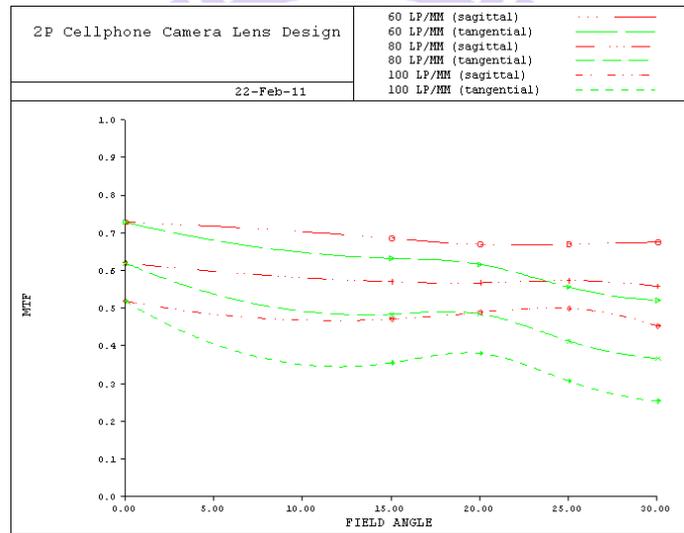


圖 46 MTF V.S 視野 (60、80、100) lp/mm

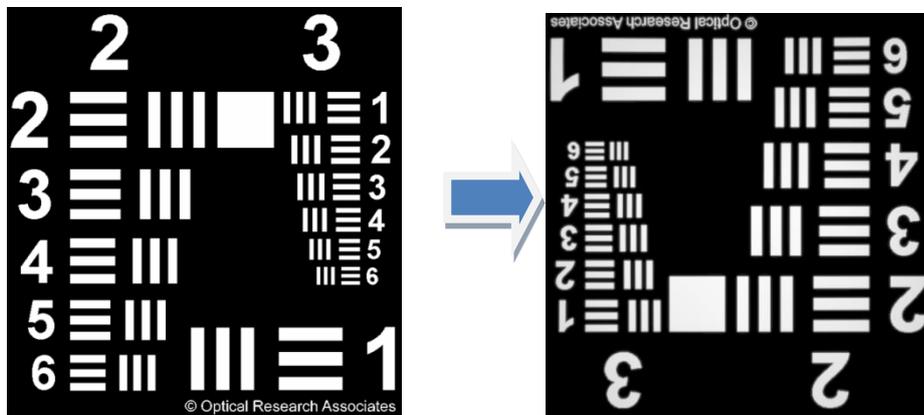


圖 47 Code V 軟體內建的影像模擬(Image Simulation)功能

我們選用的軟體是 Optical Research Associates 的 Code V 10.2 版進行設計模擬。最後的 Image Simulation 是將模擬物體通過鏡頭後呈現的影像。以此判斷成像是否符合我們的期待。

這個鏡頭的焦距和我們設計的景深 30 公厘到 40 公厘的鏡頭接近，而且感光元件的大小也一樣，因此以這個設計來進行修改起始。

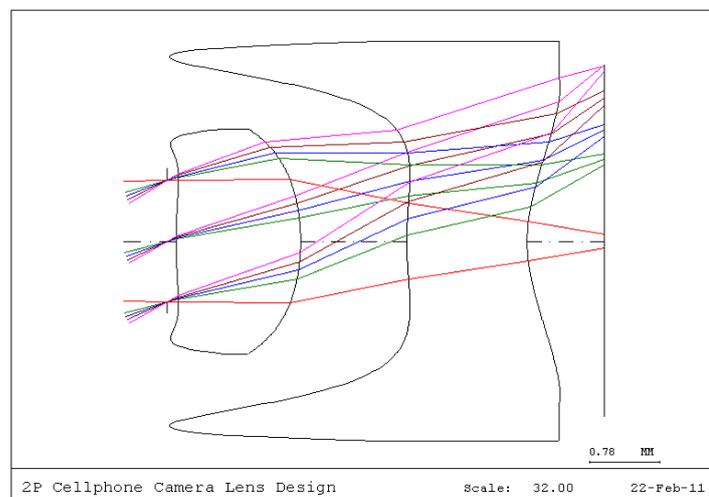


圖 48 改變物距後影像品質下降

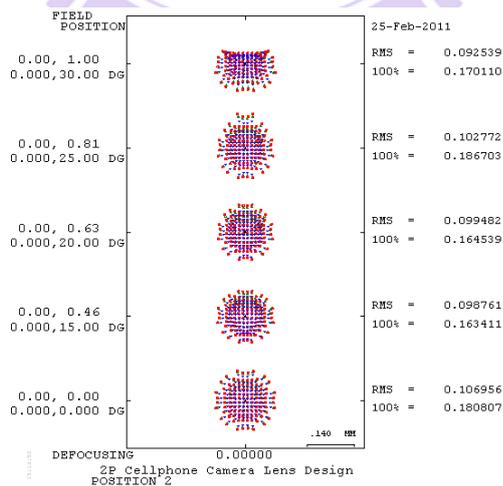


圖 49 物距 35 公厘時的光斑大小

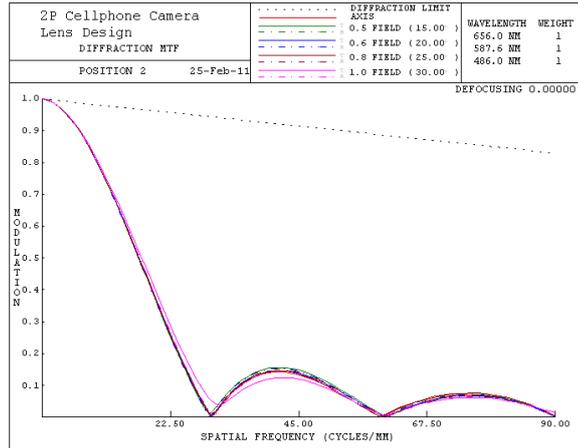


圖 50 物距 35 公厘時的 MTF

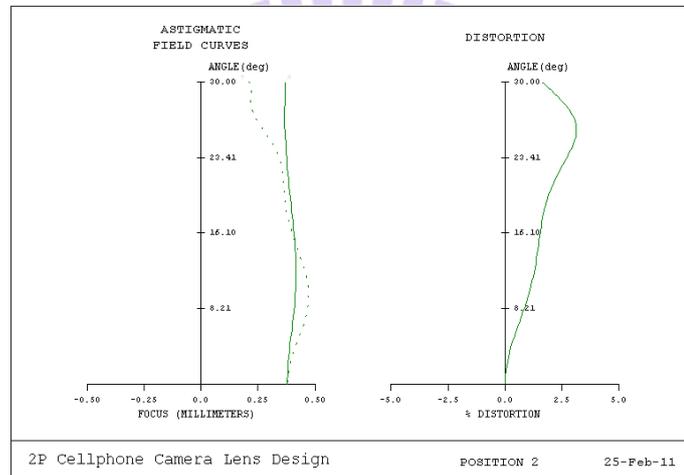


圖 51 物距 3.5 公分時的畸變量

當我們把物距改到 40 公厘時，我們可以看到成像的品質下降很多。我們要開始對這個鏡頭進行優化。

優化：

鏡頭不理想的地方：

1. MTF 下降太多，解析力不足，光斑散布範圍很大，不集中。
2. 畸變變大，造成影像變形

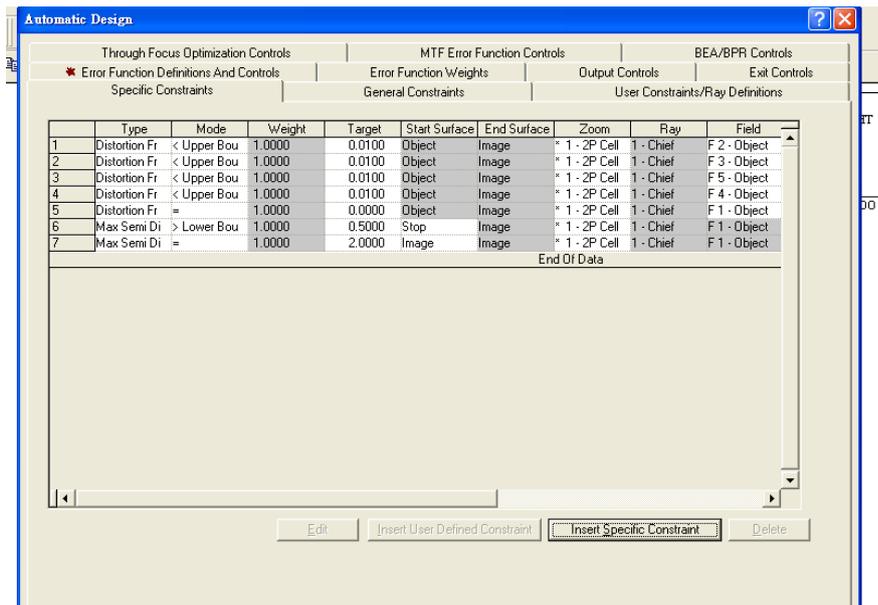


圖 52 Code V 的優化選單介面

我們在 Code V 的優化選項裡設定優化的目標，如圖 52 Code V 的優化選單介面圖 52 所示。原來鏡頭的透鏡是由許多非球面係數所構成的，所以有奇特的形狀。非球面並不影響透鏡的焦距，但是他可以改變透鏡的形狀，彌補邊緣光線的光程差問題。

優化的過程是交給電腦進行計算的，由電腦調整你所給予的變數，如透鏡曲率、厚度、非球面細數等等，找出成像品質最好的結果。但若完全讓電腦自己算，那可能我們所要求的一些條件會偏離。所以我們在讓電腦計算時還要加上一些限制條件。

1. 畸變限制在 1% 以下，在此範圍內人眼的不會覺得有明顯的變形。
2. 像平面大小固定，因為優化軟體常常會有越優化像平面越縮小的現象。
3. 有效焦距固定。F-Number 和有效焦距可以限制光圈的大小，不然軟體會有把光圈縮成針孔的傾向，導致進光亮不足。光圈最小的直徑需大於 1 公厘，否則會變成針孔相機，造成成像過暗。

在優化時應該設什麼為變數呢？透鏡的曲率和厚度必須改變，因為焦距不對，所以第一個要調整焦距。非球面係數必須改變，因為原先的非球面係數是要修正從無線遠處來的邊緣光，因此在近距離的時候必須重新調整。

我們將曲率、厚度、還有非球面係數都加入進行優化，並以條件限制之。其結果如下：

### 3.2.1 景深範圍為 30 到 40 公厘的相機模組 1 的優化結果：

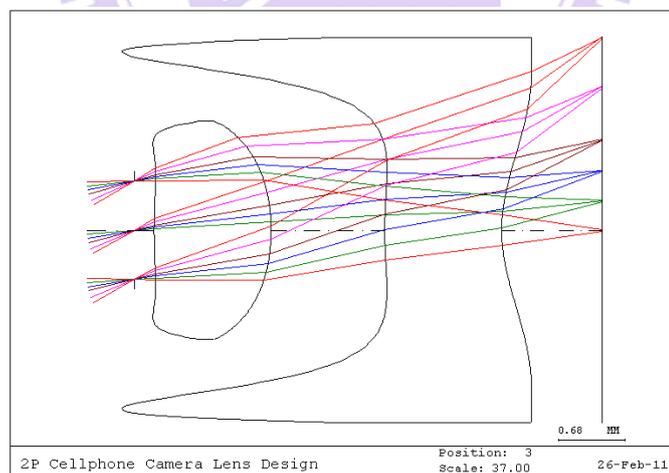


圖 53 相機模組 1 於物距 35 公厘聚焦情形

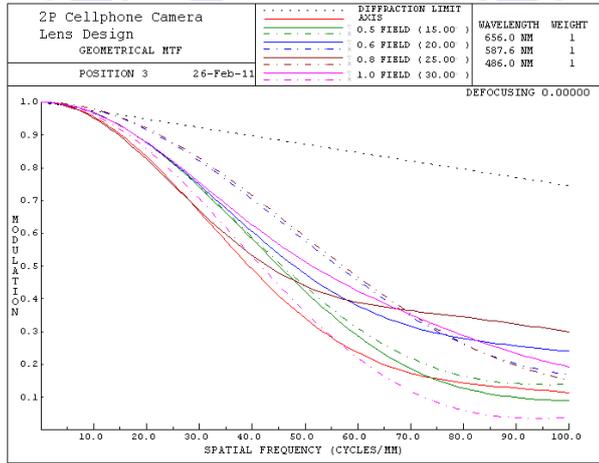
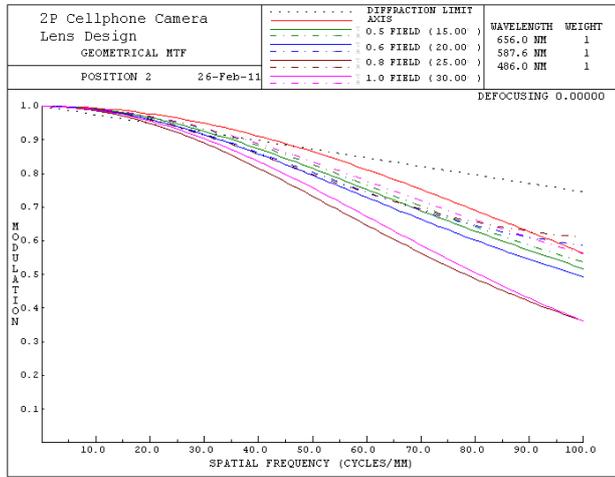
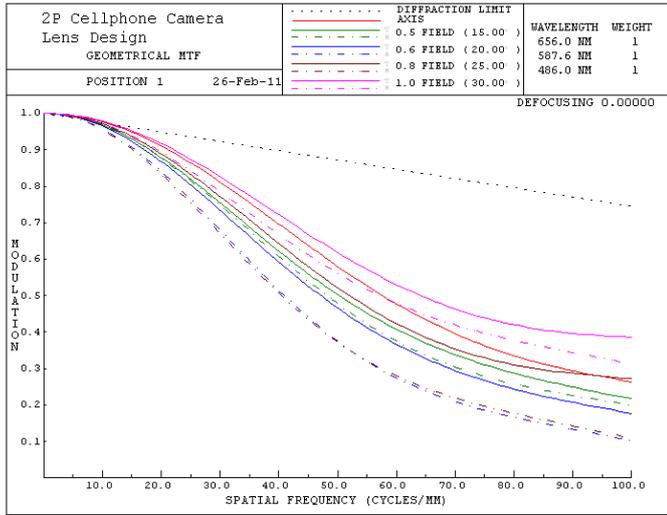
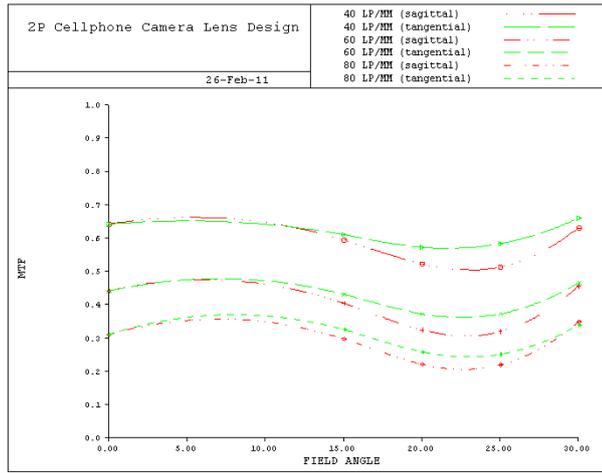
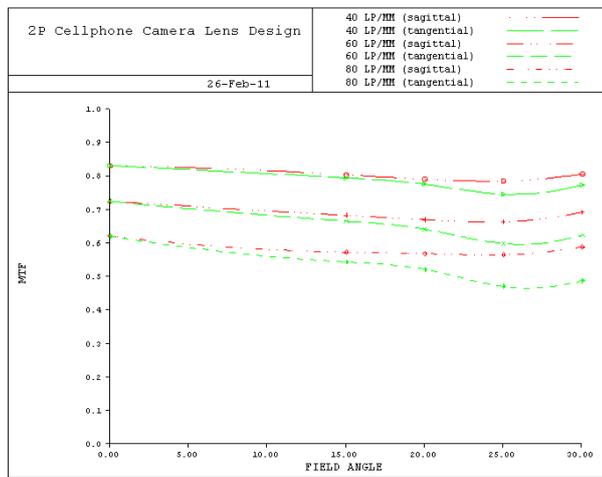


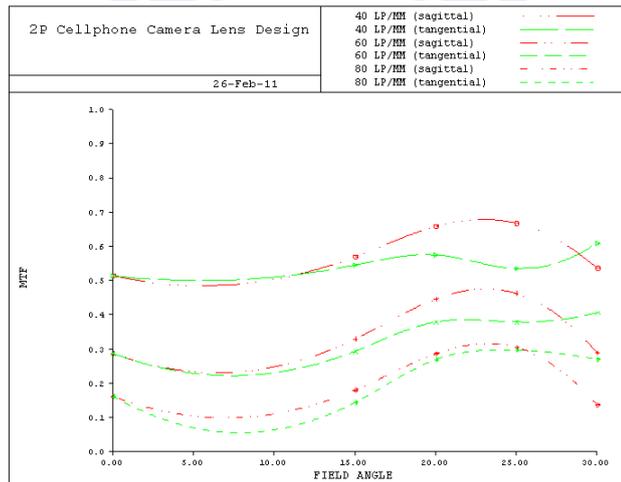
圖 54 物距為 40 公厘、35 公厘、30 公厘的 MTF 圖



(a)



(b)



(c)

圖 55 物距(a)40、(b)35、(c)30 公厘處 MTF 和視角作圖

在 MTF 和視角作圖上來看，80 lp/mm 的解析度在物距為 40 公厘和 35 公厘時，從零度到 30 度的視角都高於 0.2，也就是那些細節都在人眼可以分辨的範圍內。但在物距 30 公厘的情況下則低於 0.2，比較不理想，但是 60 lp/mm 則高於 0.2，因此還是可以達到市售 1/4 英吋影像元件產品的解析度。

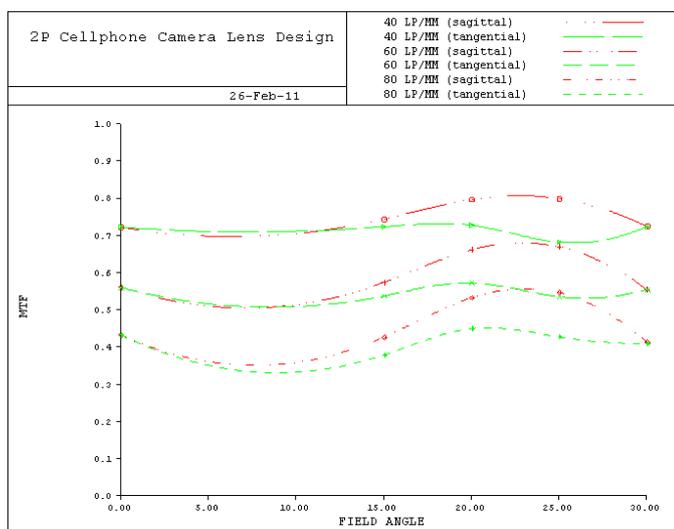


圖 56 物距為 32 公厘的 MTF 和視角作圖

我們可以看到在物距為 32 公厘時 80 lp/mm 在大部分的視角都高於 0.2。2mm 的差距就手持系統是很小的，所以影像可以透過手的微幅的移動進行調整。

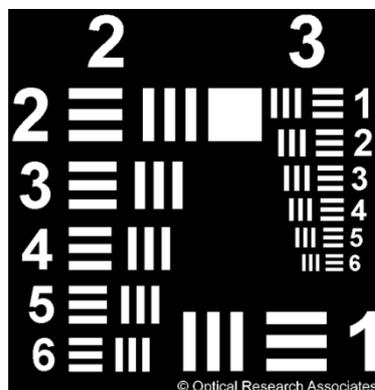


圖 57 影像模擬測試物

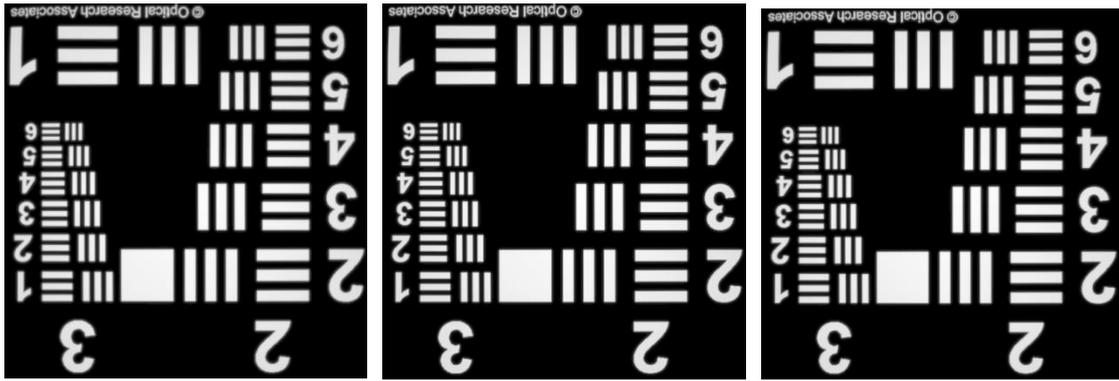


圖 58 影像模擬結果：物距為 40、35、30 公厘

目前畸變都控制在 1% 以下，只有邊緣變形情況稍微明顯。

表 4 相機模組 1 鏡頭參數

名稱	規格
系統大小	3.75mm(長)×4.06mm(高)
焦距(EFL)	3.16mm
鏡片組成	NBK-7 (第一片) PC (第二片)
感光元件大小	1/6"
有效物距	40mm~30mm

### 3.2.2 景深範圍為 60 公厘到 110 公厘的相機模組 2 優化結果：

相機模組 2 要設計的，是景深範圍從 60 公厘到 110 公厘的設計，我們依舊選用之前那個手機鏡頭來做修改。

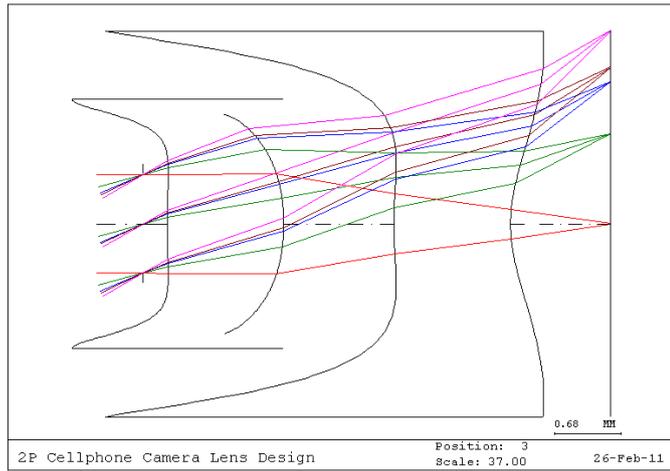
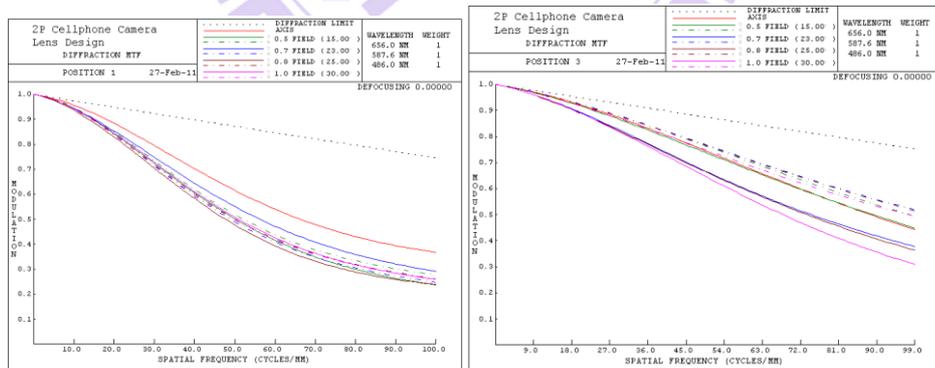


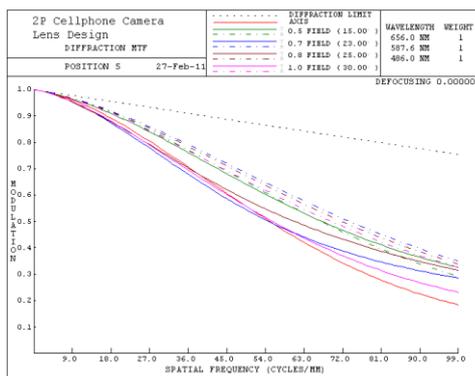
圖 59 相機模組 2 在物距為 75 公厘時對焦情形

優化限制條件與相機模組 1 的設計相同，以低變形量(distortion< 1%)和影像元件大小(image circle radius=2mm)為限制，改變鏡頭曲率、厚度、和非球面參數進行優化調整。

在軟體重新計算過後的結果如上圖所示，其結果如下：

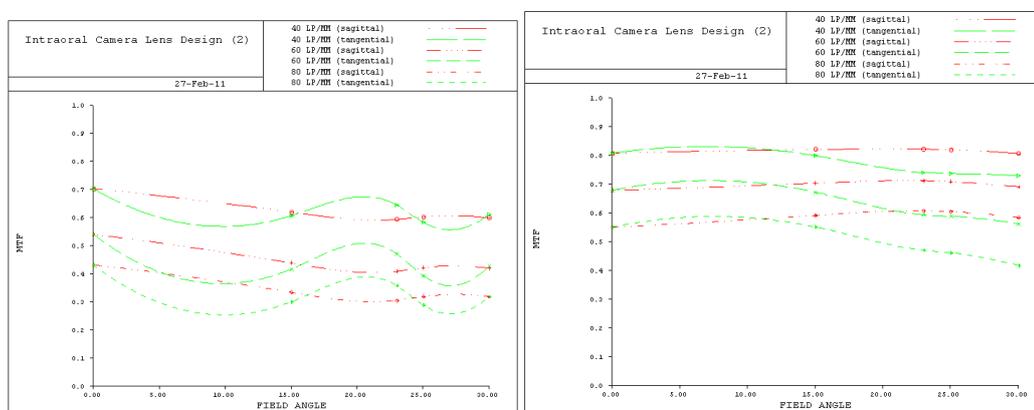


(2)

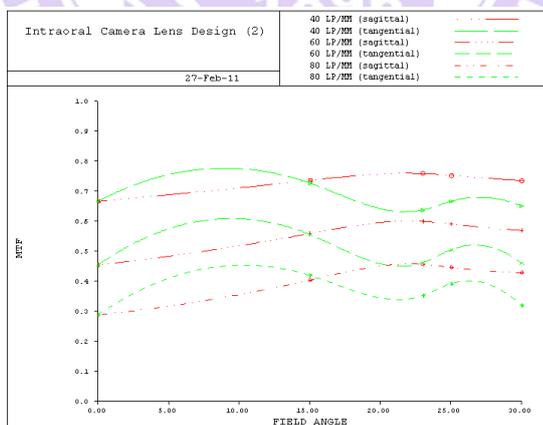


(3)

圖 60 物距為(1)110、(2)75、(3)60 公厘處時的 MTF 圖



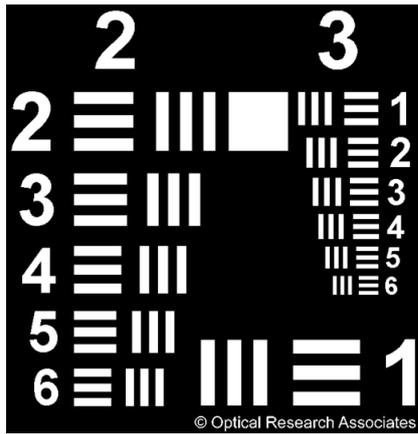
(b)



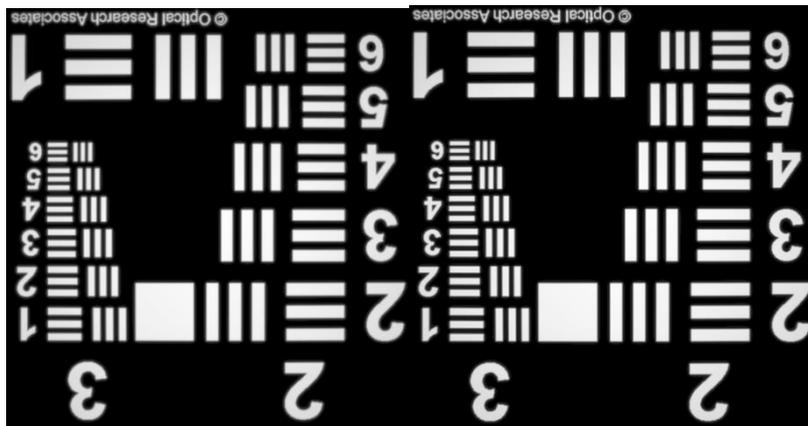
(c)

圖 61 (a)80、(b)60、(c)40 lp/mm 的 MTF 強度與各視角關係圖

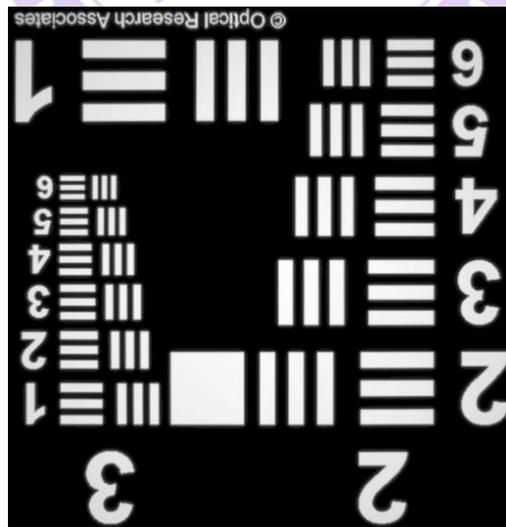
在物距為 60 公厘、75 公厘和 110 公厘處，80 lp/mm 的 MTF 強度都大於 0.2，所以都是在可分辨的範圍內。



影像模擬測試物



(b)



(c)

圖 62 物距為(a)110、(b)75、(c)60 公厘的模擬影像

模擬影像的結果(a)、(b)、(c)顯示物體的畸變程度很低。

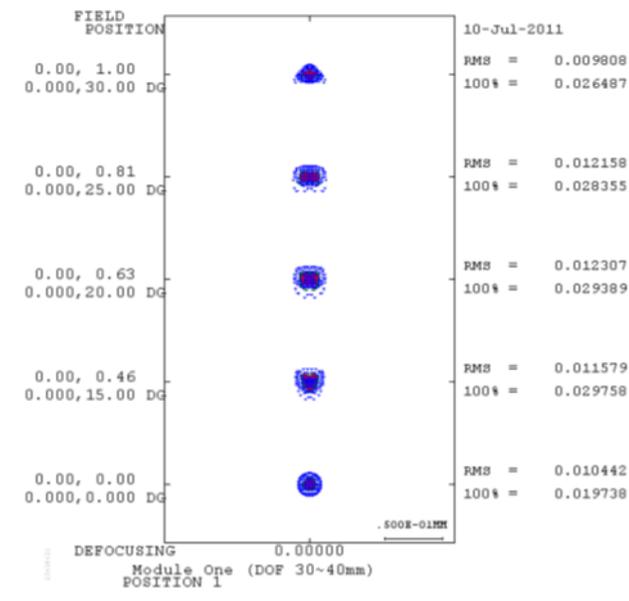
表 5 相機模組 2 鏡頭參數

名稱	規格
系統大小	3.87mm(長)×2.10mm(高)
焦距(EFL)	3.66mm
鏡片組成	NBK-7 (第一片) PC (第二片)
感光元件大小	1/6"
景深	110mm~60mm

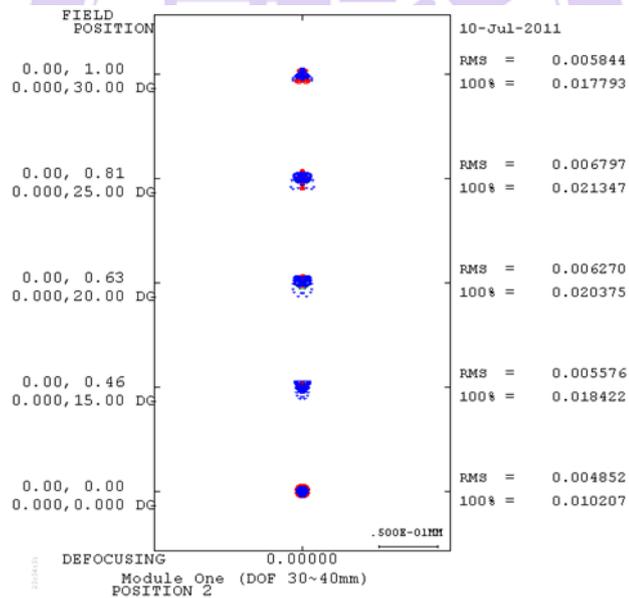
### 3.2.3 相機模組 1 與模組 2 討論：

將設計結果與先前理論計算的景深進行比較。景深計算的結果是鏡頭模組 1 的景深範圍是 30~40 公厘，在 30 公厘 和 40 公厘處，光斑大小無法滿足 1/6 英吋影像元件的畫素大小，但可以和市售產品所裝置的 1/4 英吋影像元件的畫素大小相同，因此我們說這個設計在物距為 30 和 40 公厘時仍是能用的。

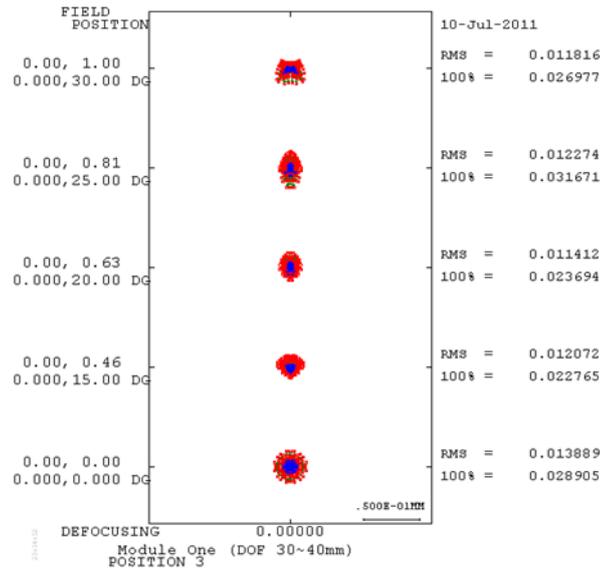
模擬結果如下：



(1)



(2)



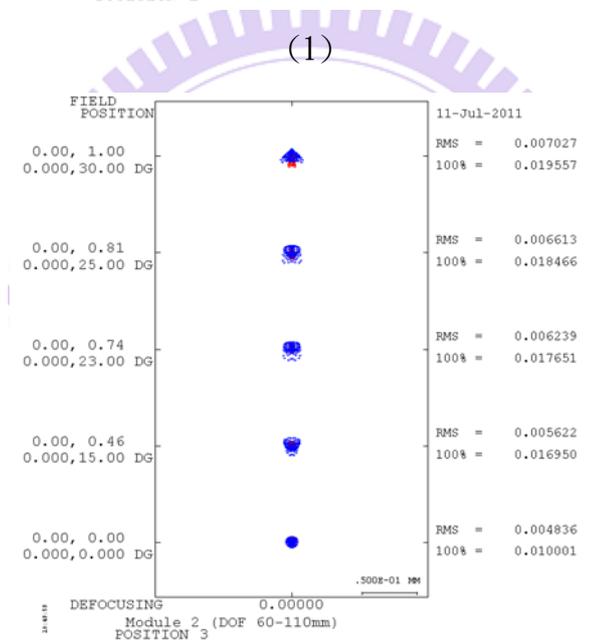
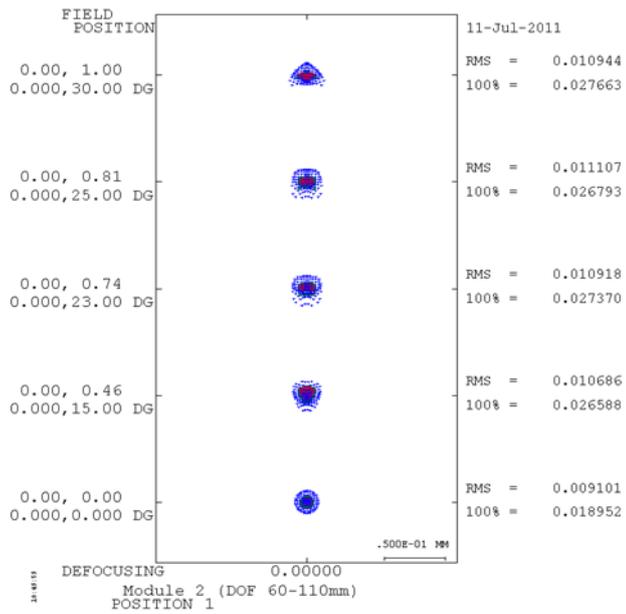
(3)

圖 63 相機模組 1 各物距光斑散佈情形

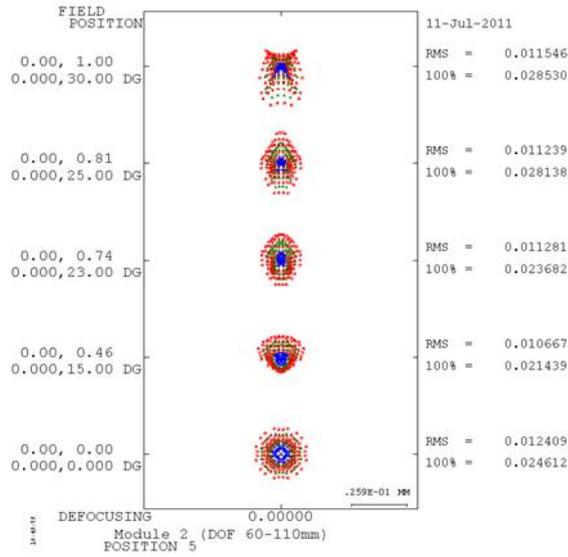
(1)物距 30 公厘(2)物距 35 公厘(3)物距 40 公厘

由圖 63 可以看出，在景深兩端，物距為 30 公厘和 40 公厘時，影像的光斑散佈面積的 RMS (方均根)大小是小於 1/4 英吋影像元件的畫素大小的( $12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$ )，但因為仍有離軸像差的關係，整體散佈的範圍是較大的，這也是我們在以一階光學成像公式進行估算時所無法估計的。但是在使用非球面估計下整體能量仍是集中在我們希望的範圍內。

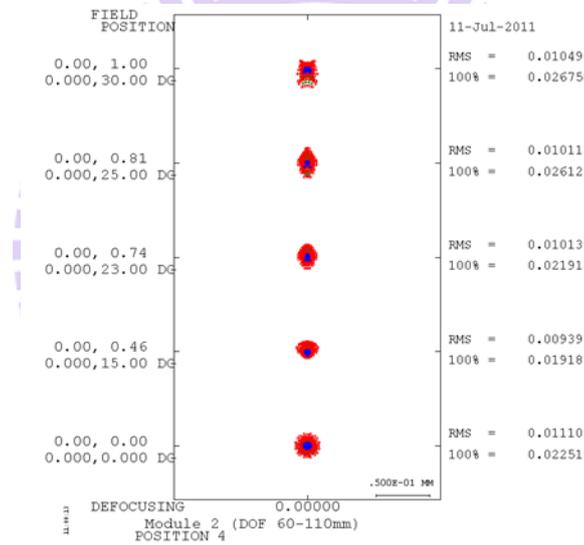
而在對焦位置，也就是物距 35 公厘時，光斑大小是小於 1/6 英吋影像元件的畫素大小的，所以是可以滿足該元件的成像需求的。



(2)



(3)



(4)

圖 64 相機模組 2 各物距光斑散佈情形

(1) 物距 110 公厘 (2) 物距 85 公厘 (3) 物距 60 公厘 (4) 物距 62 公厘

在相機模組 2 的景深估計中，在景深範圍兩端，也就是物距是 110 公厘和 60 公厘處，光斑的能量集中的方均根範圍(RMS)也是小於 1/4 英吋影像元件的畫素大小 ( $12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$ )。而在對焦位置，也就是物距為 85 公厘處，光斑大小則滿足 1/6 英吋影像元件的畫素大小 ( $7.2\mu\text{m} \times 7.2\mu\text{m}$ )。

從圖 64 可以看出，光斑散佈情況在物距為 60 公厘時是較分散的，但若我們將物距改為 62 公厘，則光斑會明顯集中的多。我認為兩公厘的誤差對於一個手持系統來說是可以接受的。

同時，我們也從 Code V 內建的像差分析程式來分析球面像差、彗差、像散、色差、和場曲。其結果如表 6 和表 7 所示。其所造成的綜合影響可以從 Code V 內建的影像模擬功能看出，對畫質的影響是在可接受的範圍內的。

以下是對於相機模組 1 和 2 的結論：

1. 符合景深計算公式所預期的。雖然在景深的兩端(相機模組 1 的 30 公厘和 40 公厘處，相機模組 2 的 60 公厘處)是未能滿足 1/6 英吋 VGA 影像元件的畫素大小，但仍小於市售產品的 1/4 英吋 VGA 影像元件的畫素大小，因此仍具有競爭力。
2. 畸變量低。雖然相機模組 1 在邊緣畸變量較大，但在中心部分的畸變量是小於 1% 的。相機模組 2 的畸變量則是在所有視野內都小於 1%。這對於醫學上的判讀有很大的助益。
3. 從影像模擬結果來看，整體的成像品質是可接受且可判讀的。這也代表其像差的綜合影響結果是在可接受的範圍內。

由以上結果我認為這兩個優化結果是合理的。但在實際生產前，必須經過公差分析的計算，以理解這個鏡頭是否加工過於困難。

表 6、相機模組 1 詳細規格

名稱	規格
系統規格：	

系統大小	3.75mm(長)×4.06mm(高)
焦距(EFL)	3.16mm
鏡片組成	NBK-7 (第一片) PC (第二片)
感光元件大小	1/6"
有效物距	40mm~30mm
<b>影像參數：</b>	
MTF(> 0.2)	物距 40 公厘：90 lp/mm 物距 35 公厘：150 lp/mm 物距 30 公厘：72 lp/mm
畸變(Distortion)	<b>視角 30 度時：</b> 物距 40 公厘：-0.0010 物距 35 公厘：-0.0003 物距 30 公厘：-0.0002
球面像差(Spherical Aberration)	物距 40 公厘：-0.04 物距 35 公厘：-0.04 物距 30 公厘：-0.04
慧差(Coma)	物距 40 公厘：0.11 物距 35 公厘：0.12 物距 30 公厘：0.13
像散(Astigmatism)	<b>縱向：</b> 物距 40 公厘：0.33 物距 35 公厘：0.34 物距 30 公厘：0.36 <b>橫向：</b> 物距 40 公厘：0.09 物距 35 公厘：0.09 物距 30 公厘：0.10
色差(Chromatic Aberration)	物距 40 公厘：-0.007 物距 35 公厘：-0.007 物距 30 公厘：-0.007
場曲	物距 40 公厘：-0.10 物距 35 公厘：-0.10% 物距 30 公厘：-0.10%

表 7、相機模組 2 詳細規格

名稱	規格
<b>系統規格：</b>	
系統大小	3.8714mm(長)×2.1mm(高)
焦距(EFL)	3.66mm
鏡片組成	NBK-7 (第一片) PC (第二片)
感光元件大小	1/6"
景深	110mm~60mm
<b>影像參數：</b>	
MTF(> 0.2)	物距 110 公厘：90 lp/mm 物距 75 公厘：150 lp/mm 物距 60 公厘：72 lp/mm
畸變(Distortion, %)	<b>視角 30 度：</b> 物距 110 公厘：-0.1% 物距 75 公厘：-0.03% 物距 60 公厘：-0.02%
球面像差(Spherical Aberration)	物距 110 公厘：-0.04 物距 75 公厘：-0.04 物距 60 公厘：-0.04
慧差(Coma)	物距 110 公厘：0.01 物距 75 公厘：0.01 物距 60 公厘：0.01
像散(Astigmatism)	<b>縱向：</b> 物距 110 公厘：0.05 物距 35 公厘：0.05 物距 30 公厘：0.05 <b>橫向：</b> 物距 40 公厘：0.00042

	物距 35 公厘：0.00045 物距 30 公厘：0.0005
色差(Chromatic Aberration)	物距 40 公厘：-0.01 物距 35 公厘：-0.01 物距 30 公厘：-0.01
場曲	物距 40 公厘：-0.08 物距 35 公厘：-0.08% 物距 30 公厘：-0.08%

### 3.3 公差分析

在鏡頭生產和組裝過程中的失誤會造影像品質下降，而對組裝失誤容忍度越高的鏡頭在製造上也越容易。每家公司生產的設備不同，對於公差的要求也不同。本章的公差分析在於分析鏡頭每個面在對於公差的容忍度測試，再給予些微改變的情況下，要求 MTF 的表現必須符合 60mm/lp 時大於 0.2。也就是在人眼最低可分辨範圍上。

公差分析鏡片的曲率、厚度、材質三個方面，每次都以改變個別參數進行測試最高容忍力。主要目的是找出最敏感的面以供加工時精度的參考。

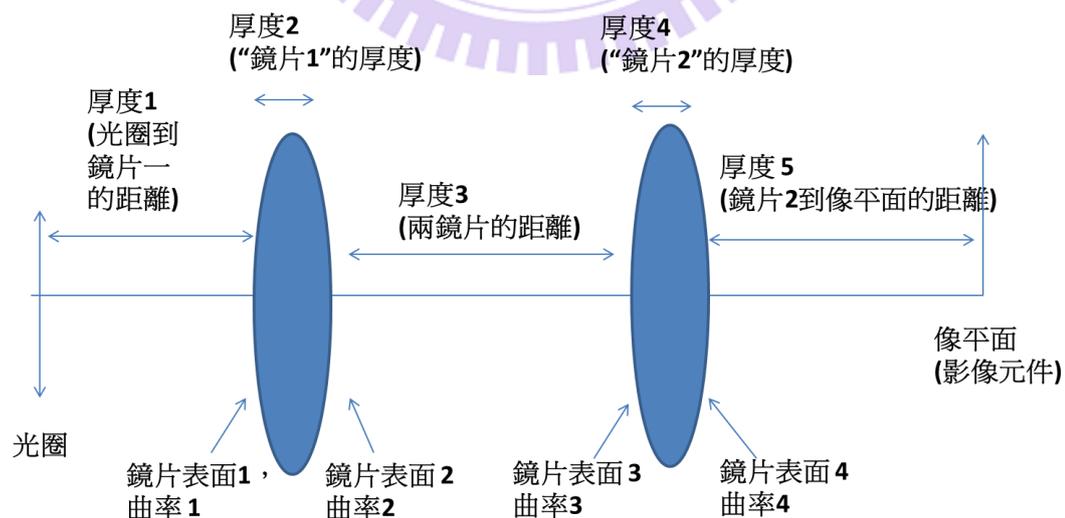


圖 65 相機模組各項公差測試目標示意圖

### 3.3.1 厚度公差分析

在以下測試中，最小值代表可以以原始數據為中心，可以減小而影像品質維持在我們需求的最小值；最大值代表以原始數據為中心，可以增大而影像品質仍落在可接受範圍內的最大值，MTF 的表現必須符合 60mm/1p 時大於 0.2，若低於這個值，人眼可以很容易感受到影像品質下降。

例如說原始數據為厚度  $X$ ，當加工造成公差失誤  $Y$  時，會造成影像品質下降。厚度加工失誤讓厚度變厚， $X+Y$ ，在影像品質上可接受的範圍內，那  $Y$  最大可到達的值（最大值）；造成  $Y'$  的失誤，厚度變薄為  $X-Y'$ ， $Y'$  最大可到達的值（最小值）。

$$\text{公差計算的方式為：} \frac{(\text{最大可容許變動值} + \text{最小可容許變動值})}{\text{原始數值}} = \frac{(Y+Y')}{X} \times 100\% \quad (29)$$

此公式代表可容許的加工誤差量占原來參數的百分比。

表 8 相機模組 1 的設計厚度公差分析

厚度公差測試			
MTF>0.2, 60 lp/mm			
鏡片表面	最小值	最大值	公差容忍量 (%)
Stop	0.05	0.02	76.14
1	1.1	1.3	16.67

2	1.18	1.21	2.50
3	1.18	1.21	2.50
4	1.03	1.06	2.86

表 9 相機模組 2 的厚度公差分析

厚度公差測試			
MTF>0.2, 60lp/mm			
鏡片表面	最小值	最大值	公差容忍量 (%)
Stop	0.2	0.37	55.72
1	1.18	1.23	4.17
2	1.16	1.18	1.71
3	1.19	1.23	3.33
4	1.005	1.03	2.47

### 3.3.2 曲率敏感度測試

表 10 相機模組 1 的曲率公差分析

曲率測試			
MTF>0.2, 60 lp/mm			
鏡片表面	最小值	最大值	公差容忍量 (%)
Stop	N/A	N/A	N/A

1	5.92	6.15	3.85
2	-2.085	-2.07	0.72
3	3.37	3.68	8.85
4	1.56	1.68	7.51

表 11 相機模組 2 的曲率公差分析

曲率測試			
MTF>0.2, 60lp/mm			
鏡片表面	最小值	最大值	公差容忍量 (%)
Stop	N/A	N/A	N/A
1	7	7.15	2.11
2	-2	-2.01	0.50
3	4	4.12	2.94
4	1.59	1.63	2.47

### 3.3.3 材料折射率分析

表 12 相機模組 1 的材料公差分析

材料折射率測試			
	最小值	最大值	公差容忍量 (%)
第一片鏡片 (N-BK7)	1.514	1.518	0.26
第二片鏡片 (PC)	1.6	1.625	1.55

表 13 相機模組 2 的材料公差分析

材料折射率測試			
	最小值	最大值	公差容忍量 (%)
First Lens (N-BK7)	1.5158	1.517	0.08
Second Lens (PC)	1.6	1.62	1.24

### 3.4 公差分析結論：

由公差分析可知，加工製造厚度最敏感處為第一和第二片鏡片的間距，也就是厚

度二，相機模組 1 容忍誤差是 2.5%，相機模組 2 是 1.7%。

曲率最敏感處是在第一面鏡片的第二面，相機模組 1 的容忍度是 0.72%，相機模組 2 是 0.50%，

材料最敏感為第一面鏡片(N-BK7)，相機模組 1 的容許誤差為 0.26%，相機模組 2 的容許誤差為 0.08%。

表 14、公差測試最敏感部分

名稱	規格(誤差容忍%)
厚度(厚度 2)	相機模組 1：2.5% 相機模組 2：1.7%
曲率(第一片鏡片第二面)	相機模組 1：0.72% 相機模組 2：0.50%
材料(N-BK7)	相機模組 1：0.26% 相機模組 2：0.08%

從公差分析我們可以得到幾個結論：

1. 公差最敏感處為第一片鏡片的折射率，但第一片鏡片為德國光學大廠 Schott AG 所生產 N-BK7 玻璃，在品質上是比較穩定而且可控制的。
2. 公差第二敏感之處，是在第一片鏡片的第二面的曲率。低於 1%的公差容忍量會造成加工困難，這也是日後真要投入生產前所必須修改調整原設計的地方。
3. 在其他各項數據上，公差的容忍量都是高於 1%的，這是利於生產的。

### 3.5 公差修正：

公差修正是修正最敏感的部分，也就是相機模組 1 第一面鏡片第二面曲率，其公差容忍度只有 0.72%。修正方法是其他透鏡曲率和材質參數都固定下，只改變鏡片間的間距，和調整光圈大小，將 F/# 增加為 4，此時光圈大小為  $0.45 \times 2 = 0.9\text{mm}$ ，比原先預計的 1mm 略小，但可以把公差容忍度提高為 1.15%。

相機模組 2 的第一片透鏡，第二面的曲率公差容忍度也是最緊的，只有 0.5%，用同樣的方法，使用移動透鏡間距和增加 F/# 到 4，可將公差容忍度放大到 1.14%。

材料的容忍度上，以改變透鏡間距和增加 F/# 到 4 的方法，可以把相機模組 2 的折射率容忍度(N-Bk7)從 0.079% 提升到 0.35%。



## 第四章：立體鏡頭設計

在真實世界中我們能察覺立體，是因為我們有左右兩隻眼睛，當他們同時觀察一個物體時，因為兩眼的視差而看到物體的不同角度，因此可以知道那物體不是一個平面而是立體物。同時人會根據平時的生活經驗，推估大概距離，而有深度感知。

對於左右眼的兩個不同影像做立體重建是人類和有立體視覺動物的固有能力，是漫長演化過程中的結果，讓他們在狩獵或評估危險時更有競爭力。顯示器顯示的是只有橫向與縱向的二維影像，雖然觀賞者能依照生活經驗自行判斷物體遠近大小，但這樣仍然不夠立體。若我們能透過人的左右眼傳達兩個影像進入腦，這樣是否就能騙過人腦而產生立體感覺？3D顯示器顯示的影像並不是真正立體，而是一種錯覺的應用。那要傳達什麼影像到左右兩眼才能成功騙過人腦產生立體？那就是3D立體攝影所要探討的目標。

### 4.1 立體攝影原理：

人類擁有一對眼睛而有立體視覺，如圖 66 和圖 67 所示。因此要利用光學設備紀錄立體感至少需要從不同的角度拍攝兩張照片。這兩張照片可以由兩台相機拍攝，或是市面上有販售具有兩顆以上鏡頭的3D照相機。但可以肯定的是必須分開一段距離。這段距離該如何制訂才能讓人覺得有立體效果？要怎樣的影像結合起來才會讓人看得舒服？

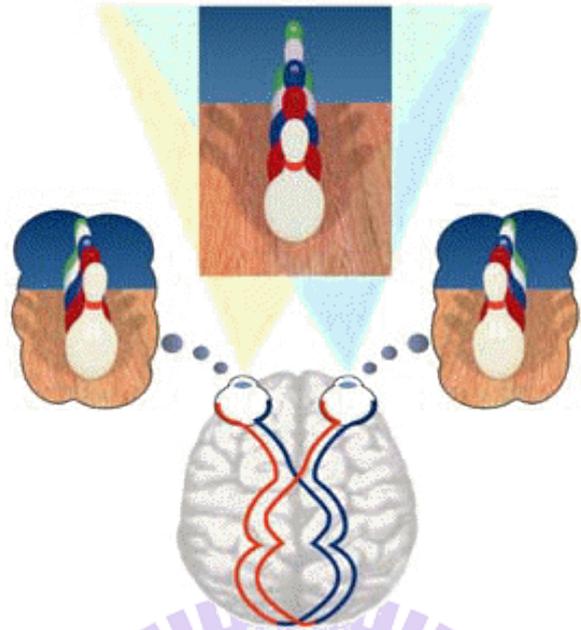


圖 66 3D 視覺示意圖

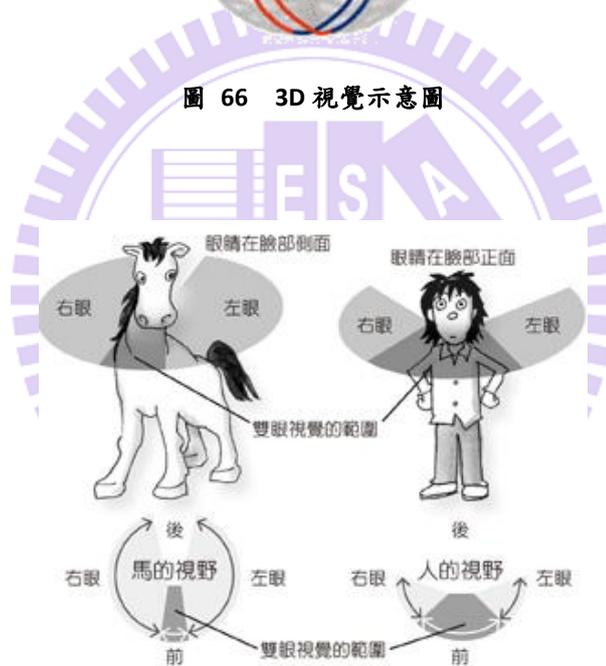


圖 67 人的視野與馬的視野比較

#### 4.1.1 早期立體攝影：

在十九世紀三十年代，英國人 Wheatstone 在研究人眼成像原理後，設計了立體看片箱，如圖 68 所示。他將左右眼看到的影像用畫圖的方式記錄下來，在放到一個具有兩片反射鏡的的看片箱中。觀賞者的雙眼在看這個看片箱時，兩隻眼睛會各別看到剛剛紀錄的左右眼圖畫，這兩張圖畫會在人眼中重新組合，變成一個立體的圖像。

看片箱在底片發明後被大量使用在立體攝影上，用攝影可以比繪圖更快更準的取得視差影像，看片箱在 3D 顯示器發明前被廣泛運用於立體影像欣賞上。

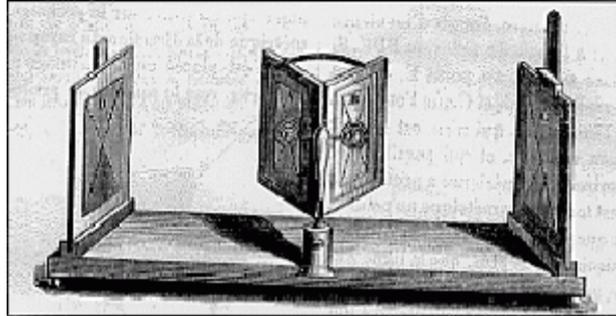


圖 68 1838 年 Wheatstone 發明立體看片箱[21]



圖 69 具有兩個鏡頭的立體相機[22]

立體影像技術隨著科技進步不斷演進，立體視覺也不再僅限於 3D 看片箱，衍生出很多系統，可分類為[23]：

**立體眼鏡式：**

1. 快門眼鏡
2. 偏光眼鏡
3. 紅藍眼鏡
4. 頭戴式投影螢幕

立體眼鏡類似看片箱的效果，以眼鏡限制兩眼看到的影像。其概念有點像立體耳機，讓左右耳聽到不同的聲音，產生立體聲效果。

快門式眼鏡會和電視螢幕進行同步連線，當螢幕播放左眼要看的影像時，就開啟左眼的快門；螢幕播放右眼影像時，開啟右眼的快門。因為速度很快，人眼感覺不出來畫面的差異，而得到立體畫面。

偏光眼鏡則是利用螢幕同時撥放左旋光和右旋光的影片，偏光眼鏡上各裝一片左旋和右旋光的偏光片，讓兩隻眼睛看到不同的影像形成立體。

紅藍眼鏡是最簡單也最普遍的 3D 顯示技術。利用紅光和藍光的波長相差很遠的特性，將左右眼要看的圖案以紅色和藍色表示，通過紅藍眼鏡就可以讓眼睛看到不同的影像，產生立體感。這種方法因為便宜簡單，大量運用在童書上，也運用在早期的立體電影。但因為無法產生彩色影像，只能被用在低階立體影像上。

頭戴式投影螢幕是另一種 3D 方法。他直接將影像顯示於左右兩眼的小螢幕上，不必透過大型螢幕，所以方便攜帶，也是一個人獨自欣賞的好方法。但它的重量較立體眼鏡重，長時間配戴會不舒服，而且沒辦法多人一起欣賞。

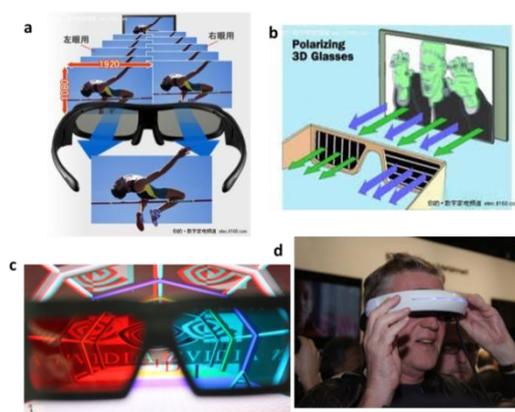


圖 70 a.快門式立體眼鏡 b.偏光是立體眼鏡 c.紅藍立體眼鏡 d.頭戴式立體眼鏡

裸眼式(不需要眼鏡協助直接觀看)：

1. 體積式
2. 全像式
3. 多平面式
4. 2D 多工式等

體積式全像是利用一塊高速旋轉的圓盤，將系統底下投影出來的雷射散射，然後掃描圓盤旋轉的空間，利用人眼視覺暫留的現象騙過眼睛，產生一個立體圖像。但是因為旋轉機構複雜，所以較為龐大，也不適合撥放影片，但適合在展覽會上展示虛擬物件。

全像影像是最真實的 3D 立體影像，因為他不是利用欺騙大腦的方式來達到立體視覺效果，而是真的在空間中還原立體影像，因此長期觀賞對人腦造成的負擔也比較小。但全像的缺點是目前投影設備架設仍然不太容易，除了少數高科技展覽和藝術表演使用外，要大規模推廣到商業及家庭應用仍有一段路要努力。

多平面式是利用兩片重疊螢幕製作出前後景深。兩片螢幕撥放著不同顏色和陰影的圖案，眼睛在看到後會在腦中產生立體影像。這種設計的缺點是兩個螢幕對位困難，而且最佳觀賞範圍只有在螢幕正前方，偏移太多看到的影像就會出現錯位。

2D 多工是目前很流行的一種方法，利用柱狀透鏡或是光柵的方式，將螢幕上的影像聚焦到人的雙眼。但這種式依然會有可視區域的限制，若眼睛偏離螢幕聚焦區太遠就會看不到。這種方法現在被用在 3D 手機螢幕上。

## 4.2 立體攝影法：

立體照片拍攝，就是要盡量做到模擬人眼的成像效果，才會得到正確的立體視野。人眼本身就是一台精密的照相機，單眼最大感知範圍超過 180 度，這在演化上有助於防範天的偷襲。但人眼實際上的立體視覺範圍，也就是雙眼視覺重疊的範圍大約是 120 度。人的視野也會隨著環境改變，如高速開車時視野就比低速前進時來的窄。

一般攝影上模擬人眼的鏡頭稱為標準鏡，以傳統底片相機來說是以焦距為 50 公厘的鏡頭為人眼標準鏡，這顆鏡頭的視野大約是 46 度，這大概是人眼注視正前方一個物體時的視角。但人眼有效立體視覺區寬達 120 度，因此也有人認為人眼在不刻意看一個物體時，視野該是等效於一台 35 公厘鏡頭的傳統底片相機，為 63 度。

立體相機是以至少兩台相機，或是兩個以上的鏡頭，同時對準一個物體進行拍攝，如圖 72 所示。相機間的夾角稱為視差角。視差角在人的立體視覺中，是判斷物體遠近的重要依據，如圖 71 所示。越遠的物體，兩眼所夾的視差角  $\theta$  就越小；反之，越近的物體人眼的視差角就愈大。

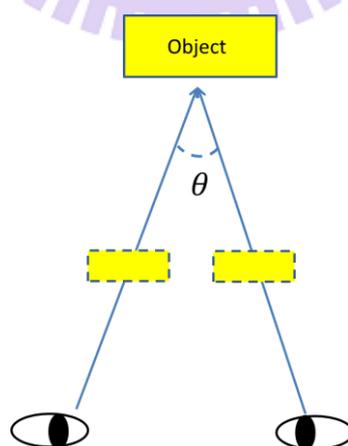


圖 71 立體視覺示意圖

想要獲得更立體的影像，可以用更多台相機對著物體進行拍攝。因為每個人眼睛

間距不同，取得更多樣本可方便不同的觀察者進行調整。同時更多台相機可以得到更豐富的立體資訊，但成本和重量都會上升。



圖 72 使用兩台相機進行立體攝影

另外一種方法就是使用具備兩個以上鏡頭的相機，如圖 73 所示。這種相機在二十世紀初期就有了，到今天進入數位化時代仍然持續發展。尤其是現在有了 3D 立體螢幕協助下，可以即時觀看立體照片，讓 3D 攝影的樂趣大幅提升，為立體相機發展注入新的活水。



圖 73 (左)骨董立體相機(右)最新的富士立體數位相機

#### 4.2.1 立體影像重現

在用 3D 顯示器還原一個具有前後物體的場景的畫面時，該如何呈現前後景深的區別？最主要的方法就是利用視差點交錯的位置，可分為三種，如圖 74 所示：

1. **非交錯視差**：觀察者的雙眼的視線在螢幕上沒有交會，其延伸點在螢幕之後，對觀察者來說，立體成像的感覺也在螢幕之後，感覺影像距離較遠。
2. **零視差**：觀察者的雙眼視線匯聚在螢幕上，感覺影像就存在於螢幕得面上。
3. **交錯視差**：當觀察者的視線在螢幕前交會，其視線交會延長於螢幕上時，是呈現發散的狀態，稱之為交錯視差。在這種情況下，觀察者會認為影像浮現螢幕之前。

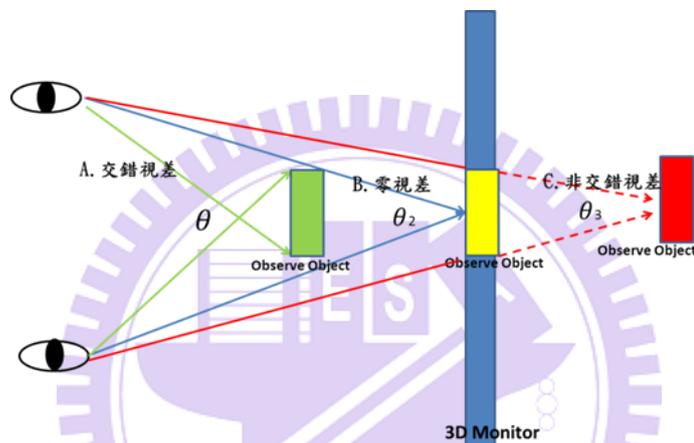


圖 74 立體視差示意圖

#### 4.3 立體攝影於口腔內視鏡的應用：

目前立體攝影主要應用於娛樂上，彷彿身歷其境的 3D 立體電影，或是紀錄當下的立體照片，以及新式的立體婚紗之類。未來也會開始應用在教育上，如虛擬藝術品展示、生態教學、地質教學等，若以 3D 方式進行，相信會比平面的圖片更加生動有趣。

在醫學上的應用方面，3D 遠距離手術也被成功使用，而 3D 手術模擬系統可讓實習醫生獲得更生動的學習機會。

目前牙醫診所常使用環口 X 光掃描對病患的牙齒進行建檔。不過這套設備只能記錄 X 光影像，並只能記錄牙齒分布情形，無法記錄口腔內組織分布情形及顏色等。設計輕巧方便的立體口腔檢查鏡可以方便醫生進行 3D 建檔，也可透過立體螢幕像病人說明口腔狀況。將畫面立體化是未來影像發展的趨勢，相信這能為牙醫檢查帶來新的便利！

#### 4.4 口腔內視鏡設計布局：

我們在進行立體攝影時，是將人眼以照相機取代，分別模擬兩個眼睛所看到的影像，然後在特殊設計的看片箱或是螢幕上，讓左右眼看到不同的影像，騙過人腦的影像處理能力得到立體視覺。

視差角對人眼來說是判斷遠近很重要的依據，我們在架設立體相機時也可以以此來讓我們的物體看起來比較遠或比較近。

假定觀測者是在距離螢幕 600 公厘處觀看影像，所以我們的視差角也是依據人眼在這樣距離觀測的視差角來設計。人的雙眼間距為 60 公厘，半間距為 30 公厘，則視差角的計算如下：

$$\theta = \arctan\left(\frac{3}{60}\right) = 2.862^\circ \quad (30)$$

##### 第一、 最小深度感知計算[24]

3D 物體表面一定也有紋路起伏，人眼對於這些表面微結構的判斷能力隨著人眼視差角不同而有所改變。

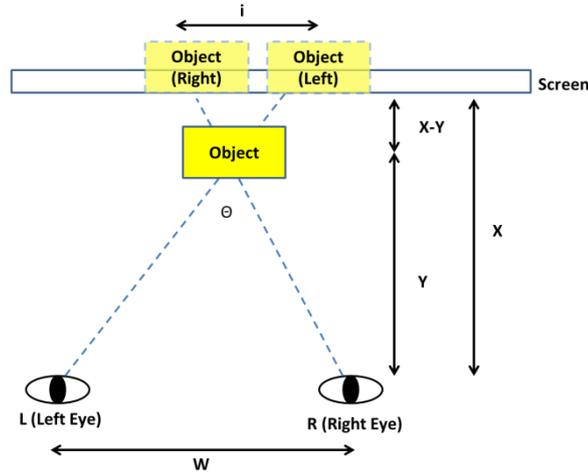


圖 75 立體螢幕與立體視覺重建

如圖 75 所示，人的雙眼到螢幕的距離為  $X$ ，螢幕上有兩個影像，分別為左眼和右眼影像，距離人眼為  $Y$ 。而  $X-Y$  為這個物體凸出螢幕的程度。左右影像靠的越近，則  $X-Y$  的值可以越小，意味著我們可以看出更小的物體深淺變化。人眼最小的視差角為  $1'=1/60^\circ$ ，當然這數值因人而異，但是個普遍的參考標準。

雙眼距離為  $W$ ，左右兩個影像在螢幕上距離為  $i$ ，則可以相似三角形推導出下列式子：

$$\frac{i}{W} = \frac{X-Y}{Y} = \frac{X}{Y} - 1 \quad (31)$$

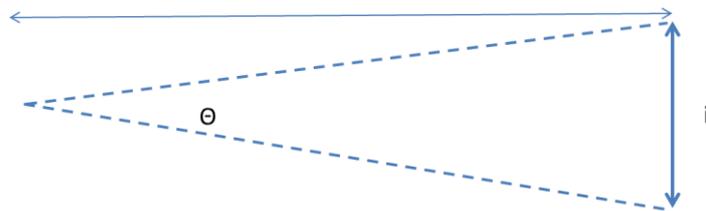


圖 76 最小視差角示意圖

在角度  $\theta$  很小時，從人眼到螢幕的距離  $X$  大約等於半徑，此時  $i=X\theta$ 。

$$\frac{i}{W} = \frac{X}{Y} - 1 = X \times \frac{2\pi \theta}{360 W} \quad (32)$$

$$Y = \frac{X}{\left(1 + X \frac{2\pi \theta}{360 W}\right)}, \text{ 此時視差角為 } 1', W \text{ 為人雙眼距離, 設為 } 65 \text{ 公厘}$$

$$Y = \frac{X}{1+0.005X} = \frac{1}{\frac{1}{X}+0.005} \quad (33)$$

當 X 趨近於無限大，也就是在極遠處，人眼會分辨不出左眼和右眼影像，此時立體知覺消失。

$$Y = \frac{1}{\frac{1}{\infty}+0.005} = \frac{1}{0.005} = 200 \quad (34)$$

也就是當物體距離我們兩百公尺外，看起來和在無限遠的物體是沒有立體視差的。

當物體距離我們六十公分時，物最靠近螢幕的距離為：

$$Y = \frac{1}{\frac{1}{0.6}+0.005} = 0.60\text{m} \quad (35)$$

$$X - Y = 0.0017\text{m} = 1.7\text{mm} \quad (36)$$

在計算非交錯景深(感覺立體物在螢幕後面)時，以同樣的方法推導。

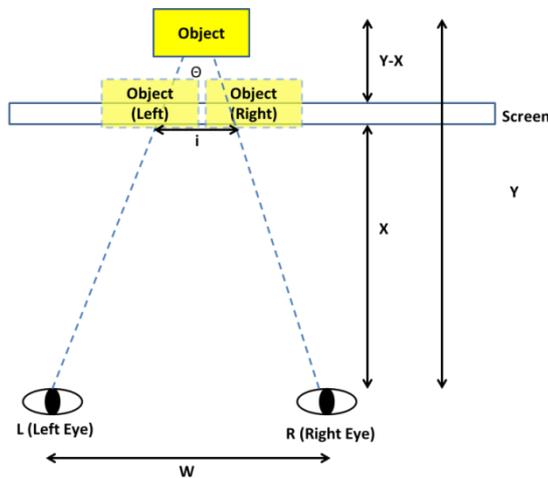


圖 77 非交錯視差於立體螢幕重建示意圖

非交錯視差影像，如圖 77 所示，左眼會看到左眼的影像，右眼會看到右眼的。左右眼的視線在螢幕上並不會交錯，但眼睛要分辨出左右兩個影像的差異才會有立體視覺，因此這兩個影像的間距必須大於人眼最小分辨視角  $1'$  才能產生立體視覺。

$$\frac{i}{W} = \frac{Y-X}{X} = \frac{Y}{X} - 1 \quad (37)$$

$$\frac{i}{W} = \frac{Y}{X} - 1 = Y \times \frac{2\pi \theta}{360 W} \quad (38)$$

$$Y = \frac{1}{\left(\frac{1}{X} - \frac{2\pi \theta}{360 W}\right)} \quad (39)$$

此時視差角為  $1'$ ， $W$  為人雙眼距離，設為 65 公厘， $X$  為物距 60 公厘，0.6 公尺。

$$Y = \frac{1}{\frac{1}{0.6} - 0.005} = 0.62\text{m} \quad (40)$$

因此最小可辨識深度為  $Y-X=0.62-0.6=0.02\text{m}=2\text{mm}$ 。

## 第二、傾斜鏡頭立體範圍計算

當鏡頭是傾斜狀態時，景深範圍會受到鏡頭視野的限制，立體視覺有效區域將是個有限，或是可至無窮遠，但視野縮小，如圖 78 所示。

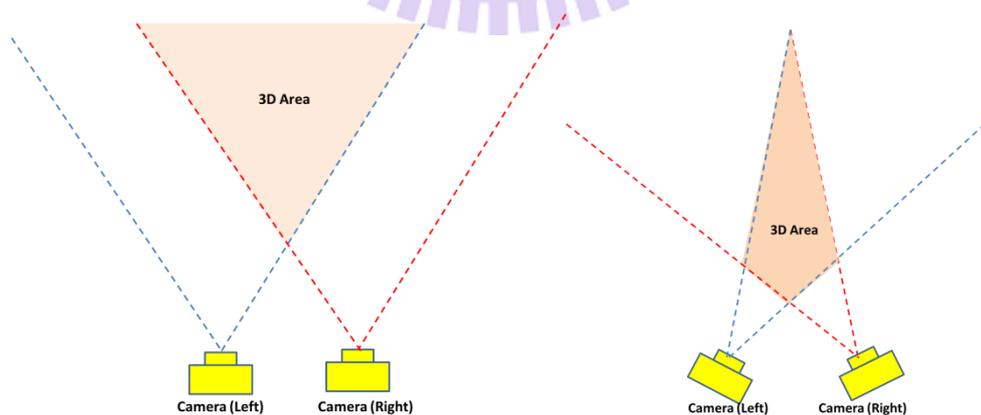


圖 78 水平與傾斜拍攝 3D 立體影像示意圖

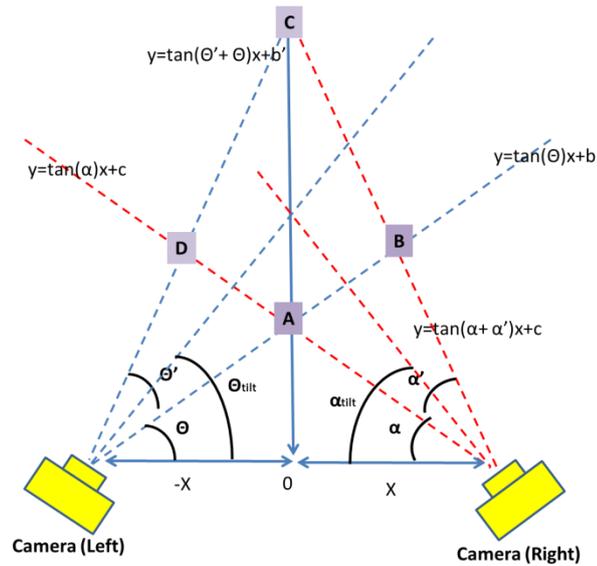


圖 79 收斂立體景深計算示意圖

立體景深的計算可以發現有四個交點 A、B、C、D，如圖 79 所示。A 和 C 代表前後景深的長度，D 和 B 則規定出景深範圍最寬的寬度。左邊鏡頭的  $\theta_{tilt}$  為鏡頭的傾斜角， $\theta'$  為鏡頭視野， $\theta = \theta_{tilt} - \frac{\theta'}{2}$ 。右邊鏡頭的傾斜角為  $\alpha_{tilt}$ ；鏡頭視野為  $\alpha'$ ， $\alpha_{tilt} - \frac{\alpha'}{2}$  為  $\alpha$  角。左右兩邊的傾斜角度呈現負號相等的關係。

設兩相機基線中心為原點，基線訂為 X 軸，物距方向訂為 Y 軸，視野的範圍可以定義成一條直線方程式： $y=mx+b$ ， $m$  為斜率， $m=-y/x=-\tan(\theta_{tilt})$ 。當  $x=0, y=b, b=-X\tan(-\theta)$ ， $b'=-X\tan(-\theta-\theta')$ ， $c=X\tan(\alpha)$ ， $c=X\tan(\alpha+\alpha')$

A、B、C、D 各點的位置為兩台相機視野的交會點。

A：

$$\begin{cases} y = -\tan(\theta)x + b \\ y = -\tan(\alpha)x + c \end{cases} \quad (41)$$

B：

$$\begin{cases} y = -\tan(\theta)x + b \\ y = -\tan(\alpha + \alpha')x + c \end{cases} \quad (42)$$

C：

$$\begin{cases} y = -\tan(\theta + \theta')x + b \\ y = -\tan(\alpha + \alpha')x + c \end{cases} \quad (43)$$

D:

$$\begin{cases} y = -\tan(\theta + \theta')x + b \\ y = -\tan(\alpha)x + c \end{cases} \quad (44)$$

然而實際上，人眼最舒適觀察物體遠近的距離時，形成的視差角並沒有很大。人眼在物距小於 300 公厘時會對眼睛造成負擔，所以許多家長都要求小孩子讀書時要超過桌面 30 公分。

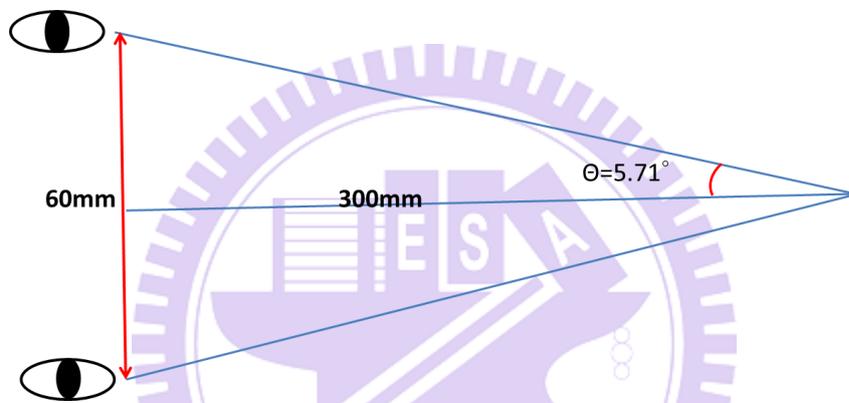


圖 80 人眼視差角示意圖

當我們把基線縮短後，又要維持立體度，所以使用相同的視差角，把鏡頭傾斜 5.71 度，此時立體區域計算方法與之前相同，但不再是個有限的區域，而是個視野較之前視野窄但是可到無窮遠的區域。

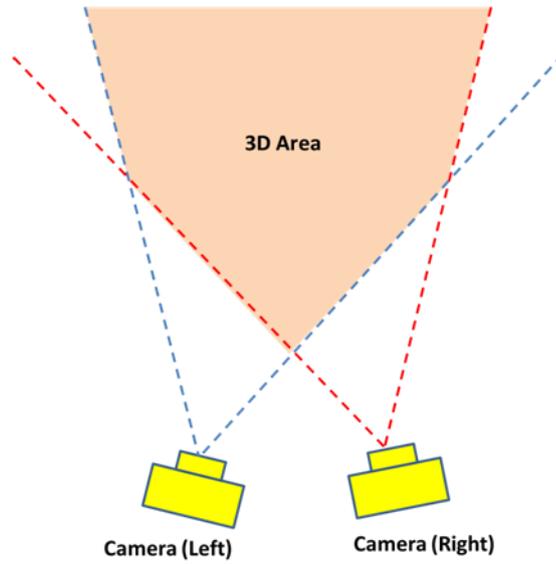


圖 81 非收斂立體視覺範圍示意圖

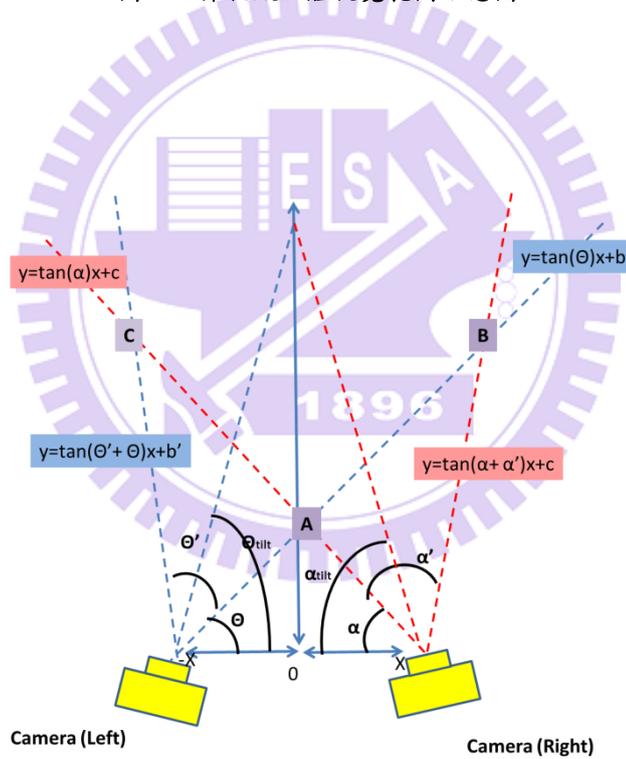


圖 82 立體視覺範圍節點示意圖

如圖 82 所示，立體視覺最近的交會點是在 A 點，從該點開始兩顆鏡頭的視野有重疊。物距在 B 點和 C 點之後，立體視覺範圍受左右兩個鏡頭的邊界視野限制，其角度為  $\theta'+\theta-90^\circ$  角。和  $\alpha'+\alpha-90^\circ$  。

A :

$$\begin{cases} y = -\tan(\theta)x + b \\ y = -\tan(\alpha)x + c \end{cases} \quad (45)$$

B:

$$\begin{cases} y = -\tan(\theta)x + b \\ y = -\tan(\alpha + \alpha')x + c' \end{cases} \quad (46)$$

C:

$$\begin{cases} y = -\tan(\theta + \theta')x + b' \\ y = -\tan(\alpha)x + c \end{cases} \quad (47)$$

若我們的基線長是一公分，模擬人眼在 30 公分外看物體的立體感，所需的視差角是 5.71 度，相機與 X 軸的夾角是  $90^\circ - 5.71^\circ = 84.28^\circ = \theta_{tilt}$ ， $\theta = 84.28^\circ - 30^\circ = 54.29^\circ$ 。在這裡假設相機的視野是  $60^\circ$ 。

A :

$$\begin{cases} y = -\tan(-54.29^\circ)x - 5 \times \tan(-54.29^\circ) \\ y = -\tan(54.29^\circ)x + 5 \times \tan(54.29^\circ) \end{cases} \quad (48)$$

B:

$$\begin{cases} y = \tan(-54.29^\circ)x - 5 \times \tan(-54.29^\circ) \\ y = \tan(54.29^\circ + 60^\circ)x + 5 \times \tan(54.29^\circ + 60^\circ) \end{cases} \quad (49)$$

C:

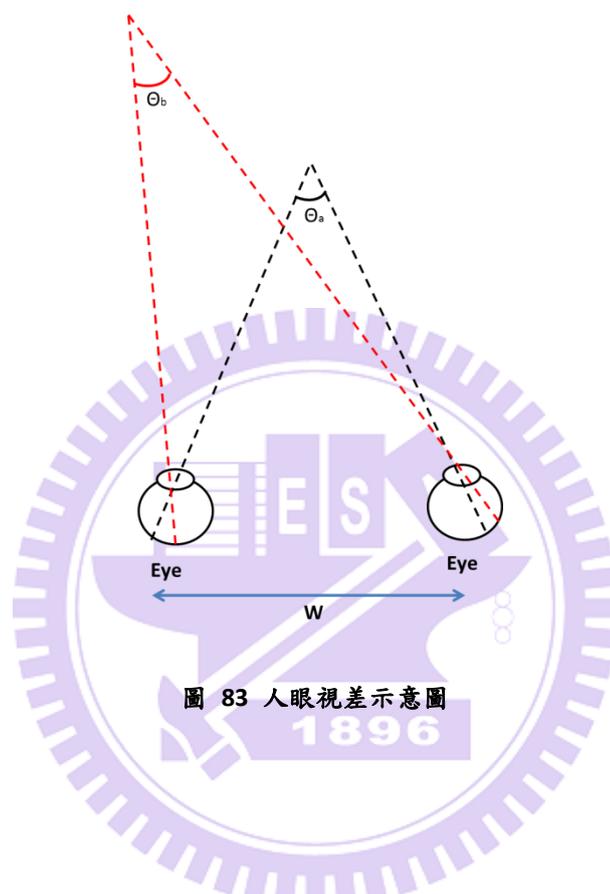
$$\begin{cases} y = \tan(-54.29^\circ - 60^\circ)x - 5 \times \tan(-54.29^\circ - 60^\circ) \\ y = \tan(54.29^\circ)x + 5 \times \tan(54.29^\circ) \end{cases} \quad (50)$$

再做聯立求解後，可得座標 A(0,7.0) B(21.86, 37.375) C(-21.86, 37.375)，立體視覺的張角是  $54.289^\circ + 60^\circ - 90^\circ = 24.28^\circ$ ，總範圍變成左右各開  $24.28^\circ$ ，視野(Field of View)縮小  $60^\circ - 2 \times 24.28^\circ = 11.42^\circ$ ，視野縮小率為  $24.28^\circ \times 2 \div 60 = 0.81$ ，約為原本鏡頭視野的百分之八十。

## 4.5 立體感校正討論

立體視覺校正時，兩個鏡頭傾斜的角度要朝向相同方向還是相反方向比較好？

人眼的立體視覺感知來自於視差角差異量。



當人眼再分別看兩個不同的物體時，雙眼產生不同的視差角 $\theta_a$  $\theta_b$ ，如圖 83 所示，此時視差角的差異量為 $\gamma = \theta_a - \theta_b$ 。設兩物體到人眼的距離是 $d_1$ 和 $d_2$ ，而兩眼寬度是 $W$

這兩個物體的深度差異為 $\delta = d_1 - d_2$ ，若 $\delta$ 值越小，代表能判斷越小的深度變化，也代表系統的立體感越好。

$$\gamma = \theta_a - \theta_b \cong \frac{W}{d_1} - \frac{W}{d_2} = \frac{W(d_1 - d_2)}{d_1 d_2} \cong \frac{W\delta}{d^2}, \text{ 當 } \delta \ll d \cong d_1, d_2 \quad (51)$$

$$\delta = \frac{d^2 \gamma}{W} \quad (52)$$

由此公式可看出，立體感的最小分辨距離的分辨力與物距平方成正比，與視差角差異量成正比，與眼睛或鏡頭的基線寬成反比。欲縮小能辨別的深度差，提升立體度，縮短物距是最顯著的，或是增加基線的寬度，減少兩目標物的視差角差異量。

若維持一樣的視差角，將基線和物距縮短，則在相機模組 2 在物距為 100 公厘時，物距  $d$  縮短六倍，則此時立體判別深度可以縮小  $1/36$ ，基線縮小為 10 公厘，縮小  $1/6$ ，此時立體判別深度在相同視差角下，仍較原來物距 600 公厘外，縮  $1/6$ ，也就是立體感能增加 6 倍。相機模組 1 在物距為 40 公厘時，物距縮短為  $1/15$ ，最小判別深度變為  $1/256$ ，基線縮短為  $1/6$ ，在相同視差角下，最小判別深度為原來的  $1/43$ 。

在我們的實驗當中，兩相機模組基線寬為一公分，物距為 30 公厘和 60 公厘，如圖 84 所示。基線寬為 10 公厘是考慮鏡頭的封裝模組體積。此時 3D 立體視覺區域的計算如下：

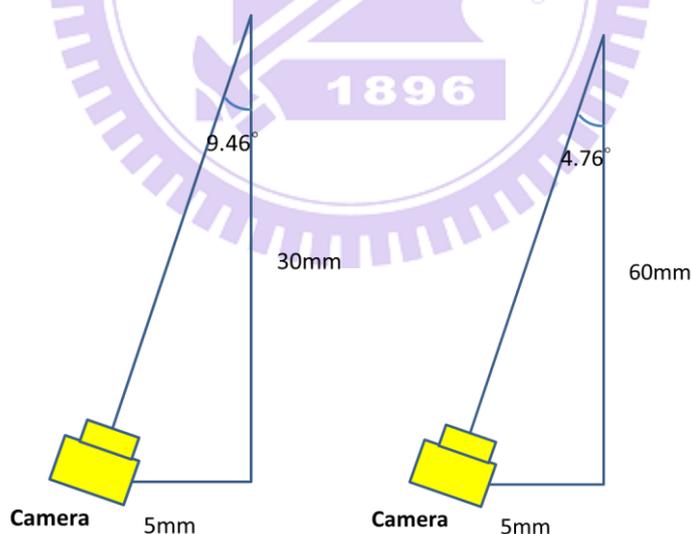


圖 84 相機模組視差角示意圖

此時 3D 立體視覺區域的計算如下：

A :

$$\begin{cases} y = -\tan(\theta)x + b \\ y = -\tan(\alpha)x + c \end{cases} \quad (53)$$

B:

$$\begin{cases} y = -\tan(\theta)x + b \\ y = -\tan(\alpha + \alpha')x + c \end{cases} \quad (54)$$

C:

$$\begin{cases} y = -\tan(\theta + \theta')x + b \\ y = -\tan(\alpha)x + c \end{cases} \quad (55)$$

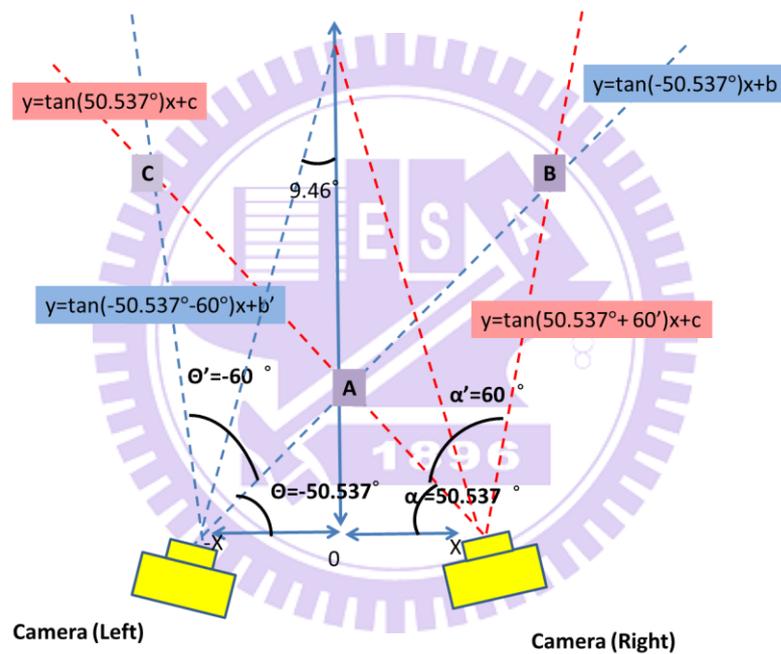


圖 85 相機模組 1 立體視覺範圍計算圖

如圖 85 所示，物距為 30 公厘，基線寬為 10 公厘，此時相機與物體之間的視差角為  $9.46^\circ$ ，將相機傾斜此角度，讓鏡頭中心對準物。

A:

$$\begin{cases} y = -\tan(-50.54^\circ)x + (-5) \times \tan(-50.54^\circ) \\ y = -\tan(50.54^\circ)x + (5) \times \tan(50.54^\circ) \end{cases} \quad (56)$$

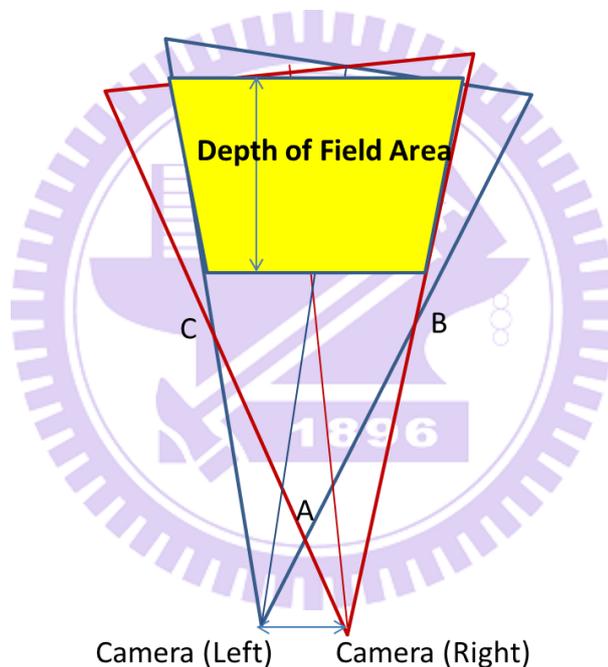
B:

$$\begin{cases} y = -\tan(-50.54^\circ)x + (-5) \times \tan(-50.54^\circ) \\ y = -\tan(110.54^\circ)x + (5) \times \tan(110.54^\circ) \end{cases} \quad (57)$$

C:

$$\begin{cases} y = -\tan(-110.54^\circ)x + (-5) \times \tan(-110.54^\circ) \\ y = -\tan(50.54^\circ)x + (5) \times \tan(50.54^\circ) \end{cases} \quad (58)$$

解得  $A(x,y)=(0, 10.11)$ 、 $B(x,y)=(13.35, 22.29)$ 、 $C(x,y)=(-13.35, 22.29)$ 。實際上物體的景深範圍為  $y=30\sim 40$  公厘，大於 22.29 公厘，所以實際上的立體範圍示意如下圖



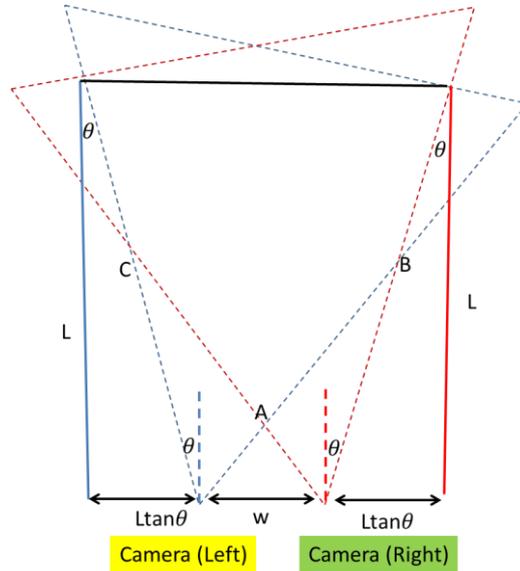


圖 86 有限景深立體範圍計算

計算有效 3D 視覺區域寬度，最遠處為 40 公厘， $L=40\text{mm}$ ， $\theta = 110.537^\circ - 90^\circ = 20.537^\circ$ ，最遠寬度為  $2 \times 40 \times \tan 20.537^\circ + 1 = 39.97 \cong 40\text{mm}$ ，最窄寬度為  $2 \times 30 \times \tan 20.537^\circ + 1 = 3.247 \cong 32.50\text{mm}$

在相機模組 2 的情況，物距為 60 公厘，基線寬為 10 公厘，此時相機與物體之間的視差角為  $4.76^\circ$ ，將相機傾斜此角度，讓鏡頭中心對準物。

A:

$$\begin{cases} y = -\tan(-55.23^\circ)x + (-5) \times \tan(-55.23^\circ) \\ y = -\tan(55.23^\circ)x + (5) \times \tan(55.23^\circ) \end{cases} \quad (59)$$

B:

$$\begin{cases} y = -\tan(-55.23^\circ)x + (-5) \times \tan(-55.23^\circ) \\ y = -\tan(115.23^\circ)x + (5) \times \tan(115.23^\circ) \end{cases} \quad (60)$$

C:

$$\begin{cases} y = -\tan(-115.23^\circ)x + (-5) \times \tan(-115.23^\circ) \\ y = -\tan(55.23^\circ)x + (5) \times \tan(55.23^\circ) \end{cases} \quad (61)$$

解得  $A(x,y)=(0, 30.49)$ 、 $B(x,y)=(26.16, 44.9)$ 、 $C(x,y)=(-26.16, 44.9)$ 。實際上物體的景深範圍為  $y=60\sim 110$  公厘，大於 44.9 公厘。

計算有效 3D 視覺區域寬度，最遠處為 110 公厘， $L=110\text{mm}$ ， $\theta = 115.23^\circ - 90^\circ = 25.23^\circ$ ，最遠寬度為  $2 \times 110 \times \tan 25.23^\circ + 10 = 113.69 \cong 113.70\text{mm}$ ，最窄寬度為  $2 \times 60 \times \tan 25.23^\circ + 10 = 66.60\text{mm}$

最小分辨深度計算，人眼最小分辨視差量為  $5 \times 10^{-5}\text{rad}$

設計一、

$$\delta = \frac{30^2 \times 5 \times 10^{-5}}{10} = 0.0045\text{mm} \quad (62)$$

設計二、

$$\delta = \frac{60^2 \times 5 \times 10^{-5}}{10} = 0.018\text{mm} \quad (63)$$

#### 4.6 相機模組 1 與 2 在立體攝影化後討論

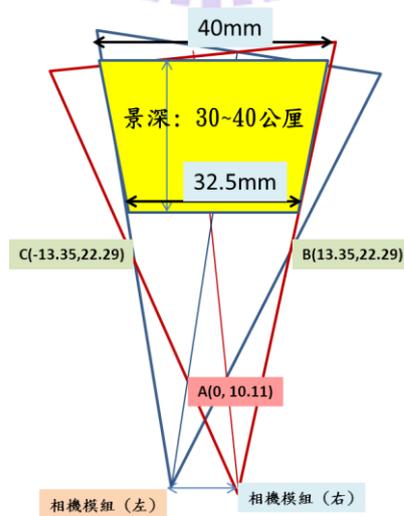


圖 87 相機模組 1 的立體景深示意圖

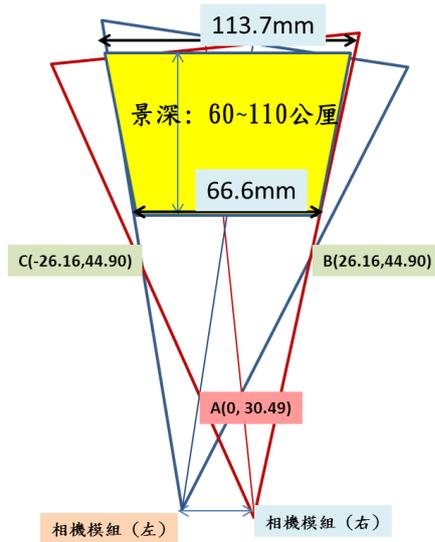


圖 88 相機模組 2 的立體景深示意圖

圖 87 和圖 88 可以看出，相機模組 1 和 2 的景深範圍並未受到 A、B、C 這三個節點的影響，因為景深範圍落在他們之後，但是立體成像範圍較未立體化前小。

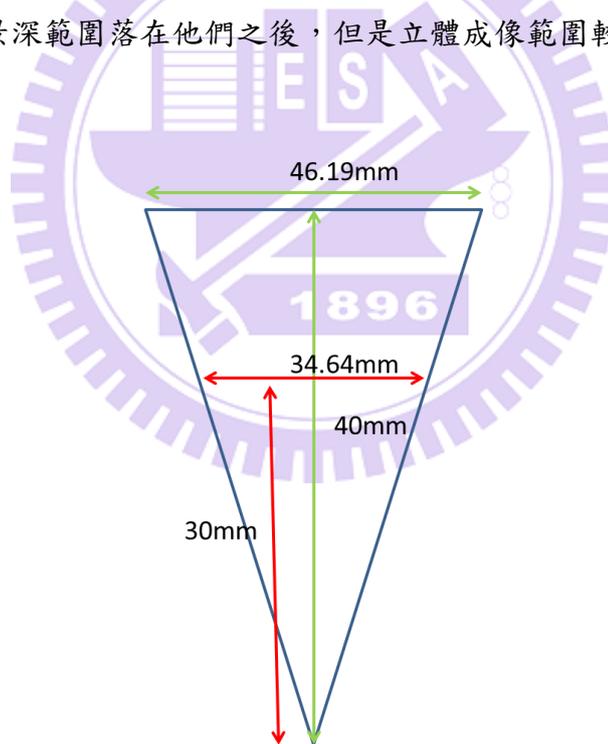


圖 89 相機模組 1 的視野範圍

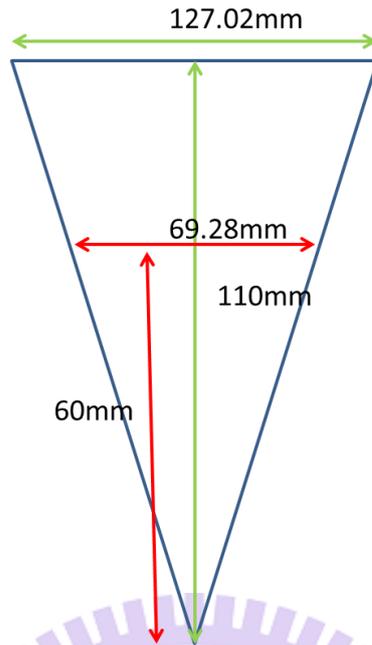


圖 90 相機模組 2 的視野範圍

相機模組 1 的視野範圍是 34.63 到 46.19 公厘，立體化的模組視野範圍是 32.5 公厘到 40 公厘；相機模組 2 的視野範圍是 69.28 到 127.02 公厘，立體化的模組視野範圍是 66.6 公厘到 113.7 公厘。

立體化之後相機模組 1 在物距為 40 公厘處的視野縮小 13.4%，在物距為 30 公厘處視野縮小 6.15%。立體化之後相機模組 2 在物距為 110 公厘處的視野縮小 10.48%，在物距為 60 公厘處視野縮小 3.86%。

視野的改變量最多再 10% 左右，收縮的量應是可以接受的。也可以利用增加相機模組的方式來彌補視野不足的問題。

由以上分析可知，

1. 我們可以利用相機模組 1 和相機模組 2 來組成一個可拍攝立體影像的口腔內視
2. 由 4.5 章的分析可知，觀察者在觀察立體攝影結果時，其立體感不會感到下降。

表 15、立體化後相機模組 1 改變參數

名稱	規格
景深	30~40 公厘
視野	較未立體化相機模組一： 40 公厘處的視野縮小 13.4% 30 公厘處視野縮小 6.15%

表 16、立體化相機模組 2 改變參數

名稱	規格
景深	60~110 公厘
視野	較未立體化相機模組二： 110 公厘處的視野縮小 10.48 % 60 公厘處視野縮小 3.86%



## 第五章 結論

### 5.1 實現例分析

綜合以上分析，我們可以簡單的歸納這新設計的特點：

1. 視角大，超過 180 度
2. 畸變小，低於 1%
3. 解析度較市售的口腔內視鏡產品的高
4. 景深長，不用自動對焦，結構簡單
5. 體積小而輕
6. 具備可生產性
7. 可立體化

將其與現在市面上相近的相機模組比較，分析其真正投入生產的可能。

在市面上已經充滿了各種微型化的 3D 攝影產品，如輕便數位 3D 相機，3D 照相手機等。而採用多個相機模組的系統也已經存在，例如新式智慧車上的行車監視系統，利用多個照相模組，分別安裝在車頭、兩側後照鏡，及汽車後方，讓駕駛可以在駕車及倒車時，看到車輛各個死角的即時影像。綜觀以上科技，可知生產 3D 口腔內視鏡的技術，現有科技已經足夠，

設計一和設計二兩個設計的資料來看，以一個市面上已經販售的產品來分析其生產可能。這兩個模組的體積都很小，小於 4mm，使用左右並列的方法放進口腔內視鏡中是可行的。

表 17 相機模組 1 參數：

名稱	規格
系統大小	3.75mm(長)×4.06mm(高)
焦距(EFL)	3.16mm
鏡片組成	NBK-7 (第一片) PC (第二片)
感光元件大小	1/6"
有效物距	40~30mm

表 18 相機模組 2 參數：

名稱	規格
系統大小	3.87mm(長)×2.1mm(高)
焦距(EFL)	3.66mm
鏡片組成	NBK-7 (第一片) PC (第二片)
感光元件大小	1/6"
有效物距	110mm~60mm

下圖為大立光電網站上的產品資料，這是一個體積和大小都類似的模組，加上封裝之後整體長度增加到 5.5mm，仍在可接受的範圍內。和我們設計的相機模組體積大小相近的產品目前已被廣泛生產，量產技術上已經成熟。



- » Sensor : 1/3"
- » Pixels : 1.3M
- » Element : 3Plastic
- » Image Circle : 6.2
- » TTL : 5.5 mm
- » FNO : 2.8
- » CRA : 23.0
- » EFL : 4.16(Paraxial)

圖 91 相機模組

若以成本計算，多個鏡頭模組在製造上會多很多成本，但在高單價的醫療產品上時這項缺陷比較不明顯，而他能帶來的廣角和低變形優勢則是很明顯的。

我們的設計在面對未來的挑戰時，我們做出 S.W.O.T 分析列表：

表 19 S.W.O.T 分析列表

優勢 (Strong)	弱點 (Weak)	機會 (Opportunities)	技術 (Technology)
1. 視角大，方便操作檢查，可輕易拍下全口影像。 2. 多鏡頭設計，變形小。 3. 使用多片小 VGA，畫面細膩，傳輸速率快。 4. 具有發展 3D 影像的潛力。	1. 近拍能力不如傳統設計。	1. 全口腔攝影建檔是這項設計最重要的功能。可以同時觀察到嘴巴兩側和咽喉。 2. 在未來搭配 3D 顯示器，可以即時展是 3D 口腔畫面給病人。	1. 多鏡頭模組組合。 2. 非球面鏡片使用。 3. 高傳輸率的 VGA 顯示元件。

## 5.2 結論與願景

在 3D 科技日漸成熟的今天，不論是硬體的 3D 螢幕或是軟體的 3D 影片節目，都開始如雨後春筍般湧出，關於 3D 的應用也是為全世界所關心的。而 3D 影像若能應用在醫學上，將擺脫傳統紀錄方式的限制，更寫實也更明確的讓醫事人員了解實際狀況，在臨床判斷或是日後教學檢討上都有很大的助益。

本論文提出的架構是希望能利用現在便宜的 VGA 相機模組技術，為 3D 在醫療應用上開發新的用途。這個設計尚需要立體螢幕的搭配，但在立體螢幕不斷進步與成熟的現在，要得到立體螢幕來觀察結果也是件容易的事了。

希望這個設計能發起拋磚引玉的效果，能夠為人類帶來更多福祉，這是我所衷心盼望的。

## 第六章、參考資料

- [1] [www.omnivision.com](http://www.omnivision.com)
- [2] <http://www.inline.com.au/vistacam>
- [3] Randy Donahoo, Tuttle Okla, "Intra- oral optical viewing device", US Patent 5528432, 1996
- [4] Gray "Sagittal section of nose, mouth, pharynx, and larynx", Anatomy "1918 edition
- [5] <http://zh.wikipedia.org/zh-tw/File:Ortopantomogram.jpg>
- [6] Robin Kerrod (1997). MacMillan's Encyclopedia of Science. 6. Macmillan Publishing Company, Inc.. ISBN 0028645588
- [7] 顏瑞瑩 等編著 “電腦斷層分析齒間牙齦寬度及皮質骨厚度—於矯正用迷你骨釘之應用” 臺灣牙周病醫學會雜誌, 民國九十八年
- [8] American Joint Committee on Cancer, "AJCC Manual for staging of cancer, 6th edition", 2002
- [9] <http://www.nikonusa.com/Nikon-Products/Product/Camera-Lenses/2180/AF-S-NIKKOR-50mm-f%252F1.4G.html#tab-ProductDetail.ProductTabs.Overview>
- [10] Eugene. Hecht "Optics", Fourth Edition, Addison Wesley
- [11] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Schematic\\_diagram\\_of\\_the\\_human\\_eye\\_en.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Schematic_diagram_of_the_human_eye_en.svg)
- [12] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Imagine\\_being\\_a\\_fly\\_VLT.jpg#file](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Imagine_being_a_fly_VLT.jpg#file)
- [13] <http://zh.wikipedia.org/zh-tw/File:Lens6a.svg>
- [14] <http://en.wikipedia.org/wiki/File:CookeTriplet-text.svg>
- [15] 孫文信, 幾何光學, 中央大學光電科學與工程學系(2007).
- [15] <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pfeilh%C3%B6he.svg>

[16] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Conic\\_constant.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Conic_constant.svg)

[17] <http://www.axis.com/edu/axis/images/ccd.gif>

[18] [http://forums.steves-digicams.com/attachments/newbie-help/3158d1092261357-me-gapixel-ccd-size-imager\\_sizes.gif](http://forums.steves-digicams.com/attachments/newbie-help/3158d1092261357-me-gapixel-ccd-size-imager_sizes.gif)

[19] <http://www.axis.com/edu/axis/images/ccd.gif>

[20] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bayer\\_pattern\\_on\\_sensor.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bayer_pattern_on_sensor.svg)

[21] [http://webh01.ua.ac.be/elmc/website\\_FL/Stereophotography.htm](http://webh01.ua.ac.be/elmc/website_FL/Stereophotography.htm)

[22] <http://www.stereoscopy.com/cameras/index.html>

[23] 許精益,黃乙白(2007),3D 立體顯示技術之發展與研究

[24] Takanori Okoshi , ” Three-Dimensional Imaging Techniques” , 1976

