

2010年臺灣國際科學展覽會  
優勝作品專輯

編號：100002 - 02

作品名稱

低像差可變倍率透鏡之設計分析與應用

**Development and Application of a Low-Aberration  
Variable Magnification Liquid Lens**

得獎獎項

工程學科大會獎一等獎

美國正選代表:美國第61屆國際科技展覽會

學校名稱：臺北市立建國高級中學

作者姓名：蕭季威

指導老師：惠沁宜

關鍵詞：可變倍率透鏡、液體透鏡、像差

## 作者簡介



我是蕭季威，現在就讀臺北市立建國高中一年級。我從小就對數理科學很有興趣，每年都找機會參加各種科學體驗營和科學競賽，從其中我學到了很多物理、化學、航太、地球科學、電腦、機器人等知識。國小時曾經以環保淨水的研究得到全國科展第三名，上了國中後除了在學校的數理資優課程吸收更多元的數理知識外，也參加機器人比賽和青少年發明展，得到不錯的名次。同時我仍一直持續在做科展研究，並以傳熱控制、磁力的緩衝作用、可變倍率透鏡等研究題目參加了北市科展、全國科展、2008 臺灣國際科展、及 2009 臺灣國際科展，得過全國科展第一名和臺灣國際科展工程學科第二名。從這些科展研究中，我樂於享受做實驗過程中的甘苦滋味。

經過這些歷練，我除了學到許多課堂上沒有教的知識外，我最大的收獲應該是培養了獨立思考和研究的能力，我會去思考如何瞭解問題，嘗試設計實驗的方法，解決自己實驗中所遇到的問題，還能自己設計一個完整的實驗程序，並耐心的做完整個實驗和分析。其實科學實驗在建立實驗設備和進行實驗的過程，時時都充滿了挫折感，尤其是兩三個月都找不到合適的材料或方法時，真的感受到那種深深的挫折感；不過，老話一句，只要有耐心，持之以恆，用心去體會過程，科學實驗其實還是很有趣的。

## 摘要

傳統光學玻璃透鏡的焦距和倍率都是固定，改變倍率必須靠多重透鏡組和改變鏡組距離。可變倍率透鏡則在單一透鏡中具有多重倍率，可讓光學器材簡單輕巧。我使用高彈性薄膜和高折射率液體，進行可變倍率液體透鏡的設計、分析和製作，並不斷地改進，讓其達到輕薄化、微小化及低成本的特性。同時我推導出液體透鏡之各種理論焦距與倍率，找出倍率與液量之關係，並以實驗驗證。

而像差是液體透鏡很難解決的問題。我透過電腦模擬和分析，建立減少液體透鏡像差的方法，並以實驗驗證此方法的可行性。研究中也設計發展出多項應用，包括成像教具、生物觀察器、非接觸式測距器、內視鏡、可調兩段式聰明眼鏡，對教學、日常應用、醫療保健等，都提供相當大的幫助。

## **Abstract**

Since the focus and magnification rate of the conventional optical lens are fixed, multi-lens set and distance-adjusting device must be used in lens set to change magnification rates. However, a variable magnification lens can have several magnification rates in a single lens to make the lens compact and convenient. In this research I used elastic membrane and high-refraction liquid to develop a variable magnification liquid lens. I also made several improvements to make the liquid lens light, compact and low-cost. The theoretical focus and the relationship between magnification rate and liquid amount were also derived, and the results were verified by several experiments.

Aberration was a big problem for the image quality of liquid lens. I proposed a solution to this problem for the designed membrane liquid lens by computer simulation and data analysis. The experimental results confirmed that the reduction of aberration was successful. At last, several applications of variable magnification lens were developed. These applications, including teaching aids, creature observer, non-contact distance measuring device, endoscope, and adjustable two-stage eyeglasses, are very helpful in teaching, daily use and health care.

## 壹、研究動機

平時在進行顯微鏡觀察或透鏡成像實驗時，常常得不斷變換各種倍率的透鏡，同時在高倍率下不容易搜尋到目標物。也常看到許多年長者得隨身有兩副不同倍率的眼鏡替換，十分不方便。因此我想到如果單片透鏡的焦距倍率可以任意調整，那顯微鏡觀察、成像實驗或日常使用等工作就方便多了。所以我進行可變倍率透鏡的設計。

經過去年的初步設計和製作後[5]，我設計製作出可變倍率液體透鏡，可透過液量的調整而改變透鏡的倍率。但在研究中我發現了液體透鏡還有許多問題尚未解決，包括：

1. 透鏡邊緣成像品質不佳；
2. 液體透鏡的應用不夠；
3. 有些應用需要更輕薄的透鏡等；
4. 液體透鏡的特性方程式

因此必須針對上述幾個問題，找出可行的解決方法，並對各種不同口徑的可變倍率液體透鏡建立完整的設計和分析的流程，讓可變倍率液體透鏡可以實際應用在日常生活中。

## 貳、研究目的及研究問題

去年我設計製作了可變倍率透鏡，但是在成像品質和應用上發現有許多問題，需要進行深入分析並找出解決方法，以提高可變倍率透鏡的成像品質，並進行透鏡的輕薄微小化。所以本研究對可變倍率透鏡的研究目的有五：

1. 物理特性之分析：

可變倍率液體透鏡的主要元素是薄膜和填充液，因此薄膜之光學特性與機械

特性，以及填充液之光學特性與化學特性，是主要的探討目標。

2. 理論倍率之探討：

可變倍率透鏡的焦距、倍率與填充液量的關係等，則必須進行相關的理論探討。

3. 球面像差改善：

像差影響高倍率下的成像品質，對液體透鏡更是難解決的問題，因此對於透鏡在各倍率下的球面像差計算、量測及改善進行了分析與探討。

4. 輕薄微小化：

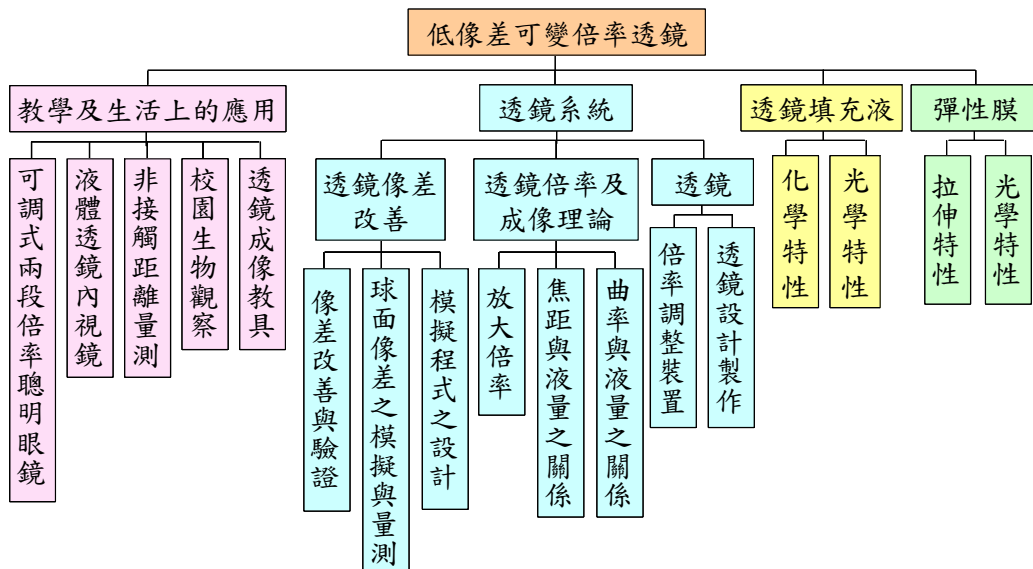
可變倍率透鏡必須輕薄、微小化，則其應用才會方便多元。因此研究中就可變倍率透鏡的輕薄化、微小化進行設計與製作。

5. 創新應用：

對具有可變倍率之功能的單片透鏡，發展出多項創新的應用，讓可變倍率透鏡的特色充分發揮。

在這個研究中，我將透過上面的五項研究子題，對薄膜式可變倍率液體透鏡進行整體的分析，並且提出詳細的理論推導、透鏡設計、特性模擬、系統製作、實驗分析，來充分探討可變倍率透鏡的理論與應用。研究的目標是要做出低像差的可變倍率透鏡，能有良好的成像品質，並在日常生活及教學上，有創新的應用。

各項研究目的和流程如下。



研究探討分項工作如下：

研究目的		研究項目
一	可變倍率透鏡可行性探討	1. 可變倍率透鏡的特性 2. 可變倍率透鏡的種類 3. 各種可變倍率透鏡的特性探討
二	液體透鏡理化性質探討	1. 彈性膜的選擇 2. 彈性膜的光學特性：透光度、散射度 3. 彈性膜的拉伸特性：彈性、降伏強度、拉伸強度 4. 填充液的光學特性：透光度、折射率 5. 填充液的化學特性：揮發性、毒性、腐蝕性
三	薄膜液體透鏡之設計	1. 第 1 代 ~ 第 4.5 代之設計與製作 2. 第 1 代 ~ 第 4.5 代之特點與規格
四	薄膜液體透鏡之理論	1. 透鏡內填充液之體積 2. 透鏡曲率與相對液量之關係 3. 透鏡焦距與相對液量之關係 4. 液體透鏡之放大倍率 5. 重力對彈性膜曲率的影響
五	透鏡之像差模擬分析與量測	1. 像差成因 2. 透鏡模擬程式之設計 3. 透鏡球面像差之模擬 4. 透鏡球面像差之量測
六	薄膜液體透鏡之像差改善	1. 透鏡像差改善方法 2. 像差改善之模擬分析 3. 像差改善之驗證
七	薄膜液體透鏡之應用	1. 透鏡成像教學教具 2. 校園生物觀察器 3. 非接觸式測距器
八	薄膜液體透鏡之輕薄微小化	1. 輕薄化之環片式液體透鏡 2. 微小化之立管式液體透鏡 3. 輕薄化之液體透鏡可調式兩段倍率聰明眼鏡 4. 輕薄化之液體透鏡內視鏡

### 參、研究設備及器材

研究項目	研究設備與器材
彈性膜的特性	雷射光筆、自製薄膜透光散射自動測量系統、自製彈性測量系統、Robolab 軟體、厚度計、薄膜拉伸測試機、薄膜透光量測儀
透鏡相差之改善	Matlab 軟體、透鏡模擬程式、自製像差測量儀、光纖觀察鏡

## 肆、研究過程或方法

### 研究一、可變倍率透鏡可行性探討

單片光學玻璃透鏡因為是固體透鏡，其焦距和倍率都是固定值，不具有可變倍率的功能。因此要設計出可變倍率透鏡，必須：

1. 透鏡介質的折射率可隨意改變；或
2. 以液體為介質，光線進入介質後偏折的折射角可隨意改變。

我蒐集了一些參考資料，經過研讀和討論後，想到幾個可能的解決方法，以下針對這些方法和優缺點逐項說明。

1. 透鏡介質的折射率可變：

可利用光彈效應。在環氧樹脂做成的薄透鏡上施加壓力時，環氧樹脂會有「光彈效應」，讓環氧樹脂的折射率改變，因此可以改變焦距。但光彈效應引起的折射率變化不太大，所得的倍率變化範圍有限。

2. 液體介質透鏡之光線折射角可變：

讓空氣和液體的接觸面是曲率可改變的曲面，而此曲面可分為液體曲面和膜片式固體曲面。

- (1) 液體曲面：

液體因為有表面張力，液體的表面可凸起或內凹，因此只要改變液體表層的物理性質，液體表面曲率便可隨意改變。可以採用的方法有：

- a. 電溼潤： Philips 公司研製出液體變焦光學鏡頭 FluidFocus [1,2]，使用兩種不相溶並具有不同折射係數的液體，靠著控制電壓產生電潤濕作用來改變兩液體面相接界面的曲率，達到改變焦距的目的。但這種鏡頭因為是靠導電液體與疏水層的電潤濕作用，僅適用於小口徑的鏡頭，電壓過大時內部易產生水泡，且高倍率下的像差問題無法解決，倍率無法太高，曲面的形狀無法控制。



b.介電性：此透鏡係由高介電係數和低介電係數之二種不互溶液體組成，並以等密度形式封裝於腔體內。當電場通過二液體之介面，藉由介電係數差異產生介電力，利用該介電力調變液珠之外形而達到焦距調變之目的 [3]。

## (2) 膜片式固體曲面：

以固體薄鏡片當作空氣和液體的接觸曲面，讓鏡片膨脹產生變形，鏡片會凸出，因此改變了鏡片的曲率和焦距。可以採用的鏡片材料和方法有：

- a. 熱脹式：利用高熱膨脹係數的金屬薄片，周圍固定，當溫度升高時，金屬的膨脹會造成材料的曲率改變。缺點是金屬的熱膨脹係數相對來說都不大，需要蠻高的溫度，才能造成明顯的材料曲率改變，同時材質多是不透明，因此可行性不高。
- b. 壓電式：利用壓電材料做成一個薄圓碟，周圍固定住且微凸，當加上電壓時，壓電材料會變形向外膨脹，造成薄圓碟壓電材料的曲率改變。雖然壓電材料可以用很小的電壓便產生變形，但壓電材料的變形量都很小，且因材料含鋇而不透明，所以這個方法可行性不高。
- c. 彈性薄膜：利用具有彈性的膜片形成囊袋，中間裝填透明液體；當擠壓囊袋或改變囊袋內之液體量時，膜片會向外擴張，使膜片之表面曲率改變，其焦距及倍率亦改變(如圖 1.1)。因為膜片容易變形，可以有很大的變形量，因此焦距的變化容易而且變化範圍大，是可行的方法。

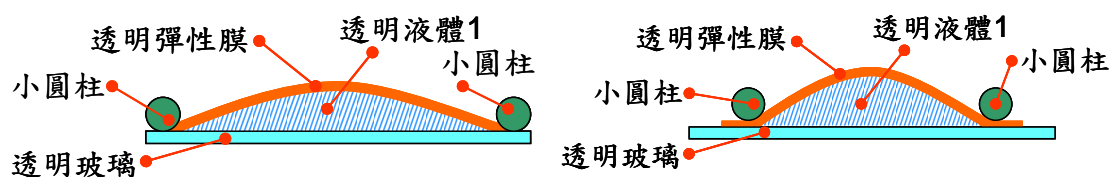


圖 1.1 可變倍率透鏡的方法概念圖

此外，可變倍率透鏡還必須具備高透光率和方便有效的倍率調整方式，因此我綜合這三項條件，對以上這 6 種可變倍率透鏡的可行性進行分析，並將特性整理如表 1.1，優缺點則整理在表 1.2。

表 1.1 各種可變倍率透鏡的特性

製作可變倍率透鏡之可行方案		使用方法	光線可產生任意偏折	高透光率	方便的控制方式
改變透鏡折射率	光彈效應	施加壓力→有「光彈效應」→折射率改變	X 折射率變化不大	○ 可找到透明材質	○ 壓力控制
改變接觸面曲率	液體曲面	電溼潤	○ 焦距變化容易且範圍大	○ 透明度高	○ 電壓電流控制
		介電性	○ 焦距變化容易且範圍大	○ 透明度高	○ 電壓電流控制
	膜片式固體曲面	熱膨脹	△ 需要高溫度	X 不透明	△ 溫度控制
		壓電	○ 只需小電壓	X 不透明	○ 電壓電流控制
		彈性薄膜	○ 焦距變化容易且範圍大	○ 透明度高	△ 液量控制

\*\* 可行性：○ 高， △：中， X: 低

表 1.2 各種可變倍率透鏡的優缺點

製作可變倍率透鏡之可行方案		優點	缺點	
改變透鏡折射率	光彈效應	透明、構造簡單	折射率變化不大、施加應力需較大功率、變焦範圍低	
改變接觸面曲率	液體曲面	電溼潤	透明度高、體積小、重量輕、易控制、變焦範圍高	小口徑、高電壓、易有氣泡產生、高倍率下有高像差、曲面形狀難控制
		介電性	透明度高、體積小、重量輕、易控制、變焦範圍高	小口徑、高倍率下有高像差、易有光軸偏移、易受重力影響、曲面形狀難控制
	膜片式固體曲面	熱膨脹	構造簡單	不透明、不易控制、需較大功率、變焦範圍低
		壓電	構造簡單、易控制	不透明、變焦範圍低
		彈性薄膜	透明度高、構造簡單、口徑範圍大、成本低、變焦範圍高、體積可微小化	液體易滲漏、需液量調整

根據表 1.1 和 1.2 的分析結果，我決定使用彈性薄膜和液體作為可變倍率透鏡的架構，原始的構造如圖 1.2，將圓形鏡筒分設計成上下兩格，中間以透明玻璃隔開，鏡筒上下端也是用圓形透明玻璃作為密封和保護。每一格中則裝有透明彈性膜，使每一格形成內外層兩個空間。內層空間灌入高折射率透明液體，外層則為低折射率透明液體或空氣。

當改變內層的液體量時，液體便壓迫彈性膜，讓彈性膜變形而凸起或凹下，因此改變了彈性膜的曲率。圖 1.3 是倍率改變的示意圖，各彈性膜可外凸或內凹，形成 9 種型式的凸透鏡 / 凹透鏡，如表 1.3。因此藉著控制上下彈性膜的凹凸，就可以得到非常大的焦距變化範圍。

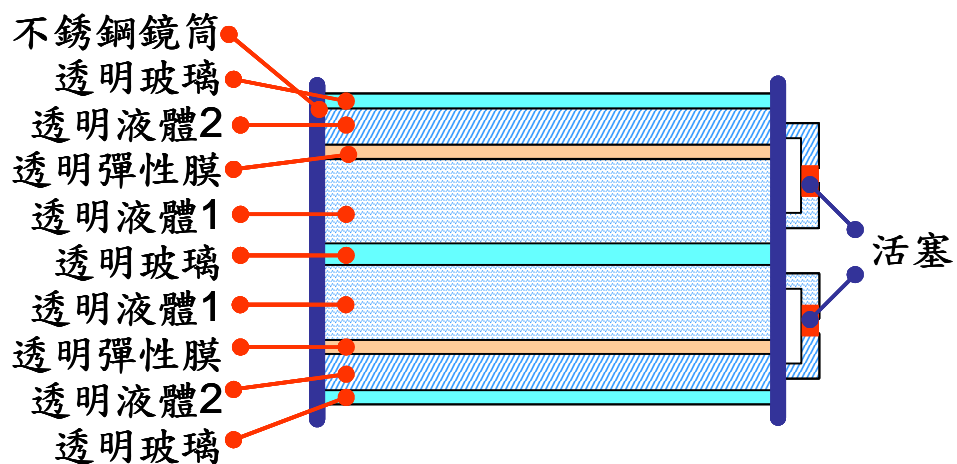


圖 1.2 可變焦距鏡片的架構圖

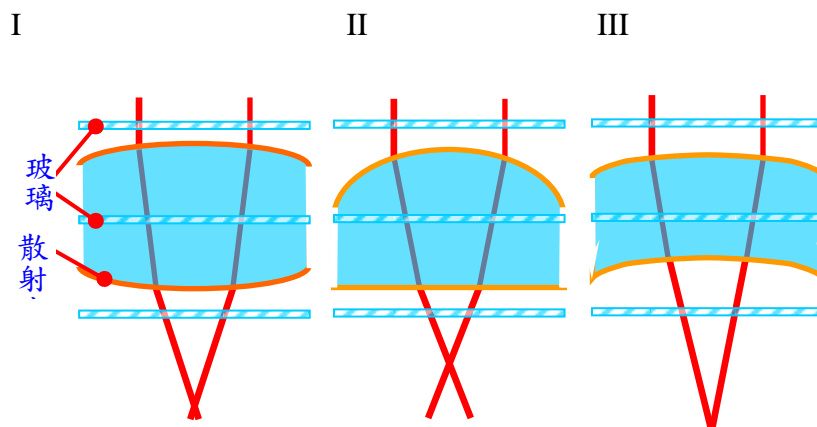


圖 1.3 彈性膜的凹凸與焦距變化

表 1.3 不同型式的凸、凹透鏡

不同型式的 凸、凹透鏡		上層彈性膜		
		凹	平	凸
下層 彈性膜	凹	雙凹	平凹	凹凸/凹凸
	平	平凹	平面	平凸
	凸	凸凹/凹凸	平凸	雙凸

## 研究二、液體透鏡理化性質探討

可變倍率透鏡的架構使用彈性薄膜和填充液體，薄膜和填充液的組合就有如傳統的光學鏡片，薄膜決定鏡片的表面曲率，填充液則決定鏡片折射率和鏡片厚度，因此必須對彈性薄膜和液體的物理化學性質進行實驗和分析，包括：

1. 彈性薄膜的光學特性：透光度、散射度；
2. 彈性薄膜的拉伸特性：彈性、降伏強度、拉伸強度；
3. 填充液的光學特性：透光度、折射率；
4. 填充液的化學特性：揮發性、毒性、對膜片腐蝕性。

### (一) 彈性薄膜的選擇

液體透鏡的薄膜會直接與液體接觸，因此透明、有彈性和防水是基本的三個選擇條件。

#### 1. 研究過程

(1)根據透明、有彈性和防水的基本三條件，找尋可以應用於研究中的薄膜。

(2)尋找的途徑有三種：

- a.根據自己生活經驗：包括保鮮膜(PVDC 聚偏二氯乙烯)、樹脂膜、矽膠膜、塑膠手套、乳膠手套；
- b.根據老師的建議：包括手機包膜、培養皿封膜、保險套；
- c.網路上搜尋：包括包裝膜(PVC 聚氯乙炔)、金屬保護膜、電腦鍵盤保護膜。

## 2. 研究結果

(1)對各種薄膜進行初步的觀察，其優缺點的質化評估如表 2.1。

表 2.1 各種薄膜的優缺點評估

類別	保鮮膜	樹脂膜	矽膠膜	塑膠手套	乳膠手套	手機包膜	培養皿封膜	金屬保護膜	鍵盤保護膜	保險套	包裝膜
透明度	○	△	△	△	×	○	×	×	△	×	○
彈性	×	○	○	△	○	×	×	○	○	○	○
防水性	○	×	○	○	○	○	×	○	○	○	○
** 可行性：○：高，△：中，×：低											

## 3. 研究小結論

(1)有些種類的薄膜的特性對使用於可變倍率透鏡上效果較不好，如表 2.2 所述。

表 2.2 不適用之彈性薄膜

	矽膠類薄膜		乳膠類薄膜	樹脂類薄膜
	矽膠膜、 金屬保護膜、 鍵盤保護膜	手機包膜	乳膠手套、保險套	樹脂膜
缺點	透明度不佳	材質較硬， 彈性很差	顏色淡黃，透明度差	遇水會溶化，防水性差

(2) 經過表 2.1 和表 2.2 的初步分析，有些薄膜不適合本研究的目的，因此研究中僅針對保鮮膜、樹脂膜、矽膠膜、塑膠手套、乳膠手套、培養皿封膜、包裝膜等 7 種薄膜進行量化的實驗分析。

## (二) 彈性膜的光學特性

薄膜式可變倍率透鏡所使用的薄膜需要高透光度，才能讓大部分光線透過，使成像清楚，但也需要具備低散射度，射入之光線才能集中，成像才能清晰。

我自製了一個薄膜透光散射自動測量系統，來測試薄膜的透光度和散射度。系統的原理是利用雷射光筆的光束照射薄膜中心，以光感測器在膜的另一端橫向等速掃過整片薄膜，量取薄膜中心橫軸上各點的光強度，結果會如圖 2.1 的曲線，曲線的峰值代表相對透光度，曲線底部寬度則可代表相對散射度(因為散射程度不容易定義，所以我使用光強度起始上升點到結束下降點之所需時間來代表散射程度)。

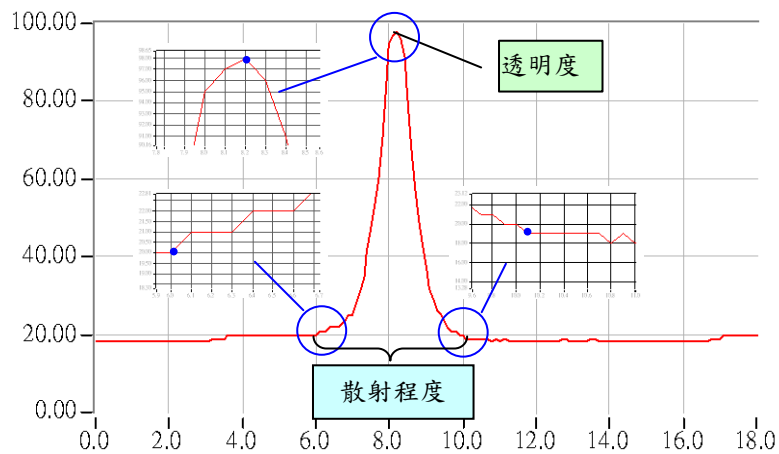


圖 2.1 由實驗結果曲線分析薄膜之透光與散射

### 1. 研究過程

#### (1). 製作薄膜試片：

將 7 種薄膜(保鮮膜、樹脂膜、矽膠膜、塑膠手套、乳膠手套、培養皿封膜、包裝膜)裁剪成 9 x 2 cm 的大小，再將硬塑膠片互摺，作成中間有 8.1 x 1.2 cm 窗口的樣板(如圖 2.2)，各種薄膜夾在樣板中間，變成薄膜試片；

(2). 製作測試平台：

自製測試平台如圖 2.3，包含薄膜試片插座、雷射光筆座、光感測器移動台，讓光感測器以橫向等速掃過薄膜試片，來量測薄膜試片橫軸上的光強度分布情形。

(3). 自動測試及記錄：

使用 Robolab 軟體撰寫控制程式，讓光感測器等速移動，每 0.1 秒量測光強度並自動記錄，等光感測器移動固定距離後，撞擊止擋開關，系統自動停止。

(4). 整理量測的數據，分析各種薄膜的透光度及散射度。

(5). 為了確定我的自製透光散射自動測量系統的實驗結果和實驗的準確性，我也使用了較高功率的薄膜透光測試儀(如圖 2.4)，測量通過薄膜之雷射光功率。

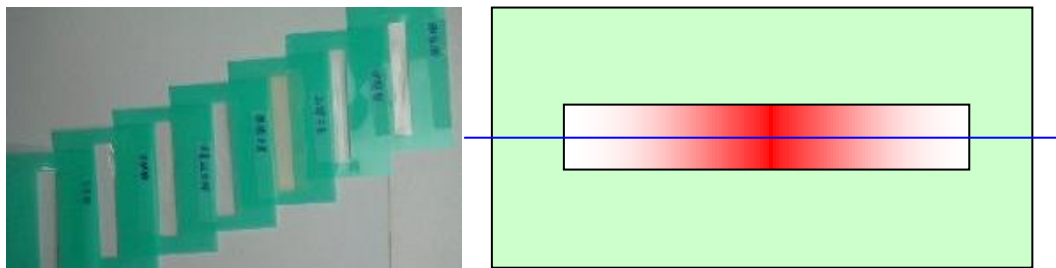


圖 2.2 薄膜試片及受雷射光束照射之示意圖

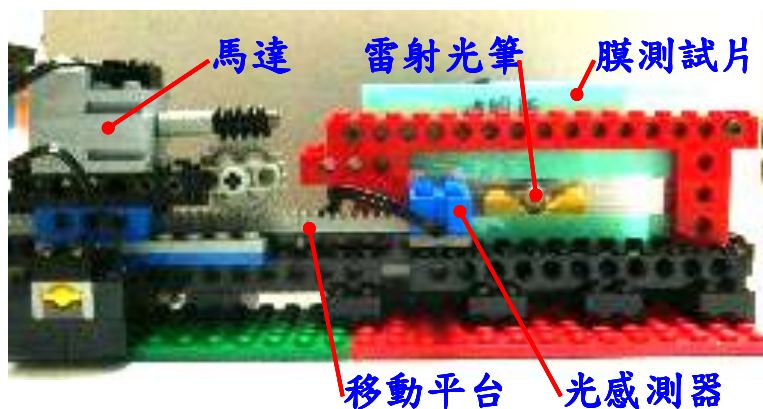


圖 2.3 自製薄膜透光散射自動測量系統



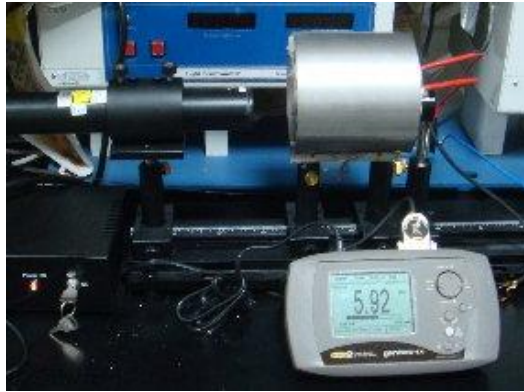


圖 2.4 薄膜透光測試儀

## 2. 研究結果

- (1) 自製的薄膜透光散射自動測量系統的效果很好，快速有效率的測量透光度及散射度，並自動記錄實驗數據。
- (2) 薄膜之透光度結果比較在圖 2.5，其中圖(a)是自製測試器量測出來的結果，圖(b)為透光測試儀量測出來的結果，可看出自製測試器量測出的結果有相當參考性。散射度結果比較在圖 2.6。
- (3) 由圖 2.5 及 2.6 可看出各種薄膜中，透光度以保鮮膜和包裝膜最好，乳膠手套最差；散射程度以包裝膜最低，樹脂膜最高。其中包裝膜和保鮮膜的透光散射度都非常接近空氣的透光散射度。

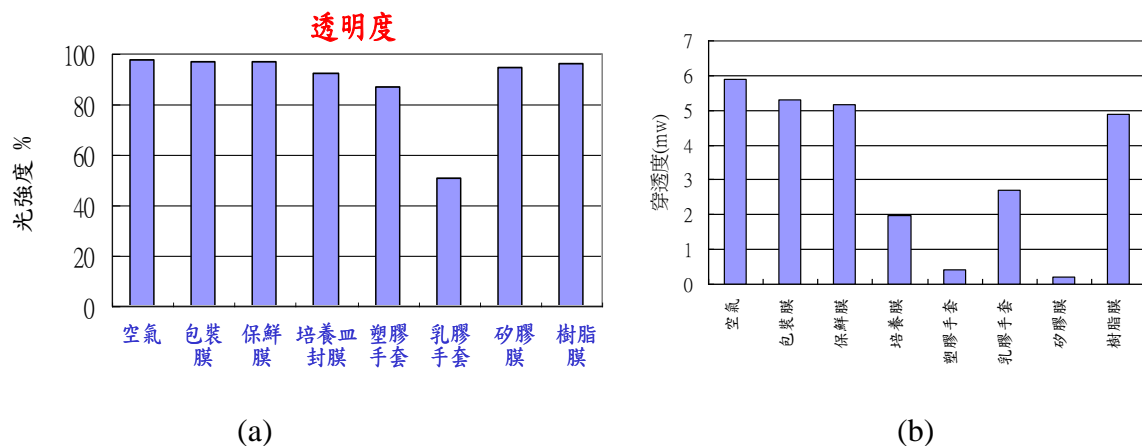


圖 2.5 各種薄膜之透光度比較 (自製儀器及薄膜透光測試儀)

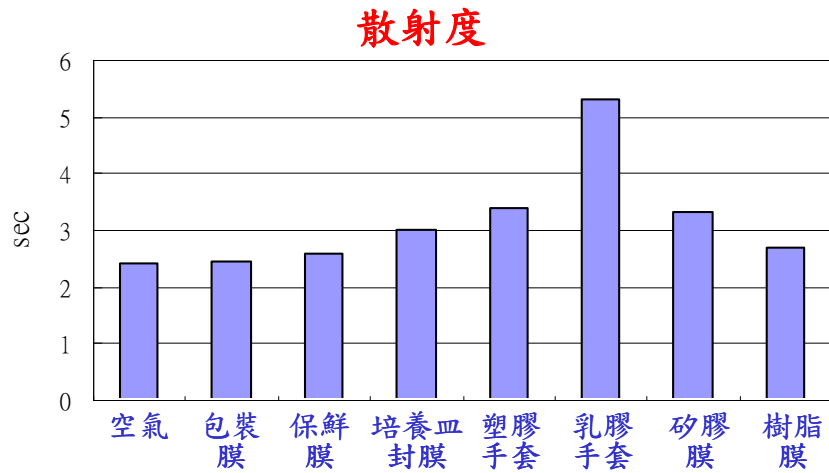


圖 2.6 各種薄膜之散射程度比較

### (三) 彈性膜的拉伸特性

薄膜靠內部填充液的壓力而外脹或內縮，薄膜會變形甚至破裂，因此要考慮薄膜的彈性大小、降伏強度及拉伸強度。彈性物質的受力和變形量的關係為：

$$F = k \cdot x$$

其中  $F$  是施力， $x$  是彈性體變形量， $k$  是彈性係數。因此只要改變施力  $F$ ，並記錄薄膜變形量，便可以求得薄膜的彈性係數。而彈性物質受力後產生彈性變形，等外力移除後，會回復原來長度；但是如果施力超過降伏強度，彈性物質就會產生永久變形。

薄膜的彈性係數  $k$  愈小，表示較小的施力就可以產生同樣的變形量，因此更適用於可變倍率透鏡，但必須知道薄膜的降伏強度，以免薄膜產生永久變形讓透鏡無法使用了。因為有些膜片韌性蠻大，拉斷時的力量甚大且彈簧秤易抖動，因此我改用膜片拉斷時的變形量，並用各膜片的彈性係數來求出薄膜的拉伸強度(這種作法會有些誤差，但僅比較各薄膜的相對強度，所以影響不大)。

## 1. 研究過程

- (1) 將各薄膜裁剪成 10 x 2 cm 的試片，並在各試片上作兩記號點，相隔 4cm(如圖 2.7)。
- (2) 將試片兩端各自黏在固定棒上，一端固定，另一端用彈簧秤往外拉，施給試片張力(如圖 2.8)。
- (3) 彈簧秤分別施力 100、200、300、400、500 gw 的力量。
- (4) 量測每次施力時的試片變形量；再移除施力，量測試片永久變形量；
- (5) 對各試片重覆(2)~(4)之實驗步驟後，整理實驗數據，並畫出曲線圖。
- (6) 為了確定我的實驗的正確性，我也使用了拉伸試驗機(如圖 2.9)，測量各種薄膜之拉伸特性。



圖 2.7 各種薄膜的試片

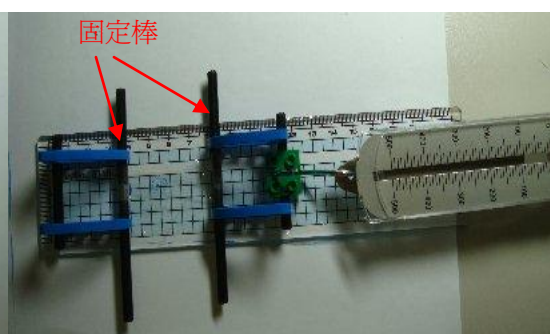


圖 2.8 薄膜試片的簡易拉伸實驗



圖 2.9 拉伸試驗機及試片模板

## 2. 研究結果

- (1) 由各薄膜的拉伸實驗的數據，繪出包裝膜等之變形量曲線圖(如圖 2.10)。
- (2) 由圖 A3 各曲線的斜率，可計算出各種薄膜的彈性係數；而由表 A3 中各薄膜的破裂時變形量，再乘上各薄膜的彈性係數，可概略求出各薄膜拉伸強度。
- (3) 各薄膜的彈性係數、降伏力、拉伸強度整理在表 2.4，並繪出拉伸特性比較圖(圖 2.11)。
- (4) 由圖 2.11 可看出包裝膜、矽膠膜、樹脂膜的彈性係數最低，而保鮮膜和塑膠手套的彈性係數很高，代表要較大的力量才能讓薄膜產生變形，因此不利於用在液體透鏡中。
- (5) 在強度部分，圖 2.11 可看出塑膠手套和乳膠手套的強度最好，不易斷裂；而培養皿封膜、樹脂膜的強度差，很容易便拉破，不適合用於透鏡中。

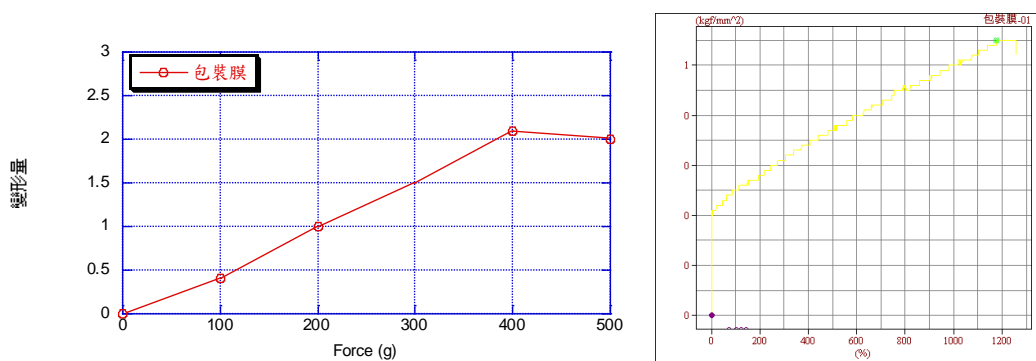


圖 2.10 包裝膜的彈性變形量 ( $F=190X$ )

表 2.4 各薄膜之彈性係數、降伏力、破裂時變形量和拉伸強度

	包裝膜	保鮮膜	培養皿封膜	塑膠手套	乳膠手套	矽膠膜	樹脂膜
彈性係數(gw/cm)	190	1250	---	2500	357	51	37
降伏力(gw)	300	> 500	400	200	200	> 500	100
破裂時變形量(cm)	7.1	1	0.2	10.3	28	15.0	15.4
拉伸力(gw)	1349	1250	400	25750	9996	765	570

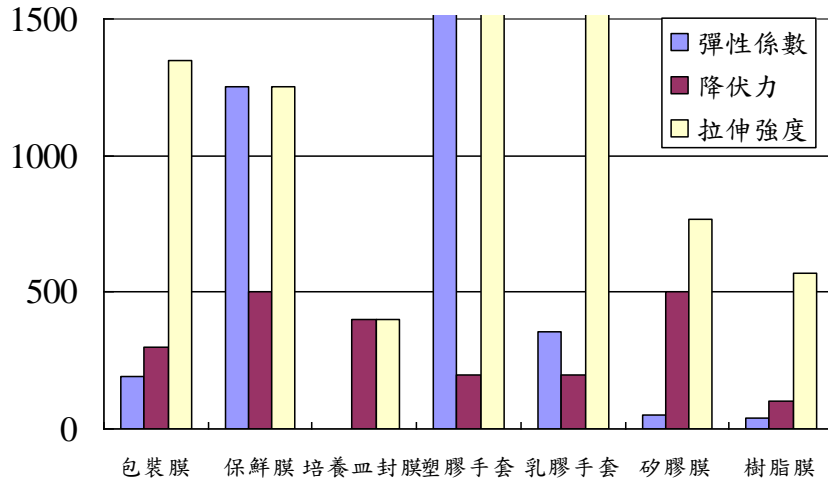


圖 2.11 各薄膜的彈性和強度之比較 (\*部分數值超過 1500g，僅畫至 1500g)

### 研究二.(一)~(三)結論：最佳透鏡薄膜之選擇

研究二.(一)~(三)的各項結果中，將各薄膜的特性整理在表 2.5 中，並依程度給予名次排序，最後再將排序相加(透明度和低散射度對透鏡很重要，所以給兩倍的加權值)，總和最低者代表是可應用在液體透鏡上的最佳薄膜。依表 2.5 之結果，包裝膜為最佳之薄膜，因此後續之研究都使用包裝膜。

表 2.5 各薄膜的特性排序

類別	高透明度	低散射程度	彈性	降伏力	拉伸強度	排比總和	總排比
包裝膜	1	1	3	3	3	13	1
保鮮膜	1	5	5	1	4	22	3
培養皿封膜	4	4	7	2	7	32	5
塑膠手套	5	5	6	4	1	31	4
乳膠手套	6	6	4	4	2	34	6
矽膠膜	3	3	2	1	5	20	2
樹脂膜	2	2	1	5	6	20	2

#### (四) 填充液體的光學及化學特性

可變倍率透鏡中的填充液決定了透鏡折射率和透鏡厚度，若要有較大倍率的放大，鏡片的折射率要大，也就是填充液的密度要大才能有較大的折射率。因此在考量填充液的選擇上，要考量的因素有

1. 填充液的光學性質：包括密度及折射率。
2. 填充液的化學性質：包括對膜片腐蝕性、揮發性、毒性。

##### 1. 研究過程

- (1) 由書籍中找出折射率較高之液體。
- (2) 參考 MSDS 表，找出各液體之密度、腐蝕性、揮發性、毒性。

##### 2. 研究結果

- (1) 可用之液體包括、丙醇、甲醇、乙醇、苯、二硫化碳、四氯化碳、三氯甲烷、乙醚、甘油、松節油、橄欖油。
- (2) 根據 MSDS 表及參考資料，各種液體的密度、透光度、對膜片腐蝕性、低揮發性(高沸點)、毒性、安定性(自燃溫度、閃火點)等整理如表 3.1。
- (3) 根據表 3.1 之整理結果，填充液以甘油及水較為理想。

表 2.6 填充液各種性質

	分子式	密度	折射率	透光度	低揮發性 (沸點)	自燃 溫度	閃 火 點	無腐蝕性/ 無毒性
乙醚	$C_2H_5 \cdot O \cdot C_2H_5$	0.7135	1.3538	○	35	170	-45	×
丙醇	$CH_3COCH_3$	0.785	1.3593	○	82.3	399	12	×
甲醇	$CH_3OH$	0.79	1.3290	○	64.7	385	12	×
乙醇	$C_2H_5OH$	0.789	1.3618	○	78.4	363	13	×
松節油	$C_{19}H_{16}$	0.86	1.4721	○	154	253	35	×
橄欖油		0.92	1.4763	△				○
水	$H_2O$	1.00	1.3330	○	100			○
甘油	$C_3H_8O_3$	1.260	1.4730	○	290			○
二硫化碳	$CS_2$	1.263	1.6276	○	46.3		-30	×
三氯甲烷	$CHCl_3$	1.484	1.4467	○	61			×
四氯化碳	$CCl_4$	1.594	1.4607	○	76.5			×
苯	$C_6H_6$	0.877	1.5012	○	80	498	-11	×

### 研究三、薄膜液體透鏡之設計

可變倍率透鏡系統最重要的考量因素有：

- (1) 透鏡必須考慮能將膜緊壓，防止填充液滲漏出來。
- (2) 透鏡須能重覆拆解及組合，便於更換薄膜。
- (3) 透鏡之薄膜必須能夠快速、安全、方便地更換，且安裝時不可損傷薄膜。
- (4) 透鏡體積及重量盡量輕薄短小。
- (5) 具有便利的調整填充液量的方式。

#### 1. 研究過程

- (1) 根據上述考量，進行液體透鏡的設計與製作。
- (2) 液體透鏡必須防止填充液滲漏，因此透鏡接合處必須使用橡膠油封環。
- (3) 上下兩透鏡組接合的方式：
  - a. 不能使用內外螺牙的旋轉接合方式，否則會扭曲薄膜而損傷；
  - b. 不能使用緊配或卡榫，否則無法拆解來更換薄膜(除非是低成本之用完即拋式)；

c. 僅能用螺絲鎖緊的方式。

## 2. 研究結果

- (1) 第一代液體透鏡如圖 3.1，透明壓克力與薄膜皆固定在鏡筒上。但第一代設計無法替換薄膜。
- (2) 第二代(如圖 7.2)將液體透鏡模組分為上中下三個單元，組合成雙透鏡，中間單元包含一個玻璃片，其他空間裝滿填充液。上下單元為相同之設計，不裝填充液，用來夾緊薄膜和防止薄膜被損壞。兩薄膜夾在各單元間，加上 O 型環，再用螺絲鎖緊，即可防止填充液滲漏。

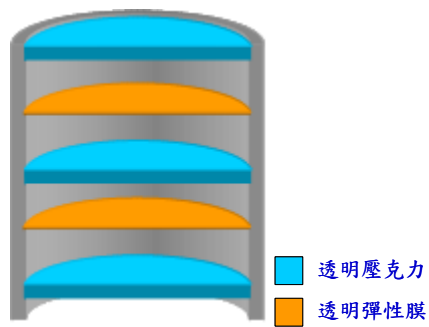


圖 3.1 第一代液體透鏡模組設計

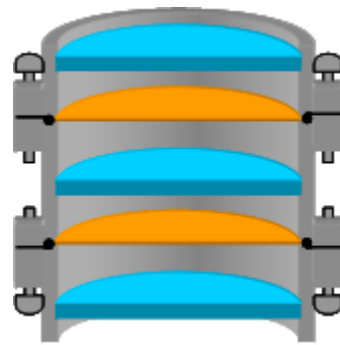


圖 3.2 第二代液體透鏡模組設計

- (3) 圖 3.3 為第三代設計，將透鏡改為單凸透鏡，每個單凸透鏡由相同的兩個單元互相接合在一起，兩單元間夾緊薄膜，所以全部透鏡為四個相同的單元，簡化了透鏡的製作，也容易有單一透鏡的組合或雙凸透鏡的組合，使用上彈性更大。第三代的實體液體透鏡模組如圖 3.4。經過實際測試，確定可以連續改變液體透鏡的倍率，且成像清楚，放大倍率目前在 10 倍左右(圖 3.4)。

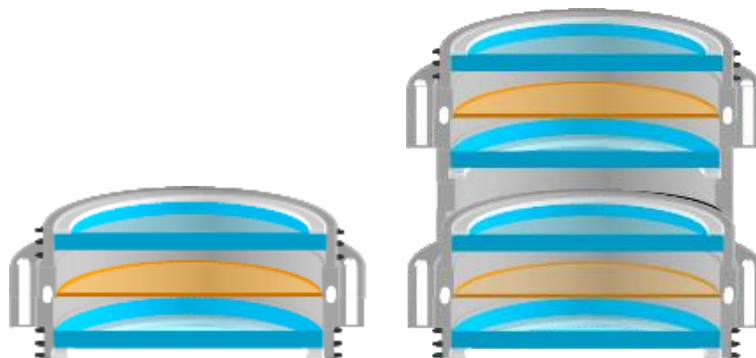




圖 3.3 第三代液體透鏡模組設計

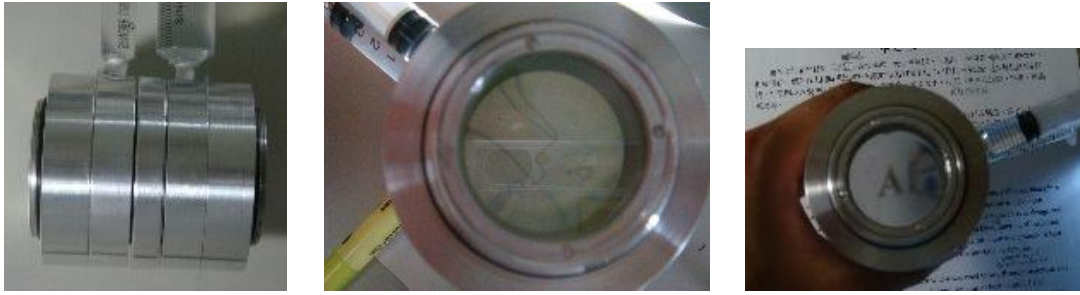


圖 3.4 完成之第三代液體透鏡模組和可變焦距鏡片系統

- (4) 第四代可變倍率透鏡(如圖 3.5)，由上中下三個單元接合在一起，上下為完全相同的單元。每兩單元間夾緊薄膜，中間單元則鑽有小孔，讓填充液進出。整個液體透鏡體積大為縮小，方便使用與攜帶。
- (5) 第四代的詳細設計圖在圖 3.6，實體液體透鏡模組如圖 3.7。我更進一步將原先的鋁合金材質改用較輕的塑鋼，完成第 4.5 代，重量為原先的一半，僅有 29 克。
- (6) 第四代液體透鏡模組可以連續改變液體透鏡的倍率，可清楚的看見螞蟻細部構造(圖 3.8a)，或印刷文件的頁面網紋(圖 3.8b)，且成像清楚，放大倍率約 15 倍左右(部分影像略模糊是因為數位相機使用近拍模式，景深淺，相機無法各點都對焦清楚)。
- (7) 從第一代至第四代的特點及改進整理於表 3.1。
- (8) 調整液體透鏡填充液量的方法，則設計有手動滾輪法及簡易囊袋法，如圖 3.9。

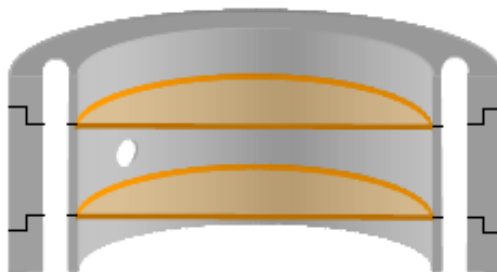


圖 3.5 第四代液體透鏡模組設計

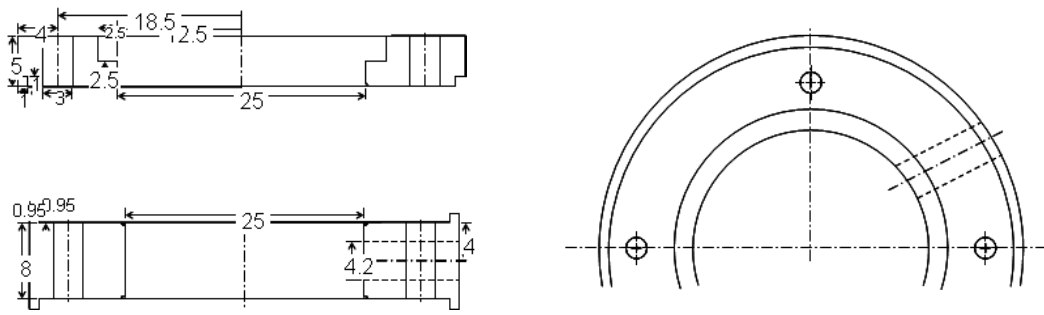


圖 3.6 第四代液體透鏡模組設計草圖

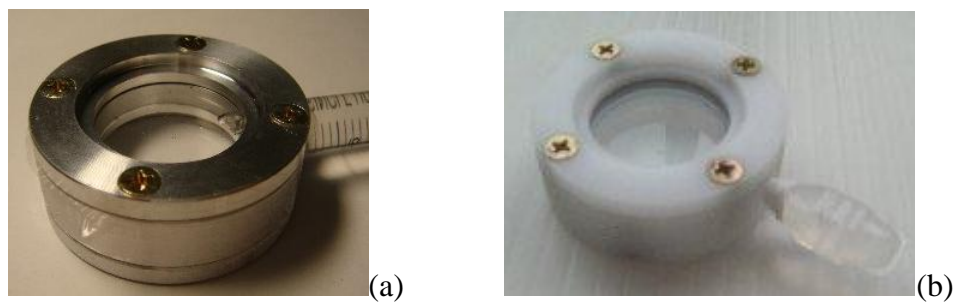


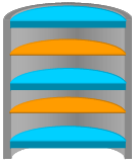
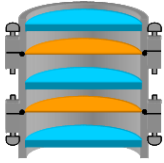
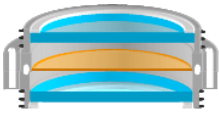
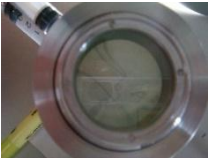
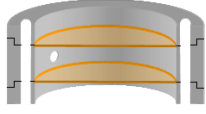

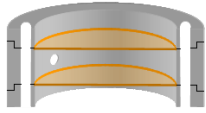

圖 3.7 第 4 代鋁合金液體透鏡模組(a) 及 第 4.5 代塑鋼液體透鏡模組(b)



(a) 螞蟻細部構造 (b) 12 號英文字及印刷文件的頁面網紋

圖 3.8 第四代液體透鏡模組的效果

表 3.1 各代可變倍率透鏡之特點及規格

	型式	透鏡實體	特點	規格
第 1 代			體積大 無法更換薄膜	口徑 D=30mm 重量 W=**g 倍率 M=14
第 2 代			模組化設計 體積較大	口徑 D=30mm 重量 W=**g 倍率 M=14
第 3 代			體積小 模組化設計，可彈性裝配 各單元均相同，簡化製作	口徑 D=30mm 重量 W=131.05g 倍率 M=10
第 4 代			體積小 可快速組合 更換薄膜僅 1 分鐘 鋁合金材質	口徑 D=25mm 重量 W=58.6g 倍率 M=15
第 4.5 代			體積小 可快速組合 更換薄膜僅 1 分鐘 塑鋼材質	口徑 D=25mm 重量 W=29.95g 倍率 M=15

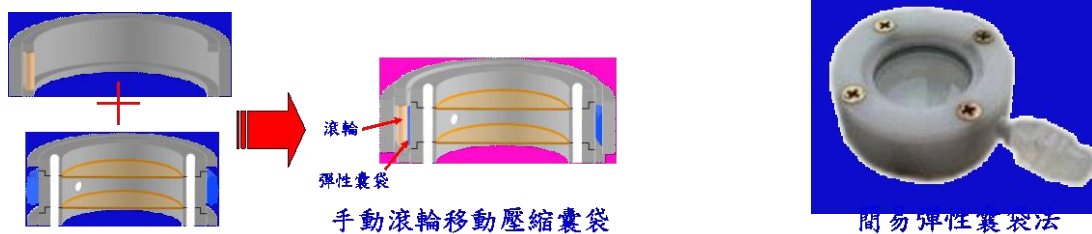


圖 3.9 液體透鏡填充液量的調整方法

## 研究四、薄膜液體透鏡之基本理論

可變倍率透鏡完成後，必須進一步探討其曲率變化與填充液量關係、焦點、放大倍率、重力的影響等，包括下列 5 項：

1. 透鏡內填充液之體積
2. 透鏡曲率與相對液量之關係
3. 透鏡焦距與相對液量之關係
4. 液體透鏡之放大倍率
5. 重力對彈性膜曲率的影響

### 一、透鏡內填充液之體積

若液體透鏡(圖 4.1)的曲率半徑為  $r$ ，透鏡半徑為  $r_d$ ，厚度為  $dx$ ，透鏡凸出部分為球面，凸出距離為  $e$ ；則厚度為  $dx$  的圓碟面積

$$= \pi \cdot r_d^2 \cdot dx = \pi \cdot r_d^2 \cdot dx$$

因為  $r_d^2 = r^2 - x^2$ ，故半徑  $r_d$  之圓碟面積 =  $\pi \cdot r_d^2 = \pi(r^2 - x^2)$

則透鏡內填充液之體積 = 球弧的體積  $V_d$

$$V_d = \int_{x_0}^{x_f=r} \text{圓碟面積} \cdot dx = \int_{x_0}^{x_f=r} \pi(r^2 - x^2) \cdot dx = \pi \int_{x_0}^{x_f=r} (r^2 - x^2) \cdot dx$$

$$= \pi \cdot \left[ \int_{x_0}^{x_f=r} r^2 \cdot dx - \int_{x_0}^{x_f=r} x^2 \cdot dx \right] = \pi \cdot \left[ r^2 \int_{x_0}^{x_f=r} dx - \int_{x_0}^{x_f=r} x^2 \cdot dx \right]$$

$$= \pi \cdot \left[ r^2 \cdot x \Big|_{x_0}^{x_f=r} - \frac{x^3}{3} \Big|_{x_0}^{x_f=r} \right] = \pi \cdot \left[ r^2 \cdot (x_f - x_0) - (x_f^3 - x_0^3) / 3 \right]$$

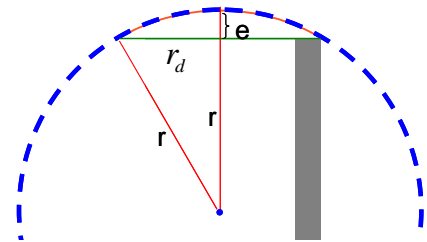


圖 4.1 液體透鏡各距離之關係

$$\text{即 透鏡內填充液之體積} = V_d = \pi \cdot \frac{e}{2} \left( \frac{e^2}{3} + r_d^2 \right) \quad \text{--- (1)}$$

## 二、透鏡曲率與相對液量之關係

改變透鏡內的填充液量時，會使薄膜表面外張或內縮而形成球面，也改變了透鏡的表面曲率，形成不同的倍率和焦距。但是填充液量的改變與薄膜曲率和透鏡焦距存在何種關係呢？

由圖 4.1 可知  $r^2 = (r - e)^2 + (r_d)^2$ ，或是  $2er = e^2 + r_d^2$ ，

則薄膜外擴距離  $e = r - \sqrt{r^2 - r_d^2}$

或曲率半徑  $r = \frac{e^2 + r_d^2}{2e} = \left[ e + \frac{r_d^2}{e} \right] / 2 \quad \text{--- (2)}$

但薄膜外擴距離  $e$  和填充液改變量  $\Delta q$  的關係，此部分需要透過實驗，用實驗值來找出關係式。

實驗的設計是以兩道互相平行的雷射光束通過液體透鏡，並調整透鏡位置讓光束集中於焦點，然後量出焦距和薄膜外擴量。但實驗前要先進行器材的校正。

### (1) 液體透鏡的量測實驗之校正

- a. 光點校正：雷射光筆的光點太大且模糊。校正方法是將光筆的前端貼上黑膠帶，再以針刺出小孔，來減小光點，如圖 4.2；結果證明雷射光筆的光點變得細小且清晰。
- b. 光束平行校正：市售的雷射光筆的光軸和光筆並不是完全平行，所以要先進行光軸校正，讓兩隻雷射光筆的光束互相平行。校正方法是：
  - (a) 將兩隻雷射光筆綁在一起，讓兩道雷射光束射向 20 公尺遠方的屏幕；
  - (b) 在兩隻雷射光筆中間插進楔形塊並調整，讓兩道光束彼此的距離在射出口和在屏幕都是相等(12.1 mm)，即完成校正。
- c. 透鏡薄膜平直校正：薄膜平直時，垂直薄膜平面的平行光線通過時，不會有折射現象，光線仍然平行。校正方法是：
  - (a) 讓液體透鏡擺在校正過的兩支雷射光筆前；

(b) 調整液體量，直到屏幕上兩光束之間的距離為 12.1 mm，如圖 4.3，即完成校正，此時薄膜為平直狀態，液體透鏡為平面鏡。

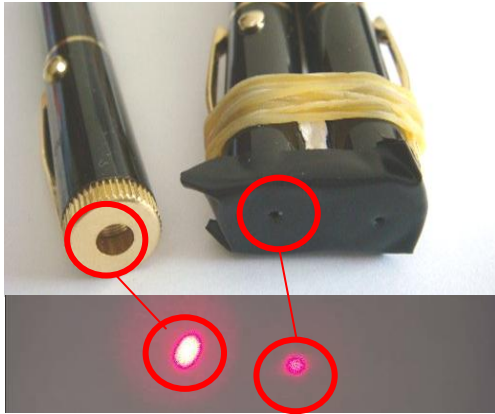


圖 4.2 雷射光筆的光點改善方法及結果



圖 4.3 液體透鏡薄膜平直之校正

## (2) 薄膜外擴距離和填充液改變量的關係

以上述校正過之雷射光筆和透鏡，測量不同填充液改變量下的薄膜外擴距離。實驗中以 0.5 ml 為單位，逐次改變液體透鏡的填充液量，並用游標卡尺測量薄膜中心的外擴距離。

實驗的結果如圖 4.4，可發現薄膜外擴距離  $e$  和填充液改變量  $\Delta q$  的關係近似直線。此一實驗曲線的擬合關係式為：

$$e = 0.2638 + 1.757 \cdot \Delta q \quad \text{或近似為} \quad e = 1.9 \cdot \Delta q \quad \text{--- (3)}$$

第四代液體透鏡之  $r_d = 12.5\text{mm}$ ，則由式(2)和(3)，可得到薄膜曲率  $r$  (mm)

與填充液改變量  $\Delta q$  (c.c.) 的關係為：

$$r = \frac{e^2 + r_d^2}{2e} = 0.95 \cdot \Delta q + \frac{41.1}{\Delta q} \quad \text{或} \quad \Delta q = 0.526 \cdot (r - \sqrt{r^2 - r_d^2}) \quad \text{--- (4)}$$

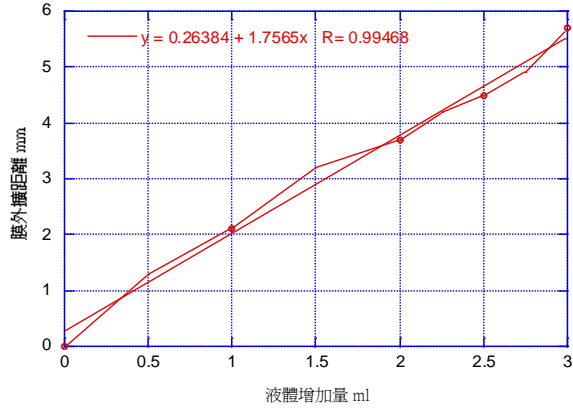


圖 4.4 薄膜外擴距離  $e$  和液體填充量  $\Delta q$  的關係

由實驗及推導的結果顯示薄膜外擴距離  $e$  和填充液改變量  $\Delta q$  約略成正比關係，而曲率半徑  $r$  和填充液改變量  $\Delta q$  約略成反比關係，無填充量時，薄膜為平直，因此曲率半徑無限大；當填充量愈大，薄膜愈外凸，因此曲率半徑愈小。

### 三、透鏡焦距與相對液量之關係

改變透填充液量時，透鏡的焦距和倍率隨之改變。但是填充液改變量與透鏡焦距的關係式為何？

#### 1. 薄膜液體透鏡之理論焦距

第四代薄膜液體透鏡視為一個球面雙凸薄透鏡，若僅考慮光軸附近的光線，即符合近軸光學(paraxial theory of geometrical optics)，則其焦距可由幾何光學中高斯光學(Gauss Optics)求得 [6,7]。

對球面雙凸透鏡的焦距，由造鏡者公式(lens makers' formula)求得：

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left[ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{n-1}{nR_1R_2} d \right] \quad \text{--- (5)}$$

其中

$f$ ：為焦距，即主平面 H 至焦點 F 的距離 (如圖 4.5)

$n$ ：透鏡之折射率

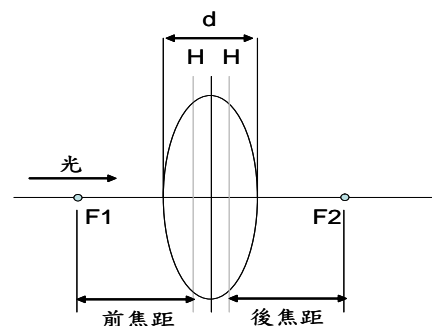


圖 4.5 透鏡的焦距與主平面



$R_1$ 、 $R_2$ ：透鏡前後兩邊鏡面之曲率半徑

$h$ ：透鏡鏡身厚度

$d$ ：透鏡厚度， $d = h + 2e$

在液體透鏡中，光線會經過空氣、薄膜和填充液三種介質，因為薄膜的厚度僅有 0.02 mm，厚度可忽略，因此僅考慮空氣及填充液的折射率。若液體透鏡兩面對稱，因此令曲率半徑  $R = R_1 = -R_2$ ，所以式(5)可簡化為：

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left[ \frac{2}{R} - \frac{n-1}{nR^2} d \right] = (n-1) \left[ \frac{2}{R} - \frac{n-1}{nR^2} (h+2e) \right] \quad \text{--- (6)}$$

$$\text{或} \quad f = \frac{nR^2}{(n-1) \cdot [2nR - (n-1) \cdot [h+2e]]} \quad \text{--- (7)}$$

因為  $e = R - \sqrt{R^2 - r_d^2}$ ，則透鏡理論焦距為：

$$f = \frac{nR^2}{(n-1) \cdot [2nR - (n-1) \cdot [H + 2(R - \sqrt{R^2 - r_d^2})]]} \quad \text{--- (8)}$$

若薄膜液體透鏡的厚度夠薄 (< 6mm)，可適用薄透鏡成像公式(thin lens formula)，則透鏡理論焦距可修正為：

$$f = \frac{R}{2(n-1)}$$

## 2. 薄膜液體透鏡之實際焦距

### (1) 研究過程

- a. 將液體透鏡擺在校正過的兩支雷射光筆前，以 0.5 ml 為單位，逐次改變液體透鏡的填充量(如圖 4.6)。
- b. 在每個填充量下，前後移動液體透鏡，讓屏幕上的兩光點合為一點，此

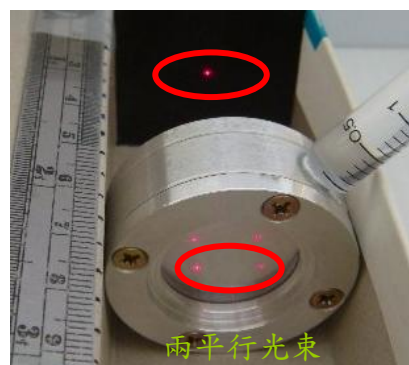


圖 4.6 液體透鏡焦距的量測方法



時光點位置即為液體透鏡在此填充量下的焦點，而焦點與鏡心的距離即為焦距。

(2) 研究結果

- a. 實驗結果如表 4.1 和圖 4.7。由圖 4.7 中，可發現焦距和填充液改變量的關係為：

$$f = 47 \cdot (\Delta q)^{-0.8} \quad \text{或近似於} \quad f \cdot \Delta q = 47 \quad (9)$$

顯示焦距和填充液增加量約略成反比關係，即填充量愈大，薄膜愈外凸，因此焦距愈短。

b. 表 4.1 同時列出各種填充液改變量下，焦距的量測值、理論值、和兩者的誤差；在圖 4.8 中，也顯示焦距量測值、理論值、和曲率半徑對填充液改變量的關係。由結果可知，焦距的量測值和理論值之最大誤差在 20% 左右，這個誤差的原因是因為理論焦距是從假想的主平面到焦點的距離，但是在實際量測時是從鏡心到焦點的距離，因此會有大約 20% 的焦距誤差。

表 4.1 不同填充液量下之焦距量測值和理論值

條件	填充液增加量 (ml)							
	0.5	1	1.5	2	2.25	2.5	2.75	3
焦距量測值 mm	88.625	43.325	31.525	26.925	24.725	22.325	21.325	20.225
焦距理論值 mm	62.464	38.466	25.254	21.916	19.414	18.198	16.829	14.730
焦距誤差	29.5%	11.2%	19.9%	18.6%	21.5%	18.5%	21.1%	27.2%

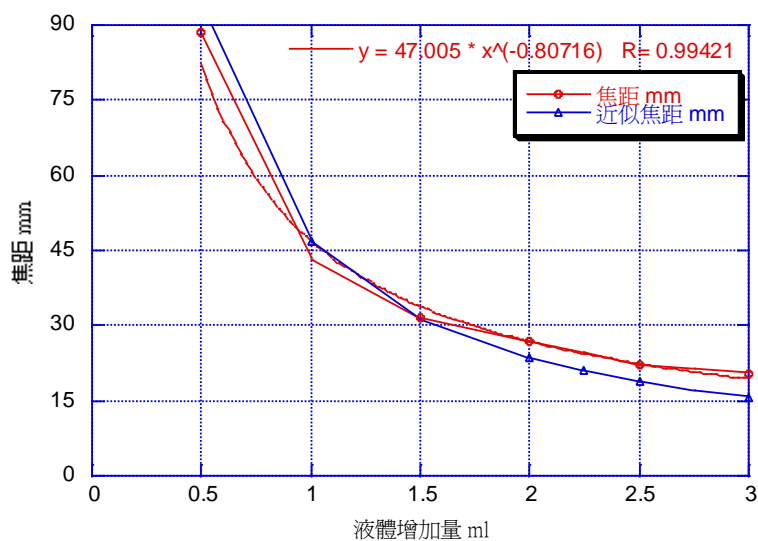


圖 4.7 第四代液體透鏡焦距和液體填充量關係

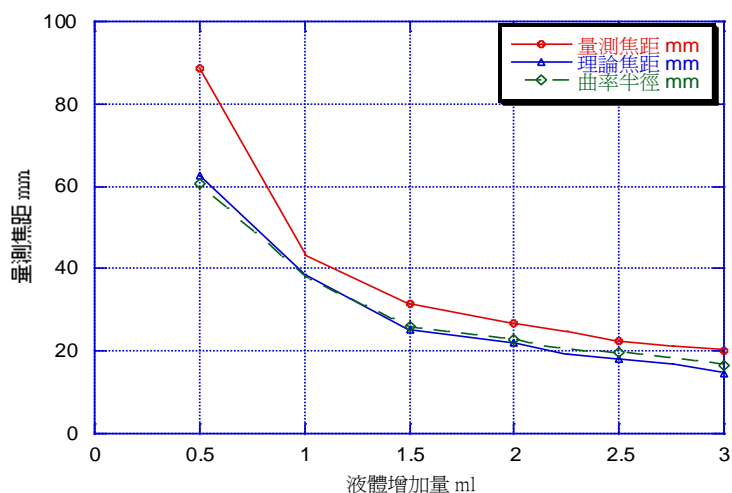


圖 4.8 焦距量測值、理論值、和曲率半徑對填充液改變量的關係

#### 四、液體透鏡之放大倍率

液體透鏡的放大倍率為： $m = \frac{-250}{f} (mm)$ ，其中“-”代表虛像 [6]。若將液體透鏡的理論焦距值和實驗值代入，則可得到液體透鏡的理論放大倍率和實際放大倍率，如表 4.2。因此可知單一液體透鏡的放大倍率可由 1 倍到 13 倍，若是兩個液體透鏡一起使用，其放大倍率將可達 40 倍，已可達到生物顯微鏡的程度，證實液體透鏡有很好的可變倍率功能。

表 4.2 不同填充液量下之放大倍率量測值和理論值

比較項目	填充液增加量 (ml)							
	0.5	1	1.5	2	2.25	2.5	2.75	3
放大倍率	2.821	5.770	7.930	9.285	10.111	11.198	11.723	12.361
理論放大倍率	4.002	6.499	9.899	11.407	12.878	13.738	14.855	16.972

#### 五、重力對彈性膜曲率的影響

薄膜液體透鏡因內有約 12g 的填充液，當透鏡在非水平的狀態下，此重量是否會使薄膜各點受力不均，使透鏡的球面變形，而焦距改變呢？因此我設計了一個簡易旋轉測量系統，可以把簡易的液體透鏡管安裝在旋轉盤上，利用兩平行雷射光束來觀測焦點的位置。

## 1. 研究過程

- (1) 將液體透鏡管安裝在簡易旋轉測量系統上。
- (2) 旋轉盤傾斜角度分別為 0(水平)、30、45、60、90(側放)、120、135、150、180 度(倒立)，觀察薄膜的曲面是否變形，並量測記錄焦距的改變量。

## 2. 研究結果

- (1) 實驗的結果如圖 4.9。
- (2) 由實驗中各角度下的焦點位置可知，傾斜角度對液體透鏡的焦距沒有影響，因此液體透鏡的位置並不會讓重力對液體透鏡造成影響。

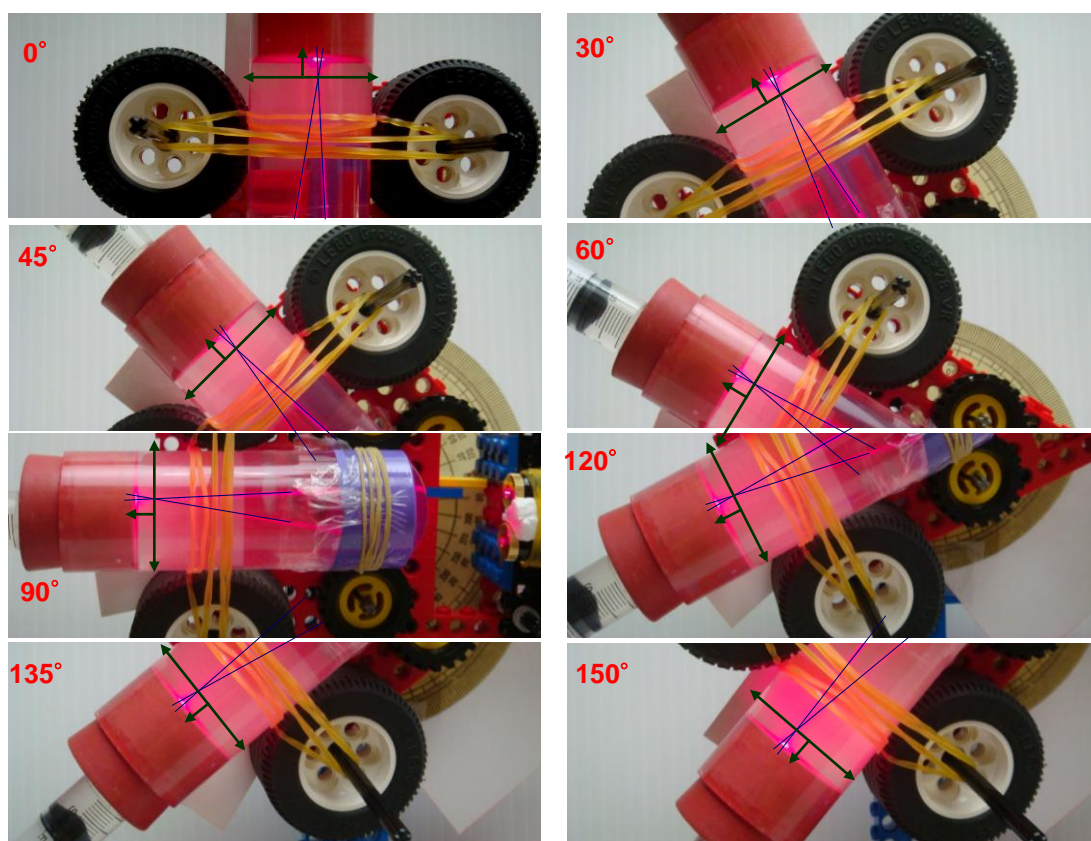


圖 4.9 各角度下液體透鏡的焦點位置實驗

## 研究五、透鏡之像差模擬分析與量測

### 一、像差成因

完成了薄膜式液體透鏡的設計製作和基本關係建立後，在實際使用時，發現在較高倍率下，液體透鏡外緣會有成像模糊的現象(如圖 5.1)。我參考了文獻資料，其中提到光學系統所成的像和理想成像點會有不同，因此形成像差(aberration) [6,7]。非單色光的像差一共有 7 種，對液體透鏡而言，球面像差(spherical aberration, SA)的影響較大。球面像差是指平行光線入射到透鏡，通過透鏡後光線無法匯聚成一像點的差異現象，如圖 5.2。



圖 5.1 高倍率下，液體透鏡外緣成像模糊

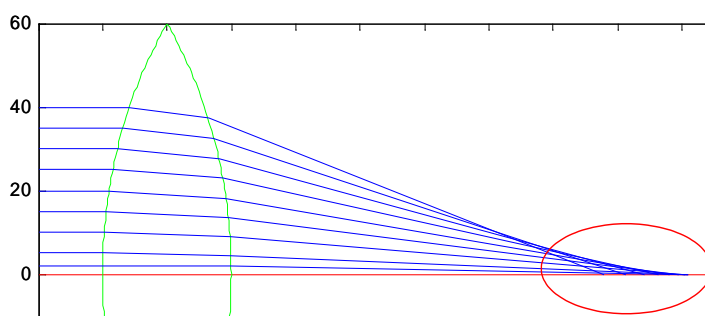


圖 5.2 透鏡的球面像差

由於像差跟透鏡孔徑、放大倍率、透鏡折射率等有關，很難以一個理論公式來表示像差而直接評估所設計出的可變倍率透鏡的像差嚴重程度，必須使用電腦模擬或實驗。在電腦模擬中，網路上有些透鏡光學的教學示範動畫程式[10]，但可改變的變數及像差的計算上功能不足；而套裝軟體則無法讓我可自己寫入迴圈計算各倍率下的最小像差，因此我自己撰寫了一個透鏡模擬程式，使用 Matlab 軟體來開發程式。

## 二、透鏡模擬程式之設計

透鏡模擬程式是模擬多束平行鏡軸的光線由空氣射入及穿出透鏡介質後，與鏡軸交叉處形成焦點。在所設計的程式中，因為要模擬像差的產生並計算像差大小，所以不能再使用研究四中的近軸光學和高斯光學。

光線穿過透鏡產生折射的過程，可用 Snell's Law 來表示：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

其中  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $n_1$ 、 $n_2$  分別是入射角、折射角，以及入射和折射的介質折射率。

### 1. 透鏡程式之流程

透鏡模擬程式之流程是由設定透鏡尺寸及平行入射光向量，再依次求各透鏡面之折射光向量，最後的折射光向量與鏡軸交點則為焦點。詳細的透鏡模擬程式之流程如圖 5.3。

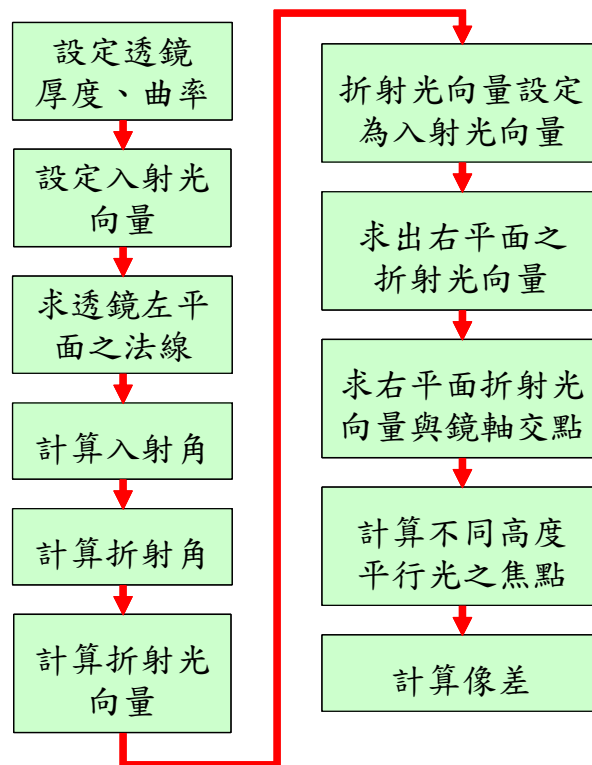


圖 5.3 透鏡模擬程式之流程

假設光束起點是  $(x_{qSL1}, y_{qSL1})$ ，入射光單位向量為  $\vec{F}_{11}$ ，透鏡曲面的曲率中心在  $(x_{S1}, y_{S1})$ ，曲率半徑  $r_1$ ，透鏡左平面與入射光交點  $P_1(x_{P11}, y_{P11})$  上的法線向量為  $\vec{G}_{11}$ ，則入射角可用內積求得：

$$\theta_{1L} = \cos^{-1} \left[ \frac{\vec{F}_{11} \cdot \vec{G}_{11}}{\|\vec{F}_{11}\| \cdot \|\vec{G}_{11}\|} \right] = \cos^{-1}(\vec{F}_{11} \cdot \vec{G}_{11})$$

則反射角為  $\theta_{1R} = \sin^{-1} \left( \frac{n_{1L}}{n_{1R}} \sin \theta_{1L} \right)$

折射光向量  $\vec{H}_{11} = (x_{H11}, y_{H11})$  則可由外積求得，

$$\vec{H}_{11} = \begin{bmatrix} x_{H11} \\ y_{H11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{f11} & -x_{f11} \\ x_{f11} & y_{f11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{bmatrix}$$

其中  $\Delta_1 = \|\vec{F}_{11}\| \cdot \sin \theta_{1r}$ ， $\Delta_2 = \|\vec{F}_{11}\| \cdot \cos \theta_{1r}$

而此折射光向量再當成透鏡右平面的入射光向量，使用上述的關係式，即可求出透鏡右平面的折射光向量  $\vec{H}_{21}$ 。而此向量  $\vec{H}_{21}$  與鏡軸的交點即為此光束之焦點  $F_{SL1}$ 。

## 2. 透鏡模擬之結果

- (1) 透鏡程式的電腦模擬結果如圖 5.4，可模擬多道平行光束及多個凹凸透鏡。
- (2) 透鏡模擬程式亦可進行像差之模擬，圖 5.5 為多道平行光透過透鏡後與鏡軸交會，但呈現多個交點，因此有像差的產生。

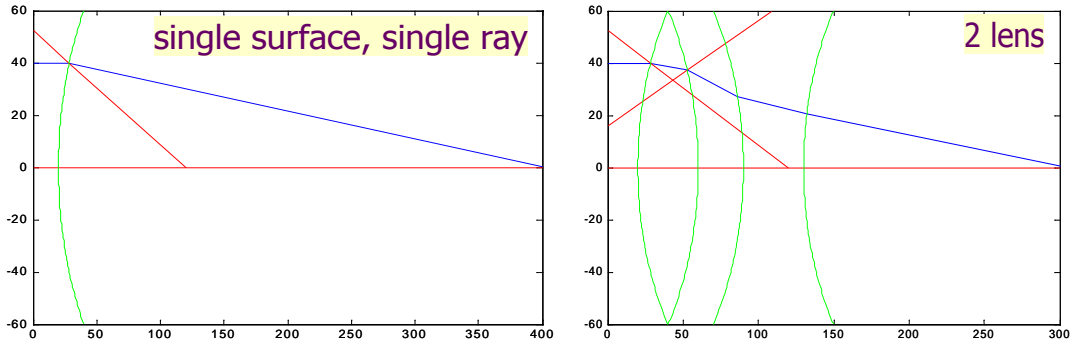


圖 5.4 透鏡程式電腦模擬之部分結果

### 三、透鏡球面像差之模擬

所設計的透鏡程式可進行像差之模擬，圖 5.5 為多道平行光透過透鏡後與鏡軸交會，但呈現多個交點，因此有像差的產生。模擬程式中並設計自動計算最大像差，由鏡軸至透鏡頂點距離為  $r_d$ ，最大像差則使用：

$$\text{像差}_{\max} = f_{SL_i} - f_{SL_f}$$

其中  $f_{SL_i}$  和  $f_{SL_f}$  分別為距鏡軸  $0.05 \cdot r_d$  和  $0.95 \cdot r_d$  高度的平行光束通過透鏡後的焦點。

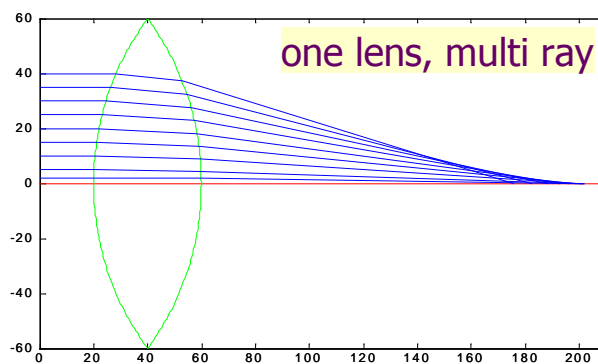


圖 5.5 透鏡程式電腦模擬之像差



#### 四、透鏡球面像差之量測

透鏡之球面像差的量測方法，可觀察單色光束在不同鏡軸高度之焦點變異之情形。因此我自製了透鏡球面像差觀測器來測量透鏡的像差。

##### 1.研究過程：

1. 將雷射光筆之光點細小化。
2. 設計並製作球面像差觀測器，包含光筆橫向滑動座(附刻度)、屏幕軸向滑動座、透鏡座。

##### 2.研究結果：

1. 完成之透鏡球面像差觀測器如圖 5.6。
2. 可使用於像差改善後之像差測量。

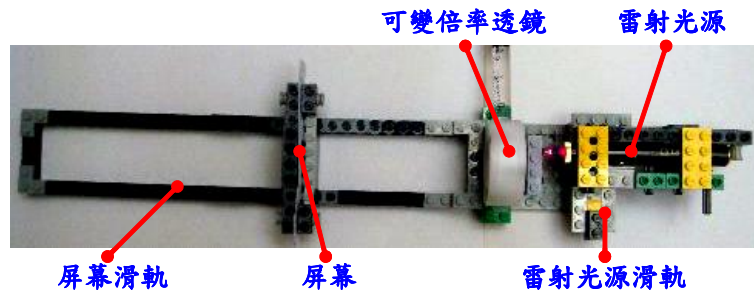


圖 5.6 透鏡球面像差觀測器

#### 研究六、薄膜液體透鏡之像差改善

##### 一、透鏡像差改善方法

所有透鏡都會有球面像差，玻璃透鏡可由改變形狀、研磨透鏡或組合透鏡而消除球差，但可變倍率的液體透鏡就無法靠研磨等方法來消除球差。要減小球差的方法有四種 [6,7]，包括：

1. 零角度差法；
2. 相異曲率法；
3. 非球面法；
4. 組合透鏡法。

我將其分析歸納如表 6.1：

表 6.1 薄膜液體透鏡之球面像差改善方法

	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
減小球差方法	零角度差法	相異曲率法	非球面法	組合透鏡法
方法概述	光線通過透鏡的入射角與離去角相等	選擇適當的透鏡，讓透鏡兩面有不同曲率	非球面透鏡	多透鏡組合
對薄膜液體透鏡可行性	○	○	△	×
可行性說明	透鏡兩面使用不同彈性係數之薄膜	透鏡兩面使用不同彈性係數之薄膜	難以製作徑向厚度不同的薄膜	單一透鏡有多種倍率，難以用其他透鏡來配合而使用於所有倍率
可行性： ○：高，△：中，×：低				

因此本研究將採用方法 1 和 2 來減小薄膜液體透鏡的球差，但必須先求出透鏡兩面薄膜分別的彈性係數。從造鏡者公式  $\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$ ，可知相同焦距(或倍率)且材料相同的透鏡，可以有不同的曲率半徑組合( $r_1, r_2$ )；而適當的曲率半徑組合( $r_1, r_2$ )，可得到最小球差。所以本研究的方法是在某一倍率下，對各種不同的  $r_1$ 、 $r_2$  曲率半徑，分別求出有最小角度差和最小像差的( $r_1, r_2$ )組合。

## 二、像差改善之模擬分析

### 研究過程：

1. 以透鏡模擬程式，對不同倍率，求出不同( $r_1, r_2$ )組合的球差和角度差。
2. 使用的倍率由低倍率到高倍率共有 1~10 等 19 種倍率，間隔 0.5 倍。

研究結果：

1. 定倍率之像差改善模擬結果如圖 6.1，本文中僅附上 8.5 倍及 2.5 倍之模擬結果。

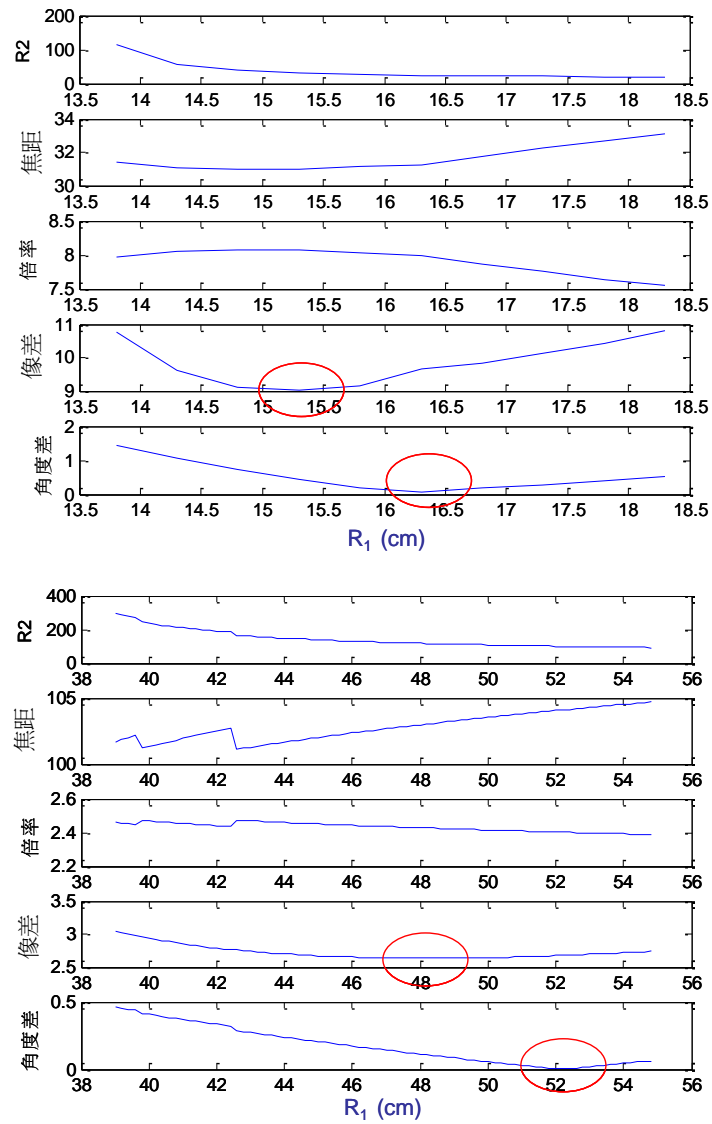


圖 6.1 在 8.5 倍及 2.5 倍透鏡倍率下，不同曲率半徑組合( $r_1, r_2$ )之透鏡特性

2. 由各倍率下的模擬數據進一步整理出各倍率下有最小像差與最小角度差時之  $(r_1, r_2)$  組合，如表 6.2。：

表 6.2 各倍率下具最小球差及最小角度差之透鏡曲率半徑組合  $(r_1, r_2)$

倍率	最小球差		最小角度差	
	$(r_1, r_2)$	球差	$(r_1, r_2)$	角度差
10.0	(14.10, 29.16)	9.8302	(14.9, 20.34)	0.0065
9.5	(14.60, 31.45)	9.3911	(15.4, 21.99)	0.02
9.0	(15.50, 29.92)	8.9352	(16.1, 23.44)	0.0015
8.5	(16.00, 32.94)	8.5092	(16.8, 25.32)	0.0091
8.0	(16.80, 35.67)	8.0076	(17.6, 27.45)	0.018
7.5	(17.50, 39.59)	7.5529	(18.7, 29.44)	0.0069
7.0	(18.40, 43.87)	7.0723	(19.8, 32.10)	0.0001
6.5	(20.30, 41.15)	6.6278	(21.1, 35.13)	0.0047
6.0	(21.60, 46.00)	6.1204	(22.8, 38.21)	0.0125
5.5	(23.10, 52.06)	5.6177	(24.5, 42.69)	0.0083
5.0	(24.80, 60.08)	5.1245	(26.8, 47.39)	0.0038
4.5	(26.80, 70.83)	4.6413	(29.6, 53.18)	0.0021
4.0	(29.40, 84.49)	4.1561	(33.2, 60.13)	0.0043
3.5	(35.00, 80.03)	3.6758	(37.6, 69.79)	0.0024
3.0	(40.40, 95.54)	3.1539	(43.8, 81.64)	0.0035
2.5	(48.20, 116.12)	2.6327	(52.2, 99.15)	0.0002
2.0	(59.80, 147.64)	2.1114	(65, 124.78)	0.0006
1.5	(81.2, 189)	1.6	(86.2, 168)	0
1.0	(118.4, 302.3)	1.1	(128.8, 253.8)	0

3. 圖 6.2 分別為各倍率的最小球差及最小角度差。可看出倍率愈高，最小球差直線遞增，而最小角度差大致維持在 0.01 度。

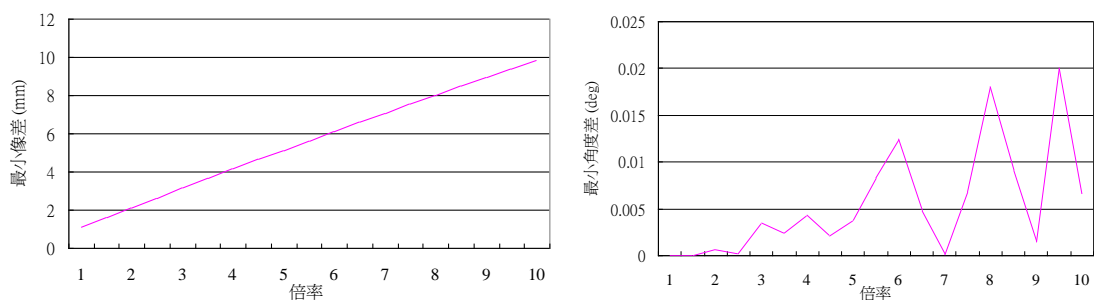


圖 6.2 各透鏡倍率之最小球差及最小角度差

4. 根據表 6.2 之結果，進一步整理分析後，可知各倍率下，當具有最小球差及最小角度差時，有最佳之薄膜曲率半徑的比值  $r_1/r_2$ 。根據此曲率半徑的比值，並計算出薄膜之變形量，此最佳薄膜變形量之比值  $\Delta S_{R2}/\Delta S_{R1}$  如圖 6.3 及圖 6.4。

5. 分析圖 6.3 及圖 6.4 可知，

a. 若要有最小球差，則液體透鏡  $\Delta S_{R2}/\Delta S_{R1}$  之最佳關係為

$$\Delta S_{R1} = C \cdot \Delta S_{R2} = 7 \cdot \Delta S_{R2} \text{。}$$

b. 若要有最小角度差，則液體透鏡  $\Delta S_{R2}/\Delta S_{R1}$  之最佳關係為

$$\Delta S_{R1} = C \cdot \Delta S_{R2} = 3 \cdot \Delta S_{R2} \text{。}$$

亦即受到填充液的壓力時，薄膜變形量的比值等於薄膜曲率半徑的比值，故(左半面薄膜的變形量) =  $C \cdot$  (右半面薄膜的變形量)，故彈性係數

$$K_2 = C \cdot K_1 \text{，其中最小球差之 } C = 7 \text{，而最小角度差之 } C = 3 \text{。}$$

6. 若要得到  $C$  倍彈性係數的薄膜，可將  $C$  層薄膜重疊成多層膜，或找到厚度  $C$  倍之薄膜。

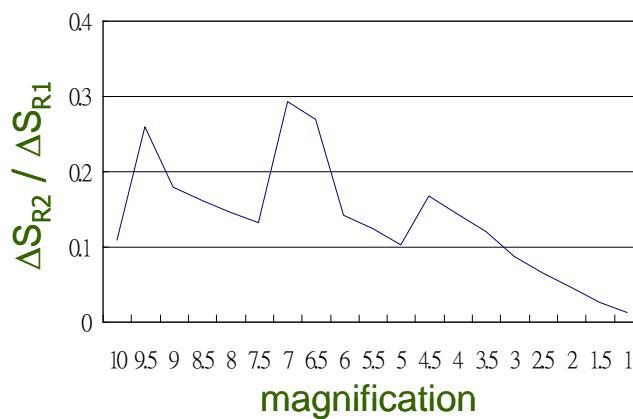


圖 6.3 具有最小球差時，倍率與薄膜曲率半徑比值的關係

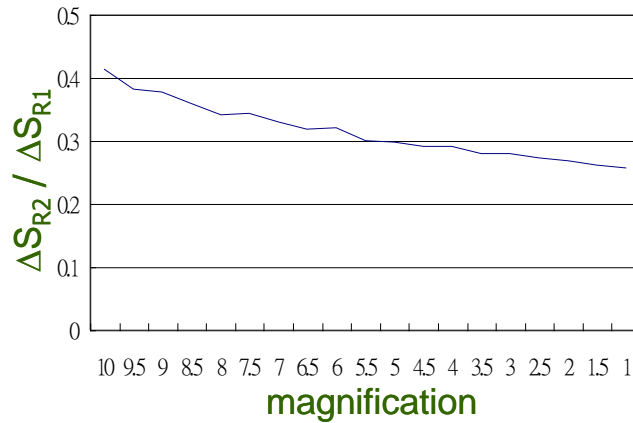


圖 6.4 具有最小角度差時，倍率與薄膜曲率半徑比值的關係

### 三、像差改善之驗證

我根據上述之模擬與分析，分別使用彈性係數比值  $C = 1$  (一般)， $C = 3$  (最小角度法) 和  $C = 7$  (最低像差法) 的薄膜組，製成 3 個可變倍率透鏡，並進行實驗觀察。

#### 研究結果：

- (1) 圖 6.5 為使用一般透鏡及  $C = 7$  之低像差透鏡之觀察結果，可明顯看出經過低像差處理，透鏡邊緣之成像跟中心處一樣清晰。

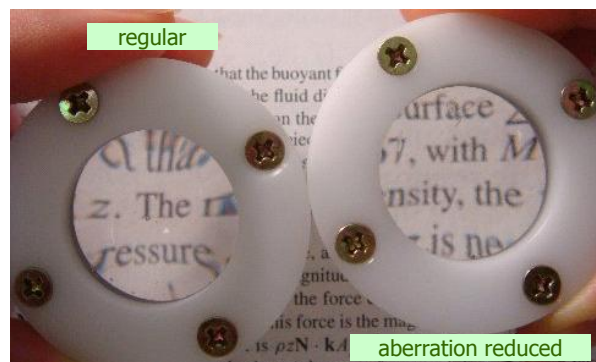


圖 6.5 一般透鏡與低像差透鏡之觀察結果

(2) 使用 1.5mm 網格來檢驗 3 種透鏡的像差，其觀察結果如圖 6.6，可看出經過低球差處理的透鏡，其球差已被消除(但因各圖是透過數位像機的成像結果，故圖片仍有微小相差)。



圖 6.6 一般透鏡與低像差透鏡之網格觀察結果

(3) 分析及實驗之結果證明，液體透鏡之球差可以透過相異曲率法，讓兩邊薄膜具有不同的彈性係數來消除相差。而零角度差法雖然也可以減少像差，但其降低效果並沒有如同相異曲率法的良好消除效果。

## 研究七、薄膜液體透鏡之基本應用

可變倍率透鏡由於在單一透鏡中，就可以具有多重倍率，再加上有低像差之處理，使透鏡邊緣成像清晰，因此具有比一般玻璃透鏡更好的優點。研究中要進行可變倍率透鏡系統在教學及生活上的應用的創新應用及系統設計，包括：

- (1) 透鏡成像教學教具
- (2) 校園生物觀察器
- (3) 非接觸式測距器

### 一、透鏡成像教學教具的應用

一般在透鏡成像教學上，要用許多固定焦距的凸透鏡或凹透鏡來觀察光線的匯聚及發散程度；若使用一個可變倍率透鏡系統就可以觀察到這些現象，也可以觀察到透鏡曲率對焦距的影響，使學生更容易瞭解透鏡的光學性質，大大減低教學實驗器材的複雜性和提高教學的瞭解性。因此在教學上有很大的助益。

## 1. 研究過程

- (1) 以壓克力及木板製作一長 86x89x500 mm 的透明箱體，底部釘上兩條鋁軌，一側為活動門，如圖 7.1。
- (2) 製作承載液體透鏡、雷射光源、屏幕的小車，可在箱體內滑行。
- (3) 為使光束可見，以超音波造霧器產生煙霧送入箱體。

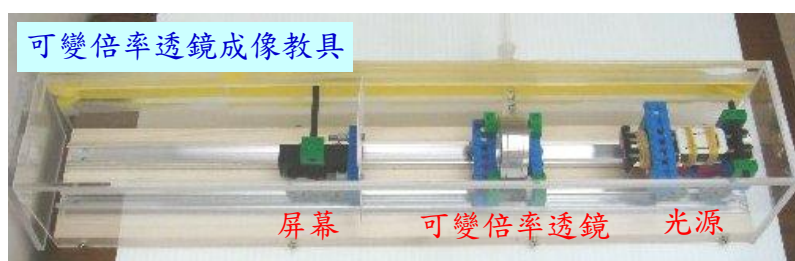


圖 7.1 可變倍率透鏡成像教具

## 2. 研究結果

- (1) 由圖 7.2~7.4 可看出透鏡與屏幕固定，調整透鏡倍率時可觀察到焦點的集中與分散。
- (2) 由圖 7.5 可觀察到不同倍率下光束的行進與匯聚。
- (3) 該教具可交替使用平行雷射光源模組或 LED 模組，如圖 7.8。使用平行雷射光源模組(圖 7.5)可以清楚呈現各種倍率下光線的行進與匯聚，並標定出焦點。而使用 LED 模組(圖 7.6, 7.7)則可取代現在學校成像實驗所使用的蠟燭，可清楚看出倒立放大實像，瞭解焦距與成像的觀念。
- (4) 為了防止箱體內部的煙霧逸散，我設計了氣密簾，並改良成伸縮式氣密簾(如圖 7.9)，使用後效果十分良好。
- (5) 可變倍率透鏡教具確實有助於學生瞭解透鏡成像原理和倍率焦距等觀念，而且可以有非常多的倍率可使用，不像目前學校中只有兩三種透鏡倍率可作實驗，對於教學成效和設備成本都有很大的幫助。



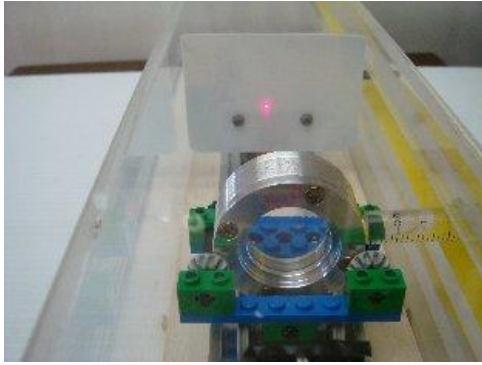


圖 7.2 兩光束集中於焦點

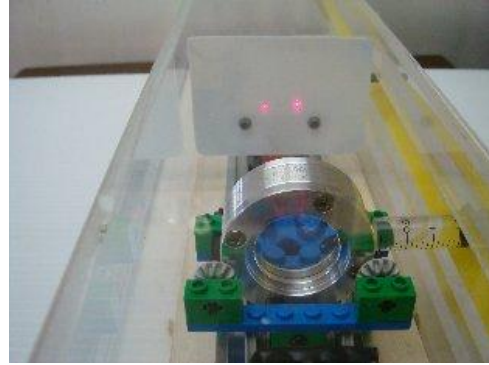


圖 7.3 倍率改變，焦點改變

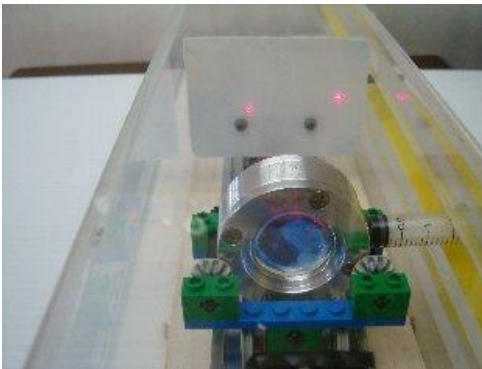


圖 7.4 倍率改變，焦點改變

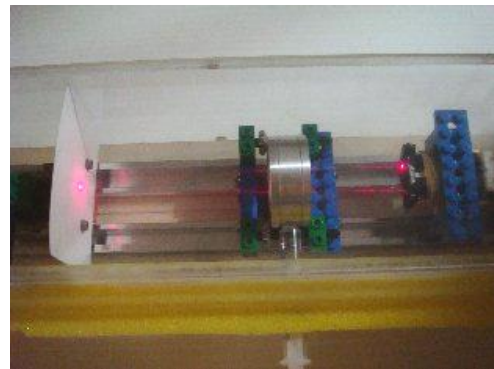


圖 7.5 可清楚見到兩光束的行進與匯聚

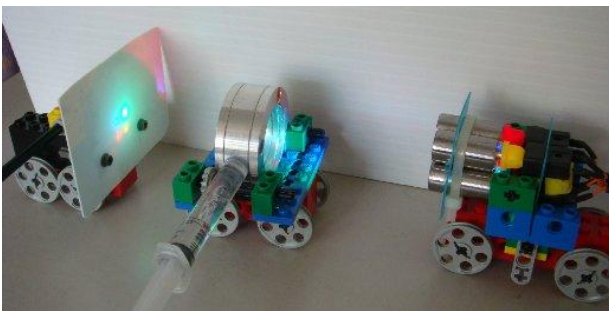


圖 7.6 透鏡成像 LED 模組

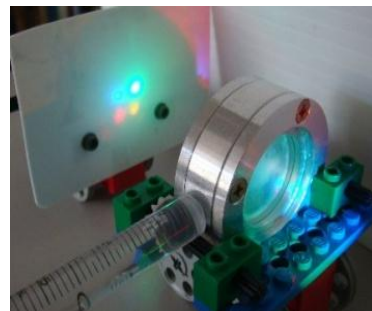


圖 7.7 清楚看出倒立放大實像

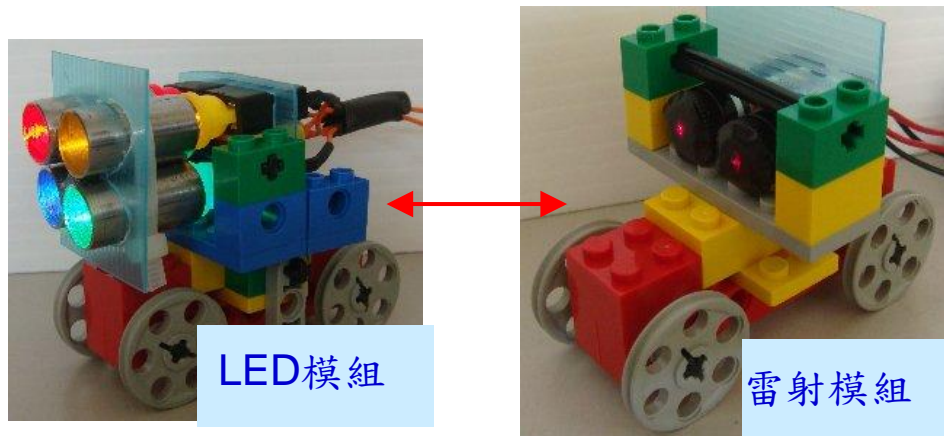


圖 7.8 LED 模組和雷射模組可互換

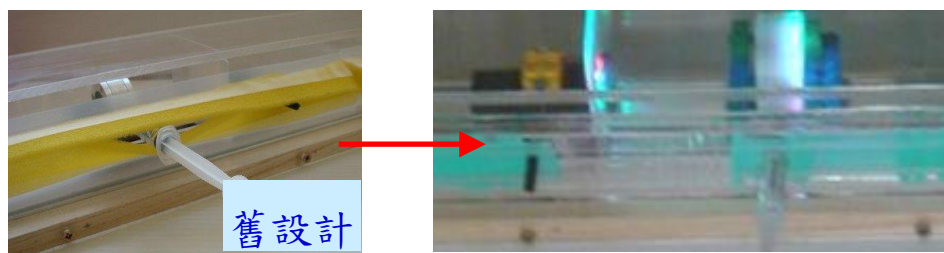


圖 7.9 氣密簾可防止煙霧逸出

## 二、校園生物觀察的應用

可變倍率透鏡可以提供連續的倍率變換，不但能夠很容易的搜尋目標，也可觀察生物由原尺寸大小到 20 倍的顯微構造；而且可以直接在活體上觀察，不需要把葉片摘下或把動物捕回實驗室，因此可觀察到更真實的生物行為，也因為成本較低加上攜帶方便，可以讓每個學生一人一具可變倍率透鏡系統，提高學生的參與性。因此在教學上有很大的助益。

### 1. 研究過程：

- (1) 使用可變倍率透鏡，並加上簡易填充液調整器，方便使用，如圖 7.10。
- (2) 為使觀察生物清晰，可變倍率透鏡末端加上微型 LED 及開關，方便觀察，如圖 7.11。



圖 7.10 簡易生物觀察器

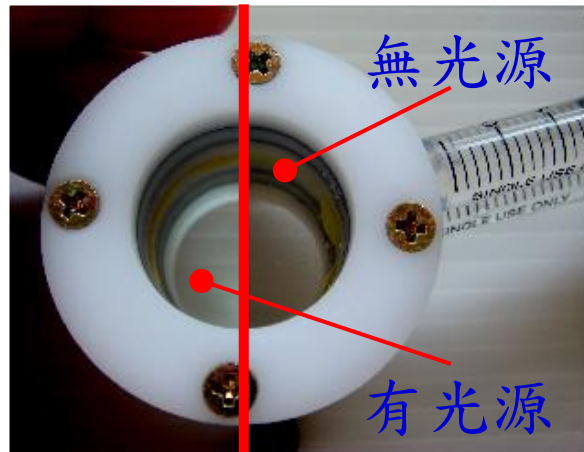


圖 7.11 具微型 LED 之生物觀察器

## 2. 研究結果

(1) 使用可變倍率透鏡，可直接觀察生物活體，倍率可到 40 倍的顯微構造，如圖 7.12。

(2) 日常生活中可觀察細小的物件，如圖 7.12、7.13，減少了體積及提高方便性。



圖 7.12 螞蟻的觀察



圖 7.13 千元鈔  
下方有英文字



圖 7.14 千元鈔玉山  
圖案中有數字 1000

### 三、非接觸式測距的應用

可變倍率透鏡系統也應用在非接觸式測距。

#### 1. 研究過程：

- (1) 設計非接觸式測距器，使用可變倍率透鏡，如圖 7.15。前方可加上一凹透鏡來改變遠距時的距離解析度。
- (2) 規畫非接觸式測距器之使用標準流程。

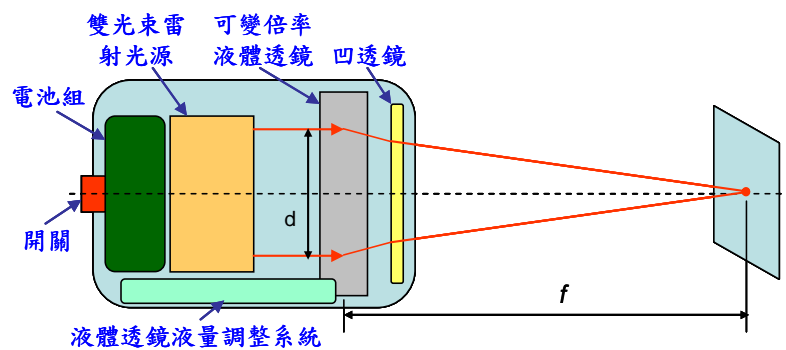


圖 7.15 非接觸式測距器之設計圖

#### 2. 研究結果

- (1) 製作非接觸式測距器，實物如圖 7.16。
- (2) 非接觸式測距器之使用流程如圖 7.17，只需要調整透鏡中的液體量，使兩平行雷射光束，匯聚於目標物上，再藉由曲線圖表的推算，便能得知與目標物的距離(如圖 7.18)。因為可以不需接觸便測出與目標物的距離，能避免危險，而且成本低、攜帶方便，又可以快速測距，因此能有很高的實用性。



圖 7.16 非接觸式測距器



圖 7.17 非接觸式測距儀原理的流程圖

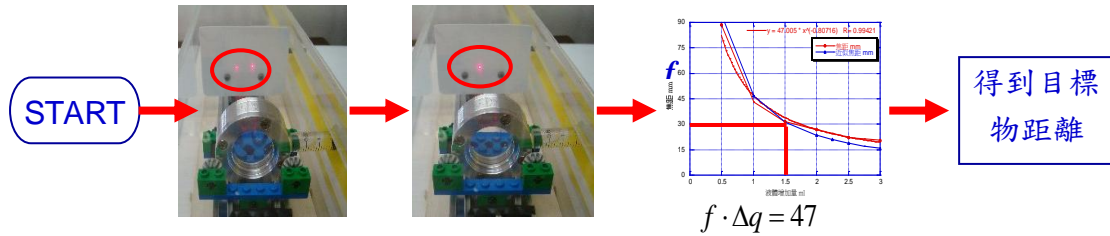


圖 7.18 非接觸式測距流程示意圖

#### 四、研究七結論

表 7.1 整理了在上述三種應用中，傳統技術與可變倍率透鏡的應用方式，可看出可變倍率透鏡的確是很好的創新應用。

表 7.1 可變倍率透鏡的創新應用

	傳統	新設計
透鏡成像教學教具		
校園生物觀察器		
非接觸式測距器	 輕巧型雷射測距儀 \$16,000	 \$350



## 研究八、薄膜液體透鏡之輕薄化與微小化

薄膜液體透鏡具有多項優點，缺點在於為了防止液體洩漏，必須加上油封環 (O-ring)，且將鏡身與膜片緊壓。但如此造成液體透鏡體積甚大，應用在如眼鏡等場合便會太重。因此如何將薄膜液體透鏡輕薄化與微小化是個重要的方向。

### 一、輕薄化之環片式液體透鏡

在研究三中已設計出第四代的薄膜液體透鏡，使用塑鋼為鏡身材料，大幅降低透鏡重量，重量僅 29g，在一般的使用上很方便。但是若要將薄膜液體透鏡應用到眼鏡、檢查鏡等，必須進行輕薄化。

#### 1. 研究過程：

- (1) 設計輕薄化液體透鏡，分為鏡片模組與鏡身模組，設計圖如圖 8.1。
- (2) 鏡片模組為口型油封環，在自製的預拉膜板上，以特種膠將薄膜與油封環黏合，並安裝鋼針頭進水管，完成鏡片模組。
- (3) 將塑膠盒切出上下圓孔，形成鏡身模組。
- (4) 組合鏡片模組與鏡身模組，連結液量調整器，完成輕薄化液體透鏡。

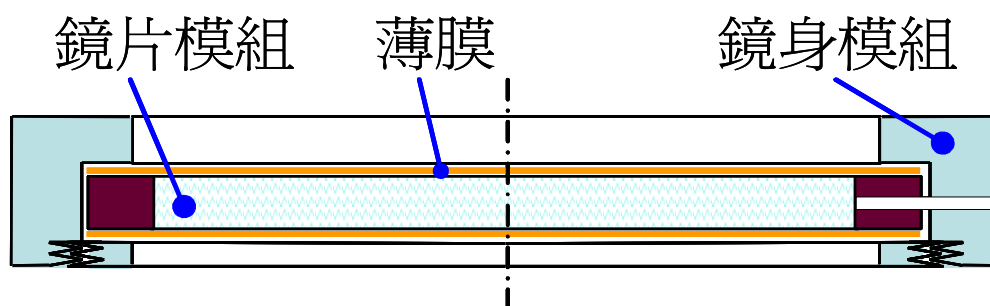


圖 8.1 輕薄化液體透鏡設計圖

## 2. 研究結果

- (1) 完成之輕薄化液體透鏡如圖 8.2。口徑 35mm 的透鏡重量僅 5.8g，僅有原先第四代塑鋼液體透鏡之 20% 重量。
- (2) 輕薄化液體透鏡的成像結果如圖 8.3。
- (3) 輕薄化液體透鏡的設計概念為模組式，為用後即拋型，可備妥數個鏡片模組，有損壞立即更換。



圖 8.2 輕薄化液體透鏡



圖 8.3 輕薄化液體透鏡的成像

### 二、微小化之立管式液體透鏡

薄膜液體透鏡由於有可變倍率的功能，若使用於檢查鏡或內視鏡時，更能比傳統的檢查鏡或內視鏡看清觀察區域。薄膜液體透鏡要進行微小化，我有兩個設計方向：環片式和立管式。

## 1. 研究過程

- (1) 設計環片式液體透鏡內視鏡，使用外徑 7 mm 內徑 4.3 mm 之口型油封環，裝入微金屬管做為液量調整管。
- (2) 設計立管式液體透鏡內視鏡，使用外徑 8 mm 內徑 6 mm 高 20 mm 之壓克力管，管前端覆緊兩層薄膜，而薄膜間置入 1 mm 之塑膠管做為液量調整管，管間並塗以矽膠防止滲漏。

## 2. 研究結果

- (1) 環片式液體透鏡內視鏡的實際模組如圖 8.4。
- (2) 立管式液體透鏡內視鏡的實際模組如圖 8.5。
- (3) 兩種液體透鏡內視鏡的優缺點整理在表 8.1。
- (4) 所設計的液體透鏡內視鏡搭配光纖使用(如圖 8.6)，可清楚地看到狹小或隱密處之景像，適合醫療保健上之使用。



圖 8.4 環片式液體透鏡內視鏡





圖 8.5 立管式液體透鏡內視鏡



圖 8.6 搭配光纖使用之液體透鏡內視鏡



表 8.1 環片式、立管式液體透鏡內視鏡之特性

	環片式	立管式
		
優點	體積小，僅 0.5g 製作難度低 透鏡兩面內徑相同	1.0g 高倍率下液體不易滲漏
缺點	高倍率下液體易滲漏	體積大 製作難度高 透鏡兩面內徑不同

### 三、輕薄化環片式液體透鏡之應用 ---可調式兩段倍率聰明眼鏡

輕薄化環片式液體透鏡輕巧，且採模組化設計，相當適合使用在眼鏡上，尤其是很多人需要的聰明眼鏡，實際上就是一副眼鏡具有兩種倍率。一般的聰明眼鏡常是兩種不同倍率的鏡片上下合在一起，看遠時眼光向上，看近時眼光向下，相當不便；但如果使用環片式液體透鏡眼鏡，就不需要調整眼光角度了。

由於聰明眼鏡僅需兩種倍率，且眼鏡上的倍率都不大，因此液體透鏡眼鏡應具有下列三種基本功能：

1. 質輕，可裝配在眼鏡上；
2. 具有兩種倍率，因此液量控制僅需要兩段式機構控制，不需要大範圍無段可變倍率，否則使用者易頭暈；
3. 為符合不同人的眼鏡度數，此兩段式倍率必需是可調整，這樣隨時可調整成適合不同人使用的兩段倍率。

根據上面的基本需求，我設計製作出了“可調式兩段倍率聰明眼鏡”，如圖 8.7。其特點為：

1. 在眼鏡上使用輕薄化環片式液體透鏡，整體輕薄，重量僅 29g；
2. 環片式液體透鏡採模組化設計，若有磨損，可用後即拋，且安裝方便；
3. 液體透鏡採兩段式倍率控制，只要按鏡側按鈕，即可在此兩種倍率相互切換；
4. 此兩段式控制為可調式，只要轉動外管，即可將按鈕的行程改變，則液體透鏡的兩種倍率亦改變，因此可快速地調整讓不同人使用。

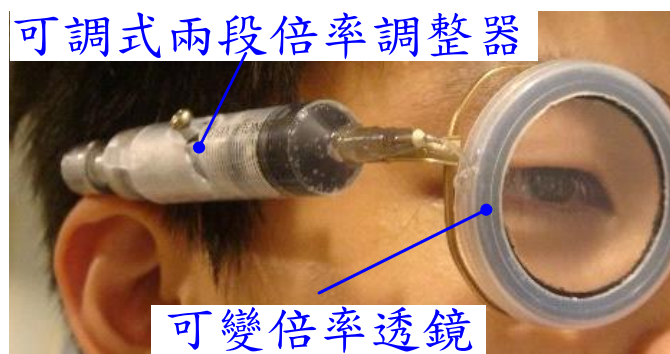


圖 8.7 可調式兩段倍率聰明眼鏡

## 伍、研究結果與討論

一、在研究中提出了可變倍率透鏡的設計，使用彈性薄膜和高折射率液體組成液體透鏡，但這液體透鏡的表面是否為球面？

如果液體透鏡的表面為球面，則在某一倍率下，填充液增加量實驗值  $\Delta q$  (式 4) 應該和理論值  $V_d$  (式 1) 相等，因此我在相同的薄膜外擴下，比較  $\Delta q$  和  $V_d$  的差異。若兩者相同，就表示液體透鏡的表面為球面。圖 9.1 為  $\Delta q$  和  $V_d$  相對於薄膜外擴  $e$  的曲線。由圖 9.1 中可看出， $\Delta q$  和  $e$  成正比，但  $V_d$  和  $e$  卻是三次方的關係。在薄膜外擴距離較小時， $\Delta q$  和  $V_d$  的值還接近，但是在薄膜外擴距離較大時， $\Delta q$  和  $V_d$  的值就相差很大。因此可以證明液體透鏡的表面並非為球面。

為何液體透鏡的表面並非為球面呢？我的推論是在液體透鏡各點為等壓，但薄膜在圓周處被固定住，所以在這附近薄膜變形量較少，而在薄膜中心處的薄膜變形量就會較多，所以薄膜在中心處比在圓周處較容易外擴，因此相同的液量體積下，

實驗值  $\Delta q$  將比理論值  $V_d$  有較大的外擴距離，也因此實際的液體透鏡的表面不會為球面。

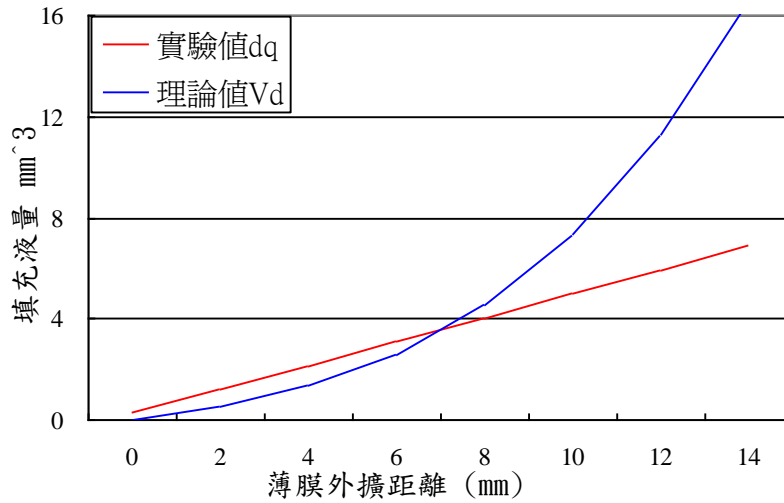


圖 9.1  $\Delta q$  和  $V_d$  相對於薄膜外擴  $e$  的關係

## 二、可變倍率透鏡的填充液是否有會變質、沉積、混濁等問題？輕薄化液體透鏡是否易損壞？

填充液目前使用水或甘油，兩者都是沸點高、無毒性的穩定液體，而且密封在透鏡中，沒有氧化的問題，也不與鏡身或薄膜互相反應。因為使用的是純水或純甘油，均勻且無雜質，所以沒有沉澱及混濁的問題。同時填充液更換容易，必要時可重新裝填。且輕薄化液體透鏡採模組化設計，鏡片模組成本非常低，可用後即拋，所以沒有磨損的顧慮。

## 三、可變倍率透鏡跟傳統透鏡相比，有哪些優缺點？

我將各種透鏡之特點整理列出，可看出可變倍率透鏡比起傳統透鏡，有倍率可變、倍率高、重量輕、成本低、耐用度高、攜帶方便等優點。

	傳統透鏡	第四代薄膜液體透鏡	輕薄化液體透鏡	微小化液體透鏡
鏡身材料	玻璃	塑鋼、螺絲	橡膠油封環、 塑膠盒	矽膠環、壓克力 管、彈性束帶
倍率	固定	連續可變 (1~13)	連續可變 (1~13)	連續可變 (1~13)
透鏡口徑 (mm)	6~1000+	10~100	6~50	6~10
透鏡重量 (g)	75	29	5.8	0.5 ~ 1.0
適用場合	教具、 生物觀察	透鏡教具、 生物觀察	眼鏡、 生物觀察	檢查鏡、 內視鏡
加工度	極高	高 (手工或射出成型)	低	低
成本 (NT\$)	高 (NT 200)	高 (NT 50)	低 (NT 20)	低 (NT 20)
耐用度	低 (透鏡 易磨損)	高 (薄膜可更換)	高 (薄膜可更換)	高 (薄膜可更換)
攜帶性	中	高 (輕巧)	高 (輕巧)	高 (輕巧)

## 陸、結論與應用

一、本研究的目的是要設計出一個可變倍率透鏡系統，讓透鏡的焦距和倍率可以連續改變，並藉著模組化的設計，可得到大範圍的放大倍率。這個研究的成果有下列七項。

- 1、完成可變倍率透鏡系統的可行性分析和架構設計。
- 2、完成液體透鏡模組薄膜和填充液的特性分析，找出最佳的薄膜和填充液。
- 3、完成 4.5 代的可變倍率透鏡設計與製作，具有倍率可變、質輕、可快速組合等優點。

- 4、建立液體透鏡的相關理論及特色實驗，並證實重力對液體透鏡不會造成影響。
  - 5、以模擬及實驗方式完成透鏡像差之改善，完成超低像差之可變倍率透鏡。
  - 6、完成薄膜液體透鏡之輕薄微小化，大幅減少透鏡重量至 29g。
  - 7、完成包括可調式兩段倍率聰明眼鏡等多項應用，讓可變倍率透鏡系統有更好的可行性和實用性。
- 二、研究中所設計的液體透鏡擁有單一透鏡倍率可變、放大倍率高、觀察方便、體積小、重量輕、蒐尋目標物容易、透鏡磨損可快速更換等優點，改善傳統透鏡只有單一焦距倍率的問題。
- 三、研究中建立了流程化的低像差液體透鏡的最佳化設計流程，可透過所設計的透鏡模擬軟體，找出最佳的低像差透鏡薄膜組合。而研究中之分析及實驗之結果證明，液體透鏡之球差可以透過相異曲率法，讓兩邊薄膜具有不同的彈性係數來消除相差。而零角度差法雖然也可以減少像差，但其降低效果並沒有如同相異曲率法的良好消除效果。

## 柒、參考資料及其他

1. B. Berge and J. Peseux, "Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting", *The European Physical Journal E* 3 (2000), p. 159.
2. S. Kuiper and B. H. W. Hendriks, "Variable-focus liquid lens for miniature cameras", *Appl. Phys. Lett.* 85, 1128 (2004)
3. Cheng, C.-C., *Electrically Tunable Dielectric Liquid Lens*, Ph.D. dissertation, Institute of Micro electromechanical Systems, National Tsing Hua University, 2006.
4. 蕭季威, "可變倍率透鏡及其控制系統", 2009 臺灣國際科展工程學科作品說明書, 2009。
5. Beer, Johnston and DeWolf, *Mechanics of Materials 材料力學*, 高立出版社
6. Naess, Robert O., *Optics for Technology Students*, Prentice Hall, 2001.
7. 耿繼業、何建娃, *幾何光學*, 全華圖書

8. 吳漢雄，*工程光學與實習*，國立編譯館，2002
9. O'Neil, P.V., *Advanced Engineering Mathematics*, PWS-Kent Publishing Co., 1995.
10. 物理教學示範實驗教室  
<http://www.phys.ncku.edu.tw/~optlab/modernoptics/fiber%202/modulator.htm>

# Low-Aberration Variable-Focus Liquid Lens

Eric Chiwei Shiao

## ABSTRACT

Liquid lens has been studied since 1940. The basic idea is to use a transparent liquid in the lens cell instead of solid glass or plastics as used in conventional optical lenses. One of the important features of liquid lens is that its focal length is tunable through the change of curvatures of both surfaces of the lens. However, the aberration is an important issue for the image quality of such a liquid lens. In this research, the theoretical focal length and the relationship between the focal length and the volume of the liquid were first derived. And then a solution was proposed to reduce the aberration of the liquid lens. With a careful design of the thicknesses of the two membranes through computer simulation and data analysis, the curvatures of the two surfaces of the liquid lens were controlled so that the aberration of the liquid lens was reduced significantly. In the experiments, several elastic membranes and high refractive index liquids were used to develop variable-focus liquid lenses. Besides, several improvements were made to reduce the weight, size and cost of the liquid lens. For low-aberration liquid lens design, the experimental results also agreed with the theoretical results very well (agreed with theories very well). At last, several applications of variable-focus liquid lens were developed. These applications, including teaching aids, small object observer, non-contact range-finder, endoscope and adjustable dual-focus eyeglasses were very helpful in teaching, daily use and health care.

## **Introduction**

The focal length of a conventional glass lens is fixed, so it is impossible to have different magnification. Liquid lens provides a chance to have changeable focus in one single lens. Many problems occurred when I started to try to make a liquid lens, for example, the lens structure, lens material, filling liquid, and even the major problem facing liquid lens – lens aberration. I did this research about liquid lens step by step, solved the problems one by one.

The objectives of this research were: 1. to investigate the properties of liquid lens and its theoretical analysis; 2. to develop an approach to reduce the spherical aberration of a liquid lens; and 3. to develop several applications of low-aberration liquid lens.

## **Len Property and Theoretical Analysis**

### **1. Methods of variable focus lens**

The focus of a conventional glass or plastic lens is fixed because the lens curvature and the refractive index of the lens are constant. There are two ways to make focus changeable, either by the variable lens curvature or by the variable lens refractive index. The explanations of the methods are as the followings.

#### **(1). Method by variable lens refractive index:**

If an epoxy is pressed, its refractive index is changed accordingly. The phenomenon is called “photo-elastic effect”. If a lens is made of some transparent material of photo-elastic effect, the refractive index will be changed according to the force applied on it. Then this lens is a variable focus lens. However, the change of refractive index due to photo-elastic effect is not very large, so is the range of focus variation.

#### **(2). Methods by variable lens curvature:**

A liquid lens can have different lens curvatures. Currently, liquid lens of variable lens curvature can be divided into 3 categories according to its technique: electro-wetting liquid lens, dielectric liquid



lens and membrane liquid lens.

#### A. Electro-wetting liquid lens:

Electro-wetting liquid lens, invented by Philips Co. or called FluidFocus [1,2], is a lens containing two immiscible liquids with different refractive indices. By applying different voltage to control the electro-wetting effect, the curvature of the contact surface between these two liquids is changed, then the lens focus is changed. However, such an electro-wetting liquid lens is for small aperture lens and small magnification only, and its lens aberration is difficult to be corrected.

#### B. Dielectric liquid lens:

Dielectric liquid lens contains two immiscible liquids with the same density but different dielectric constants. When an electric field is applied, the resulting dielectric force changes the liquid shape to form different surface curvature [3]. The dielectric liquid lens is also for small aperture lens and small magnification only, and its lens aberration is hard to be corrected.

#### C. Membrane liquid lens:

Membrane liquid lens contains a lens body and two elastic membranes. A transparent liquid is filled into the lens. When the liquid is squeezed into or withdrawn from the lens, the membranes are deformed to form some surface curvatures, which changes its focus and magnification. Since the elastic membrane has large deformation when a small inner pressure is applied, changing focus is relatively easy and the range of focus changed is large. This liquid lens is suitable for large aperture lens. Therefore, membrane liquid lens was chosen in my study and analysis.

## **2. Determination of lens membrane and filling liquid**

The concept of a membrane liquid lens was in Fig. 1. When the volume of the filling liquid inside the lens is changed, the elastic membrane deformed to form a biconvex or biconcave lens.

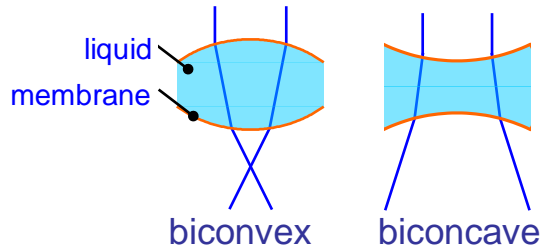


Fig. 1 Concept of membrane liquid lens

For a membrane liquid lens, the lens curvature depends on the elastic membrane, while the lens refractive index is determined by the filling liquid. Thus the first step of designing a liquid lens was to choose appropriate elastic membrane and filling liquid. An ideal membrane for the liquid lens should have properties of high transparency, low dispersion, low stiffness, and proper yielding and tensile strength. In addition to this, an ideal filling liquid should be transparent, stable, nontoxic, low-volatility, and non-corrosive.

I searched for several common elastic films, including PVC film, PVDC film, silicon film, lab film, vinyl glove, and latex glove. Those films were tested for their optical and tensile properties. The test result of optical property was shown in Fig. 2, while the result of tensile property was in Fig. 3. These films were then ranked based on their performances in each test. The ranking result was shown in Fig. 4. It concluded that the PVC film was the ideal membrane for the liquid lens.

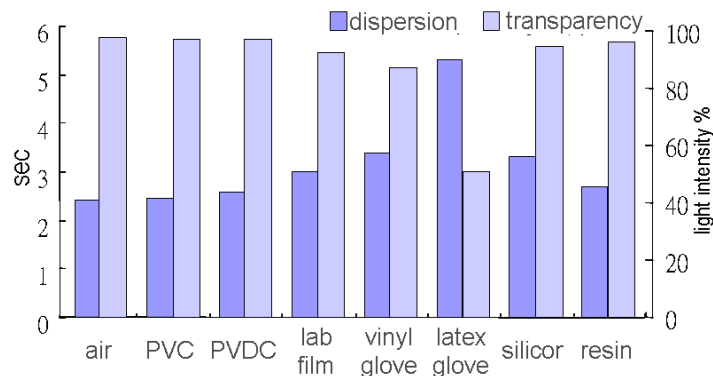


Fig. 2 Optical properties for elastic films

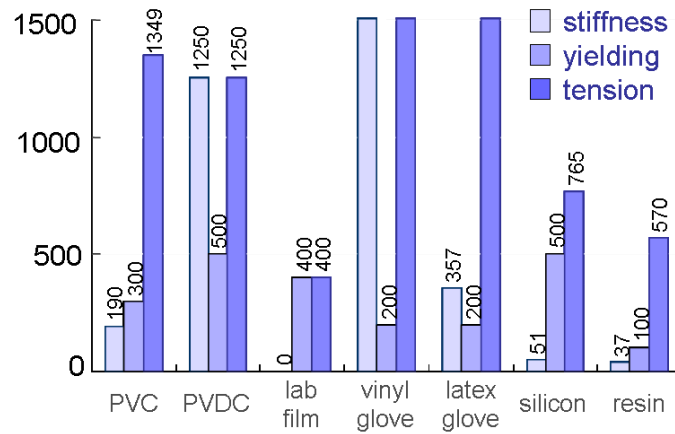


Fig. 3 Tensile properties for elastic films

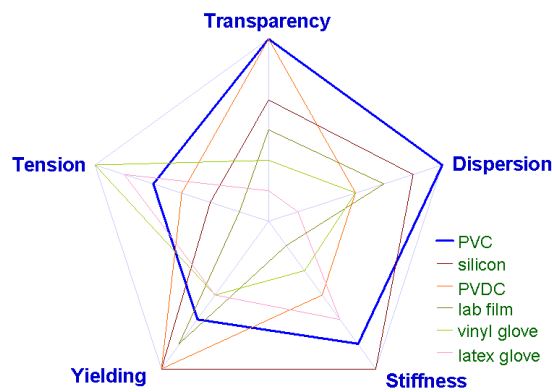


Fig. 4 Ranking for elastic films

Many liquids with proper refractive index were tested to determine the ideal filling liquid for the liquid lens, including methanol, ethanol, propanol, benzene, ether, carbon disulfide, carbon tetrachloride, trichloroethane, water, glycerol, turpentine, and olive oil. The results of optical and chemical tests indicated that water and glycerol were the ideal filling liquid for the liquid lens. Therefore, the PVC film and water or glycerol were used for the designed liquid lens for experiments and analysis.

### 3. Lens design

To design a liquid lens, the basic requirements are:

- (1). the edge of membrane can be pressed firmly to prevent the filling liquid from leaking,
- (2). the lens can be easily assembled and disassembled to change the membrane conveniently,

- (3). the membrane can be replaced easily and quickly,
- (4). the size and weight of a lens are as small as possible.

Based on these requirements, I used O-rings inside the lens for sealing, and used screws to hold the lens parts tightly. The initial design (Generation 1) and its improved version (Generation 2) of liquid lens were shown in Fig. 5. Since the dimension of these two types of lens was large, I adopted module design for the new lens (Generation 3) as in Fig. 6. This new design reduced the lens size and simplified the lens structure. In the Generation 4 and 4.5 (Fig. 7), I further reduced the size of the lens, and applied light material POM to significantly reduce its weight. The new lens weighted only 29 g with aperture 25 mm and magnification rate 13. Besides, the technique of aberration reduction, which is discussed in the later part of this research, was applied to this lens to make the image clear and less distorted.

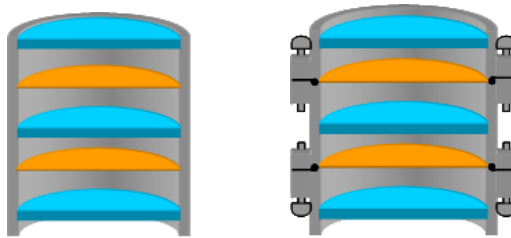


Fig. 5 Designed liquid lens of Generation 1 (left) and 2 (right)

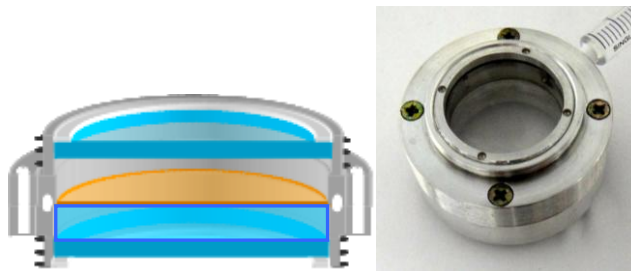


Fig. 6 Designed liquid lens of Generation 3



Fig. 7 Designed liquid lens of Generation 4 (left) and 4.5 (right)

If the liquid lens would be used in eyeglasses, it had to be even lighter. I tried many ways to make the lens compact, and finally created a compact ring-type liquid lens. This type of liquid lens used an O-ring as the lens body, and glued the films on the O-ring. Fig. 8 showed the ring-type liquid lens for eyeglasses and for endoscope. Such a compact lens significantly reduced the lens weight to only 6 g, which was 20% of the weight of the lens of Generation 4.5.

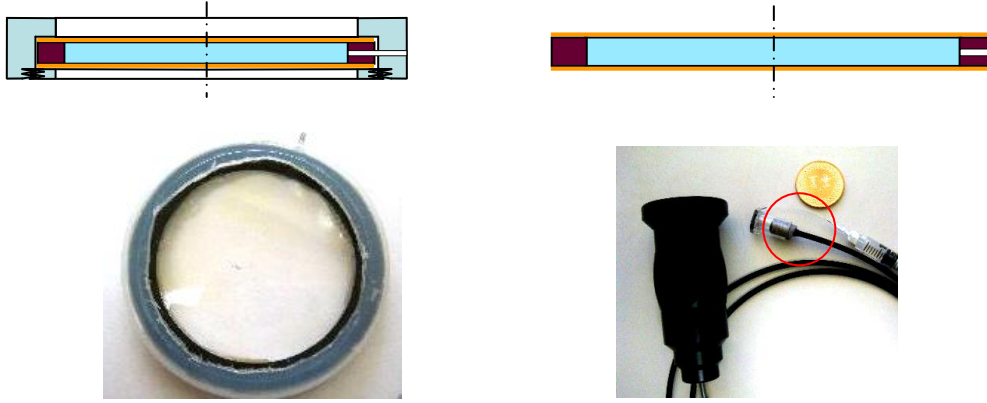


Fig. 8 Designed compact ring-type liquid lens for eyeglasses (left) and endoscope (right)

#### 4. Theoretical analysis

In the membrane liquid lens, the curved membrane has a parabolic profile [5] which can be approximated by a spherical shape with small error [6]. Thus the spherical profile of the membrane is used for the following analysis.

Fig. 9 showed the geometric figure of a liquid lens. In order to control the focal length  $f$  by adjusting the liquid volume  $\Delta q$ , the  $f$ - $\Delta q$  relation must be known in advance. As in Fig. 9, the  $\Delta q$  was a function of the membrane protrusion  $\delta$  as in Eq. 1.

$$\Delta q_{i(mm^3)} = \int_{x_0}^{x_f=r_i} \pi(r_i^2 - x^2) \cdot dx = \pi \cdot \frac{\delta_i}{2} \left( \frac{\delta_i^2}{3} + r_d^2 \right), \quad i=1,2 \quad (1)$$

where  $r_d$  is the radius of lens aperture. From the ray optics, the theoretical focal length of a lens with lens body thickness  $h$  was as in Eq. 2. The lens magnification was also shown as in Eq. 3.

$$\frac{1}{f_{th}} = (n-1) \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{n-1}{nr_1r_2} (h + \delta_1 + \delta_2) \right], \quad \delta_i = r_i - \sqrt{r_i^2 - r_d^2}, \quad i=1,2 \quad (2)$$

$$m = \frac{-250}{f_{th}} \quad (3)$$

Combining the Eqs. 1 and 2, the relation between  $f_{th}$  and  $\Delta q$  was obtained as in Eq. 4 for  $\frac{\delta^2}{3} \ll r_d^2$ .

$$\frac{1}{f_{th}} = (n-1) \left[ \frac{4}{\pi \cdot r_d^4} (\Delta q_1 + \Delta q_2) - \frac{16(n-1)}{n\pi^2 r_d^8} \cdot \Delta q_1 \Delta q_2 \cdot \left( h + \frac{2}{\pi r_d^2} (\Delta q_1 + \Delta q_2) \right) \right] \quad (4)$$

Moreover, Eqs. 5 and 6 showed the experimental  $\Delta q$ - $\delta$  and  $f_{exp}$ - $\Delta q$  relations for a 25mm-aperture lens. I found that the theoretical  $f_{th}$  and experimental  $f_{exp}$  were close to each other as in Fig. 10.

$$\delta_{exp,i} \approx 3.8 \cdot \Delta q_{i(ml)}, \quad i=1,2 \quad (5)$$

$$\frac{1}{f_{exp}} \approx \frac{\Delta q_{total(ml)}}{38} \quad (6)$$

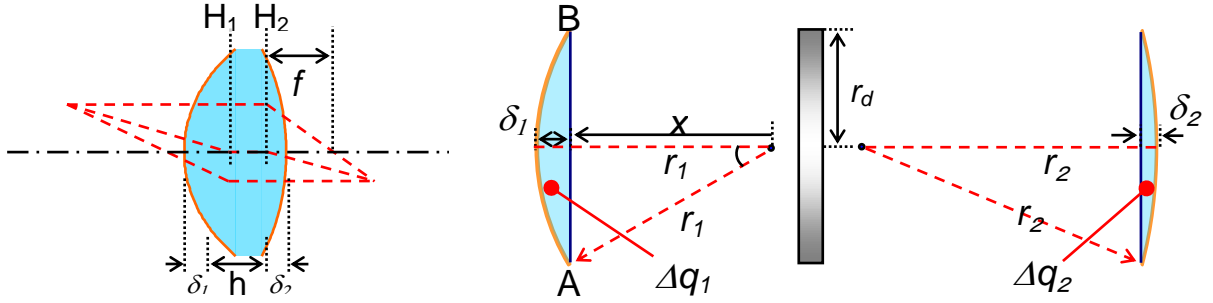


Fig. 9 Geometric figure of a biconvex liquid lens

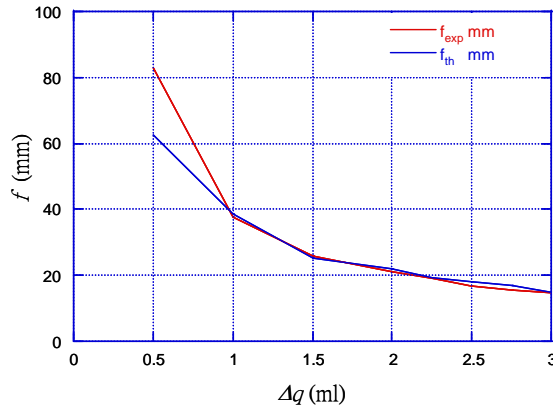


Fig.10 The theoretical and experimental focal lengths

# Aberration Reduction for the Liquid Lens

## 1. Aberration

For the original liquid lens I designed, I found that the image around the edge of lens was distorted and blurred (Fig. 11). I checked the referenced book [7] for this phenomenon and knew it as aberration. Aberration is an imperfection in image formation by an optical system. There are 7 kinds of aberrations, and the spherical aberration (SA) has more impact to liquid lens.



Fig. 11 The lens image with spherical aberration

Spherical aberration creates a poor image quality, which happens when the light rays transmitting through an optical lens do not converge into a single point (Fig. 12). Reducing the aberration to get clear images is an important issue for the liquid lens.

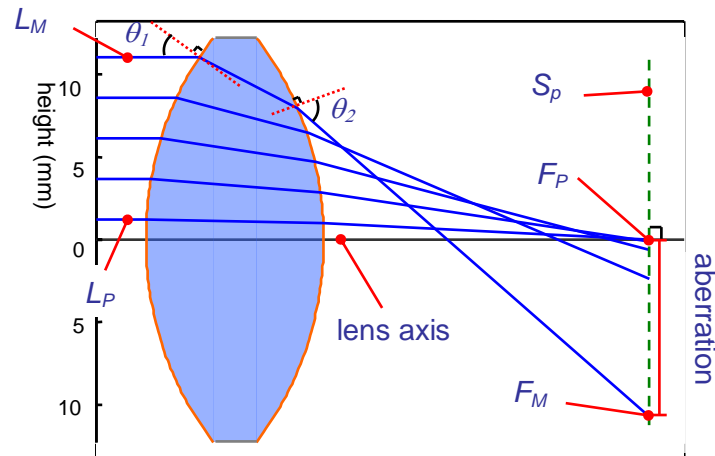


Fig. 12 The lens optics for spherical aberration

There are four approaches to correct the aberration for solid (glass or plastic) lens. They are:

- a. Compound lenses: to combine two or many lenses which have positive or negative spherical aberrations together to reduce the total aberration.

- b. Aspheric surface: to ground one or two lens surfaces into aspheric surfaces to completely eliminate the aberration.
- c. Angle equalizing (AE): to make the incident angle equal to the refractive angle to reduce the aberration.
- d. Lens shaping (LS): to choose appropriate lens shape to get a minimum of aberration.

The Compound lenses approach would not be discussed here because the study focused on reducing aberration for one single liquid lens. The conventional techniques from the other three approaches applied to the solid lens require the lens to have a special fixed lens shape, which does not work for the variable focus liquid lens. A new technique of aberration reduction was developed uniquely for the variable focus liquid lens.

## **2. New technique for aberration reduction**

In this research, I developed a new technique to correct the aberration. Applying the principles of Angle Equalizing approach and Lens Shaping approach, I used different lens membrane curvatures for the right and left lens sides of the liquid lens to fit those two approaches for aberration reduction, instead of grounding the lens surface for solid lens. It meant that the right side and left side of the liquid lens would have different protrusions when filling liquid was squeezed into the lens.

The extent of membrane protrusion depends on the membrane ductility, which is stiffness-related. Membranes with the same optical property but different stiffness constants were used for both lens sides. Therefore, the individual stiffness constant for each membrane was found first. In the technique, for a certain magnification I checked all possible radius pairs ( $r_1, r_2$ ) to select the radius pair which met the requirement of Angle Equalizing approach or Lens Shaping approach. The detailed procedure was expressed in the followings.



### 3. Procedure of aberration reduction

I wrote a lens simulation program to simulate the lens optics and aberration. The application software Matlab was used for this simulation program because of its easy use of matrix operation and plotting. Fig. 13 showed one simulated result by my simulation program. The procedure of aberration reduction was in Fig. 14.

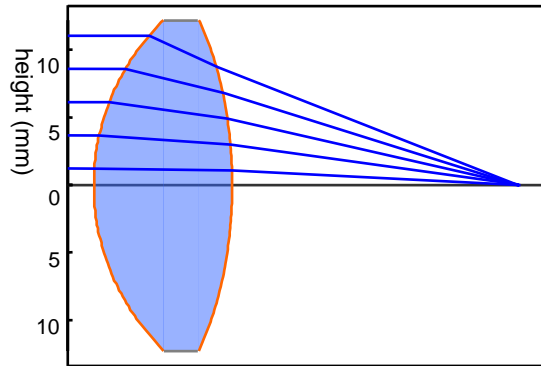


Fig. 13 One result of optics simulation

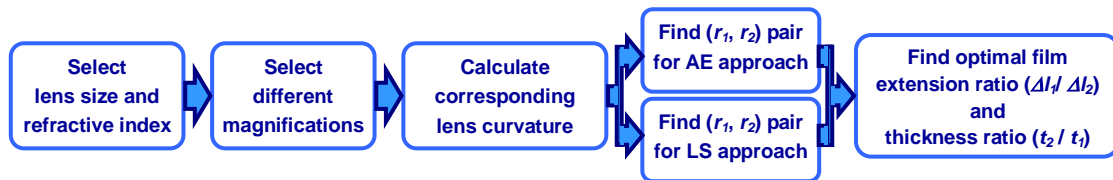


Fig. 14 Procedure of reducing lens aberration

At first, for a certain lens with specified media refractive index, lens aperture and dimension, I chose a value of magnification. Then I ran the simulation program to search all possible radii  $r_1$  and  $r_2$  to meet this magnification value. For any one radius  $r_1$ , there would be a matched radius  $r_2$  to get such a magnification. Then I calculated every corresponding angle difference  $\Delta\theta$  between  $\theta_1$  and  $\theta_2$ , and every corresponding distance  $\Delta s$  between the points  $F_p$  and  $F_m$ . According to the simulated results, I selected the pair of  $r_1$  and  $r_2$  which let  $\Delta\theta$  close to zero for the angle equalizing approach. I also selected the radius pair to have a minimum  $\Delta s$  for the Lens Shaping approach.

This process was repeated again and again from low magnification to high magnification. Among all selected radius pair  $(r_1, r_2)$  for all desired magnifications, an optimal radius pair  $(r_1, r_2)_{opt}$  and its corresponding radius ratio  $r_2 / r_1$  were then determined for each approach by their weighted average.

After the optimal radius ratio  $r_2/r_1$  was obtained, I used Eqs. 7 and 8 to transfer this radius ratio into some practical parameters of membrane. If a membrane was forced to protrude outward, it would extend. The extension length was a function of membrane curvature radius as in Eq. 7.

$$\Delta l_i = \widehat{AB} - \overline{AB} = 2 \cdot (r_i \sin^{-1}(r_d/r_i) - r_d), \quad i=1,2 \quad (7)$$

For the optimal radius ratio  $r_1/r_2$ , the corresponding extension ratio  $\Delta l_1/\Delta l_2$  could be calculated from Eq. 7. Considering the stiffness and thickness of a membrane, the ratio  $\Delta l_1/\Delta l_2$  could be expressed as:

$$\frac{\Delta l_1}{\Delta l_2} = \frac{K_2}{K_1} = \frac{t_2}{t_1} \quad (8)$$

where  $K$  was the membrane stiffness constant, and  $t$  was the film thickness. Therefore, an optimal thickness ratio  $t_2/t_1$  was found according to the selected optimal radius ratio for each approach.

Fig. 15 showed the simulated results for some possible radius pairs  $(r_1, r_2)$  with their corresponding  $\Delta\theta$  for magnification equal to 9. It was found that the pair  $(r_1, r_2) = (16.1 \text{ mm}, 23.4 \text{ mm})$  had a minimum  $\Delta\theta$  equal to 0.0015 degree. So, the pair  $(16.1, 23.4)_{(\text{mm})}$  was the selected radius pair for magnification equal to 9 for Angle Equalizing approach.

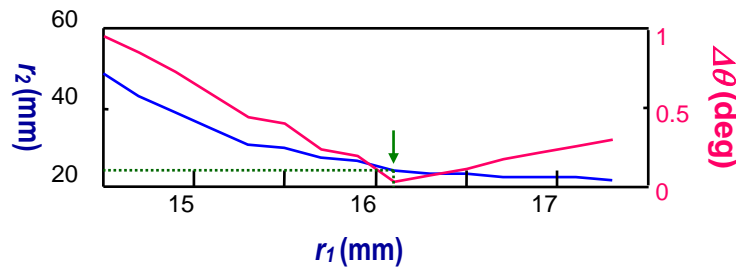


Fig. 15 Radius pairs  $(r_1, r_2)$  and angle difference  $\Delta\theta$

Fig. 16 showed the simulated results for some possible radius pairs  $(r_1, r_2)$  with their corresponding  $\Delta s$  for magnification equal to 9. It was found that the pair  $(r_1, r_2) = (15.5 \text{ mm}, 29.9 \text{ mm})$  had a minimum  $\Delta s$  equal to 5.5 mm. So the pair  $(15.5, 29.9)$  was the selected radius pair for magnification equal to 9 for Lens Shaping approach.

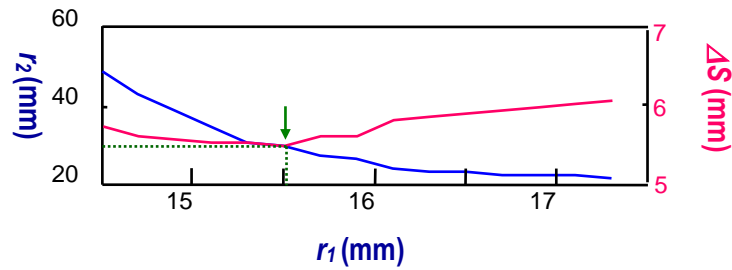


Fig. 16 Radius pairs ( $r_1, r_2$ ) and angle difference  $\Delta s$

Among all selected radius pairs for different magnifications, an optimal radius ratio  $(r_2 / r_1)_{opt}$  was then determined by weighted average for both two approaches. So, the optimal extension ratio  $\Delta l_1 / \Delta l_2$  (or the optimal thickness ratio  $t_2 / t_1$ ) for the liquid lens in research was equal to 3 for the Angle Equalizing approach, and equal to 6 for the Lens Shaping approach.

#### 4. Results of aberration reduction

Applying this new technique of aberration reduction, I made 3 liquid lenses with membrane thickness ratios of 1, 3, and 6 respectively. Fig. 17 was the result of lens images for different membrane thickness ratios. For the original lens on the left, both of its films had the same thickness. The image showed that the edges were distorted and blurred. After applying the aberration reduction technique, the right lens, whose two films had thickness ratio equal to 6, had very clear image. It is obvious that the proposed aberration reduction technique could significantly correct the spherical aberration for liquid lens.

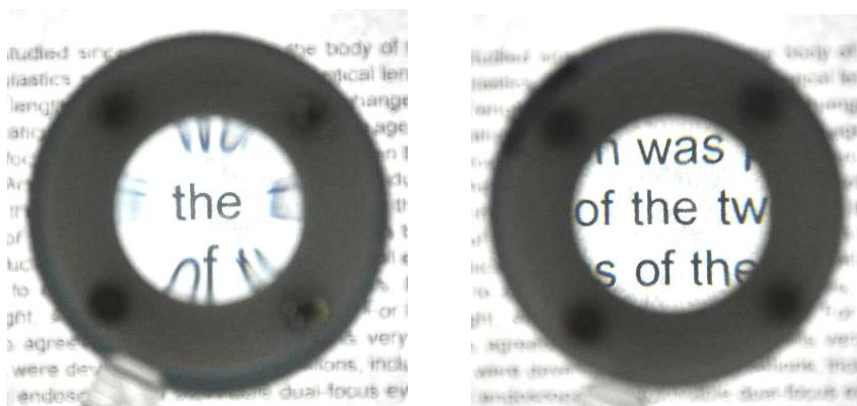


Fig. 17 Lens without ( $t_2 / t_1 = 1$ ) and with ( $t_2 / t_1 = 6$ ) aberration correction

The lens images and related simulated aberrations for different aberration reduction approaches in a 1.5 mm square-net test were shown in Figs. 18~20. The original lens (Fig. 18) with film thickness ratio equal to 1 had large spherical aberration (14.1 mm) and had distorted blurry edge image. The lens with Angle Equalizing technique (Fig. 19) with the ratio equal to 3 had smaller aberration (6.6 mm), but still had unapparent distorted edge image. The image of the lens with Lens Shaping technique (Fig. 20), whose thickness ratio was 6, was very clear, and its aberration was reduced to only 5.5 mm. The images in Figs. 19 and 20 also proved that the Lens Shaping approach was better for the liquid lens than the Angle Equalizing approach.

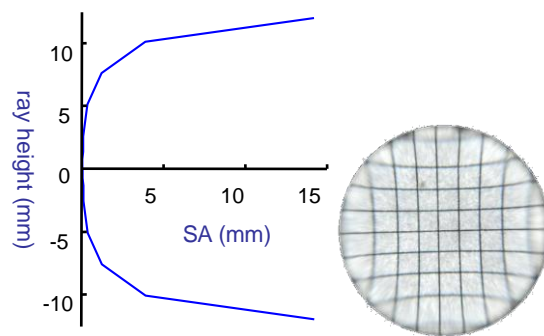


Fig. 18 Lens image and its aberration of an original liquid lens

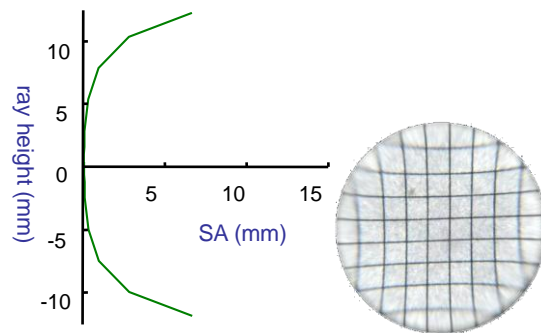


Fig. 19 Lens image and its aberration of liquid lens applying AE approach

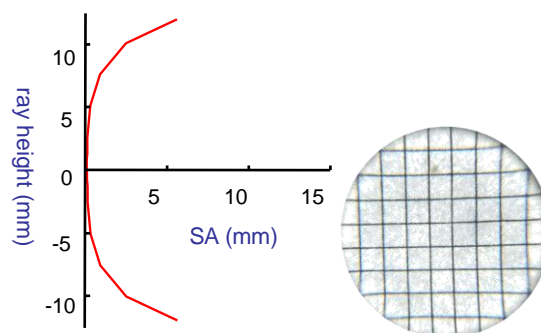


Fig. 20 Lens image and its aberration of liquid lens applying LS approach

## Applications of variable focus liquid lens

To take the advantage of the variable focus liquid lens, I developed four beneficial and educational applications of liquid lens. These applications were useful for optics teaching or daily lives.

### 1. Optics teaching aids

For the optics teaching at school, lots of focus-fixed convex or concave glass lenses were needed to observe the convergence or divergence of light rays conventionally. Since light is invisible, it is uneasy for students to see the paths of light rays and understand the optic phenomenon.

I developed an optics teaching aid to solve these problems. The teaching aid (Fig. 21) had a light source, a moveable liquid lens, and a moveable imaging screen. With tunable focus, one liquid lens could show lots of foci. The light source could be 4-color LED light module or laser beam module (Fig. 22). With the design of installing the lens and screen inside a sealed box, the light rays could be visible when smoke was filled in the box (Fig. 23), which facilitated students to easily understand optics by observing the changing path and convergence of light rays. I also designed a flexible sealing curtain (Fig. 24) to prevent smoke leaking out from the box.

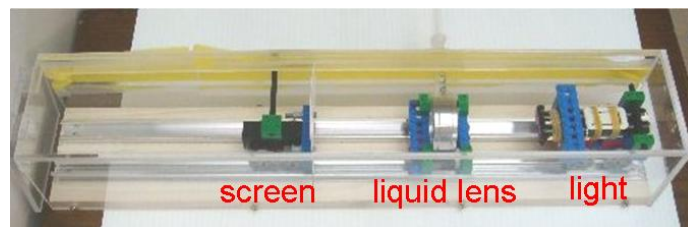


Fig. 21 The optics teaching aid

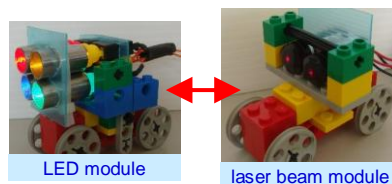


Fig. 22 Light source with 4-color LED light module (left) or laser beam module (right)

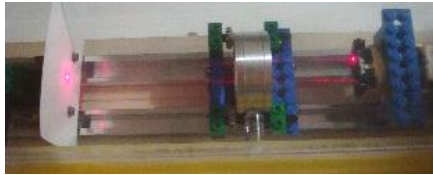


Fig. 23 The light rays are visible

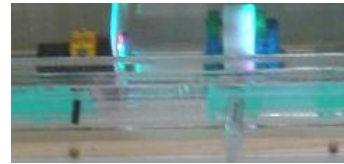


Fig. 24 The flexible sealing curtain

## 2. Non-contact range finder

The variable focus liquid lens can be also used in non-contact distance measurement. The structure of the designed non-contact range finder was shown in Fig. 25. There are liquid lens, dual-beam laser module, liquid adjuster, a concave lens, battery and switch.

The procedure of operating this range finder was shown in Fig. 26. The first step was to aim the laser rays at an object, and tuned the liquid adjuster to make the rays focus on the object. Then the corresponding focal length followed by the change of liquid volume could be found from the relation curve in Fig. 26. This focal length was just the distance between the lens and the object. Such a range finder was low cost, easy to carry, and of fast measuring.

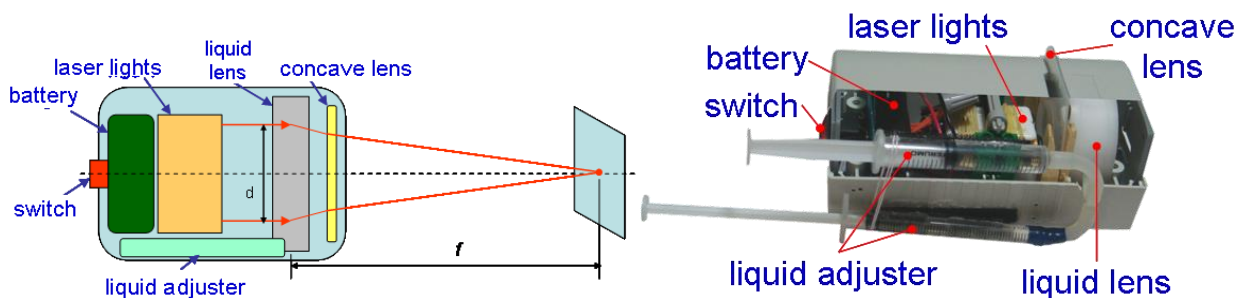


Fig. 25 The non-contact range finder

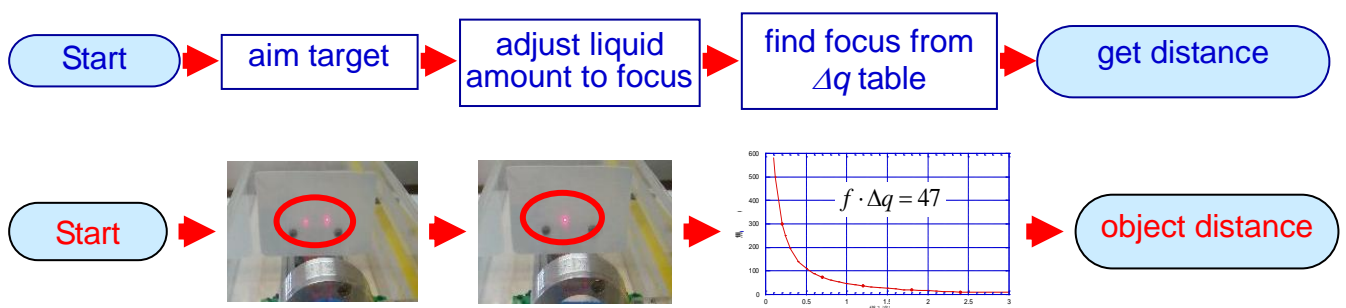


Fig. 26 The procedure of operating this range finder

### 3. Small object observer

The designed variable focus lens can continuously change its magnification, so it was very easy to focus on small object and to observe it at low or high magnification (Fig. 27). This observer (Fig. 28) equipped with a micro LED light to provide clear object image (Fig. 29). Because of its high magnification, high portability and low cost, it is beneficial for students to observe small objects.



Fig. 27 The small object observer is easy to focus and observe small object

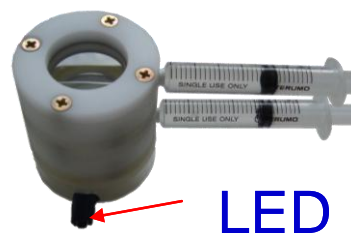


Fig. 28 The small object observer



Fig. 29 The micro LED light can provide clear object image

### 4. Smart eyeglasses

Smart eyeglasses (Fig. 30) means a pair of eyeglasses with two or more lens foci in it. Usually the elders have both problems of presbyopia and myopia. They need 2 pairs of eyeglasses, one for presbyopia and one for myopia. The variable focus liquid lens is suitable to be used for smart eyeglasses to provide 2 foci if its weight can be reduced and if it is able to quickly switch between presbyopia focus and myopia focus.

I used the designed generation 5 ring-type liquid lens in a pair of eyeglasses to significantly reduce

the weight of lens. I also designed a tunable dual-focus quick adjuster. Fig. 31 is the structure of this adjuster. The quick adjuster was used to push the piston to squeeze in or withdraw the liquid. By rotating the purple ring, the focus could be quickly changed between the long and short focal lengths. Rotating the top yellow ring reset the value of short focal length, while rotating the bottom green ring reset the value of long focal length. Therefore, this designed smart eyeglasses not only provided quick presbyopia-myopia switching, but also offered adjustable high-low focal length.

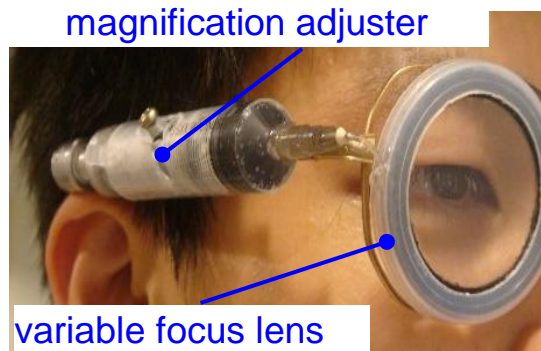


Fig. 30 The tunable dual-focus smart eyeglasses

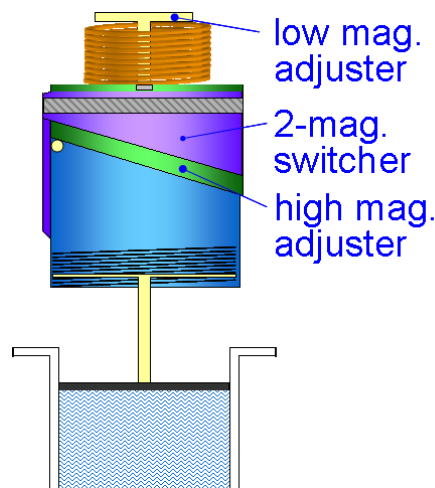


Fig. 31 The tunable dual-focus quick adjuster

## Conclusions

1. I used the PVC film and water to create a liquid lens, and made improvements to reduce the lens size and weight. I also found the corresponding lens equations to have better control of the lens focus.
2. Although the aberration was a big problem for liquid lenses, I found a simple but very effective technique to reduce the lens aberration. By this technique, I successfully got a clear image of the



liquid lens.

3. I developed four applications to make the liquid lens more educational and beneficial to us.

4. My other application idea is using the concept of liquid lens to make a liquid concave mirror. This liquid concave mirror can be used in vehicle headlights to switch between high beams and low beams.

## Reference

1. B. Berge and J. Peseux, "Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting", *The European Physical Journal E* 3 (2000), p. 159.
2. S. Kuiper and B. H. W. Hendriks, "Variable-focus liquid lens for miniature cameras" , *Appl. Phys. Lett.* 85, 1128 (2004)
3. Cheng, C.-C., *Electrically Tunable Dielectric Liquid Lens*, Ph.D. dissertation, Institute of Micro electromechanical Systems, National Tsing Hua University, 2006.
4. Ren, H. and Wu, S.T., "Variable-focus liquid lens ," *Optics Express*, Vol. 15 Issue 10, pp.5931-5936 (2007)
5. Sugiura, N. and Morita, S., "Variable-focus liquid-filled optical lens," *Applied Optics*, Vol. 32 Issue 22, pp.4181-4186 (1993)
6. Ren, H., Fox, D., Anderson, P.A., Wu, B., and Wu, S.T., "Tunable-focus liquid lens controlled using a servo motor ," *Optics Express*, Vol. 14 No.18, pp.8031-8036 (2006)
7. Naess, Robert O., *Optics for Technology Students*, Prentice Hall, 2001.