

2009 年臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

編號： 100007

作品名稱

可變倍率透鏡及其控制系統

得獎獎項

工程學科大會獎第二名

候補作品

學校名稱： 臺北市立大直高級中學（國中部）

作者姓名： 蕭季威

指導老師： 惠沁宜

關鍵字： 透鏡、可變倍率、液體透鏡

作者簡介



我是蕭季威，臺北市大直高中國中部九年級，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班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、磁力的緩衝作用等研究題目參加了北市科展、全國科展、及 2008 國際科展，得過全國科展佳作。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

透鏡被廣泛地使用在顯微鏡、望遠鏡、相機等，但是這些設備使用的光學玻璃透鏡，只有固定的焦距，無法靠單一透鏡做到倍率的放大，必須靠拉長或縮短多個透鏡之間的距離。因此鏡頭的長度、系統的體積、和成本上都不是最佳的選擇。

因此我進行可改變倍率的透鏡之研究，將傳統光學透鏡改為高彈性薄膜和高折射率液體所組成的液體透鏡，再透過倍率調整裝置來控制透鏡內層的液體填充量，就可讓彈性膜具有不同的表面曲度，形成具有多重倍率的液體透鏡。

在這個研究中，我進行許多項的研究工作，包括透鏡的設計、彈性膜和填充液的特性研究、填充液改變量和透鏡位置的影響分析、填充液量調整方法的設計、倍率控制等，完成了可變倍率液體透鏡模組，可以透過控制程式自動控制填充液量，而得到各種特定的倍率，如此在國中小學物理的透鏡成像教學上，以及實際的應用，都可以提供很多的幫助。

Variable Magnification Lens and Magnification Adjusting System

Abstract

Convex/concave optical lenses are widely applied in binoculars, microscopes, and cameras. A single optical lens has one fixed lens magnification only. To get different lens magnification, those equipments above must use several lenses and either exchange lenses or change the distances among the lenses. Thus the length, size and cost of the lens set are not optimal.

In this research, I made a variable magnification lens by replacing the fixed-focus optical lens with liquid lens which was made of elastic membrane and liquid. I also designed a magnification-adjusting device to control the amount of the liquid inside the liquid lens. By this way the membrane could form different surface curvature, which made different magnifications for the liquid lens.

I finished several things in this research, such as the design of variable magnification lens, the study of the characteristics of elastic membranes and liquids, the analysis of liquid amount and lens position, the adjusting methods of liquid amount inside lens, the programming of control algorithm, and a variable magnification liquid lens system. The designed liquid lens can provide different lens magnifications by controlling the liquid amount via a computer program. The variable magnification liquid lens can be used in teaching physical courses about convex lenses in the junior high schools or elementary schools.

可變倍率透鏡及其控制系統

壹、研究動機

去年我在做科展的實驗時，使用顯微鏡觀察細鐵粉被油脂包覆的情形，為了看到微小的鐵粉粒和觀看詳細的油脂包覆情形，我得不斷地變換低倍率和高倍率物鏡，並在有限的視野內搜尋目標物。這時我想到我要這麼辛苦的轉換物鏡，是因為每片物鏡的焦距固定，倍率也固定；如果單片的物鏡可以有很多種焦距，那顯微鏡觀察的工作就方便多了。所以我開始思考是否可以作出一種透鏡，可以藉著調整而連續地改變透鏡的焦距和倍率，那就可以使用同一物鏡由低倍率連續地變換到高倍率了。

後來也觀察到每天生活中，有很多的例子都需要這樣的可以改變倍率的透鏡，如放大鏡、望遠鏡、相機鏡頭，而且在學校中有了這樣的可變倍率透鏡，在透鏡成像部分的實驗就可以連續改變焦距而觀察到成像的變化，讓學生更容易瞭解透鏡的成像原因。因此我決定開始可變倍率透鏡的研究。

貳、研究目的及研究問題

我的研究目的是要做出具有多種倍率的可變倍率透鏡，藉著控制程式自動調整液體量，讓焦距和倍率連續地變大或變小。在日常生活中已經有些焦距可變的鏡頭組，普遍用在數位相機上；但是數位相機是使用許多固定焦距鏡片的透鏡組，整體的倍率變化是靠拉長鏡筒，改變不同透鏡間的距離 [1]，在高倍率時需要很長的鏡筒，而且倍率範圍有限，因此不是一種理想簡便的方法。近年來，荷蘭 Philips 公司研製出一種獨特的液體變焦光學鏡頭 FluidFocus [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，似乎只適用於小口徑的鏡頭，如手機上的相機，同時倍率無法太高，而且因為是有兩種不相溶液體相接觸，故非水平位置時，會受重力影響，使鏡頭無法使用。

我認為如果將傳統的固定焦距光學透鏡，改成彈性透明物質的鏡片，就可以任意改變此鏡片的表面曲率，也就改變了焦距及改變放大倍率。

因此在這個「可變倍率透鏡」的研究中，我必須要解決的問題包括：

1. 鏡片的選擇：

鏡片表面的曲率要能變化，才可以改變焦距；也就是鏡片要有彈性。
鏡片本身的透光率要高，才能讓光線通過；也就是鏡片要盡可能透明。

2. 焦距和倍率的改變控制：

調整焦距和倍率的控制方式要方便有效；也就是盡可能不要有太多的機械元件。

3. 焦距變化的範圍要大：

除了讓單一鏡片的表面曲率能變化外，還應該能有不同的透鏡組合，構成平凸或雙凸或凹凸透鏡。

我的各項研究目的和流程列如圖 1，表 1 所示。

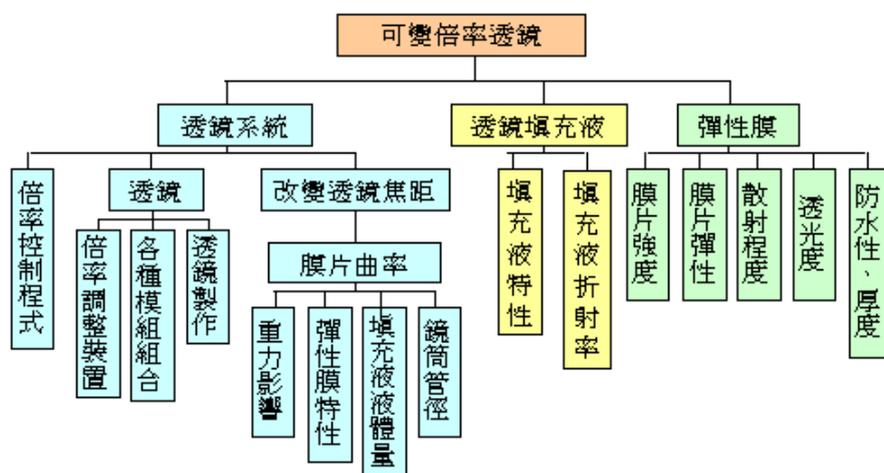


圖 1

研究探討分項工作如表 1 所示：

表 1

研究目的		研究項目
研究一	可變倍率透鏡的規劃與設計	(一)表面曲率可變的彈性鏡片 (二)透光率高的鏡片 (三)方便有效的焦距調整方式
研究二	彈性膜的特性研究	(一)彈性膜的條件與選擇 (二)彈性膜的透光度 (三)彈性膜的散射度 (四)彈性膜的彈性 (五)彈性膜的強度
研究三	填充液的特性研究	(一) 填充液折射率的探討 (二) 填充液種類的選取
研究四	填充液改變量的影響	(一)對彈性膜曲率的變化 (二)對透鏡焦距的變化
研究五	透鏡位置的影響	(一)透鏡水平角度對彈性膜曲率的影響
研究六	如何改變透鏡內填充液量	(一)改變透鏡內層填充液量
研究七	可變倍率透鏡系統的設計	(一)鏡筒尺寸 (二)防漏 (三)模組接合
研究八	填充液量調整控制裝置	(一)填充液量控制裝置 (二)填充液量控制程式 (三)填充液量控制設備

參、研究設備及器材

研究項目	研究設備與器材	研究設備與器材內容
彈性膜的特性	原料	保鮮膜(PVDC 聚偏二氯乙烯)、樹脂膜、矽膠膜、塑膠手套、乳膠手套、培養皿封膜、包裝膜(PVC 聚氯乙烯, 工業包裝用伸縮薄膜)、手機包膜、金屬保護膜、鍵盤保護膜、保險套
	器材	光感測器、雷射光筆、馬達、自製薄膜透光散射自動測量系統、自製彈性測量系統、Robolab
填充液的特性	原料	水、甘油
	器材	MSDS 表
填充液改變量的影響	器材	壓克力管(管徑外徑 10, 12, 15, 20, 22, 25, 30, 35, 40, 45 mm)、10 ml 針筒、橡皮塞、氣球、橡膠圈、透鏡焦距模擬軟體
透鏡位置的影響	器材	10 ml 針筒、簡易液體透鏡、量角器、雷射光筆、自製鏡筒旋轉測量系統
可變倍率透鏡系統	器材	鋁管、壓克力圓片(直徑 35mm、厚度 1mm)、O 型環
填充液量控制	器材	LabVIEW 軟體、數據擷取卡 NI USB 6008、直流馬達、步進馬達

肆、研究過程或方法

研究一、可變倍率透鏡的規劃與設計

對於我想設計的「可變倍率透鏡」，主要的問題有：

1. 表面曲率可變的彈性鏡片；
2. 透光率高的鏡片
3. 方便有效的焦距調整方式；也就是盡可能不要有太多的機械元件，最好應用電壓、溫度、應力等來控制。

針對上面要解決的三項問題，我蒐集了一些參考資料，經過研讀參考資料、思考和討論後，我提出了幾個可能的解決方法和優缺點，以下針對這三項問題逐項說明。

(一)、表面曲率可變的彈性鏡片：

要讓鏡片本身的曲率產生變化，最有效的方法就是讓鏡片可以變形，例如將鏡片的周圍固定住，再讓鏡片產生膨脹，則鏡片會凸出，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：

1. 利用高熱膨脹係數的金屬，周圍固定，當溫度升高時，因為金屬膨脹，所以會向兩側脹大，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是很大，要造成明顯的材料的曲率改變，需要蠻高的溫度，因此這個方法可行性不高。
2. 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，因此向外膨脹，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，所以這個方法可行性不高。

3. 利用環氧樹脂做成一個薄圓碟，當施加上壓力時，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 [3]。但光彈效應引起的折射率變化好像不太大，因此這個方法可行性不高。
4. 利用具有彈性的膜片，用上下兩片周邊密封或一片膜片與玻璃周邊密封而形成中空的囊袋，袋中再裝填透明液體；當由周邊擠壓囊袋時，因體積減小，所以液體會將膜片向外撐，因此使得焦距及倍率改變(如圖 1.1 所示)。因為膜片容易變形，可以有很大的的變形量，因此焦距的變化容易而且變化範圍大，是可行的方法，但如何擠壓囊袋的方法還需要多加思考。

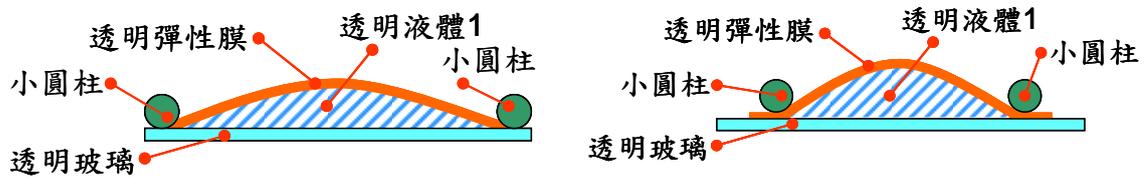


圖 1.1 可變倍率透鏡的方法概念圖

(二)、鏡片本身的透光率要高：

鏡片要盡可能透明，可見光的透過率才會高。

1. 高熱膨脹係數的金屬：金屬不透明，方法不可行；
2. 壓電材料：因為壓電材料中含有鋇，為不透明材料，所以也不可行；
3. 環氧樹脂：透光率高，具有可行性；
4. 彈性膜片和液體：可以找到透明材質，如厚的保鮮膜，因此具有可行性。

(三)、調整焦距的控制方式要方便有效：

要讓控制方式方便有效，較不好用的方法是使用溫度控制或力量控制，較好用的方法是使用電壓電流控制，因此第一項使用加热的控制方式不好。而第二、三項之方式因為使用壓電方式，因此可行。第四項可使用電壓控制小滾筒或壓電材料擠壓囊袋，或是如果用半透膜作為囊袋材質時，可使用電極控制，因此也可行。

綜合以上我對這三項因素的可行性方法的分析，我將其整理如表 1.1 所示。

表 1.1 製作可變倍率透鏡之可行方案分析表

製作可變倍率透鏡之可行方案	高熱膨脹係數金屬	壓電材料	光彈效應	彈性膜片
使用方法	溫度升高→金屬膨脹→曲率改變	加上電壓→材料變形→向外膨脹→曲率改變	施加壓力→有「光彈效應」→折射率改變	周邊擠壓膜片→液體將膜片向外撐→焦距改變
可變鏡片曲率~鏡片可變形	△ 需要高溫度	○ 只需小電壓	X 折射率變化不大	○ 焦距變化容易且範圍大
高鏡片透光率~鏡片要透明	X 不透明	X 不透明	○ 可找到透明材質	○ 可找到透明材質
方便的控制方式~電壓電流控制	△ 溫度控制	○ 電壓電流控制	○ 壓力控制	△ 擠壓控制
** 可行性：○ 高，△：中，X：低				

根據表 1.1 所示的分析結果，我決定使用彈性膜片和液體來作為可變倍率透鏡的架構。這個系統架構如圖 1.2 所示。為了得到範圍較大的焦距和倍率改變，我最初將圓形鏡筒設計成上下兩格，兩格之間用透明玻璃隔開，鏡筒上下端也是用圓形透明玻璃作為密封和保護。在每一格的中間，裝有透明的圓形彈性膜，周圍緊密地固定在鏡筒，因此每一格便形成內外層兩個空間。內層空間在初始時灌入高

折射率透明液體，讓彈性膜保持在平直狀態，外層則為低折射率透明液體或空氣；此時鏡筒如平面鏡，光線平行穿過鏡筒。

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。如圖 1.3 所示是我畫的示意圖，如圖 1.3.I 所示讓兩格中的彈性膜皆向外凸起，形成雙凸透鏡；如圖 1.3.II 所示讓上格中的彈性膜向外凸起，下格保持平直，形成平凸透鏡；如圖 1.3.III 所示讓上格中的彈性膜向外凸起，下格的彈性膜向內凹，形成凹凸透鏡。因此藉著這樣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。變化的方式如表 1.2 所示，共計有 9 種型式的凸透鏡 / 凹透鏡。

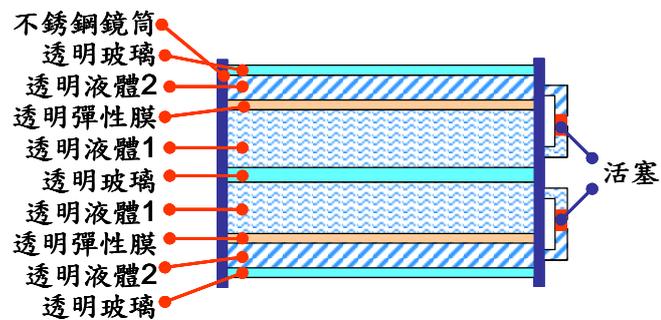


圖 1.2 可變焦距鏡片的架構圖

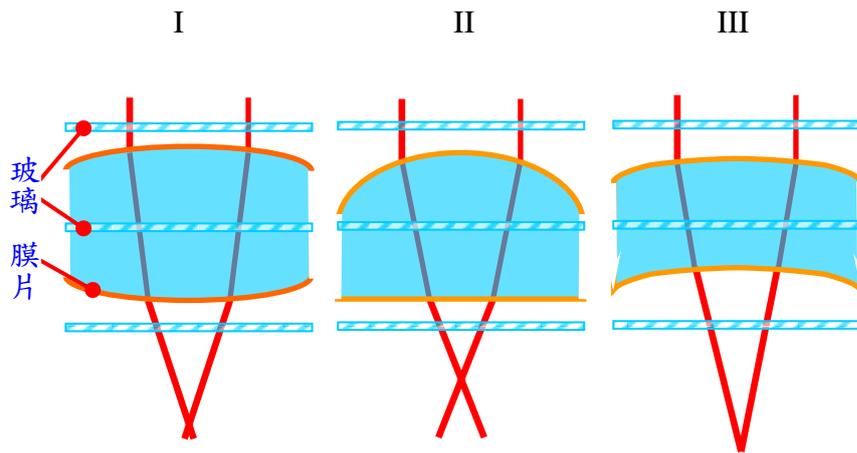


圖 1.3 彈性膜的凹凸與焦距變化

表 1.2 不同型式的凸、凹透鏡

		上層彈性膜		
		凹	平	凸
下層彈性膜	凹	雙凹透鏡	平凹透鏡	凹凸透鏡/凸凹透鏡
	平	平凹透鏡	平面鏡	平凸透鏡
	凸	凸凹透鏡/凹凸透鏡	平凸透鏡	雙凸透鏡

研究二、彈性膜的特性研究

研究中使用彈性膜片和液體來當作可變倍率透鏡，因此必須對彈性膜片的性質進行實驗和分析。

(一) 彈性膜的條件與選擇

先找出可用之薄膜。因為薄膜直接與水接觸，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). 尋找的途徑有四種：
 - a. 根據自己日常生活經驗：包括保鮮膜、樹脂膜、矽膠膜、塑膠手套、乳膠手套；其中樹脂膜和矽膠膜分別是用樹脂糊和防水矽膠接著劑，經過圓筒自己滾壓成的薄膜(如圖 2.1 所示)；手術用乳膠手套彈性好，但都是淡黃色；塑膠手套則是半透明，但彈性差。
 - b. 根據老師的建議：包括手機包膜、培養皿封膜。
 - c. 網路上搜尋：包括金屬保護膜、筆記型電腦鍵盤保護膜。
 - d. 店家的建議：包括保險套、包裝膜。為了找乳膠手套到藥房詢問，老闆建議使用保險套，保險套彈性好，但是材質都是透明度差的乳膠，而且都塗有油脂，所以就沒有使用。為了找筆記型電腦鍵盤保護膜，到電腦材料店詢問，老闆建議使用包裝膜。



- a. 滾壓樹脂，作成樹脂模
- b. 擠壓防水矽膠在塑膠片上
- c. 將矽膠抹平
- d. 矽膠抹平乾燥後，便形成薄膜

圖 2.1 自製矽膠模的過程

2. 研究結果

- (1) 各種薄膜的優缺點評估如表 2.1 所示。
- (2) 樹脂膜遇水會溶化，防水性差；
- (3) 乳膠類薄膜(乳膠手套、保險套)是淡黃色，透明度差；
- (4) 手機包膜較硬，彈性很差；
- (5) 矽膠類膜(矽膠膜、金屬保護膜、鍵盤保護膜)的透明度不佳，且薄的矽膠膜不容易找；矽膠膜是自己將防水矽膠接著劑滾壓而成(如圖 2.1 所示)，厚度厚且不均勻；金屬保護膜噴出厚度不均勻，且為淡藍色；鍵盤保護膜厚度厚，透明度不佳。

3. 研究小結論

經過表 2.1 所示的初步分析，有些薄膜不適合研究的目的，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 種薄膜進行透明度、散射度、彈性度、強度的分析；手機包膜、金屬保護膜、鍵盤保護膜、保險套等 4 種薄膜就不進行進一步分析。

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											

(二) 彈性膜的透光度

透鏡所使用的薄膜需要高透光度，才能讓大部分之光線透過，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。為了測試薄膜的透光度和散射度，我自製了一個薄膜透光散射自動測量系統，原理是利用雷射光筆的雷射光束通過薄膜，在膜的另一端用光感測器接收雷射光強度，分析薄膜的透光度；並讓光感測器以等速掃過整片薄膜，來瞭解光束發散的程度，分析薄膜的散射度。

1. 研究過程

- (1). 將保鮮膜、樹脂膜、矽膠膜、塑膠手套、乳膠手套、培養皿封膜、包裝膜等 7 種薄膜裁剪成 9 x 2 cm 的大小；
- (2). 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 所示)，各種薄膜夾在樣板中間，變成薄膜試片；
- (3). 以積木製作測試平台(如圖 2.3 所示)，有底座固定雷射光筆和薄膜試片插座，讓雷射光筆光束通過薄膜試片正中心；使用馬達、減速齒輪、齒軌等作成光感測器移動台，讓光感測器以等速掃過薄膜試片，可測得整片薄膜試片的光強度分布情形。
- (4). 製作開關和止擋開關，讓移動台移動固定距離後，撞擊觸碰感應器，讓程式可以控制停止移動。
- (5). 使用 Robolab 軟體撰寫控制程式(如圖 2.4 所示)，讓移動台等速移動，每 0.1 秒量測光強度並自動記錄，並控制移動台的停止。
- (6). 整理記錄的數據，並分析薄膜的透光度。

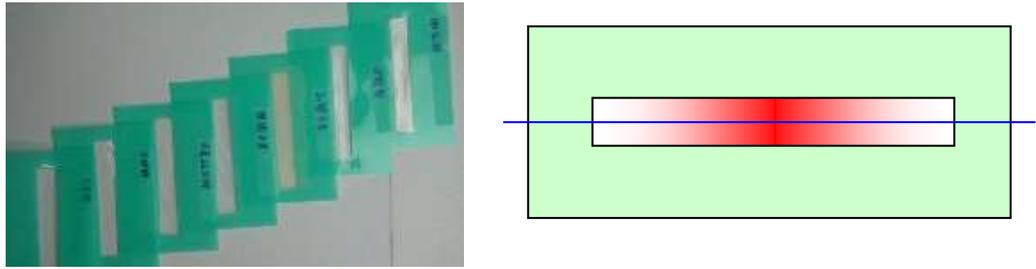


圖 2.2 薄膜試片及受雷射光束照射之示意圖

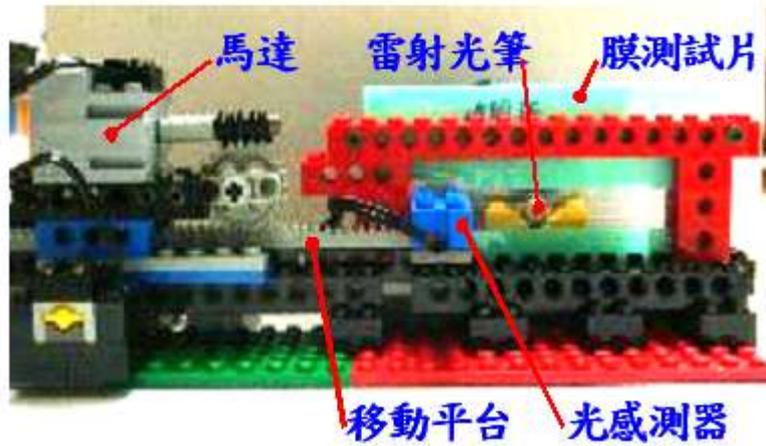


圖 2.3 自製薄膜透光散射自動測量系統

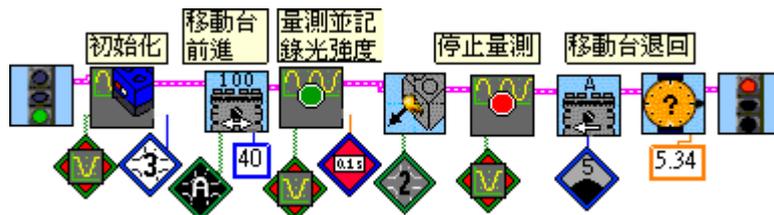


圖 2.4 薄膜透光散射自動測量系統的控制程式

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，可以很快且很有效率的測量透光度，並自動記錄實驗數據。
- (2) 實驗的結果會由程式自動畫出曲線圖後，如圖 2.5 所示說明如何分析曲線結果來決定透明度和散射程度。
- (3) 如圖 2.6 所示是空氣和各種薄膜的實驗曲線，如圖 2.7 所示則為全部薄膜之曲線。
- (4) 各種薄膜的透光度分析整理如表 2.2 所示，並畫出比較圖如圖 2.8 所示。
- (5) 由表 2.2 所示及圖 2.8 所示可看出保鮮膜和包裝膜的透光度最好，乳膠手套的透光度最差。

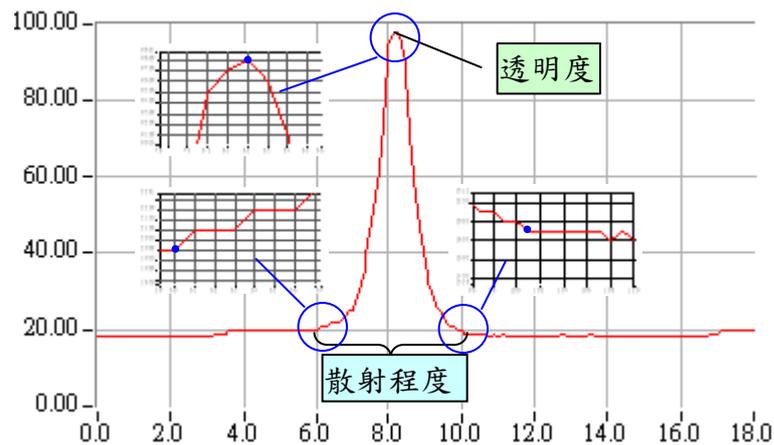


圖 2.5 由實驗結果曲線分析薄膜之透光與散射

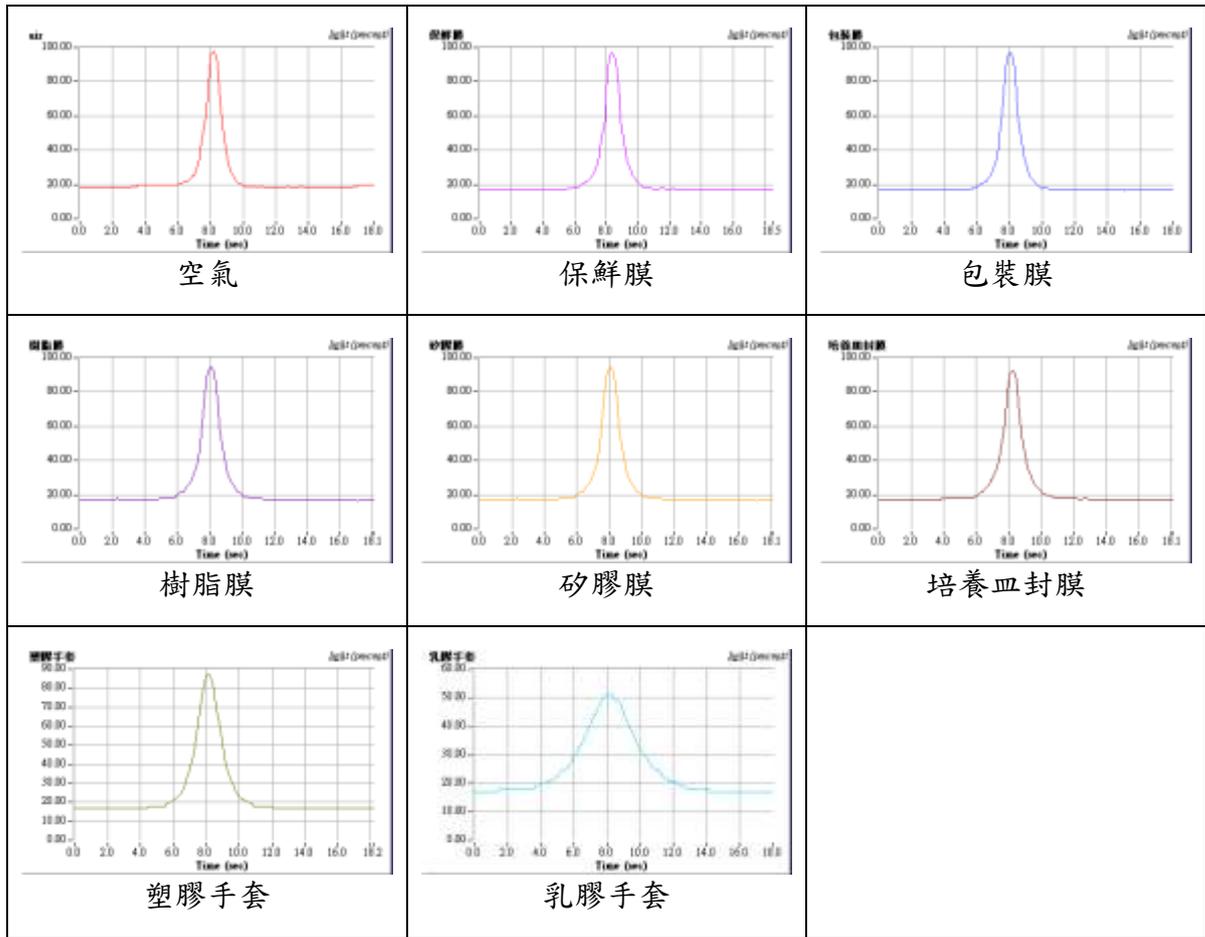


圖 2.6 由實驗結果曲線分析薄膜之透光與散射

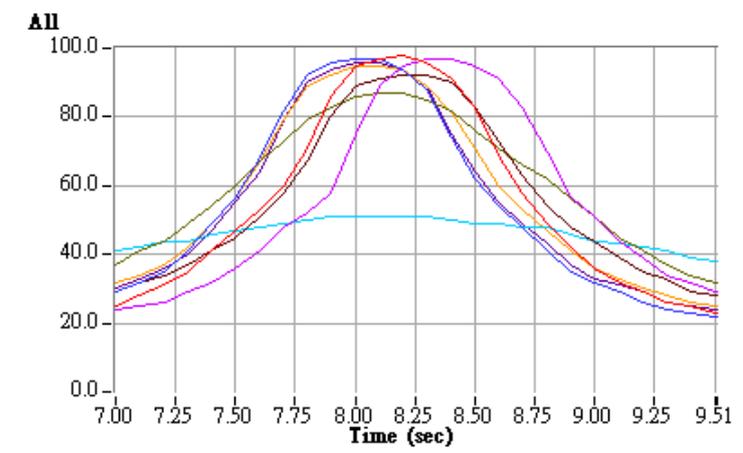


圖 2.7 全部薄膜的透光及散射實驗結果曲線 (各曲線顏色之意義與圖 2.6 所示相同)

表 2.2 各種薄膜的透光度及散射程度分析

類別	透明度	高透明度排比	透光度開始及結束變化之時間	散射程度	低散射程度排比
空氣	98.0		6.0/10.1	4.1	
包裝膜	97.0	1	5.6/10.0	4.4	1
保鮮膜	97.0	1	5.5/10.9	5.4	5
培養皿封膜	92.0	4	5.8/10.8	5	4
塑膠手套	87.0	5	5.5/10.9	5.4	5
乳膠手套	51.0	6	3.6/12.8	9.2	6
矽膠膜	95.0	3	5.8/10.4	4.6	3
樹脂膜	96.0	2	5.9/10.4	4.5	2

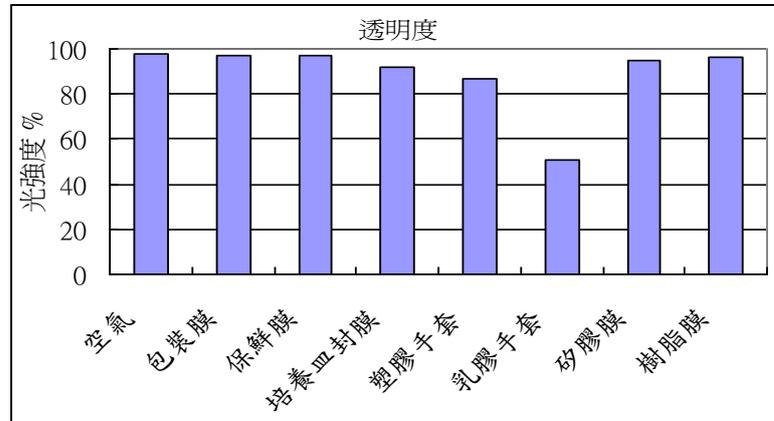


圖 2.8 各種薄膜之透光度實驗結果比較

(三) 彈性膜的散射度

光通過薄膜時，會因薄膜內部材料不均勻，會有不同方向的折射，造成光束穿過薄膜後光束不集中的散射。在研究中要使用的薄膜的散射度要低，因此我利用研究二、(二)的自製薄膜透光散射自動測量系統，來量測光束發散的程度，分析薄膜的散射度。

1. 研究過程

- (1). 使用與前項研究相同的 7 種薄膜試片；
- (2). 使用相同的測試平台和控制程式，每 0.1 秒量測光強度並自動記錄，並控制移動台的停止。
- (3). 整理記錄的數據，並分析薄膜的散射度。

2. 研究結果

- (1) 實驗的數據如表 2.2 所示，曲線圖如圖 2.6 及圖 2.7 所示。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(如圖 2.5 所示)
- (2) 各種薄膜的散射度分析整理如表 2.2 所示，並畫出比較如圖 2.9 所示。
- (3) 由表 2.2 所示可看出包裝膜的散射程度最低，而樹脂膜的散射程度最高。

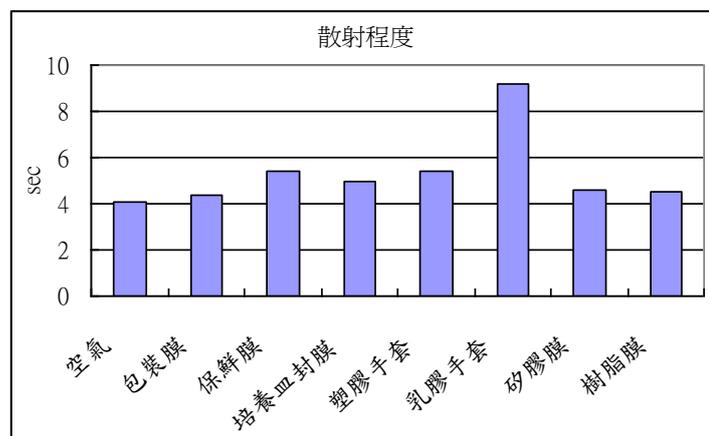


圖 2.9 各種薄膜之散射程度實驗結果比較

(四) 彈性膜的彈性

薄膜靠內部填充液的壓力向外膨脹或內縮，因此薄膜的彈性要好。因此我要透過實驗來量測各種薄膜的彈性，包括薄膜的彈性係數和降伏強度。

彈性物質的受力和變形量具有下列的關係：

$$F = k \cdot x$$

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 ，並記錄變形量，便可以由 $k = F/x$ 知道彈性物質的彈性係數，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。而彈性物質受力後產生變形，等外力移除後，會回復原來長度；但是如果施力太大，彈性物質就會無法回復原長度，會產生永久變形，而開始產生永久變形的單位面積的力量稱為降伏強度 [4]。

1. 研究過程

- (1). 將各膜片裁剪成 10 x 2 cm 的長條，並在各膜片上作兩記號點，相隔 4cm(如圖 2.10 所示)。
- (2). 將膜片兩端黏在兩個自製的固定棒上；一個固定棒固定在桌面，另一個用彈簧秤往外拉，給膜片張力(如圖 2.11 所示)。
- (3). 彈簧秤分別施力 100、200、300、400、500 gw 的力量。
- (4). 每次施力後，量測並記錄膜片變形量；再移除施力，量測並記錄膜片永久變形量；
- (5). 對各膜片重覆(2)~(4)之實驗步驟。
- (6). 整理實驗數據，並畫出曲線圖。



圖 2.10 各膜片的試片

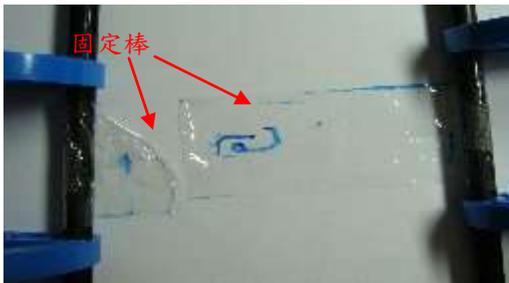


圖 2.11 膜片的彈性實驗

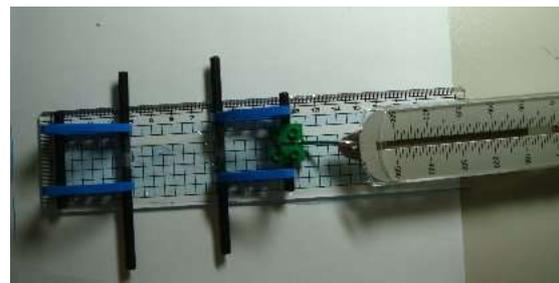


圖 2.12 被拉斷的包裝膜膜片

2. 研究結果

- (1) 各膜片的彈力實驗的數據如表 2.3 所示，彈力實驗的曲線圖如圖 2.13 所示。
- (2) 各種薄膜的彈性和降伏強度分析整理如表 2.4 所示。
- (3) 由表 2.4 所示可看出樹脂膜、矽膠膜、包裝膜的彈性係數最低，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。

表 2.3 各膜片的彈力實驗的數據 (變形量 cm / 永久變形量 cm)

類別	產生變形量和永久變形量的施力大小					
	100 gw	200 gw	300 gw	400 gw	500 gw	破裂時變形量 (cm)
包裝膜	0.4 / 0	1.0 / 0	1.5 / 0.1	2.1 / 0.15	2.0 / 0.4	7.1
保鮮膜	0.1 / 0	0.1 / 0	0.2 / 0	0.3 / 0	0.4 / 0	1
培養皿封膜	0 / 0	0 / 0	0.1 / 0	0.2 / 破裂	--	0.2
塑膠手套	0.7 / 0	1.3 / 0.2	2.1 / 0.3	2.5 / 0.4	3.2 / 0.4	10.3
乳膠手套	0.7 / 0	2.6 / 0.1	5.5 / 0.3	8.4 / 0.5	12.4 / 0.5	28
矽膠膜	2.8 / 0	4.6 / 0	6.7 / 0	7.3 / 0	9.8 / 0	15.0
樹脂膜	1.3 / 0.6	5.0 / 2.5	8.1 / 3.4	11.0 / 3.5	13.5 / 4	15.4

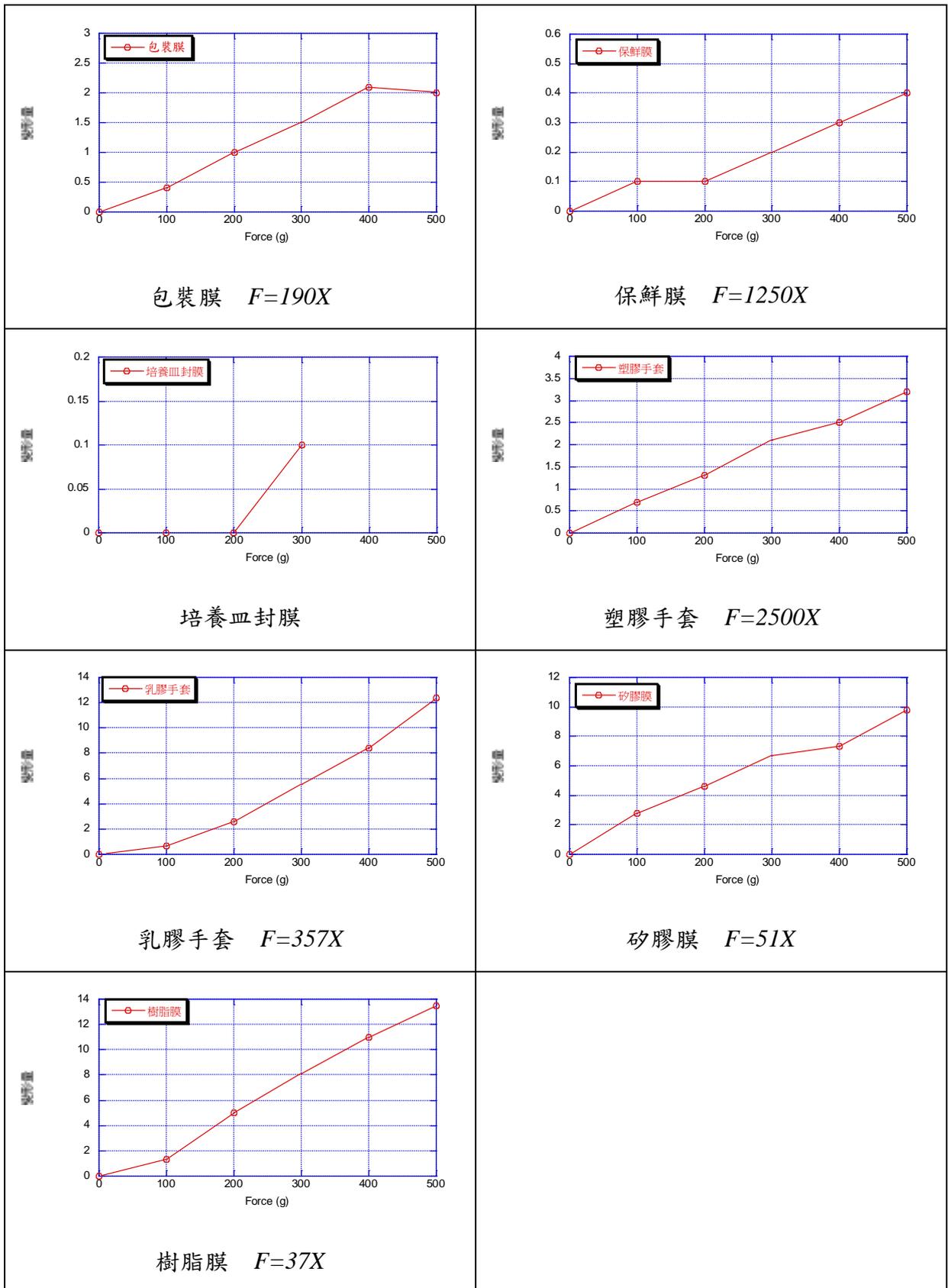


圖 2.13 薄膜的彈力實驗曲線圖

表 2.4 各薄膜之彈性係數和降伏力

	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

(五) 彈性膜的強度

薄膜被內部填充液的壓力向外擠壓，必須要有好的材料，否則往外撐開便容易破裂。我透過實驗來量測各種薄膜的拉伸強度。因為有些膜片蠻強韌，若要量測拉斷的力量需要較大刻度的彈簧秤，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)。

1. 研究過程

- (1) 將上面實驗的各膜片兩端黏在兩個自製的固定棒上；一個固定棒固定在桌面，另一個固定棒用力往外拉，給膜片張力。
- (2) 記錄膜片開始破裂時的變形量。
- (3) 對各膜片重覆(1)~(2)之實驗步驟。
- (4) 整理實驗數據，並畫出曲線圖。

2. 研究結果

- (1) 實驗的數據如表 2.3 所示。
- (2) 如表 2.4 所示破裂時變形量算出各膜片的拉伸強度。
- (3) 如表 2.4 所示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。

表 2.4 各膜片的破裂時變形量和拉伸強度

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

(六) 研究二結論

由上面的各項討論中，將各薄膜的特性整理在表 2.5 所示中，並依程度給予排序，最後再將排序相加(透明度和低散射度很重要，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好薄膜。如表 2.5 所示，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 各薄膜的特性整理及排序

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

研究三、填充液的特性研究

研究中將使用液體填充液造成薄膜的擴張或收縮，當作可變倍率鏡片，因此必須對填充液體的性質進行研究和分析。

在研究中，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。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。
- (3) 參考 MSDS 表，找出各液體之腐蝕性、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 所示。
- (3) 根據表 3.1 所示之整理結果，填充液以甘油及水較為理想。

表 3.1 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	×

研究四、填充液改變量的影響

當改變透鏡內的填充液量時，會使薄膜外張或內縮，讓薄膜表面形成球面，變成一個液體透鏡，也改變了透鏡的表面曲率，形成不同的透鏡焦距。但是透鏡內的填充液量的改變與薄膜表面曲率和透鏡焦距存在何種關係呢？這是我所要研究的課題。

(一) 透鏡曲率和透鏡折射率

透鏡的曲率並不是愈大愈好，若曲率太大，反而可能造成無法聚焦 [3]。因此我先要測試各種不同透鏡曲率和透鏡折射率，瞭解焦點集中的情形，也確定我的液體透鏡可使用的透鏡曲率範圍和高折射率液體的可用範圍。

但是不可能找到各種曲率的透鏡和各種折射率的鏡片，而且這樣實驗也太花時間，所以我開始尋找透鏡焦距的模擬軟體。幸運地找到台灣師範大學黃福坤老師在網路上設立的物理教學示範實驗教室 [3]，其中就有「面鏡與(厚)透鏡成像動畫」，可以讓我改變透鏡曲率和透鏡折射率等條件來進行模擬。

1. 研究過程

如圖 4.1 所示是我使用該程式進行模擬以及整理數據的情形。我使用透鏡曲率和透鏡折射率作為變數，並量測焦點離透鏡後端的位置用來瞭解焦點的位置，並量測光束離開透鏡後端時的一半寬度用來瞭解光束聚焦的情形。

1. 研究結果

- (1) 模擬的結果整理如表 4.1 所示。
- (2) 如表 4.1 所示中可知道液體折射率愈大，焦距愈短；當使用水(折射率 1.333)或甘油(折射率 1.473)，若曲率半徑過大(>53.2 cm)時，光束不易聚焦，也就是影像會不清晰；曲率半徑過小(<31.9 cm)時，焦距會很長(超出程式可模擬範圍)，就要有較長的鏡筒(註：此處曲率半徑的定義使用該模擬軟體的定義)。
- (3) 對水和甘油而言，在透鏡厚度 100cm 時，曲率半徑在 50 cm 以內，都可以得到聚焦的成像。

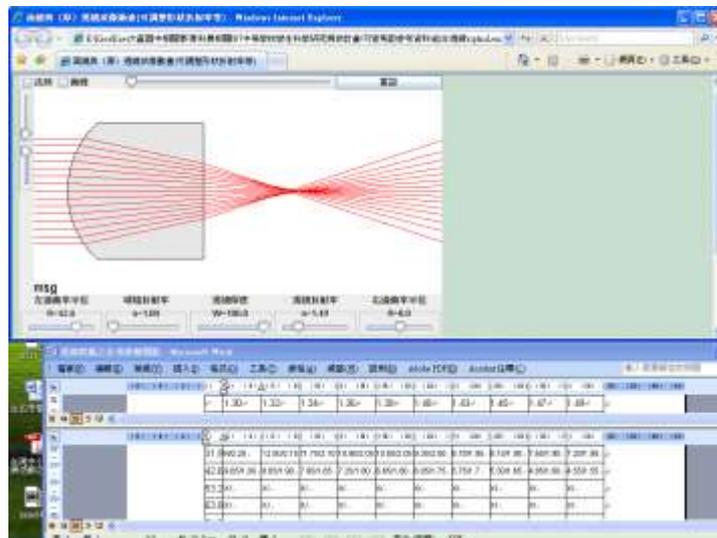


圖 4.1 使用程式進行透鏡焦點模擬

表 4.1 透鏡模擬之結果

		透鏡折射率									
		1.30	1.32	1.34	1.36	1.38	1.40	1.43	1.45	1.47	1.49
透徑 曲率 半徑 (cm)	2.1	N/3.00	N/2.95	N/2.95	N/2.95	N/2.90	N/2.90	N/2.90	N/2.90	N/2.85	N/2.85
	10.6	N/2.75	N/2.65	N/2.65	N/2.6	N/2.6	N/2.55	N/2.55	N/2.55	N/2.50	N/2.50
	21.3	N/2.40	N/2.45	N/2.45	N/2.30	N/2.30	N/2.25	N/2.25	N/2.25	N/2.20	12.50/2.20
	31.9	N/2.20	12.50/2.15	11.75/2.10	10.90/2.05	10.05/2.05	9.35/2.00	8.70/1.95	8.15/1.90	7.65/1.90	7.20/1.90
	42.6	9.65/1.00	8.65/1.90	7.95/1.85	7.25/1.80	6.65/1.80	6.05/1.75	5.75/1.7	5.30/1.65	4.85/1.60	4.55/1.55
	53.2	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/
	63.8	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/
	74.5	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/
	85.1	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/
	95.7	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/	X/
** 數據 p/q : p : 鏡平後端至焦點距離，q : 鏡平後端光束寬的一半。 ** N : 焦距太遠； X : 散焦											

(二) 對彈性膜曲率的變化

這個研究是要瞭解填充液的變化量會引起彈性膜的曲率變化情形。在這個研究中我先找透明的壓克力管來替代鏡筒，目的是方便觀察光束的折射情形，除了檢查研究的構想是不是正確可行，另一方面則測量焦距的變化。

實驗中將包裝膜薄膜套在壓克力管前端，用橡膠圈束緊，後端再連結 10 ml 的塑膠針筒，用來壓入填充液，因為灌入填充液時有時必須整個壓克力管浸入填充液內，避免管內留有氣泡，需大量的填充液，因此在此階段先使用水作為填充液。

但實驗過程發現包裝膜薄膜容易被壓克力管前緣給劃破，經過不斷的嘗試後，最後找到方法，先在管前端套上一圈氣球膜，再套上薄膜，如此就解決薄膜被劃破的問題。另外後端的塑膠針筒因水壓大會滲漏，經過嘗試後，以單孔橡皮塞先壓入壓克力管，塑膠針筒再壓入塞孔中，便解決了滲漏的問題。完成品如圖 4.2 所示。

實驗中為了觀察焦距的變化，使用了一枝雷射光筆由管前端射入光束，來觀察光束行進路徑的變化。但初步測試後發現不容易觀察出焦距點，因此改用兩枝光束平行的雷射光筆並排射入光束，則很容易便發現兩光束的交會點就是焦距。

1. 研究過程

- (1) 準備不同管徑(管徑外徑 10, 12, 15, 20, 22, 25, 30, 35, 40, 45 mm)透明壓克力管共 10 個。
- (2) 各壓克力管前端分別套上包裝膜薄膜(內面以氣球膜保護)束緊，後端連結單孔橡皮塞和塑膠針筒。
- (3) 緩慢地注入填充液，並反覆抽壓，讓管內充滿填充液而沒有氣泡，並讓薄膜保持平面。
- (4) 以兩隻雷射光筆的平行雷射光束由管前端與管軸平行射入壓克力管內(如圖 4.2 所示)。
- (5) 慢慢將塑膠針筒內填充液壓入管內，觀察並記錄薄膜的表面曲率變化和焦距的變化。
- (6) 另量測填充液壓入管內時，薄膜頂端向外擴張的距離(如圖 4.3 所示)

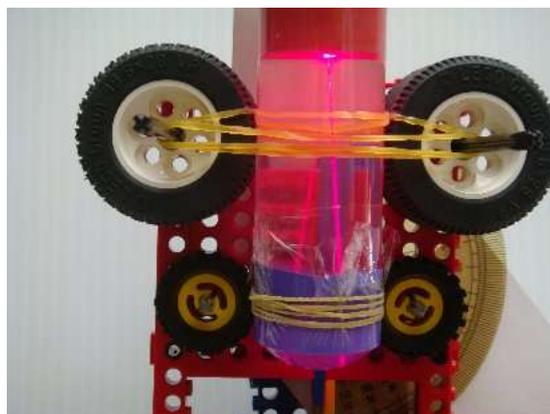


圖 4.2 簡易液體透鏡及填充液

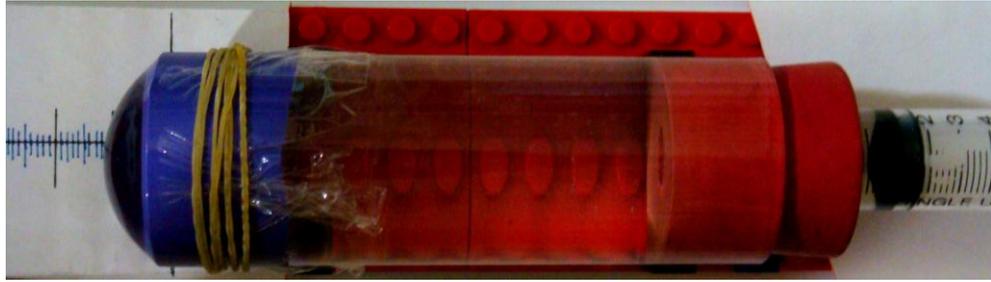


圖 4.3 量測薄膜頂端向外擴張的距離

2. 研究結果

- (1) 實驗的設計可以很容易觀察到焦距的移動變化。
- (2) 改變填充液量，便改變薄膜的表面曲率和透鏡焦距，證明研究構想是確實可行。
- (3) 經過實驗測試，決定 30 mm 管徑可得到較佳的觀測範圍，同時給薄膜足夠的支撐力。因此後續研究均以管徑 30 mm 進行實驗分析。
- (4) 填充液改變量和透鏡外擴距離之關係如圖 4.4 所示的曲線圖，可發現填充液改變量和薄膜頂端向外擴張的距離成正比，由實驗數據的曲線擬合中，可以找到兩者的關係如方程式(1)，其中 e 為薄膜外擴距離(mm)， Δq 為增加之液體量(c.c.)。

$$e = -0.589 + 2.125 \cdot \Delta q \quad (1)$$

- (5) 薄膜外擴距離 e 與透鏡曲率的關係如圖 4.5 所示推算出，其中 r_d 為管半徑 13 mm。

如圖 4.5 所示可知 $r^2 = (r - e)^2 + (r_d)^2$

得到 $2er = e^2 + r_d^2$ ，亦即曲率半徑 $r = \frac{e^2 + r_d^2}{2e}$ (2)

或薄膜外擴距離 $e = r - \sqrt{r^2 - r_d^2}$ (3)

由公式(1)和(2)，可以知道：

$$r = \frac{e^2 + r_d^2}{2e} = [e + \frac{r_d^2}{e}] / 2, \text{ 即 } r = -0.589 + 2.125 \cdot \Delta q + \frac{r_d^2}{-0.589 + 2.125 \cdot \Delta q} \quad (4)$$

$$\text{或 } \Delta q = \frac{r - \sqrt{r^2 - r_d^2} + 0.589}{2.125} \quad (5)$$

因此從公式(4)或(5)就可以得到填充液改變量 Δq 和液體透鏡曲率 r 的關係了。所以便可以知道壓入多少填充液後，透鏡曲率半徑的值；或是要得到何種曲率半徑時，所需的填充液量。公式(4)或(5)的關係式將用在後續的焦距或倍率調整控制程式中，用來自動控制填充液量，來得到所需的透鏡焦距。

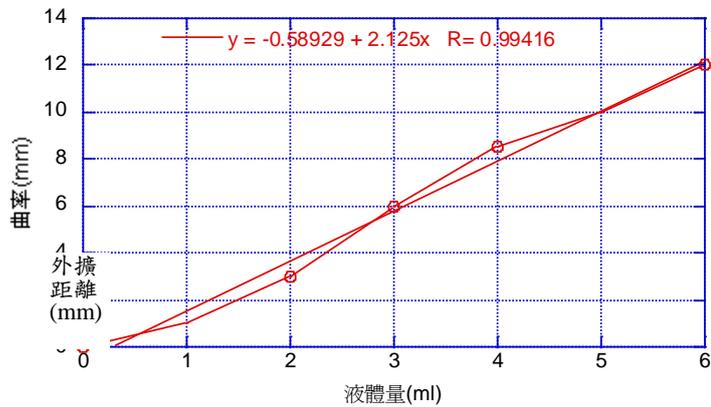


圖 4.4 填充液改變量和鏡片薄膜頂端向外擴張的距離之關係

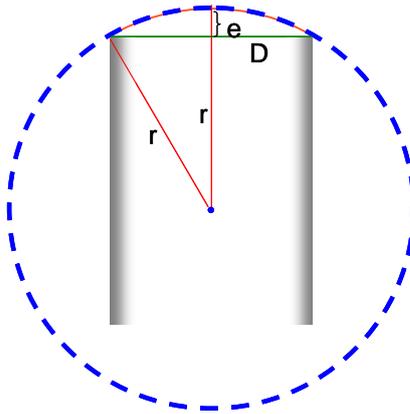


圖 4.5 填充液改變量和鏡片薄膜頂端向外擴張的距離之關係

研究五、透鏡位置的影響

研究四中證實了所設計的液體透鏡的可行性。但重力是否會對液體透鏡造成影響？例如透鏡以水平方式擺放時，重力是否會使下端的薄膜受力較大，因此薄膜形成上下不對稱的曲面呢？那這樣的話透鏡焦距是不是就不固定，各光束也無法再集中在一點呢？

因此我設計了一個自製鏡筒旋轉測量系統(如圖 5.1 所示)，可以把液體透鏡管安裝在旋轉盤上，後面有量角器來知道旋轉的角度，底端有兩平行雷射光束，用來觀測焦距。

1. 研究過程

- (1) 將液體透鏡管安裝在自製鏡筒旋轉測量系統的旋轉盤上。
- (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)，觀察曲面是否變形，並量測記錄焦距的改變量(如圖 5.2 所示)。

2. 研究結果

- (1) 因為焦距點不容易直接量測，因此改為先拍照，再由相片分析焦距長度。
- (2) 因為相機會有移動，每張相片拍出的液體透鏡管大小不一，因此每個由相片上量到的距離要經過校正，校正的方法是以第一張液體透鏡管垂直時相片的管徑為基準管徑，其他各張相片中的管徑除以基準管徑的比例就是各張相片的縮放比例，再把各相片量到的焦距長度乘上這個比例，便是校正後的焦距長度。
- (3) 由各角度下的校正後焦距長度可知，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 5.1 自製鏡筒旋轉測量系統

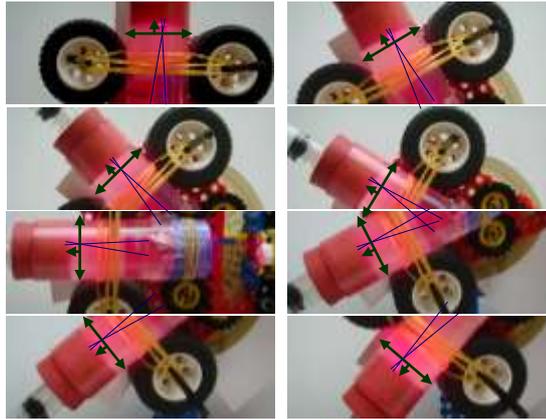


圖 5.2 自製鏡筒旋轉測量系統測量情形

研究六、如何改變透鏡內填充液量

接下來的問題是如何改變彈性膜內層填充液量。對這個部分我初始的想法有下列三種方法。

- (1) 在彈性膜內外層使用不同折射率的液體，內外層以圓管相連，但中間使用微活塞阻隔，若控制微活塞向下移動，會使內層液量增加、外層液量減少，因此彈性膜將向外凸起；反之若控制微活塞向上移動，彈性膜將向內凹入(如圖 6.1 所示)。
- (2) 在彈性膜外層使用空氣，兩格內層將分別接上微幫浦，用來控制彈性膜內層的液體量，進而改變鏡片焦距(如圖 6.2 所示)。
- (3) 目前理化課教到電解質溶液，因此我有一個想法是如圖 6.3 所示，使用半透膜做為彈性膜，彈性膜兩側為兩種不同液體，用半透膜隔開，其中內層液體為強電解質，初始時裝填較多的量，因此會將彈性膜推擠凸出形成凸透鏡。如果將電壓正負極都接在內層，則正負離子都存在內層，因此此時保持為凸透鏡；若將電極接在內外層兩側，使電解質解離，而只有較小的正離子(或負離子)可以穿過半透膜，使外層體積增加而內層體積減少，因此彈性膜逐漸平直形成平透鏡，或繼續向內凹陷形成凹透鏡。這個方式可

以簡單地用電壓大小控制彈性膜的曲率變化，會讓系統的操作方式和架構都比較簡單，但難度相當高，不容易進行。

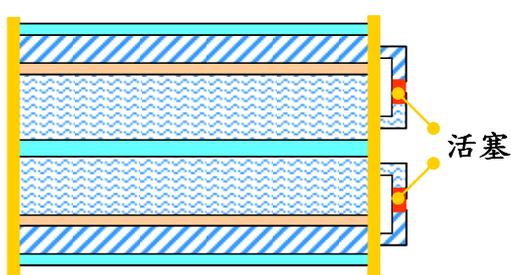


圖 6.1 活塞法

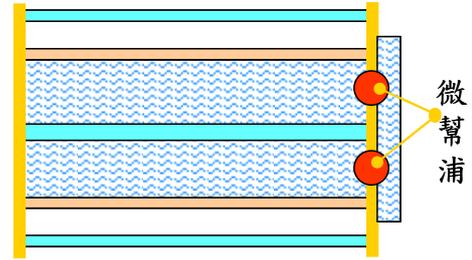


圖 6.2 微幫浦法

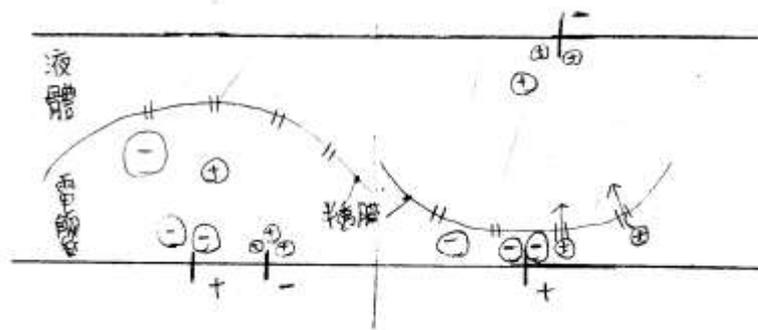


圖 6.3 使用電解質和電極位置來控制半透膜凹凸之示意圖

1. 研究過程

- (1) 設計使用微活塞和微幫浦的液體透鏡。
- (2) 在書籍、網頁、公司型錄上找尋適合的微活塞和微幫浦。

1. 研究結果

- (1) 使用微活塞和微幫浦的液體透鏡分別如圖 6.1 和圖 6.2 所示。
- (2) 微活塞法的想法可行性高，經過分析後，因為薄膜上層要使用低折射率介

質，因此我使用空氣，所以液體透鏡只要單個活塞連接薄膜下層便可以，不需要連接薄膜上下層，簡化了液體透鏡的設計。但這樣的活塞要能防漏和輕巧，找了一個月的時間都找不到市面有成品出售，因此在進行透鏡放大倍率的研究上會使用微活塞法的概念，但先以塑膠針筒替代使用。

(3) 微幫浦法：微幫浦可快速將液體注入薄膜內層，缺點是噪音比較大。但是這樣的微幫浦不容易找到，機械工業上使用的都是很大流量；我原本想醫療上會有這樣的微幫浦，但找了一個月的時間也都找不到，所以不採用這種方法。

(4) 半透膜法因為反應慢，變化量小，所以不採用這種方法。

(5) 因為要能方便的將填充液壓入透鏡內，因此我後來採用微幫浦法的概念，另外再設計了彈性囊袋法，其示意圖如圖 6.4 所示。概念是在透鏡外設一圈彈性的密封囊袋，只留一開口和透鏡內層相連通。囊袋外側可用彈性束帶環繞。當囊袋被壓縮，填充液便被壓入透鏡內，使透鏡焦距改變；當束帶放鬆時，透鏡彈性膜的彈性會將填充液壓回囊袋，使透鏡曲率減小。這方法可快速改變透鏡焦距。而壓縮囊袋的方式如圖 6.5 所示以小馬達控制彈性束帶的收緊或放鬆，或以如圖 6.6 所示的方式用滾輪來移動壓縮囊袋，都是可行又方便的方法。

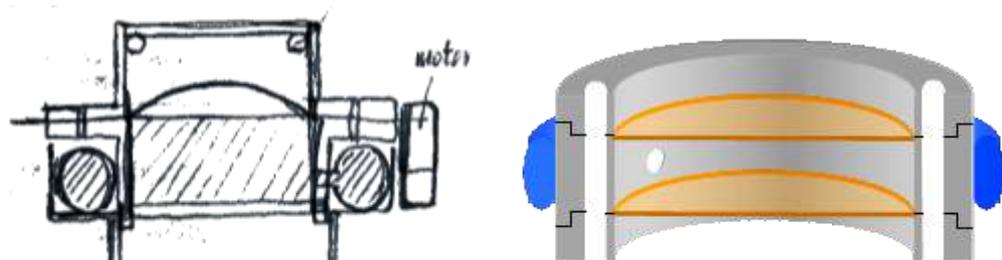


圖 6.4 彈性囊袋法

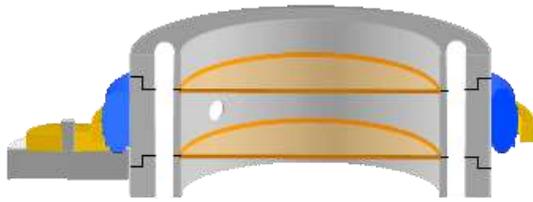


圖 6.5 馬達控制彈性束帶來壓縮囊袋



圖 6.6 滾輪移動壓縮囊袋

研究七、可變倍率透鏡系統的設計

根據前面各研究的結果，可變倍率透鏡系統使用包裝膜薄膜和水或甘油作為液體透鏡模組。由於內裝液體，必須有防滲漏的考量，所以我先進行包含液體透鏡模組的可變倍率透鏡系統設計。

由於希望這個可變倍率透鏡系統可以應用較大範圍的放大以及教學上使用，所以我採用模組化設計。我將整個系統分為液體透鏡模組和連接組兩部分，液體透鏡模組用來容納薄膜和填充液，而連接組用來作為光學鏡筒，連接兩個液體透鏡模組。

1. 研究過程

- (1). 設計液體透鏡模組，必須考慮能將膜緊壓，並且防止填充液滲漏出來。
- (2). 設計連接組，大小要能與液體透鏡模組相配合。

2. 研究結果

- (1) 根據先前的構想，設計出第一代，如圖 7.1 所示。藍色部分是透明玻璃，黃色部分是薄膜，玻璃與薄膜皆固定在鏡筒上。
- (2) 但第一代的設計無法替換薄膜，因此再設計出第二代，如圖 7.2 所示。第二代將液體透鏡模組分為上中下三個單元，形成一個雙凸透鏡。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，主要用來夾緊薄膜和防止薄膜被損壞。兩薄膜夾在各單元間，並加上 O 型環的設計，再用螺絲鎖緊，就可以防止填充液滲漏出來。

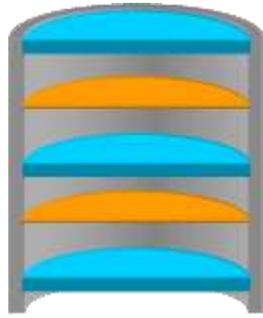


圖 7.1 第一代液體透鏡模組設計

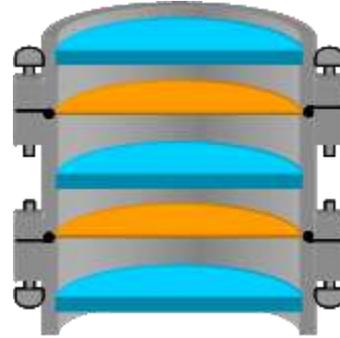


圖 7.2 第二代液體透鏡模組設計

- (3) 如圖 7.3 所示為第三代，為了使用時的方便，把第二代液體透鏡模組三個單元的雙凸透鏡改為兩組單凸透鏡，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，所以共有四個相同的單元，如圖 7.3 所示。第三代因為使用相同模組，製造上比較簡化，也容易有單一透鏡的組合或雙凸透鏡的組合，使得使用上彈性更大。第三代的設計圖草稿如圖 7.4 所示。
- (4) 我將設計圖拿去請工廠幫忙加工製作，完成了一套實體的液體透鏡模組和可變焦距鏡片系統(如圖 7.5 所示)，這樣就不只是理論上的討論而已，還可以有實體來進行實驗和驗證。
- (5) 經過實際測試，確定可以經過調整填充液量，連續改變液體透鏡的焦距，且成像清楚，放大倍率目前在 10 倍左右(如圖 7.6 所示)。若再調整兩個液體透鏡的距離，應該可以達到低倍率顯微鏡的目標。

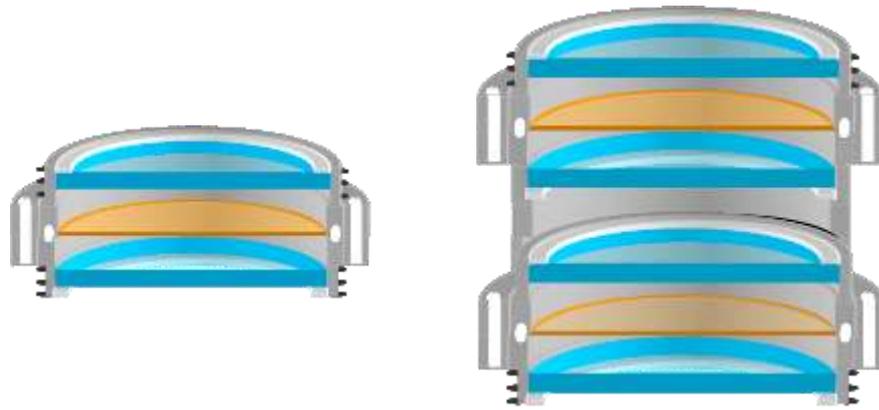


圖 7.3 第三代液體透鏡模組設計

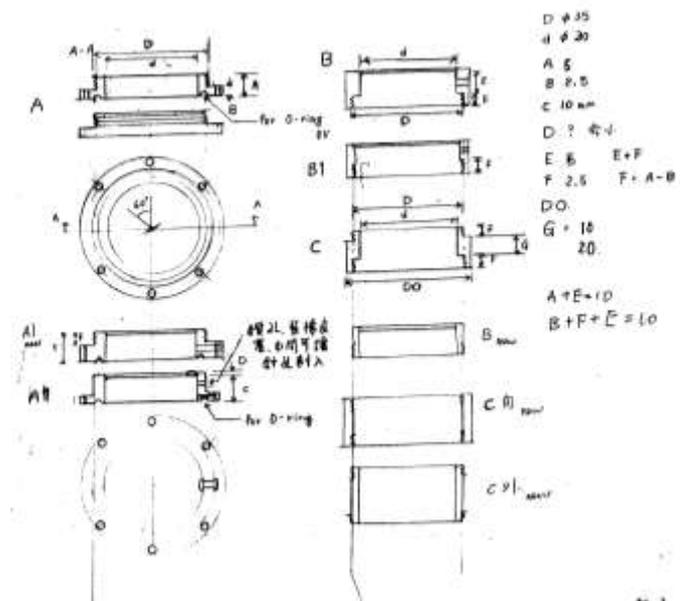


圖 7.4 第三代液體透鏡模組設計草圖

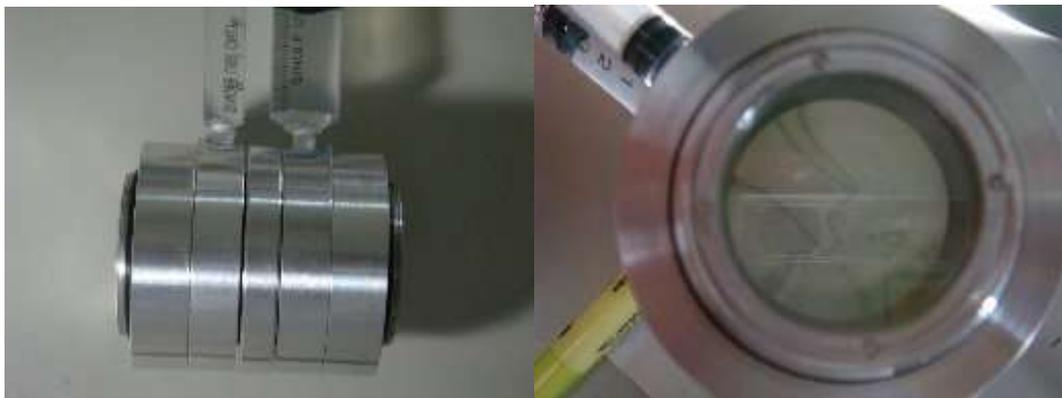


圖 7.5 完成之第三代液體透鏡模組和可變焦距鏡片系統



圖 7.6 可將 14 號字體放大

- (6) 第三代雖然具有雙凸或雙凹透鏡的功能，但透鏡體積較大，且一般使用中，雙凹透鏡很少使用，因此我把第三代再改良成第四代的雙凸透鏡，如圖 7.7 所示；這個雙凸透鏡有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。因此可以讓整個液體透鏡體積大為縮小，方便使用與攜帶。
- (7) 第四代的詳細設計圖如圖 7.8 所示。我再將設計圖拿去請工廠幫忙加工製作，完成第四代的實體的液體透鏡模組(如圖 7.9 所示)。
- (8) 第四代液體透鏡模組經過實際測試，可以連續改變液體透鏡的焦距，可清楚的看見螞蟻細部構造(如圖 7.10a 所示)，或印刷文件的頁面網紋(如圖 7.10a 所示)，且成像清楚，放大倍率約 20 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)。

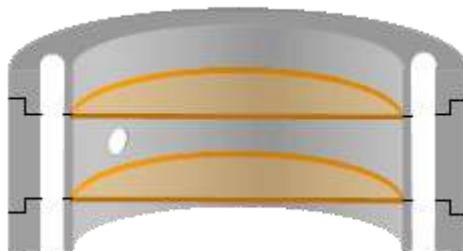


圖 7.7 第四代液體透鏡模組設計

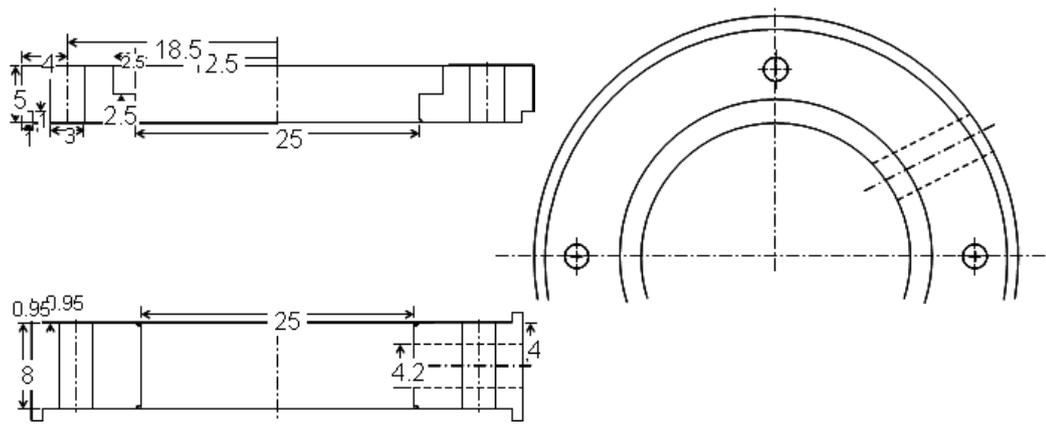


圖 7.8 第四代液體透鏡模組設計草圖



圖 7.9 第四代液體透鏡模組



(a) 螞蟻細部構造

(b) 12 號英文字及印刷文件的頁面網紋

圖 7.10 第四代液體透鏡模組

研究八、填充液量調整控制裝置

我的研究最後階段便是填充液量調整控制的裝置和程式。

(一) 填充液量控制裝置

根據研究六的分析，這個可變倍率透鏡的焦距倍率調整是採用彈性囊袋法。而壓縮囊袋的方式如圖 6.5 所示以小馬達控制彈性束帶的收緊或放鬆，或如圖 6.6 所示的方式用滾輪來移動壓縮囊袋，都是可行又方便的方法。

1. 研究結果

- (1) 如圖 6.5 和圖 6.6 所示是以囊袋環繞彈性束帶，保護囊袋不受損傷；如圖 6.5 所示使用馬達控制彈性束帶的收緊和放鬆，來控制囊袋中的填充液進入或流出透鏡內，使透鏡焦距改變。
- (2) 如圖 6.6 所示是在透鏡外圈設一圈外環，外環上有一垂直滾輪(如圖 8.1a 所示)，轉動外環時可讓滾輪由囊袋末端位置向囊袋開口位置滾動，則可以壓縮囊袋(如圖 8.1c 所示)，控制囊袋中的填充液進入或流出透鏡內，而外環可以用馬達驅動或是手動調整，而手動調整方式非常適合學校透鏡單元的教學使用。

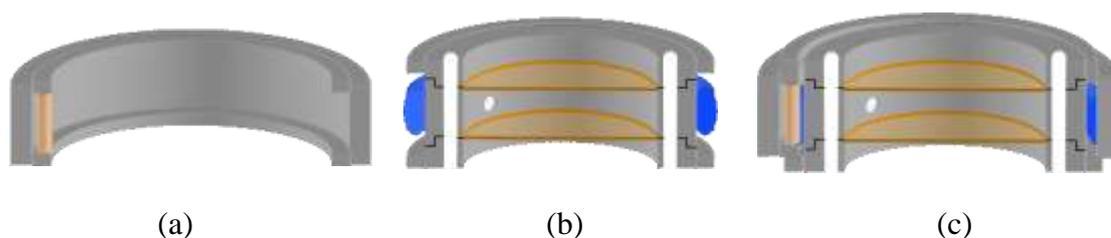


圖 8.1 具垂直滾輪和囊袋的透鏡倍率調整裝置

(二) 填充液量控制程式和設備

目前設計的可變倍率透鏡系統是使用彈性囊袋法來控制液體透鏡模組內的填充液量，進而控制薄膜的曲率和液體透鏡的焦距。因此我使用電腦軟體撰寫控制程式，來控制系統得到想要的焦距，讓使用者只要輸入想要的焦距，控制系統會自動驅動小型步進馬達，灌入適當的填充液，得到想要的薄膜的曲率和液體透鏡的焦距。

1. 研究過程

- (1) 軟體使用 LabVIEW 圖控程式，硬體使用 NI USB-6008 數據擷取卡和馬達驅動卡，以驅動小型步進馬達。

2. 研究結果

- (1) 填充液量控制程式如圖 8.2，控制程式中使用了公式(4)和(5)的焦距和填充液量關係式。



圖 8.2 可變倍率透鏡的填充液量控制程式

- (2) 完成了液體透鏡的焦距倍率控制系統。
- (3) 使用者可設定焦距或倍率後，透鏡自動調整到所需的焦距或倍率。或可讓透鏡自動由低倍率逐漸轉變到高倍率，而轉變的速度可由使用者自定；因此使用者可清楚看到目標物由低倍率連續變換到高倍率，也不再存在在倍率變換過程中找不到目標物的問題了。

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？

如圖 9.1 所示的液體透鏡中，假設透鏡的曲率半徑為 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 ；

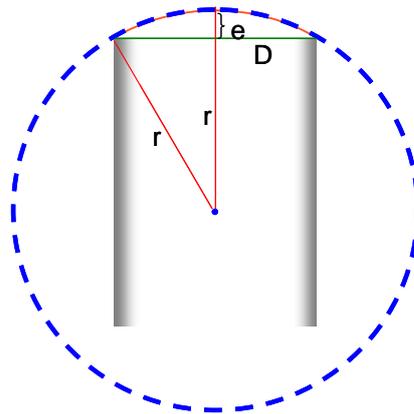


圖 9.1 液體透鏡各距離之關係

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 = $\pi \cdot r_d^2 = \pi(r^2 - x^2)$

而球弧的體積為 $V_d = \int_{x_0}^{x_f=r} \text{圓碟面積} \cdot dx$

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

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

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

$$\text{即 } V_d = \pi \cdot \frac{e}{2} (3e^2 + r_d^2) \quad (6)$$

而如果液體透鏡的表面為球面，則公式(1)中填充液增加量實驗值 Δq 應該和理論值 V_d 相等，因此我在相同的薄膜外擴下，比較 Δq 和 V_d 的差異。若兩者相同，就表示液體透鏡的表面為球面。如圖 9.2 所示為 Δq 和 V_d 相對於薄膜外擴 e 的曲線。如圖 9.2 所示可看出， Δq 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， Δq 和 V_d 的值還接近，但是在薄膜外擴距離較大時， Δq 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 Δq 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。

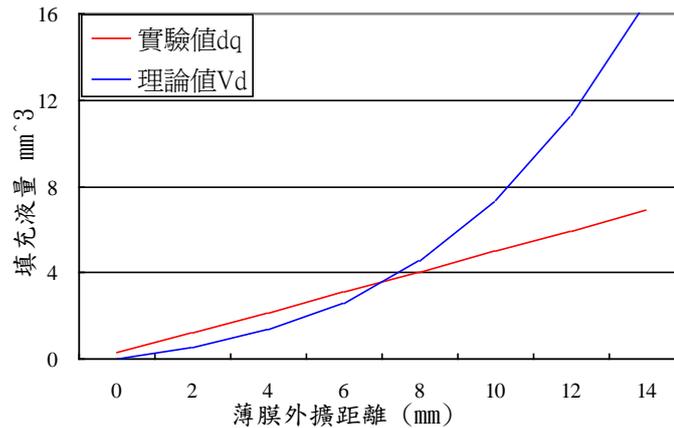


圖 9.2 Δq 和 V_d 相對於薄膜外擴 e 的關係

二、液體透鏡的表面非球面的影響是什麼？

液體透鏡的表面不會為球面的影響，就是通過透鏡中心的光束和通過接近透鏡圓周的光束不會聚焦在同一點，而且倍率愈高，光束聚焦點相差愈遠，這會使液體透鏡在高倍率時視野變小；而我在實驗時也觀察到這一個現象（如圖 7.10b 所示），證實我的推論是正確的。所以液體透鏡擁有倍率可變、觀察方便、蒐尋目標物容易、教學使用方便、透鏡磨損可快速更換等優點，但也有高倍率下視野縮小的缺點。

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八項。

- 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的選擇和分析，包括薄膜防水性、透光度、散射度、彈性係數、降伏強度、拉伸強度等，並選定包裝膜作為後續研究的薄膜。

- 3、完成液體透鏡模組填充液的選擇和分析，包括密度、折射率、透光度、腐蝕性、揮發性、毒性等特性，並選定水和甘油作為後續研究的填充液。
- 4、完成填充液量對薄膜表面曲率和鏡片焦距倍率的影響分析，建立填充液量對鏡片曲率影響的關係式。
- 5、完成重力對液體透鏡模組焦距的影響分析，證實重力對液體透鏡不會造成影響。
- 6、完成填充液調整的分析與設計，並選定彈性囊袋法作為後續研究的填充液調整系統。
- 7、完成液體透鏡模組和可變倍率透鏡系統的詳細設計，並製作出實體，證明了可變倍率透鏡系統的可行性和實用性。
- 8、完成液體透鏡的填充液調整裝置和自動控制程式，可以自動控制填充液量，得到想要的焦距和倍率。

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、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、依我和同學的學習經驗，在國中小的光學透鏡教學中，學生往往對焦距、實像、虛像等觀念很模糊，不容易瞭解當透鏡焦距改變後，成像為何有不同的變化。學校通常僅能提供兩三種焦距的透鏡讓我們學生作實驗，其效果有限；雖然有一些電腦模擬軟體可輔助學習，但仍是感到很虛幻，不是每個學生都能夠完全瞭解。

但是可變倍率透鏡則可以完全解決這些教學上的問題，可讓學生真正瞭解到當透鏡焦距逐漸連續增加或減少時，成像會如何連續改變；也可讓兩道平行雷射光束通過可變倍率透鏡，更能讓學生觀察到透鏡的焦距和成像如何的連續變化了。

柒、參考資料及其他

1. <http://tw.knowledge.yahoo.com/question/?qid=1405122714940>
2. http://www.research.philips.com/technologies/light_dev_microsys/fluidfocus/
物理教學示範實驗室
3. <http://www.phys.ncku.edu.tw/~optlab/modernoptics/fiber%202/modulator.htm>
4. Beer & Johnston & DeWolf, *Mechanics of Materials* 材料力學, 高立出版社

評語

本作品能考慮以液體鏡頭來改變透鏡的放大倍率，並進行相當完整的實驗，且有一定程度的實用性。整題而論在創新性與實用性有一定程度的水準。

目前所得成果及數據和國際發展趨勢相契合，惟此部分的國際相近成果極多，宜進行更完整的文獻收集。

在應用範疇，可考量修正，應可讓本作品有更寬廣的應用空間。