

中華民國第 54 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 物理科

040110

Hologram

學校名稱：嘉義縣私立協同高級中學

作者： 高二 劉沛弦 高二 范雅瑄 高一 林俊諭	指導老師： 何世明 蕭嘉偉
---	-----------------------------

關鍵詞：全像圖、立體感、圓弧

題目：Hologram

摘要

在此篇研究中，首先我們探討以刮痕製成的刮製全像圖形成的基本原理，也就是我們的雙眼之所以能看到立體影像的原因乃是來自大腦的錯覺。在探討基本原理之餘，我們為了實作的需求，研究的變因更包含了觀察者角度、入射光角度、刻痕半徑、入射光顏色、材質、刻痕深度去作探討，而以上對於製作此種刮製全像圖有莫大的實質幫助。

由觀察者角度的實驗，我們發現了影像隨觀察者角度移動的趨勢。光的入射角會影響成像的位置，而刻痕半徑則會影響影像深度。而我們也發現入射光線是什麼顏色，影像就會呈現什麼顏色。實作方面：選擇反射率較好的板子其成像愈亮；深的刻痕中光線較難反射到我們的雙眼。我們並發現所有變因的結果皆符合最初推論「成像原因」的理論。

壹、研究動機








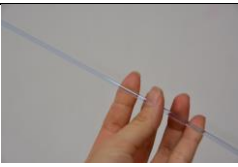


隨著科技不斷發展，人類也越來越追求高質的生活享受。其中，視覺是人們十分講究的一環。為了能讓視覺享受達到極限，人類引進了3D視覺技術。其實這個想法早在很久之前就有許多科幻小說提到這個想法。如：星際大戰中就已有提到3D投影的技術有可能在未來實現。果不其然，在第一部3D電影—阿凡達推出後，3D電影就成為一個世人皆知的技術了。

就在這種世界的潮流與3D技術的魅力，我們深深的被這種技術吸引，也同是希望自己有朝一日能做出不需要3D眼鏡較能看見立體圖形的技術，但實際上已經有人做到了。經由搜尋相關的資料後，我們發現一種稱為刮製全像圖（Scratch Hologram）的神奇方法，能輕易做出我們所想要的立體效果。但其製作方法時在是太簡單，簡單到讓我們忍不住想去探討其真正的原理，於是我們設計了一連串實驗來驗證並更深入了解這種技術。

貳、研究目的

- 一、探討刮製全像圖背後原理（為何會產生3D影像）
- 二、探討成像隨觀察者移動的變化
- 三、探討入射光角度對全像圖的成像影響
- 四、探討材料及刻痕深度對成像的影響

參、研究設備及器材

壓克力板	分規	圓規刀	照度計	相機
				
雷射筆	水管、燈泡	透明管子	玻璃紙	電腦軟體
				

肆、研究過程與方法

一、全像圖的定義

全像圖嚴謹的定義是能夠記錄並重建一物件的光強度與向位的技術。而由不同角度觀看則可見到物件的不同面，故有 3D 的效果。根據這種定義，此種由刻痕製成的全像圖其實並不符合全像圖嚴謹的定義，因其並沒有「記錄」的過程，只是利用雙眼的錯覺產生 3D 效果。

此種全息圖的創始者 W.Beaty 對於此種全像圖的立場及看法十分堅定，在這裡我們得先解釋一下此種全像圖創造出的源起－彩虹全像圖 ("Benton" or "Rainbow" hologram) 此種全像圖設計之初衷是為了在白光下能看見全像圖，並在保存其 3D 效果的前提下移除垂直視差來降低圖形模糊的程度，而其記錄圖像的基本像素如下圖 (一) 所示。



圖 (一)、彩虹的基本像素

我們可以發現它是由許多類似圓弧的曲線所組成，而 W.Beaty 發現如果將它經過簡化放大 (微觀到巨觀) 後，其實可以將其視為圓弧，過程如下

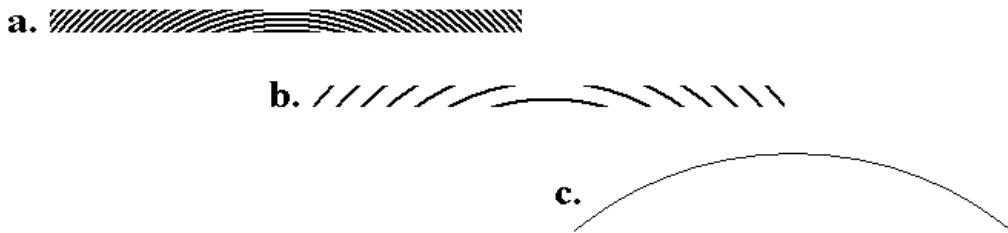


圖 (二)

他發現即使做過這些變動，刮製全像圖本身仍然會成像 (干涉只是繞射後光線交會所造成，隨尺度放大後干涉現象可能會消失，單是光的交會依舊)，我們始終能看見由許多個點所組成的圖像。而這樣產生的圖像保有全像圖立體效果 (包含物體的不透明感) 和水平視差，並能重建場景。基於這幾點，作者認為它仍能算是全像圖。因此如果彩虹全像圖是全像圖，那無可否認的刮製全像圖必然也是。

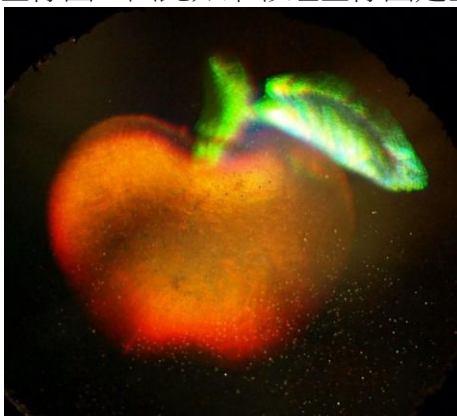


圖 (三)、彩虹全像圖



圖 (四)、刮製全像圖

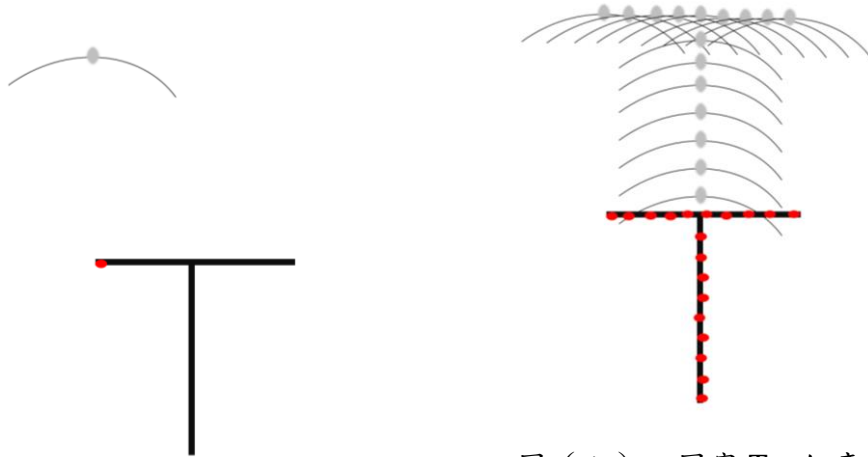
然則有人提出了這樣的疑問：原本的彩虹全像圖會用到干涉來儲存圖像的光的相位（phase），並且利用每一個單位中許的多弧線的距離及角度來紀錄，但在經過簡化及放大後，巨觀之下的刻痕可能已經失去了此種能力，同時也失去了彩虹的色彩，只能單純由光源的頻率來決定其顏色。此時，我們再回頭看看全像圖嚴謹的定義：它不只要能顯現 3D 的立體效果，更要能記錄下反射或透射光波中的全部信息（振幅、相位等）由上方兩圖來看，兩者有顯著的差異，刮製全像圖和彩虹全像圖確實皆只能記錄水平視差，但將全像圖在其他方向做移動時皆無法如實際看物體時所能感覺到的變動，換句話說，也就時它們無法產生所謂的垂直視差。如此一來，此種全像圖便有了缺陷，而且也無法完全符合先前所提到對於全像圖的定義。作者雖然覺得這些小小的缺陷並無傷大雅，但實際上，他自己也說了，對於這兩種全像圖是否真的是全像圖，答案仍是見仁見智。

總結後我們的觀點如下：刮製全像圖是利用反射定律-光的直進等性質使人腦產生 3D 影像，因此它之於傳統全像圖類似圖畫之於相片的關係，我們認為它不算真正的全像圖。雖由 W.Beaty 的論文中可知它許多性質與彩虹全像圖相似，但彩虹全像能記錄與重建一影像而刮製全像圖不行。

二、 實驗觀察

(一)、 製作方法：

首先準備好要製作的圖案，如下圖（五）。接著拿出分規並設定一個固定的半徑，將其中一端當作支點，固定在圖案的任意點（紅點）上，然後在板子上刻出一圓弧。此時如果照光就會發現在弧上會有一個亮點，而此亮點（灰點）隨觀察角度的移動改變。然後依照同樣的方式，用同一個半徑，在圖案的線條上定出許多紅點並依序刻出許多弧。當你的圖案布滿了許多紅點，而你也有和紅點一樣個數的弧，再照光便會發現弧上的那些特定亮點構成了你的圖案，如下圖（六）。

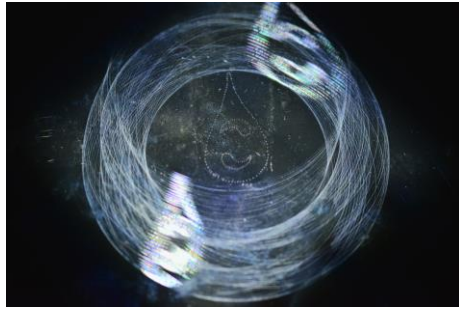


圖（五）、刻的圖案：英文字母

圖（六）、圖案 T、任意點（紅點）、刮痕和亮點成像（灰點）

(二)、 實品

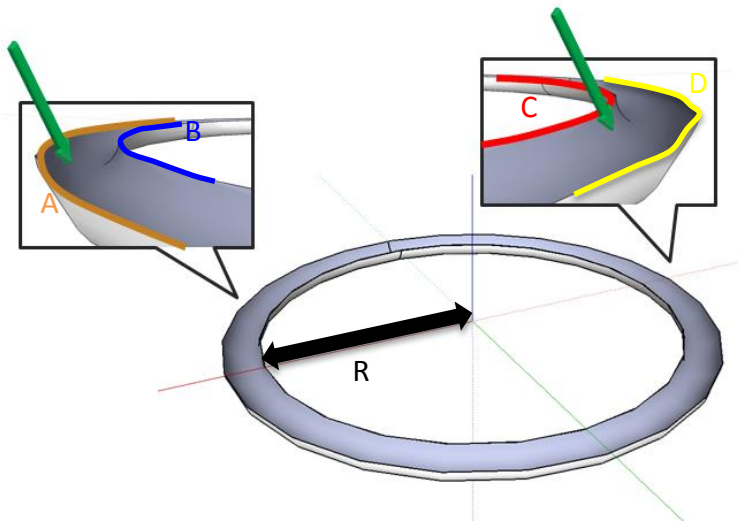
實際製成的實品如下圖（七）。我們觀察到圖案有兩個成像：位於上方而較大且看起來浮在板子上的是虛像；另一個位於下方而較小且看起來浮在板子下的是實像。



圖（七）、圖案為水滴的實品

(三)、討論

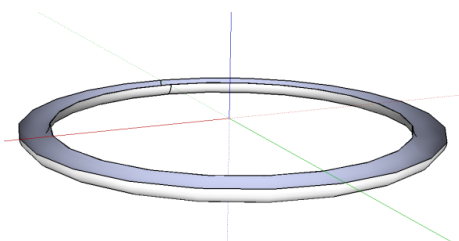
下圖（八）是刻痕的切面圖。若打入眼中的光是經由面 A 或 D 反射的，因它們是凹面鏡，故會呈現實像；若是經面 B、C 反射，則會呈現虛像。



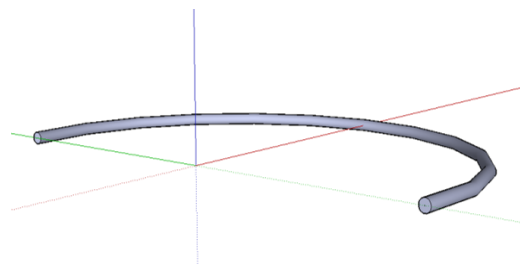
圖（八）、刻痕的切面圖

三、刮製全像圖的成像原理

我們發現如果把一個刻痕放大，它看起來像一個凹槽，如下圖（九）。我們做實驗中做了些背景資料查詢。在 William J. beaty 的論文中發現了件有趣的事，那就是全像圖中的那些刻痕的光學性質可以用一根可彎曲的、透明的、實心塑膠管子來模擬，如下圖（十）。

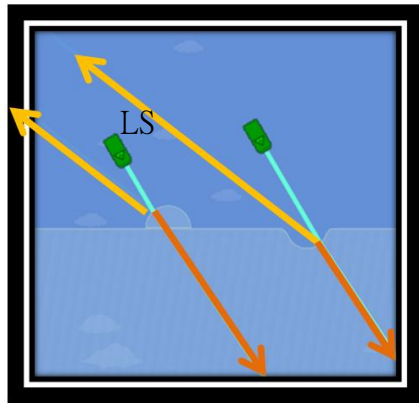


圖（九）、刻痕示意圖



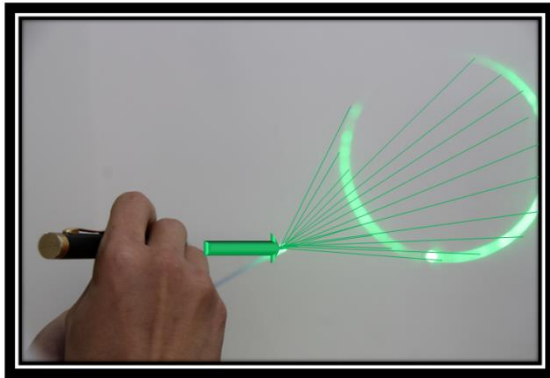
圖（十）、塑膠管子示意圖

之所以能用塑膠管子模擬可由折射、反射定律得知，如下圖（十一）所示：

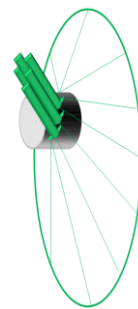


圖（十一）、用 Algodoo 程式模擬的光折反射圖

如果用同樣的光線（LS）打到塑膠管子和刻痕的凹槽，他們折射和反射的光線角度一模一樣。能夠用透明管子模擬代表實驗更容易進行了，於是我們著手觀察當光線照到管子時會發生些甚麼事。我們用了雷射光打在塑膠管子上，因為雷射光是平行光，示意圖如圖（十二）。

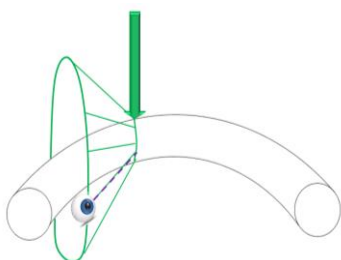


圖（十二）、雷射光打到塑膠管子上

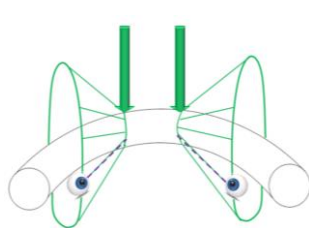


圖（十三）、光打到塑膠管子後的散射光線示意圖

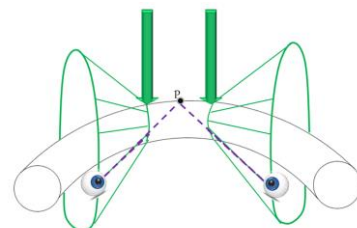
由圖（十三）中可以發現光線在打到管子上之後會錐狀散射開來。因此我們推論：眼睛置在塑膠管的前方，如下圖（十四），假設這隻眼睛偵測到了來自某的散射圓錐的一條光線。因為我們的眼睛會認為光是直進的，所以就循著散射出來的光追溯回塑膠條上的一點（紫色虛線），如下圖（十四）。如果有第二隻眼睛，它同樣也會尋著散射出來的另一束光追溯回去到塑膠條上的一點，如下圖（十五）。當這兩隻眼睛將所見傳回大腦時（且個別追溯回去的那兩點夠近）大腦便會傾向認為這兩點是同樣的單一點，所以眼睛就會更往後追溯到新的一點 P，也就是我們眼睛最終看到的那一點亮點，如下圖（十六），而這個亮點就會看似有深度。



圖（十四）、一隻眼睛追溯光線

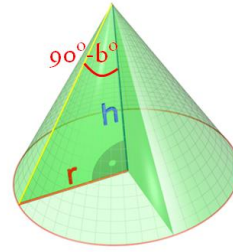


圖（十五）、兩隻眼睛追溯光線



圖（十六）、大腦誤以為 2 點是同一點追溯光源後交於一點

由前文可知我們所看到的影像主要決定於前面所述的「散射」的「圓錐」。更精確地說，若此圓錐是正圓錐（在某種特定的情況下成立，將於下文中再討論），則我們可以定義此圓錐的角度為 $(90-b)$ 度，而決定成像的就是圓錐角 $90-b$ 的大小，示意圖如右圖（十七）。

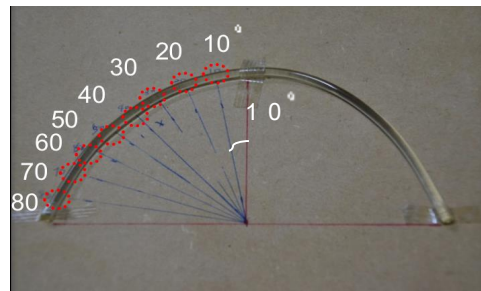


圖（十七）、圓錐角的定義

在此我們分別探討改變兩種變因時圓錐角大小的改變：（1）同樣（平行）的光束打在塑膠管子上面不相同的位置。（2）在塑膠管子上相同的位置照射不同入射角的光，我們把雷射筆固定在三腳架上以便精確控制光的入射角。實驗裝置照片如下圖（十八），而位置的定義圖如圖（十九）。

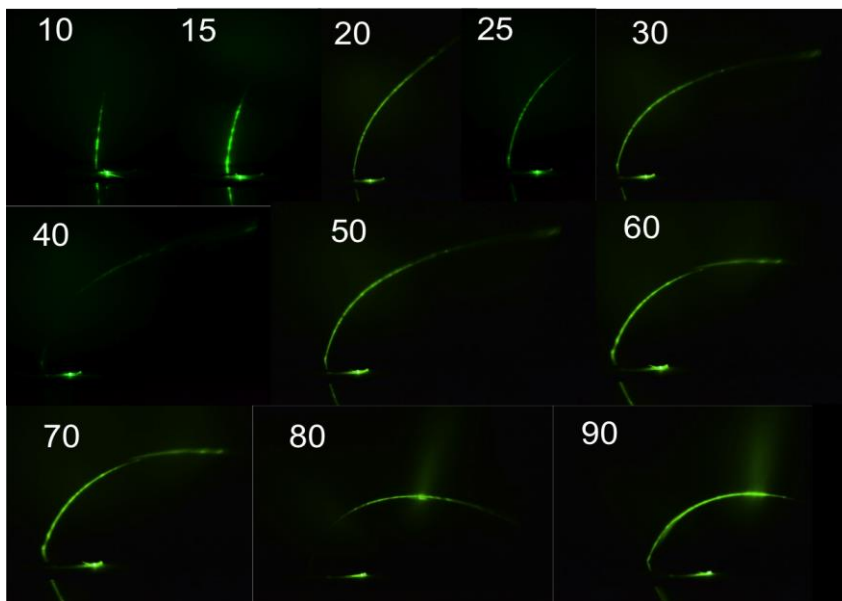


圖（十八）、實驗裝置照片

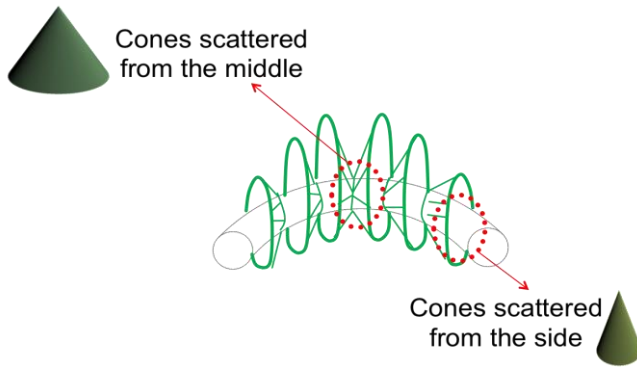


圖（十九）、位置的定義圖

變因（1）的實驗結果：打到越旁邊的位置（越接近 90 度）的光所散射的圓錐角越小，如下圖（二十）。



圖（二十）、變因（1）的實驗結果



圖(二十一)、推論：打到越旁邊的位置(越接近90度)的光所散射的圓錐角

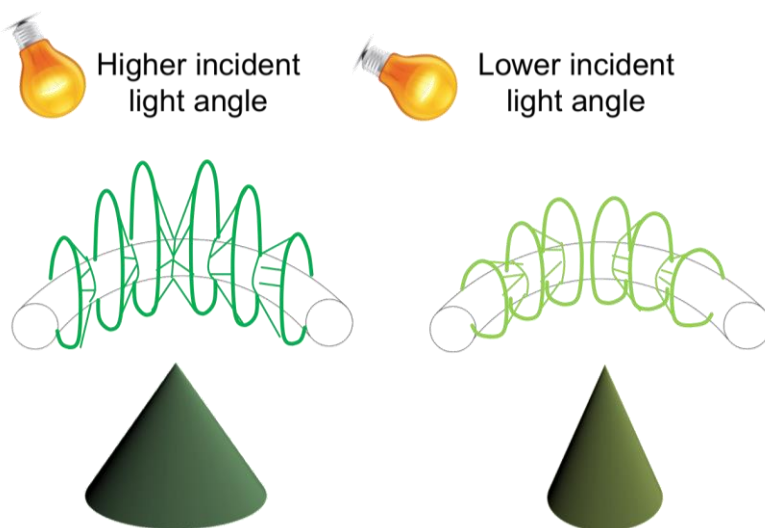
變因(2)：以69度和37度兩個不同的入射光角度照射，結果如下圖(二十二)(a)與圖(二十二)(b)：



圖(二十二)(a)、入射光為35

圖(二十二)(b)、入射光為69度

不同入射光角度當光打在管子的同一個點時，散射出來的圓錐比較寬。因此我們分別畫出了在入射光角度大、小時的模擬圖，如下圖(二十三)。



圖(二十三)、推論：入射光角度越大，圓錐角越大。

四、 實驗變因：

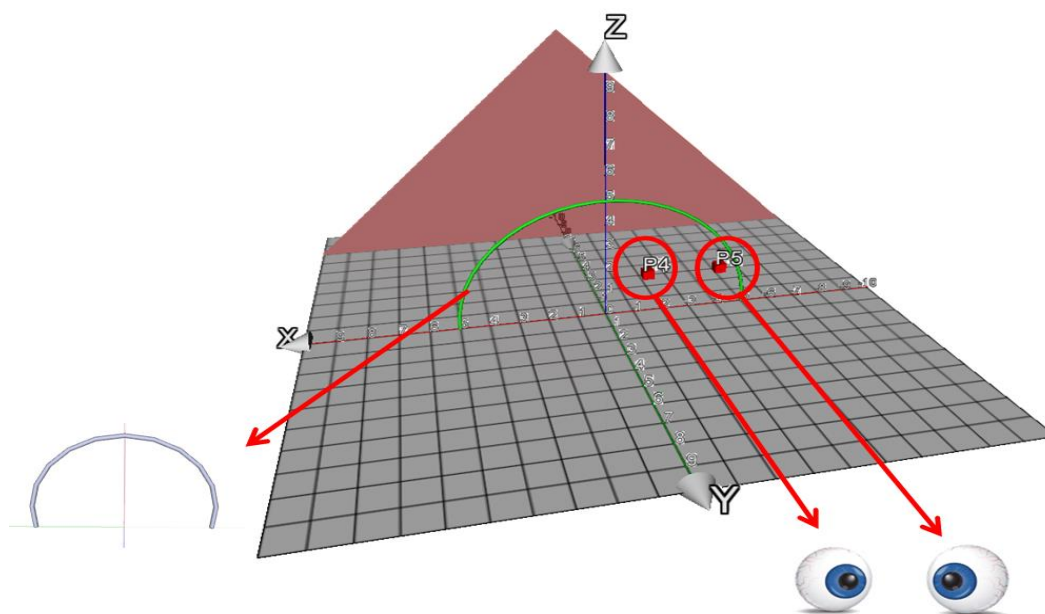
由前述的觀察與分析，我們定出下列六種變因分別進行探討與實驗分析：

- (一)、 觀察者角度
- (二)、 入射光角度
- (三)、 刻痕半徑
- (四)、 入射光顏色
- (五)、 板子材質
- (六)、 刻痕深度

伍、 研究結果與討論

一、 觀察者角度

- (一)、 實驗目的：用電腦程式模擬當我們的眼睛左右移動時，成像會如何移動。
- (二)、 實驗方法：我們使用 Archimedes Geo 3D 來模擬塑膠管子和兩隻眼睛。P4 是左眼，P5 是右眼，綠色圓弧便是塑膠管子，如下圖（二十四）。



圖（二十四）模擬圖

就像之前所論述的，我們的眼睛會沿著光追溯回去，如果有兩隻眼睛便會追溯得更回去。下頁圖（二十五）(a) 是左眼追溯回去的路線，圖（二十五）(b) 是右眼追溯回去的路線，然後他們會因大腦而傾向認為是一個亮點 P，如下頁圖（二十六）。因此，藉由改變 P4 及 P5 在軟體裡的座標我們就能夠預測 P 點改變的路徑。而亮點 P 的位置定義則如下頁圖（二十七），相機拍攝的即是平面（珍珠板）截圓錐的二次曲線。

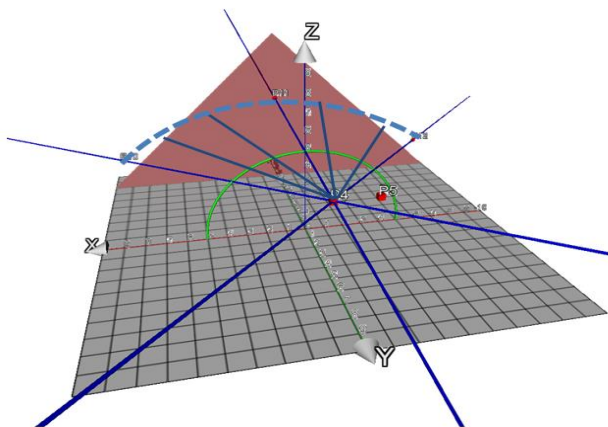


圖 (二十五) (a)、左眼追溯回去的路線

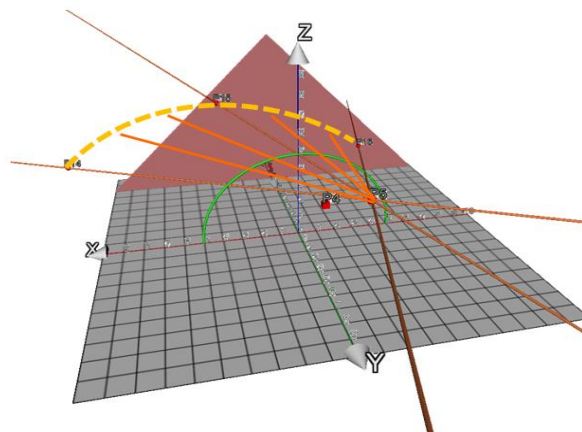


圖 (二十五) (b)、右眼追溯回去的路線

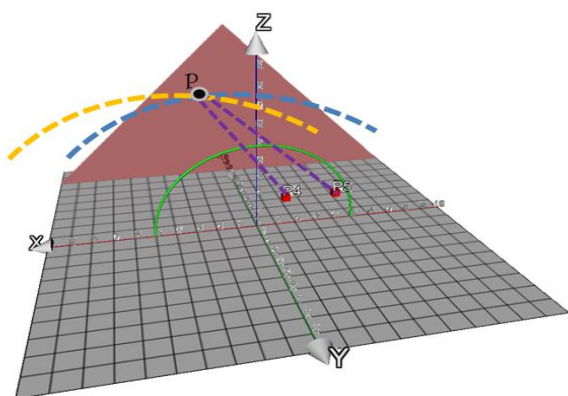


圖 (二十六)、大腦認為的亮點 P

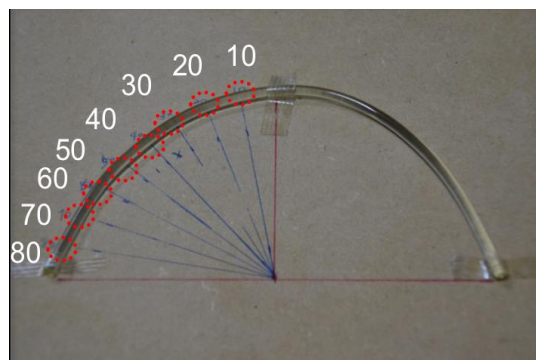


圖 (二十七)、位置定義

(三)、實驗理論：

詳細描述過程如下：

假設 $Eye_1 = (a_1, b_1, c_1)$ 、 $Eye_2 = (a_2, b_2, c_2)$ 分別代表雙眼位置

$C = (0,0,r)$ ； $D = (0,r,0)$ ； $E = (0,0,-r)$ 三點組成圓弧

C_1 、 D_1 、 E_1 代表 $\overline{CEye_1}$ 、 $\overline{DEye_1}$ 、 $\overline{EEye_1}$ 射線分別交於 $x=-r$ 的平面上的三點，

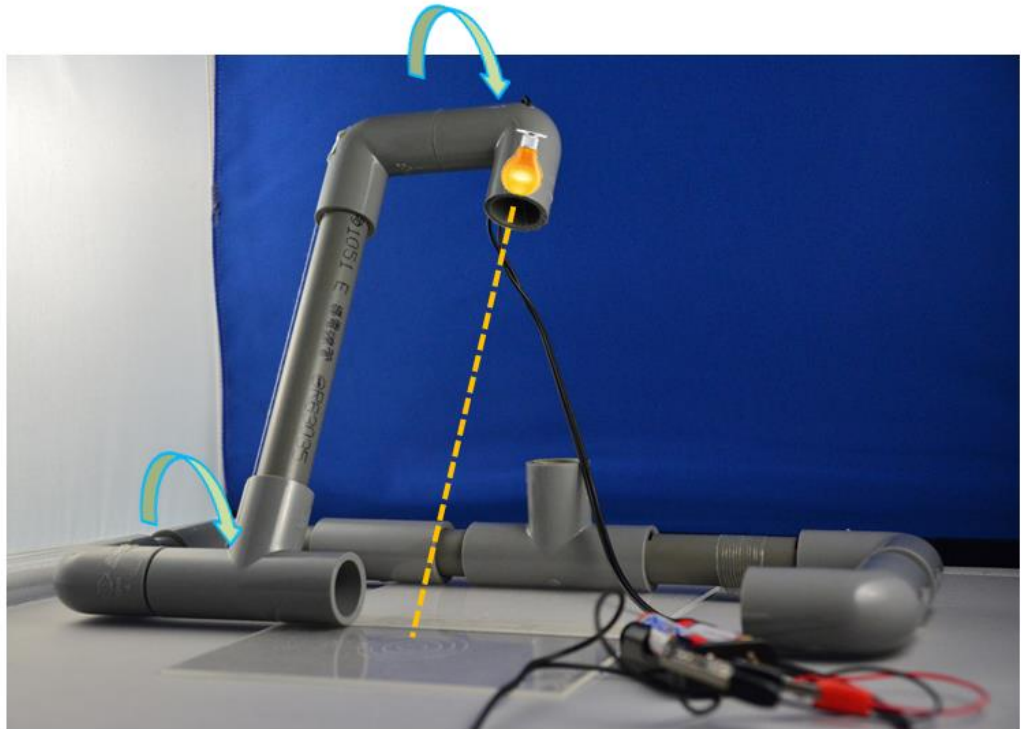
則

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \left(-r, \frac{0-b_1}{0-a_1} \times (-r-a_1) + b_1, \frac{r-c_1}{0-a_1} \times (-r-a_1) + c_1 \right) \\
 &= \left(-r, -\frac{b_1 r}{a_1}, \frac{-r(c_1-r)}{a_1} + r \right) \\
 D_1 &= \left(-r, \frac{r-b_1}{0-a_1} \times (-r-a_1) + b_1, \frac{0-c_1}{0-a_1} \times (-r-a_1) + c_1 \right) \\
 &= \left(-r, \frac{-r(b_1-r)}{a_1} + r, \frac{c_1 r}{a_1} \right) \\
 E_1 &= \left(-r, \frac{0-b_1}{0-a_1} \times (-r-a_1) + b_1, \frac{-r-c_1}{0-a_1} \times (-r-a_1) + c_1 \right) \\
 &= \left(-r, -\frac{b_1 r}{a_1}, \frac{-r(c_1+r)}{a_1} - r \right)
 \end{aligned}$$

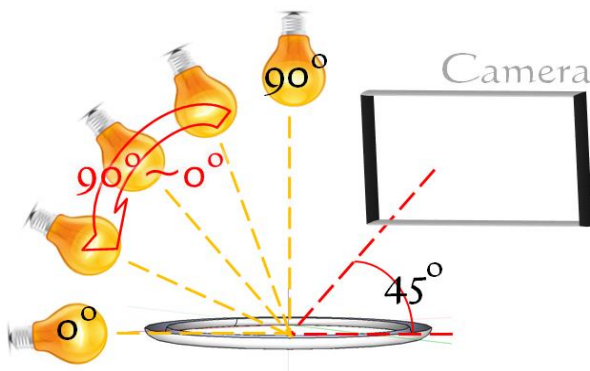
然後經由 geogebra 輔助計算找出過此三點的圓弧，即是圖（二十五）中左眼追溯回去的路線，接著再如法炮製得處理 Eye_2 的部分，最後再找出兩路線之交點即可找出亮點。

二、光的人射角度

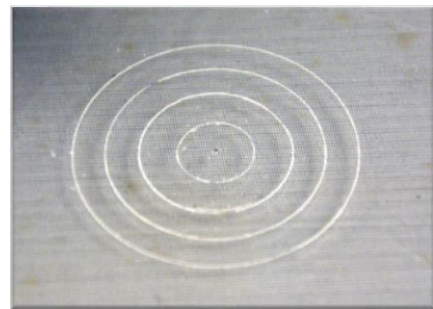
- (一)、實驗目的：接著我們想，如果光入射的角度改變了呢？
- (二)、實驗方法：我們設計了一個裝置來改變光的入射角度。將燈泡裝在水管裡，並設計讓水管的角度可以自由調整，如下圖（二十八）。示意圖如下圖（二十九），我們從 90 度的人射光開始實驗，一路做到 10 度，然後架上了台朝地面夾 45 度角的攝影機來紀錄圖案影像的改變。為了方便探討，這個實驗中的全像圖刻痕是三個圓圈，如下圖（三十）。



圖（二十八）、實驗裝置

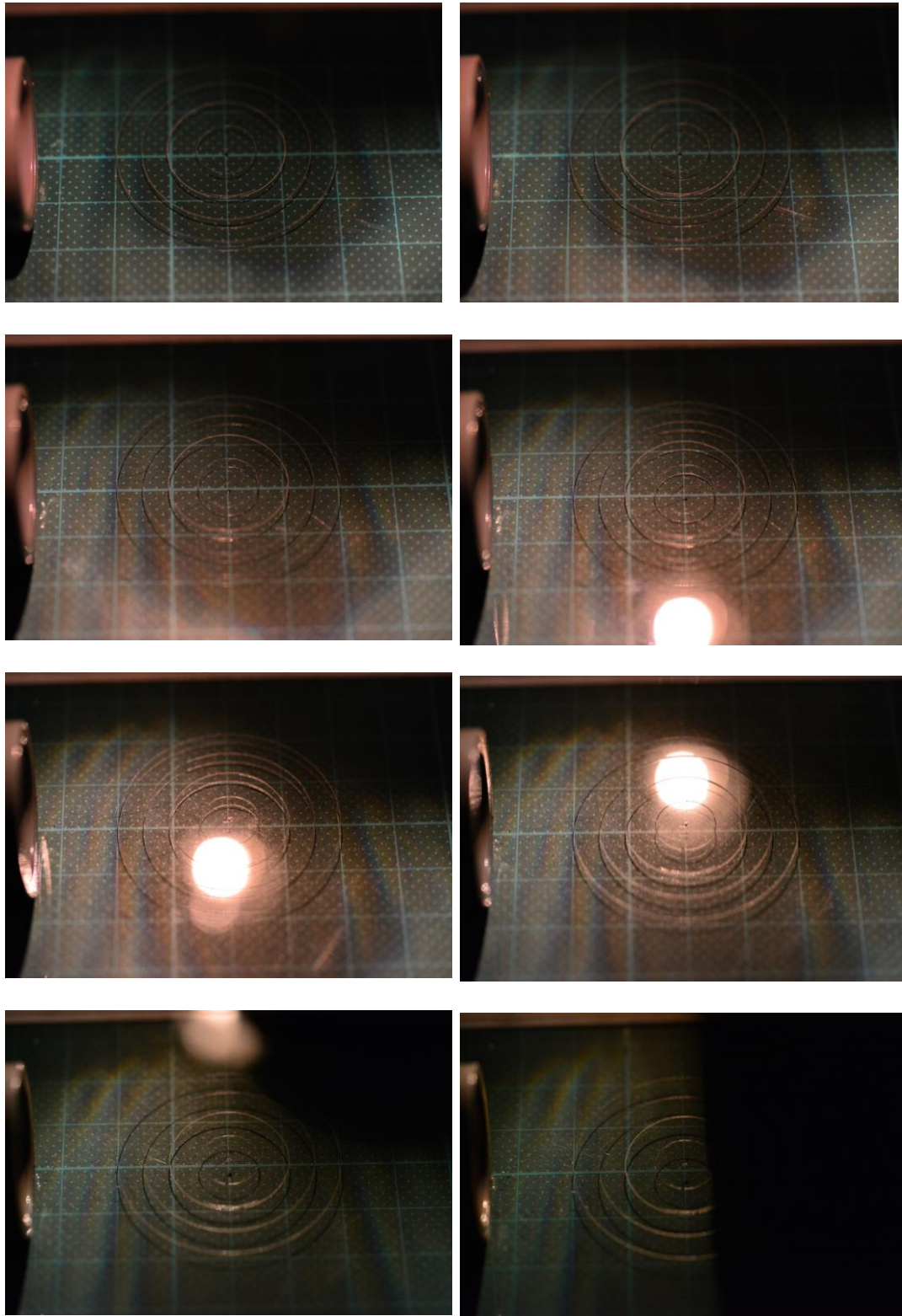


圖（二十九）、角度改變示意圖



圖（三十）、全像圖刻痕

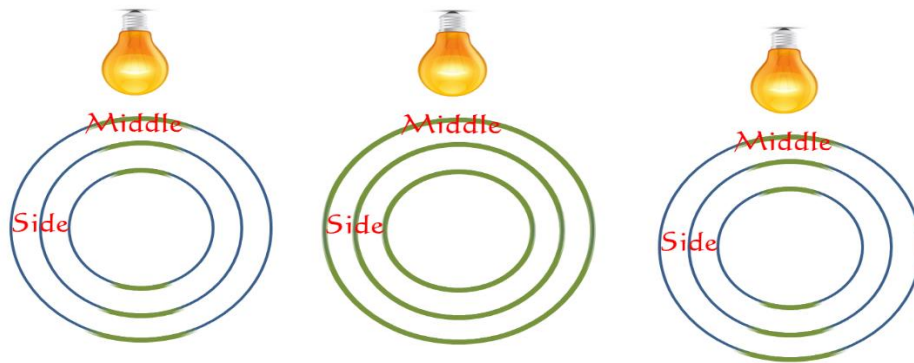
(三)、實驗結果：如下圖（三十一）。



圖（三十一）、不同光的入射角度實驗結果照片

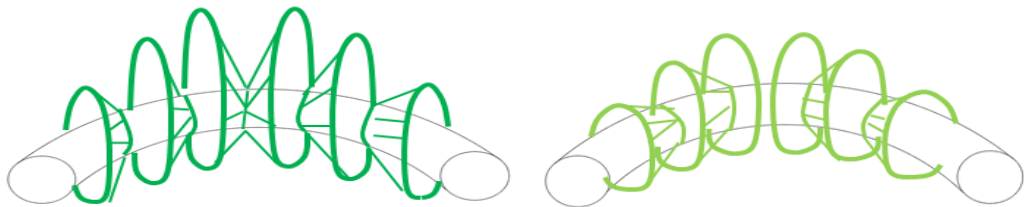
(四)、實驗理論：

結果我們發現光線是由刻痕中間開始亮起，到 45 度時擴散到邊緣並且最亮，而在更低的角度時又退回中間了，如下頁圖（三十二）所示。（藍色代表刻痕，綠色代表亮光範圍）



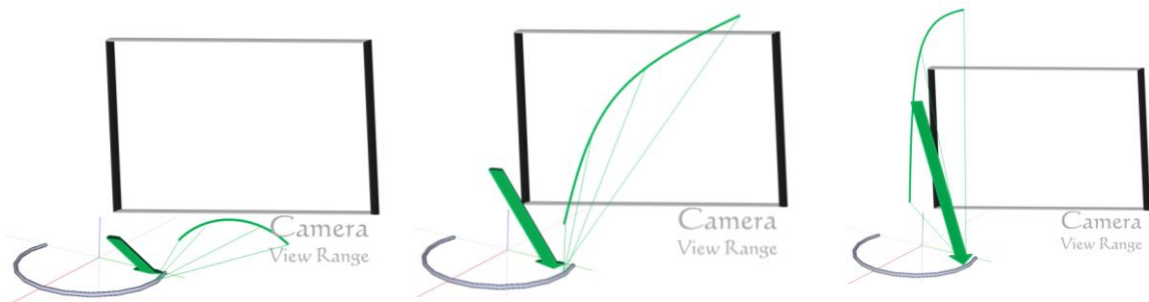
圖（三十二）、實驗理論圖

它的原理必須用前述的實驗來解釋：當入射光角度越大時，圓錐的角度越大，如下圖（三十三）。



圖（三十三）、當入射光角度越大時，圓錐的角度越大

這表示如果入射光角度太小時，所散射出來的光線很容易無法進入相機的拍攝範圍。當入射光角度適當時，大小恰好，可以剛好進入相機範圍。但當角度太大時，又會超出相機範圍了，如下圖（三十四）所示。



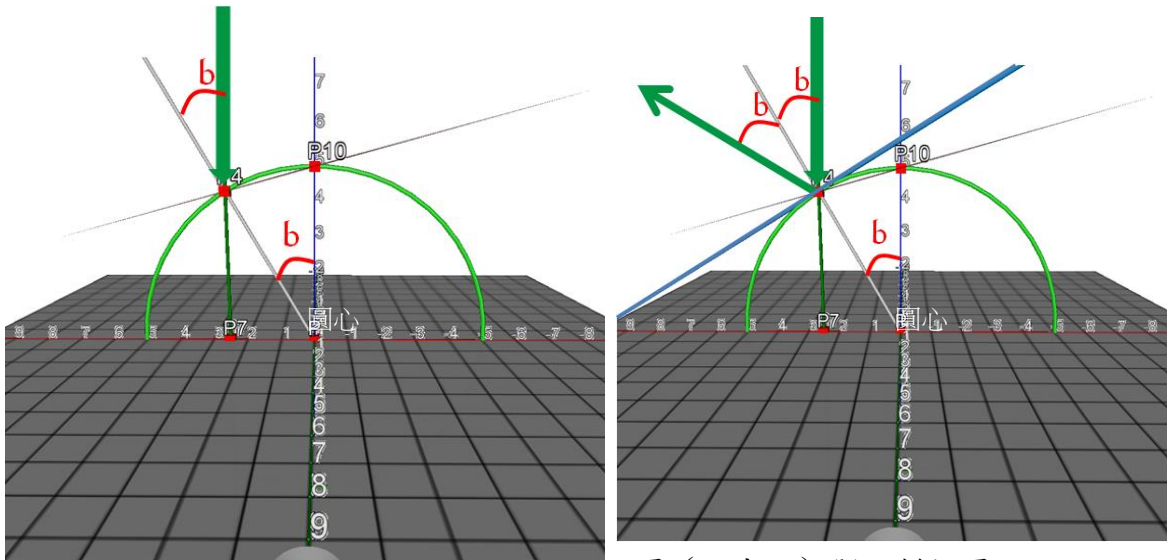
圖（三十四）、相機拍攝範圍示意圖

這就是為什麼當 90 度的光線打到邊緣（side）時，邊緣是暗的，而在約為 45 度時邊緣是亮的。中央（middle）的話，不論什麼角度的入射光，散射的圓錐光線都能夠達到相機拍攝範圍內，所以不論何時都是亮的。

三、刻痕半徑

- (一)、實驗目的：討論刻痕半徑對於影像深度的影響。
- (二)、實驗理論：在觀察全像圖時，會發現影像一那些亮點一似乎漂浮在板子的上或下，有深度。網路上的資料告訴我們那些亮點的深度約等於刻痕的半徑，但為什麼？這個問題困惑了我們許久，最後終於找到解答：關鍵在

於散射的圓錐！模擬圖如下圖（三十五）(a)。

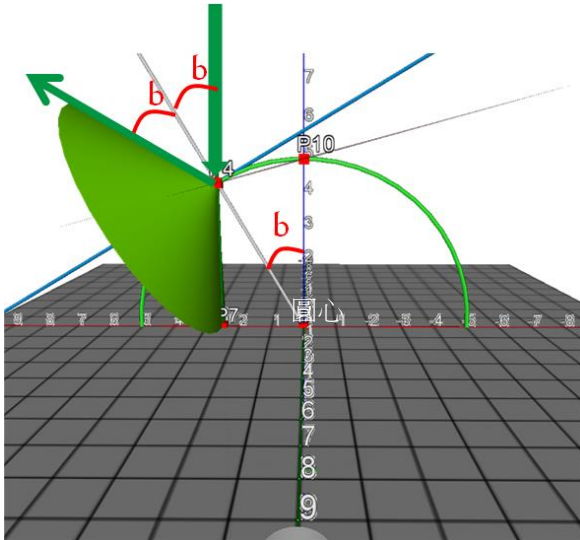


圖（三十五）(a)、模擬圖

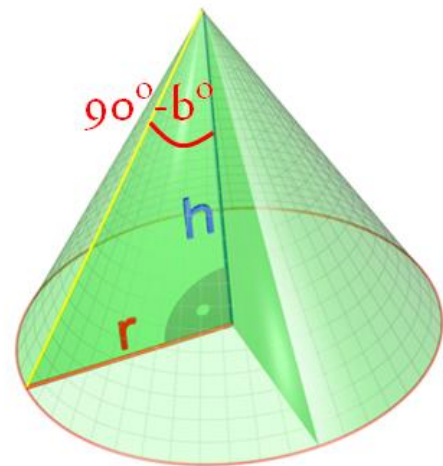
圖（三十五）(b)、模擬圖

綠色的箭頭表示任一束入射光，它打在點 P4 上，P4 與圓心的連線與深藍色線夾 b 角。因此，入射光與 P4-圓心連線也夾 b 角，如圖（三十五）(b)。

做過 P4 的淺藍色切線，根據入射角等於反射角，我們可以畫出反射光，反射光也與 P4-圓心連線夾 b 角，如下圖（三十六）。
因為散射的光線會是一個圓錐，因此可以用反射光求出圓錐角，在進而畫出圓錐（因為，當 b 角夠小時，可視散射圓錐為正圓錐）。圓錐的角度是 90 減 b 度，如圖（三十七）。

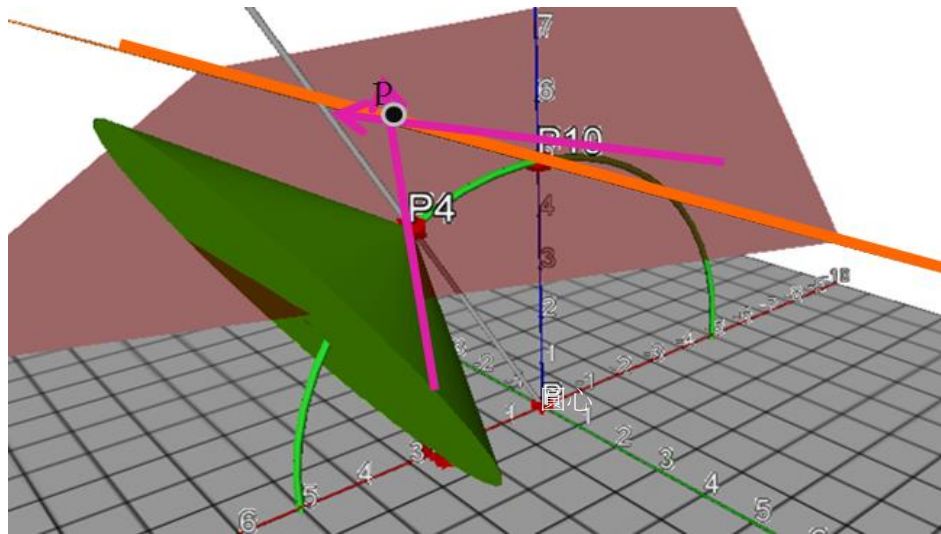


圖（三十六）、示意圖



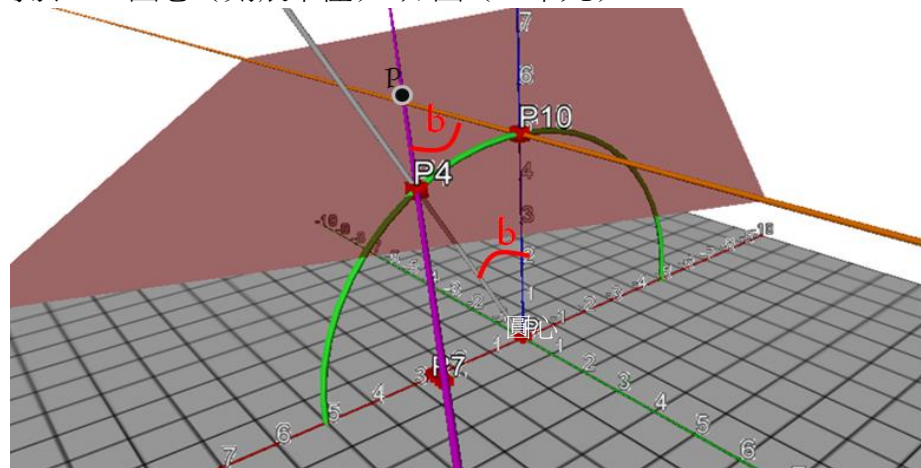
圖（三十七）、圓錐的角度

假設橘色線是 P 可能存在的線（因為我們的雙眼必須追朔光線、焦於一點才有亮點 P，因此會有範圍限制），通過 P4 的粉色箭頭代表眼睛所追朔回去的一道光線。另一條粉色箭頭代表另一隻眼所追朔的另一條光線。他們相交於橘色的線，而焦點 P 就是我們的亮點，如圖（三十八）。



圖（三十八）、模擬圖

因為圓錐的角度是 $90-b$ 度，因此粉色線和橘色線的交角是 b 度。P4-圓心連線與深藍色線交角亦是 b 度，而 P-P4-P10 角與 P4-P10-圓心角都是 90 度，因此 P-P4-P10 三角形和 P4-P10-圓心三角形是全等三角形，P10-P（影像深度）等於 P10-圓心（刻痕半徑），如圖（三十九）。

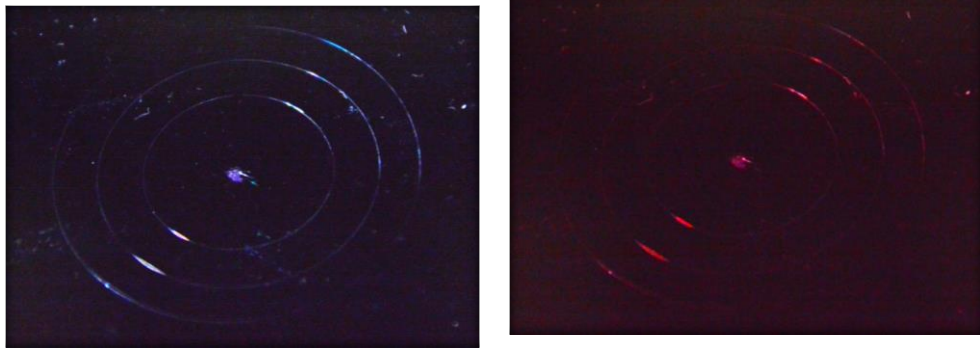


圖（三十九）、模擬圖

這是個有用的資訊！因為若是要刻 3D 的立體圖形，可以利用各點的影像深度不同來做出立體的效果。

三、光源

- (一)、實驗目的：如果使用不同顏色的光源呢？使用更強的光呢？
- (二)、實驗方法：用玻璃紙覆蓋光源，看不同的顏色的人射光對於全像圖所造成的影響。
- (三)、實驗結果：圖案的颜色會和光源的颜色一樣。使用更強的光，圖案也會變得更亮。實驗結果如下頁圖（四十）。



圖（四十）、不同顏色的光源實驗結果

- (四)、實驗理論：其實全像圖的亮點就是光源的虛像，所以光源是什麼顏色，亮點也就會是什麼顏色。至於光源的亮度我們也能根據這個推論，當光源亮度越亮，我們所看到的影像應該也就會越亮。

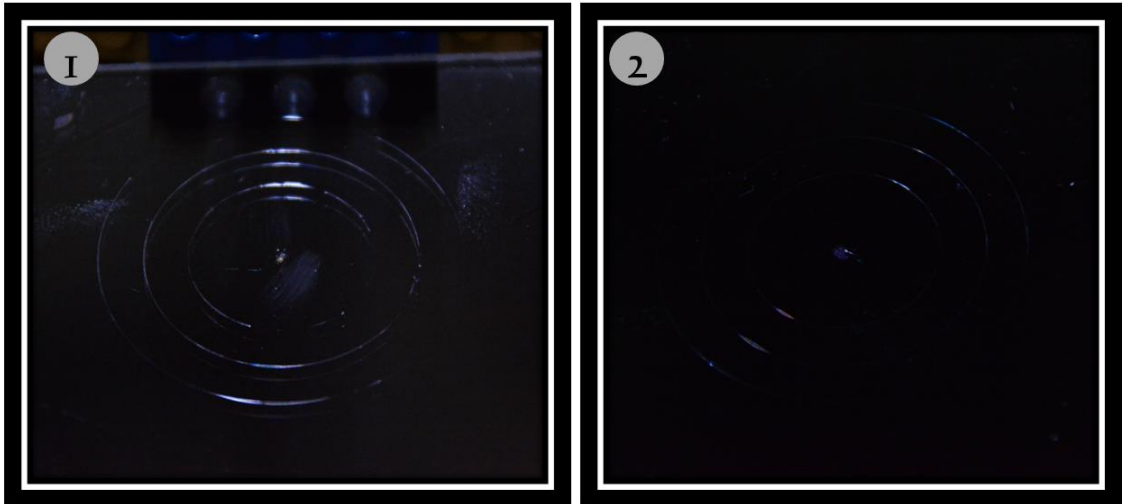
五、板子材質

- (一)、實驗目的：使用不同材質的板子是否會影響影像的亮度呢？我們的推論是，因為我們所看到的亮點是有反射的光線組成而非折射，所以照理來說反照率越高的材質應該會看到越亮的影像。我們在此想驗證自己的假說。
- (二)、實驗方法：我們使用光度計來測量影像的亮度。要注意的是，因為光度計非常的敏感，所以板子要放在一樣的地方且要一樣大否則便會改變控制變因。我們有兩種壓克力，分別稱為材質 1 號和 2 號，而 1 號 2 號的反照率如下表（一）所示：

表（一）、背景與兩種板子在相同情況下的亮度

Background Illumination (Lumen)	Illumination of Material 1 (Lumen)	Illumination of Material 2 (Lumen)
9.8	10.6	10.2
10.5	11	10.9
12.8	13.6	13.2
20	20.7	20.4
42.7	43.7	43.2

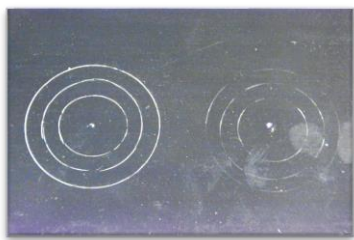
- (三)、實驗結果：板子的反照率越高，成像便越亮，如下頁圖（四十一）。圖中照片表示 1 號及 2 號板子相同刻圖，在相同光源照射下所顯示的情形；而 1 號比 2 號板子反射率高，照片也明顯看出 1 號比 2 號板子成像更亮。因此我們證明假說是正確的。



圖（四十一）反照率越高的材質應該會看到越亮的影像，

六、刻痕深度

- (一)、實驗目的：想要刻出一個清楚的全像圖，到底要用力刻（刻痕深一點）還是輕輕刻（刻痕淺一點）呢？
- (二)、實驗方法：我們使用不同的工具來刻出明顯不同深度的刻痕，分別使用圓規刀來刻出深的，分規來刻出淺的，如下圖（四十二～四十四）。



圖（四十二）、不同刻痕深度

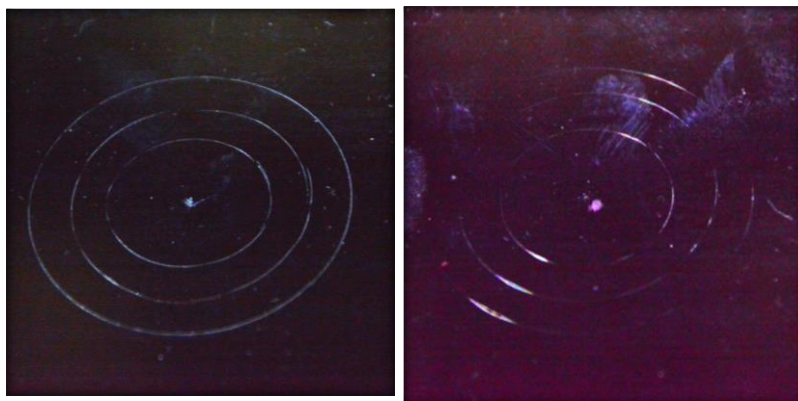


圖（四十三）、圓規



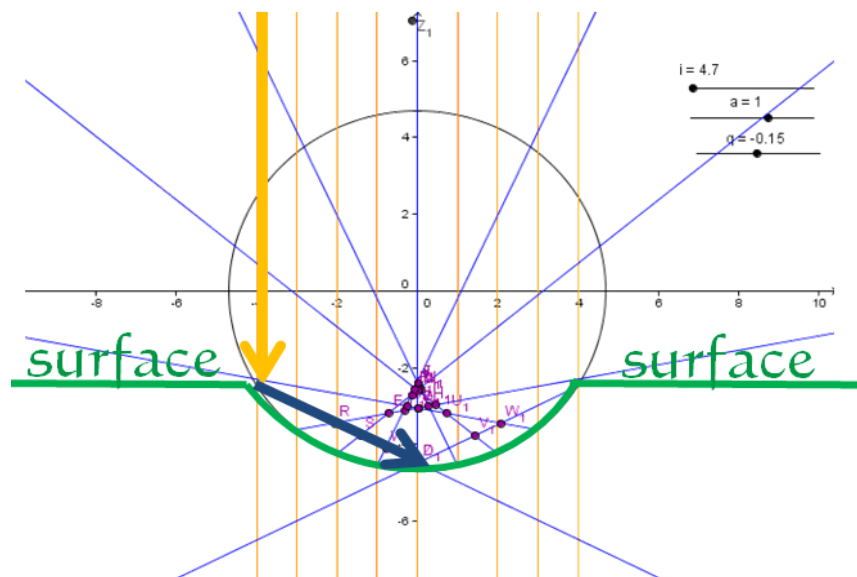
圖（四十四）、分規

- (三)、實驗結果：放到相同光源下照射的結果如下圖（四十五），刻痕淺的成像較亮較清楚。



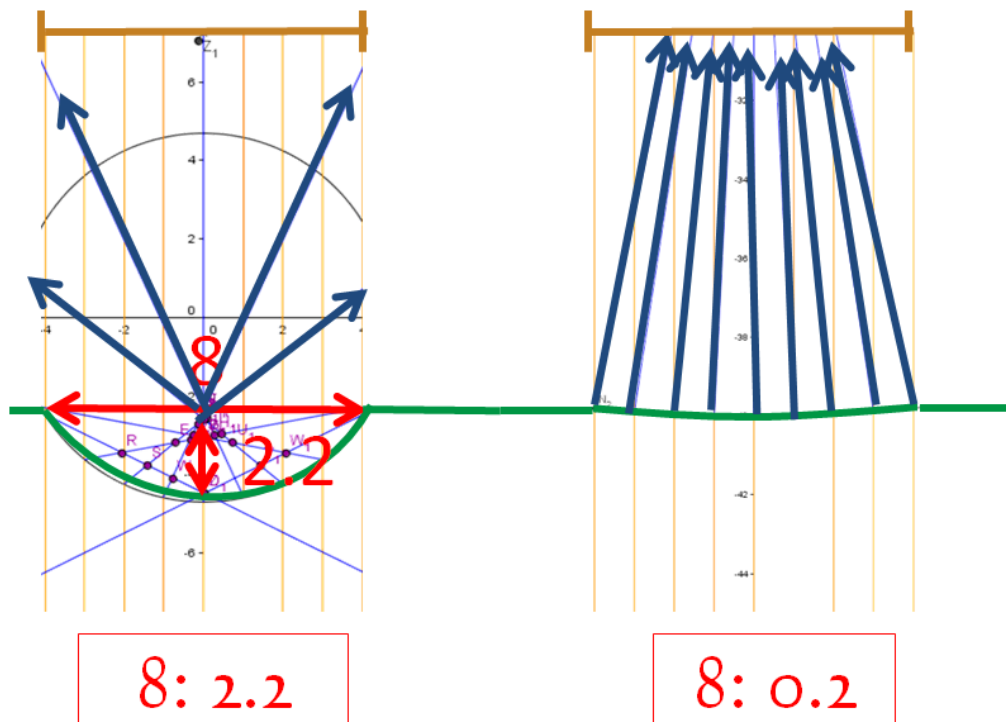
圖（四十五）、實驗結果：左為深的刻痕，右為淺的刻痕

(四)、實驗理論：下圖是由 Geogebra 所繪。如下圖（四十六）所示，綠色的部分是板子的表面，凹下去的圓弧是刮痕的切面，黃色箭頭代表入射光，藍色代表反射光。



圖（四十六）、Geogebra 模擬圖

當刻痕比較淺的時候，反射光線的數目比較多，因此所見的全像圖會比較亮。但是全像圖並不是越淺越好，因為所謂「最淺」的情況即是完全沒有刻痕深度的情況，而沒有刻痕深度就不會有全像圖。如下圖（四十七）所示。



圖（四十七）刻痕深淺反射情形示意圖

陸、結論

- 一、觀察角度：我們可以利用理論來在電腦中模擬光線的反射，然後用電腦軟體來模擬觀察者角度移動時，影像隨之移動的趨勢。該趨勢可以藉由影片證實。
- 二、光的入射角：它會影響（由光線組成的）圓錐的角度大小，進而影響到我們所能看到的圓錐多寡，最終使看到的影像不同。我們討論了光在不同入射角時之所以看的到或看不到的原因。
- 三、刻痕半徑：刻痕半徑會影響影像深度。影像深度可以藉由數學計算求之，結果為影像深度約略等於刻痕半徑。
- 四、光源：不像是傳統的全像圖或彩虹全像圖，這種全像圖中入射光線是什麼顏色，影像就會是什麼顏色。
- 五、板子材質：我們推測影像的亮度應該與板子的反射率呈正相關，而實驗顯示的確反射率較好的材質其成像愈亮。
- 六、刻痕深度：利用不同的工具可以刻出深淺相差甚遠的刻痕，而可以明顯發現刻痕深的成像較暗，這是由於在深的刻痕中，光線較難反射到我們的雙眼。
- 七、研究應用：在這個實驗中，我們探討了製作全像圖的方法、它的運作原理、以及深入研究它的各種性質。這可以是一個很好的教材，因為傳統的全像圖太精密，若要帶領學生做實驗實在不便。刻痕全像圖的許多光學性質與彩虹全像圖相近，在課程上可以做相關連結。這種隨手可做的全像圖不僅僅是個良好的科學教材，可以引領學生思考其中原理，在刻劃 3D 的圖形時同時需要數學和美術能力。若屏除教學上的意義，刻痕全像圖仍是一個業餘愛好者可以專研的區塊，如畫畫彈琴一般，這可以帶給生活無窮的樂趣！

柒、檢討與未來展望

一、檢討：

我們並沒有嘗試刻不同形狀的痕跡的影響，也沒有探討折射部分的光線（若觀察者在板子的反面觀看，折射的光線亦能聚集成像），將來有時間或許可以繼續嘗試。

二、實驗展望：可將相機對焦於成像上，再藉由換算相機焦距與實際距離來求得像高。

捌、參考資料及其他

- [1] William J. beaty. (2003) . Drawing Hologram by Hand. *Proc. SPIE-IS&T Electronic Imaging, Tung H. Jeong, ed., SPIE* Vol. 5005, 156-167
- [2] 維基百科。2013 年 12 月 8 號。取自 <http://en.wikipedia.org/wiki/Holography>
- [3] OpticsInfoBase。2014 年 1 月 11 號。取自 <http://www.opticsinfobase.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-50-25-5042>。
- [4] 維基百科。2013 年 11 月 5 號。取自 http://en.wikipedia.org/wiki/Scattering_from_rough_surfaces。

【評語】 040110

本作品探討以刮痕製成全像圖形成的基本原理，並實作一些成品來研究成像的實際情形以及成像的變因問題，主題十分有趣，仍有向下發展和提昇成像好壞的研發題材。