

2025年臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

作品編號	160013
參展科別	物理與天文學
作品名稱	探討可調式聲波梯度透鏡受高強度雷射光穿透 後的熱效應
得獎獎項	四等獎

就讀學校	臺北市立建國高級中學
指導教師	曾靖夫 朱士維
作者姓名	林宥廷 吳宣煜

關鍵詞	<u>可調式聲波梯度透鏡(TAGlens)、熱效應、螢光</u>
-----	----------------------------------

作者簡介



我的名字是林宥廷（右），年齡十六歲，家住台北市東部住宅區，未婚。

我在「建國中學」上課，即使在實驗室進行實驗，每天最晚也是十點前回家，不吸菸，酒也是淺嘗輒止。晚上十一點上床，保證六到八個小時的充足睡眠，睡前喝一杯水，然後再睡覺，基本可以熟睡到天亮，健康檢查的結果也顯示無異常。

我的意思是我是一個隨時都想追求進步的人，不管是在專題研究或是其他領域，這就是我對於這個社會的生活態度，我也清楚這就是我的幸福。

我的名字是吳宣煜（左），十六歲，是個學生（高中生）。身高158公分，體重45公斤，看起來算是健康型的！我平常喜歡物理，已經讀了5年，主要是為了保持身體均衡發展。

對於公開表現自己其實不太害羞，比如演講或在班上分享，只要能展現出最好的我，我都很樂意試試！作為一個熱愛學習的學生，我每天都努力充實自己，對未來充滿期待！希望大家多多指教！

1個主題、1個夢想、經過4+5個月，1直不懈的努力，希望我們能夠在國際科展的舞台上光芒四射。

2025 年臺灣國際科學展覽會

研究報告

區 別：

科 別：物理與天文學科

作品名稱：探討可調式聲波梯度透鏡受高強度雷射光穿透
後的熱效應

關 鍵 詞：可調式聲波梯度透鏡(TAGlens)、熱效應、螢光

編 號：

摘要

由於符合活體研究、解析度、穿透深度等需求，加上螢光技術，使光學方法成為追蹤單一腦神經工作情形較合適的方式。其中重要元件 TAGlens（可調式聲學梯度折射透鏡）的透鏡（目前 z 軸焦距變動最快的透鏡裝置），透過焦距快速變動達到快速掃描。不過 TAGlens 在高強度雷射穿透下，焦距變化範圍會產生改變，我們稱之 TAGlens 的熱效應。

本研究即研究 TAGlens 的熱效應，使用不同研究方法以量化並分析，其中利用體積影像中螢光球軌跡變化的方法，明顯呈現了 TAGlens 熱效應的變化，我們發現入射雷射功率越大，會使 TAGlens 的焦距平衡點越遠，焦距變化範圍越小。未來可望校正 TAGlens 因熱效應造成的數據誤差。

ABSTRACT

Due to its suitability for live tissue research, resolution, and penetration depth requirements, combined with fluorescence technology, optical methods have become more suitable for tracking the activity of single brain neurons. A crucial component in this process is the TAGlens (Tunable Acoustic Gradient Index Lens), which is currently the fastest lens device in terms of focal changes along the z-axis. By rapidly altering its focal length, the TAGlens enables high-speed scanning. However, under high-intensity laser exposure, the focal range of the TAGlens changes—a phenomenon we refer to as the thermal effect of the TAGlens.

This study investigates the thermal effect of the TAGlens using various methods to quantify and analyze its impact. Among these methods, the approach of observing changes in fluorescent sphere trajectories in volumetric imaging clearly demonstrates the thermal effect of the TAGlens. We found that as the incident laser power increases, the focal equilibrium point of the TAGlens moves farther away, and the range of focal variation decreases. This research opens the way for future corrections of data inaccuracies caused by the TAGlens's thermal effect.

目錄

壹 前言 (研究動機、目的、文獻回顧)	3
一、研究動機	3
二、研究目的	3
(一) 探討改變射入 TAGlens 之雷射功率對螢光球軌跡的影響	3
(二) 探討改變 TAGlens 振幅對螢光球軌跡的影響	3
三、文獻探討	4
(一) 雙光子顯微術	4
(二) TAGlens 簡介	4
(三) 澤爾尼克多項式	4
(四) 牛頓冷卻定律	5
(五) 快速體積影像	5
貳 研究過程及方法	7
一、利用透明容器裝螢光溶液觀察焦點振動以探討 TAGlens 熱效應	7
(一) 實驗過程與想法	7
(二) 失敗原因與檢討	7
二、利用相機拍攝光斑觀察模糊程度改變以探討 TAGlens 熱效應	7
(一) 實驗過程與想法	7
(二) 失敗原因與檢討	8
三、利用麥克森干涉儀觀察波程差變化以探討 TAGlens 熱效應	8
(一) 實驗過程與想法	8
(二) 失敗原因與檢討	9
四、利用體積影像中螢光球軌跡變化以探討 TAGlens 熱效應	9
(一) 實驗裝置圖	9
(二) 實驗方法	10
(三) 進行步驟	10
(四) 分析方法	11
參 研究結果與討論	12
一、利用體積影像中螢光球軌跡變化以探討 TAGlens 熱效應	12

(一) 重覆相同條件探討誤差	12
(二) 探討通過 TAGlens 之功率對體積影像中螢光球軌跡影響	14
(三) 探討 TAGlens 振幅比例對體積影像中螢光球軌跡影響	16
(四) 討論	19
肆 結論	21
伍 未來展望	22

壹、前言（研究動機、目的、文獻回顧）

一、研究動機

腦作為控制我們身體活動和思考重要的一部分，使我們的對其工作方式非常感興趣，然而現在對腦的運作方式並不完全瞭解，因此我們想要對腦的研究盡一份心力。由於觀察神經傳導需要用活體來實驗，因此不適合侵入式的觀察方式，而且從網路上的資料我們發現，磁共振造影、斷層掃描限於解析度太低，以目前技術無法辨別單一神經，因此用光學方式觀察腦較為合適。

使用光學技術的優點在於對樣本造成的損害較少，而且可以透過基因工程使欲觀察部位含有結合離子後會發出螢光之螢光分子，便於追蹤神經的工作方式。而雙光子掃描的光學顯微技術以其能進行光學切片以及穿透深度的優勢，讓它成為觀察神經傳遞的熱門選擇。於是我們找了利用光學研究腦部構造的實驗室，該實驗室使用 TAGlens 的透鏡裝置，TAGlens 目前是 z 軸焦距變動最快的透鏡裝置，它的主要原理是利用在周圍產生聲波振動讓其中的液體或氣體共振，使其因駐波產生週期性的密度變化，進而隨著時間快速改變光線的焦距，搭配雙光子掃描顯微技術能達到高速觀察體積影像的目的。學長帶我們做實驗的過程中提到：TAGlens 共振腔內的液體在高強度雷射射透下會被加熱，會導致其焦距變化範圍產生縮放和偏移，我們認為若解決此一問題便能改善此光學元件及相關研究效率。因此我們想著手進行一些關於其熱效應的研究。

二、研究目的

（一） 探討改變射入 TAGlens 之雷射功率對螢光球軌跡的影響

1. 軌跡中心的 z 座標
2. z 向軌跡長度
3. 軌跡中心的 x、y 座標

（二） 探討改變 TAGlens 振幅對螢光球軌跡的影響

1. 軌跡中心的 z 座標
2. z 向軌跡長度
3. 軌跡中心的 x、y 座標

三、文獻探討

(一) 雙光子顯微術

雙光子激發顯微鏡（英語：Two-photon excitation microscopy）是一種螢光成像技術，可以對活體組織進行深度約 1 毫米的成像。它不同於傳統的螢光顯微鏡，其中可激發螢光的波長約等於 1/2 的雷射光，使得必須有兩顆光子同時被吸收才可發出螢光，而在焦點處被激發的機率為最高 [3]。

(二) TAGlens 簡介

TAGlens (Tunable Acoustic Gradient lens) 是一項革命性的創新，它利用聲波在液體中的作用，成為目前自適應光學領域中最快速的可變焦透鏡。TAGlens 能夠在微秒內掃描多個焦距範圍，其速度遠遠超過當前市場上的其他液體透鏡、光學膜或機械掃描方法，達到激發並偵測樣本中不同距離處的螢光的效果，進而配合光路中的振鏡變換角度，得到一個三維區域的螢光資料。TAGlens 由一個圓柱形的壓電殼體組成，內部填充透明材料。當壓電換能器 (PZT) 受到射頻 (RF) 範圍內的正弦電壓驅動時，會產生駐壓波，這些駐波會定期改變透鏡內部折射介質的折射率分佈。

$$n(r, t) = n_0 + (n_a - \frac{n_a \omega^2}{4v^2} r^2) \sin(\omega t) \quad (1.1)$$

其中 n_0 和 v 分別對應到液體折射率以及介質中的聲速，而常數 n_a 取決於聲學介質的物理性質（包括初始折射率、聲速以及有效動黏度）和內壁的峰值速度（該速度與驅動信號的振幅呈線性關係）。

透過光學轉移函數我們可以將 1.1 式改寫為

$$\delta(t) = \frac{1}{f(t)} = \frac{Ln_a \omega^2}{2v^2} \sin \omega t \quad (1.2)$$

其中 $f(t)$ 為焦距而 L 為 TAGlens 的長度 (2.5cm)。

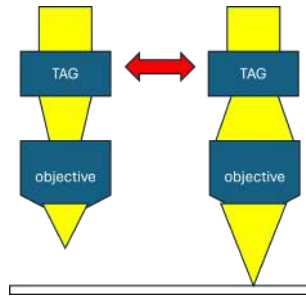


圖 1.1: TAGlens 搭配物鏡所造成的動態變焦（作者自行繪製）

如圖 1.1 所示，TAGlens 在開啓後會因為內部矽油的折射率分佈的變化，形成一個屈光度在 $\pm 1.6m^{-1}$ 的凸／凹透鏡 [6]。

(三) 澤爾尼克多項式

當使用 TAGlens 進行動態變焦時，波前的形狀會隨著焦距的變化而變化。在這種情況下，Zernike 多項式可以用來分析這些變化，具體來說是量化和描述透鏡變焦過程中引入的波前像差 [4, 2]。

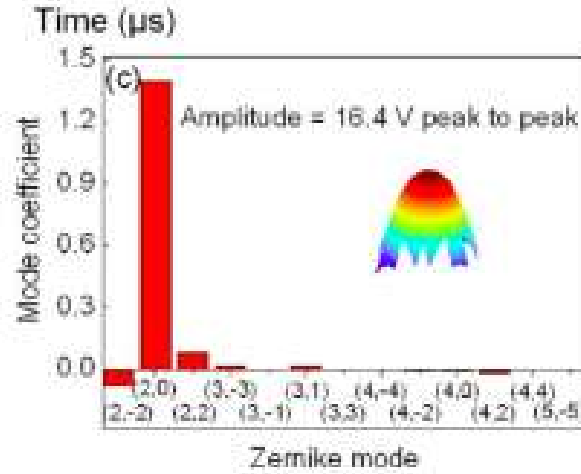


圖 1.2: TAGlens 中的 Zernike mode (圖片來源：參考資料 [9])

我們在文獻中看到在 TAGlens 的 Zernike mode 以 (2,0) 為最多 (圖 1.2)，對應光束的聚焦或散焦 (圖 1.3)，而 TAGlens 的高精度設計通常會讓高階 Zernike 模式的振幅非常小，這表示透鏡在變焦過程中引入的像差較少，能夠保持較好的光學性能 [5]。

(四) 牛頓冷卻定律

當 TAGlens 吸收雷射光能時，透鏡材料的溫度會上升，導致其熱量向周圍環境散發。最初，透鏡的吸收熱量高於散失的熱量，因此溫度持續上升。然而，隨著透鏡的溫度接近環境溫度，散熱速度加快，最終達到一個平衡狀態，此時吸收的雷射能量與散失的熱量相等。

當達到平衡時，

$$P_{befTAG} - P_{aftTAG} = k(T_{eq} - T_{env}) \quad (1.3)$$

其中， P_{befTAG} 為入 TAGlens 前的雷射功率， P_{aftTAG} 為出 TAGlens 後的雷射功率，兩者的差即為 TAGlens 所吸收的熱量。而 T_{eq} 代表 TAGlens 達動態平衡時的溫度， T_{env} 為環境溫度。

(五) 快速體積影像

快速體積影像攝影是基於半個世紀前發明的共焦顯微鏡 (confocal microscopy)，其通過激光掃描、共焦針孔和點檢測器，利用雙光子激發來實現不同層的光學切片。其特殊點是在系統中加入先前提到的 TAGlens，其變焦速度遠大於掃描儀進行 x、y 平面掃描的速度，並且使用 DOE (diffraction optical element) 將通過光束分 16 束，配合後序的透鏡，可以一次進行 16 個點的聚焦，將掃描體積的速度提升到約 500Hz (可以達到之深度約為 200 μ m)。

由於進行快速體積影像掃描時需要使用到 DOE 使光數分為 16 道，因此需要使用較強雷射才不致螢光不被激發，而在該強度下便會有熱效應的產生。

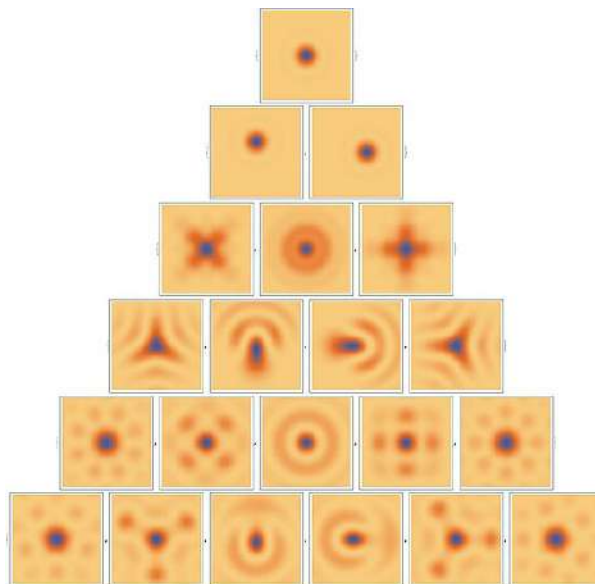


圖 1.3: 上圖為各個 Zernike mode 所代表的圖形，由上而下由左至右是 $(0,0)$ 、 $(1,-1)$ 、 $(1,1)$ 、 $(2,-2)$ 、 $(2,0)$ 、 $(2,2)$ 以此類推（來源：參考資料 [9]）。

貳、研究過程及方法

我們嘗試過了一些方法，但都以失敗告終，方法如下

一、利用透明容器裝螢光溶液觀察焦點振動以探討 TAGlens 熱效應

(一) 實驗過程與想法

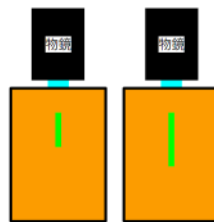


圖 2.1: 螢光溶液示意圖（作者自行繪製）

我們原本想要設計一個透明盒子裝著螢光溶液，從側面錄影並觀察焦點的上下振動。

由於該螢光溶液需要雙光子激發，因此我們只會看到焦點發出螢光，可由圖 2.1 見，我們預測將會在溶液中看到焦點振幅上有一條螢光，而產生熱效應後可能使其振幅加大（或減小）、平衡點移位等現象發生。

(二) 失敗原因與檢討

1. 手工製作樣品容易產生氣泡，影響觀察。
2. 承 1. 聚焦位置太淺使其會被氣泡影響到，而無法激發螢光。
3. 振動幅度太小 (0.2mm) 使得螢光難以觀察及測量長度。

二、利用相機拍攝光斑觀察模糊程度改變以探討 TAGlens 熱效應

(一) 實驗過程與想法

見圖 2.2 右，可以看到光斑上有我們刻意新增的條紋，開啓 TAGlens 後因焦點持續上下移動，光斑的條紋會變得較為模糊，而熱效應可能使焦點移動幅度加大或減小，將會使模糊程度改變。

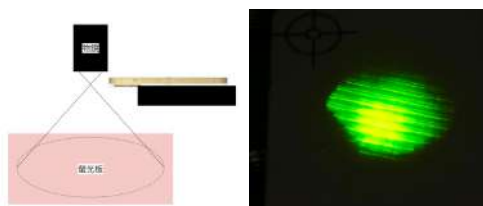


圖 2.2: 雷射在螢光卡上的光斑 (作者自行繪製或拍攝)

實驗架構可見圖 2.2 左，我們把 iPhone 14 pro 放在載物台上錄影並開啓雷射使 TAGlens 產生熱效應並進行影像分析。

(二) 失敗原因與檢討

我們做出的分析結果如圖 2.3 所示，我們利用 940nm, 420mW 的雷射光觀察並開啓 TAGlens。

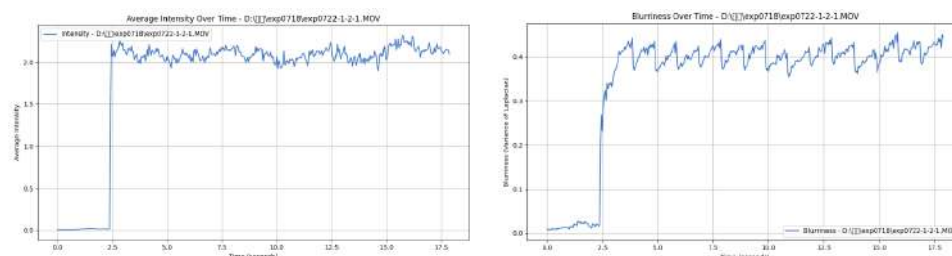


圖 2.3: 平均強度 (左) 和模糊程度 (右) 隨時間的變化 (作者自行繪製)

由於聚焦或散焦不影響總功率，因此平均強度如我們所預測，並沒有明顯的變化趨勢。

在模糊程度的量化我們使用了拉普拉斯變異數。在右圖可以明顯看到有週期約為 1 秒的上下起伏。亦可從圖 (二) 圈起的地方可以看出，其在尚未開啓雷射時也有出現，且其相位取決於開始時間 (如開始後 10 秒皆是波形最低處)，因此認為是手機相機自動對焦所造成。

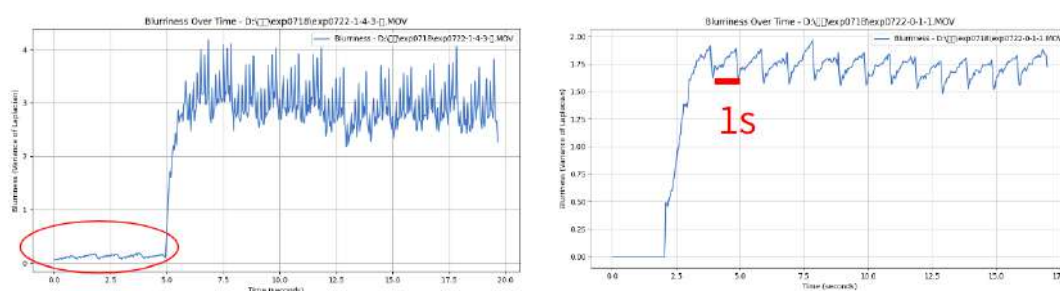


圖 2.4: 模糊程度分析中出現的一秒週期 (作者自行繪製)

三、利用麥克森干涉儀觀察波程差變化以探討 TAGlens 熱效應

(一) 實驗過程與想法

預期可以藉由觀察麥克森干涉儀產生的干涉圖形偵測微小的光程差變化，例如斑變寬可能會反映在干涉圖形上。

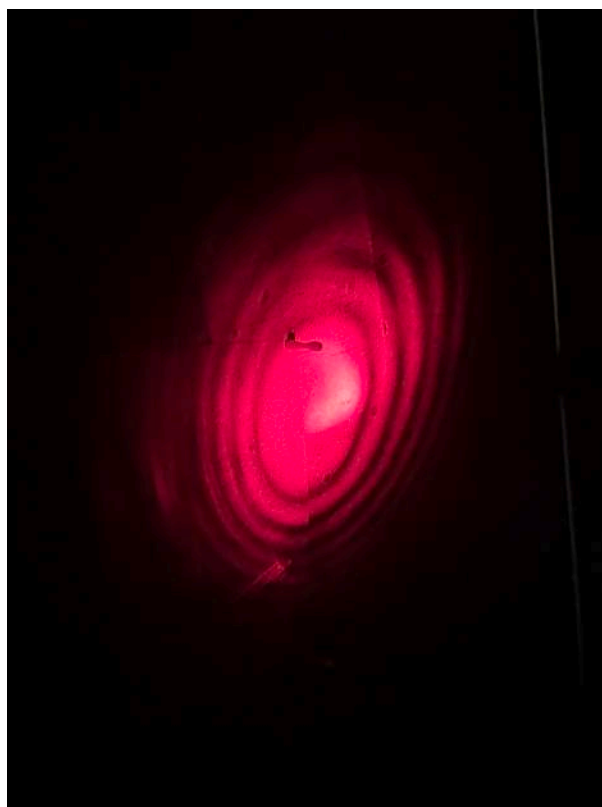


圖 2.5: 麥克森干涉條紋 (作者自行拍攝)

(二) 失敗原因與檢討

僅能用相機或肉眼觀察的幀率都低於 TAGlens 的 160Hz，若僅觀察因為光程差快速變化導致條紋模糊之模糊程度，即使可以觀察到變化，亦無法量化，因而放棄這個方法。

四、利用體積影像中螢光球軌跡變化以探討 TAGlens 熱效應

(一) 實驗裝置圖

各器材介紹

1. Galvo scanner

Galvo 掃描系統可以實現精確的 XY 平面掃描，透過兩個伺服驅動的反射鏡來控制光束的運動。這些反射鏡分別負責 X 軸和 Y 軸的掃描，使光束能夠靈活地在 XY 平面上進行快速移動和定位。

2. ND filter

中性密度濾鏡 (Neutral Density Filter, 簡稱 ND filter) 是一種光學濾鏡，能均勻地減少進入光線的強度，而不改變其顏色。[1]。

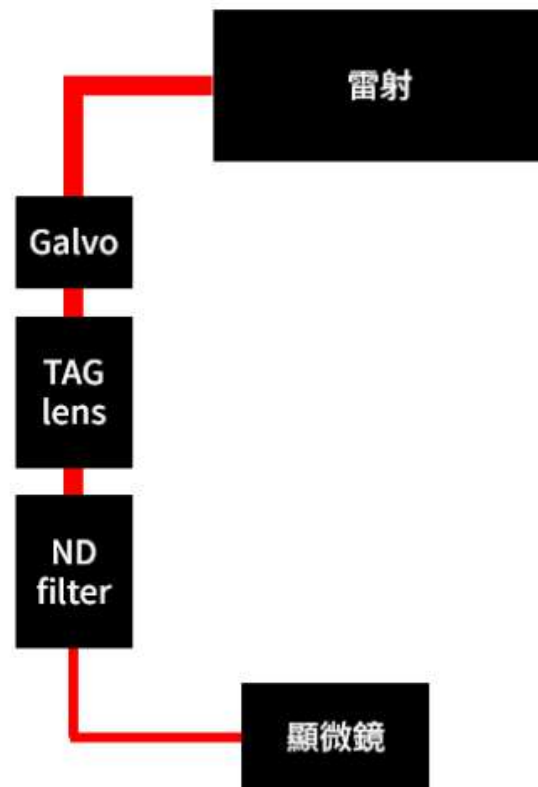
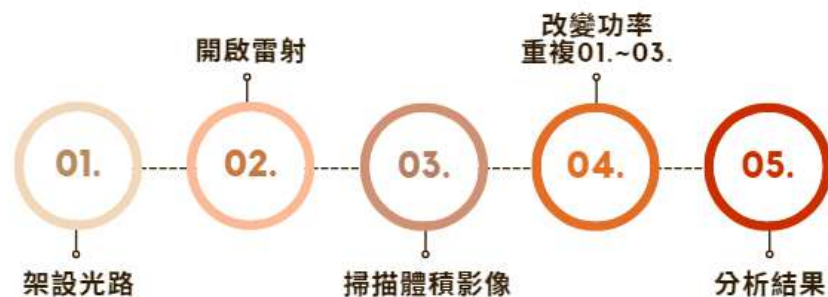


圖 2.6: 光路示意圖 (作者自行繪製)

(二) 實驗方法

1. 利用 Galvo scanner 掃描一個 xy 平面的影像之後調整載物台高度，即可掃描出清晰的樣本體積影像。
2. 在先前的經驗中，我們發現樣本無法承受能讓 TAGlens 產生熱效應的雷射強度，於是我們想到可以在 TAGlens 後方加上一個 ND filter，使得 TAGlens 能被雷射光充分加熱，又不會破壞樣本。
3. 在光路中加入 TAGlens，掃描出的體積影像，螢光球原本是正球體，而其被拉長的長度即為焦點之振幅。

(三) 進行步驟



(四) 分析方法

我們將會掃描出一個體積影像（三維）。

開啓 TAGlens 後，只要焦距移動的平衡點在螢光球附近幾層時，範圍便會包含到螢光球。由於我們接收光訊號的頻率低於 TAGlens 來回一次的頻率，所得的影像類似在焦距變化範圍依一定權重取平均。因此掃描到的體積影像中呈現長條狀的軌跡，而 TAGlens 產生熱效應之後螢光球的軌跡可能會有變化，因此我們分成以下各項來量化：

1. 平衡點移動

我們將畫面上每一個有訊號的點當作一個粒子，然後依訊號強度為權重定義其重心，是為螢光球的平衡點。(TAGlens 內部的振動來回具有對稱性，因振幅極小可視為簡諧運動，其平衡點即為中點。)

2. z 軸向的伸縮

利用影像中螢光球軌跡 z 軸方向的長度變化可以看出伸縮的比例。

參、研究結果與討論

一、利用體積影像中螢光球軌跡變化以探討 TAGlens 熱效應

這個實驗我們先在相同條件（功率 520mW，振幅 25%）下做了 5 次，並劃出各螢光球之 z 座標、z 向長度、xy 座標變化量的平均標準差，其變化量和第一次（時間最早者）比較，其中 z 座標、xy 座標是計算各功率和最小功率的差值，z 向長度則是計算比值。這部分放在「重覆相同條件探討誤差」。

這個實驗中我們改變的變因分別是功率和振幅，並比較 z 座標、z 向長度、xy 座標的變化量，以測得熱效應對螢光球軌跡的影響。我們在改變功率的情況下，我們會拿各個功率和最小的功率（20mW）比較，其中 z 座標、xy 座標是計算各功率和最小功率的差值，z 向長度則是計算比值；改變振幅的情況下則和最小振幅（15%）比較，同樣其中 z 座標、xy 座標是計算各功率和最小功率的差值，z 向長度則是計算比值。

（一）重覆相同條件探討誤差

為了探討此方法的誤差和可靠性，我們在相同的條件（TAGlens 前功率 520mW，30% 振幅）進行了五次掃描，我們分別在其中選擇了相同的 2~5 顆螢光球進行坐標的測量。

1. 軌跡中心 z 坐標

由表 3.1 和圖 3.1，我們可以發現在不改變條件的情況下，z 坐標的變動在 $8\mu\text{m}$ 以內。

次數 (次)	1	2	3	4	5
z 坐標差異之平均 (μm)	0.0	-2.0	-3.0	-8.0	-2.0
z 坐標差異之標準差 (μm)	0.0	2.8	4.2	2.8	0.0

表 3.1: 不同通過 TAGlens 的功率時中心 z 坐標差異

2. 軌跡中心 x、y 坐標

由表 3.2 和圖 3.2 我們可以發現 x 坐標的變動在 $4\mu\text{m}$ 以內；由表 3.3 和圖 3.3 我們可以發現 x 坐標的變動在 $7\mu\text{m}$ 以內。

次數 (次)	1	2	3	4	5
x 坐標差異之平均 (μm)	0.0	-1.2	-0.7	1.5	1.5
x 坐標差異之標準差 (μm)	0.0	0.4	0.2	0.5	0.6

表 3.2: 不同通過 TAGlens 的功率時中心 x 坐標差異

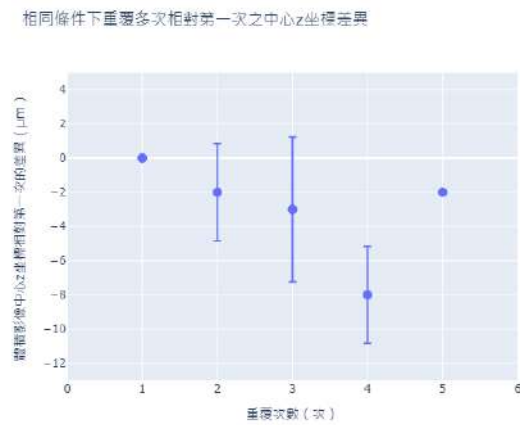


圖 3.1: 相同條件下重覆多次之中心 z 坐標差異 (作者自行繪製)

次數 (次)	1	2	3	4	5
y 坐標差異之平均 (μm)	0.0	6.3	11.7	0.4	-1.0
y 坐標差異之標準差 (μm)	0.0	0.3	0.4	0.1	0.2

表 3.3: 不同通過 TAGlens 的功率時中心 y 坐標差異

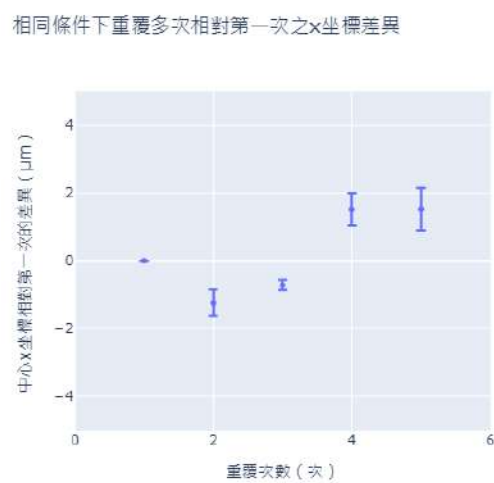


圖 3.2: 相同條件下重覆多次之 x 坐標差異 (作者自行繪製)

相同條件下重複多次相對第一次之y坐標差異

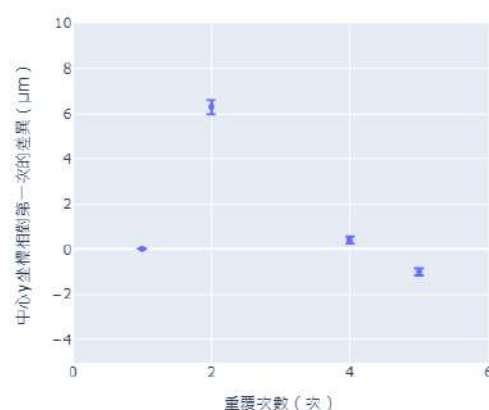


圖 3.3: 相同條件下重複多次之 y 坐標差異 (作者自行繪製)

小結：

由於 x、y、z 軸的變化都很不規律，且標準差皆不大，也就是說不同次掃描中每顆球和第一顆球的相對位置幾乎不變動，只是整體受到些微外界干擾而在畫面中移動。也就是說後續實驗 xy 向和 z 向在約 $8\mu\text{m}$ 以下，我們可以視為外界擾動造成。我們亦從此得知其對外界擾動很敏感，若要精準觀察熱效應造成的影響，往後應注意盡量減少外界擾動。

(二) 探討通過 TAGlens 之功率對體積影像中螢光球軌跡影響

我們接著改變了進入 TAGlens 的雷射功率，在 15% 振幅下我們做了 20mW、120mW、220mW、320mW、420mW、520mW 等六個功率。

- 軌跡中心 z 坐標首先我們比較 15% 振幅時了不同功率下的 z 坐標變化，由於 20mW 是數據中最小的功率，我們推測它幾乎不會產生熱效應，因此將 20mW 的螢光球坐標設為原點，以比較的影響。由表 3.4 和圖 3.4 可發現 z 坐標隨功率增大而減小，橫跨約 $20\mu\text{m}$ ，趨勢明顯。可能為熱效應造成。

功率 (mW)	20.0	120.0	220.0	320.0	420.0	520.0
z 坐標差異之平均 (μm)	0.0	-2.0	-8.0	-12.8	-12.8	-18.4
z 坐標差異之標準差 (μm)	0.0	0.0	1.4	1.8	1.1	0.9

表 3.4: 不同通過 TAGlens 的功率時中心 z 坐標差異

- 軌跡 z 向長度比較 z 向長度時，我們將每個功率下的長度除以 20mW 時的長度，由表 3.5 和圖 3.5 可發現 z 向軌跡長度隨功率增大而減小，即較為發散。亦可能為熱效應造成。

功率 (mW)	20.0	120.0	220.0	320.0	420.0	520.0
z 向長度比值之平均	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9
z 向長度比值之標準差	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

表 3.5: 不同通過 TAGlens 功率時中心 z 坐標差異

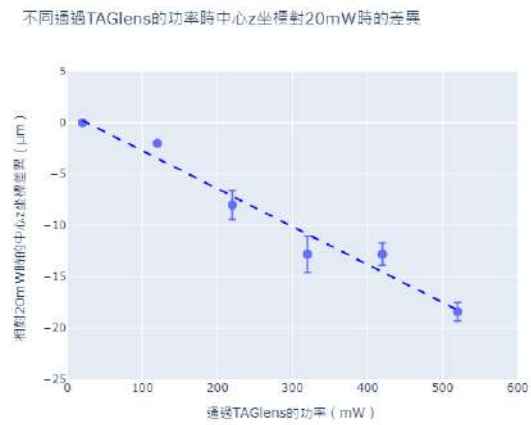


圖 3.4: 不同通過 TAGlens 功率時中心 z 坐標差異 (作者自行繪製)

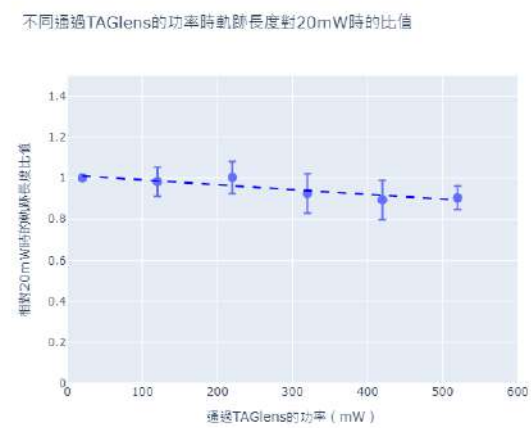


圖 3.5: 不同通過 TAGlens 功率時軌跡長度比值 (作者自行繪製)

不同通過TAGlens功率時中心相對20mW之x坐標差異

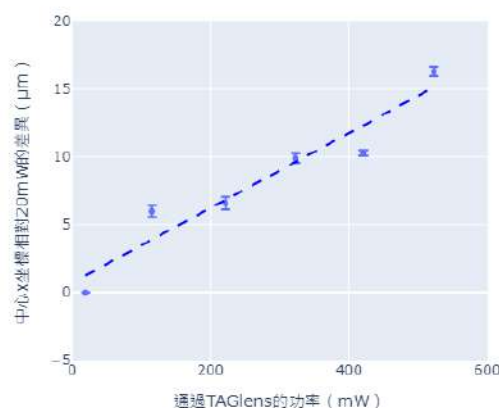


圖 3.6: 不同通過 TAGlens 功率時中心 x 坐標差異 (作者自行繪製)

3. 軌跡中心 x、y 坐標由表 3.6 和圖 3.6，以及表 3.7 和圖 3.7，螢光球 x、y 向的變動隨功率朝一定方向變動，皆橫跨近 $15\mu\text{m}$ 。因為 TAGlens 裝置是對稱的，可能是體積影像 x、y 方向光路上些微的不對稱，加上前述的 z 坐標變動帶動而造成。

功率 (mW)	20.0	120.0	220.0	320.0	420.0	520.0
x 坐標差異之平均 (μm)	0.0	6.0	6.6	9.9	10.3	16.3
x 坐標差異之標準差 (μm)	0.0	0.4	0.5	0.3	0.2	0.3

表 3.6: 不同通過 TAGlens 功率時中心 x 坐標差異

功率 (mW)	20.0	120.0	220.0	320.0	420.0	520.0
y 坐標差異之平均 (μm)	0.0	4.4	12.5	2.2	9.5	13.4
y 坐標差異之標準差 (μm)	0.0	0.7	1.0	1.2	1.5	1.6

表 3.7: 不同通過 TAGlens 功率時中心 y 坐標差異

小結：功率越大，z 坐標值有明顯減小的趨勢，推測可能熱效應造成其發散的效果；z 向長度減少；x，y 向有朝一方向變動的趨勢。

(三) 探討 TAGlens 振幅比例對體積影像中螢光球軌跡影響

這個實驗中我們使用 TAGlens 的振幅 15%、20%、25% 和 30%，各振幅下我們皆做了 20mW 和 520W 兩種功率，將 20mW 視為不產生熱效應，作為有無熱效應的比較。

- 軌跡中心 z 坐標由表 3.8 和圖 3.8 中我們發現在各振幅的情形下，z 軸橫跨 $10\mu\text{m}$ 多的範圍，卻無穩定趨勢。
- 軌跡 z 向長度由表 3.9 和圖 3.9 中我們發現軌跡長度比例介在 0.8~1.2 之間，較無規律。
- 軌跡中心 x、y 坐標由表 3.10 和圖 3.10，以及表 3.11 和圖 3.11 中，雖 x 向軌跡中心之坐標看似有減小的趨勢，但 y 坐標沒有。

不同通過TAGlens功率時中心相對20mW之y坐標差異

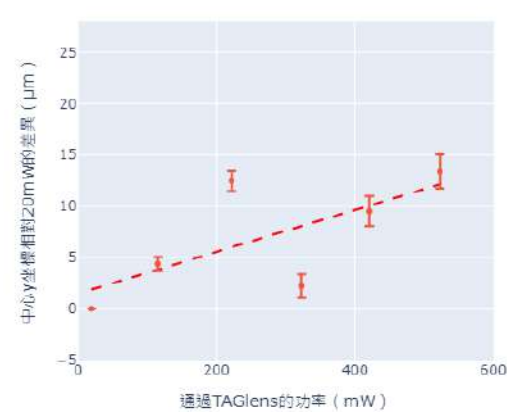


圖 3.7: 不同通過 TAGlens 功率時中心 y 坐標差異 (作者自行繪製)

振幅 (%)	15	20	25	30
z 坐標差異之平均 (μ m)	-18.4	14.8	0.8	-7.6
z 坐標差異之標準差 (μ m)	0.9	2.3	1.1	5.2

表 3.8: 不同 TAGlens 振幅時中心 z 坐標差異

不同TAGlens振幅時中心z坐標對20mW時的差異

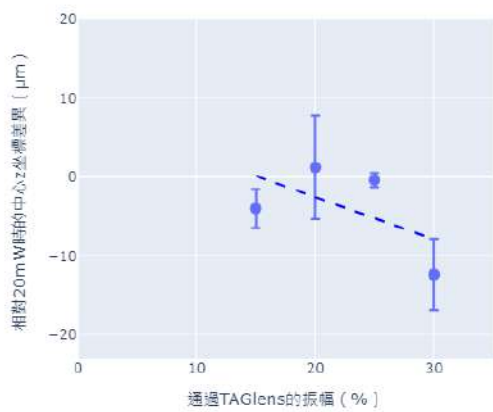


圖 3.8: 不同 TAGlens 振幅時中心 z 坐標差異 (作者自行繪製)

振幅 (%)	15	20	25	30
z 向長度比値之平均	0.9	1.0	1.0	0.9
z 向長度比値之標準差	0.1	0.1	0.0	0.0

表 3.9: 不同 TAGlens 振幅時軌跡長度比値

功率 (mW)	15	20	25	30
x 坐標差異之平均 (μ m)	16.3	6.8	3.3	1.4
x 坐標差異之標準差 (μ m)	0.3	0.3	0.7	0.4

表 3.10: 不同 TAGlens 振幅時中心之 x 坐標差異

不同TAGlens振幅時軌跡長度對20mW時的比值

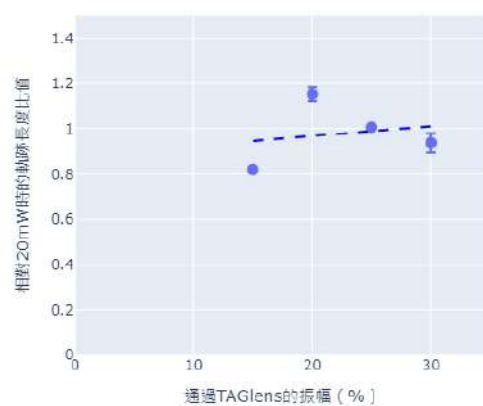


圖 3.9: 不同 TAGlens 振幅時軌跡長度比值 (作者自行繪製)

功率 (mW)	15	20	25	300
y 坐標差異之平均 (μm)	13.4	-6.8	4.0	13.0
y 坐標差異之標準差 (μm)	1.6	0.5	0.8	0.4

表 3.11: 不同 TAGlens 振幅時中心 y 坐標差異

不同TAGlens振幅時中心相對20mW之x坐標差異

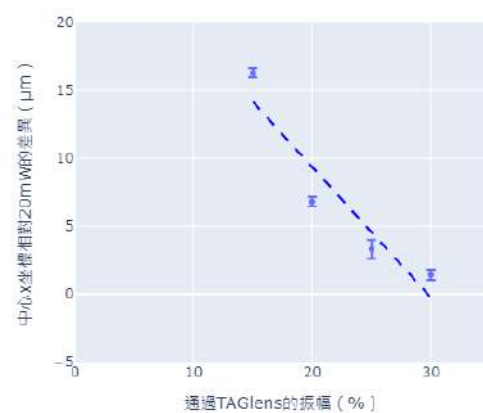


圖 3.10: 不同 TAGlens 振幅時中心 x 坐標差異 (作者自行繪製)

不同TAGlens振幅時中心相對20mW之y坐標差異

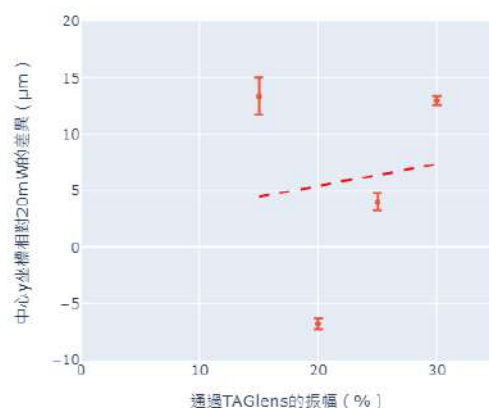
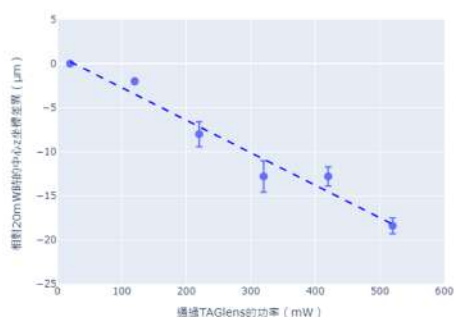


圖 3.11: 不同 TAGlens 振幅時中心 y 坐標差異 (作者自行繪製)

不同通過TAGlens的功率時中心z坐標對20mW時的差異



不同時間測量相對第一次之中心z坐標差異

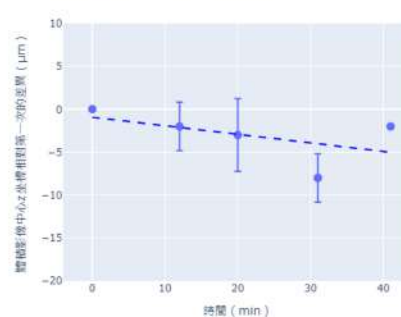


圖 3.12: 「功率對中心 z 坐標的影響」(左) 和 「時間對中心 z 坐標的影響」(右) (作者自行繪製)

小結：由振幅對 x、y、z 的影響皆不規律，因此推斷振幅不是主要影響熱效應的變因，不過橫跨的範圍皆有 10~20 μm ，此部分有待釐清。

(四) 討論

根據上面的研究結果，我們發現通過 TAGlens 的功率會顯著影響螢光球軌跡的 z 坐標和 z 方向長度，對於 xy 方向的影響不顯著；而振幅對各變因的影響亦不顯著。因此以下我們討論功率如何影響軌跡之 z 坐標和 z 軸方向軌跡長度的變化的可能機制和驗證方法。

1. 軌跡之 z 坐標的變化從研究結果可得知，隨著功率上升，螢光球軌跡的 z 坐標減少 (圖3.12左)。為了確定這並非受時間影響，我們做了五組相同條件的掃描，並按時間比較排列 (圖3.12右)，我們發現受時間的影響沒有固定方向，且變化範圍約 8 μm 。因此我們認為軌跡中心 z 坐標確實會受功率影響，可能是 TAGlens 的熱效應造成。

2. z 軸方向軌跡長度的變化

TAGlens 使用共振使介質產生振動以達改變焦距之目的，我們推測是因為 TAGlens 的熱效應讓其

共振頻率有些微變動，而無法如原先良好的接收能量並共振，因此焦點變化範圍隨功率減小，進而使影像中的 z 方向軌跡變小。

肆、結論

1. 入射雷射功率越大，會使 TAGlens 的焦距變動範圍越遠。
2. 入射雷射功率越大，會使 TAGlens 的焦距變動範圍較小。

伍、未來展望

1. 利用 COMSOL 程式模擬 TAGlens 內部情形
2. 利用觀察螢光球在體積影像中軌跡的實驗結果修正 TAGlens 的熱效應

參考文獻

- [1] Wikipedia contributors. Neutral-density filter. https://en.wikipedia.org/wiki/Neutral-density_filter. Accessed: 2024-10-09.
- [2] Wikipedia contributors. Optical aberration - zernike model of aberrations. https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_aberration#Zernike_model_of_aberrations. Accessed: 2024-10-09.
- [3] Wikipedia contributors. Two-photon excitation microscopy. https://en.wikipedia.org/wiki/Two-photon_excitation_microscopy. Accessed: 2024-10-09.
- [4] Wikipedia contributors. Zernike polynomials. https://en.wikipedia.org/wiki/Zernike_polynomials. Accessed: 2024-10-09.
- [5] A. Mermillod-Blondin, E. McLeod, and C. B. Arnold. High-speed varifocal imaging with a tunable acoustic gradient index of refraction lens. *Optics Letters*, 33(18):2146–2148, 2008.
- [6] Thorlabs. Tag lens - tunable acoustic gradient lens. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10674. Accessed: 2024-10-09.

【評語】160013

本研究為研究 TAGlens 的熱效應。使用不同研究方法以量化並分析，其中利用體積影像中螢光球軌跡變化的方法，明顯呈現了 TAGlens 熱效應的變化。入射雷射功率越大，會使 TAGlens 的焦距平衡點越遠，焦距變化範圍越小。報告雖豐富，卻看不出太多物理的探討。實驗失敗原因毋須報導。