

# 高速旋轉反射鏡變形狀態量測與量測方法研究

## A Study of the Measurement of the Deformation of a High-Speed Rotational Mirror

黃柏瑄、黃鼎名

Po-Hsuan Huang, Ting-Ming Huang

高速旋轉鏡可使用於光電實驗中，提供一種高速的光學調變機制。此旋轉鏡需要解決動態平衡問題，此外處於高速旋轉狀態時，鏡面結構也經由實驗發現會有發生變形的現象，造成光路反射後端之實驗訊號不穩定，影響實驗數據正確性。本研究發展一種量測高轉速兩面鏡變形現象的方法，兩面鏡轉速由 5000 rpm 至 30000 rpm，觀測結果證明兩面鏡的鏡面在高速旋轉下的確會發生變形，進而導致在光電實驗中兩面鏡後端 1550 nm 雷射接收端雷射耦光功率隨轉速變動的現象，本研究搭配有限元素法分析兩面鏡在高轉速下的變形行為，了解兩面鏡結構與旋轉變形的相關特性。

A high-speed rotational mirror can serve as a modulation mechanism in the optoelectric experiments. Dynamic stability shall be checked before applying this mirror to avoid destroying the rotational spindle. During the high-speed rotation, the mirror may suffer from deformation such that the signal of the experiments will be unstable. The authors propose a measurement method to study the deformation of the mirror at a rotational speed ranging from 5000 to 30000 rpm. The experiment and the numerical simulation show that the mirror deforms. Two kinds of measurement types are presented, and the same results can be obtained.

### 一、前言

本研究肇因於進行光學通訊量測實驗時，發現隨著鋁合金製兩面鏡旋轉速率的增加，在兩面鏡反射後端接收之 1550 nm 紅外線雷射的光功率有變動的現象，為了釐清此現象的成因，乃提出發生原因的假設並設計實驗進行驗證。

兩面鏡為本光學通訊量測實驗<sup>(1,2)</sup>的光學系統中一項相當重要的元件，光學系統中的兩條光路

均要通過兩面鏡的反射，此兩條光路分別是主光路與提供主光路接收感測器參考訊號的觸發光路 (trigger 光路)。光通訊實驗的光學系統中與兩面鏡相關之部分光路架構如圖 1 所示，圖中的高速轉軸 (spindle motor) 即為兩面鏡的位置，兩面鏡的外形結構如圖 2 所示。

兩面鏡的製作材質為鋁合金 AL6061，其中兩個反射面進行拋光加工以反射光線，兩面鏡在實驗操作時會以 20000 rpm 到 30000 rpm 的最高轉速進

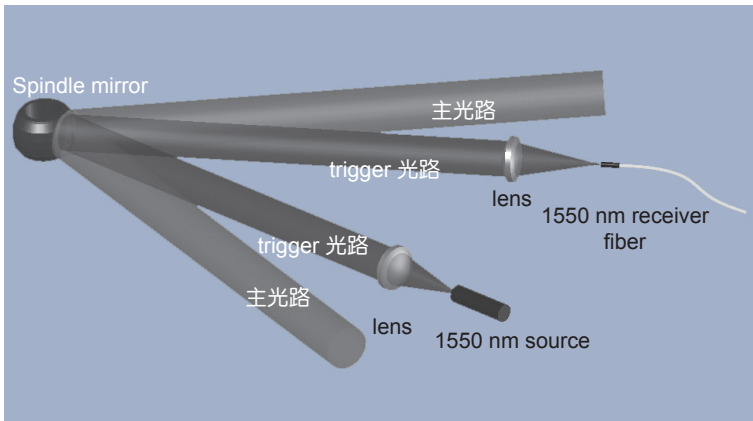


圖 1. 光通訊實驗之部分光學系統架構。

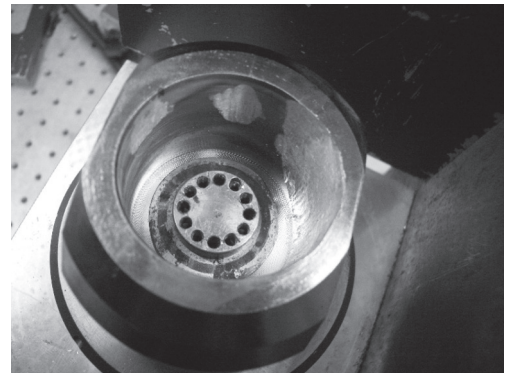


圖 2. 兩面鏡實體俯視照片。

行旋轉。其中觸發光路的 1550 nm 雷射光束在被兩面鏡反射後透過一個 5 cm 直徑透鏡的聚焦後耦合進入 50  $\mu\text{m}$  光纖。光學通訊實驗進行中，發現若是光路調校時是在靜態時將光纖耦合的光功率最佳化，則兩面鏡轉動後耦合進入 50  $\mu\text{m}$  光纖的光能量隨著轉速提高而逐漸減少。圖 3 為其中一次驗證實驗所得到的光纖耦合光功率對轉速的圖形，此次實驗未刻意調校光纖耦合光功率於靜態時達到最大，因此由圖形可以發現此次實驗光纖耦合光功率隨轉速而變化，耦合光功率最大值是發生在轉速約 12000 rpm 的時候。

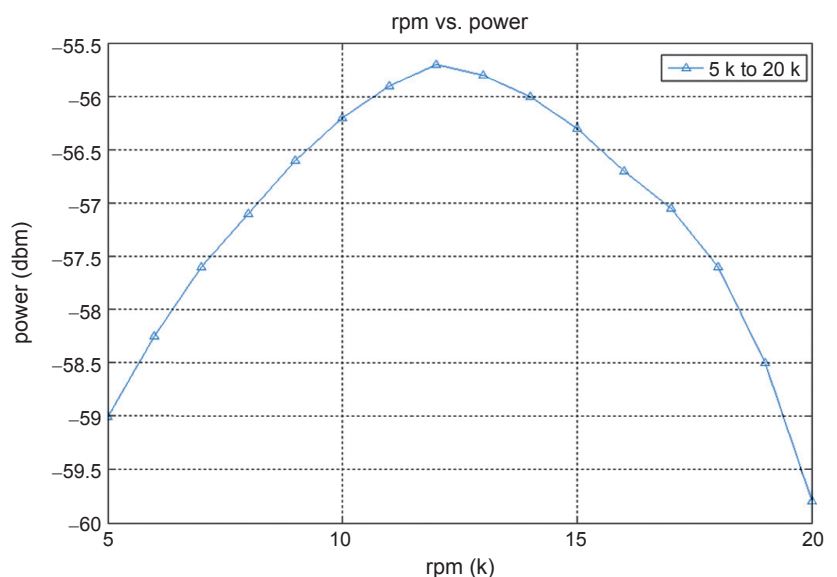
此現象對於光學通訊實驗數據的穩定性有關，故有必要探討發生原因。而推測可能原因之一為兩面鏡在隨轉速提高時，由於自身質量的離心力造成

反射鏡面變形，而導致反射光的角度有所改變或是反射光的波前有所變形，使得能夠耦合進入光纖的光能量相較於靜態或是低轉速時有相當顯著的減少所導致。

圖 4 即是本研究對於此種實驗中光纖耦合之光功率隨轉速變化的現象的推論示意圖；推測兩面鏡在轉速增加時，反射鏡面發生變形導致鏡面角度發生變化，且此變化量隨轉速成正比，導致兩面鏡所反射之直徑約為 5 cm 的 1550 nm 雷射光束在直徑 5 cm 接收透鏡 (receiver lens) 的相對位置隨轉速變化，進一步導致雷射光束被接收透鏡聚焦耦合進入光纖的光功率隨轉速而產生變動。

為驗證以上推論的正確性，本研究設計一套量測實驗方法，針對兩面鏡在高速轉動下的變形進行

圖 3. 實驗量測光纖耦合光功率與轉速關係。



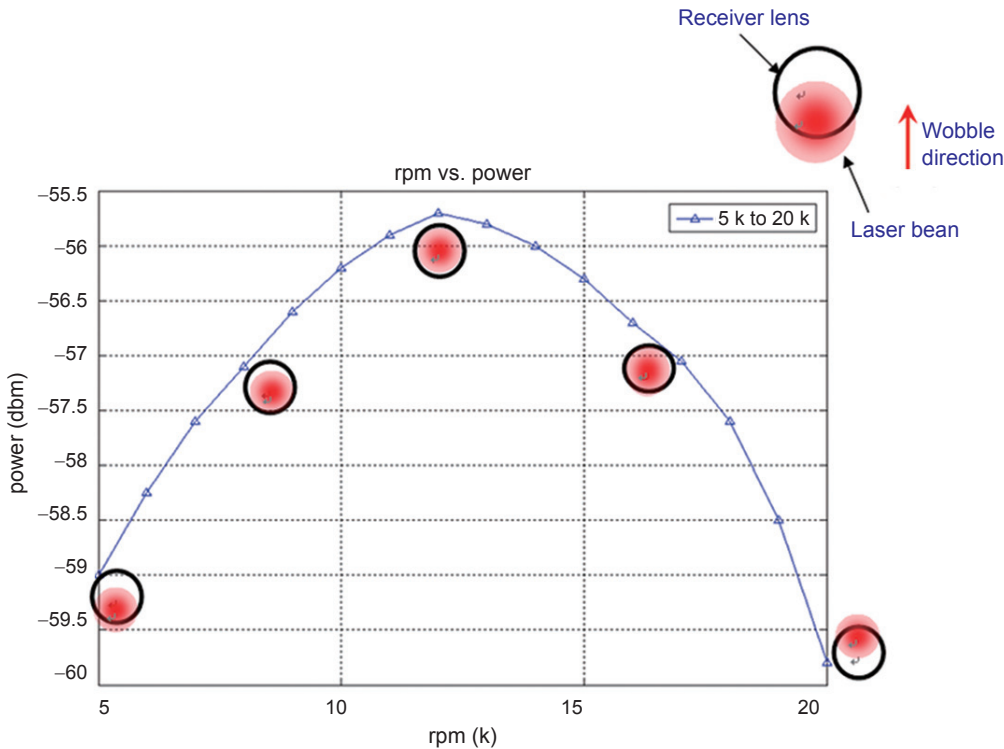


圖 4. 本研究對於光纖耦合光功率對轉速變化的現象初始推論之示意圖。

量測和觀察，並配合有限元素法分析兩面鏡在高轉速下的變形行為，以確認在光通訊實驗中接收端耦合光能量隨兩面鏡轉速提高而減少的真正原因，是否為兩面鏡結構發生變形所導致。

## 二、研究內容說明

### 1. 實驗概念設計

根據系統分析，實驗的光學系統會導致接收端雷射耦合光功率變化的因素主要有四項，分別為 (1) 兩面鏡的偏擺，(2) 兩面鏡的變形、(3) 溫度變化的影響以及 (4) 大氣擾動。實驗中轉速將高達 30000 rpm，推論若偏擺為主要因素，則高速轉軸 (spindle motor) 將因動態不平衡而損傷；而第三與第四項推論的因素均不會隨轉速變化，故判斷光纖接收功率隨兩面鏡轉速而變動的主要因素為兩面鏡的變形，因此本研究將著重於兩面鏡變形現象的探討。

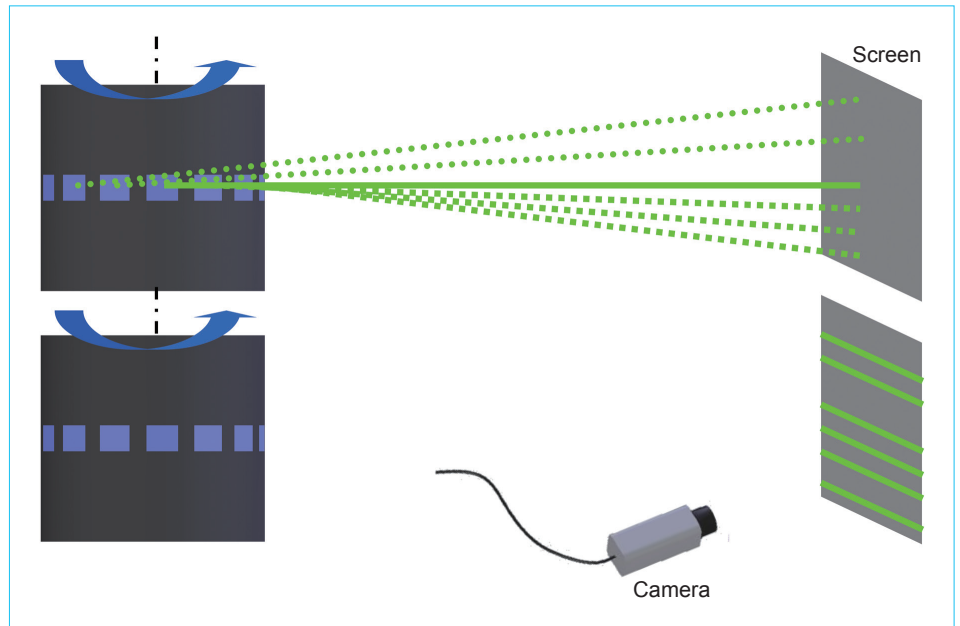
由於高轉速的觀測或是量測變形無法以傳統工具與方法為之，而必須使用非接觸之方式進行量測。兩面鏡進行光通訊實驗時所使用的轉速相當高，一般實驗中即會運作在高達 30000 rpm 的狀

態，因此本研究設計以光學的方式來進行量測。規劃以一道雷射光入射至兩面鏡的反射面上，觀察反射光的角度以及位置即可以判斷反射面是否有角度變形產生。

設計的實驗架構概念如圖 5 所示，反射光被兩面鏡的反射面反射之後投影至螢幕上，藉由直接觀測或是透過數位攝影機調整積分時間的方式，拍攝投影至此螢幕上的雷射光斑所累積成的光線線條，即可分析兩面鏡反射面上所發生的變形現象。

藉由觀察分析螢幕上雷射光線所掃描出的現象，可以判斷被測物體表面是否發生變形或是發生偏擺現象，如圖 6 所示。兩面鏡有兩個反射面，由於本身加工的些微角度誤差，在低轉速時兩個反射面會將同一束雷射光反射至不同位置，將拍攝螢幕的數位攝影機積分時間拉長即可在螢幕上得到兩條雷射光帶。實驗規劃以低轉速的雷射光帶位置作為基準，提高兩面鏡轉速之後再觀測此兩條雷射光帶是否有位置上的移動；若是兩條光帶變粗且同時移動，代表兩面鏡有振動偏擺現象，而若是兩條光束漂移的距離不一致，則代表兩面鏡上發生了變形現象，導致反射之雷射光束角度改變。由於發生變形的量有可能非常微小，因此兩面鏡與觀測螢幕間的

圖 5.  
高轉速變形量測實驗概念示意圖。



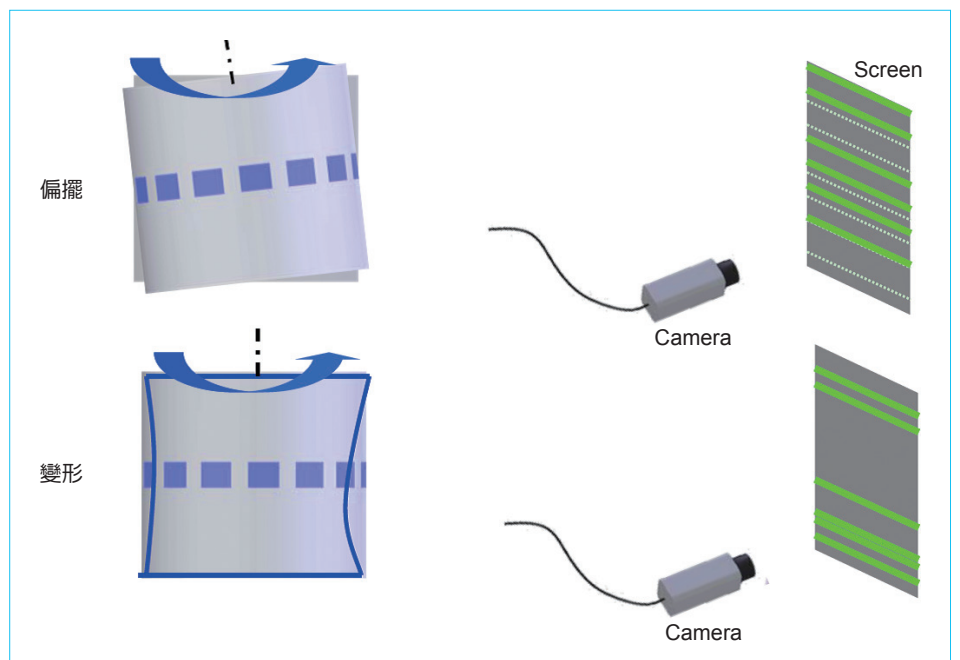
距離便是一項類似放大器的工具，增加與螢幕距離即可將更小的變形量予以放大，便於觀測。

## 2. 實驗架構敘述

依上述構想的量測概念，進行兩面鏡於高轉速狀態的變形分析實驗，所使用的雷射為功率為 5 mW 的綠光半導體雷射，固定在穩固之腳架上對準

兩面鏡的鏡面正中央發射雷射，並調整角度讓兩面鏡的鏡面所反射的雷射光投射至約 8.1 公尺外的正前方之壁面上，本實驗在壁面上貼上方格紙當作觀測螢幕，同時利用方格紙之方格當作參考基準。同時在實驗室左側壁面上也布置一張方格紙當作參考，用以比較觀察兩面鏡在不同反射角度時變化趨勢是否一致。實驗架設配置如圖 7 所示。

圖 6.  
待測物體振動偏擺與變形分析示意圖。



實驗主要以一部數位相機與一部數位攝影機記錄，搭配目視進行觀察並直接在方格紙上標示記錄。數位相機與數位攝影機的積分時間則適當地予以調整，使掃描過方格紙的雷射光點能夠累積形成一條雷射光帶以方便觀測光帶相對位置。

本實驗之實驗步驟為：

步驟 1：當完成實驗所有架設布置以及校準光路後，開啟攝影機並且先讓兩面鏡以低於 500 rpm 之低轉速進行轉動，並且開啟雷射光瞄準兩面鏡上所要量測的位置，首先以 500 rpm 的低轉速為基準標示出兩面鏡受較小離心力影響所反射之雷射光束之位置，此時兩面鏡的振動偏擺現象減少至最小。

步驟 2：逐步提升兩面鏡的旋轉速度開始進行實驗，本實驗所進行實驗的轉速分別為 5000 rpm、15000 rpm、20000 rpm、25000 rpm 與 30000 rpm。本實驗在兩面鏡由 5000 rpm 轉速提升之 30000 rpm 的過程中進行記錄。

步驟 3：完成 30000 rpm 的實驗後，開始降低轉速，重複進行一階段降低 5000 rpm 的實驗記錄，以驗證本實驗在不同轉速量測結果的重複性。

旋轉兩面鏡的高速轉軸之轉速由於是光通訊實驗中很重要的參數之一，因此控制高速轉軸轉速的

變頻器其轉速顯示值都以示波器與光電轉速計互相校對，在實驗中會同時以光電轉速計監控轉速，因此在本實驗中轉速值的誤差在  $\pm 0.5\%$  以內。

### 三、實驗結果

第一階段的實驗中，雷射光所瞄準的位置為兩面鏡反射鏡面的正中央位置，初步之實驗結果以所拍攝的數位影像加上分析之結果來呈現。如圖 8 所示，此圖下方為經過影像處理軟體強化雷射光帶後的數位影像，上方為分析的結果圖，兩張圖片同時呈現較容易了解實驗結果。

本實驗所使用的兩面鏡有一面反射率較佳，因此其反射之雷射光束能量也較強，因此顯示在照片中的雷射光帶較亮，可藉此區別照片中的雷射光帶是分別由哪個反射面所反射。圖 8(a) 為兩面鏡在 5000 rpm 的量測結果，兩條光帶位置皆與低轉速 (500 rpm) 時無明顯差異，上下兩條雷射光帶的間距約為 7.5 mm。圖 8(b) 為兩面鏡在 15000 rpm 的量測結果，下方的雷射光帶相較於基準線往上漂移了約 3.5 mm，顯示此反射面開始發生明顯的變形現象，導致反射之雷射光束角度有明顯變化；照片中上方的雷射光帶也些微地往上漂移，兩條雷射光帶的間距縮小為約 5.5 mm。圖 8(c) 為兩面鏡在 20000 rpm 的量測結果，可以發現下方較亮的雷射光帶已經較基準線往上漂移了約 6.0 mm，上方較

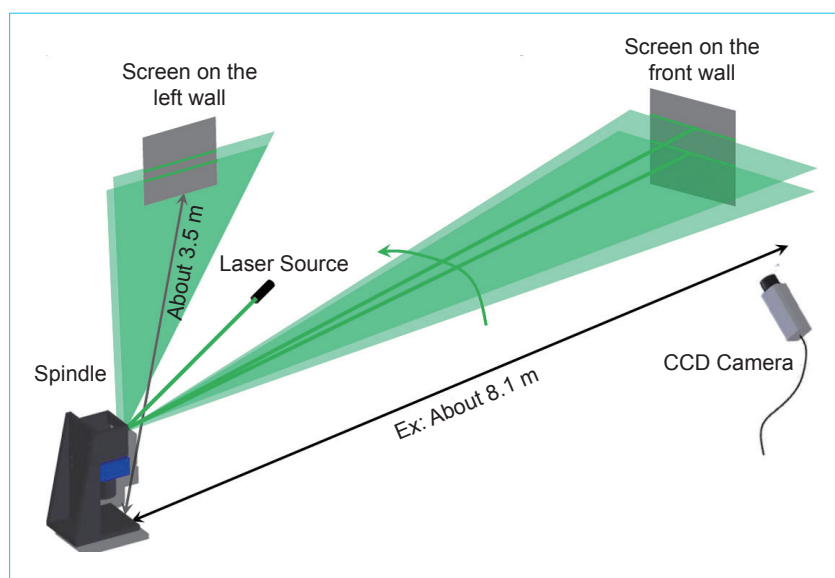


圖 7. 實驗架設配置示意圖。

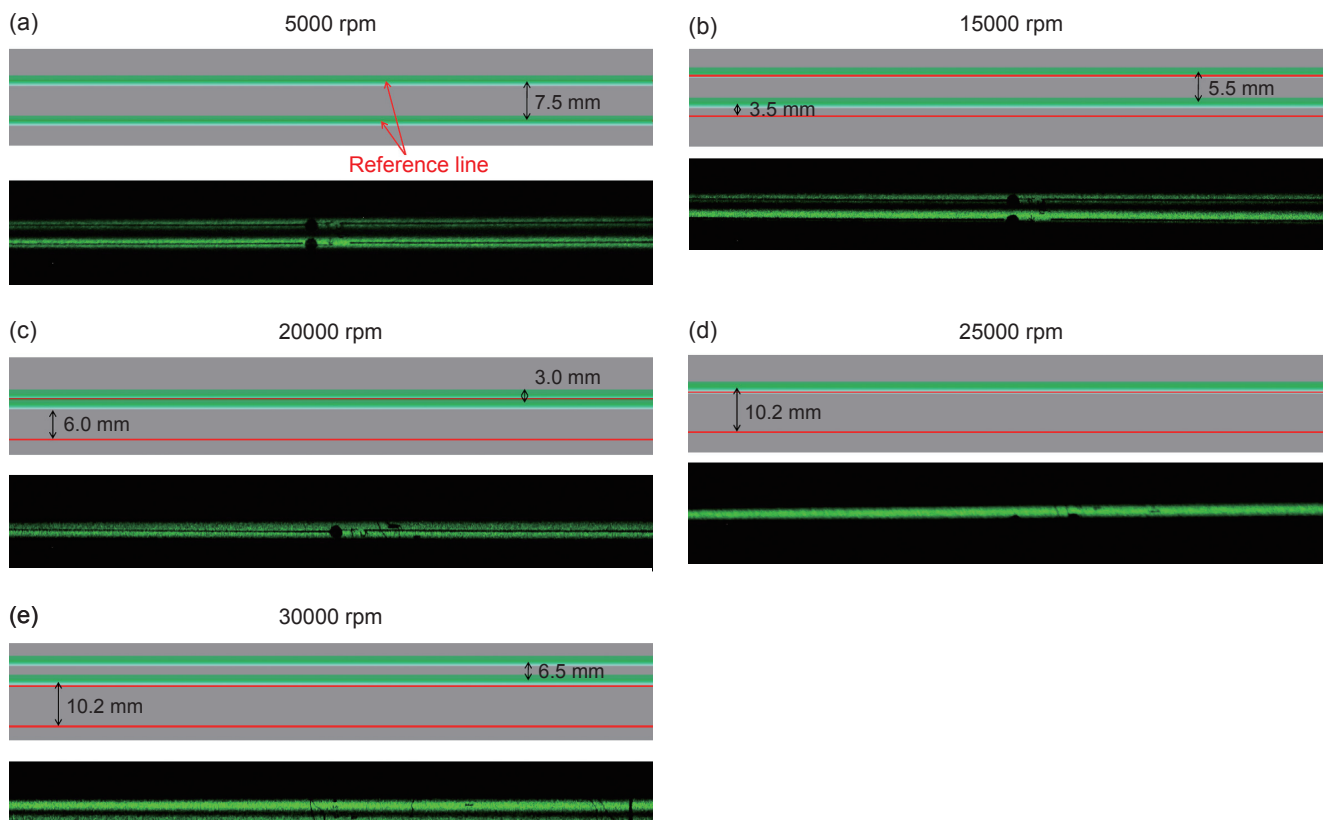


圖 8. (a) 5000 rpm，(b) 15000 rpm，(c) 20000 rpm，(d) 25000 rpm，(e) 30000 rpm 實驗結果。

暗的雷射光帶也比基準線往上移了約 3.0 mm，兩條光帶已經非常接近且快要接觸在一起。

圖 8(d) 為兩面鏡在 25000 rpm 的量測結果，可以發現原本的兩條雷射光帶已經幾乎重合在一起，原本下方較亮的雷射光帶已經相對於原先的基準線往上漂移了 10.2 mm。圖 8(e) 為兩面鏡在 30000 rpm 的量測結果，可以發現在較低轉速狀態原本位置在下方較亮的雷射光帶已經超越原本在上方較暗的雷射光帶，這條光帶相對於基準線已經往上偏移了 16.7 mm。上方較暗的這條雷射光帶相對於基準線也有明顯的往上漂移量。運用此位置漂移量  $h$  加上兩面鏡與螢幕的距離  $L$  (8.1 m)，可以以  $2\theta = \tan^{-1}(h/L)$  估計出反射光的角度變異為  $2\theta$ ，此時反射光線之反射面的角度變異為  $\theta$ ，如此將得到此雷射光所瞄準的反射面在 30000 rpm 相較於靜態時所改變的角度量  $\theta$  為 0.059 度。

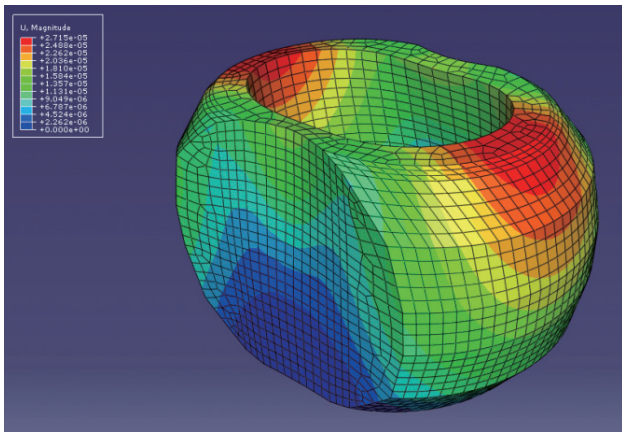
由圖 8 的實驗結果顯示兩面鏡在高轉速發生了變形，並且隨轉速的增加變形量也增加；更特別的是兩面鏡的兩個反射面的變形行為以及在各轉速的

變形量還不一致，由圖 8(a) 到圖 8(e) 兩條雷射光帶位移量的一致可以看出此現象。在完成 30000 rpm 的實驗之後，當轉速下降時進行觀測仍會重複圖 8 所記錄各轉速的雷射光帶位置，並且轉速下降到最低轉速時雷射光帶位置又回至與基準線重合的位置，實驗具有重複性。本實驗只要固定雷射光打在兩面鏡上的位置，即使停止兩面鏡的旋轉後再重新啟動進行實驗，仍能重複上述實驗所觀測到的行為與雷射光帶位置；這些行為都顯示了以上這些現象是材料的彈性變形行為所產生的結果。

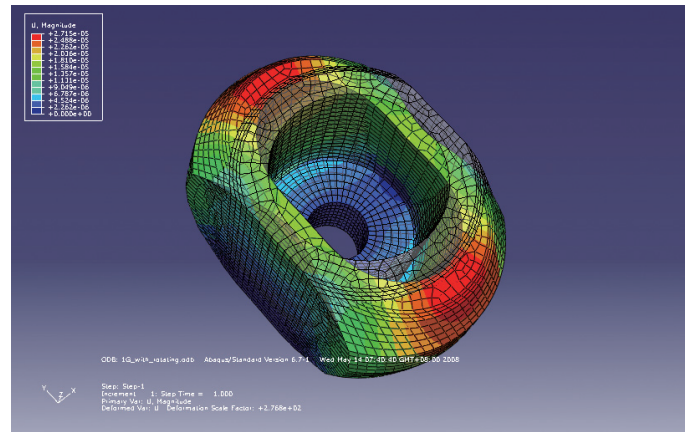
觀察圖 8 的實驗結果，由實驗圖片中並沒有辦法解析出雷射光束的寬度有變化的現象，因此初步判斷兩面鏡於本實驗中，並沒有發生大小足夠以本實驗的量測方式觀察記錄到的偏擺現象。

#### 四、實驗結果分析

兩面鏡的兩個反射面的變形行為不一致乃實驗之前未曾預料到的，因此本研究開始檢視本實驗所



(a)



(b)

圖 9. (a) 兩面鏡總變形量分布圖，(b) 兩面鏡總變形量分布與未變形前形狀比較。

使用的兩面鏡來嘗試分析此現象的原因。圖 2 即是兩面鏡的實體照片，拍攝角度是由正上方俯瞰兩面鏡的結構，觀察結果發現兩面鏡的兩個反射面的肉厚 (thickness) 並不一致，其中反射率較佳的一面肉厚最薄處為 3.5 mm，另外反射率較差的一面肉厚最薄處為 4.5 mm，肉厚較薄的反射面對應到實驗結果就是高轉速狀態發生角度變形現象較大的那一面。

造成兩面鏡兩個反射面厚度不一致的原因在於，進行兩面鏡動態平衡校正的方式為將兩面鏡內緣的材料移除，也因此造成了最後肉厚不一致的現象。而由於兩面鏡此種兩邊反射面肉厚不一致的現象，懷疑兩面鏡的量測實驗所顯示的兩反射面變形行為不一致的結果與此不均勻結構有密切的關係，後續將使用有限元素法分析軟體來對兩面鏡結構進行結構應力分析。

結構應力分析的部分由台大機械所研究生協助進行，使用的軟體為 Abaqus 6.7，兩面鏡的材質設定如下：材料 Al 6061、熱膨脹係數 23.6 ppm/°C、楊氏係數  $6.82 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>、密度 2.68 g/cm<sup>3</sup>、浦松比 0.332；模擬分析的狀態為 30000 rpm 狀態下的應力應變。分析的模型參考兩面鏡的原始設計狀態，也就是兩邊壁厚應當是一致的狀態。邊界條件設定兩面鏡下方的圓孔之內徑為固定，模擬兩面鏡固鎖於旋轉主軸上時底面圓孔被固定的實際情況。

初步分析的結果如後，圖 9(a) 所顯示的是兩面鏡總變形量分布圖，兩邊較圓的一端在高轉速狀

態下被向外拉開，而兩個反射面則向軸內縮，最大變形量為 0.027 mm。

圖 9(b) 與圖 9(a) 均是變形量分布圖，但是圖示視角改為由上方俯瞰兩面鏡的角度，同時加入透明的變形前結構位置以提供參考。可以發現兩面鏡圓形的兩端在高轉速下被自身材料質量的離心力往外拉伸而位移變形，也造成了兩個反射面位置的結構往內凹陷。兩面鏡下半部的變形量相對地小，因此造成反射面的中央位置在變形後，由原本的垂直面變成些微地往上傾斜，反射面正中央位置傾斜的角度約為 0.029 度。反射面角度的傾斜將造成高轉速下將雷射光束往上傾斜反射，將會產生與實驗所觀測相同的現象。由實驗結果所估計出的反射面在正中央位置與中間高度位置的角度傾斜量在 30000 rpm 時約為 0.059 度，此量測數值的為模擬數值的兩倍量，與實驗結果沒有完全吻合，這主要是由於分析的模型是依據兩面鏡原始設計狀態，並未依據兩面鏡實際加工後的結構狀態以及兩鏡面壁厚不均的情形來進行模擬，因此以上之模擬結果與實驗值算是相當地接近。若是要修正這問題，則必須以 3D 精密量測的方式量測獲得兩面鏡實體的整體輪廓與尺寸，再以分析軟體進行分析，應當能縮小分析結果與實驗結果的差距。

由圖 9(b) 所示的反射面位置上的上中下三條水平線與中央的垂直線當作參考線，畫出位置與變形量的關係如圖 10(a) 至圖 10(d)。圖 10(a) 為中央垂直線的位置對變形量的關係圖，縱軸為變形量，

橫軸為位置，位置零代表鏡面的最上方位置，正的位移量代表材料往軸心方向位移。由圖 10(a) 中可以發現兩面鏡在 30000 rpm 時鏡面從距離底部約 2.2 cm 開始即呈現以約 0.029 度的角度往內傾斜，因此導致了打在這上面的雷射光束在 30000 rpm 時相較於低轉速 (5000 rpm) 時往上反射了 0.058 度，使得距離 8.1 公尺外的觀測螢幕上的雷射光帶明顯地往上漂移。至於鏡面從底部至底部上方約 2 cm 的部分的變形量均比較小且一致，代表這部分的鏡面沒有角度上的傾斜。

圖 10(b) 至圖 10(d) 則是圖 9(a) 鏡面上三條水平線的位移量對位置的圖形。這三張圖主要提供三個位置的鏡面變形的形狀提供參考。由於本實驗所使用的量測方式只能對於垂直轉動方向 (軸向、Z 方向) 的角度變形量進行解析，而無法對於其他方向的角度變形量進行量測。若是要能夠對其他方向的角度變形量進行量測，則必須思考加入新的量測

技術進行解析與判斷。

上述實驗結果已經提供足夠的證據顯示兩面鏡在高轉速下的變形現象，也能合理的解釋在高轉速下 1550 nm 紅外線雷射耦合光功率下降的現象，這已經足夠提供在進行光通訊實驗時進行修正的參考。由於現有技術沒有方法可以完全避免兩面鏡的結構在高轉速下變形，接續的光通訊實驗在進行實驗操作時，會以示波器監測 1550 nm 紅外雷射耦合進入光纖的光能量波形，並依據此示波器所顯示的波形，在轉速變化時細微調整光纖的上下位置，以此方式來克服兩面鏡變形在光通訊實驗中所造成的影響。

## 五、量測技術改進與建議

本研究繼續對此一量測方式進行一部分的測試與後續改良探討。其中第一部分是針對兩面鏡

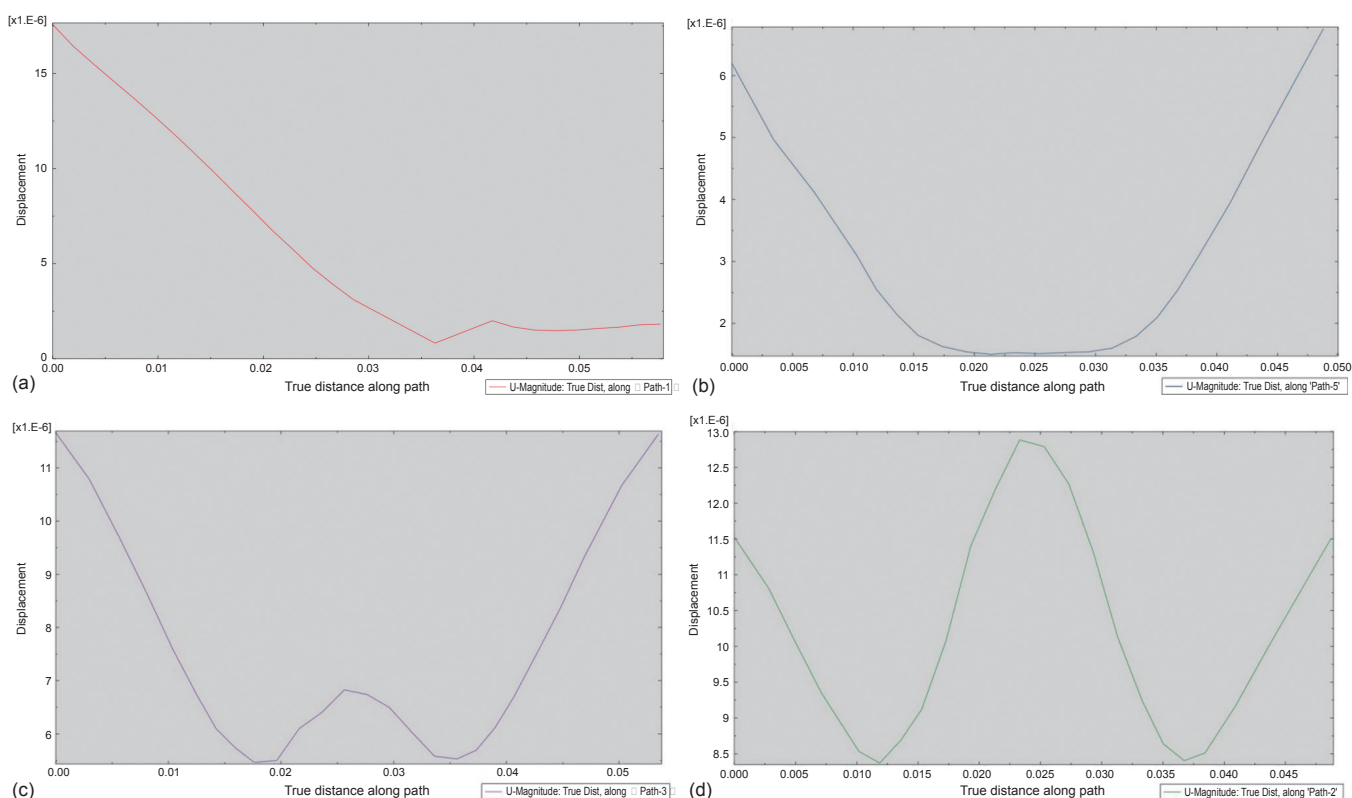


圖 10. (a) 中央垂直線的變形圖 (位置 0 代表在兩面鏡的最上方)。(b) 水平線 (下) 的變形圖，(c) 水平線 (中) 的變形圖，(d) 水平線 (上) 的變形圖，縱軸變形量，橫軸為位置，位置 0 代表面向鏡面時，鏡面的最左邊。

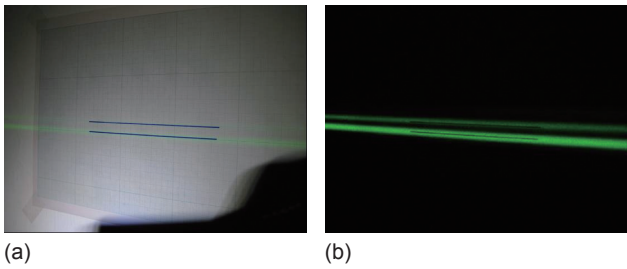


圖 11. 兩面鏡鏡面中線上緣位置量測。

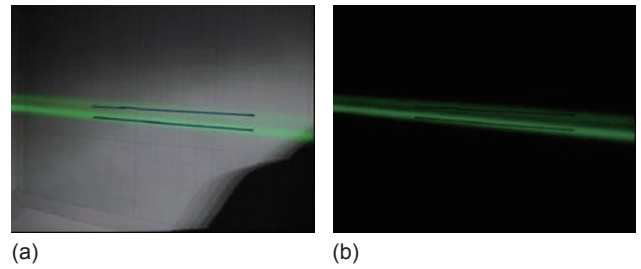


圖 12. 兩面鏡鏡面中線下緣位置量測。

的鏡面上不同位置進行量測，如圖 11 與圖 12 即是 5000 rpm 條件之下，針對兩面鏡鏡面中線上緣位置與中線下緣位置所進行的量測照片。在進行量測記錄時，為了讓數位相機拍攝方格紙的影像能夠同時清楚顯示方格紙的細節與清楚記錄雷射光帶位置，曾經多方面嘗試各種拍攝方式與狀態，最後是以圖 11 與圖 12 所示的方式。在同一個狀態下分別開啟與關閉室內照明進行拍攝兩張照片，其中一張照片由於室內照明開啟而可以清楚顯示方格紙上的位置資訊，另外一張照片由於室內照明關閉而能夠強化雷射光帶的能量分布資訊，提供雷射光帶位置與範圍的判斷。此兩張照片在實驗完成後進行資料分析時，可以利用影像處理軟體套疊，分析雷射光帶的位移量資訊。

上述量測方式在實際操作後發現了一些量測技

術上的問題點。在進行兩面鏡下緣的量測時，由於變形量較小 (與 FEM 分析結果吻合)，以本實驗原本所使用的觀測方式，也就是利用方格紙加上攝影機的方式，有時候相當難以精確地解析出變形的量，同時此種記錄方式也不利於後續進行數據分析和比較，例如要判斷雷射光帶的位置與範圍在分析上就有許多模糊的地帶，因此量測記錄方式有必要進一步予以改良，以利於更精確的量測，同時方便對實驗資料進行分析比對。

量測改良方式是引入光感測元件，以感測器直接接收雷射光束的方式來改進實驗記錄方式以及改進雷射光束位置的判斷精確度。圖 13 即是改良方案的概念示意圖。此改良方案以線型 CCD 作為感測器用，以直接接收雷射光束來記錄雷射光束位置的變化以及能量的變化，由於是直接接收雷射光並

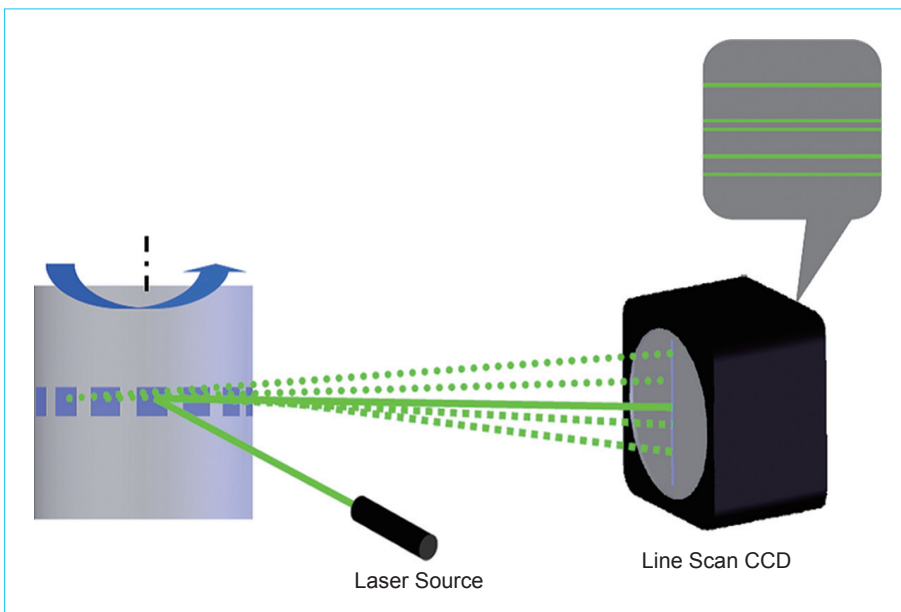


圖 13. 以線型 CCD 作為雷射光束位置記錄器示意圖。

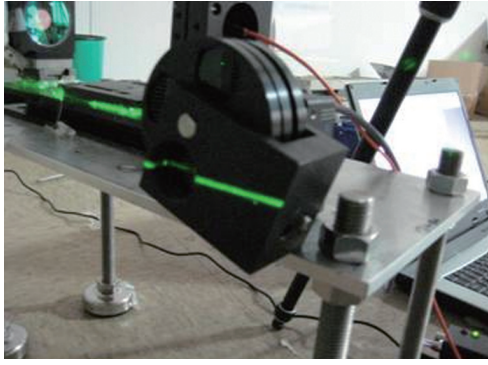


圖 14. 以面型 CCD 進行直接接收雷射光束實驗架設。

且轉成數位資訊，方便進行後續資料的分析與影像處理，加上所使用的 CCD 畫素大小為 5 到 10  $\mu\text{m}$  等級，將能夠精確分析出雷射光束位置上微小的變化量，相較於原先的實驗記錄方式在精確度上將有非常大幅度的提升。另外也能在許多位置部署多個 CCD，能夠同時對被量測物體不同位置的反射光同時進行量測，能夠加快實驗的速度。

由本文前述的實驗結果照片並無法判斷出雷射光帶是否因為兩面鏡的偏擺而變寬，若是改用 CCD 直接接收雷射光束的實驗方式之後，理論上由數位影像應當可以分析與辨識出偏擺所造成的影響。

上述所提之以 CCD 直接接收雷射光束來進行實驗記錄的方案，本研究曾以面型 CCD 進行初步之可行性實驗。此實驗運用 Basler A312fc (780  $\times$  580 畫素，畫素大小 8.3  $\mu\text{m}$ ) color CCD<sup>(4)</sup> 前方加上 ND filter 進行直接接收雷射光束的實驗，實驗 CCD 架設實況如圖 14 所示。實驗架設時微調雷射光源之角度，讓經由兩面鏡所反射之雷射光束能夠完全進入 CCD 感測區域範圍。另外為了讓雷射光帶因為兩面鏡高轉速變形的漂移量範圍皆能進入 CCD 感測區域，所以此實驗架設時特別將 CCD 架設距離兩面鏡約只有 30 cm 的位置。

實驗之結果如圖 15 所示，CCD 直接接收雷射光束的影像可以很清楚顯示雷射光帶的分布與相對位置，而由於此 CCD 的畫素大小為 8.3  $\mu\text{m}$ ，因此雷射光帶位置判斷的精確度也將能夠達到  $\mu\text{m}$  等級，相較於原本之實驗記錄方式精進許多。另外由

於此面型 CCD 只有 780  $\times$  580 畫素，CCD 感光面積對角線只有 1/2 英寸，因此若是雷射光帶的位移量稍為變大或是感測器與兩面鏡的距離加大，雷射光帶將非常容易移動超出 CCD 的感測範圍。如本研究之改良方案建議所預想的，線型 CCD 將是更適合本研究量測用途的感測器型式。圖 15(a) 與圖 15(b) 分別為以 Basler 面型 CCD 進行直接接收雷射光束實驗的結果。

## 六、結論

本研究提出一種高轉速兩面鏡變形量測方法，經實驗及理論模擬發現兩面鏡在轉速提高時鏡面會變形同時向上傾斜，而且鏡面是以上緣為中心成內凹的形狀，這將導致於光通訊實驗中兩面鏡所反射的 1550 nm 紅外線雷射光束往上漂移，經過透鏡聚焦後雷射焦點也將漂移，導致 1550 nm 雷射接收功率訊號不穩定。

利用 CCD 直接或間接記錄雷射反射光點的位置及寬度結果顯示，兩面鏡變形為 1550 nm 雷射接收功率訊號不穩定的主要原因。其解決方案最直接為降低兩面鏡變形，或增加 1550 nm 雷射接收功率回饋。

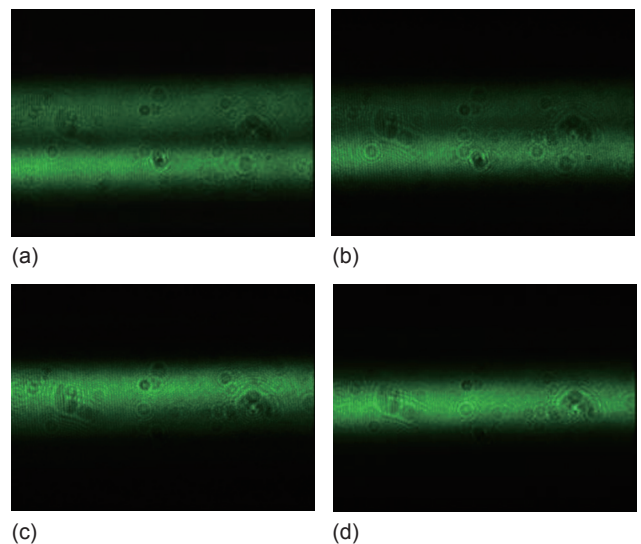


圖 15. 以面型 CCD 進行直接接收雷射光束實驗結果 (5000、10000、20000、30000 rpm)。

## 誌謝

本研究中有限元素法分析的部分感謝台灣大學機械系研究生馮瑞裕、張哲源與蕭詠中的協助。

## 參考文獻

1. P.-L. Chen, S.-T. Chang, S.-T. Ji, S.-C. Lin, H.-H. Lin, H.-L. Tsay, P.-H. Huang, W.-C. Chiang, W.-C. Lin, S.-L. Lee, H.-W. Tsao, J.-P. Wu, and J.-S. Wu, "Demonstration of 16 Channels 10 Gb/s WDM Free Space Transmission Over 2.16 km," *LEOSCONF*, Acapulco, Mexico (2008).
2. 黃柏瑄, 陳永祥, "高速旋轉反射鏡變形狀態量測", 2010 精密機械與製造科技研討會 (2010).
3. P.-H. Huang, S.-T. Chang, J. S. Wu, and T.-M. Huang, "Optical Measurement of a High-Speed Rotation Mirror Deformation," *Frontiers in Optics 2010*, Rochester NY (2010).
4. <http://www.graftek.com/pages/A312FC.htm>



黃柏瑄先生為國立中興大學機械碩士，現任儀器科技研究中心助理研究員。

Po-Hsuan Huang received his MS degree in mechanical engineering from National Chung Hsing University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



黃鼎名先生為國立成功大學航太博士，現任儀器科技研究中心研究員。

Ting-Ming Huang received his Ph.D. degree in aeronautics and astronautics engineering from National Cheng Kung University. He is currently a researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.