

國立臺灣大學工學院機械工程學系



碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

巢狀式位移放大壓電致動器之設計與開發

Design and Development of a Nested-Type Amplified
Piezoelectric Actuator

吳起雲

Chi-Yun Wu

指導教授：廖先順 博士

Advisor: Hsien-Shun Liao, Ph.D.

中華民國 113 年 7 月

July, 2024



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書
MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

巢狀式位移放大壓電致動器之設計與開發

Design and Development of a Nested-Type Amplified
Piezoelectric Actuator

本論文係 吳起雲 (R11522639) 在國立臺灣大學機械工程學系完成之碩士學位論文，於民國 113 年 7 月 4 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department of Mechanical Engineering on 4, July, 2024 have examined a Master's Thesis entitled above presented by WU, CHI-YUN (R11522639) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

廖先順

高豐生

胡昱強

系(所、學位學程) 主管 Director:

莊嘉揚

致謝



時光飛逝，碩士生涯即將到尾聲，兩年前與廖先順教授面談的場景猶歷歷在目，首先感謝老師提供我一個自由的研究空間，讓我可以對有興趣的題目自由探索，在我的研究遭遇瓶頸時，很感謝老師能提供經驗，讓我豁然開朗。

感謝博班的政融學長，學長的引導讓我能架起理論與實踐間的橋樑，從第一次送加工件到電路設計、後期的實驗架構，學長的意見讓我能夠少走許多彎路，並更深入理解工程的設計思路。謝謝博班的亞康學長提供我實驗上的經驗及建議。感謝前一屆的邑華、暄文、守程、俊佑學長，讓我更快熟悉研究生活。感謝同屆的彥瑋、鴻升、凱彥、沛宸，大家互相協助，處理實驗室事務，分享研究心得，度過充實的研究生時光。

感謝庫力索法高科的同事們，以前輩的身分導引我學習在業界的做事方法。

接著必須感謝中研院物理所的精工室及台大實習工廠，不論多麼複雜的形狀，都能將我需要的工件加工出來。

最後要感謝我的家人，提供我背後的支持及鼓勵，讓我能無後顧之憂得進行研究。

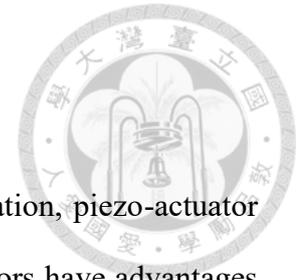
摘要



壓電式致動器是一種利用壓電效應將電能轉換為機械能的元件。壓電材料在受到電場作用時會產生形變，而這種形變可以用來驅動機械元件。壓電式致動器具有耐用度高、出力強、驅動頻率高、等優勢，因此被廣泛應用於自動化工業、精密儀器、等領域。然而，壓電材料的變形量較低，因此壓電式致動器的行程也較小。為了滿足某些應用場合的需求，需要對壓電式致動器的行程進行放大。壓電行程放大器是一種用於放大壓電式致動器行程的機構。現有的壓電行程放大器多為槓桿式。槓桿式放大器的原理是利用槓桿的力學原理，將壓電材料的微小形變放大為較大的行程。槓桿式放大器具有結構簡單的優點，但其垂直輸出位移方向上的尺寸較大，因此不適合安裝在空間狹小的場所。為了克服槓桿式放大器的缺點，本文提出了一種撓性結構的壓電行程放大器設計。此設計使用尺寸為 $7 \times 7 \times 36 \text{ mm}^3$ 之積層式壓電元件，首先以壓電元件推動一菱形撓性放大機構，菱形機構再推動一對對稱之槓桿結構，槓桿結構再撐開一個半菱形結構，共可達到 $285 \mu\text{m}$ 之致動行程，以及 11.5 倍之行程放大倍率。所提出之結構利用槓桿及菱形結構之特性互補，使得占用較大空間的槓桿式結構及積層式壓電元件能被配置在平行輸出位移之方向上，使得所設計之致動器尺寸可在 $60 \times 44 \times 12 \text{ mm}^3$ 以內。相較於同伸長量之其他致動器，所提出之致動器寬度尺寸可減少 50% 以上，並具有 935 Hz 之輸出方向共振頻率及 $0.16 \text{ N}/\mu\text{m}$ 之輸出剛性。

關鍵詞： 壓電式致動器、壓電行程放大器、撓性結構、槓桿式放大結構、菱形形式放大結構

Abstract



Through converting electrical energy into mechanical deformation, piezo-actuator can be used to actuate mechanical components. Piezoelectric actuators have advantages of high durability, large output force, and high bandwidth, which have been widely used in automatic manufacturing and precision instruments. Due to the small displacement of the piezoelectric actuator, amplification mechanism is necessary for many applications required long travel distance. The lever-type amplifier is a commonly used mechanism, which has simple structure. However, the lever-type amplifier usually has a larger dimension in the direction that paralleled to the output axis, making it difficult to fit in a narrow space. To overcome this limitation, this study proposed a nested-type amplified piezo actuator design using a compliant mechanism. This design employed a piezoelectric stack with dimensions of $7 \times 7 \times 36 \text{ mm}^3$ to drive a rhombus-type amplifier. The displacement of the rhombus-type amplifier then actuated two symmetrical lever-type amplifiers. Finally, the two levers deformed a half rhombus-type amplifier to achieve a total displacement of $285 \text{ }\mu\text{m}$ with an amplification ratio of 11.5. The proposed design integrated two types of the amplifiers to reduce the width, and the dimensions of the actuator were under $60 \times 44 \times 12 \text{ mm}^3$, offering up to a 50% reduction in width compared to other actuator designs. The design also featured an output resonance frequency of 935 Hz and an output stiffness of $0.16 \text{ N}/\mu\text{m}$.

Keywords: piezo-electric actuator, piezo electric amplifier, compliant mechanism, lever-type amplifier, rhombus-type amplifier

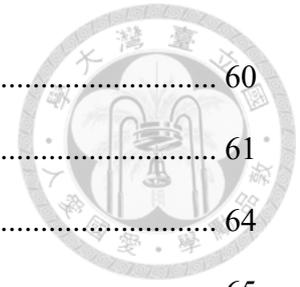
目次



口試委員審定書	i
致謝	ii
摘要	iii
Abstract.....	iv
目次	v
圖次	viii
表次	xiii
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 文獻回顧	2
1.2.1 壓電材料的原理	3
1.2.2 壓電材料的歷史	3
1.2.3 壓電致動器之類型	3
1.2.4 機械式位移放大機構	7
1.2.5 共振式位移放大機構	8
1.2.6 步進式壓電致動器	9
1.2.7 撓性結構之關節設計	11
1.2.8 槓桿式撓性放大結構	13
1.2.9 菱形式撓性放大結構	15
1.2.10 複合式撓性放大結構	20
1.3 研究目的	21
1.4 內容簡介	23
第二章 巢狀撓性放大機構	25



2.1 巢狀撓性放大機構之設計概念	25
2.2 巢狀撓性放大機構有限元素分析	28
2.3 巢狀撓性放大機構模態分析	31
第三章 實驗架構與設計	33
3.1 整體系統架構	33
3.2 壓電柱安裝	34
3.3 荷重元與應變規	38
3.3.1 應變規 (Strain gauge)	38
3.3.2 惠斯通電橋 (Wheatstone bridge)	39
3.3.3 荷重元 (Load cell)	40
3.3.4 穩壓電路	41
3.3.5 前置放大器	44
3.3.6 校正裝置	45
3.4 位移量測系統	47
3.4.1 像散式光學輪廓儀	47
3.4.2 雷射位移計	51
3.5 控制系統	52
3.5.1 控制板	52
3.5.2 鎖相放大器	53
3.5.3 電壓放大器	54
第四章 實驗流程與結果	56
4.1 實驗流程	56
4.2 實驗前準備	56
4.2.1 荷重元校正	56
4.2.2 商用紅光讀取頭校正	58
4.2.3 積層式壓電元件無負載位移量	59



4.3 撓性結構軸向定義	60
4.4 行程與放大倍率實驗	61
4.4.1 總行程實驗結果	64
4.4.2 壓電元件伸長量實驗結果	65
4.4.3 半菱形撓性放大結構位移放大量實驗結果	66
4.4.4 總行程放大量實驗結果	67
4.5 巢狀撓性結構推力實驗	67
4.5.1 巢狀撓性結構推力實驗結果	69
4.6 頻率響應實驗	71
4.6.1 共振模態掃頻實驗	72
4.6.2 輸出端主軸(A, Y)頻率響應	78
4.6.3 第二階槓桿臂(D, X)頻率響應	79
4.6.4 撓性末端(C, X)頻率響應	80
4.6.5 撓性末端(B, Z)頻率響應	81
4.6.6 壓電柱輸入端(E, Z)頻率響應	82
4.7 結果與討論	82
第五章 結論與未來展望	83
參考文獻	84
附錄	86

圖次



圖 1.1 壓電材料之變形與施加電壓關係[1]。	1
圖 1.2 積層式壓電致動器構造圖[1]。	2
圖 1.3 壓電致動器的分類[1]。	5
圖 1.4 雙層壓電致動器[1]。	5
圖 1.5 (a)單軸與(b)雙軸壓電管式致動器[1]。	6
圖 1.6 (a)伸縮(b)剪力積層式壓電材料。(c)矩形(d)圓形(e)環形截面設計。(f)附預壓 彈簧之元件[1]。	6
圖 1.7 機械式壓電致動器點膠閥之(a)結構示意圖、(b)安裝實體圖、(c)點膠噴頭示 意圖、(d)積層式壓電元件驅動電壓示意圖[4]。	7
圖 1.8 Liao 等人設計之共振物鏡掃描器之(a)架構圖、(b)撓性機構尺寸圖[5]。	8
圖 1.9 共振物鏡掃描器撓性機構共振模態圖[5]。	9
圖 1.10(a)尺蠖式步進驅動器原理示意圖。(b)煙囪式載台尺蠖式步進驅動器工作圖。 (c)碟片式載台尺蠖式步進驅動器工作圖[6]。	10
圖 1.11(a)壓電元件推動摩擦塊、(b)壓電元件推動底板之摩擦力慣性移動平台原理 示意圖[6]。	11
圖 1.12 摩擦力慣性移動平台之壓電元件驅動波形[6]。	11
圖 1.13 撓性樞紐設計[7]。	12
圖 1.14 各式撓性樞紐設計之解析解結果比較圖(a)彎折勁度(b)旋轉軸位移度(c)最 大彎折角度(d)同彎折角度下，表面之張力分布[8]。	13
圖 1.15 撓性槓桿結構之應用實例 (a)位移放大機構之示意圖 (b)串聯式積層式壓 電致動器設計(c)並聯式積層式壓電致動器及井字解耦器設計[9]。	14
圖 1.16 各式撓性放大結構[10]。	15
圖 1.17 將菱形撓性放大機構等效為連桿。	16
圖 1.18 將菱形撓性放大機構等效為多連桿機構之 θ 角與行程放大倍率關係圖。 16	

圖 1.19(a)內縮式菱形壓電行程放大機構[11](b)外張式菱形壓電行程放大機構 (DSM 公司所開發之 FPA 系列菱形式放大機構致動器)。	17
圖 1.20 不同機構之行程放大倍率與斜面角度關係圖[10]。	18
圖 1.21(a)三維串聯式菱形放大機構[12]， (b)菱形放大機構[10]，(c)並聯樞紐之單 層橋狀放大結構[13]，(d)平板式樞紐之菱形放大結構[14]。	18
圖 1.22 Mikio 等人所設計之 XY 平台所使用之驅動單元[15]。	19
圖 1.23 Mikio 等人所設計之串聯菱形行程放大結構 XY 平台[15]。	20
圖 1.24 Ling 等人設計之複合式撓性壓電行程放大機構[16]。	21
圖 1.25 各式設計與本研究之(a)寬度-行程比較圖、(b)長寬乘積-行程比較圖、(c)體 積-行程比較圖。圖中之 r 分別為行程對寬度比值、行程對寬高乘積比值及行 程對體積比值。	23
圖 2.1 與本研究提出之巢狀撓性放大機構擁有相同外部尺寸之槓桿放大機構設計。	26
圖 2.2 翻轉槓桿後之設計。	27
圖 2.3 本研究提出之巢狀撓性放大機構(a)尺寸圖以及(b)安裝立體圖。	28
圖 2.4 巢狀式撓性放大結構有限元素分析位移圖(a)不考慮積層式壓電元件剛性(b) 考慮積層式壓電元件剛性。	29
圖 2.5 巢狀式撓性放大結構有限元素分析，應力分布圖。	29
圖 2.6 壓電元件之伸長行程與彈性負載之關係[附錄 C]。	30
圖 2.7 巢狀撓性放大機構之第一到第四共振頻率與對應模態。	32
圖 3.1 致動器量測系統之系統架構圖。	33
圖 3.2 系統機構設計圖(a)無安裝紅光讀取頭、(b)有安裝紅光讀取頭。	34
圖 3.3 無安裝間隙片之撓性結構位移量及驅動電壓。	35
圖 3.4 開始安裝前測量菱形結構之間隙尺寸。	36
圖 3.5 以虎鉗對槓桿臂施壓，使菱形結構之間隙被撐開，隨時測量間隙尺寸變化， 確保變形量不超出設計值。	36

圖 3.6 撐開菱形結構之間隙後，安裝壓電元件及間隙片。	37
圖 3.7 巢狀撓性壓電行程放大機構(a)治具安裝圖(b)治具示意圖。	37
圖 3.8 以光固化膠固定壓電元件的位置後，即可拆除治具。	38
圖 3.9 電阻與材料尺寸的關係示意圖。	39
圖 3.10 一維應變規示意圖。	39
圖 3.11 惠斯通電橋。	40
圖 3.12 懸臂樑式荷重元。	41
圖 3.13 本研究使用之荷重元。	41
圖 3.14 荷重元穩壓電路拓圖結構圖。	42
圖 3.15 可調穩壓電路之基本結構圖。	43
圖 3.16 荷重元穩壓電路外觀。	44
圖 3.17 SR560 前置放大器。	45
圖 3.18 荷重元校正裝置示意圖。	46
圖 3.19 荷重元校正裝置。	46
圖 3.20 M1 級標準砝碼。	47
圖 3.21 (a)像散式光學輪廓儀原理圖。(b)聚焦誤差訊號對位移曲線圖[22]。	48
圖 3.22 像散式透鏡光斑形狀與透鏡距離示意圖[23]。	49
圖 3.23 商用紅光 DVD 讀取頭。	50
圖 3.24 商用紅光 DVD 讀取頭訊號放大電路。	50
圖 3.25 雷射位移計原理示意圖。	51
圖 3.26 (a)雷射位移計(KEYENCE, LK-H052S) [附錄 D]與(b)雷射位移計控制器 (LK-G5001) [附錄 E]。	52
圖 3.27 myRio。	53
圖 3.28 SR830 鎖相放大器。	54
圖 3.29 壓電高壓驅動器。	55
圖 4.1 荷重元校正圖。	57



圖 4.2 紅光讀取頭 S-curve。	59
圖 4.3 積層式壓電元件無負載之位移量，藍色實線為伸長時的位移曲線，橘色虛線為縮短時的位移曲線。	60
圖 4.4 軸向與各測量點代號定義。	61
圖 4.5 巢狀撓性放大機構行程與放大倍率實驗架構圖。	62
圖 4.6 撓性放大機構行程與放大倍率量測點與測量方向示意圖。	62
圖 4.7 測量點(A, Y)、(E, Y)與(F, Y)實驗架構設計圖。	63
圖 4.8 測量點(D, X)實驗架構設計圖。	64
圖 4.9 測量點(A, Y)位移圖，藍色實線為 0 V 到 150 V 之伸長位移，橘色虛線為 150 V 到 0 V 之縮短位移。	65
圖 4.10 壓電元件(a)測量點 (E, Y)位移量、(b) 測量點(F, Y)位移量、(c) (E, Y)- (F, Y)位移圖，其中藍色實線為 0 V 到 150 V 之伸長位移，橘色虛線為 150 V 到 0 V 之縮短位移。	66
圖 4.11(a)測量點(A, Y)位移量與(b)槓桿末端測量點(D, X)位移量。	67
圖 4.12 巢狀撓性放大機構推力實驗架構圖。	68
圖 4.13 推力實驗機構設計圖。	69
圖 4.14 雷射位移計光斑位置。	69
圖 4.15 巢狀撓性放大機構(a)推力(b)推動荷重元位移(c)空負載位移(d)剛性圖。	71
圖 4.16 巢狀撓性放大機構模態實驗架構圖，使用雷射位移計。	72
圖 4.17 雷射位移計振幅測量點與測量方向示意圖。	73
圖 4.18 共振模態掃頻實驗，測量點(A, Y)實驗架構設計圖。	74
圖 4.19 測量點(C, X)、(D, X)實驗架構設計圖。	75
圖 4.20 巢狀撓性放大機構模態實驗架構圖，使用紅光讀取頭。	76
圖 4.21 紅光讀取頭振幅測量點與測量方向示意圖。	76
圖 4.22 共振模態掃頻實驗，使用紅光讀取頭實驗架構設計圖。	77
圖 4.23 輸出端(A, Y)頻率響應圖。	78

圖 4.24 第二階槓桿測量點(D, X)頻率響應圖。.....	79
圖 4.25 輸出端測量點(D, X)頻率響應圖。.....	80
圖 4.26 輸出端測量點(B, Z)頻率響應圖。.....	81
圖 4.27 壓電柱輸入端測量點(E, Z)頻率響應圖。.....	82

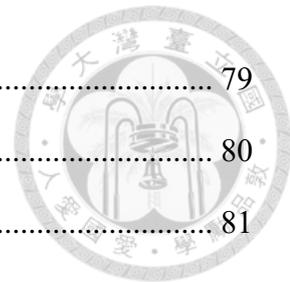


表 次



表 1.1 各式撓性放大機構比較表。	22
表 2.1 有限元素模擬參數表。	28
表 3.1 校正用砝碼規格表。	46
表 4.1 SR560 前置放大器使用參數表。	57





第一章 緒論

1.1 研究背景

壓電元件是一種能夠根據壓電效應工作的材料，它們可以根據正壓電或逆壓電效應的不同，分別作為感測器或致動器使用。當作為致動器使用時，壓電元件能夠通過施加電壓而產生形變，從而實現位移的功能。這種元件因其體積小、精密度高、反應速度快以及高輸出力量對尺寸比的特點，在精密量測和定位控制等領域有著廣泛應用。常見的壓電材料包括石英 (Quartz)、電氣石 (Tourmaline) 和鋯鈦酸鉛 (PZT)。其中，PZT 因其優異的壓電特性而被廣泛使用。如圖 1.1 所示，基於施加電壓與產生形變之間的軸向關係，壓電元件可以被分類為縱向型(Longitudinal)、橫向型(Transverse)、平行剪力型(Parallel Shear)和彎曲型(Bending)。這些不同類型的壓電元件滿足了各種精密控制和量測的需求，其多樣性和靈活性使它們在現代科技和工程領域中扮演著關鍵角色。

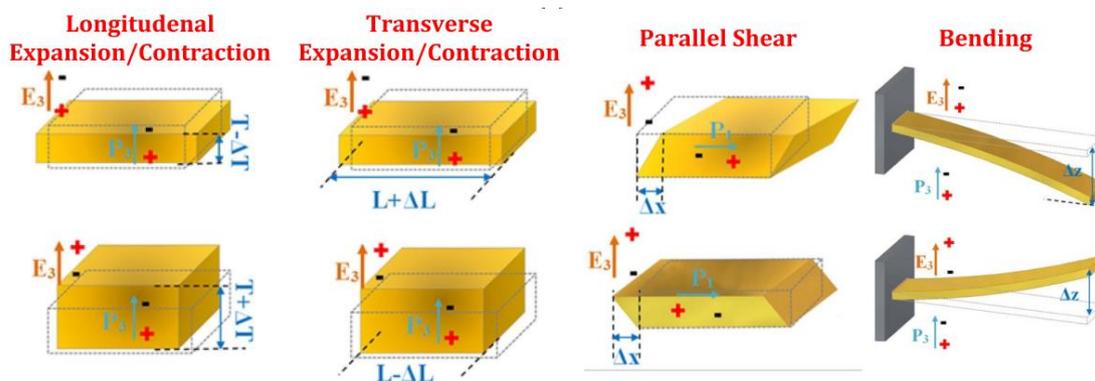
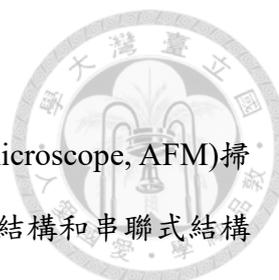


圖 1.1 壓電材料之變形與施加電壓關係[1]。

積層式壓電致動器是通過堆疊多層壓電材料製成的，這種設計使其能產生更大的位移行程。這些元件可以使用不同類型的壓電材料，如縱向型或平行剪力型，從而實現不同的運動模式，如圖 1.2。為了適應不同的應用需求，積層式壓電致動器經常與撓性結構結合使用，通過調整撓性結構的剛性來改變致動器的頻寬速度，



這種設計特別適合於高速運動的應用。

在實際應用中，例如作為高速原子力顯微鏡(Atomic force microscope, AFM)掃描器，積層式壓電致動器可以根據結構設計不同，被分為平行式結構和串聯式結構兩種形式。平行式結構能夠在 XY 軸上提供相同的位移行程特性，適合於特殊的掃描軌跡，例如螺旋掃描，但可能會遇到 XY 軸相互干擾的問題。而串聯式結構則是通過快軸(X 軸)帶動樣品，慢軸(Y 軸)同時帶動快軸進行掃描，這種設計由於快軸的重量輕、剛性高，能夠實現更高的掃描速度，但會導致兩軸的位移和動態特性不同，因此需要分別校正。

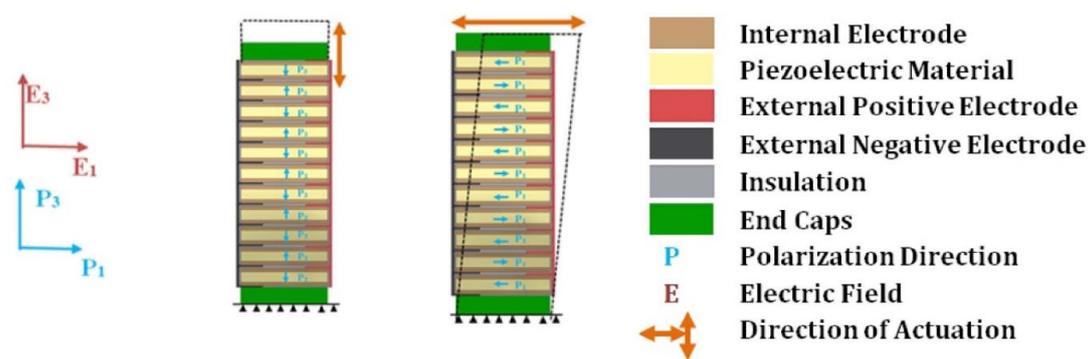


圖 1.2 積層式壓電致動器構造圖[1]。

雖然積層式壓電致動器可透過增加撓性結構之剛性來增加其響應頻率，然而其所受預壓力與位移量成反比之趨勢。雖然可以透過施加更大之電壓增加壓電材料的出力與行程，然而一般積層式壓電元件可接受之最大驅動電壓大約在 150V 左右。為了符合較大位移之應用需求，亦可透過選用更長、更高層數的積層式壓電元件來增加行程。然而，在許多位移行程要求達數百微米之應用中，即意味著需要使用數百毫米長之壓電塊，而這樣的尺寸顯然會造成致動器之尺寸變得過於龐大。為解決此一問題，放大機構式壓電致動器因應而生。

1.2 文獻回顧



1.2.1 壓電材料的原理

壓電材料是指在受到機械力時表面電荷密度會產生變化的物質，這種現象被稱為壓電效應。反之，當施加電場時會產生機械變形，稱為逆壓電效應。上述兩種現象主要源自分子的極性，分子在組成時會傾向使得分子的電荷總量達到平衡，但是由於電子軌域的不同排列方式，分子內的原子無法達到完全對稱，使得電子在分子內不均勻的分布，造成分子的極性。在單晶體中，所有偶極子(Dipole)的極軸都沿著同一個方向排列。在多晶體中，材料內部有不同極軸的晶粒。為了極化多晶體，會將多晶體加熱並施以強電場讓材料內的偶極子重新排列並指向大致相同方向[2]。

1.2.2 壓電材料的歷史

1880 年 Pierre Curie 及 Jacques Curie 兄弟發現電氣石具有壓電效應，即施加特定方向的壓力或張力在電氣石晶體上會使電氣石晶體表面產生電荷，並且受壓後產生的電荷密度與壓力成正比。隨後兩兄弟驗證了逆壓電效應，藉由施加電壓在電氣石結晶上讓其產生機械變形[2]。1954 年 Bernard Jaffe 發現鋇鈦酸鉛(PZT)中形態相邊界(Morphotropic phase boundary, MPB)的重要性後，促成了 PZT 壓電陶瓷家族的快速發展，而 PZT 也成為現今主流的壓電材料之一[3]。

1.2.3 壓電致動器之類型

自從壓電材料發明以來，壓電致動器因其高度的靈活性、耐用性還有提供可靠的精密控制的能力，被廣泛應用在精密控制領域，壓電致動器又可根據設計結構以及驅動原理做進一步之分類，如圖 1.3。

傳統壓電致動器(Traditional actuator)的主要特徵是只會在限定範圍內產生單一動作，而根據結構可分為單層式(Unimorph)、雙層式(Bimorph)、壓電管式(Tube)、積層式(Multi-layer stack)、以及放大機構式(Amplified)等。

單層式壓電致動器由單層壓電材料配合上下電極層所構成，不但可作為感測

器使用，因為其體積小、結構簡單的特性，也常被應用在聲學產品如蜂鳴器或是耳機等。

雙層式壓電致動器與單層式類似，可以理解為兩組堆疊的單層式壓電致動器，如圖 1.4 所示，根據電極的排列方式，除了單純的收縮及伸長，雙層式壓電致動器也可以產生彎折的動作，如圖 1.4(b)。

壓電管式致動器可以理解為將雙層式壓電致動器的概念拓展到三維空間，同樣利用電極分割不同位置的壓電材料，使壓電管產生彎折的運動，如圖 1.5 所示，四組電極區域即可用於產生 XY 兩軸之位移運動，如圖 1.5 (b)。壓電管式致動器的主要缺點為其運動為一弧形，因此 XY 方向之運動會與 Z 方向產生耦合問題，產生在精密控制時無法忽略的誤差，因此使用上經常會配合掃描線背景處理(Scan line levelling)來進行影像處理。

積層式壓電材料係將多層的壓電材料及電極堆疊起來，因為其多層的特性，可以產生更大的位移量達到數十微米，同時產生數百到數千牛頓的力。積層式壓電材料亦可因不同的電極排列方式產生伸縮、剪力等不同運動方式，分別如圖 1.6(a)、(b)所示。因應不同應用場景，也有不同截面形狀之積層式壓電元件，如矩形、圓形、環形截面設計，分別如圖 1.6(c)、(d)、(e)所示。為了在高速驅動狀況下保護壓電元件，也有附預壓彈簧之積層式壓電元件，如圖 1.6(f)所示。

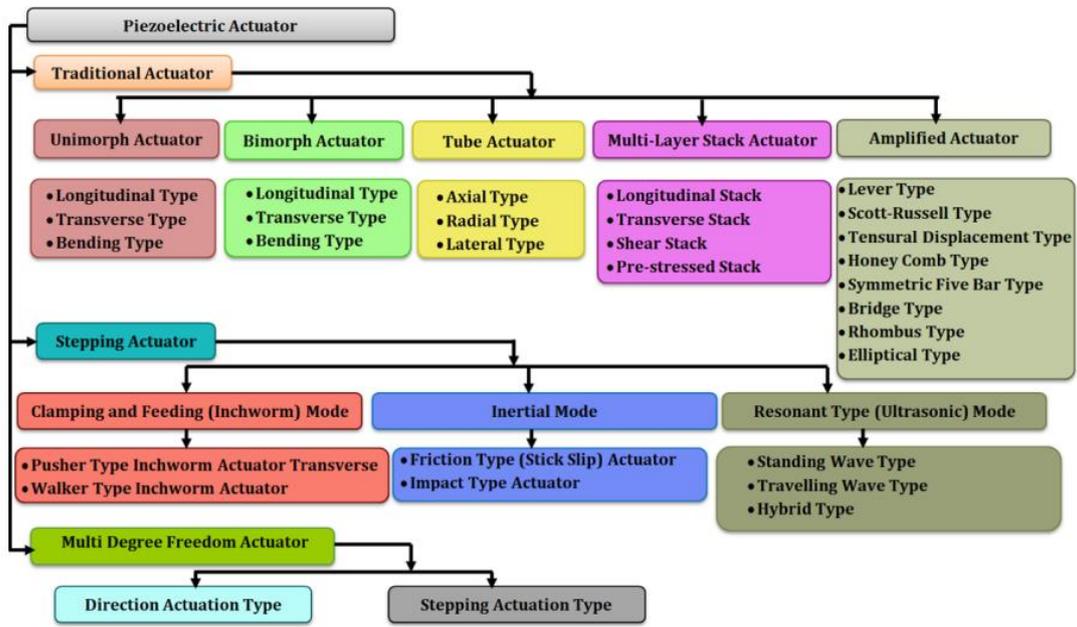


圖 1.3 壓電致動器的分類[1]。

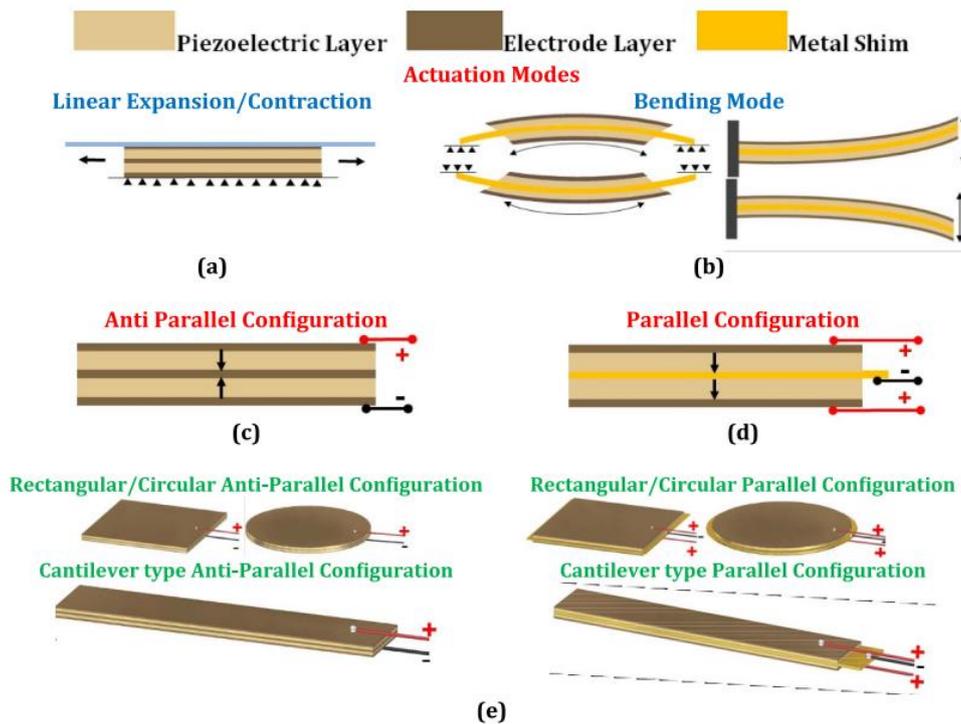


圖 1.4 雙層壓電致動器[1]。

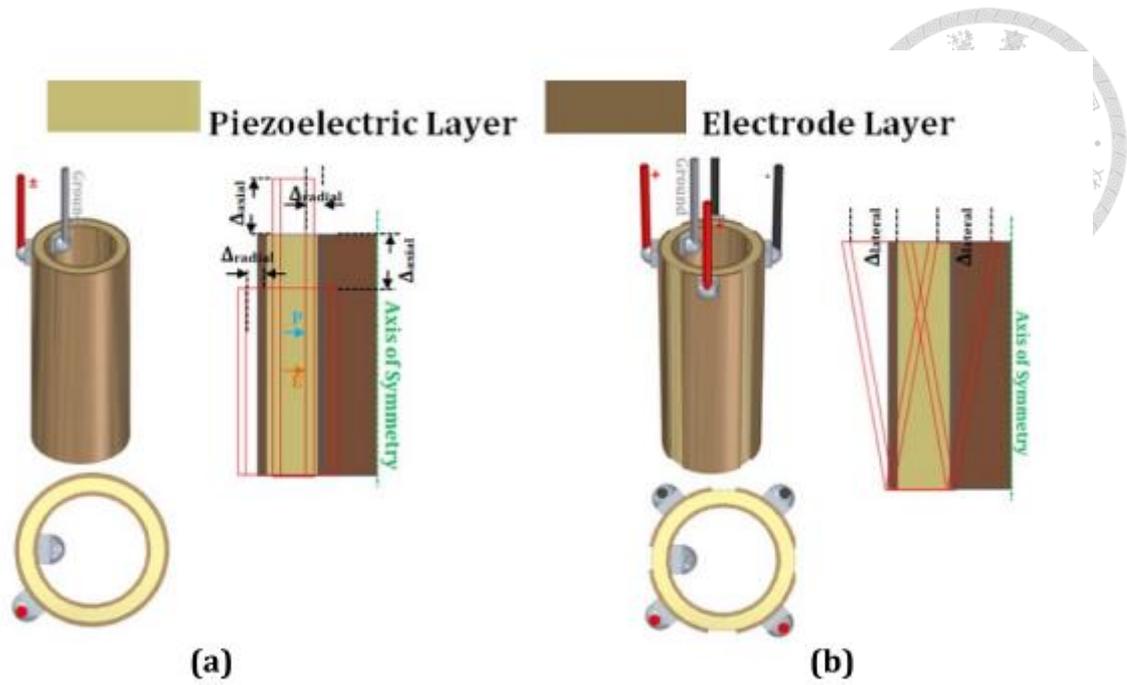


圖 1.5 (a)單軸與(b)雙軸壓電管式致動器[1]。

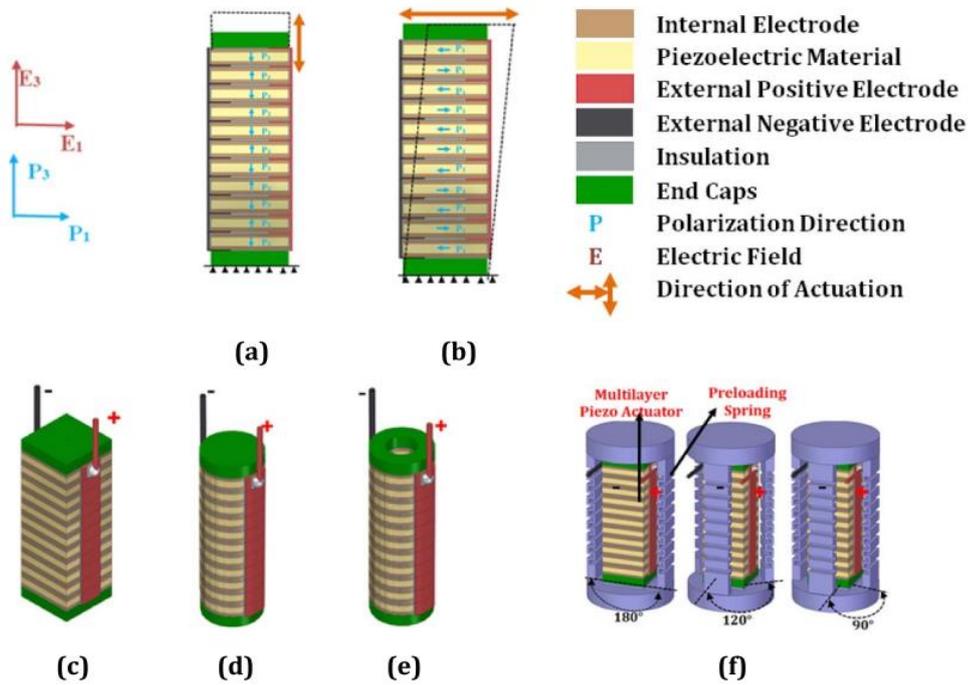


圖 1.6 (a)伸縮(b)剪力積層式壓電材料。(c)矩形(d)圓形(e)環形截面設計。(f)附預壓彈簧之元件

[1]。



1.2.4 機械式位移放大機構

機械式的壓電位移放大機構以槓桿式為主流，以圖 1.7 之壓電致動器點膠閥為例，使用高碳鋼滾柱作為槓桿(Lever)及積層式壓電元件(PZT stack)的運動樞紐(Lever pin)，由外殼提供整體的結構強度，另外需要預壓彈簧(Return spring)提供積層式壓電元件所需的預壓力，以防止產生內部張力。機械式壓電位移放大器的主要挑戰在於需要給予整個機構適當的約束條件，若拘束條件不足，有可能在長時間運作後導致零件產生移位，而拘束條件過多可能導致其中的積層式壓電材料內部產生應力，在運作時對壓電材料產生微小損傷，進一步導致壓電材料壽命縮短。機械式壓電位移放大器的優勢在於槓桿結構在設計時不須考慮變形，意即不須預留應力點，可以著重在優化強度與減輕重量，相比於撓性結構的壓電行程放大機構，容易達到更高的共振頻率。而另一方面，機械式槓桿壓電行程放大機構缺點也很明顯，即是在槓桿作動時槓桿與各施力點會相互摩擦，若未施予適當地潤滑保養，槓桿與其接觸面容易快速磨損。

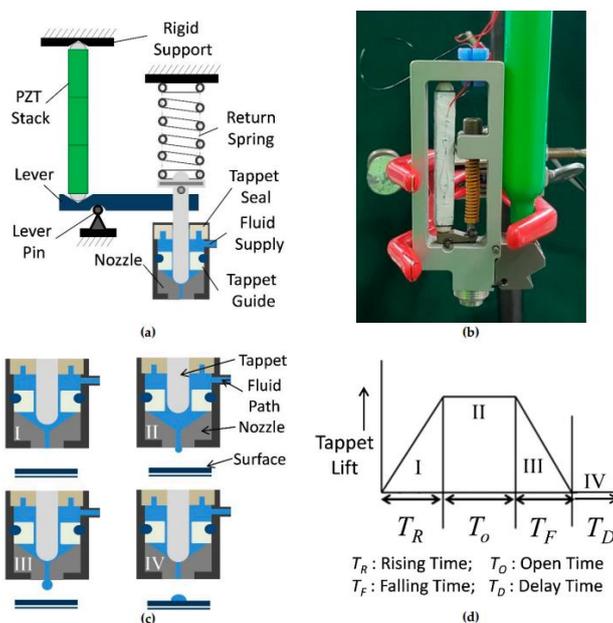


圖 1.7 機械式壓電致動器點膠閥之(a)結構示意圖、(b)安裝實體圖、(c)點膠噴頭示意圖、(d)積層式

壓電元件驅動電壓示意圖[4]。



1.2.5 共振式位移放大機構

機械式的壓電致動器通常需要避免在結構的共振頻率下運作，而工作頻率與工作行程的大小通常無法兩全，需要由經驗豐富的設計者進行取捨，通常會將第一共振頻率的三分之一設定為最高工作頻率。然而共振式壓電致動器則不同，共振式壓電致動器被應用在精密加工及原子力顯微鏡等領域，其優點在於較低的驅動電壓及更高的工作頻率，通常只需要數微米的激振振幅即可達到約 $100\ \mu\text{m}$ 的共振振幅，且將共振頻率作為工作頻率，相較於機械式的致動器，共振式壓電致動器可以在相同的工作距離達到更高的工作頻率。但共振式壓電驅動器的缺點也十分明顯，即是工作頻率無法調整，因此整個系統需要圍繞著激振式壓電驅動器設計。

Liao 等人開發壓電共振式撓性機構作為光學輪廓儀物鏡掃描器，如圖 1.8 所示，該機構使用振幅 $9.1\pm 1.5\ \mu\text{m}$ 、驅動電壓達 $150\ \text{V}$ 之積層式壓電元件(Piezoelectric actuator)，在圖 1.9(a)中之第一共振頻率 $1.94\ \text{kHz}$ 可達 $87\ \mu\text{m}$ 之行程。該機構使用一對壓電元件，利用平板式撓性結構提供側向穩定性，再連接到共振結構。共振結構使用兩對平板式將 DVD 讀取頭之物鏡固定在中間，提供 Z 軸方向的高速掃描位移，成功將掃描時間縮短為原系統之 50 分之一[5]。

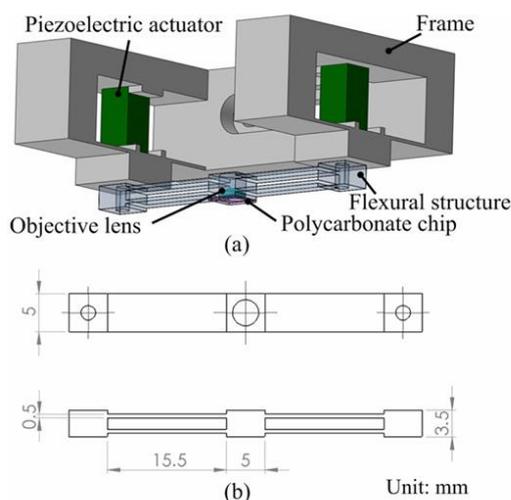


圖 1.8 Liao 等人設計之共振物鏡掃描器之(a)架構圖、(b)撓性機構尺寸圖[5]。

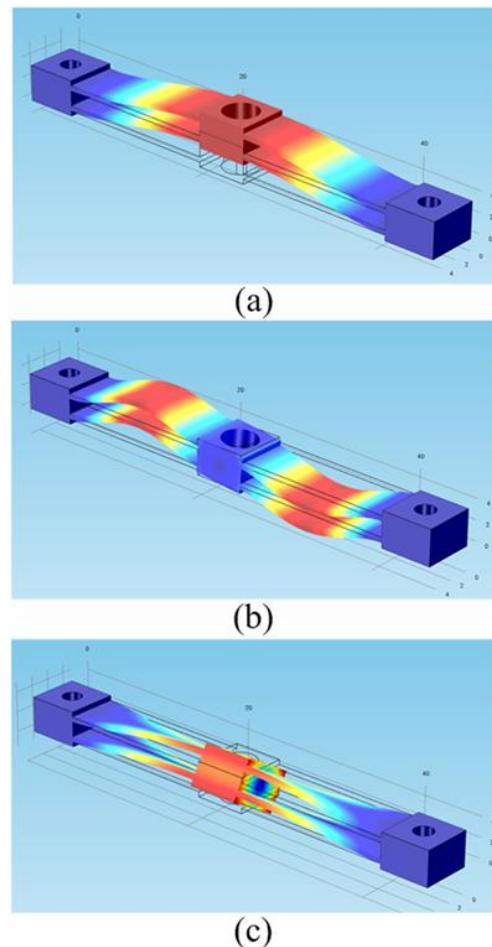


圖 1.9 共振物鏡掃描器撓性機構共振模態圖[5]。

1.2.6 步進式壓電致動器

不同於行程放大致動器，步進式壓電致動器不採用放大壓電元件行程的方式，而是將壓電元件的行程累積起來，這樣的作法理論上可以達到無限大的移動行程。尺蠖式步進壓電致動器的基本原理與尺蠖蟲相似，每個移動單元內有三個壓電元件，其中兩個用於固定驅動，稱為夾持單元(Clamping unit)，一個用於移動，稱為驅動單元(Driving unit)，如圖 1.10。首先，其中一個夾持單元伸長壓緊驅動元件與驅動面，利用摩擦力將整個驅動元件固定，接著中間的驅動單元伸長，將另一夾持單元前推，隨即第二個夾持單元伸長，隨後將第一個夾持單元縮短，釋放與驅動面的固定，最後驅動單元放電縮短，將第一個夾持單元向前拉一步，循環以上步驟即



可以步進的方式向前移動，如圖 1.10 (b)(1)-(6)所示。

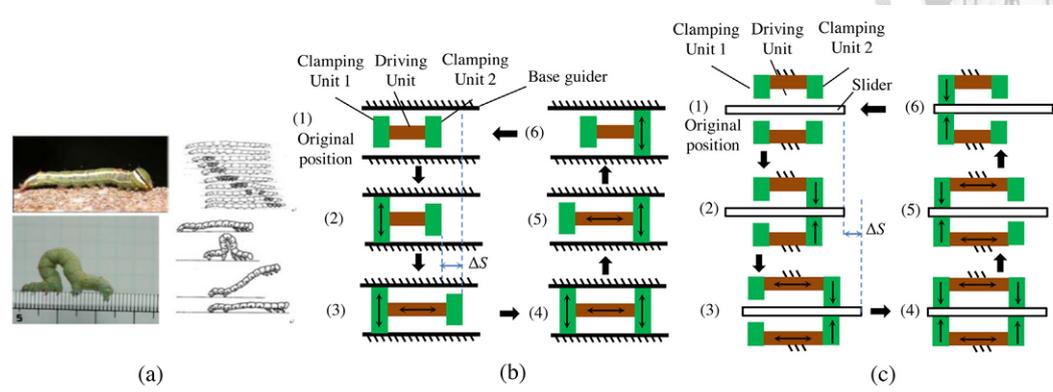


圖 1.10(a)尺蠖式步進驅動器原理示意圖。(b)煙囪式載台尺蠖式步進驅動器工作圖。(c)碟片式載台尺蠖式步進驅動器工作圖[6]。

尺蠖式步進壓電驅動器相較於行程放大式驅動器有更大的精度優勢，因為壓電元件的行程未經放大，因此每步約在數個微米以內，最小解析度則根據不同驅動器之驅動精度，約在數十奈米左右。尺蠖式步進壓電驅動器因為每一步都需要多個壓電元件之配合，因此會使得控制系統更加複雜，另外因為每步都需對移動平台施加壓力並依靠摩擦力固定，使得摩擦力成為影響步進式壓電驅動器的一個重要變數，若滑台表面粗糙度不均勻，會使得載台前進速度不均，也更容易受到驅動載台上質量變化的影響。

為了減少步進式壓電致動器所需的驅動器數量，亦有研究提出摩擦力慣性式步進式壓電驅動器。如圖 1.11 所示，摩擦力慣性式壓電驅動器主要由一摩擦塊(Main block)、移動平台(Inertial block)與壓電元件(Piezoelectric element)所組成。首先使壓電元件慢速伸長，因為沒有突破靜摩擦力，移動平台與摩擦塊一同被推動，隨後壓電元件快速縮短，突破摩擦塊與移動平台之間的靜摩擦力，縮回摩擦塊，將位平台留在原位，完成一步，依序如圖 1.11 (a)(1)-(3)，使得載台能被摩擦塊拖動，壓電元件之驅動電壓則依序如圖 1.12 (a)-(c)，呈一鋸齒狀波形。而圖 1.11 (b)則展示了不同的設計，讓壓電元件推動包含摩擦塊(Friction block)與滑軌的底板，壓電元件



慢速伸長後，再快速縮短將滑軌與摩擦塊快速縮回，而載台(Slider)因為慣性留在原地，完成移動一步，如圖 1.11 (b)(1)-(3)。

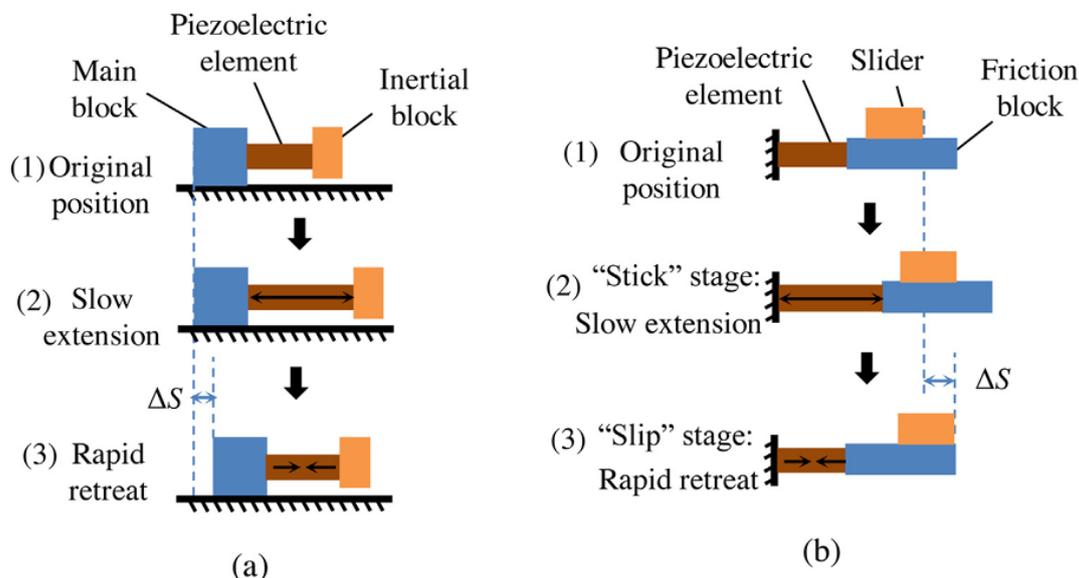


圖 1.11(a)壓電元件推動摩擦塊、(b)壓電元件推動底板之摩擦力慣性移動平台原理示意圖[6]。

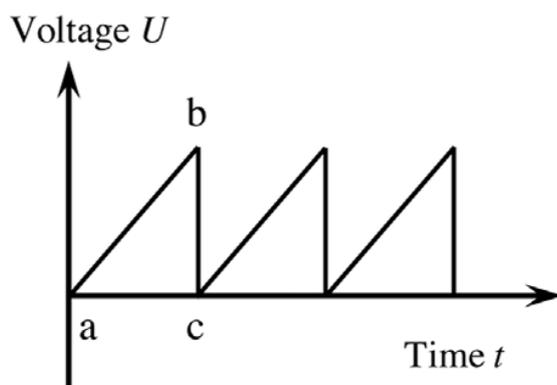


圖 1.12 摩擦力慣性移動平台之壓電元件驅動波形[6]。

1.2.7 撓性結構之關節設計

撓性結構樞紐是一種藉由在材料上特意留下應力點，以造成預期變形的結構，常用來取代機械式關節，相較於機械式關節，撓性結構樞紐有很多優點，例如無摩擦、無背隙、不須潤滑、抗髒汙及更長的壽命，另外，因為不需要其他零件，如轉

軸、軸承等，撓性結構樞紐可以大幅度縮小可動機構的大小。不過，相對於以上的優點，其缺點也很明顯，撓性結構樞紐較不適合做需要大活動度的關節。綜合以上的優缺點，撓性結構樞紐常被應用在小尺度、高精度的機械結構，例如操作細胞、光纖校準及微米或奈米級 XY 平台。

根據不同的應用場景，撓性樞紐衍生出很多不同的形態，例如半圓式、橢圓式、平板式、V 型式及多項式曲線式等等，分別如圖 1.13 (a)、(b)、(c)、(f)、(g) 所示。而圖 1.14 (a)-(d) 則展示了不同撓性樞紐的機械特性，依序為彎折勁度、旋轉軸位移度、相同材料應變下最大彎折角度、表面之張力分布，圖中四條曲線依序為半圓式 (Circular)、經圓角處理後的平板式 (Corner-filleted)、橢圓式 (Elliptical) 及四階曲線式 (Power function 4th ord.)。平板式有最低的彎折勁度及表面張力，同時可以達到的彎折角度是四者中最大的，不過平板式也有四者中最大的旋轉軸偏移量，即彎折後結構之等效旋轉軸會依不同彎折角度偏移，因此平板式結構常被用在支撐式結構而非旋轉結構，例如圖 1.15 (c) 中 XY 平台，利用細長的平板式結構將 XY 軸解耦，也起到類似滑軌的作用。半圓式可以提供很高的旋轉精度，不過表面應力及彎折勁度是四者中最大的。橢圓式及四階曲線式的機械特性則位於以上兩者之間。

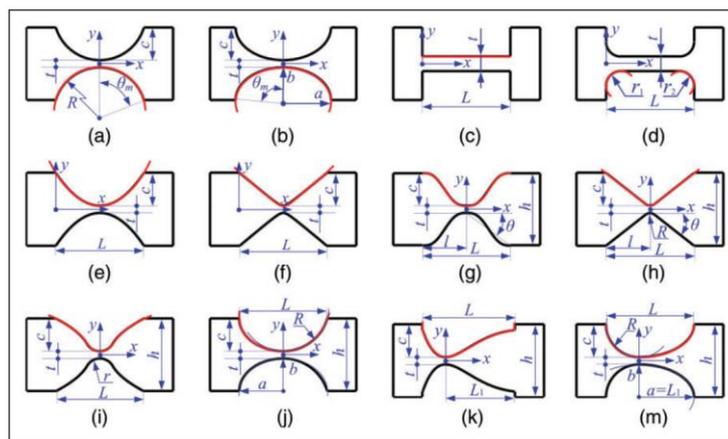


圖 1.13 撓性樞紐設計[7]。

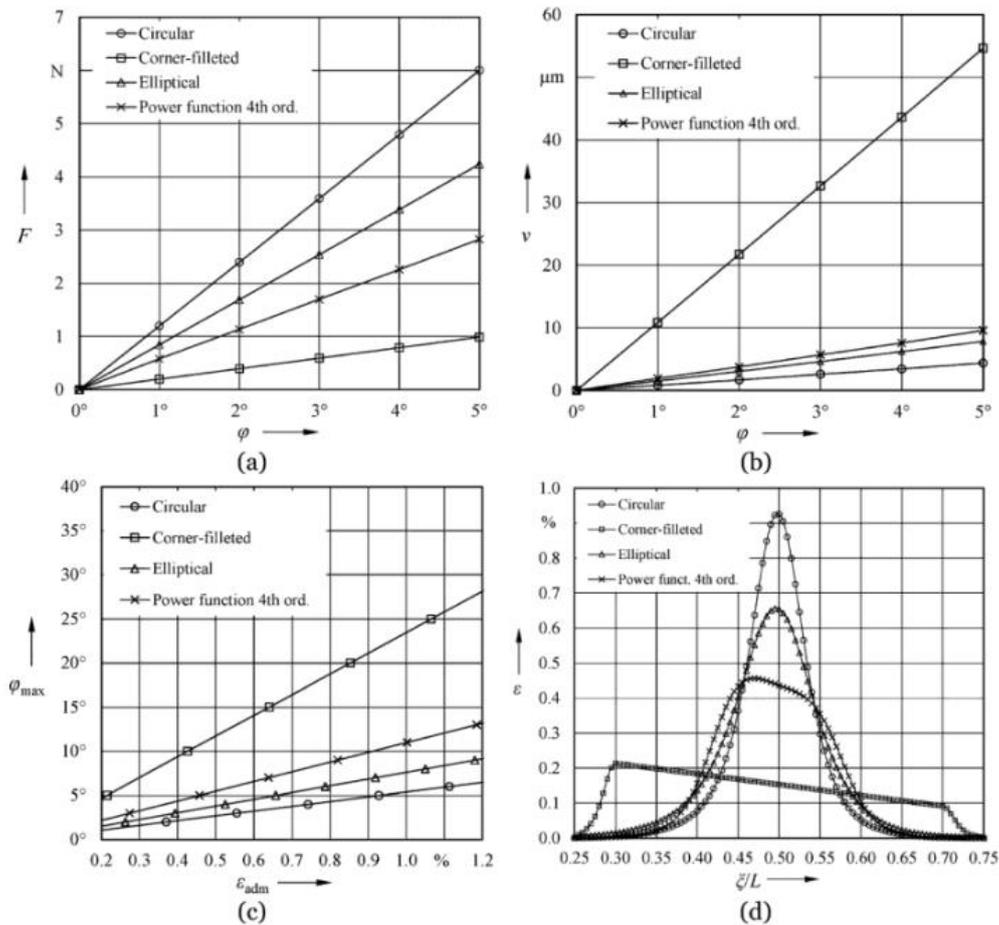
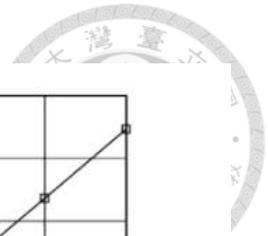


圖 1.14 各式撓性樞紐設計之解析解結果比較圖(a)彎折勁度(b)旋轉軸位移度(c)最大彎折角度(d)同

彎折角度下，表面之張力分布[8]。

1.2.8 槓桿式撓性放大結構

這種簡單的機械結構便被廣泛的應用於需要傳遞力量的裝置中，槓桿放大原理可由圖 1.15 (a)說明之，圖中黃色部分代表積層式壓電元件(Piezoactuator)，其向上產生位移 δ 並透過一撓性結構(Flexure)推動一槓桿放大結構(Amplifier)。槓桿以左側另一撓性結構作為支點，最右端之放大位移輸出為 $a\delta$ 。放大倍率 a 即為右側端點至支點距離與壓電元件與支點之長度比值，因此放大倍率可透過修改力臂長度進行調整。圖 1.15 (a)中積層式壓電元件上方之撓性樞紐可以吸收槓桿結構旋轉時在輸入端產生的非軸向位移，非軸向位移會在積層式壓電元件中產生剪力，而剪

力及張力會對積層式壓電元件產生破壞，因此此一設計可以保護積層式壓電元件，延長其使用壽命。

槓桿式撓性放大機構因為設計直觀，因此常被用於壓電放大機構，圖 1.15 (b) 是一串聯式撓性槓桿壓電 XY 位移平台，因為撓性槓桿之輸出端位移可以視為對支點做旋轉，為了降低各軸之非線性度，會在各軸搭配由平板式撓性樞紐組成之解耦器(Decoupler)，圖 1.15 (b)中之位移平台將 XY 軸分別解耦並串聯，而圖 1.15 (c) 中則使用井字型的解耦器，以達到兩軸並聯且解耦的目的。

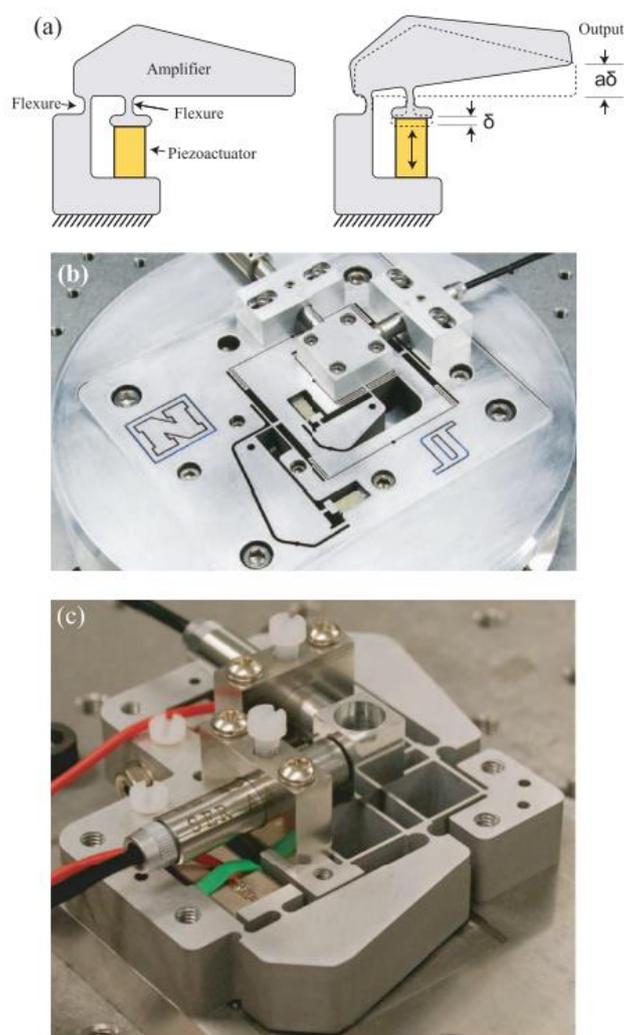


圖 1.15 撓性槓桿結構之應用實例 (a)位移放大機構之示意圖 (b)串聯式積層式壓電致動器設計(c)

並聯式積層式壓電致動器及井字解耦器設計[9]。



1.2.9 菱形式撓性放大結構

圖 1.16 展示了菱形式撓性放大機構的各種變形，Rhombus-type 是一個典型的菱形式放大結構，其積層式壓電元件採橫向放置，當其在水平方向伸長時，會帶動上下方結構往壓電元件方向內縮。菱形式放大機構的放大倍率與其結構中的斜面角度有高度相關，若依據撓性樞紐之位置，將菱形式放大機構等效為多連桿機構，如圖 1.17，式(1.1)、式(1.2)表示了斜面的寬與高對於角度的微分式，使用連鎖律消除式中 $d\theta$ ，可以得到式(1.3)，表示了在不同 θ 角度，菱形結構的位移放大量，將放大量及斜面角度作圖後如圖 1.18，當斜面角度 θ 愈小，則放大倍率愈大。

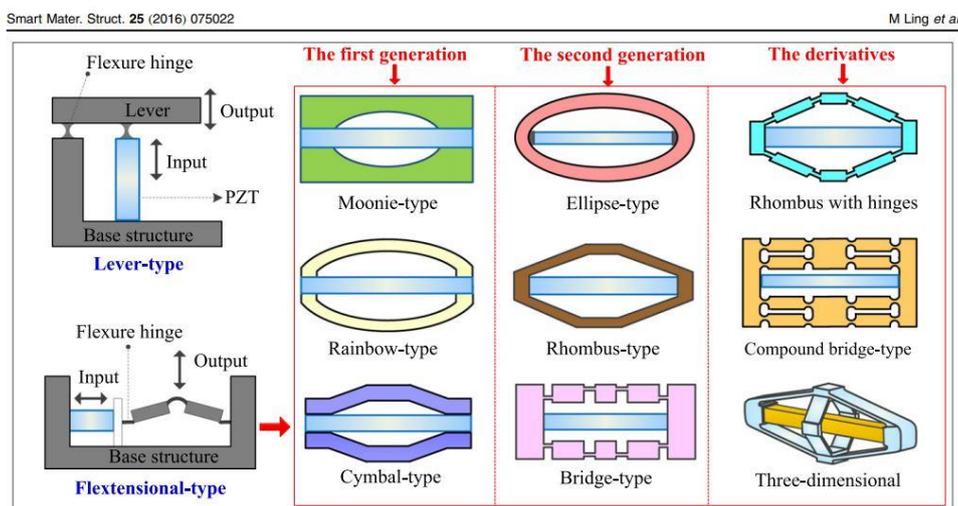


Figure 1. Topology of several types of compliant mechanisms.

圖 1.16 各式撓性放大結構[10]。

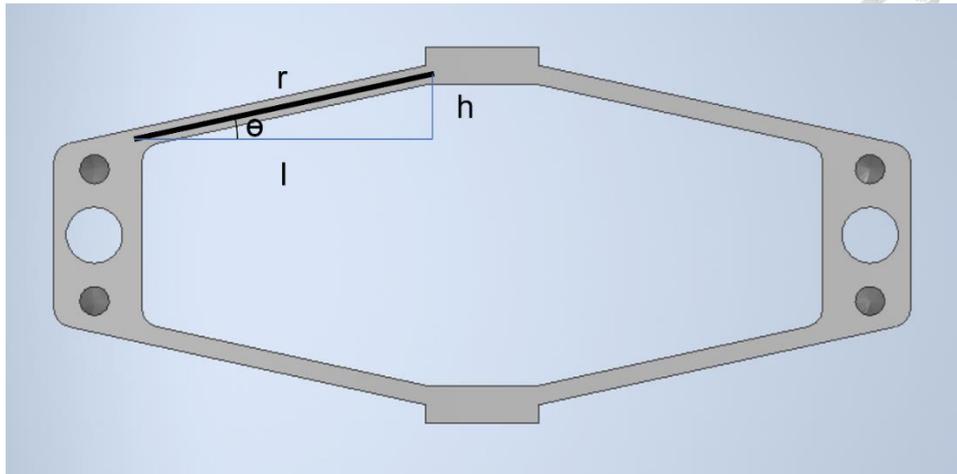


圖 1.17 將菱形撓性放大機構等效為連桿。

$$\frac{dh}{d\theta} = -r \sin \theta \quad \text{式(1.1)}$$

$$\frac{dl}{d\theta} = r \cos \theta \quad \text{式(1.2)}$$

$$\frac{dh}{dl} = -\cot \theta \quad \text{式(1.3)}$$

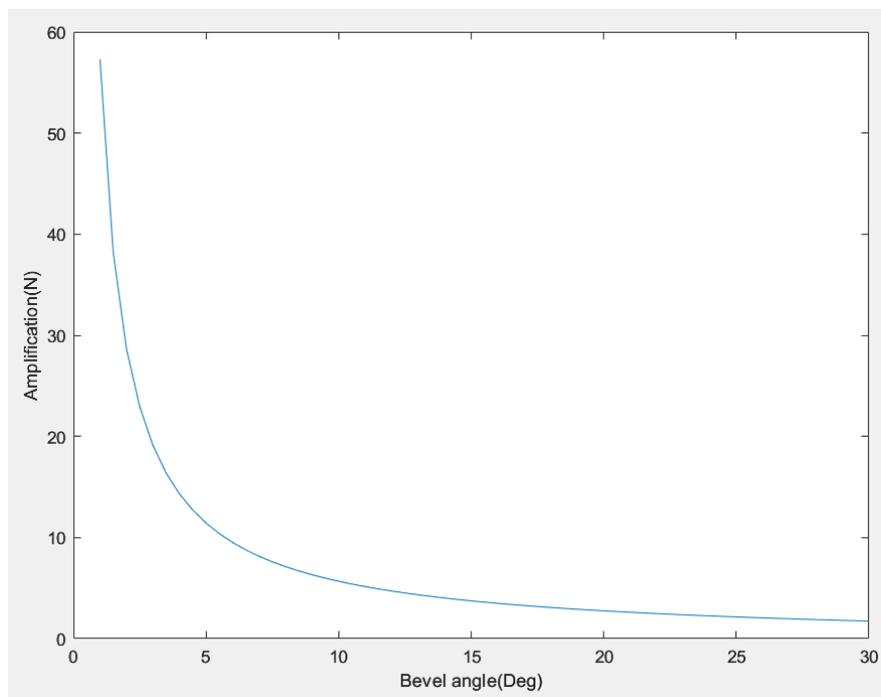


圖 1.18 將菱形撓性放大機構等效為多連桿機構之 θ 角與行程放大倍率關係圖。

另外，根據不同的應用需求，菱形式撓性放大機構可分為內縮式及外張式，主要差別在於施予積層式壓電元件電壓時輸出端之運動方向，圖 1.19 (a)為一典型的內縮式菱形壓電行程放大器，當中間的積層式壓電元件伸長時，上下兩端的輸出端向內縮。而圖 1.19 (b)中的菱形放大機構改變了撓性樞紐的位置，因此等同於改變了菱形放大機構之等效連桿方向，當中間的積層式壓電元件伸長時，上下兩端的輸出端向外展。

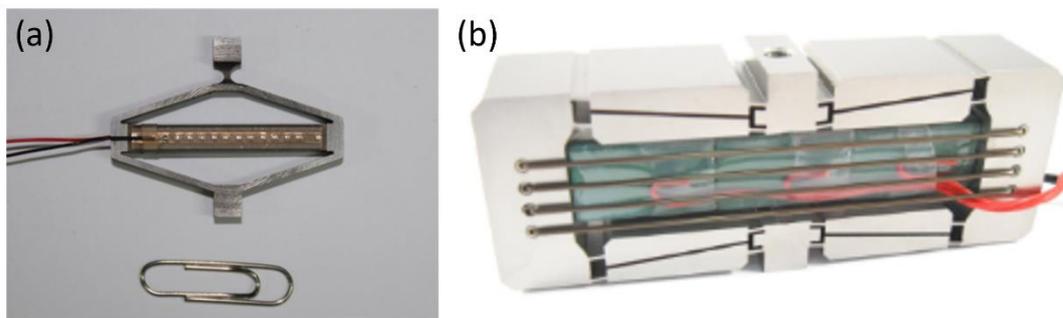


圖 1.19(a)內縮式菱形壓電行程放大機構[11](b)外張式菱形壓電行程放大機構(DSM 公司所開發之 FPA 系列菱形式放大機構致動器)。

然而實務上極少有斜面角度 θ 少於 2.5 度之設計，因為在過小的斜面角度下，菱形式撓性機構相對於積層式壓電元件的結構剛性大幅提高，使得積層式壓電元件大部分出力被用於造成放大機構的形變，造成菱形放大結構無法無限增加放大倍率，如所圖 1.20 示，圖中橫軸為斜面角度，縱軸為斜面放大倍率，其中黑色實線為解析解，藍色十字線為菱形放大結構(Rhombic model)，結構如圖 1.21(b)所示，綠色方形線為三維式串聯菱形放大結構，結構如圖 1.21(a)所示，棕色倒三角線為並聯樞紐之單層橋狀放大結構，結構如圖 1.21(c)所示，紅色菱形線為採用平板式樞紐之菱形放大結構，結構如圖 1.21(d)所示。各個放大機構雖然在放大倍率之效能有所差異，但是皆在斜面角度約為 2 度時達到最大之放大倍率，無法如解析解無限增加，因此設計者需要依據所需之剛性及放大倍率採用不同之斜面角度及樞紐設計。

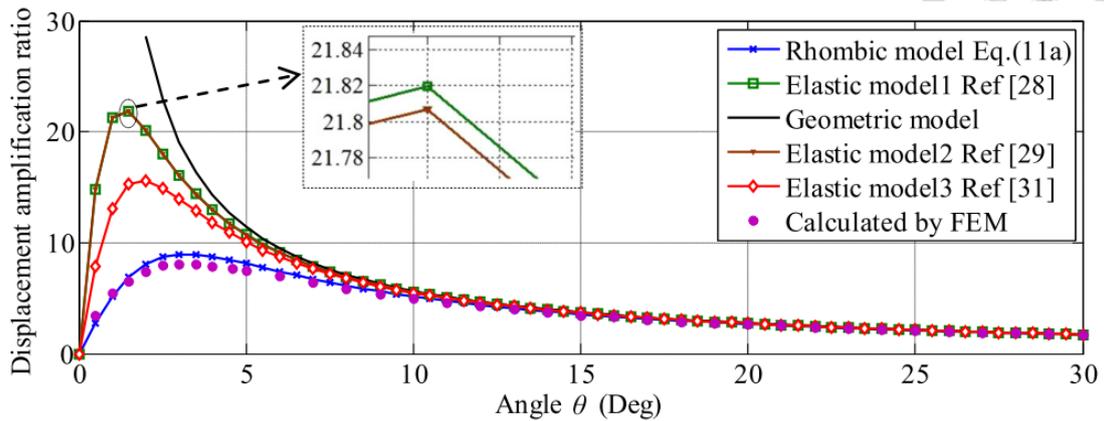


圖 1.20 不同機構之行程放大倍率與斜面角度關係圖[10]。

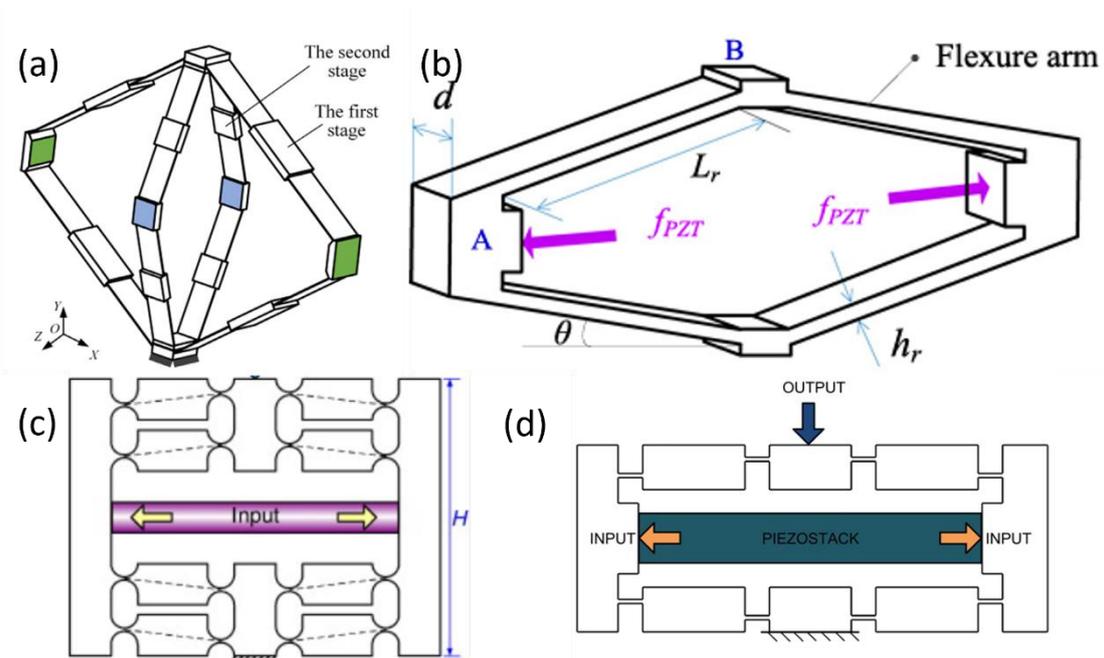


圖 1.21(a)三維串聯式菱形放大機構[12]，(b)菱形放大機構[10]，(c)並聯樞紐之單層橋狀放大結構[13]，(d)平板式樞紐之菱形放大結構[14]。

菱形形式放大結構的優勢在於結構緊緻，零件數量少，相較於槓桿式放大結構擁有更強的剛性，較高的剛性意味著更強的推力以及更高的共振頻率。但須注意的是，積層式壓電元件之輸入與放大機構之輸出方向呈垂直，因此整體結構會呈現寬扁形架構。另外菱形形式放大結構因為形狀方正，因此可以串聯的方式得到更大的總行程，圖 1.22 為 Mikio 等人所設計之菱形放大機構單元，每個單元使用兩根積層式

壓電元件，行程為 $410\ \mu\text{m}$ ，彈性常數為 $0.05\ \text{N}/\mu\text{m}$ ，共振頻率為 $355\ \text{Hz}$ 。圖 1.23 為 Mikio 等人以該驅動單元為基礎設計之 XY 平台，每軸串聯三個菱形放大機構，串聯後兩軸行程提高至約 $1000\ \mu\text{m}$ ，因為該設計沒有解耦器，造成兩軸互相干擾，因此行程並非驅動單元的三倍 $1230\ \mu\text{m}$ 。然而串聯多個放大機構會造成兩個問題，一是需要多個積層式壓電元件，意味著需要更大的驅動電流及更高效能的驅動器，進一步提高成本，同時，無法避免多支壓電元件因製造公差而有不同的伸長性能。二是大幅降低結構剛性，串聯多個致動器如同串聯彈簧，會大幅降低結構之彈性常數及共振頻率。

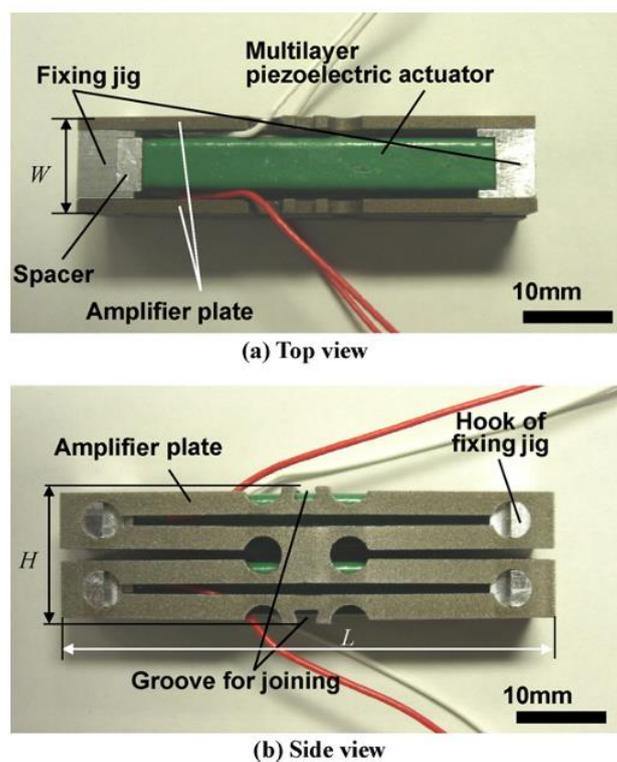


圖 1.22 Mikio 等人所設計的 XY 平台所使用之驅動單元[15]。

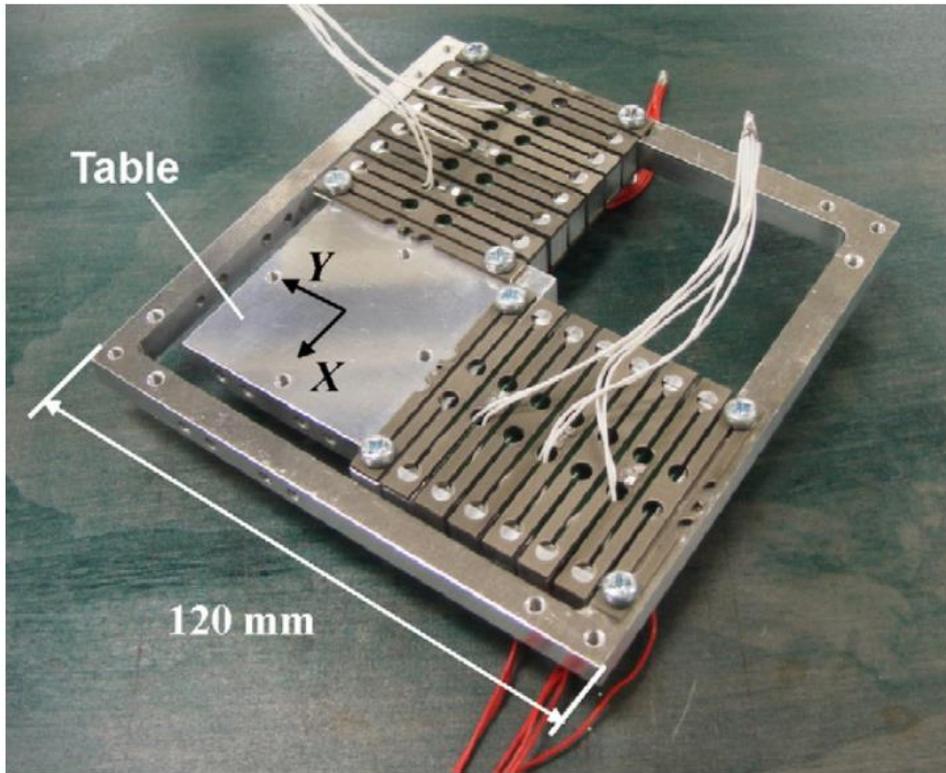


圖 1.23 Mikio 等人所設計之串聯菱形行程放大結構 XY 平台[15]。

1.2.10 複合式撓性放大結構

因應高速之壓電致動器之需求，Ling 等人設計了結合多種放大結構的複合式放大機構，如圖 1.24。該結構利用一對對稱之槓桿放大結構(Leveraged mechanism)，放大積層式壓電元件(Piezo-stacks)外張之行程，以槓桿撐開半菱形放大結構(Semi bridge-type mechanism)，將位移之輸出方向旋轉 90 度，同時使得輸出端內縮，該結構在結合了兩種放大結構後達到了 6 倍的放大倍率，總行程 61 μm 。該機構在壓電元件之輸入端有平板式撓性結構(Guiding flexure beam)，起到導引壓電元件均勻受力的作用，兩側槓桿因為轉動角度較小，採用 V 型凹槽之撓性樞紐(V-type flexure hinge)以達到最高旋轉精度。該機構只使用一個積層式壓電元件進行驅動，大幅降低了驅動之複雜度。

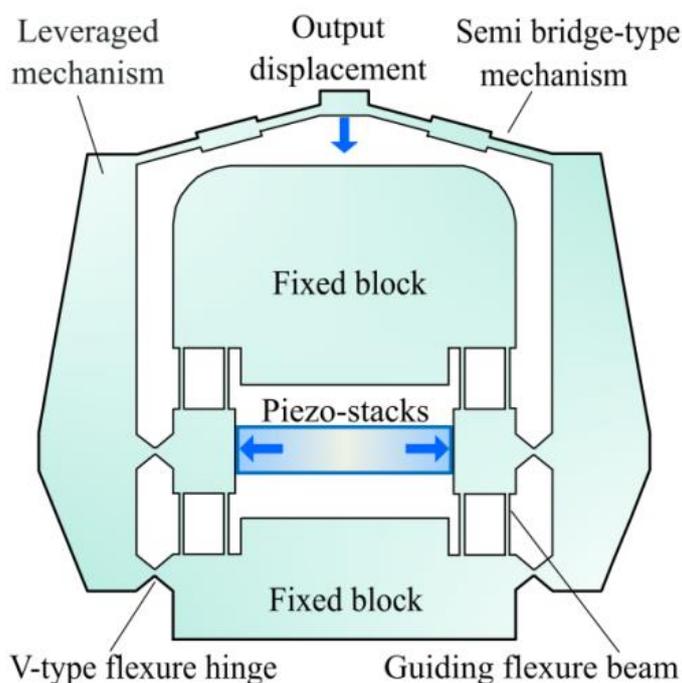


圖 1.24 Ling 等人設計之複合式撓性壓電行程放大機構[16]。

1.3 研究目的

不管是上文所提到之槓桿式抑或是菱形式放大機構，其槓桿或壓電元件皆需要垂直輸出方向放置，若需要較大的輸出位移量，不管是增加槓桿輸入端與輸出端之比值，或是採用伸長量更大的積層式壓電元件，都需要大幅增加與輸出方向垂直之寬度尺寸，然而，在工業界或是實驗環境內，樣本旁的空間有限。因此本研究旨在減少壓電致動器在作動方向的橫向寬度，使得致動器可以安裝在更狹窄的空間內，增加樣本旁安裝其他感測元件的空間。本文所提出之壓電放大機構以三層撓性放大結構放大積層式壓電元件之輸出行程，並且利用各種撓性結構之特性以達到空間利用最大化的效果，同時保證壓電元件在受力平均的狀態下工作，保護壓電元件並延長使用壽命。

表 1.1 展示了各研究所提出之複合式撓性壓電放大機構之設計、尺寸、行程、放大倍率、共振頻及剛性，可說撓性放大機構之設計過程即是對放大倍率、共振頻

率即剛性之取捨，而本研究所提出之撓性放大機構則著重在較小的寬度尺寸，即垂直輸出方向之尺寸，詳細定義如圖 4.4 軸向與各測量點代號定義。本研究之放大倍率及共振頻率之數值較平衡，輸出行程可達 285 μm ，具有優異的寬度對行程比值，圖 1.25(a)展示了表 1.1 中各研究之寬度尺寸對輸出行程之散佈圖， $r1$ 則為寬度與輸出行程之比值，本研究所提出之撓性機構之比值達到約 6.5 $\mu\text{m}/\text{mm}$ ，圖 1.25(b) 為寬度高度乘積對輸出行程之散佈圖， $r2$ 為面對樣本之面積與行程之比值，圖 1.25(c)則為機構之體積對輸出行程之散佈圖， $r3$ 為體積對輸出行程之比值。

表 1.1 各式撓性放大機構比較表。

撓性放大 器設計	尺寸(mm) 長×寬×高	輸出行 程(μm)	倍率	共振頻率 (Hz)	剛性 (N/ μm)
槓桿、菱形 複合式[17]	80×120×25	30	10.4	1152	0.1156
兩組菱形 串聯[18]	15×30×30	80	10	190	0.02
兩組槓桿 串聯[19]	50×134×20	200	20	189	N/A
槓桿、橋狀 複合式[20]	50×92×18	214	12.1	205	2.42
槓桿、橋狀 複合式 [21]	22×65×10	200	16.2	628	N/A
槓桿、半菱 形複合式 [16]	44×50×7	61	6	2176	0.0072
本研究	61.4×44×16	285	11.5	935	0.1623

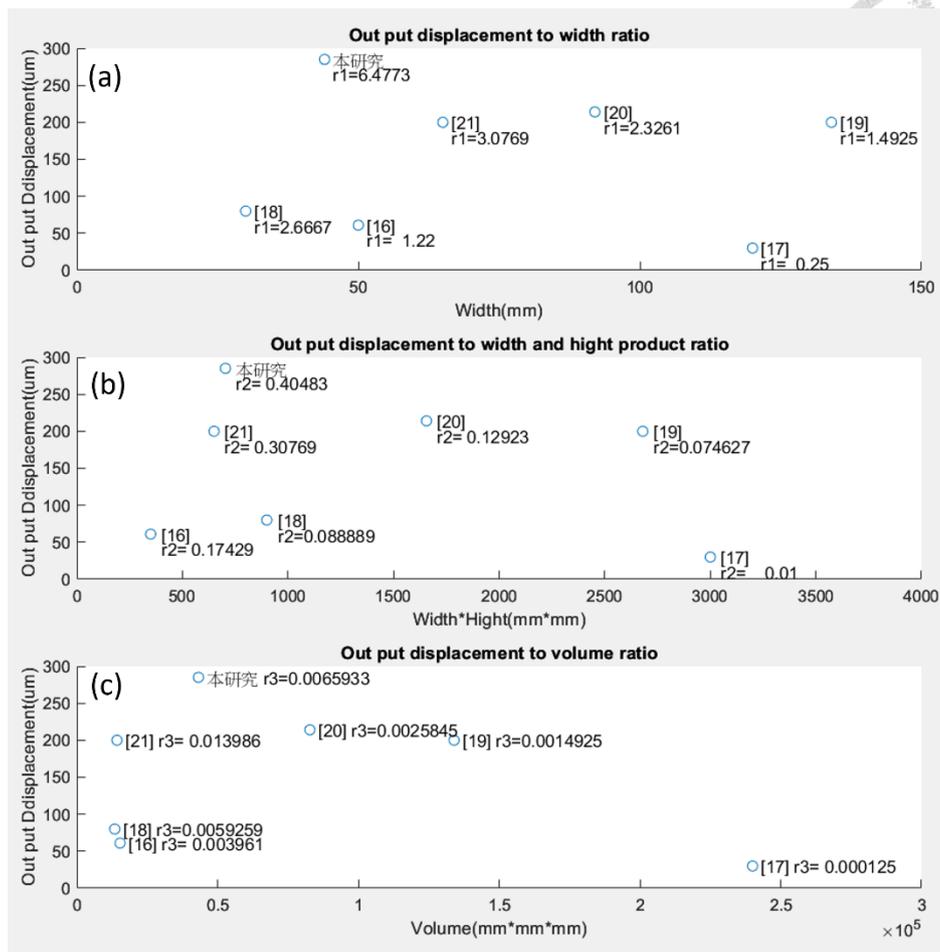


圖 1.25 各式設計與本研究之(a)寬度-行程比較圖、(b)寬高乘積-行程比較圖、(c)體積-行程比較圖。圖中之 r_1 、 r_2 、 r_3 分別為行程對寬度比值、行程對寬高乘積比值及行程對體積比值。

1.4 內容簡介

本論文共有五個章節，本章為緒論，首先簡介壓電驅動器之歷史與各式設計及應用，接著介紹各式撓性放大結構之設計方式，以及各種其優缺點與性能比較。最後介紹本論文之研究目的。

第二章提出本論文之巢狀撓性放大機構之設計理念及方法，以及討論在設計階段之有限元素模擬結果。

第三章為實驗架構與設計，將會在前一章的基礎上，介紹本研究使用的實驗儀器及系統架構，以及壓電放大機構之組裝方式及組裝成品展示，並介紹將會在實驗

中使用之元件的運作原理，包含荷重元、像散式光學輪廓儀、雷射位移計等。

第四章詳細介紹實驗之步驟及相關細節，首先介紹實驗前之各儀器校正，接著介紹行程實驗、剛性實驗及共振頻率掃頻實驗，在各節均包含數據處理及小結。

第五章承接了上一章之實驗結果，對本研究提出之巢狀撓性放大機構設計之性能進行總結，以及未來在實驗設計可以更加完善的細節。

第二章 巢狀撓性放大機構



2.1 巢狀撓性放大機構之設計概念

為了達到較大之行程/尺寸比，本實驗之主要設計概念為串聯多段放大機構以增加行程放大倍率，本實驗提出的巢狀撓性放大機構主要由三層放大結構組成，一個菱形結構、一對槓桿結構及一個半菱形結構。就單一種放大結構而言，槓桿式放大結構有最差的空間利用率，若要增加槓桿結構之放大倍率，需要增加輸入與輸出力臂之比值，而輸入力臂受壓電元件之尺寸限制，只能增加輸出臂之長度。圖 2.1 為一放大倍率 6 倍，輸出行程約 $228\ \mu\text{m}$ 之撓性槓桿放大機構設計，其外部尺寸與本研究提出之巢狀撓性放大機構相同， $44\ \text{mm}\times 60\ \text{mm}$ 。圖 2.1 (a) 為撓性槓桿的支點。圖 2.1 (b) 為壓電元件之輸入端撓性結構，用以吸收槓桿傳回之側向反作用力，保護壓電元件。圖 2.1 (c) 則為積層式壓電元件，最大可伸長量為 $38\ \mu\text{m}$ 。圖 2.1 (d) 為撓性槓桿的輸出端，輸出方向如箭頭所示。圖 2.1 (e) 為固定壓電元件及槓桿結構之外框，因為需要傳遞壓電元件之推力並保持整體結構穩定性，因此需要保留足夠之材料厚度以保證結構剛性。而圖 2.1 (f) 壓電柱之右側，槓桿上方則為槓桿放大機構沒有使用到之空間。另外，雖然在壓電元件之輸入端有設計撓型結構，但是仍無法完全消除槓桿作旋轉運動時產生的側向力，模擬結果顯示，在槓桿旋轉時，壓電元件之末端會受到約 $5\ \text{N}$ 之反作用力。

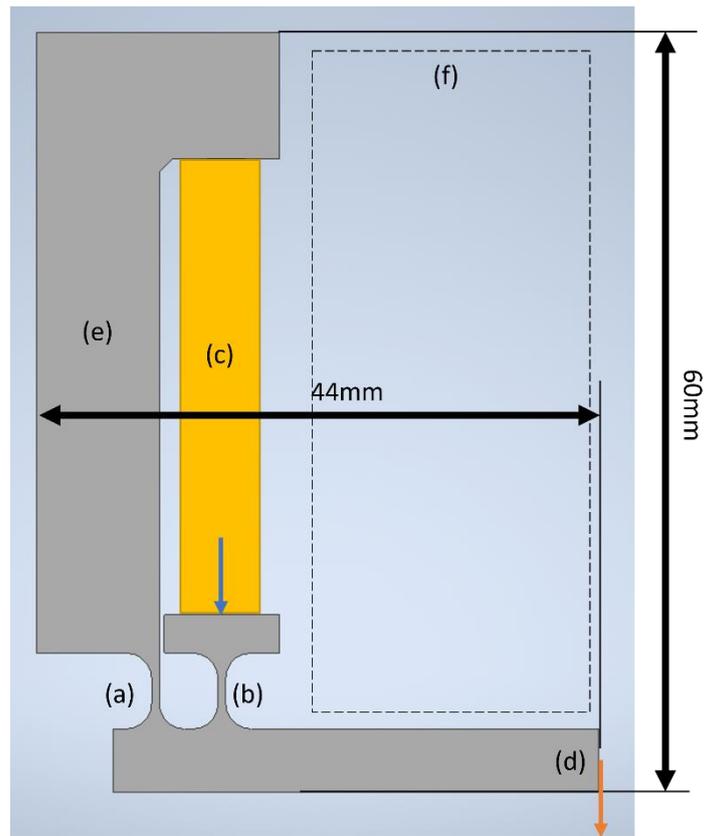


圖 2.1 與本研究提出之巢狀撓性放大機構擁有相同外部尺寸之槓桿放大機構設計。

本研究所提出之巢狀撓性放大機構為了有效利用槓桿結構上方之空間，將槓桿結構旋轉 90 度，並增加一對稱之槓桿結構，並利用槓桿末端撐開頂端之半菱形結構，同時解決輸出方向改變及槓桿過長之問題。然而，雖然利用對稱設計解決了槓桿之側向反作用力問題及增加了輸出行程，若要保持輸出量，仍需要相當大的力臂比值，較大的力臂比值意味著需要更高強度之槓桿臂，導致低下的共振頻率，另外仍無法完全解決空間利用率不佳的問題，如圖 2.2，該設計在槓桿中間、壓電柱上方仍有未利用之空間存在。為了安裝有足夠行程之積層式壓電元件，兩槓桿間需要有足夠空間，導致結構需要更大之寬度尺寸，達到 68 mm×68 mm，使得半菱形結構尺寸過寬，進一步降低輸出剛性及頻率。

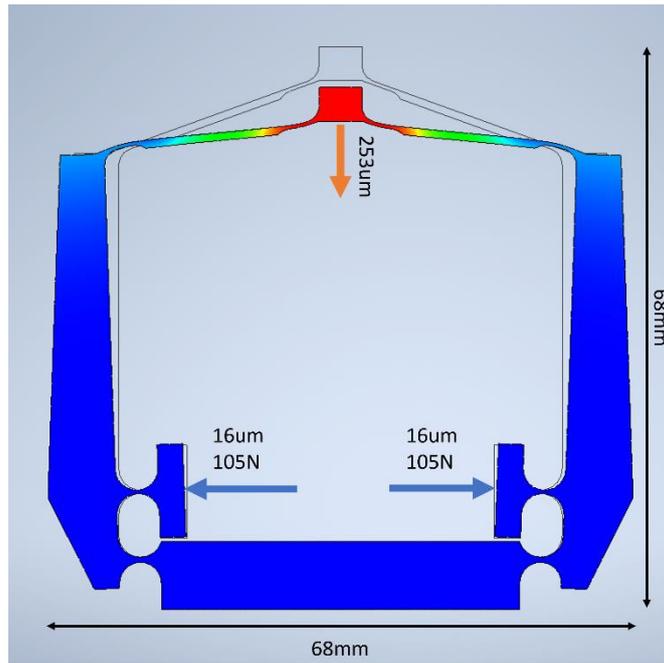


圖 2.2 翻轉槓桿後之設計。

為保持較小的寬度尺寸，利用菱形結構將壓電元件之輸出再次轉向，並同時增加輸出的位移量，因為多了一層放大結構，所以可以減少所需要之槓桿放大量，即減少所需的槓桿長度、剛性相對提高，同時直立後的積層式壓電元件與菱形放大結構減少對稱的槓桿間的距離，並充分利用了槓桿中間、輸出端下方的空間，另外，也將槓桿的支點設計在菱形放大結構下方斜面處，進一步縮短所需的槓桿長度，因此雖然增加了一層放大結構，但是尺寸得以縮小達到 44 mm×60 mm，如圖 2.3。不同於圖 1.24 Ling 等人之 V 形樞紐設計，本設計之槓桿樞紐因為已經過一層放大，有較大的旋轉角度，因此槓桿部分改用旋轉精度較低，但可旋轉角度較大之半圓形樞紐設計。

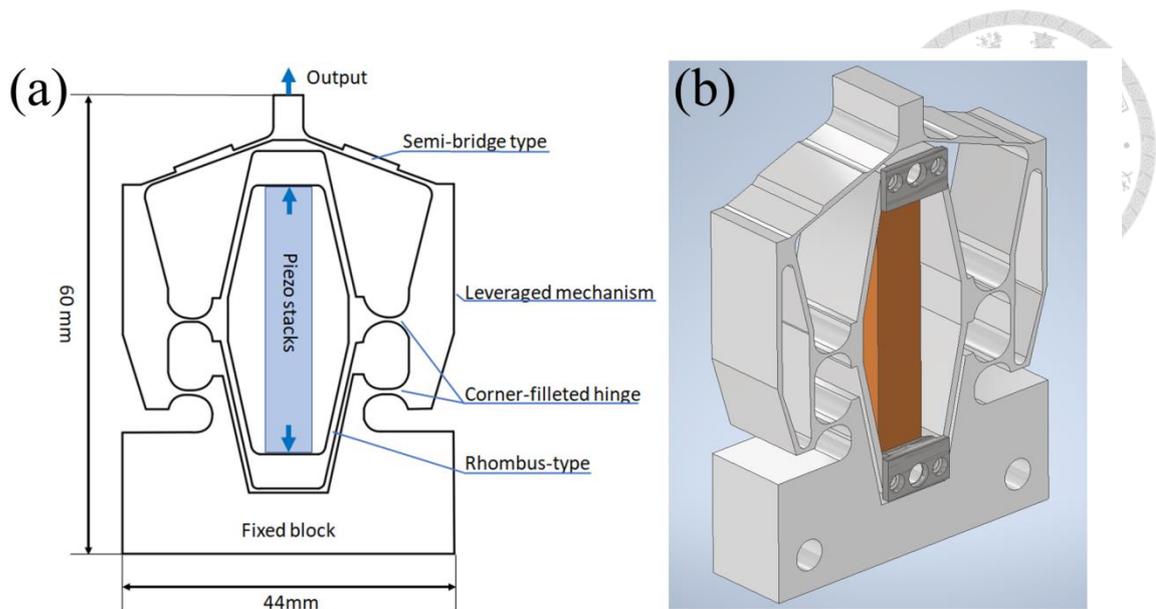


圖 2.3 本研究提出之巢狀撓性放大機構(a)尺寸圖以及(b)安裝立體圖。

2.2 巢狀撓性放大機構有限元素分析

根據文獻，有限元素分析可以提供精確的撓性結構變形行程估算[10]，圖 2.4 展示了本研究提出的巢狀式放大結構，經由有限元素分析推算出的預估行程及放大倍率。本研究所提出之撓性放大機構之材料使用 304 不鏽鋼，加工時先銑削槓臂之減重凹槽後，再以線切割切出輪廓，線切割使用線徑為 0.4 mm。有限元素模擬之參數如表 2.1 所示。

表 2.1 有限元素模擬參數表。

材料	304 不鏽鋼	剪切模數	8.59 GPa
楊式係數	193 GPa	密度	7999.5 kg/m ³
柏松比	0.30	降伏強度	250 MPa

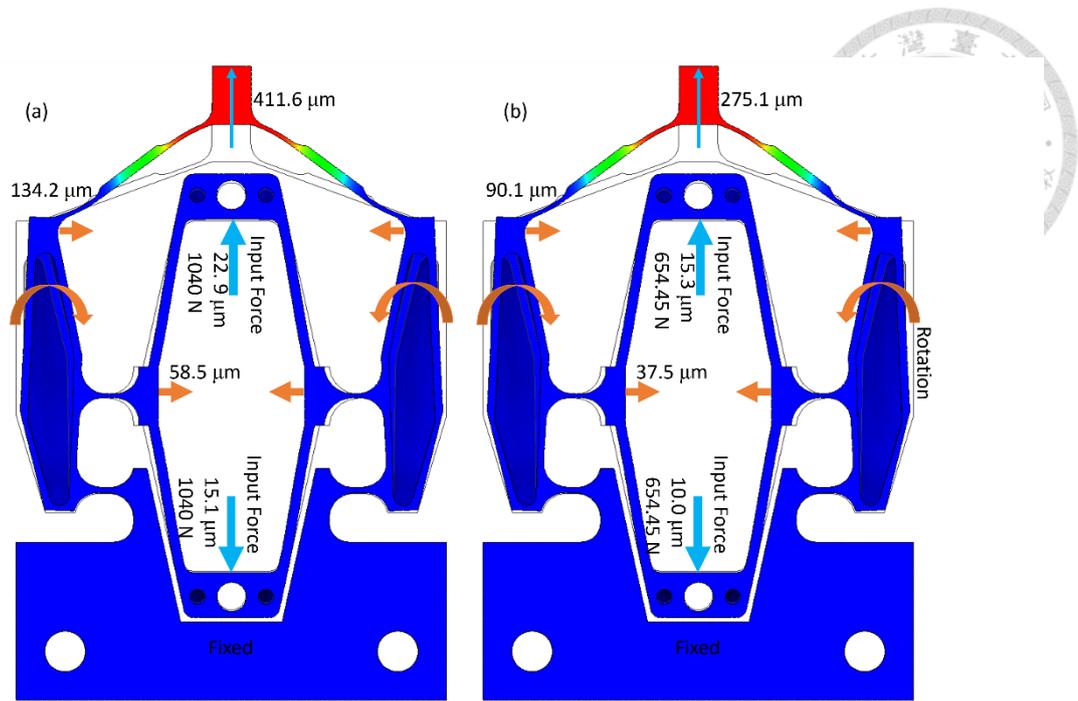


圖 2.4 巢狀式撓性放大結構有限元素分析位移圖(a)不考慮積層式壓電元件剛性(b)考慮積層式壓電元件剛性。

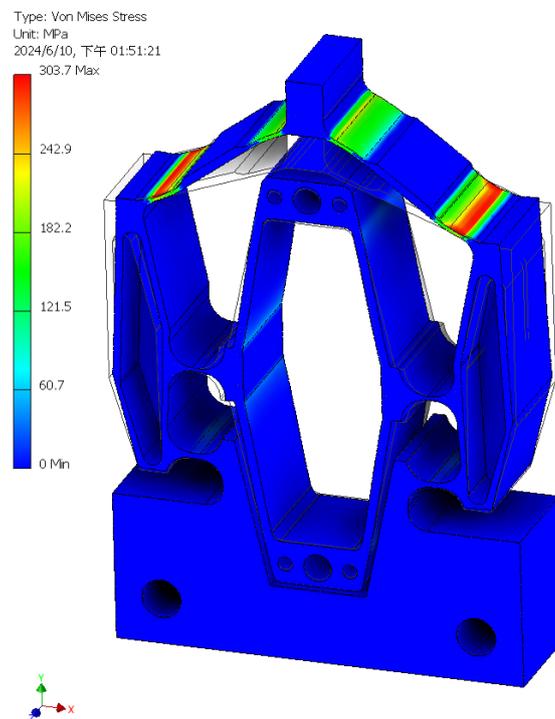


圖 2.5 巢狀式撓性放大結構有限元素分析，應力分布圖。

根據規格，本研究所使用的積層式壓電元件(PK4GYP2, THORLAB) 長寬高尺

寸為 $36 \times 7 \times 7 \text{ mm}$ ，其中輸出方向與長軸相同，最大出力(Blocking force)可達 1960 N ，最大伸長量可達 $38 \mu\text{m}$ 。為提供多段放大結構所需的力量，此處菱形式放大機構之斜面角度設計為 15 度，斜面角度較常見的菱形式放大結構大，模擬結果顯示，第一段可達約 3.1 倍之放大倍率，位移放大後輸出約為 $117 \mu\text{m}$ 。第二段之槓桿放大機構透過力臂比例可進一步提供 2.3 倍之放大倍率，使上方兩端點產生總共 $268 \mu\text{m}$ 之內縮行程。第三段之半菱形結構放大倍率約為 1.5 倍，因此最後將位移放大為 $411 \mu\text{m}$ 向上方伸長，如圖 2.4(a)所示。三組放大機構串聯所產生之總放大倍率約為 11 倍。撓性機構內最大應力為 303 MPa ，發生在半菱形結構之平板式撓性樞紐，如圖 2.5 所示。然而，若積層式壓電元件的負載為高剛性的彈性體，壓電元件之輸出行程與負載剛性成反比，如圖 2.6(a)所示，A 曲線為無負載之電壓行程曲線，B 曲線為負載為高剛性彈性體之電壓行程曲線， K_L 為負載之彈性係數，圖 2.6 (b)展示了在相同驅動電壓的條件下，伸長行程與負載之彈性常數為反比關係。

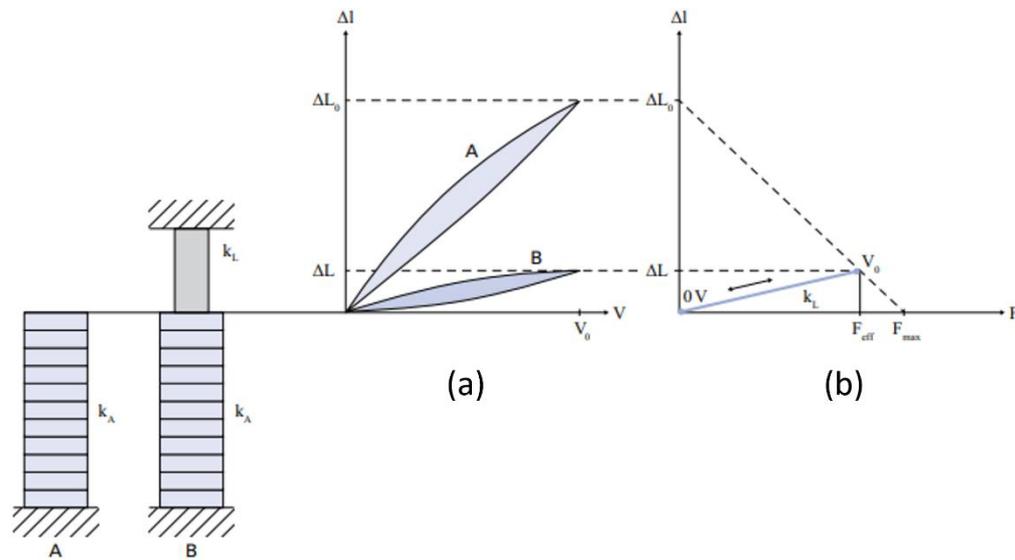


圖 2.6 壓電元件之伸長行程與彈性負載之關係[附錄 C]。

因此可以根據規格書所提供的圖表對有限元素分析的結果進行修正，如式 (2.3)，其中 Δl 為在最大驅動電壓下受到壓力 F 時，壓電元件之伸長量， Δl 單位為 μm ， F 單位為 N ， 1960 (N) 為壓電元件之最大出力， $38 \text{ (}\mu\text{m)}$ 為壓電元件在無負載時



之最大伸長量。

$$k = \frac{F'}{\Delta l'} = \frac{682.6}{26.4} = 25.856 \text{ N}/\mu\text{m} \quad \text{式(2.1)}$$

$$F = k \times \Delta l \quad \text{式(2.2)}$$

$$\Delta l(\mu\text{m}) = \frac{-38(\mu\text{m})}{1960(\text{N})} \times F(\text{N}) + 38(\mu\text{m}) \quad \text{式(2.3)}$$

$$\Delta l = 25.31 \mu\text{m} \quad \text{式(2.4)}$$

$$F = 654.45\text{N} \quad \text{式(2.5)}$$

受到有限元素分析軟體限制，先以力量 $F' = 682.6 \text{ N}$ 與輸入端位移量 $\Delta l' = 26.4 \text{ mm}$ 計算撓性機構輸入端之 k 值，如式(2.1)，其中 F' 可以為任意值， $\Delta l'$ 為經有限元素分析之輸入端位移量。計算得 k 值後聯立解式(2.2)及式(2.3)可得式(2.4)及式(2.5)，式(2.4)及式(2.5)分別為輸入端之位移量及力量大小。經過修正後可見到壓電柱推出的行程及力量相較於不考慮壓電元件剛性時有所減少，第一段位移放大後輸出約為 $75 \mu\text{m}$ 。第二段之槓桿放大機構透過力臂比例可進一步提供 2.4 倍之放大倍率，使上方兩端點產生總共 $180 \mu\text{m}$ 之內縮行程。第三段之半菱形結構放大倍率約為 1.5 倍，因此最後將位移放大為 $275 \mu\text{m}$ 向上方伸長。經過修正後雖然行程有所減少，但是放大倍率仍為 11 倍。以同樣方式操作，於模擬軟體中給予撓性機構之輸出端 $F_O = 20 \text{ N}$ ，可得輸出端的位移量 $\Delta l = 150.4 \mu\text{m}$ ，經計算得到輸出端的彈性常數為 $0.133 \text{ N}/\mu\text{m}$ ，如式(2.6)所示。

$$k_O = \frac{F_O}{\Delta l_O} = \frac{20}{150.4} = 0.133 \text{ N}/\mu\text{m} \quad \text{式(2.6)}$$

2.3 巢狀撓性放大機構模態分析

本研究所提出的巢狀撓性放大機構經有限元素分析得出前四振動模態，如圖 2.7 所示。第一模態為 395 Hz ，振動型態為對稱之兩槓桿結構在厚度軸上，對個別的支點進行同方向的晃動。第二模態為 730 Hz ，振動型態為整體在寬度軸上，對著槓桿結構的支點振動。第三模態為主模態，頻率為 926 Hz ，與壓電元件驅動的



方向相同。第四模態為 1231 Hz，振動型態為中間的菱形放大結構在寬度軸上，對菱形結構的輸出端振動。本研究主要對主模態附近及低於主模態之振動模態進行討論，因此不一一列出更高頻率之振動模態。

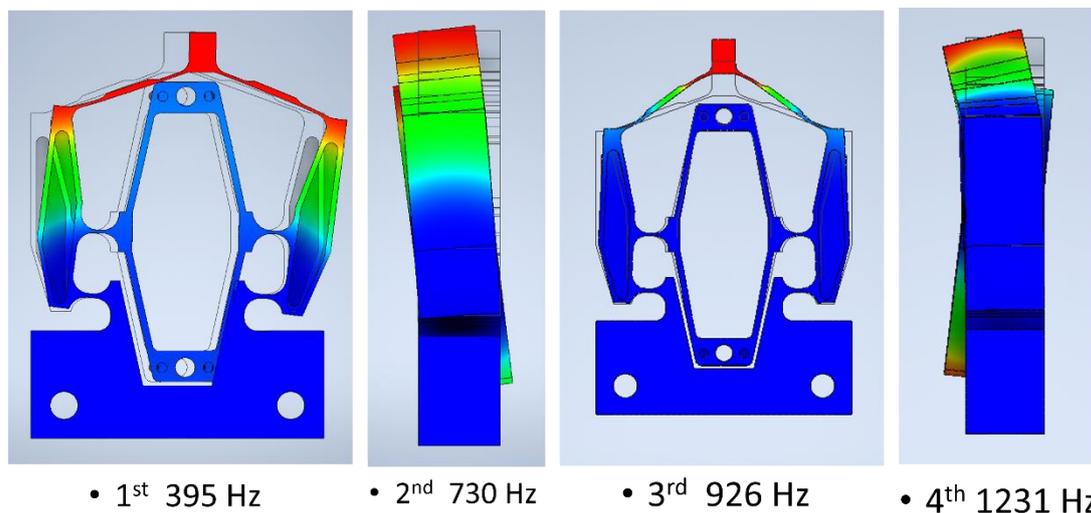


圖 2.7 巢狀撓性放大機構之第一到第四共振頻率與對應模態。

第三章 實驗架構與設計



3.1 整體系統架構

本實驗系統之架設目的為驗證本研究所提出的巢狀撓性放大機構之特性，包括巢狀撓性放大機構之位移量、剛性及出力大小、共振模態及致動器是否產生其他方向之運動耦合等。系統架構如圖 3.1 所示，可分為多個子系統，包含巢狀撓性放大機構(Piezoelectric actuator)、雷射位移計(Laser displacement sensor)、荷重元(Load cell)、像散式輪廓儀系統(Astigmatic pickup head)，除巢狀撓性放大機構外，各子系統皆搭配多軸位移平台(Manual stage, S-AM-41, MISUMI)以便調整量測位置。首先由電腦控制一微控制器產生任意驅動波形，經由高壓放大器(High voltage amplifier)放大後驅動積層式壓電元件(Piezo stacks)推動巢狀撓性放大機構，再經由前置放大器及鎖相放大器對雷射位移計、荷重元及像散式輪廓儀所回傳之訊號進行前置處理如濾波、放大及振幅擷取後，傳回微控制器及電腦進行後續分析。

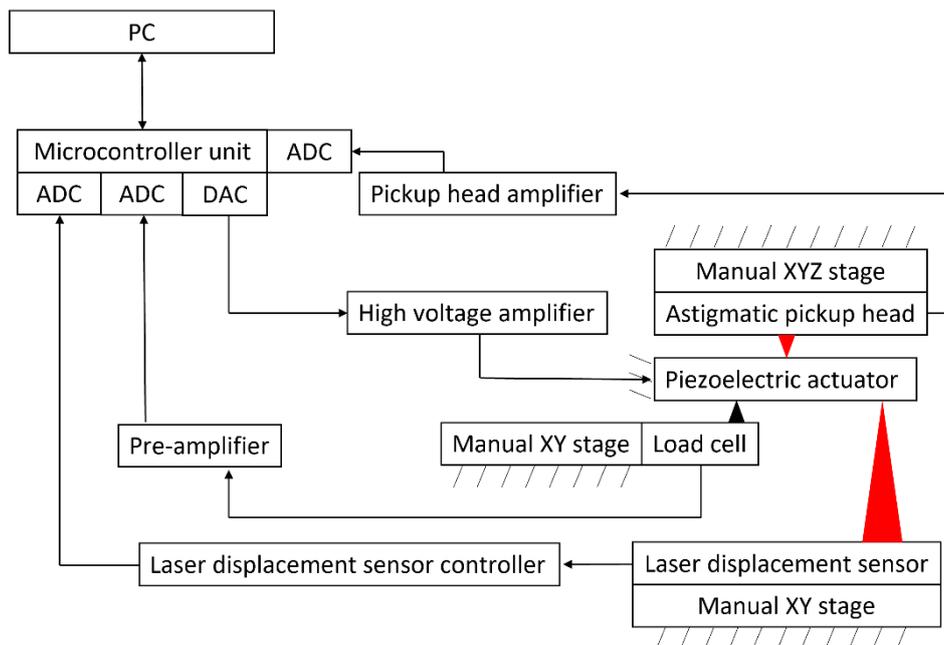


圖 3.1 致動器量測系統之系統架構圖。

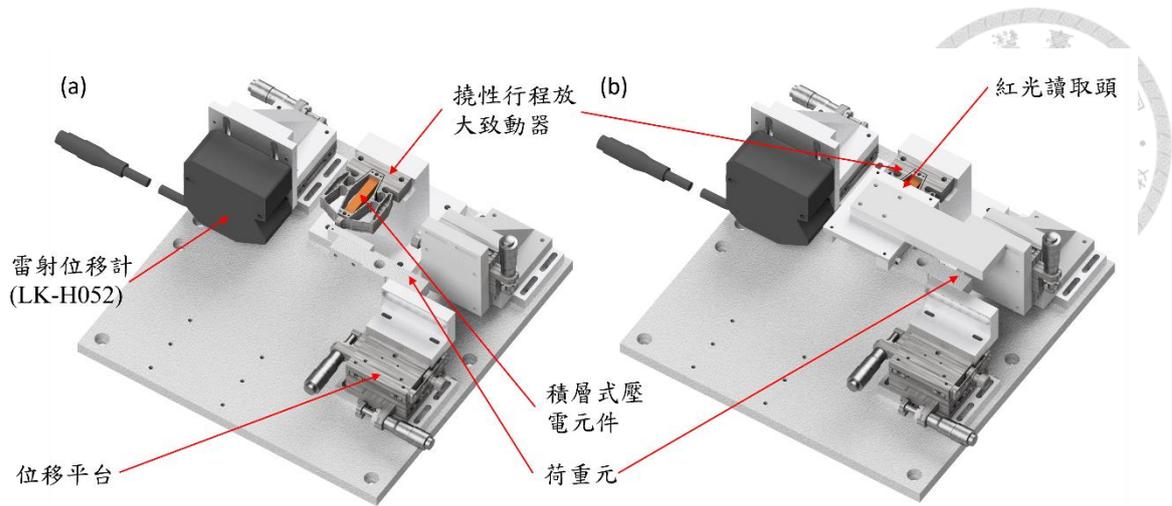


圖 3.2 系統機構設計圖(a)無安裝紅光讀取頭、(b)有安裝紅光讀取頭。

3.2 壓電柱安裝

由於拉伸張力對壓電材料容易造成破壞，而積層式壓電材料因本身質量之慣性，容易在快速放電收縮時在內部產生張力，因此安裝壓電元件時須對其提供適當之預壓力，確保壓電元件隨時處在受壓的狀態。本研究為減少結構複雜度，不另外安裝遇壓彈簧，而是由最內層之菱形結構直接對積層式壓電材料施加預壓力，在設計階段將菱形結構內部空間設計成略小於壓電元件長度，之後將壓電元件嵌入菱形結構內時即可自然產生預壓力。

然而，根據規格書[附錄 A, 附錄 B]，積層式壓電元件之長度尺寸公差可達 0.1 mm，約是其最大可產生位移量的三倍，而菱形結構之尺寸誤差根據不同的加工工藝約在 20 μm 左右，以上因素造成預壓力的大小難以掌控，因此本實驗在安裝積層式壓電材料時使用不銹鋼間隙片針對菱形結構的預變形量進行調整。

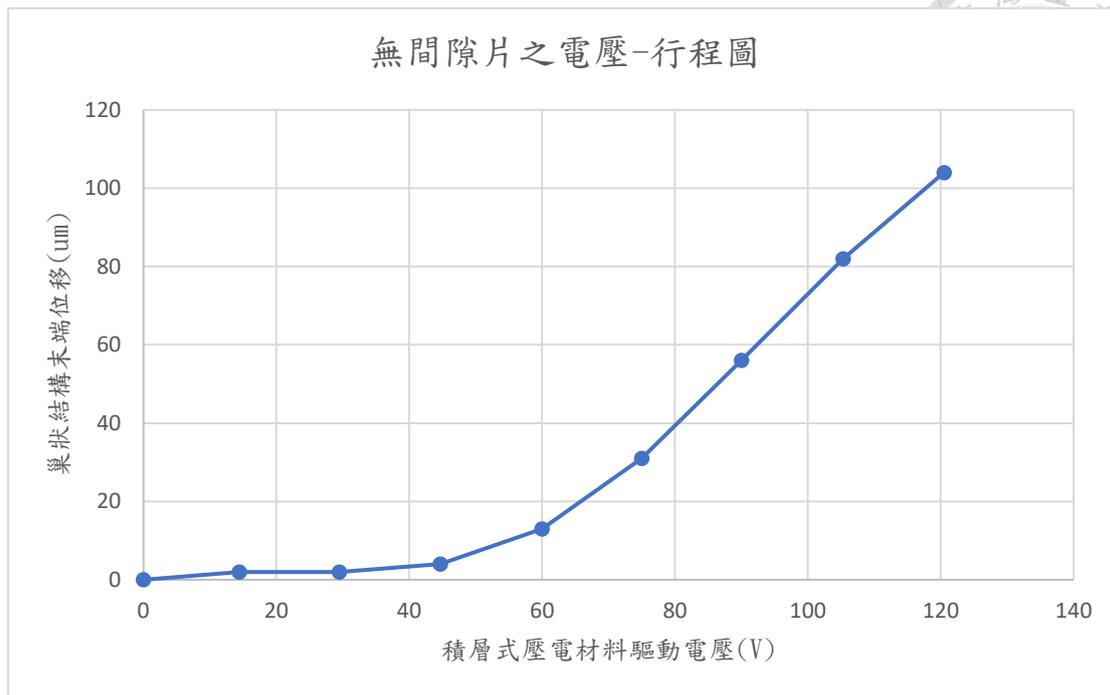


圖 3.3 無安裝間隙片之撓性結構位移量及驅動電壓。

圖 3.3 展示了在無間隙片的情況下，巢狀撓性放大機構輸出端的行程對電壓曲線，在前半段的積層式壓電材料驅動行程，從 0 V 到約 50 V 沒有產生位移行程，根據規格書，該壓電元件之行程約為 $0.253 \mu\text{m}/\text{V}$ ，藉由上圖的資訊可以推測壓電元件之安裝間隙約為 $12.6 \mu\text{m}$ ，可以為所需間隙片之尺寸提供參考。

安裝積層式壓電材料時，先測量巢狀撓性放大機構中的菱形結構及所用的積層式壓電元件之尺寸，如圖 3.4 所示，然後將巢狀撓性放大機構放入虎鉗中，利用虎鉗的夾持力擠壓撓性機構兩側的槓桿臂，進一步使菱形結構被擠壓，使壓電元件之接觸面被撐開，在夾緊虎鉗的同時須隨時測量菱形結構的變化，避免變形量超出設計值，使機構出現塑性變形，如圖 3.5 所示。同時準備相應尺寸之間隙片，為了利用撓性放大機構提供積層式壓電元件所需的預壓力，可選用比上一節所推算之間隙稍大的間隙片，選用完間隙片之後將積層式壓電元件治具安裝到菱形放大結構中，將積層式壓電元件及間隙片放入，如圖 3.6。圖 3.7 (a)則展示了壓電元件之治具安裝位置，治具上附有 7.04 mm 寬之凹槽，可以使積層式壓電元件的安裝位置在菱形放大結構之正中間，盡量確保壓電元件受力平均。確認安裝位置後，用光

固化膠固定積層式壓電元件，完成固定後即可拆除治具，完成安裝，如圖 3.8。



圖 3.4 開始安裝前測量菱形結構之間隙尺寸。



圖 3.5 以虎鉗對槓桿臂施壓，使菱形結構之間隙被撐開，隨時測量間隙尺寸變化，確保變形量不

超出設計值。



圖 3.6 撐開菱形結構之間隙後，安裝壓電元件及間隙片。

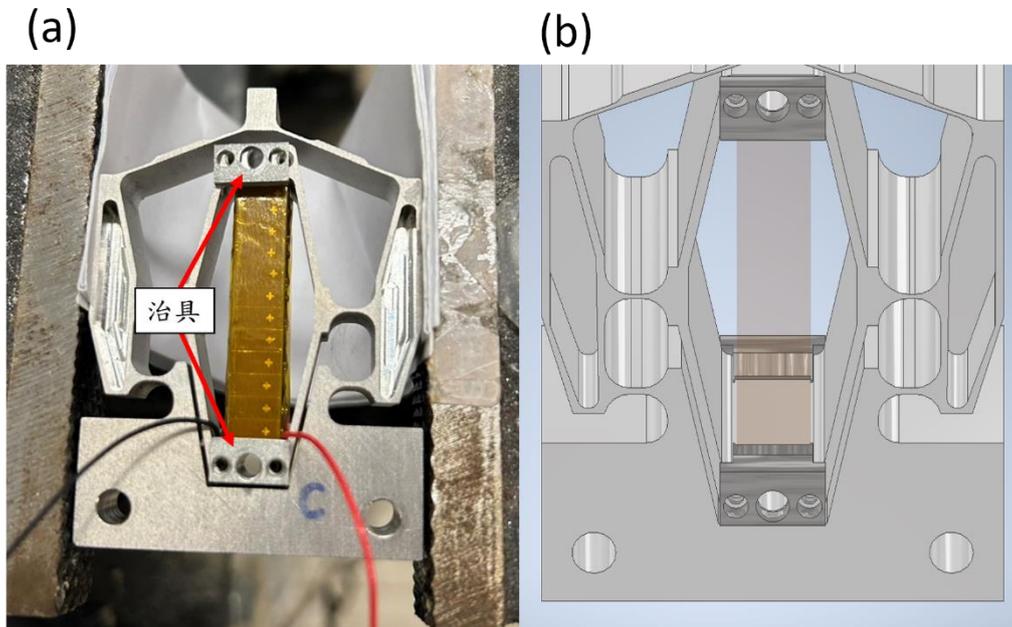


圖 3.7 巢狀撓性壓電行程放大機構(a)治具安裝圖(b)治具示意圖。



圖 3.8 以光固化膠固定壓電元件的位置後，即可拆除治具。

3.3 荷重元與應變規

3.3.1 應變規 (Strain gauge)

應變規 (Strain gauge) 是一種用來測量物體應變的測試工具，又稱為應變計、應變片，其原理是利用導體的電阻會隨著其長度變化而變化的特性。物體的電阻取決於它的形狀和組成材料，為方便計算，以圖 3.9 中的圓柱形電阻器進行分析，圓柱的電阻 R 與其長度 L 成正比，這與管道對流體流動的阻力類似，圓柱越長，電荷與其原子的碰撞就越多。電阻與圓柱的橫截面積 A 成反比。圓柱的直徑越大，其能承載的電流就越多，這點同樣類似於流體通過管道的流動。使用時將應變規黏貼在待測件上，應變規會隨著待測件伸長或縮短，這時應變規內的銅箔會因為伸長的關係造成電阻值跟著改變，因此可以通過測量電阻值的變化來計算應變量，電阻的變化可以使用惠斯通電橋 (Wheatstone bridge) 測得。

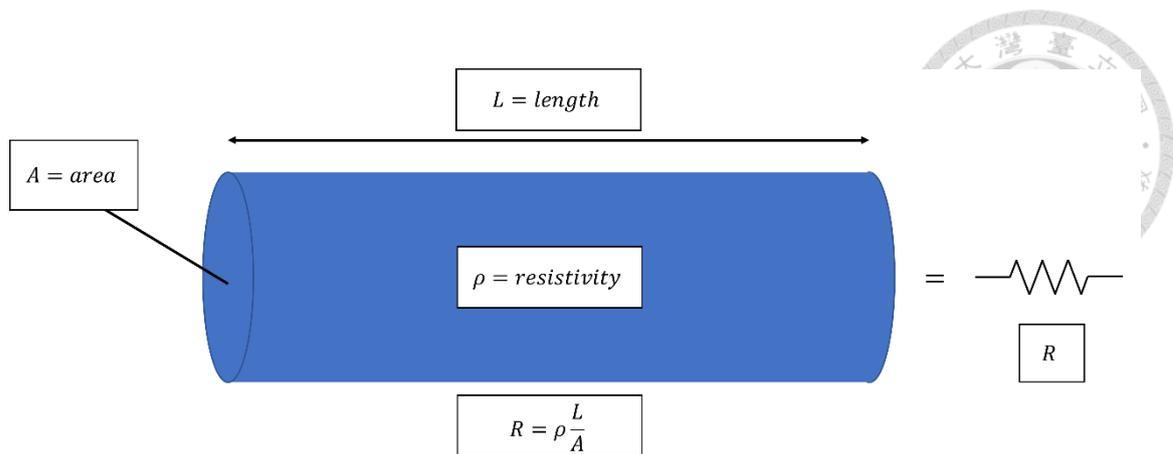


圖 3.9 電阻與材料尺寸的關係示意圖。

圖 3.10 為常見之一維應變規之示意圖，將銅箔以摺疊之 S 形印在基材上以增加對伸長量之敏感度，應通常變變規可承受之變形量約在 3% 左右。

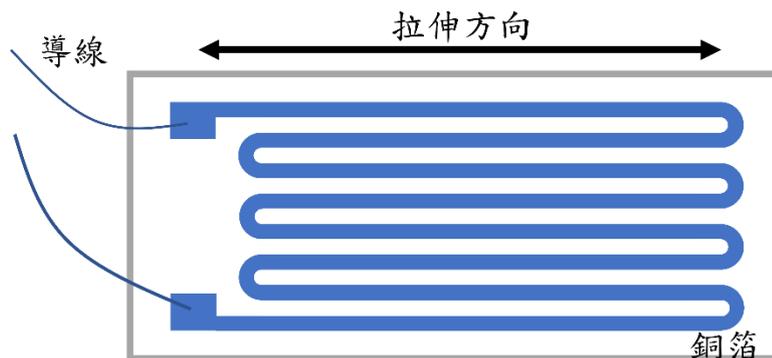


圖 3.10 一維應變規示意圖。

3.3.2 惠斯通電橋 (Wheatstone bridge)

惠斯通電橋是一種用來測量電阻的電路，由 Samuel Hunter Christie 在 1833 年所發明，Sir Charles Wheatstone 在 1843 年所改進。理論上，我們可以使用單一一個應變規，搭配另外三個電阻值匹配的電阻搭成一個惠斯通電橋，然而，實務上為了減少環境溫度對於應變規的影響，至少會使用一對應變規，使得兩個應變規同時受溫度影響而改變長度，以降低系統對於環境溫度的敏感度。本研究使用之懸臂梁式荷重元因為同時有拉伸及收縮面，因此將兩對應變規分別貼在懸臂梁的兩面，以



達到更高的量測精度。如圖 3.11 所示，本研究中 R1、R3 一組，R2、R4 一組，共同拉伸、壓縮。A-B 之電壓差 V 如式 (3.1) 所示。

$$V = V_A - V_B = V_{cc} \left\{ \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right\} \quad \text{式(3.1)}$$

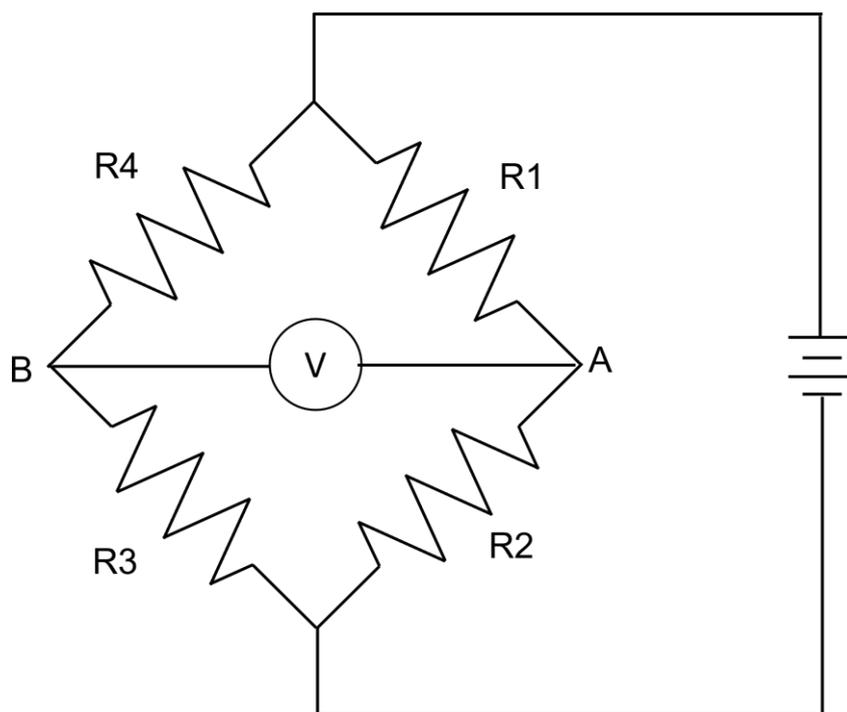


圖 3.11 惠斯通電橋。

3.3.3 荷重元 (Load cell)

荷重元是一種將力轉換為電信號的感測器，又稱為測力感測器、重力感測器。荷重元的結構主要由彈性體、應變規和惠斯通電橋等部分組成。其運作原理是使彈性體受力變型後，由應變規將局部的應變轉換為電阻變化，再用惠斯通電橋的作用將電阻變化轉換為電壓訊號。本研究採用懸臂樑式荷重元對撓性壓電致動器之輸出力量進行量測，如圖 3.12，懸臂樑式荷重元是一種常見的荷重元的形式，利用懸臂樑受力的彈性變形測量力量，實務上會挖空在應變規中間的材料，使變形量集中在該區域，如圖 3.13 所示，可以利用孔洞的大小對荷重元之靈敏度進行調整，

孔洞愈小則可量測之力量範圍愈大，孔洞愈大則可量測之解析度愈高。本實驗使用之荷重元內建四個應變規，分別在懸臂梁之拉伸側及壓縮側。此種荷重元的優點在於結構簡單，缺點則是受到扭力也會使讀數產生變化，因此本實驗中使用軸承滾珠作為受力點，降低扭力及摩擦力對量測結果之影響。

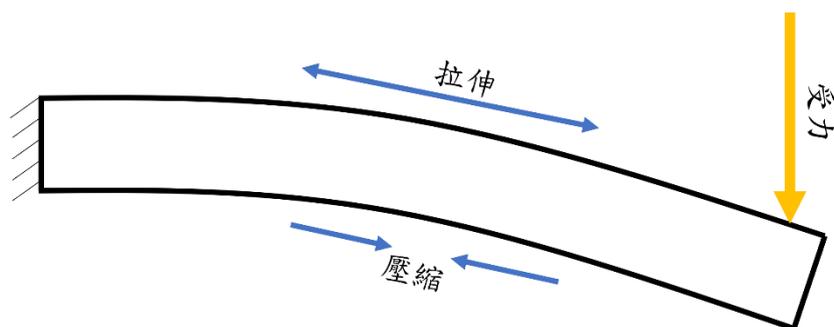


圖 3.12 懸臂樑式荷重元。

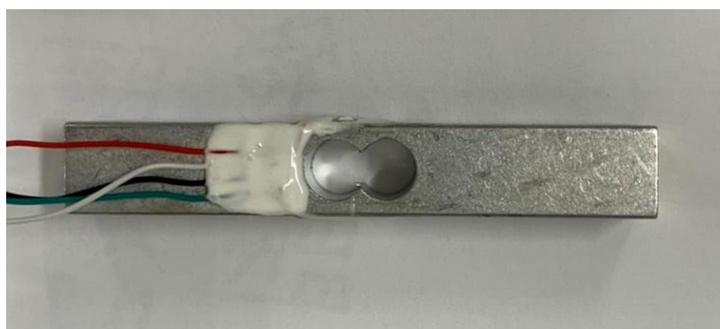


圖 3.13 本研究使用之荷重元(YZC131-05KG, 廣華電子)。

3.3.4 穩壓電路

由於荷重元的工作原理是測量惠斯通電橋的微小電壓訊號，因此輸入的電壓品質對所收集到訊號有決定性的影響，本實驗採用 LM317 線性穩壓器做為穩壓電路的核心元件，穩壓電路的拓樸結構如圖 3.14 所示，LM317 線性穩壓器於輸入腳位(IN)與調整腳位(ADJ)內建 1.25 V 之參考電壓 V_{REF} ，以提供外部電阻一固定電流，如圖 3.15 中流過電阻 R1 的電流 I_1 ，而可調電阻 R2 則可調整輸出腳位(OUT)與調整腳位之平衡電壓，經過穩壓後的電壓 V 。如式(3.2)所示，其中電流 I_{ADJ} 小於 100

μA ，因此大部分狀況下可忽略 $I_{\text{ADJ}} \times R_2$ 項。根據規格書， R_1 須盡量靠近調整及輸出腳位， R_2 則須盡量靠近地(GND)以達到最佳效能，為避免受到干擾須將穩壓電路安裝在靠近惠斯通電橋之位置，如圖 3.16 所示，SG1、SG2、SG3、SG4 則為荷重元上內建之四個應變規，無變形時電阻各為 $1\text{k} \Omega$ 。

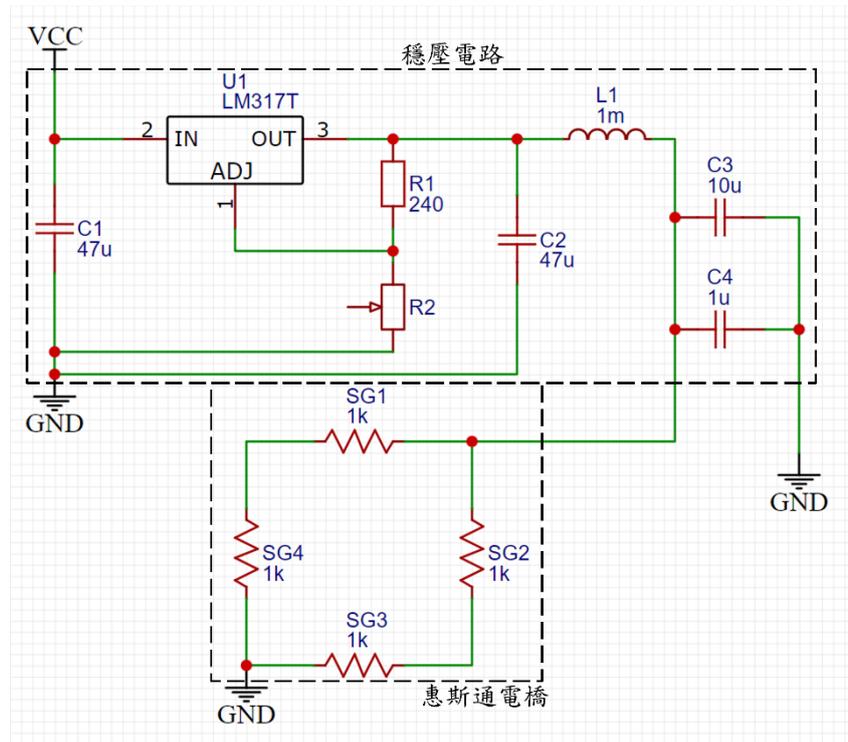


圖 3.14 荷重元穩壓電路拓圖結構圖。

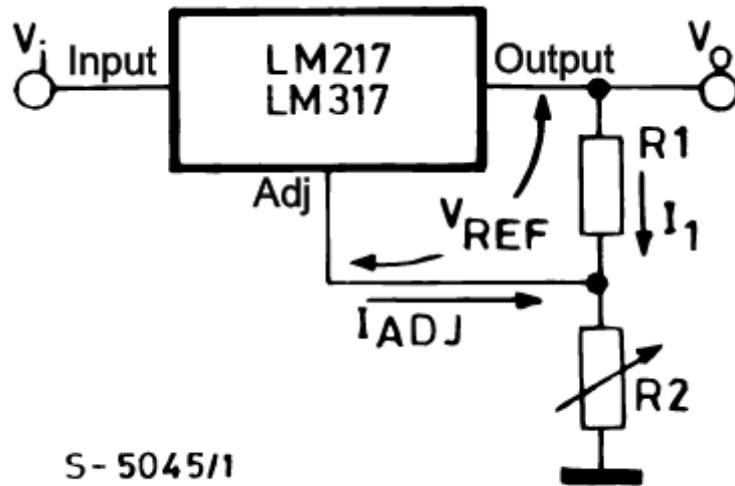


圖 3.15 可調穩壓電路之基本結構圖。

$$V_o = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} \times R_2 \quad \text{式(3.2)}$$

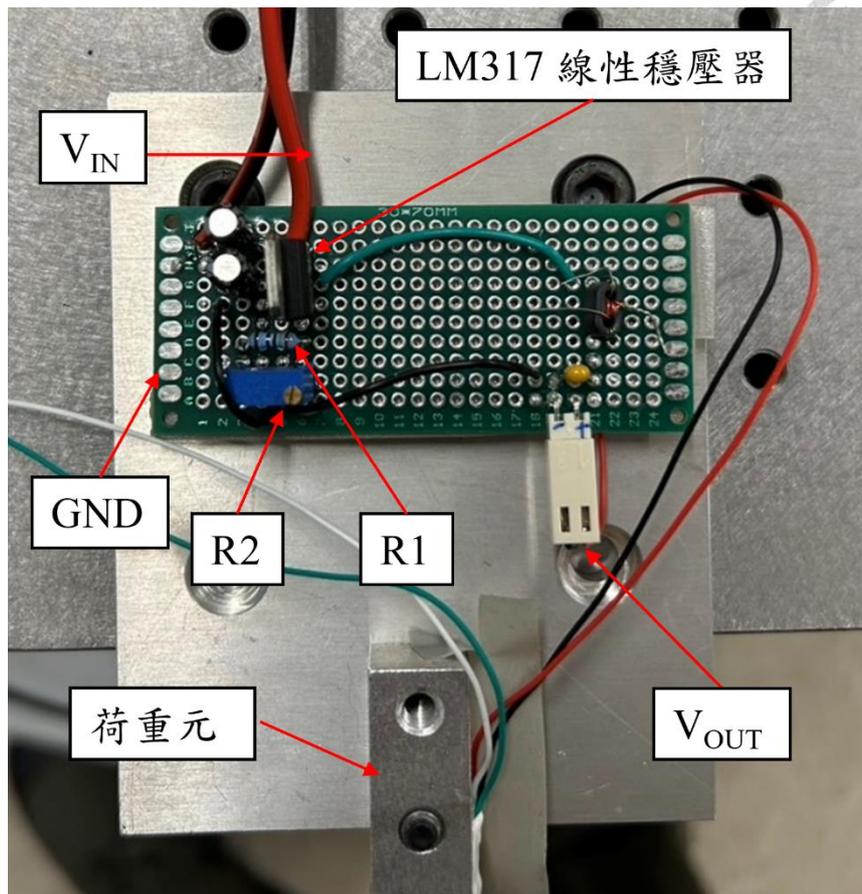


圖 3.16 自製荷重元穩壓電路外觀。

3.3.5 前置放大器

由於荷重元是藉由測量應變規所搭成的惠斯通電橋的電壓差進一步換算成力量大小，而在惠斯通電橋上所測量到的電壓差往往在數個 mV 以內，加上容易受到環境雜訊干擾，控制器的 ADC 無法有效截取訊號，因此本研究使用前置放大器 (SR560, Stanford Research Systems) 對惠斯通電橋的訊號進行放大濾波處理，如圖 3.17，其頻寬可達 1 MHz，增益 1~50,000 倍，可支援 RS232 通訊介面，可使用充電電池供電，進一步降低雜訊干擾。

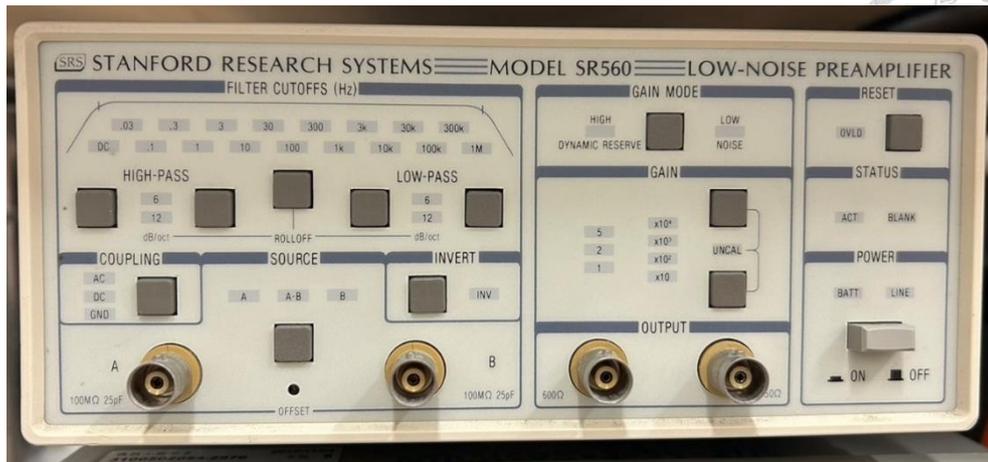


圖 3.17 SR560 前置放大器。

表 3.1 前置放大器參數設定表

	荷重元	頻率響應實驗
Coupling	DC	DC
Filter cut off	3Hz 12 dB/oct Low-pass	10kHz 12 dB/oct Low-pass
Gain	500	1
Gain mode	Low noise	Low noise

3.3.6 校正裝置

由於本實驗使用自製的荷重元，因此在使用前須對其進行校正。本實驗使用 M1 級標準砝碼(OIML 不鏽鋼標準砝碼, Polit)進行校正，砝碼之規格如表 3.2 及圖 3.20 所示，校正時將砝碼懸掛在荷重元之受力位置，因為本實驗所使用的荷重元為懸臂梁式，所測出之訊號大小會受到施力時的力矩大小影響，因此在校正時須使砝碼所施的力與進行實驗時的受力位置在同一直線，同時透過解耦器消除懸掛砝碼時可能產生之扭力。荷重元之校正系統架構如圖 3.18 所示，首先由電源供應器驅動線性穩壓電路，穩壓電路對惠斯通電橋提供經過穩壓濾波之 10 V 電源，再由前置放大器對惠斯通電橋之電壓變化進行穩壓放大，最後於示波器顯示電壓訊號。

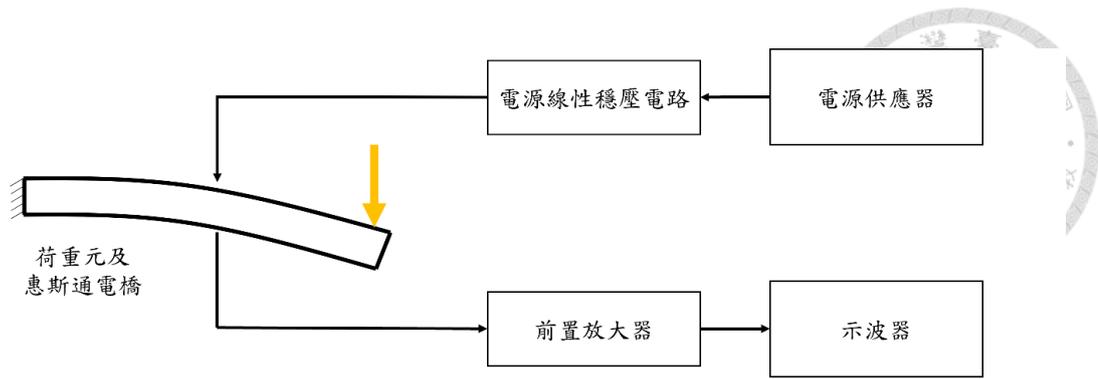


圖 3.18 荷重元校正裝置示意圖。

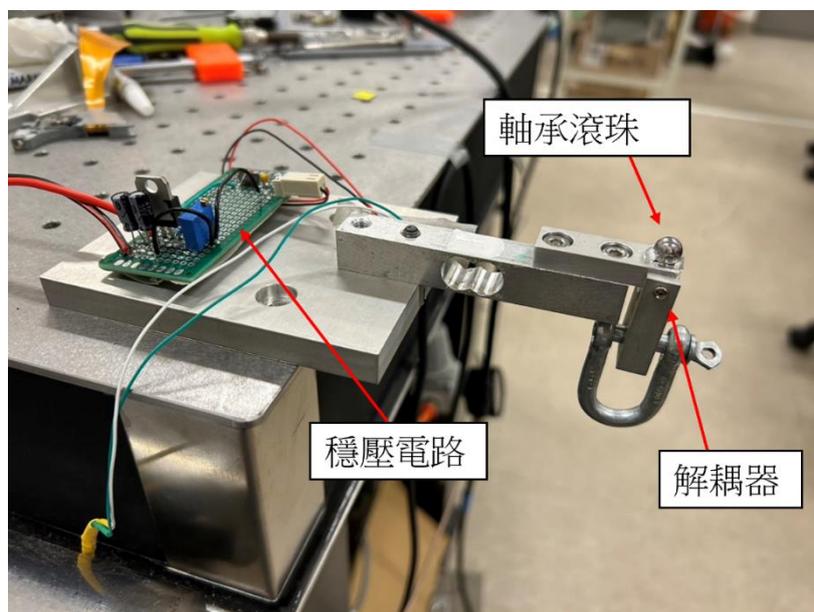


圖 3.19 荷重元校正裝置。

表 3.2 OIML 不鏽鋼標準砝碼規格表。

重量(g)	誤差(±mg)
100	5
200	10
300	15
500	25
1000	50
2000	100



圖 3.20 M1 級標準砝碼。

3.4 位移量測系統

雷射位移計具有工作距離長、可量測範圍大、架設容易等優點，像散式光學讀取頭則具有解析度高、量測頻寬高等優點。根據欲量測之壓電致動器特性，此量測系統可任意更換量測元件。

3.4.1 像散式光學輪廓儀

本研究使用像散式光學輪廓儀作為小範圍非接觸光學位移量測工具，像散式光學輪廓儀原理如圖 3.21 (a)所示，雷射二極體光源所產生之發散光束經準直鏡平行化後，再經由物鏡聚焦於待測表面上。反射光經由同一組透鏡聚焦後，再通過一像散鏡片(Astigmatic lens)，最後射入一位置感測儀(Position sensitive detector, PSD)，當物鏡與待測表面之距離發生改變時，由於像散鏡片平行鏡面的兩垂直軸之焦距不同，如圖 3.22 所示，聚焦於位置感測儀之光點形狀會產生改變，如圖 3.21 (b)所



示，將光感測器所產生的訊號進行運算後可產生對焦誤差訊號 (Focus error signal, FES)，如式(3.3)。

$$S_{FES} = (S_A + S_C) - (S_B + S_D) \quad \text{式(3.3)}$$

其中 S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D 分別為光感測器 A、B、C、D 之光電流訊號。因像散透鏡之兩軸焦距不同之緣故，當待測平面距物鏡小於像散透鏡之焦距時，光斑之 BD 軸距焦程度較高，因此光斑大部分分布於 AC 象限內， $(S_A+S_C)>(S_B+S_D)$ ， S_{FES} 值為正。反之，當待測平面距物鏡大於像散透鏡之焦距時，光斑之 AC 軸距焦程度較高，因此光斑大部分分布於 BD 象限內， $(S_A+S_C)<(S_B+S_D)$ ， S_{FES} 值為負。當待測平面剛好位於像散透鏡之焦距上時，光斑呈圓形， S_{FES} 值為零。

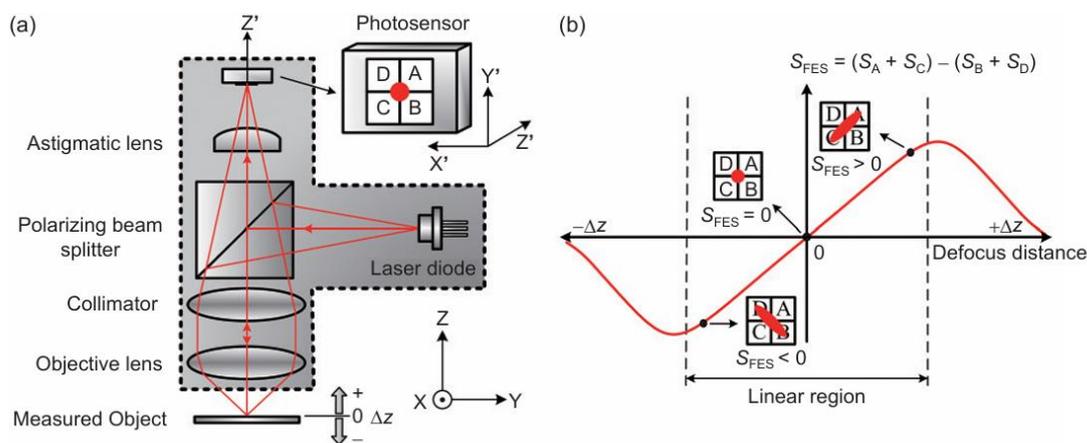


圖 3.21 (a)像散式光學輪廓儀原理圖。(b)聚焦誤差訊號對位移曲線圖[22]。

聚焦誤差訊號與 Z 軸位移曲線因呈一側倒之 S 形，故被稱為 S-curve，S-curve 在像散透鏡焦距附近之變化接近線性關係，利用此線性區間即可取得待測表面之表面高度訊號。

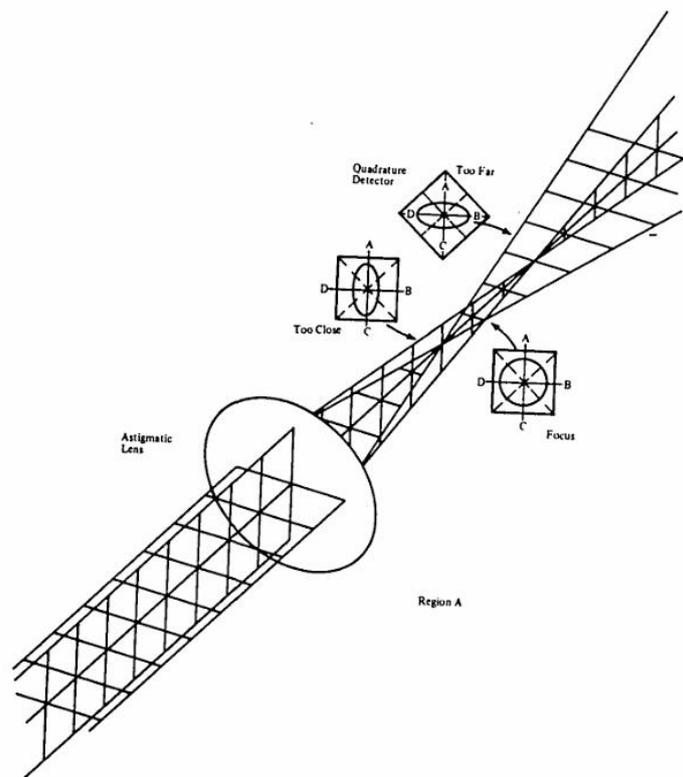


圖 3.22 像散式透鏡光斑形狀與透鏡距離示意圖[23]。

本研究以商用紅光 DVD 讀取頭(TOP1100s, TopRay Technologies)作為短距離量測元件，紅光 DVD 讀取頭主要由雷射二極體、準直透鏡、分光鏡、音圈馬達、四象限位置感測器(Position sensitive detector, PSD)所組成，如圖 3.23 所示，可量測範圍約在 7~10 μm ，具有量測精度高、頻寬高、成本低廉等優點。

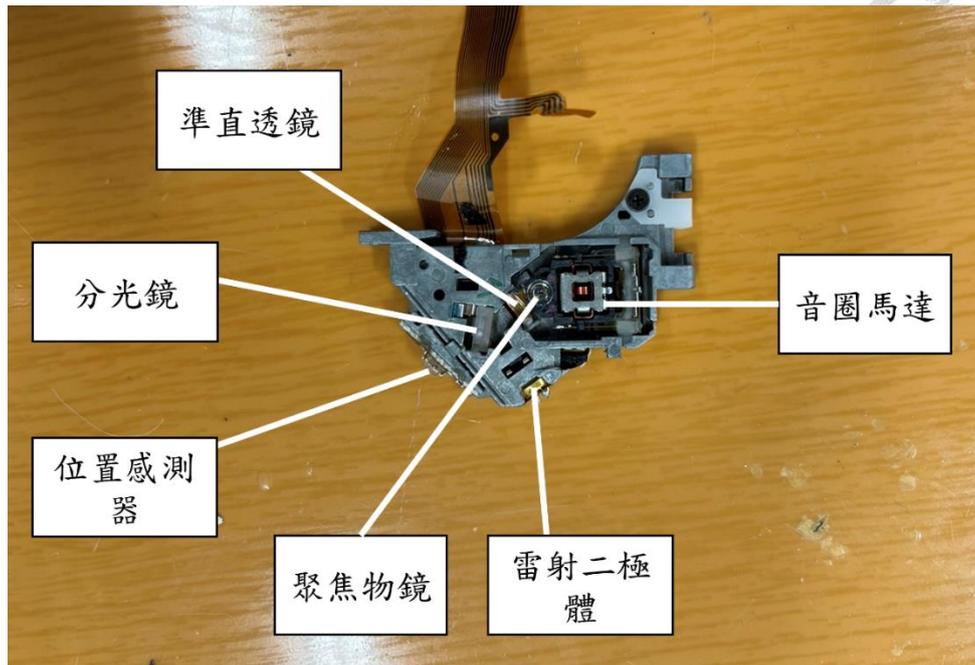


圖 3.23 商用紅光 DVD 讀取頭。

本研究所使用的讀取頭訊號放大電路(Topray 1100s 讀取頭驅動電路, OME Technology), 如圖 3.24, 輸入 $\pm 10\text{ V}$ 電源即可使用, 用於驅動讀取頭中的雷射二極體, 並對四象限位置感測器之訊號進行計算放大後以板上之 BNC 接口輸出 SUM 值、FES 值及音圈馬達微調 XZ 值。

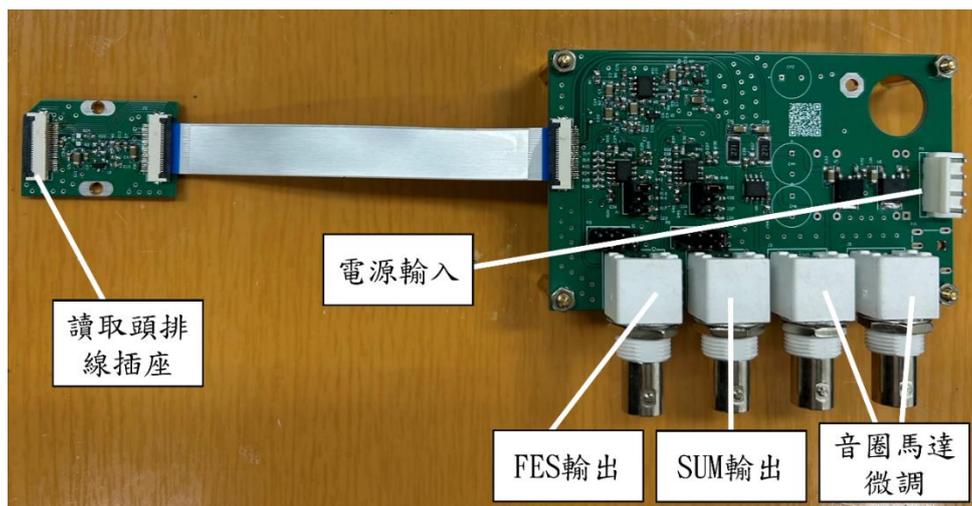


圖 3.24 商用紅光 DVD 讀取頭訊號放大電路。



3.4.2 雷射位移計

雷射位移計使用三角測量的原理，經雷射二極體及投光透鏡將距焦光打在待測表面上後，再由一受光透鏡將反射光投射於一一維圖像感測器(Charge-coupled device, CCD)上，如圖 3.25 所示。待測物距雷射位移計之距離會影響反射光投射於圖像感測器之位置，圖像感測器可以回傳每一位置的光強度值，藉由計算光強度最高之光峰位置，以計算得待測物與雷射位移計間之距離。不同於像散式光學輪廓儀，雷射位移計不需依靠穩定的表面反射率，這消除了物體的光澤或顏色所帶來的誤差。另外，因為圖像感測器所回傳的訊號是一一維的光強度訊號，因此可以取得多個光峰值與位置，使得測量透明體之多個介面位置成為可能。

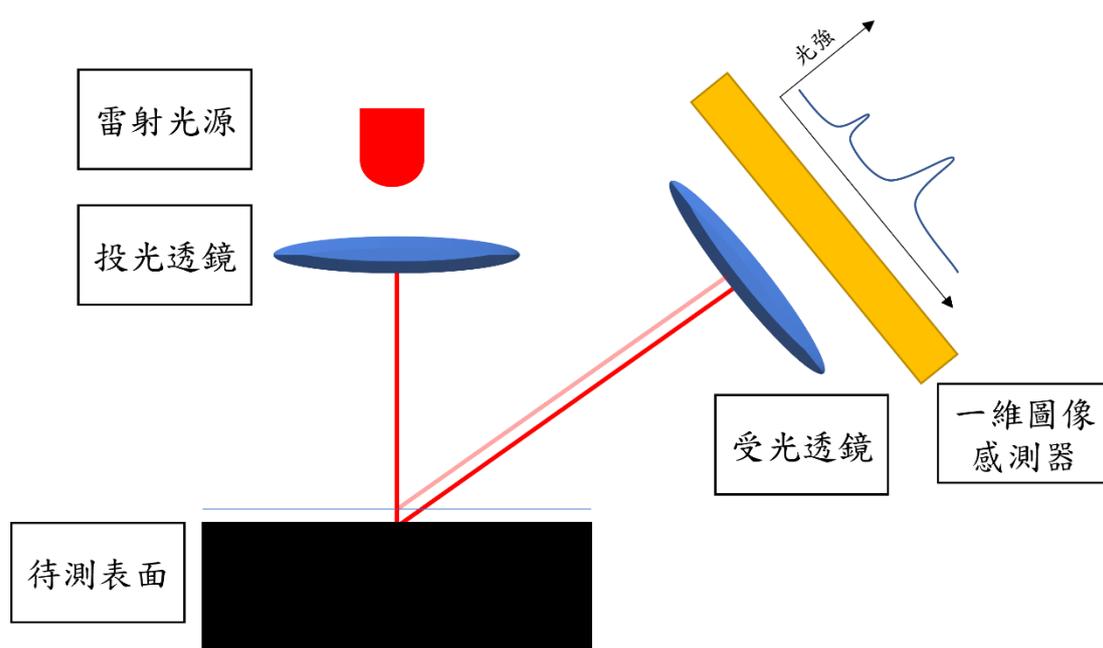


圖 3.25 雷射位移計原理示意圖。

本研究使用之雷射位移計(LK-H052S, KEYENCE)，如圖 3.26 所示，具有可量測距離大、穩定性佳、頻寬高等優點，主要用於本研究中需要數百微米級之非接觸光學量測。本雷射位移計最大工作距離可達 ± 10 mm，最小可重複精度可達 25 nm，最大取樣頻率可達 392 kHz。

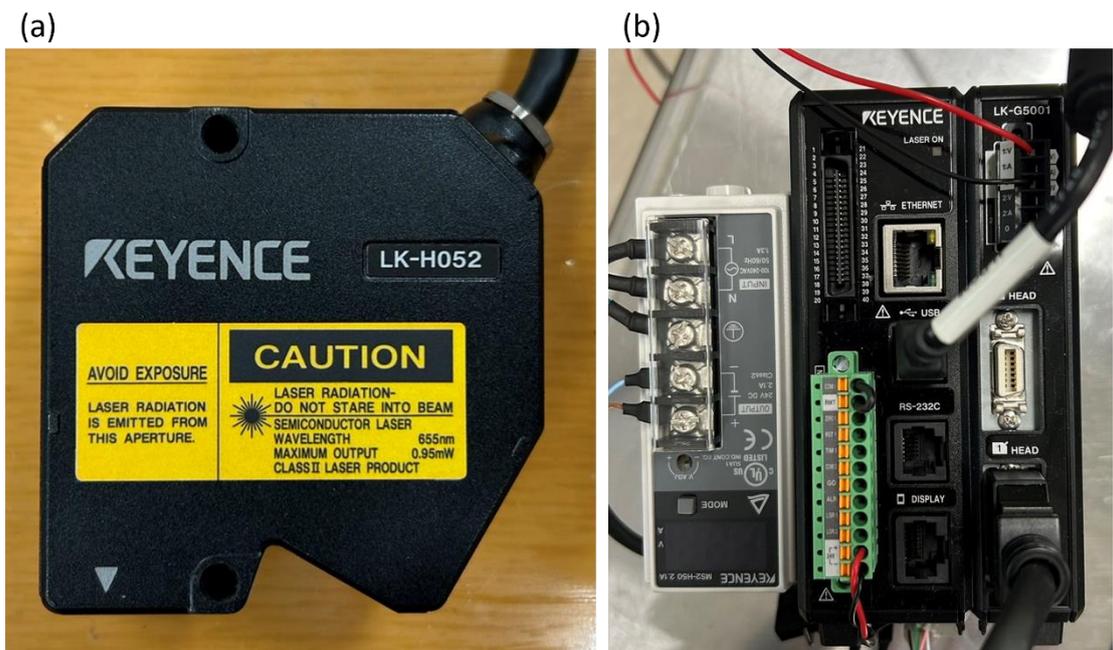


圖 3.26 (a)雷射位移計(KEYENCE, LK-H052S) [附錄 D]與(b)雷射位移計控制器(LK-G5001) [附錄 E]。

3.5 控制系統

本研究的控制系統由 PC 與控制板組成，控制板負責輸出壓電柱的控制電壓，並回傳雷射位移計、荷重元及光學讀取頭的類比訊號至 PC 進行濾波與運算。

3.5.1 控制板

本研究使用的控制板(myRio, National Instruments)如圖 3.27 所示，搭載雙核心處理器和 FPGA 晶片，具備 10 個類比輸入、6 個類比輸入輸出，與最多 40 條數位輸入/輸出(DIO)通道。可由 PC 端上傳 LabVIEW 程式，並且獨立運作，內部採用 Linux 作業系統，相較一般 PC 的作業系統來得穩定。



圖 3.27 myRio。

3.5.2 鎖相放大器

本實驗使用鎖相放大器(SR830, Stanford Research Systems)如圖 3.28 所示，其頻率範圍為 1 mHz~102.4 kHz，穩定性達 5 ppm/°C，相位解析度可達 0.01 度，同時內建參考訊號源，與 GPIB、RS232 等多種通訊界面相容。在本研究中用於輸出不同頻率之弦波以驅動壓電柱，同時接收雷射位移計的類比訊號，鎖定其振幅值並回傳給控制系統。

鎖相放大器在本實驗有兩項主要功能，一是輸出壓電元件之激振弦波訊號，二是將非接觸式量測裝置回傳之振動訊號之振幅轉換為電壓訊號。因為本實驗所使用的微控制器(myRio, National Instruments)之類比輸出腳位的輸出頻率無法支持掃頻實驗所需要弦波頻率(50~1600 Hz)，故由使用鎖相放大器接收微控制器輸出之數位方波後輸出相應頻率之弦波，驅動積層式壓電元件。



圖 3.28 SR830 鎖相放大器。

表 3.3 鎖相放大器參數設定表。

參數	設定值
Time constant	100 ms
Sensitivity	500 mV
Reserve	Low noise

3.5.3 電壓放大器

本研究使用壓電高壓驅動器(PD200)驅動積層式壓電元件，驅動電壓 0 V 到 150 V，驅動頻寬可達 310 kHz，可使用旋鈕調整偏移量(OFFSET)，輸入端使用 BNC 接頭輸入 -1 V 到 1 V 之電壓訊號。可使用 BNC 接頭接出電壓及電流監控訊號，分別為 1 V/V 及 1V/A。輸出端則具有 LEMO 00, LEMO 0B, 4mm Banana 及 BNC 四種接頭。面板上也具有電壓監控螢幕，可實時確認輸出之電壓大小。



圖 3.29 壓電高壓驅動器。

第四章 實驗流程與結果



4.1 實驗流程

本研究進行之實驗主要分為三大類。第一種為量測撓性機構的輸出行程，包含最終輸出行程及在各階段的撓性放大結構之放大量，以及積層式壓電元件之推動行程，最後是最終的行程放大倍率，因為頻率較低及量測行程較長，因此主要以雷射位移計測量。第二種為測量撓性結構之推力，推力大小會受不同推動行程與驅動電壓影響，因此可將推力換為剛性(N/ μm)表示，即每產生 1 μm 變形所需力量大小，需要使用雷射位移計配合荷重元，同時擷取力量與位移訊號。第三種為共振模態掃頻實驗，以低壓弦波對撓性壓電放大機構進行激振，並測量各部位之振幅並探討可能存在之共振模態，因各部位之振幅大小不同，所以會根據振幅大小使用雷射位移計或紅光讀取頭測量。

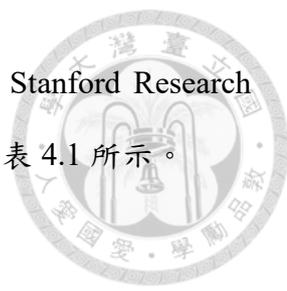
4.2 實驗前準備

本研究之量測系統可分為非接觸光學量測與接觸式力量量測兩部分，其中非接觸式光學量測中使用之紅光讀取頭因損壞率高，因此每次更換皆須重新校正，而接觸式的力量量測系統因為大部分為自製，因此需要先進行校正後才能使用。

4.2.1 荷重元校正

本研究之接觸式力量量測系統以懸臂梁式荷重元為核心，可分為電源供應、荷重元及訊號濾波放大三個部分，本校正實驗使用 6 種重量之 M1 級標準砝碼，砝碼材質為 316 不銹鋼。

首先，由電源供應器輸出電源至自製線性穩壓電路，這時可調整穩壓電路上的可調電阻以調整經穩壓後所輸出之電壓，接著便可於荷重元上之校正載盤上放置不同重量之砝碼組合，使用表 3.2 中的六種重量可組合出 0-4kg 中以 100g 為單位



之任意重量，惠斯通電橋兩端之電壓差經前置放大器(SR560，Stanford Research Systems)放大濾波後輸入至示波器讀取，前置放大器設定參數如表 4.1 所示。

表 4.1 SR560 前置放大器使用參數表。

參數名稱	設定值
Coupling	DC
High-pass	NA
Low-pass	30Hz 12dB/oct
Gain	200
Power	Line

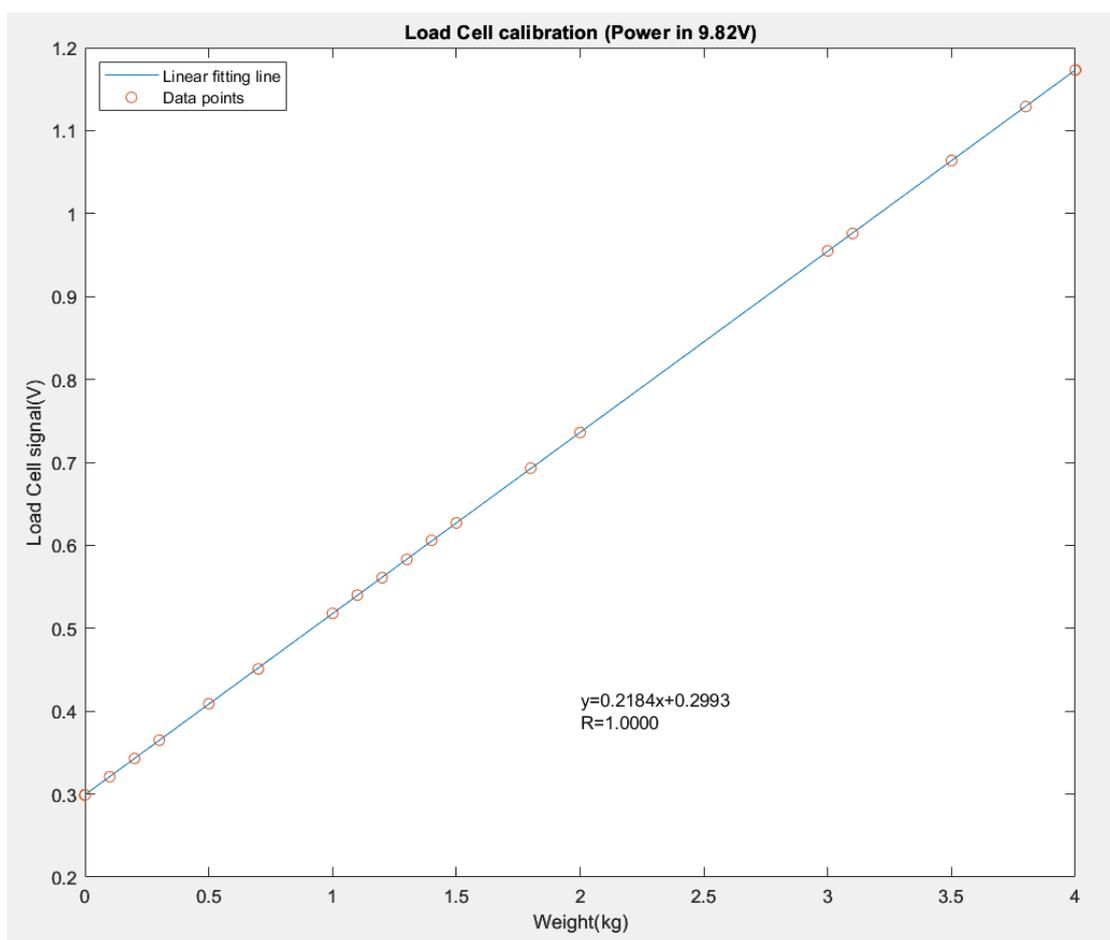


圖 4.1 荷重元校正圖。

校正之結果如圖 4.1 所示，其中橫軸為砝碼重量，縱軸為惠斯通電橋經濾波放大後之電壓訊號，橘色圓圈為校正之重量與電壓資料點，藍色實線為擬合之趨勢線。由校正結果得知此荷重元之承重與輸出電壓關係如式(4.2)。

$$y = 0.2184x + 0.2993 \quad \text{式(4.1)}$$

其中式(4.1)中之 y 為輸出之電壓(V)， x 為砝碼重量(kg)，根據中華民國內政部國家重力基準站公布之資料，距本實驗室最接近之新竹重力基準站測得之重力為 978901.91 毫伽，因此將公斤重量換為牛頓(N)後之荷重元校正數值如式(4.2)。

$$y = 0.0223f + 0.2993 \quad \text{式(4.2)}$$

其中式 4.2 中之 y 為輸出之電壓(V)， f 為力量(N)。

4.2.2 商用紅光讀取頭校正

本校正實驗使用奈米位移平台(NanoCube P-611.3, PI)作為紅光讀取頭之校正基準，首先將紅光讀取頭安裝在奈米位移平台上方，並將無鹼玻璃固定在在奈米位移平台上方，以確保反射率的一致性，接著移動奈米位移平台的 Z 軸並記錄紅光讀取頭之 FES 輸出，做出 S-curve 曲線圖如圖 4.2，並計算出 S-curve 中間線性區之斜率。實驗時須將待側面調整至 S-curve 之線性區段，並且因為 FES 值與反射光強度成正相關，待測表面需與校正表面之反射率一致。本實驗使用之紅光讀取頭 S-curve 線性段斜率約為 0.0474 nm/mV。

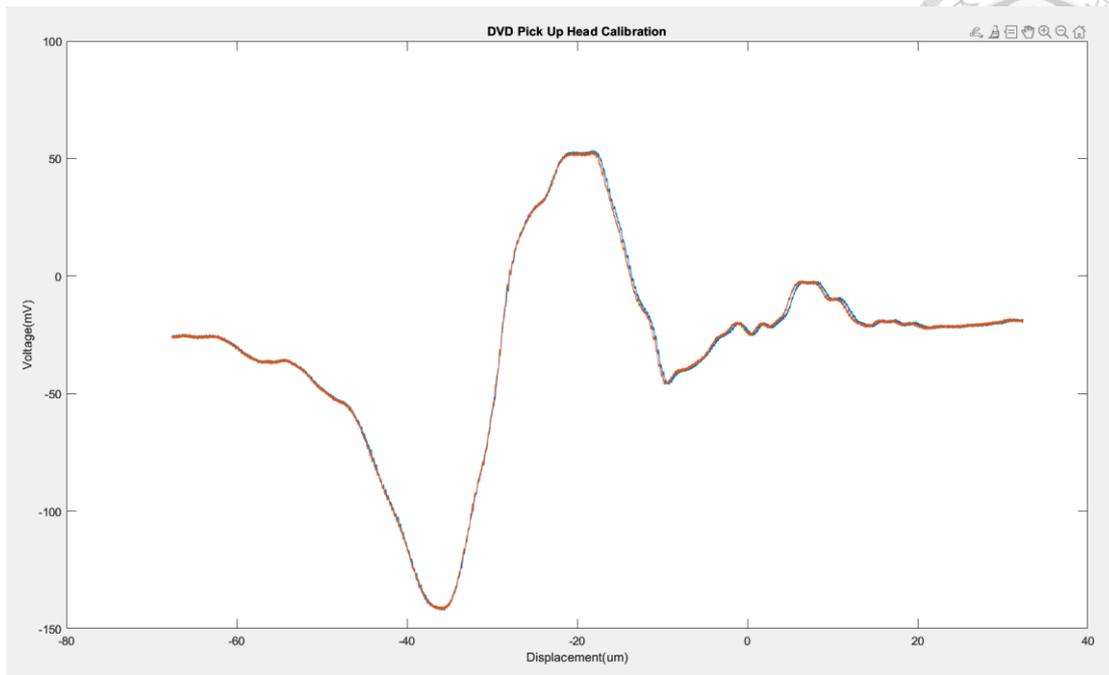


圖 4.2 紅光讀取頭 S-curve。

4.2.3 積層式壓電元件無負載位移量

不同壓電元件因加工誤差，有不同之伸長能力，為了更了解實驗中所使用之壓電元件在有無負載的狀況下之行程差異，在無負載情況下測量壓電元件之位移能力，實驗結果如圖 4.3 所示。壓電元件的無負載最大行程為 $44\ \mu\text{m}$ ，圖中藍色實線為 $0\ \text{V}$ 到 $150\ \text{V}$ 之伸長量，橘色虛線則為 $150\ \text{V}$ 到 $0\ \text{V}$ 縮短之位移。

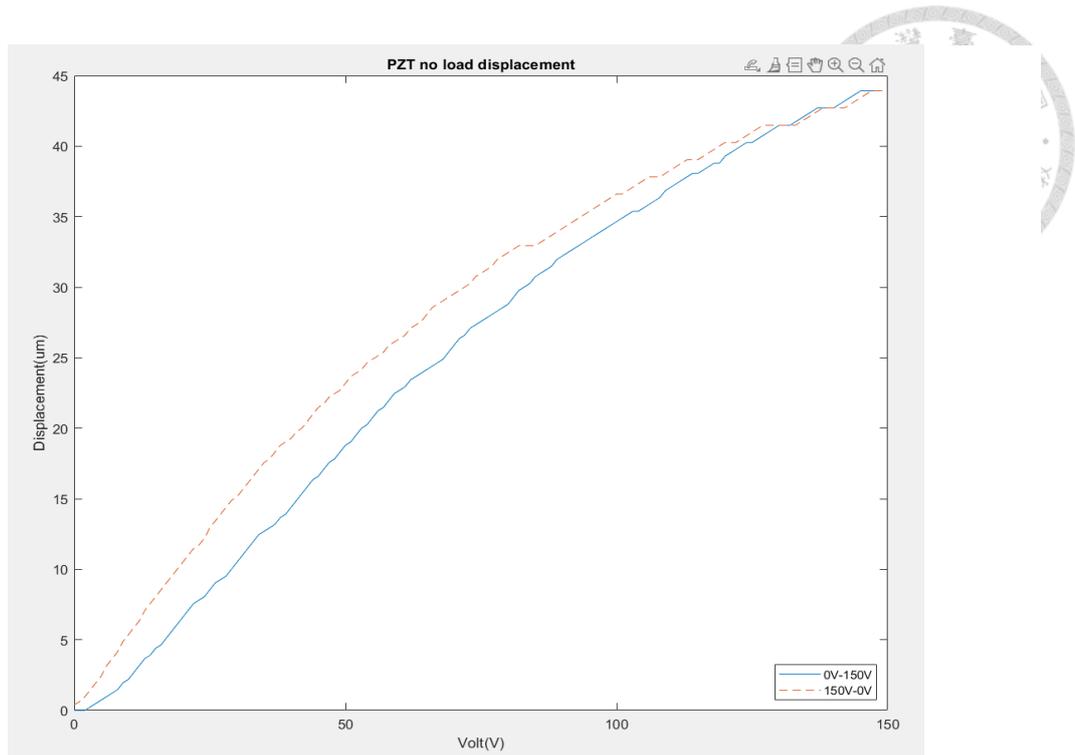


圖 4.3 積層式壓電元件無負載之位移量，藍色實線為伸長時的位移曲線，橘色虛線為縮短時的位移曲線。

4.3 撓性結構軸向定義

為方便以文字敘述，本節將定義本研究所提出之巢狀撓性放大機構各部位之名稱與軸向，如圖 4.4 所示，X 軸為寬軸，與輸出端之輸出方向垂直，Y 軸為長軸，與輸出端之運動方向平行，Z 軸為高軸，與輸出端之方向垂直，在二維之撓性機構也可以視為厚度軸。輸出端在有 A、B、C 三個測量點，法向量分別平行 Y 軸、Z 軸、X 軸。測量點 D 在槓桿臂的外側，其法向量平行 X 軸。而測量點 E、F 則分別在壓電元件靠輸出端一端及靠底座一端，法向量平行 Z 軸。測量點則用(測量點, 軸向)描述，例如測量點(A, Y)代表輸出端上的 A 點在 Y 軸方向測得的位移。

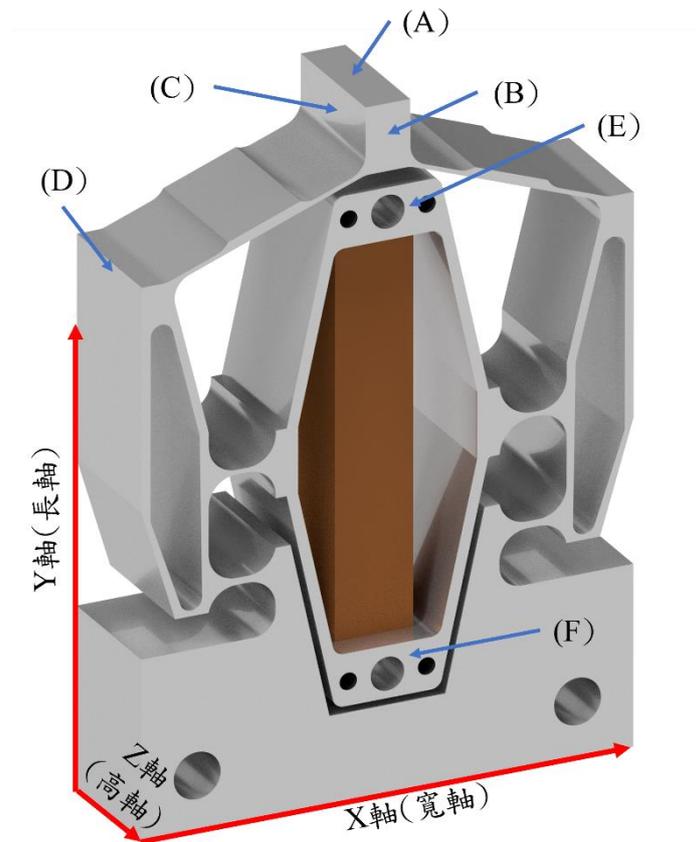


圖 4.4 軸向與各測量點代號定義。

4.4 行程與放大倍率實驗

可推動行程是衡量撓性壓電致動器性能的一個重要標準，本實驗之架構圖如圖 4.5。首先由 myRio 之類比輸出腳位輸出電壓訊號，控制壓電高壓驅動器(PD200)輸出 0V 到 150V 之高壓，驅動積層式壓電元件並推動撓性機構產生變形後，以雷射位移計(LK-H052, KEYENCE)測量輸出端與各階層撓性結構之位移量以驗證各階層之撓性放大結構之行程放大量。其中壓電元件因為並非固定在在撓性元件之底板上，所以在兩側槓桿臂轉動，會帶動菱形放大結構在輸出方向上移動，因此若要測量壓電元件之真實伸長量，需測量壓電元件兩面位移量之差值。

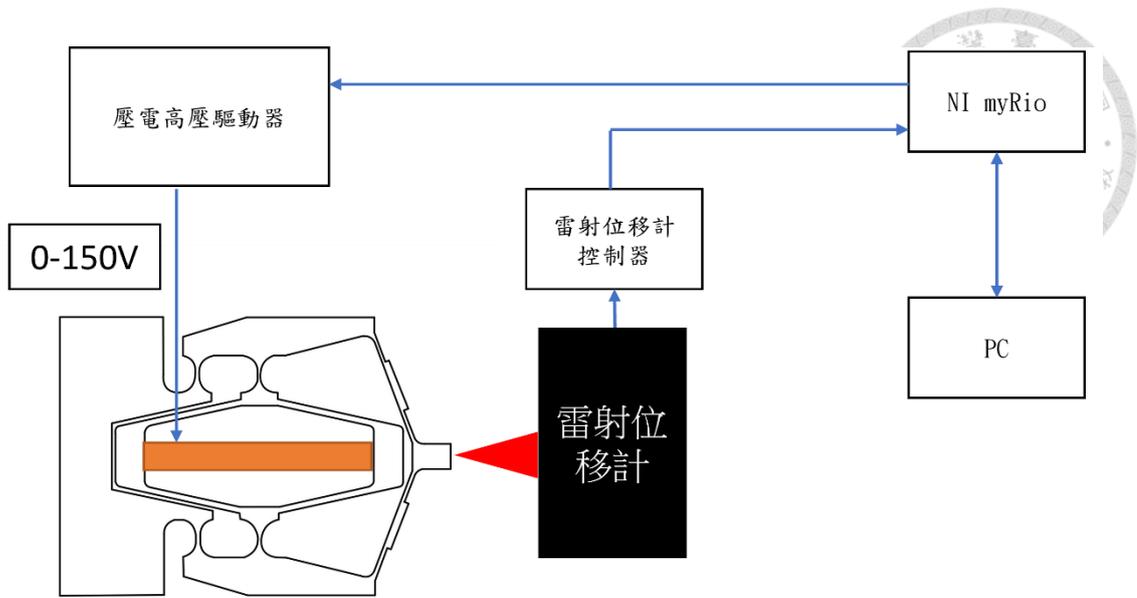


圖 4.5 巢狀撓性放大機構行程與放大倍率實驗架構圖。

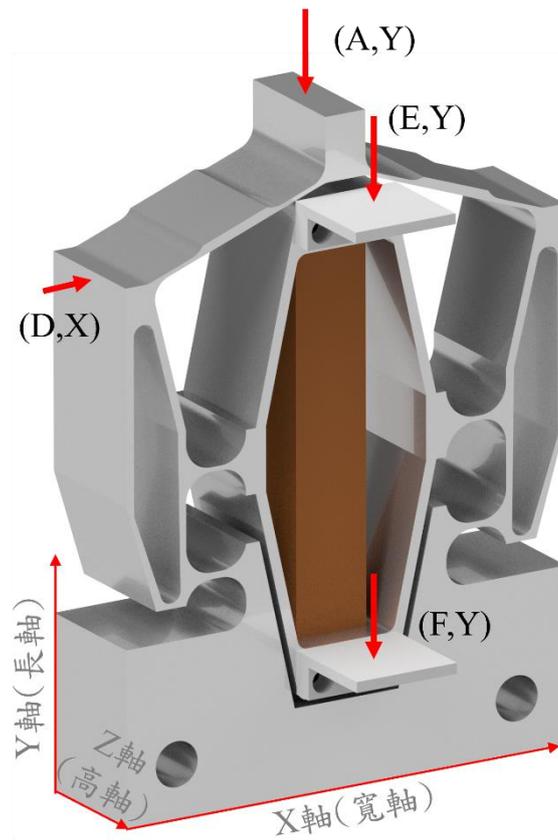


圖 4.6 撓性放大機構行程與放大倍率量測點與測量方向示意圖。

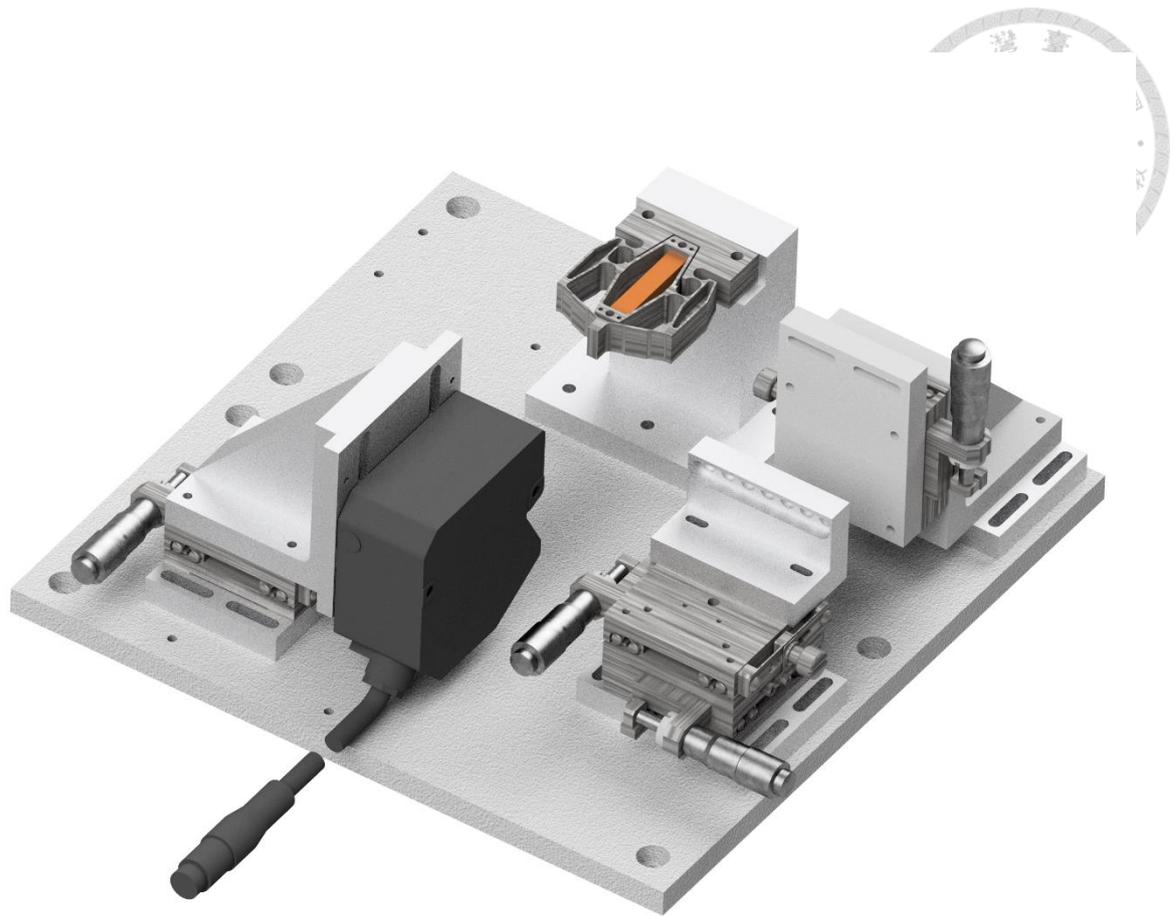


圖 4.7 測量點(A, Y)、(E, Y)與(F, Y)實驗架構設計圖。

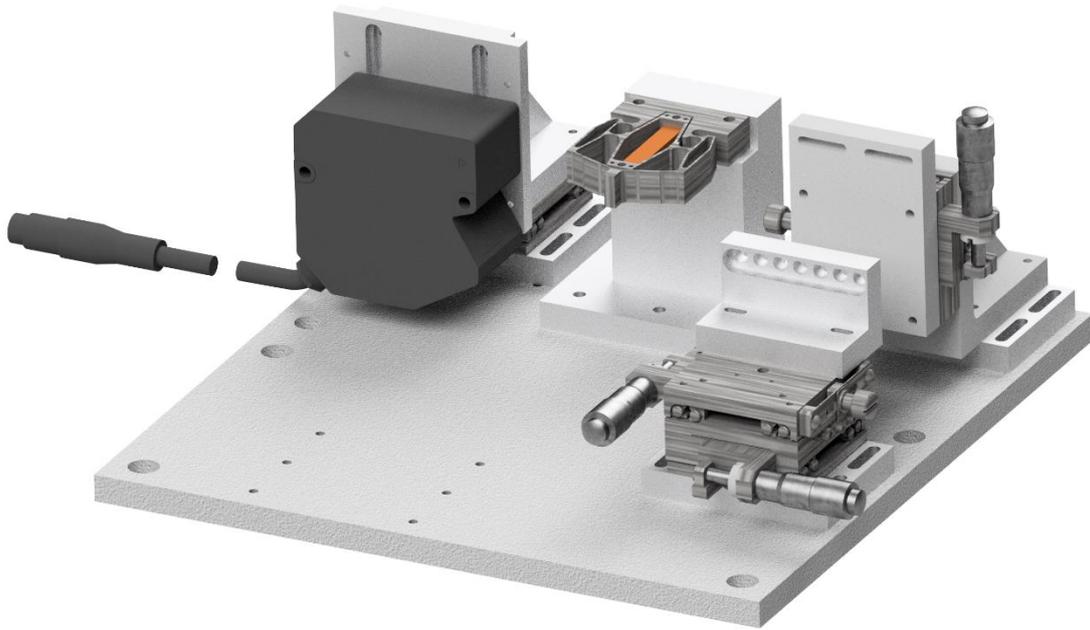


圖 4.8 測量點(D, X)實驗架構設計圖。

4.4.1 總行程實驗結果

巢狀撓性壓電行程放大機構之最大行程如圖 4.9 所示，在驅動電壓達 150 V 時，撓性機構之測量點(A, Y)位移最高可達 285 μm ，其中藍色實線為 0 V 到 150 V 之伸長位移，橘色虛線為 150 V 到 0 V 之縮短位移。

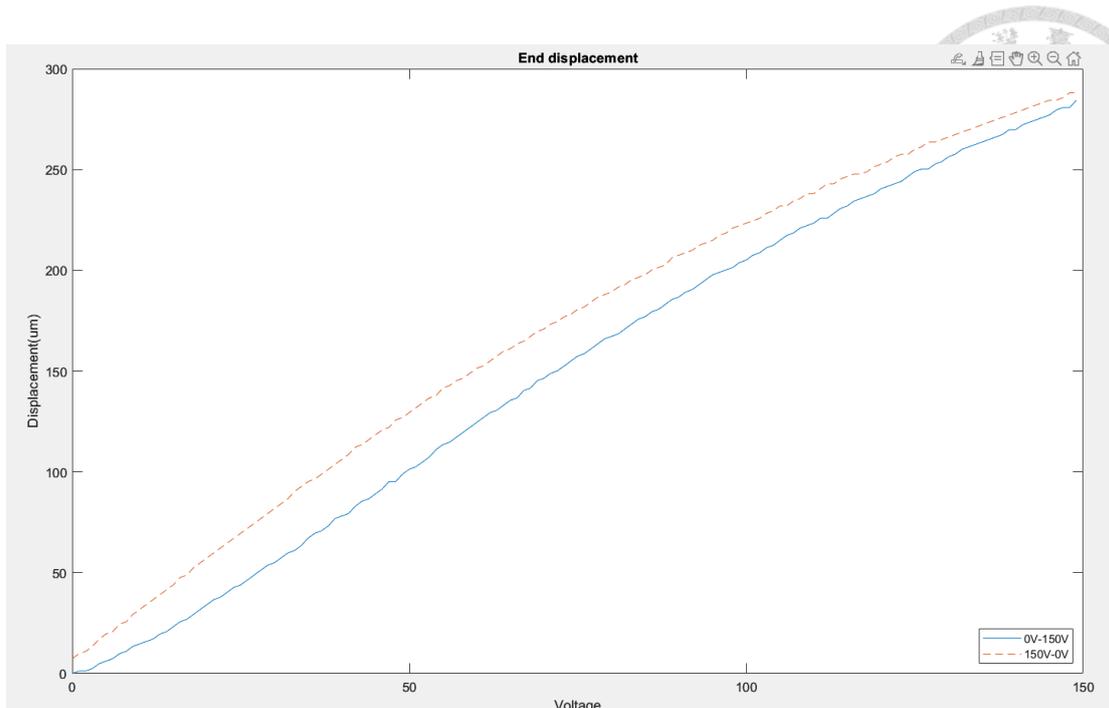


圖 4.9 測量點(A, Y)位移圖，藍色實線為 0 V 到 150 V 之伸長位移，橘色虛線為 150 V 到 0 V 之縮短位移。

4.4.2 壓電元件伸長量實驗結果

積層式壓電元件受到撓性放大機構壓力後其伸長量與驅動電壓之關係如圖 4.10，藍色實線為 0 V 到 150 V 之伸長位移，橘色虛線為 150 V 到 0 V 之縮短位移，其中圖 4.10 (a)、(b)分別為

圖 4.6 中測量點(E, Y)、(F, Y)位移量，因為位移方向不同，故(E, Y)位移量為 0 μm 到 15 μm ，(F, Y)位移量為 0 μm 到 -9 μm 。圖 4.10 (c)為圖 4.10 (a)、(b)之差值，由圖 4.10 (c)可知壓電元件之伸長量在受到撓性機構的壓力後由 44 μm 減少至 24 μm 。

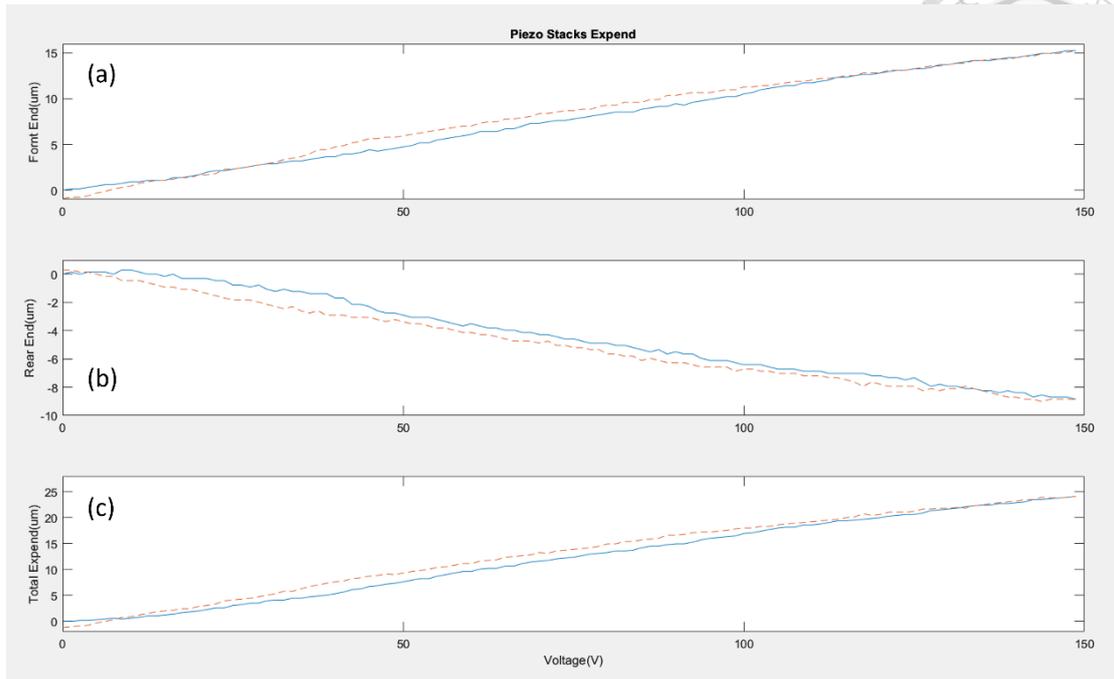


圖 4.10 壓電元件(a)測量點 (E, Y)位移量、(b) 測量點(F, Y)位移量、(c) (E, Y)- (F, Y)位移圖，其中藍色實線為 0 V 到 150 V 之伸長位移，橘色虛線為 150 V 到 0 V 之縮短位移。

4.4.3 半菱形撓性放大結構位移放大量實驗結果

圖 4.11(a)為測量點(A, Y)位移量，0 V 到 150 V 之位移為 285 μm ，圖 4.11(b)為第二層之槓桿結構之測量點(D, X)位移量，0 V 到 150 V 之位移為 106 μm ，兩邊共 212 μm 。由此實驗可知，第三層之半菱形結構放大量約為 1.35 倍。

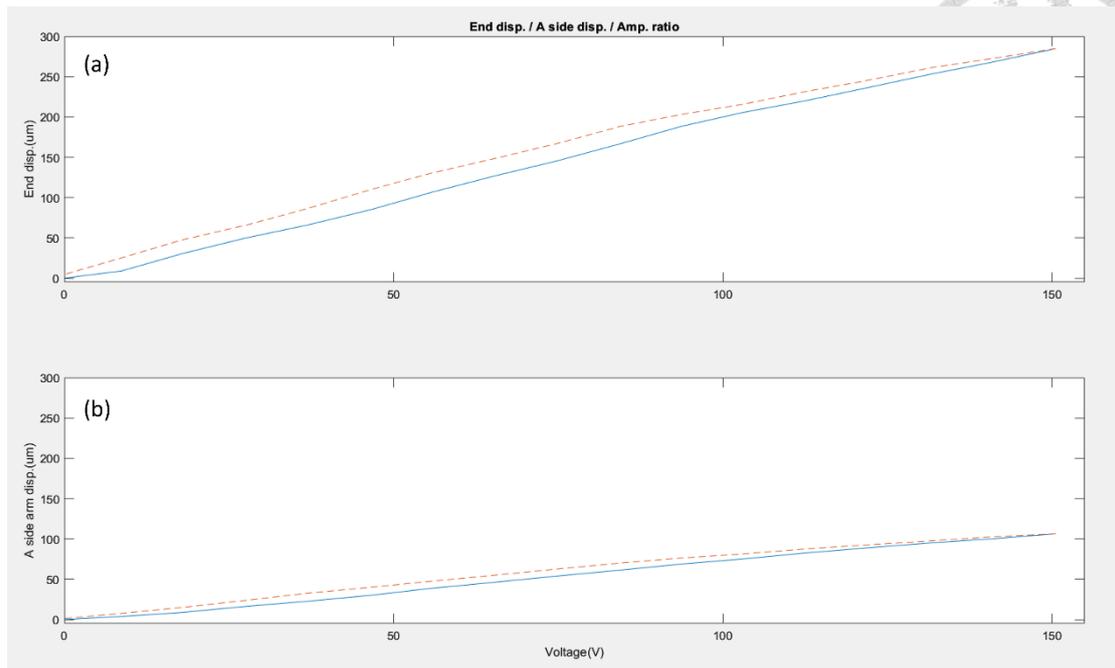


圖 4.11(a)測量點(A, Y)位移量與(b)槓桿末端測量點(D, X)位移量。

4.4.4 總行程放大量實驗結果

巢狀撓性放大機構之總位移量為 $285 \mu\text{m}$ ，而壓電元件受到預壓及推動放大機構後之輸入位移量為 $24 \mu\text{m}$ ，因此此機構之行程放大能力約為 11.5 倍，與有限元素模擬之結果相同。

4.5 巢狀撓性結構推力實驗

本實驗目的在於測量撓性機構輸出端之推動力量大小，即測量點(A, Y)，撓性機構可以推動之力量大小，即其剛性，也是在文獻中常被提出並進行比較的參數，本實驗之架構圖如圖 4.12。首先由 myRio 之類比輸出腳位輸出電壓訊號，控制壓電驅動器(PD200)輸出 0 V 到 150 V 之高壓，驅動積層式壓電元件並推動撓性機構，撓性機構再推動荷重元，由於荷重元在受力後也會產生變形，因此需要由一雷射位移計(LK-H052)測量撓性機構推動荷重元後之位移量，荷重元被推動所產生的電訊號由前置放大器濾波放大後傳回 myRio 之類比輸入腳位並傳回 PC 紀錄，同時雷

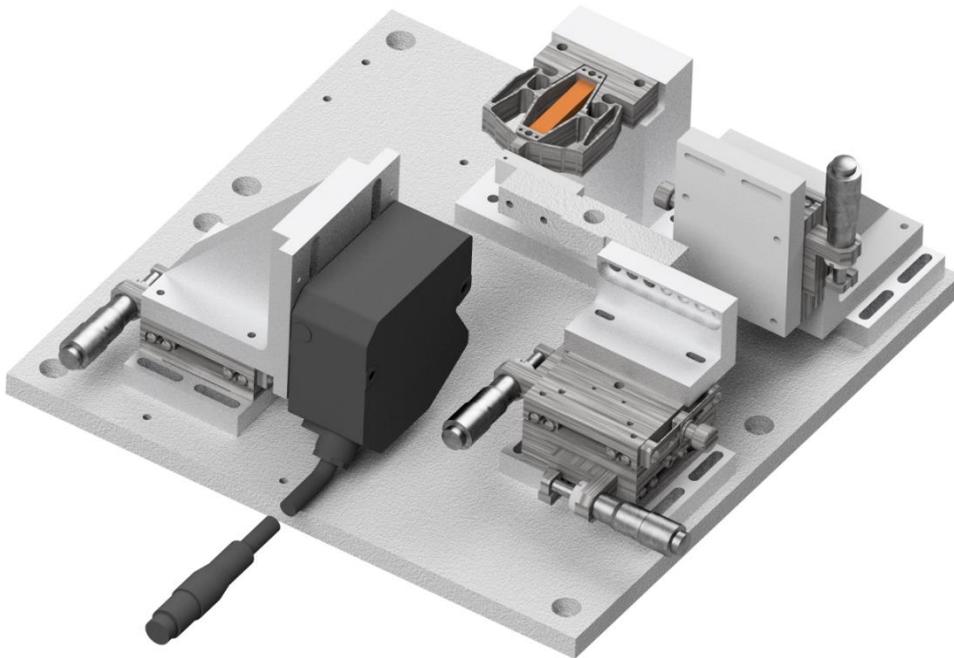


圖 4.13 推力實驗機構設計圖。

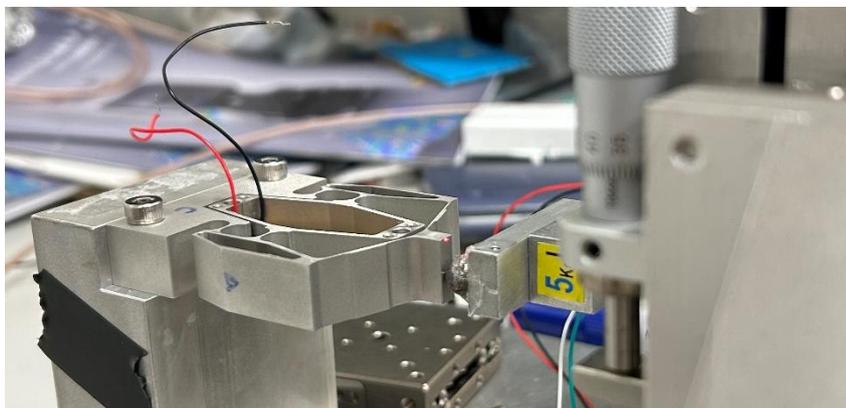


圖 4.14 雷射位移計光斑位置。

4.5.1 巢狀撓性結構推力實驗結果

圖 4.16(a)、(b)、(c)、(d)分別為巢狀撓性壓電放大機構之推力圖、推動荷重元之位移、空負載位移及相對之剛性圖。由圖 4.16(b)、(c)可知，在驅動電壓為 150 V

的條件下，撓性壓電行程放大裝置將荷重元推動了 $160\ \mu\text{m}$ ，相比空負載的情況下減少 $125\ \mu\text{m}$ 的行程。藉由圖 4.15 可知，我們可以使用推動位移量及力量計算出荷重元之彈性係數 k 值，如圖 4.15 中之箭頭(a)之斜率，配合 4.4.1 之總行程實驗結果，可以得出斜直線(b)，其中斜直線(b)之斜率即為撓性結構之輸出端 k 值。且由圖 4.16(a)可知，在驅動電壓為 150V 時，荷重元受到的推力為 19.8N ，由以上條件可計算出本研究所提出之撓性放大機構輸出端之機械剛性為 $0.1584\text{N}/\mu\text{m}$ ，如式 (4.4)，圖 4.16(d)則展示了使用以上條件在不同電壓所計算出的剛性。

$$19.8\text{ N} \div 125\ \mu\text{m} = 0.1584\text{ N}/\mu\text{m} \quad \text{式(4.4)}$$

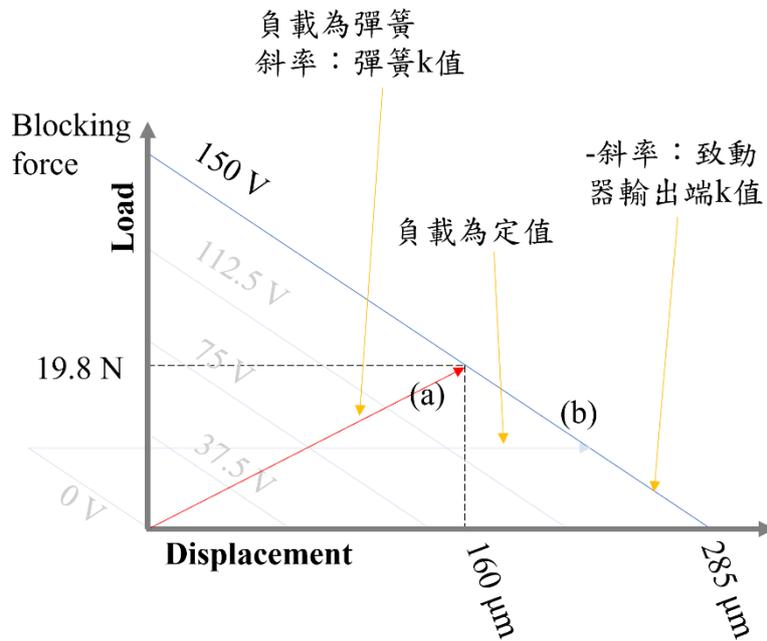


圖 4.15 位移負載示意圖。

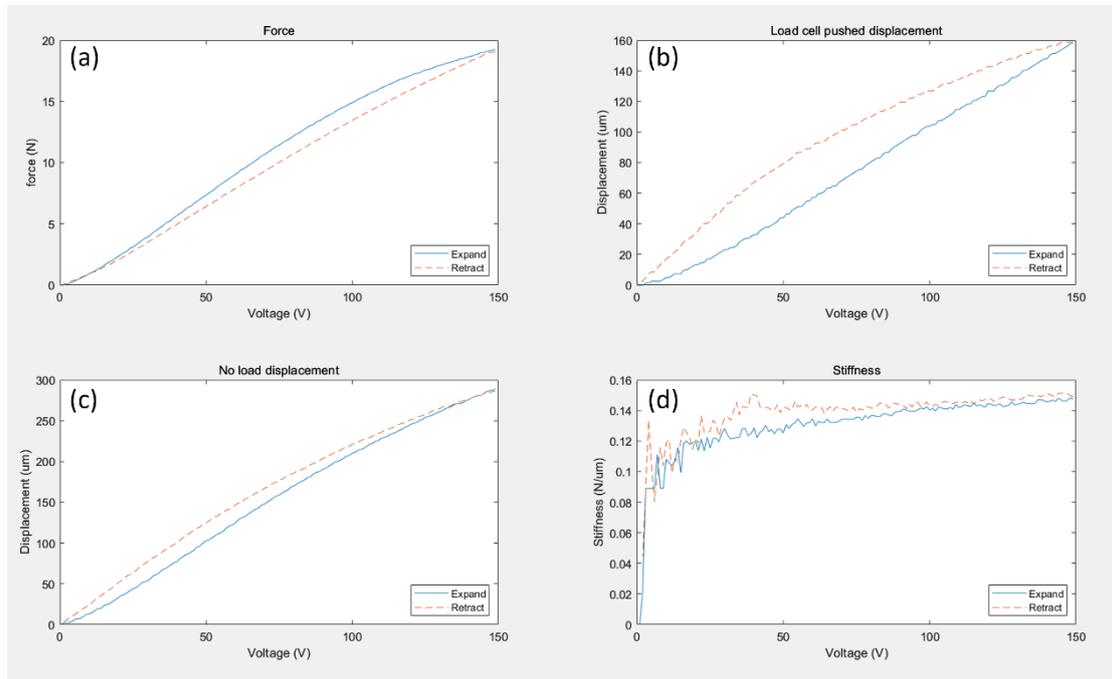
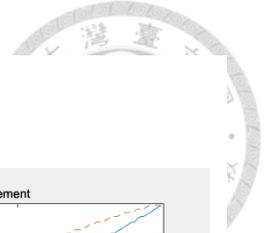


圖 4.16 巢狀撓性放大機構(a)推力(b)推動荷重元位移(c)空負載位移(d)剛性圖。

4.6 頻率響應實驗

共振頻率常被用於衡量一機械元件之動態強度，一般會要求機械元件的共振頻率至少達到工作頻率的三倍以上，本實驗之目的在於測量出撓性壓電放大機構的共振頻率及其相應模態，以提供應用時的相關參考。在本節將會使用 3.4 節中的兩種非接觸光學量測元件測量巢狀撓性壓電撓性放大機構之頻率響應特性，雷射位移計用於測量測量點(A, Y)及第二層撓性槓桿之末端測量點(D, X)位移等振幅較大的部分，其振幅約為 $500 \mu\text{m}$ 到 $10 \mu\text{m}$ 之間，紅光讀取頭用於測量第一層菱形放大結構之測量點(E, Z)與輸出端之測量點(B, Z)，其振幅小於 $10 \mu\text{m}$ 。根據有限元素模擬的結果，本研究所提出之驅動方向共振模態約在 979 Hz ，因此在本節之實驗將以弦波驅動壓電致動器並測量 5 Hz 至 1600 Hz 之響應，驗證前述之各模態及其頻率。



4.6.1 共振模態掃頻實驗

首先由 myRio 輸出數位訊號至鎖相放大器，再由鎖相放大器輸出與數位訊號相同頻率之 $\pm 2.5\text{ V}$ 弦波至積層式壓電元件，接著以雷射位移計測量不同測量點受到激振後的響應，將雷射位移計控制器輸出之類比訊號進行低通濾波後，輸入鎖相放大器，將振幅訊號轉換為電壓訊號，傳回 myRio 及 PC 進行處理。

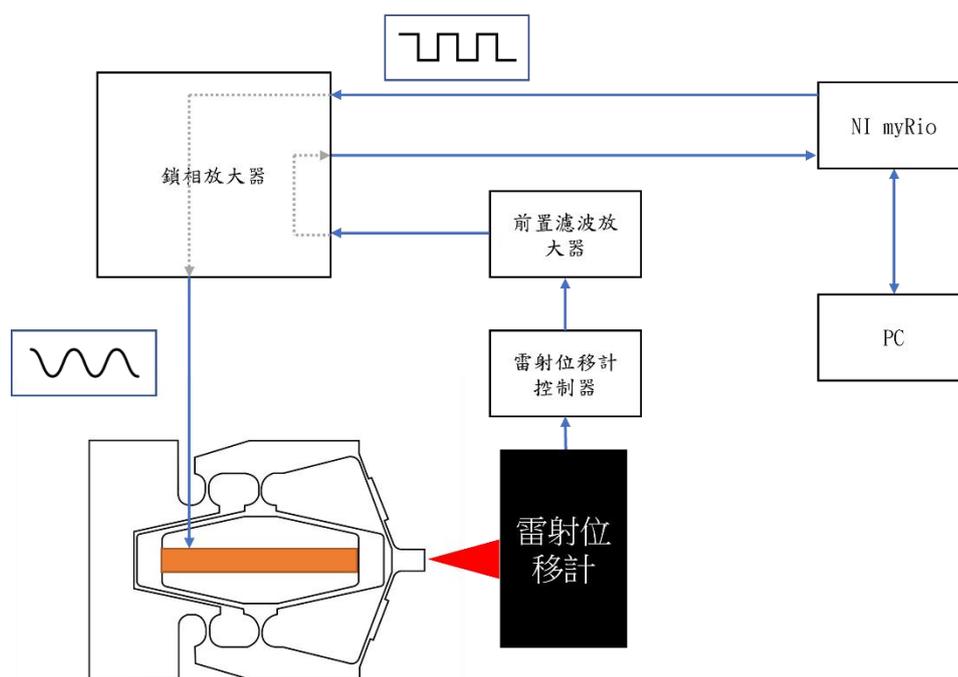


圖 4.17 巢狀撓性放大機構模態實驗架構圖，使用雷射位移計。

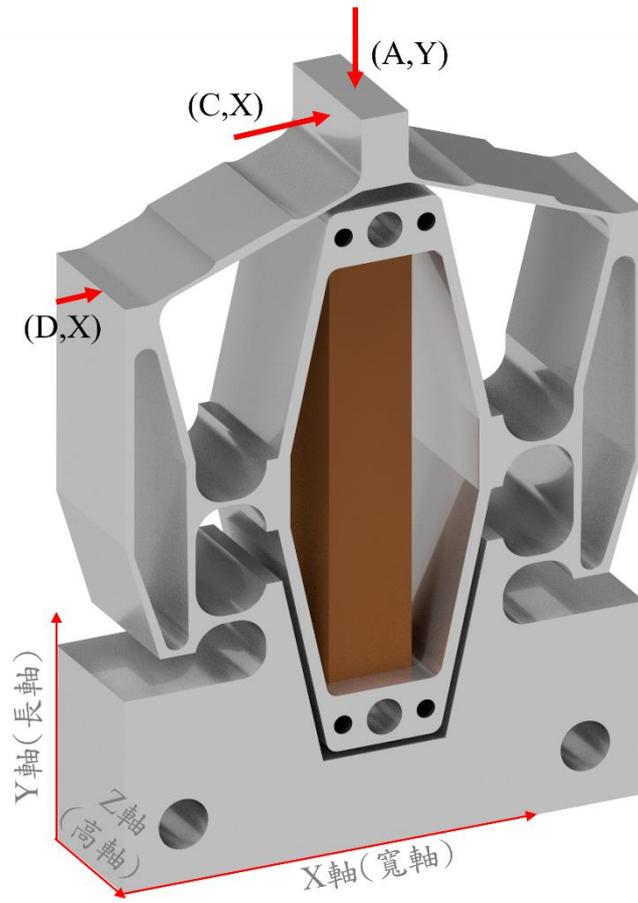


圖 4.18 雷射位移計振幅測量點與測量方向示意圖。

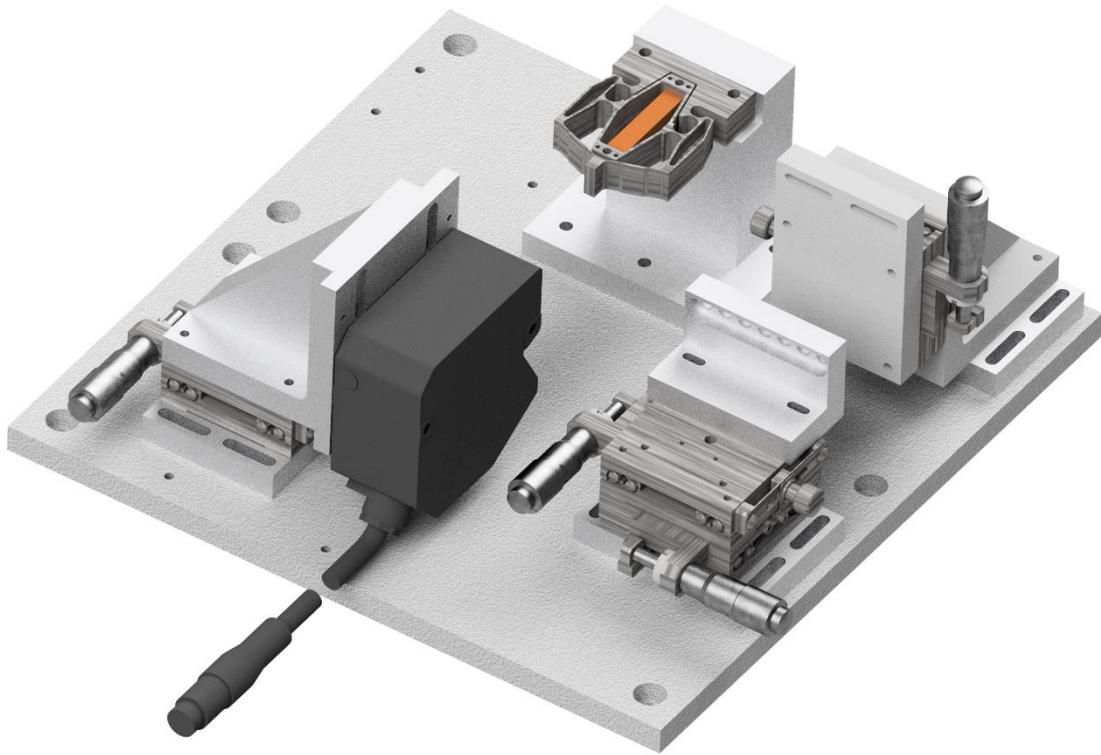


圖 4.19 共振模態掃頻實驗，測量點(A, Y)實驗架構設計圖。

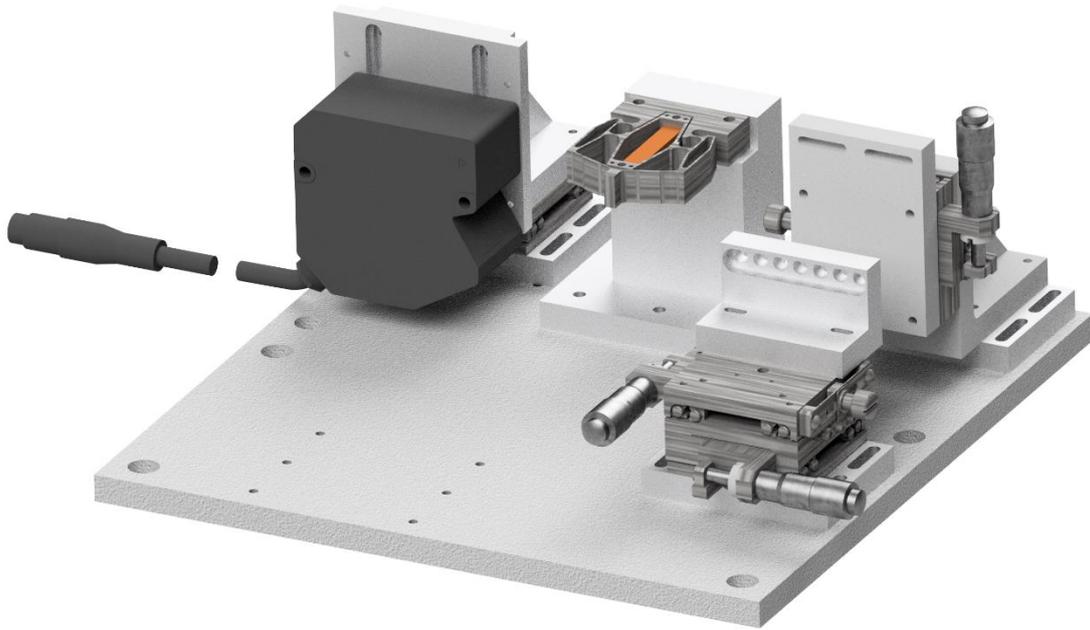


圖 4.20 測量點(C, X)、(D, X)實驗架構設計圖。

使用讀取頭測量振幅流程與使用雷射位移計大致相同，首先由 myRio 輸出數位訊號至鎖相放大器，再由鎖相放大器輸出與數位訊號相同頻率之 $\pm 2.5\text{ V}$ 弦波至積層式壓電元件，接著以紅光讀取頭測量不同測量點受到激振後的響應，將雷射位移計控制器輸出之類比訊號進行低通濾波後輸入鎖相放大器，由鎖相放大器將振幅訊號轉換為電壓訊號，傳回 myRio 及 PC 進行處理，不同之處在於讀取頭需要反射良好及反射率穩定度高之表面，因此在待測表面貼上無鹼玻璃以提高測量之一致性。

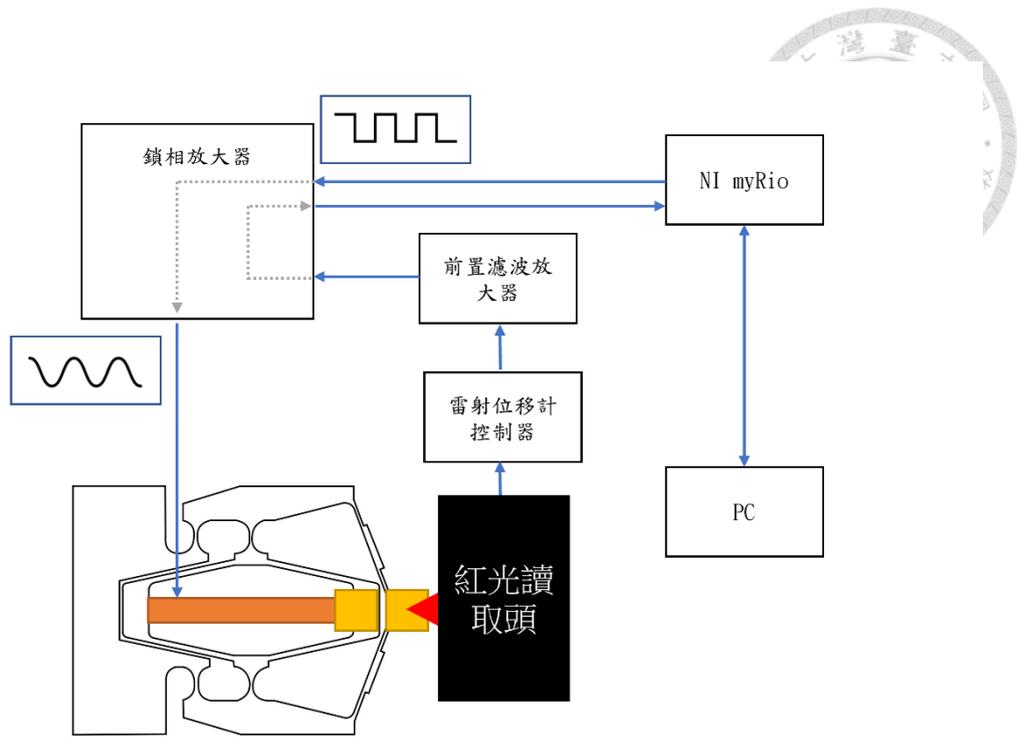


圖 4.21 巢狀撓性放大機構模態實驗架構圖，使用紅光讀取頭。

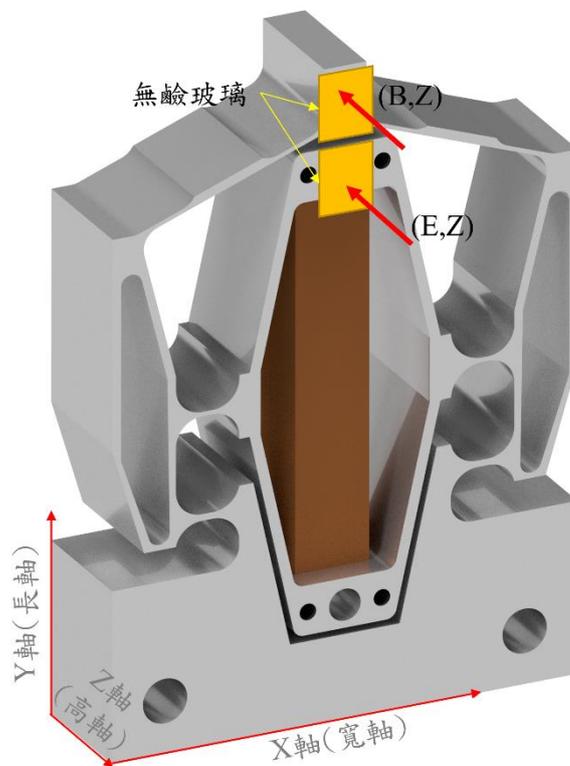


圖 4.22 紅光讀取頭振幅測量點與測量方向示意圖。

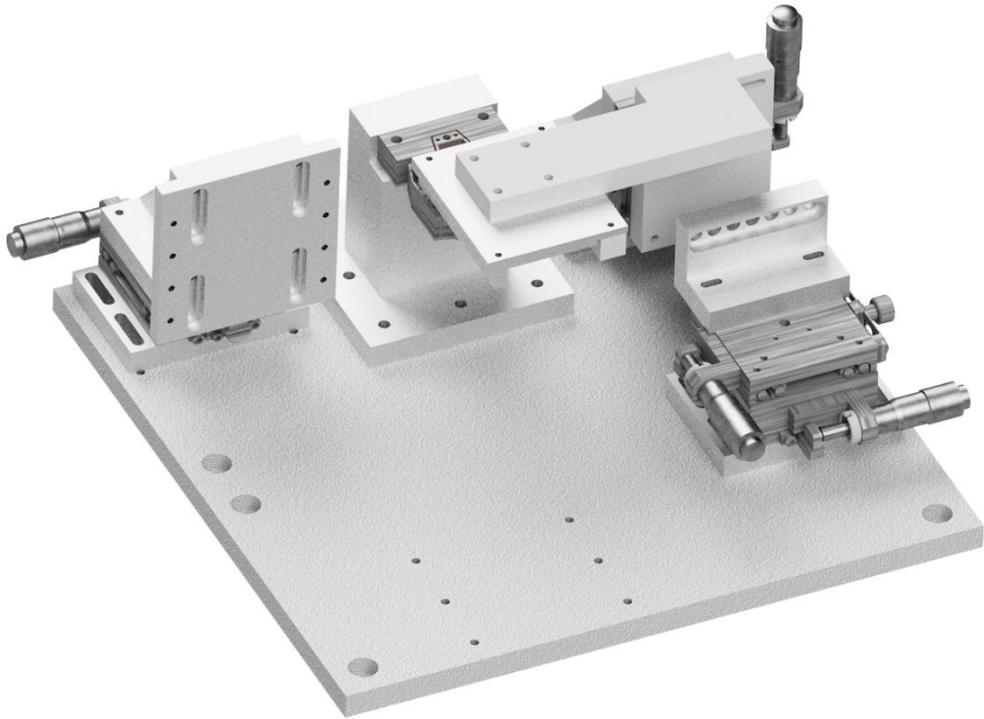


圖 4.23 共振模態掃頻實驗，使用紅光讀取頭實驗架構設計圖。



4.6.2 輸出端主軸(A, Y)頻率響應

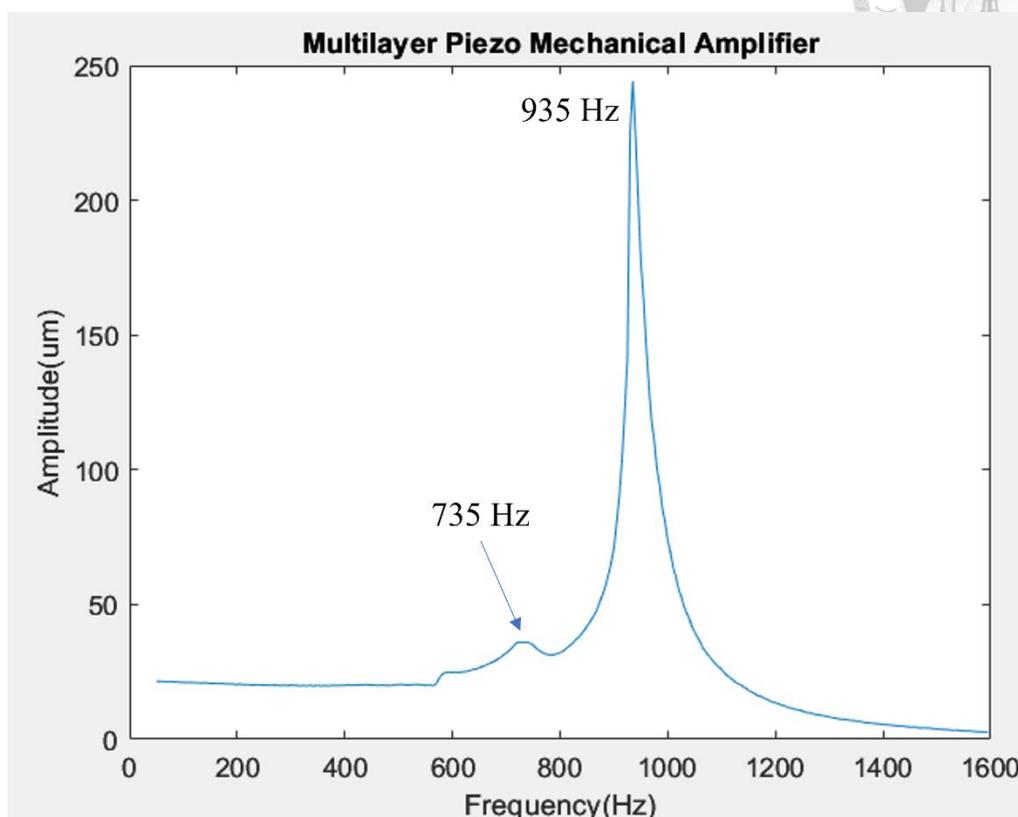


圖 4.24 輸出端(A, Y)頻率響應圖。

對測量點(A, Y)方向進行掃頻，發現在測量的範圍內有多個峰值，由低至高分別為 575 Hz、735 Hz、935 Hz，其中 935 Hz 在輸出主軸最為明顯，如圖 4.24 所示，判斷為與壓電推動方向相同之模態，如圖 2.7 之第三共振模態，而以上結果也與有限元素模擬結果吻合。



4.6.3 第二階槓桿臂(D, X)頻率響應

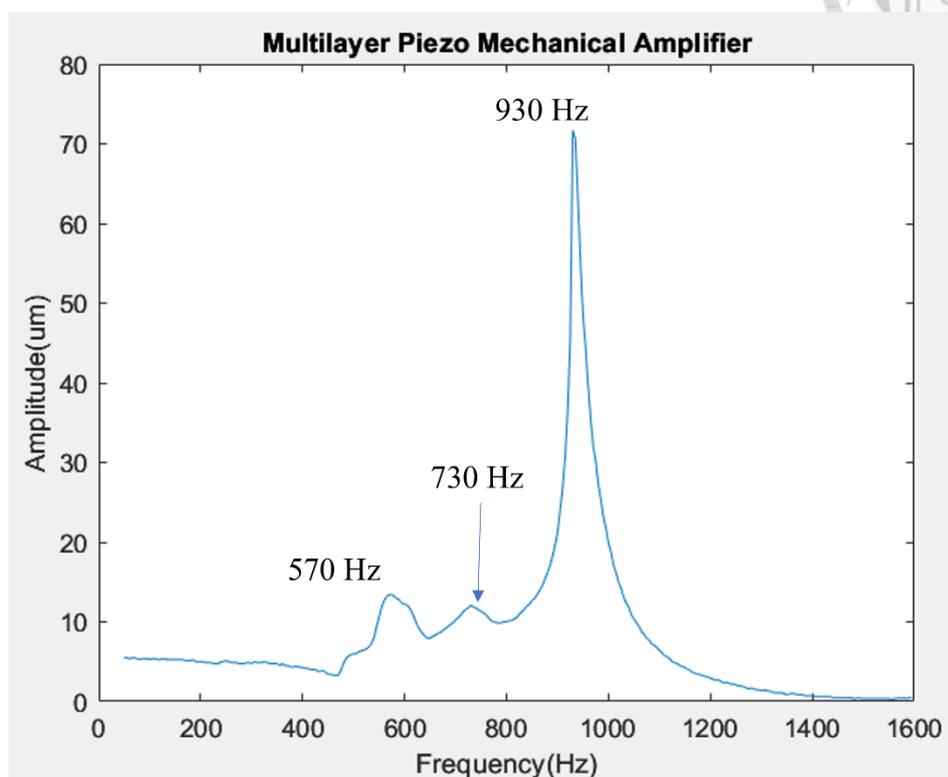


圖 4.25 第二階槓桿測量點(D, X)頻率響應圖。

對撓性壓電機構第二階放大結構的撓性槓桿臂末端之測量點(D, X)掃頻，與主軸方向之結果相似，發現在測量的範圍內有多個峰值，由低至高分別為 570 Hz、730 Hz、930 Hz，其中 930 Hz 在輸出主軸最為明顯，如圖 4.25 所示，判斷為與壓電推動方向相同之模態，如圖 2.7 之第三共振模態。



4.6.4 撓性末端(C, X)頻率響應

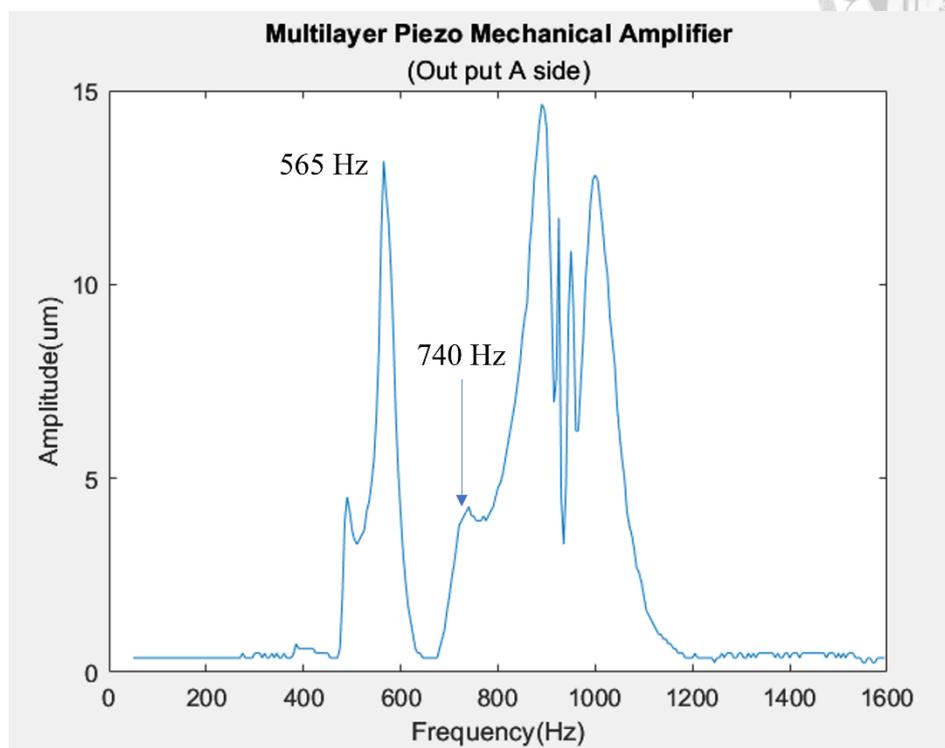


圖 4.26 輸出端測量點(D, X)頻率響應圖。

為驗證圖 2.7 中經有限元素模擬所得的第一模態之頻率響應，對巢狀撓性壓電放大機構的輸出端測量點(D, X)，以雷射位移計進行掃頻實驗。實驗結果如圖 4.26 所示，相較於主軸方向達到 240 μm 之振幅，輸出端側面只有 15 μm 的振幅，因此解析之能力較不理想，但也可觀察到三個共振頻率，約在 570 Hz、740 Hz 及 935 Hz。



4.6.5 撓性末端(B, Z)頻率響應

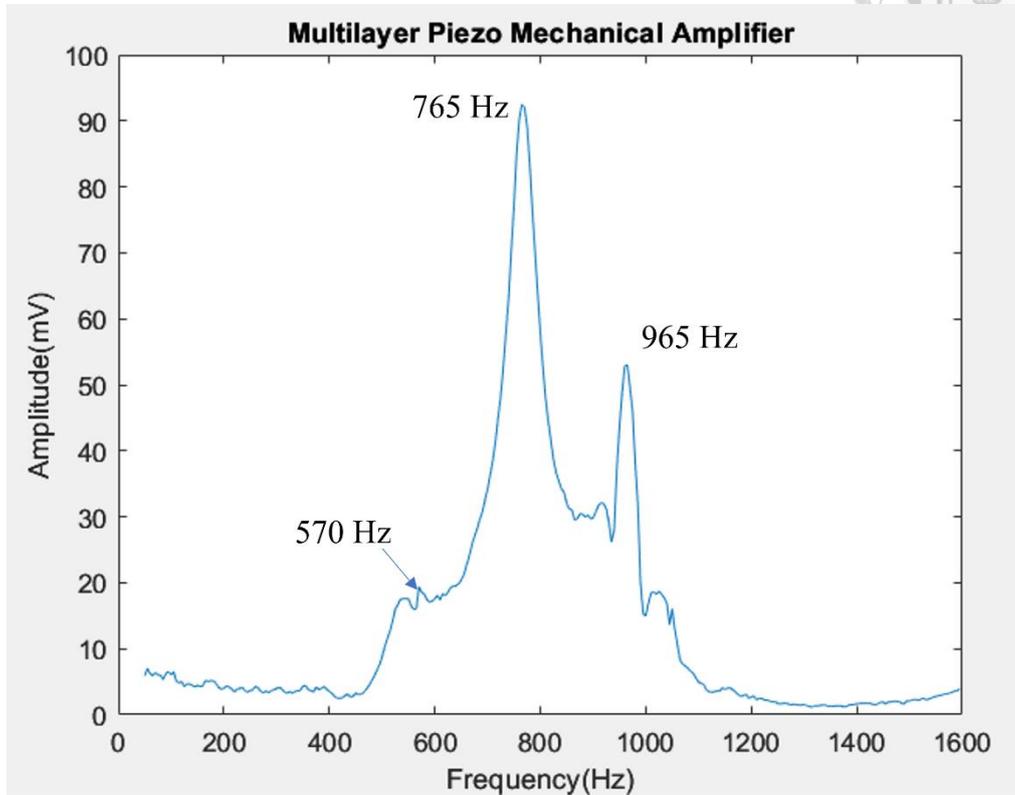
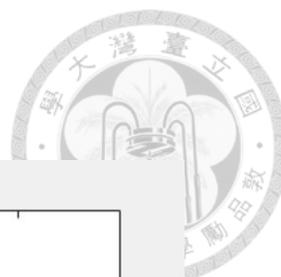


圖 4.27 輸出端測量點(B, Z)頻率響應圖。

對撓性機構的輸出端測量點(B, Z)掃頻，結果如圖 4.27，測量的範圍內有多個峰值，由低至高分別為 570 Hz、765 Hz、965 Hz，與先前在主軸之測量結果相似，而不同之處在於，其中 765 Hz 較其他兩個頻率的振幅更大，推測為結構整體對第二層撓性槓桿結構支點振動之共振模態，如圖 2.7 中第二共振模態。



4.6.6 壓電柱輸入端(E, Z)頻率響應

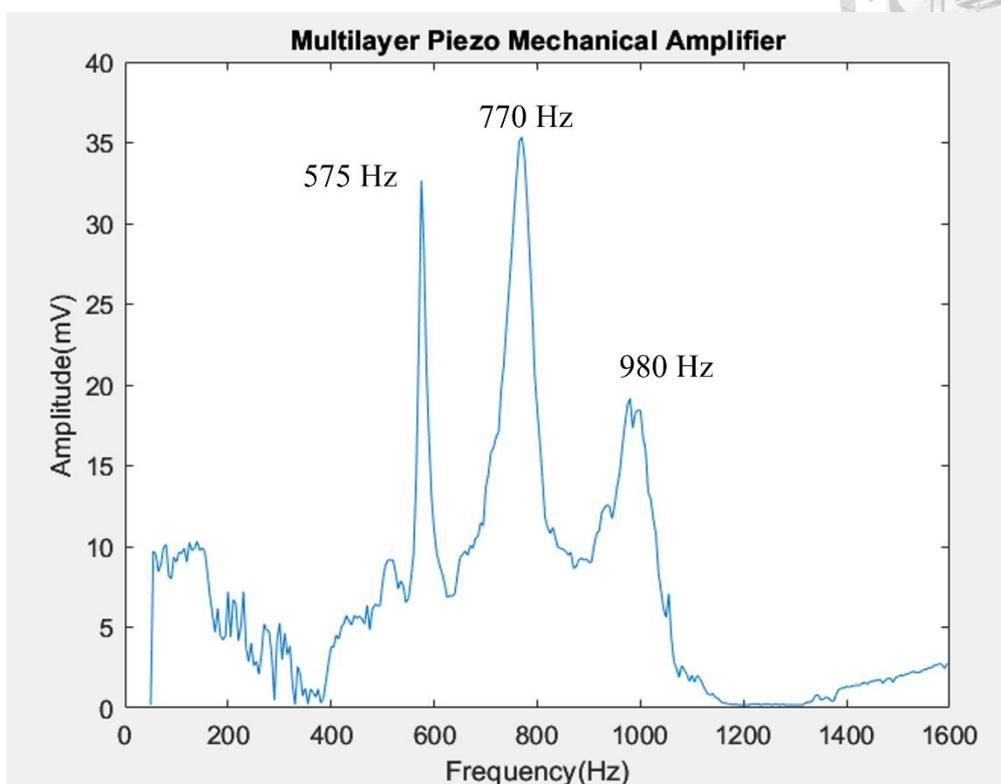


圖 4.28 壓電柱輸入端測量點(E, Z)頻率響應圖。

對第一層之菱形結構上之測量點(E, Z)掃頻，結果如圖 4.28，可以觀察到多個峰值，而各峰值之頻率與先前結果相近，如上節之結果所推測，770 Hz 之峰值應為整個撓性結構對槓桿支點振動之模態，而 575 Hz 在菱形結構側面較輸出端的側面更為突出，因此推測為菱形放大結構對菱形結構輸出端之振動之模態，如圖 2.7 之第四共振頻。

4.7 結果與討論

本研究所提出之撓性壓電放大器使用 Thorlab 的積層式壓電元件，驅動電壓最高達 150 V，無負載行程 44 μm ，有負載行程 24 μm 。輸出行程則為 285 μm ，行程之放大倍率約為 11.5 倍。輸出端之機械剛性為 0.1584 N/ μm 。機構在 0~1600 Hz 中有 3 個較明顯之共振頻率，分別為 570 Hz、730 Hz、935 Hz，其中 935 Hz 為主軸方向之共振模態。

第五章 結論與未來展望



本研究提出一三層式巢狀撓性壓電行程放大機構，經實驗驗證其放大倍率、輸出力量及共振頻率等特徵。該機構結合了菱形、槓桿及半菱形放大結構，利用不同放大結構之特徵，有效利用空間，縮小三種結構結合後占用之空間，此機構之尺寸為 $61 \times 44 \times 16$ mm，由一 $7 \times 7 \times 32$ mm 之積層式壓電元件驅動，最大驅動電壓為 150 V，輸出行程達 $285 \mu\text{m}$ ，在同尺寸之撓性壓電放大機構中，擁有優異之位移行程。

共振頻率方面，與工作型態相同之主共振模態之頻率達 935 Hz，雖然有較低頻率之其他模態，但因未受到激發，與主模態相比較不明顯。本研究提出之撓性放大機構因為縮小了槓桿尺寸，使得共振頻率有較優的表現，可以說在行程、共振頻率與強度間取得了理想的平衡。

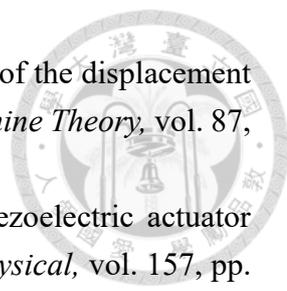
本研究之未來展望如下：

1. 以相同之設計，開發系列的壓電致動器，例如使用較短之積層式壓電元件，進一步縮短槓桿的尺寸，提高共振頻率與輸出剛性。
2. 共振頻率實驗直接激振相應之模態，而非以驅動壓電對機構進行激振。
3. 直接測量輸入剛性，更精準控制預壓力之大小。

參考文獻



- [1] S. Mohith, A. R. Upadhy, K. P. Navin, S. M. Kulkarni, and M. Rao, "Recent trends in piezoelectric actuators for precision motion and their applications: A review," *Smart Materials and Structures*, vol. 30, p.013002, 2020.
- [2] B. Bera and M. Das Sarkar, "Piezoelectric effect, piezotronics and piezophotonics: A review," *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, vol. 2, pp. 1407-1410, 2016.
- [3] A. V. Carazo, "Piezoelectric transformers: An historical review," *Actuators*, vol. 5, p. 12, 2016.
- [4] M. A. Trimzi, Y. B. Ham, B. C. An, Y. M. Choi, J. H. Park, and S. N. Yun, "Development of a piezo-driven liquid jet dispenser with hinge-lever amplification mechanism," *micromachines*, vol. 11, p. 117, 2020.
- [5] H. S. Liao, S. H. Cheng, and E. T. Hwu, "Development of a resonant scanner to improve the imaging rate of astigmatic optical profilometers," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 26, pp. 1172-1177, 2021.
- [6] J. P. Lia, H. Huang, and T. Moritac, "Stepping piezoelectric actuators with large working stroke for nano-positioning systems: A review," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 292, pp. 39-51, 2019.
- [7] W. Ma, R. Q. Wang, X. Q. Zhou, and G. W. Meng, "The performance comparison of typical notched flexure hinges," *Mechanical Engineering Science*, vol. 234, pp. 1859-1867, 2019.
- [8] J. Mizrahi, *Kinematics: Analysis and Applications*. BoD – Books on Demand, 2019.
- [9] Y. K. Yong, S. O. R. Moheimani, B. J. Kenton, and K. K. Leang, "Invited review article: High-speed flexure-guided nanopositioning: Mechanical design and control issues," *Review of Scientific Instruments*, vol. 83, 2012.
- [10] M. X. Ling, J. Y. Cao, M. H. Zeng, J. Lin, and D. J Inman, "Enhanced mathematical modeling of the displacement amplification ratio for piezoelectric compliant mechanisms," *Smart Materials and Structures*, vol. 25, p. 075022, 2016.
- [11] J. L. Chena, C. L. Zhang, M. L. Xub, Y. Y. Zia, and X. Zhang, "Rhombic micro-displacement amplifier for piezoelectric actuator and its linear and hybrid model," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 50, pp. 580-593, 2015.
- [12] Y. Z. Li, S.S. Bi, and C.X. Zhao, "Analytical modeling and analysis of rhombus-type amplifier based on beam flexures," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 139, pp. 195-211, 2019.
- [13] Q. S. Xu and Y.M. Li, "Analytical modeling, optimization and testing of a compound bridge-type compliant displacement amplifier," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 46, pp. 183-200, 2011.

- 
- [14] K. Q. Qi, Y. Xiang, C. Fang, Y. Zhang, and C. S. Yu, "Analysis of the displacement amplification ratio of bridge-type mechanism," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 87, pp. 45-56, 2015.
- [15] M. Muraokaa and S. Sanada, "Displacement amplifier for piezoelectric actuator based on honeycomb link mechanism," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 157, pp. 84-90, 2010.
- [16] M. X. Ling, L. Yuan, Z. H. Luo, T. Huang, and X. M. Zhang, "Enhancing dynamic bandwidth of amplified piezoelectric actuators by a hybrid lever and bridge-type compliant mechanism," *Actuators*, vol. 11, p. 134, 2022.
- [17] X. Yang, L. Zhu, S. Li, W. Zhu, and C. Ji, "Development of a novel pile-up structure based nanopositioning mechanism driven by piezoelectric actuator," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 25, pp. 502-512, 2020.
- [18] J. H. Kim, S. H. Kim, and Y. K. Kwak, "Development of a piezoelectric actuator using a three-dimensional bridge-type hinge mechanism," *Review of Scientific Instruments*, vol. 74, pp. 2918-2924, 2003.
- [19] S. B. Choi, S. S. Han, Y. M. Han, and B. S. Thompson, "A magnification device for precision mechanisms featuring piezoactuators and flexure hinges: Design and experimental validation," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 42, pp. 1184-1198, 2007.
- [20] X. B. Zhu, X. Xu, Z. J. Wen, J. Q. Ren, and P. K. Liu, "A novel flexure-based vertical nanopositioning stage with large travel range," *Review of Scientific Instruments*, vol. 86, 2015.
- [21] P. R. Ouyang, W. J. Zhang, and W. J. Zhang, "A new compliant mechanical amplifier based on a symmetric five-bar topology," *Journal of Mechanical Design*, vol. 130, 2008.
- [22] I. S. Hwang, E. T. Hwu, K. Y. Huang, C. S. Chang, H. S. Liao, W. M. Wang, Y. H. Chen, C. H. Chen, C. H. Cheng, and H. F. Huang, "Astigmatic detection system: New tool for precision measurements," *科儀新知*, vol. 200, pp. 46-65, 2014.
- [23] D. K. Cohen, W. H. Gee, M. Ludeke, and J. Lewkowicz, "Automatic focus control: The astigmatic lens approach," *Applied Optics*, vol. 23, pp. 565-570, 1984.

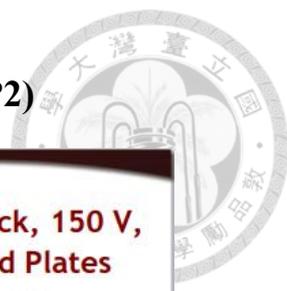
附錄

附錄 A 紅光讀取頭規格表



Item	Specifications		
	DVD	CD	Unit
Laser diode wavelength	655	790	nm
Objective lens	Aspheric plastic lens	Aspheric plastic lens	
Numerical aperture	0.6	0.47	
Working distance	1.28	0.91	mm
Focal length	2.33	2.35	mm
Emission power			
Typical power	0.23	0.17	mW
Maximum power	0.373	0.297	mW
Detection method			
Focusing	Astigmatism	Astigmatism	
Tracking	DPD	3-spot	
Photo detector	PDIC with I/V Amp	PDIC with I/V Amp	
PDIC Response Frequency	80	45	MHz
Dimensions	48.7(W) x 36.7(D) x 7.5(H) mm		
Unit weight	~18g		
Operating temperature	0~60°C		
Storage temperature	-30~70°C		

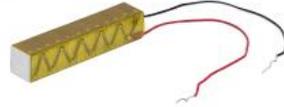
附錄 B 積層式壓電元件規格書(PK4GYP2)



THORLABS

Piezoelectric Stack, 150 V, 38.0 μm , Two End Plates

PK4GYP2



Description

The PK4GYP2 piezoelectric stack consists of multiple chips which are bonded via epoxy and glass beads. It offers a maximum displacement of $38.0 \mu\text{m} \pm 15\%$. A red wire is attached to the electrode that should receive positive bias, and a black wire is attached to the electrode that should be grounded.

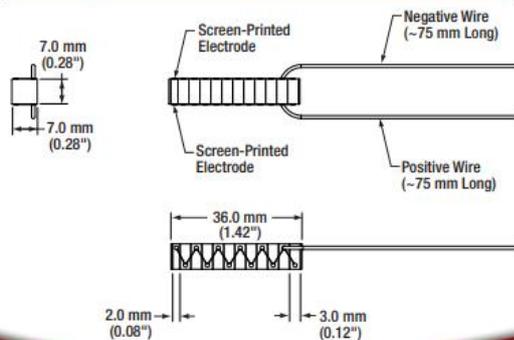
Specifications

PK4GYP2 ^a	
Drive Voltage Range	0 - 150 V
Displacement (Free Stroke) at 150 V	$38.0 \mu\text{m} \pm 15\%$
Hysteresis	<15% (See Graph on Next Page)
Load (Recommended) ^b	785 N (177 lbs)
Blocking Force at 150 V	1960 N (441 lbs)
Resonant Frequency	35 kHz (No Load)
Impedance at Resonant Frequency	80 m Ω
Dissipation Factor	<2.0%
Capacitance	$6.0 \mu\text{F} \pm 15\%$
Operating Temperature	-25 to 130 °C
Curie Temperature	230 °C
External Electrodes	Screen-Printed Silver
Outer Dimensions ^c	7.3 mm x 8.9 mm x 36.0 mm
Piezo Stack Dimensional Tolerance	$\pm 0.1 \text{ mm}$



- All specifications are quoted at 25 °C, unless otherwise stated.
- The displacement may vary slightly for different loads, and the maximum displacement occurs when used with the recommended load.
- Outer dimensions include the electrodes, wire connection area, and Kapton® tape but not the length of the wires.

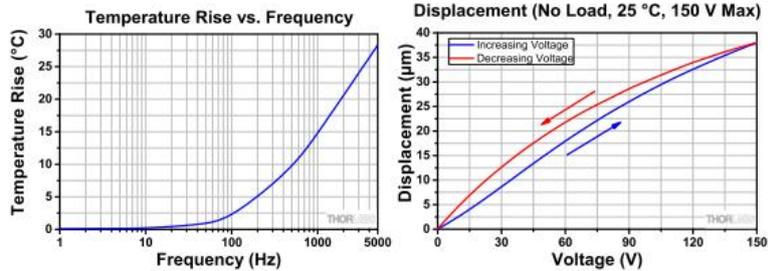
Drawing



Specifications Subject to Change without Notice

July 7, 2020
CTN003160-S01, Rev B
www.thorlabs.com/contact

Typical Performance Plots



Temperature rises were measured after applying a sine-wave drive voltage ranging from 0 to 150 V at the specified frequency for 10 minutes.

Operation

Electrical Considerations

- The electrode attached to the red wire should be positively biased, and the electrode attached to the black wire should be grounded. The recommended maximum drive voltage is 150 V, and the absolute maximum voltage is 150 V. Exceeding 150 V will decrease the device's lifespan and may cause mechanical failure. Reverse biasing the device may cause mechanical failure.
- If it becomes necessary to reattach the wires to the electrodes, use a soldering iron at a temperature no greater than 370 °C (700 °F) for a maximum of 2 seconds per spot. Solder to the middle of the electrode, keeping the spot as small as possible.
- **Caution:** After driving, the piezo is fully charged. Directly connecting the red and black wires has the risk of electricity discharging, spark, and even failure. We recommend using a resistor (>1 kΩ) between the wires to release the charge.

Attaching Devices to the Piezo

- Any epoxy which cures at a temperature lower than 80 °C is safe to use. We recommend Thorlabs Item Numbers 353NDPK or TS10. Loctite Hysol 9340 is also usable.
- Loads should only be attached to the central area of the largest face since the edges do not translate. Attaching a load to the smaller faces may lead to mechanical failure.

Storage Instructions

- Do not store the device at temperatures above 80 °C.
- Do not store the device in humid environments. The relative humidity (RH) should be less than 40%.
- Do not immerse the device in organic solvents.
- Do not use the device around combustible gases or liquids.

附錄 C PI 規格書 高剛性負載

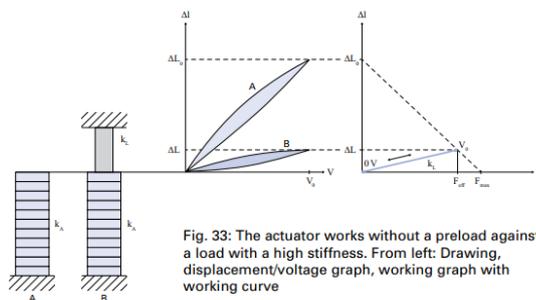


Fig. 33: The actuator works without a preload against a load with a high stiffness. From left: Drawing, displacement/voltage graph, working graph with working curve

Force Generation Without Preload, Load with High Stiffness

When large forces are to be generated, the load stiffness k_L must be greater than that of the actuator k_a (fig. 33):

$$F_{eff} \approx F_{max} \left(\frac{k_L}{k_a + k_L} \right) \quad \text{(Equation 16)}$$

The careful introduction of force is especially important in this load case, since large mechanical loads arise in the actuator. In order to achieve a long lifetime, it is imperative to avoid local pull forces (p. 50).

附錄 D 雷射位移計控制器規格表(LK-G5001)



型號	一體式	LK-G5001V	LK-G5001PV	LK-HA100
	獨立型	LK-G5001/ LK-HD500	LK-G5001P/ LK-HD500	
名稱	主控制器			感測頭擴充模組
感測頭相容性	相容			
可連線的感測頭數	2			1
顯示 (LK-HD500)	最小顯示單位	0.001 μm		無
	顯示範圍	±999.999 μm 到 ±9999.99 mm (有 7 個可選設定)		
	顯示週期	約 10 次 / 秒		
顯示接口	DISPLAY 連接埠	可連線顯示設備 (LK-HD500) 或專用觸控面板 (LK-HD1001)		無
	LED 指示燈	LASER ON		POWER STABILITY BRIGHT DARK
端子台	類比電壓輸出	±10 V，輸出阻抗：100 Ω		
	類比電流輸出	4 到 20 mA，最大負載電阻：350 Ω		
	類比輸出數	2		1
	TIMING1 輸入 *1	無電壓輸入	電壓輸入	無
	RESET1 輸入 *1	無電壓輸入	電壓輸入	
	自動歸零 1 輸入 *1			
	雷射控制 輸入			
	雷射遠端 輸入 *2	無電壓輸入		
警報輸出	NPN 集電極開路輸出	PNP 集電極開路輸出		
一般比較器輸出				
擴充接口	TIMING 輸入	無電壓輸入	電壓輸入	無
	RESET 輸入	無電壓輸入	電壓輸入	
	自動歸零輸入			
	程式切換輸入			
	二進位選擇輸入			
	警報輸出	NPN 集電極開路輸出	PNP 集電極開路輸出	
	比較器輸出			
二進位輸出				



型號	一體式	LK-G5001V	LK-G5001PV	LK-HA100
	獨立型	LK-G5001/ LK-HD500	LK-G5001P/ LK-HD500	
RS-232C 接口	波特率：9600 到 115200 bps 資料長度：8 位元 停止位長度：1 位元 奇偶性：無 / 偶 / 奇			無
USB 接口	符合高速 USB 修訂版 2.0*3			
乙太網接口 *4	100Base-TX/10Base-T			
感測頭擴充模組接口	一個主控制器最多可以連線 10 個感測頭擴充模組			
擴充模組接口	可連線 CC-Link 裝置 (LK-CC100) 或 DeviceNet 裝置 (LK-DN100)			無
電源	電源電壓	24 VDC±10%		24 VDC±10% (由控制器提供)
	最大消耗電流	3.5 A (連線最大數量的感測頭擴充模組時)		
環境耐受性	環境溫度	連線一個或更少的感測頭擴充模組時：0 到 50°C 連線兩個或更多的感測頭擴充模組時：0 到 40°C		
	相對濕度	35 到 85% RH (無冷凝)		
重量	600 g		300 g	

*1 此輸入適用於所有同步的 OUT。

*2 連線 3B 類雷射感測頭時，必須針對此端子的輸入使用鑰匙操作的開關。僅當鑰匙操作的開關設到 ON 位置時，才會發射雷射。(選擇只有在設到 OFF 位置時才能移除的鑰匙。) 連線 1、2/3R 類雷射感測頭時，雷射會在此端子開啟時開啟，在此端子短路時關閉。

*3 連線支援 USB 修訂版 1.1 或全速 USB 修訂版 2.0 的 PC 時，資料刷新週期及其他操作速度可能會減緩。

*4 乙太網連線應僅用於與 PC 的一對一連線，或只包含 PC 與 LK-G5000 系列設備的本機連線。

- NPN 集電極開路輸出的額定值：最大 50 mA (最大 40 V)，剩餘電壓：最大 0.5 V
- PNP 集電極開路輸出的額定值：最大 50 mA (最大 30 V)，剩餘電壓：最大 0.5 V
- 無電壓輸入的額定值：ON 電壓：最大 1 V，OFF 電流：最大 0.6 mA
- 電壓輸入的額定值：最大額定輸入：26.4 V，ON 電壓：10.2 V，OFF 電流：0.6 mA
- LK-G5000 系列的部分輸入 / 輸出電路在內部是共通的。請注意，內部共通端子之間不會因連接線 / 外部裝置之間存在電位差而產生電位差。如需有關詳細資訊，請參閱「配線注意事項」(第 7 頁)。

附錄 E 雷射位移計規格表(LK-H052)



LK-H050/H055/H053/H058/H052/H057/H052K/H057K

型號	LK-H050/ LK-H055	LK-H053/ LK-H058	LK-H052/ LK-H057	LK-H052K/ LK-H057K		
安裝模式	擴散反射	擴散反射	擴散反射	鏡面反射		
參照距離	50 mm	50 mm	50 mm	46.3 mm		
量測範圍 *1	±10 mm	±10 mm	±10 mm	±5.2 mm		
紅色半導體雷射						
光源	波長	655 nm	690 nm	655 nm	655 nm	
	雷射分類	IEC60825-1	3R 類	3B 類	2 類	2 類
		FDA (CDRH) Part 1040.10	IIIa 類	IIIb 類	II 類	II 類
	輸出	4.8 mW	50 mW	0.95 mW	0.95 mW	
光點直徑 (在參照距離處)	φ50 μm (LK-H050/H053/H052/H052K)/ 50 μm x 2000 μm (LK-H055/H058/H057/H057K)					
線性度 *2	滿量程的 ±0.02% (F.S. = 20 mm)					
重複性 *3	0.025 μm					
取樣週期	2.55/5/10/20/50/100/200/500/1000 μs (有 9 個可選步驟)					
溫度波動	滿量程的 0.01%/°C (F.S. = 20 mm)					
環境耐受性	外殼防護等級	IP67				
	環境光	白熾燈或螢光燈：最大 10000 lx				
	環境溫度	0 到 +50°C				
	相對濕度	35 到 85% RH (無冷凝)				
	振動	在 X、Y、Z 方向上，10 到 55 Hz、1.5 mm 雙振幅，各方向均為 2 小時				
材料	壓鑄鋁					
重量 (含纜線)	約 260 g					

*1 如需有關量測範圍的詳細資訊，請參閱第 1-13 頁 (適合取樣週期介於 2.55 與 10 μs 之間的情況)。

*2 此值是透過在普通量測模式下測量 KEYENCE 標準目標 (導致光線漫射的白色對象) 來獲取的。

*3 此值是透過將平均量測次數設定為 16384，在參照距離處測量 KEYENCE 標準目標 (導致光線漫射的白色對象) 來獲取的。