

軟性壓電式觸覺感測器應用於機器人 抓取控制

Grasp Control with Robotic Flexible Piezoelectric Tactile Sensor

莊承鑫、穆建良、陳嘉文

Cheng-Hsin Chuang, Chien-Liang Mu, Jia-Wun Chen

本研究所提出軟性壓電式觸覺感測器，可辨認滑動與檢測動態側向力量之功能。為了防止機器手臂於抓取過程中發生掉落的情況，其機器人檢測未知重量的物體時的初始滑動訊號則為最重要的事情。此感測器利用軟性電路板 (FPC) 製作出兩個結構化電極夾著壓電薄膜 (PVDF)，利用內部凹凸結構彎曲作用，以感測器所產生的靜摩擦力現象使壓電薄膜 (PVDF) 輸出電壓值進行滑動檢測，因此兩個相反的電壓可判斷動態側向力與初始滑動。當感測器的產生壓縮應力時，其電壓發生將是正電位 (V1)；另一方面，相反的壓縮應力則是呈現負電位 (V3)，壓縮應力的滑移信號皆與物體重量息息相關。本研究檢測初始滑動以三種加速度分別為 (5、10、15 mm/s²)，根據實驗結果顯示，感測器的對於滑動訊號的靈敏度會因為不同的加速度與物體重量變化成正比，實驗結果為在 200 克重下加速度為 15 mm/s² 電壓輸出 0.08 V 時為初始滑動判斷時之最佳靈敏度，故經由感測器辨認物體的初始滑動訊號，達到即時機器人手掌之監控功能。

We have developed a robust and flexible tactile sensor for use in robotic gripping that can identify dual axis slippage by measuring the dynamic lateral force. The sensor consists of a rigid bump like structure embedded in a soft polydimethylsiloxane (PDMS) packaging and placed on top of a piezoelectric polyvinylidene fluoride (PVDF) film that is sandwiched between two flexible printed circuits (FPC). The rigid structure induces two opposite stress states on the PVDF film in the presence of a dynamic lateral force, resulting in a positive (V1) and negative voltage (V3) output at the electrodes located in the compressive and tensile areas, respectively. The sensor sensitivity defined as the voltage output variation depends on the slip acceleration and normal external force exerted on the sensor by the counter weight. From our results, it was observed that the best sensor response corresponding to a voltage output variation of 0.08V was obtained at an acceleration of 15 mm/s² and a counter weight of 200 grams. To test its efficacy, the tactile sensor has been mounted on a robot arm and can successfully configure grab conditions by identifying slippage for objects with different weights. Consequently, the tactile sensor can sensitively detect slippage occurrence and direction of lateral force due to two opposite peak voltages occurring simultaneously rather than relying on variation in voltage output as utilized in conventional piezoelectric devices.

一、前言

根據國際機器人聯盟資料顯示，機械手臂在產業自動化的應用已經相當廣泛，同時也因各個國家產業分布不同，對於各產業之機械手臂的需求量也因而有所差異，美國各產業於 2011 年至 2013 年當中對於機械手臂之使用需求增加⁽¹⁾，其市場調查如圖 1 顯示。目前產業均以人工進行組裝作業，其易產生作業流程重覆性過高導致產品準確性降低，故使用機械手臂能夠避免於產品精度與耐用性上可減少不可預知的人為問題。

至今標準化工業型機器人在生產線上只有固定的動作範圍或工作路徑，為了符合工業 4.0 時代的需求，因應不同訂單而需不斷的產線變化，無法浪費太多時間在產線上進行修正與從新編碼等作業流程，需讓機械手臂做適應性的學習與減少虛擬路徑規劃的誤差，感測器的回饋訊號則顯得十分重要，但目前工業型機械手臂大多以視覺感測為主，缺乏觸覺感測上的回饋體制，容易造成視覺感測上之死角、距離判斷誤差，即便可判斷物體形狀但仍無法判斷物體其材質與重量，進而導致感測器發生抓取上的判斷錯誤。因此，觸覺感測器結合機械手臂的需求於未來工業 4.0 當中更會是重要的一環。然

而，各式觸覺感測器規格搭配精密抓取系統則可進一步辨認待測物體形狀、軟硬度和材質，以調整/切換適當的模式取代人工組裝，達到更廣泛的工業應用，其觸覺感測器功能需求則參照表一。

機器人領域之觸覺感測器若要模擬人手機械手臂準確抓取目標物仍然是一大挑戰，若要抓取未知特性目標物可能會因為抓取力道過大或過小，導致目標物產生損壞或掉落的情況。因此，若能發展出雙軸滑動與動態側向力的量測，可防止目標物於掉落前，得知側向力施力大小和方向，進而控制機器手臂要施加之力量，方能調整適當參數穩定的抓取目標物。因此，本研究開發以軟性基材為主的感測裝置，利用標準微機電製程 (micro electro mechanical systems, MEMS) 製作出感測電極，整合封裝具結構電極以及壓電薄膜 (polyvinylidene fluoride, PVDF)，完成具辨識雙軸滑動與動態側向力之軟性壓電式觸覺感測器。目前許多研究團隊也提出各種不同感知類型之觸覺感測器，除了檢測抓取物體所承受之接觸力量外，也朝向至側向剪力強度⁽²⁾、接觸物體表面的粗糙程度^(3, 4)、初始滑動判斷^(5, 6)、以及檢測多軸向力量⁽⁷⁻⁹⁾ 等感知能力的技術發展。針對三軸力量測之觸覺感測器，如 2007

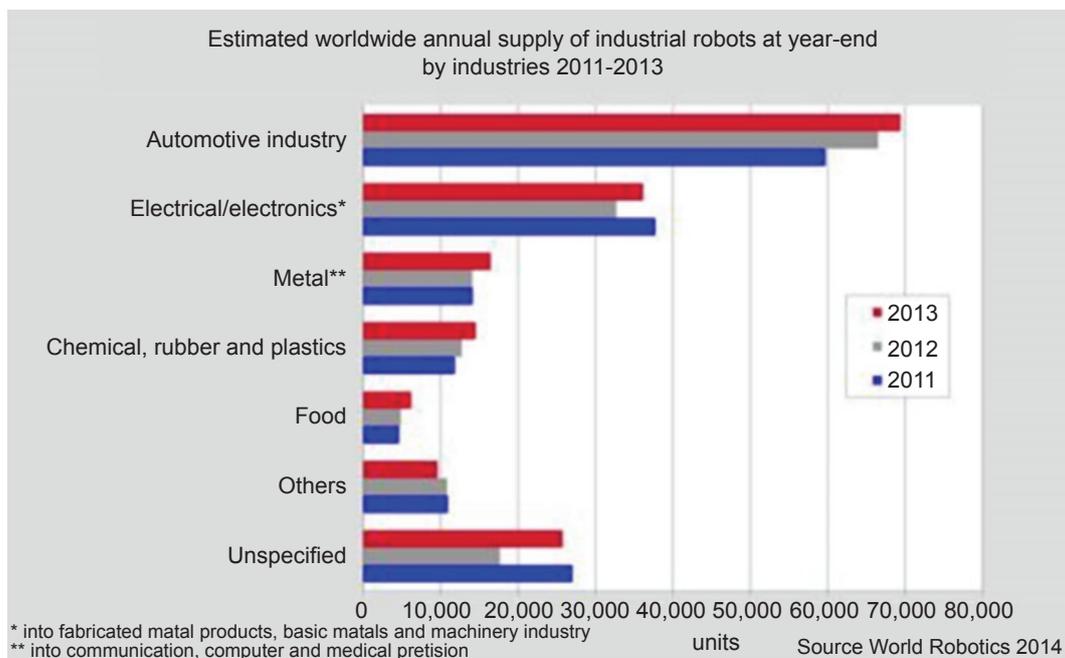


圖 1. 2011—2013 年各行業機械手臂需求量。

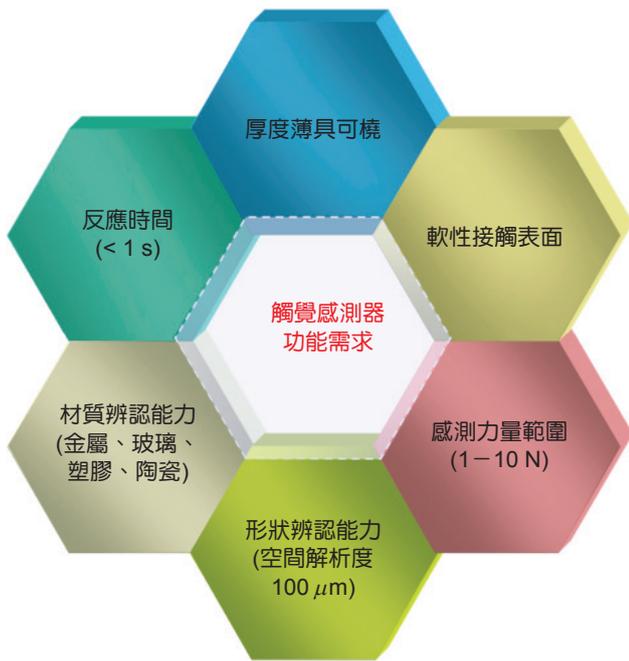


表 1. 未來觸覺感測器功能需求。

年的 Hwang 研究團隊⁽¹⁰⁾ 利用高分子材料為基底，以四組應變規搭配凸塊結構，開發出可檢測側向力與正向力之軟性壓阻式觸覺感測器，經實驗結果顯示，該團隊所提出之感測器針對正向力量大小必須大於 4 牛頓以上才產生檢測訊號，而於感測器側向力方面僅能應用於微小位移之量測，且其感測器量測誤差範圍高達 25%；2008 年 Beccai 研究團隊⁽¹¹⁾ 利用微機電系統 (MEMS) 技術製作成四個壓阻感測器，利用高分子彈性材料—聚二甲基矽氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 將整個感測器及軟性電路板加以包覆封裝，完成具三軸力量測之軟性壓阻式觸覺感測器，針對正向力、側向力可達到最大量測範圍 15N 和 11N；2009 年 Takenawa 研究團隊⁽¹²⁾ 在電路板上建構出二維陣列之電磁感應器，以矽膠製作上部連接結構，開發出具三軸力量測之電磁感應觸覺感測器，但此類型感測器由於基板過硬且體積過大不適用於機器手指和各種曲面上；2011 年 Shirafuji 研究團隊⁽¹³⁾ 提出複合式觸覺感測器，結合壓電薄膜與應變規兩種不同感測元件製作而成，主要量測正向力與側向力，然而其靈敏度過低並且容易產生雜訊導置誤判等相關問題；2012 年 Noda 研究團隊⁽¹⁴⁾ 提出基於電磁感應原理所製作出三軸軟性觸覺感測器，結構分為上層結構層、檢測

線圈層、腔體層與下層激磁線圈層，當外力施加於感測器表面上時，造成內層結構產生機械變形，藉此改變腔體內高度使得線圈層接近或遠離激磁線圈層，進而檢測電壓訊號增加或減少現象，透過此原理可使感測器檢測出三軸力量大小與方向，且量測誤差可為 0.0109 mV；2013 年 Lee 研究團隊⁽¹⁵⁾ 提出基於垂直排列的奈米碳管 (carbon nanotube, CNT) 所開發出一種新穎的三維觸覺感測器陣列，其奈米碳管已合成於矽基板之微結構上，並使用 PDMS 進行整合封裝，其感測器一共為四個檢測區域，透過其感測區域可監測電阻值變化，進而判斷施加力量的方向與大小為何，此感測器於正向力和側向力之最大量測範圍分別為 183 mN 和 29 mN。本研究團隊於 2012 年觸覺感測器研究中⁽¹⁶⁾，開發創新性的結構化分散式微電極，並且結合壓電薄膜製作出滑動感測器，利用凸狀結構誘導壓電薄膜的壓縮應力和拉伸應力，可檢測感測器表面側向力和兩個相反電壓輸出的滑動訊號，然而先前所開發之感測器僅局限於單軸方向量測。

綜觀以上文獻探討之內容得知，觸覺感測器皆使用不同原理來檢測三軸方向力量，其各式製作過程相對繁複，並且無法使用於軟性基材。故本研究開發軟性基材之觸覺感測裝置，利用微機電製程並整合具結構電極以及壓電薄膜，完成低成本、簡易製作具辨識雙軸滑動與動態側向力之軟性壓電式觸覺感測器。目前市面上的薄型感測器，無法達到即時反應的讀取速度，也相較欠缺靈敏度與解析度的功能。然而，至今仍以觸控為主流的消費性電子產品蓬勃發展，其感測器的市場仍然是無可限量的持續發展，觸覺感測器未來除了用於工業型機器人以外，皆可應用於手機觸控市場、遊戲、醫療、運動、生活等應用。

二、感測原理

本研究之觸覺感測器使用 PVDF 壓電式感測元件，主要量測多軸向動態應力，分別為垂直於感測表面的動態側向力和同水平之雙軸滑動。感測原理主要以動態應力檢測為組，因感測器產生形變時，其內部電荷會從與薄膜連接的電路流失，一般而言壓電薄膜並不能探測靜態應力。故本研究所量

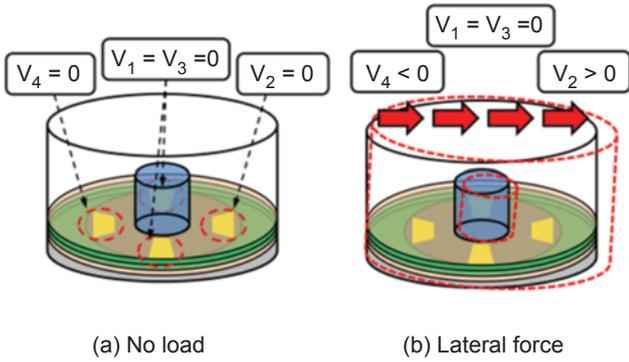


圖 2. 壓電式觸覺感測器量測側向力之機械變形圖
(a) 無力量負載的狀態；(b) 施予一側向力狀態。

測的側向力量都是基於動態力量進行量測與分析。以圓柱狀結構與分散式微電極之觸覺感測器原理則如圖 2 所顯示，將壓電感測元件與上下電極層使用異方性導電膠層 (electrically conductive adhesive transfer tape 9709, 3M Electronics Co., USA) 進行疊合，並封裝於柔軟矽橡膠材料中 (PDMS184)，完成感測器製作。當表面施加一動態側向力時，由於內層結構剛度大於外部封裝層，則會由圓柱狀結構傳遞大部分力量至疊層感測元件上，造成壓電薄膜產生均勻變形量，經由分散式電極輸出四組同等電壓訊號。當表面受到動態側向力時結構會產生彎曲效應，進而得知其相反的應力狀態，壓縮和拉伸應力，如圖 3 所示。因此，藉由此方式可檢測出兩個

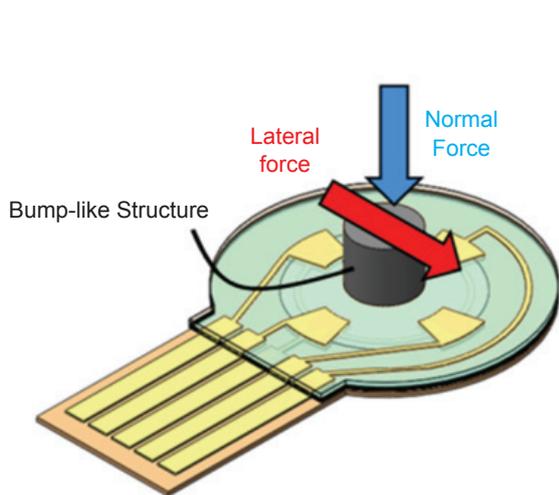


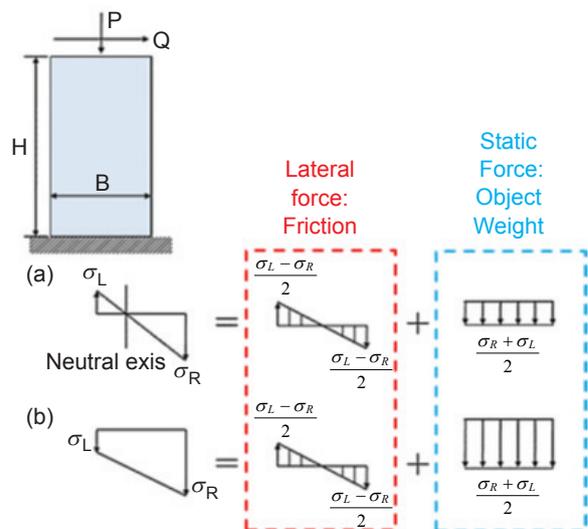
圖 3. 壓電式觸覺感測器量測側向力之感測原理。

相反的電壓輸出，進而量測其壓縮與拉伸範圍中之最大靜摩擦力，有利於辨別動態側向力方向。

本研究所建立之層疊結構模型，採用商業用有限元素分析軟體 (ABAQUS) 進行分析與計算。針對本研究所提出的感測器整體尺寸之設定，根據人類使用手指頭觸壓物體以感受材料之機械性質的情境狀況為基礎，感測器整體之尺寸大小將設定為 $15 \times 15 \times 5 \text{ mm}^3$ 的圓柱體結構，進行多角度側向力量之靈敏度辨識，其量測模擬結果如圖四以及圖五所表示，分別顯示出多角度應力分佈與多角度電位分佈情況，藉由給定不同方向側向力，從結果可看出壓電薄膜因內層結構受不同側向力之影響，會有一彎取 (bending) 效應產生，使得內層結構下方之壓電薄膜處產生不均勻的應力分佈，分別為壓應力區與拉應力區，如圖 4 所示，而所對應的電位為正電位與負電位，如圖 5 所示，可觀察出因受內層圓柱狀結構之影響，而有明顯的正負電位分佈，透過本研究所提出的具結構化電極概念，進而判別物件施力之方向。

三、元件設計與製作流程

根據有限元素分析感測結構其雙軸應力與電位分佈之最佳化模型架構，進行設計分散式微電極之光罩圖案，運用微機電製程技術進行圖案轉移至軟性電路板上，藉由圖案定義後檢測電極層，擷取壓



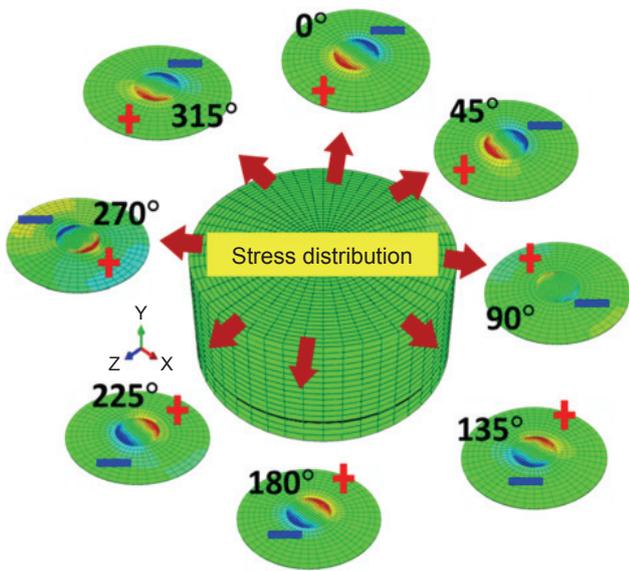


圖 4. 有限元素分析多角度側向力之應力分佈圖。

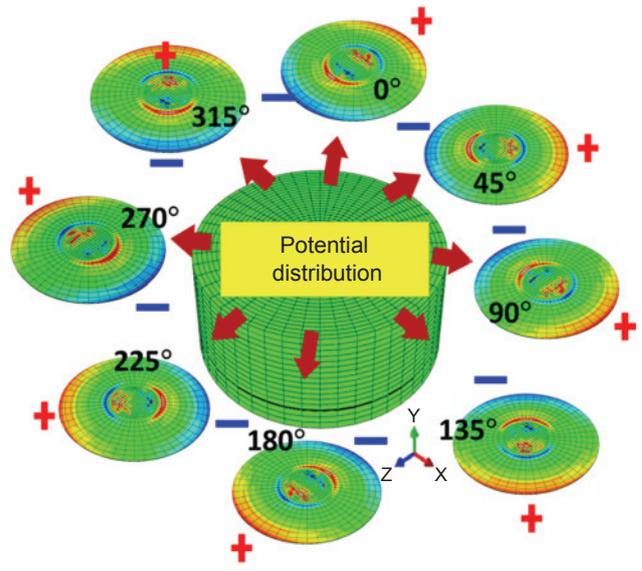


圖 5. 有限元素分析多角度側向力之電位分佈圖。

電薄膜表面上所定義出感測區域產生之壓電訊號。此外，於感測元件外部製作兩種具軟硬度差異的內層結構與外部封裝層的高分子材料，其內層結構與外層包覆結構分別以壓克力模具製程及矽膠體包覆製程來實現及控制結構尺寸與形狀精確度。感測元件設計之製作流程示意圖如圖 6(a) 所示。選用市售厚度為 $30\ \mu\text{m}$ 的軟性印刷電路板 (flexible printed circuit, FPC)，利用切割繪圖機 (C5000-40-CRP, GRAPHTEC Co., JAPAN) 裁切適當元件尺寸，使用旋轉塗佈機 (WS-400-6NPP-LITE, Laurell Technology Co., USA) 塗佈 EPG-512 光阻約 $1-2\ \mu\text{m}$ 厚度層，放置於 $100\ ^\circ\text{C}$ 加熱板 (hot plate) 上軟烤 5 分鐘，利用黃光微影製程 (photolithography) 進行定義電極圖案與位置，緊接著使用 EPD-1000 顯影液進行顯影製程約 2 分鐘，最後以去離子水 (DI Water) 將殘留試片表面之顯影液進行殘留溶液清洗並且使用氮氣氣槍 (N₂) 吹乾，利用顯微鏡確認光阻覆蓋層是否有斷裂後，放置於已加熱 $80\ ^\circ\text{C}$ 氯化鐵溶液 (ferric chloride solution) 中浸泡 10-15 分鐘後取出，爾後，利用丙酮 (acetone) 將殘留光阻覆蓋層去除，最後使用 DI Water 洗淨殘留雜質後即可完成上、下電極層之製作。

感測器之壓電薄膜選用市售厚度為 $28\ \mu\text{m}$ 的 PVDF 材料 (Measurement Specialties Inc., USA) 薄

膜層，由於其出廠時薄膜上下表面已先鍍一層銀導電層，為了避免整片 PVDF 都產生導通現象，故本實驗中使用丙酮清除薄膜表面上的銀導電層，並以 DI Water 洗淨，爾後，將先前所定義完成之上下電極層，以本研究提出之三明治結構方式結合壓電薄膜，利用市售異方性導電膠 (electrically conductive adhesive transfer tape 9709, 3M Electronics Co., USA) 作為上下電極層與壓電薄膜之間電性傳導層，其各元件貼合後完成示意圖則如圖 6(b) 所示，透過其結構設計則可使其產生具垂直方向的電性引導。

接續，矽橡膠內層結構採用模造技術來製作，將所需之結構尺寸輸入雷射雕刻機 (DC-6040-60W, Taiwan 3axle Technology Co., TAIWAN) 將壓克力進行裁切製作所需模仁，模具表面噴灑脫模劑 (RELEASE AGENT, TS-202, SHIANG IU CO. LTD, TAIWAN) 以便於方便脫膜製程，選用道康寧公司所生產之 PDMS160 (Sylgard 160 Elastomer, Dow Corning Co., USA)，產品以主劑 (A) 及固化劑 (B) 混合 1:1 比例進行條配製作，灌模後放置室溫固化一天，脫膜後即可完成內層結構形貌，最後利用瞬間接著劑 (Apollo 2077, Cyberbond Co., USA) 將其黏貼於不同方向量測之四組感應電極中央區域位置，如圖 6(c) 所示。

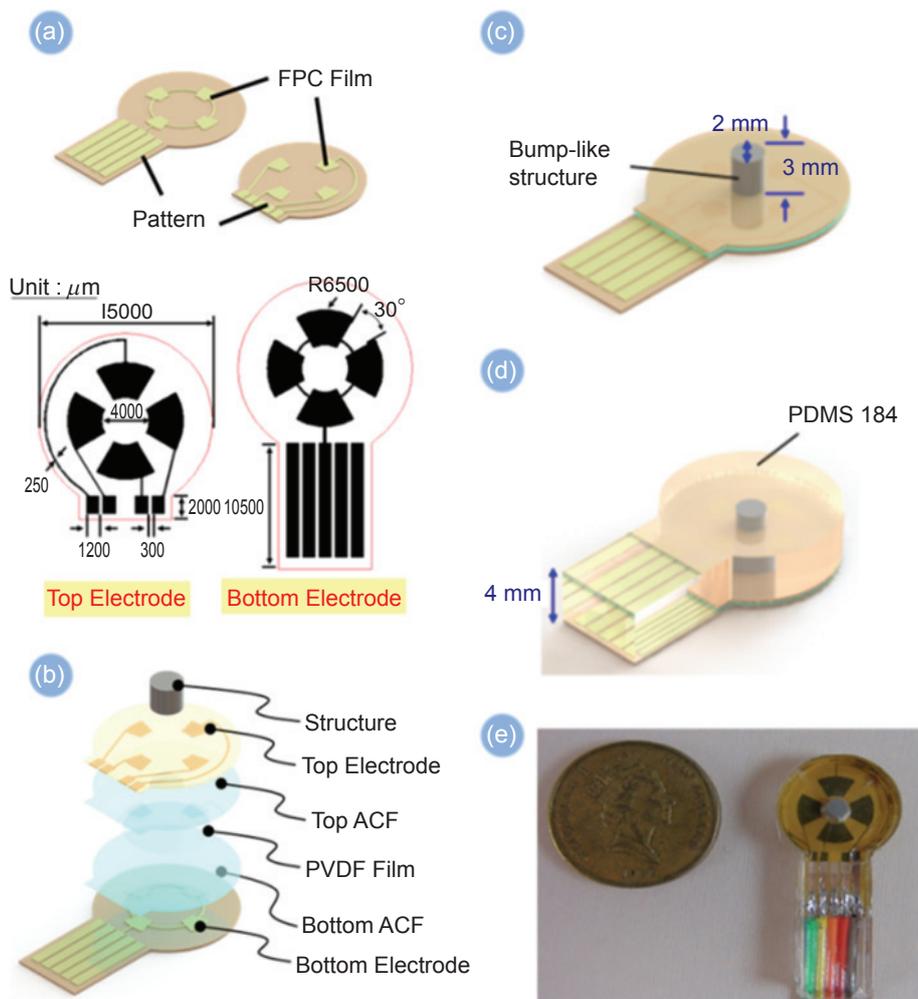


圖 6. (a) 軟性銅箔基板之表面分散式微電極；(b) 各元件結合之爆炸圖；(c) 內層結構黏貼至感測元件示意圖；(d) 感測器封裝示意圖；(e) 感測器之實體圖。

最後再將所製成的感測器置入壓克力模具中進行封裝，將 PDMS184 (Sylgard 184 Elastomer, Dow Corning Co., USA) 注入模內，並加熱至 80 °C 約 3-4 小時使 PDMS184 固化之後進行脫模動作，完成最後本研究之觸覺感測器製備其示意如圖 6(d)，本研究開發觸覺感測器整體尺寸約為 10 mm 尺寸以內，實際圖 6(e) 所示。

四、動態量測結果與討論

(1) 動態側向力量測平台

本研究量測瞬間側向衝擊荷載試驗之實驗架構如圖 7 所示；首先將製作完成之壓電式觸覺感測

器固定於旋轉平台上方，以方便調整量測 X 軸與 Y 軸兩種水平方向之動態側向力，並且將旋轉平台鎖上至特製的 L 型鋁板的線性滑軌上，並於感測器表面放置一壓克力棒 (4 × 5 × 50 mm³)，透過使用電子式拉壓力計施加 100 g 靜態力量於 L 型鋁板的線性滑軌，使之移動至另一邊已事先固定住的 L 型鋁板，其表面一樣放置一塊與本實驗所製作出感測器大小的軟性 PDMS 矽橡膠，將其壓克力棒夾住，再使用週期激振器 (Shaker) 施予 1–10 N 的動態力敲擊壓克力棒，使壓克力棒於感測器表面產生一週期性的動態側向力量，由於壓克力棒所受到的力量會經由兩側感測器與 PDMS 固定層所分攤，因此實際施加於感測器表面的力量只有 0.5–5 N，

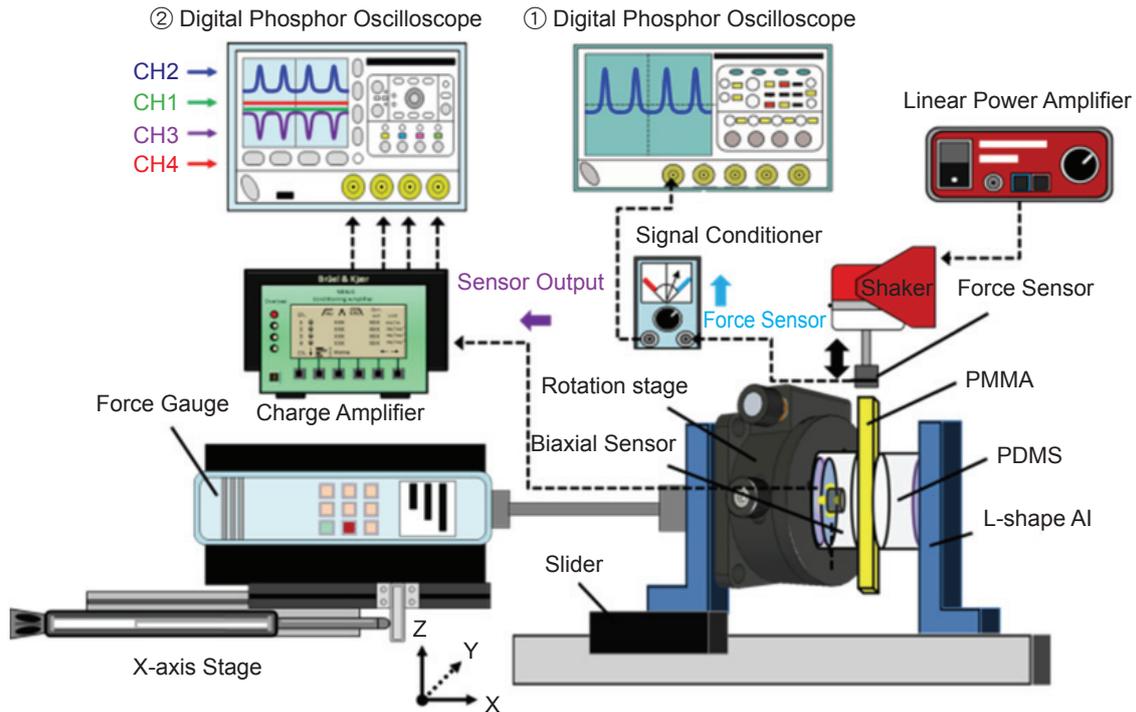


圖 7. 動態側向力量測平台示意圖。

而訊號經由電荷放大器濾波、整流後，再接至示波器 CH1 – CH4 進行觀察與紀錄，以利於後續數據整理的方便性。

當感測器受到側向力時，會使內層結構產生彎曲效應 (bending)，並且在結構底部產生不均勻的壓應力與拉應力分佈。基於理想狀態而言，壓應力與拉應力之間會呈現相等狀態，4 秒內會產生 4 組壓電訊號，將其各個感測單元數值擷取後，可針對所施加於感測器表面的動態側向力量，從 0.5 – 5 N 以 0.5 N 為間隔增加進行量測記錄，匯整擷取的數值經平均統整計算，其結果則如圖 8 所示。根據實驗結果顯示，當施加動態力量越大時 V_1 感測單元部分因受壓應力影響，產生之正電荷與 V_3 感測單元因受拉應力影響所產生之負電荷也會越來越大，其呈獻線性上升趨勢；而垂直於受力方向的 V_2 與 V_4 的感測單元，所輸出的電壓值趨近於零與模擬結果相吻合，並經回歸曲線計算後，其各個感測單元 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 的靈敏度分別為 4.300 mV/N、0.1173 mV/N、-1.981 mV/N、0.1130 mV/N。

透過結果得知側向力施加方向，不僅有 X 軸和 Y 軸兩個水平方向，相對的而是來自各個水平角度下的變化。因此，為了更清楚了解本研究所提

出之壓電式觸覺感測器是否具有多角度側向力方向與輸出所對應的壓電訊號的辨識能力，選用旋轉平台作為角度定義的裝置，量測方式為在 Z 軸方向選用週期激振器施加 2 N 動態力量，以壓克力棒敲

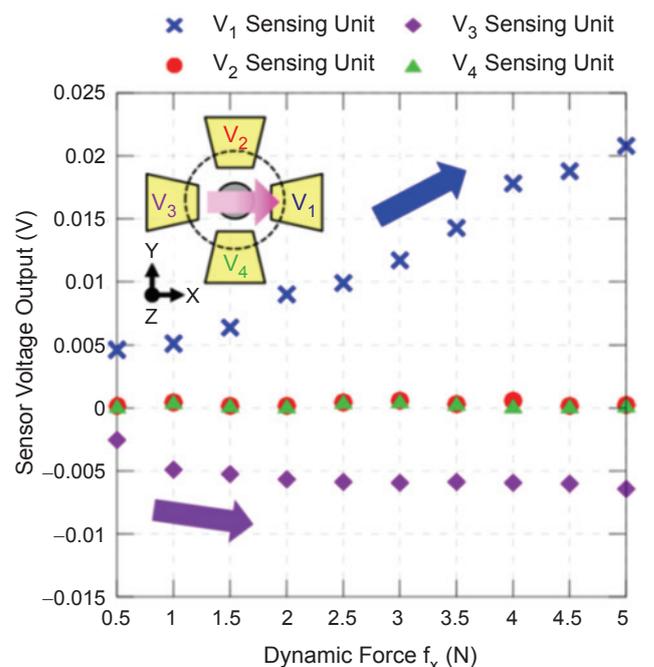


圖 8. 在 x 軸方向動態側向力量測。

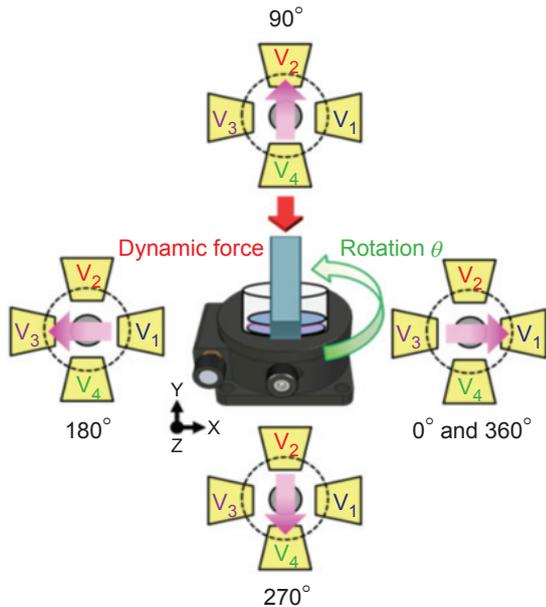


圖 9. 檢測多角度動態側向力之方向示意圖。

擊於感測器表面，使其於感測器表面產生一側向力量，藉由固定敲擊四面方向以及旋轉角度 30 度下遞增旋轉為量測基準，記錄至 360 度旋轉一圈條件下之感測器變化。此實驗總共量測 13 點數據並繪製成圖表，其量測結果則如圖 9、10 所示。

根據實驗結果顯示，以 0 度數據結果來探討固定敲擊方向 V_1 則受到最大壓應力輸出最大正電荷，相對的 V_3 則是受到最大拉應力輸出最大負電荷， V_2 和 V_4 因為受拉壓應力影響最小故輸出數值趨近於零；然而，當角度轉至 90 度方向時，在 V_2 與 V_4 分別受到最大壓應力與最大拉應力影響，輸出最大正電荷與最大負電荷， V_1 和 V_3 的感測單元則垂直於拉力方向故受到拉壓應力影響最小則輸出數值趨近於零；接續，將角度再進一步轉達至 180 度，而 V_1 和 V_3 又回到與敲擊力同方向但是受拉壓力區域剛好呈現相反趨勢，以及 V_2 和 V_4 因回到與拉力呈垂直方向則輸出數值又回到零的位置。根據每個感測單元在每個旋轉角度下所受拉壓力程度不同，因此在 V_1 和 V_3 於原點形況下旋轉一圈會產生訊號相反的振幅圖形，而 V_2 和 V_4 則是產生訊號相反的正弦波圖形，因此，將實驗結果與有限元素分析模擬結果相比，可確實驗證其感測器具有相同的電位變化趨勢。

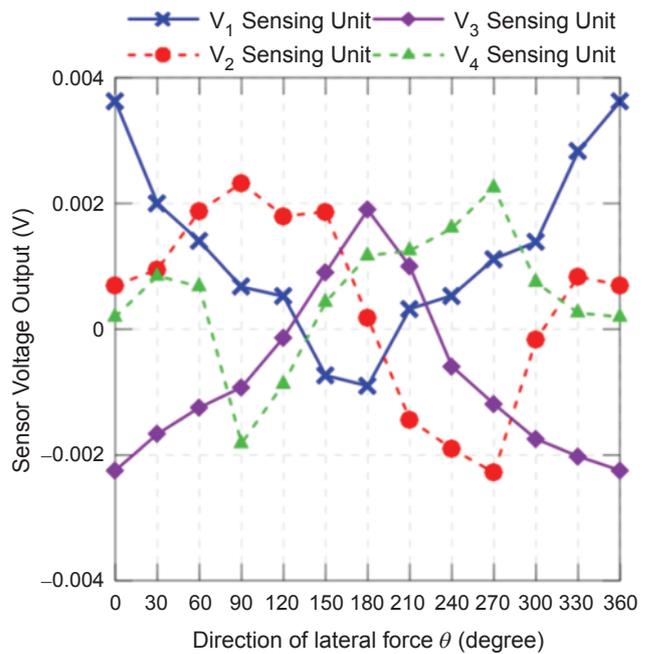


圖 10. 檢測多角度動態側向力之壓電訊號分佈圖。

(2) 初始滑動量測平台

本研究進一步將辨認物體於初始滑動訊號，其檢測平台架構圖如圖 11 所示。初始滑動量測平台與動態側向力量量測平台十分相似。首先，將壓電式觸覺感測器固定於旋轉平台上，並且於感測器表面放置一壓克力圓板，其邊緣處切出 1 mm 圓洞後以市售釣魚線穿過並綁於切除圓洞上；另一端接至電子式拉壓力計的鉤環頭裝置，而電子式拉壓力計固定於 X 軸線性平台上，經由輔助軟體搭配電腦輸入以 30 mm 移動速度做為水平拉力調整，並且於壓克力板上施以 50、100 及 200 g 荷重砝碼，模擬三種加速度於 X 軸與 Y 軸方向的滑動，觀測其感測器對於初始滑動的靈敏度與準確性。

為了更清楚分析三種加速度在 X 軸方向拉動 50、100 及 200 g 三種荷重對於初始滑動判斷上是否有影響，故當產生滑動訊號時將其表面所受到最大壓應力與最大拉應力之值相減後進行探討，整理後數據則如圖 12 所示，從實驗結果得知，加速度與荷重重量成正比成長，當使用三種加速度拉動荷重越重物體時，因靜摩擦力相對增加使得 (V_1-V_3) 的變化量也進而增加，也可發現當改變加速度時，加速度越快也會使 (V_1-V_3) 的變化量增加。綜合以

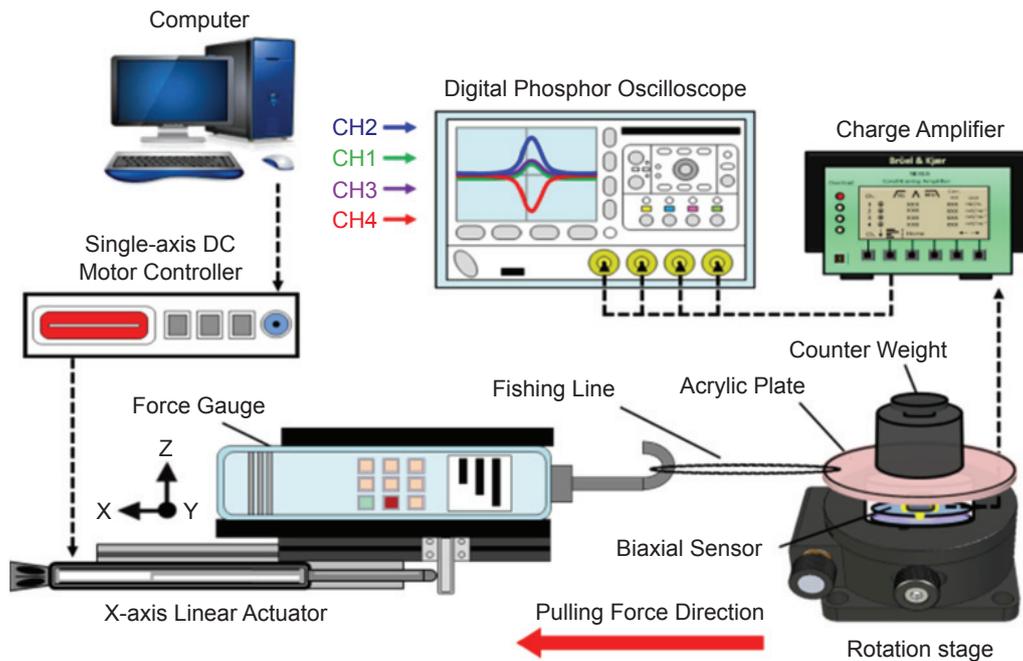


圖 11. 辨認目標物體其初始滑動訊號的量測平台。

上兩種趨勢結果發現，當加速度設定為 15 mm/s^2 且荷重為 200 g 時，為本研究所提出之壓電式觸覺感測器辨認其初始滑動訊號的靈敏度為最佳參數。

(3) 機械手臂實際抓取平台

為了使本研究開發之壓電式觸覺感測器更接近機器人手指感測，本章節探討將其感測器裝置於水平多關節機械手臂的電動夾爪上，進行實際機器人手臂抓取測試，其實驗架構如圖 13 所示。將觸覺感測器裝置於之機器人電動夾爪上，並檢測其抓取 500 g 砝碼之待測物，將抓取移動高度設定為 30 mm ，電動夾爪抓取位置固定 4.2 mm 間距，以定速度 1% (等同於 11 mm/s) 的速度上升移動 Z 軸，抓取重量為 500 g 時，因抓取力不足導致物體產生滑動現象，藉此判定在抓取過程中初始滑動訊號，並觀察手臂上升速度是否會影響判斷準確性。

透過手臂原廠軟體下達指令給機械手臂下降至待測物旁，如圖 14 所示的深藍色方框，時間軸從 10 到 50 秒，此時的訊號是由移動產生的剪力所造成；在紅色方框部分 ($50-60 \text{ sec}$)，為軟體下達抓取指令給電動夾爪進行抓取的動作，而感測器會接觸到抓取物體而產生動態正向力的訊號；在淺藍色

方框部分 ($60-100 \text{ sec}$)，軟體命令 Z 軸往上升至初始點，並觀察待測物是否產生初始滑動訊號，從原始訊號圖中擷取 $55-65 \text{ sec}$ 之間訊號，並繪出初始滑動擷取圖進行觀察，如圖 14、15 所示，從擷取圖發現抓取 500 g 荷重的待測物時，由於本身

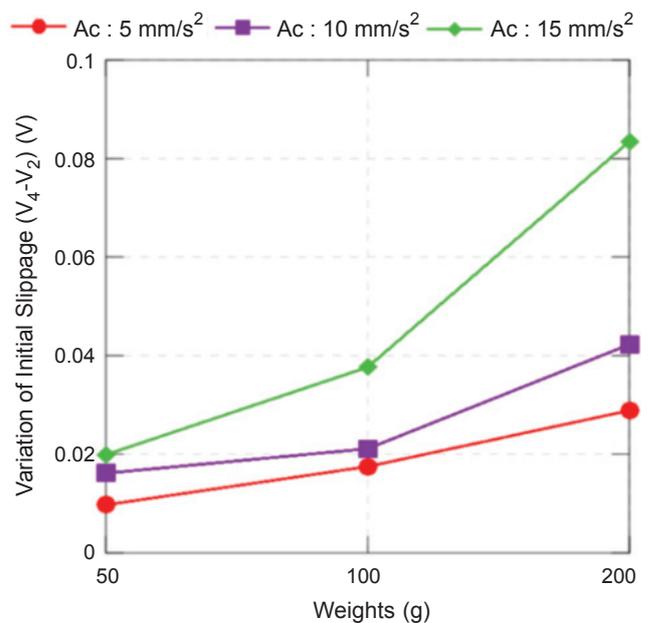


圖 12. 檢測在 x 軸方向初始滑動量測。

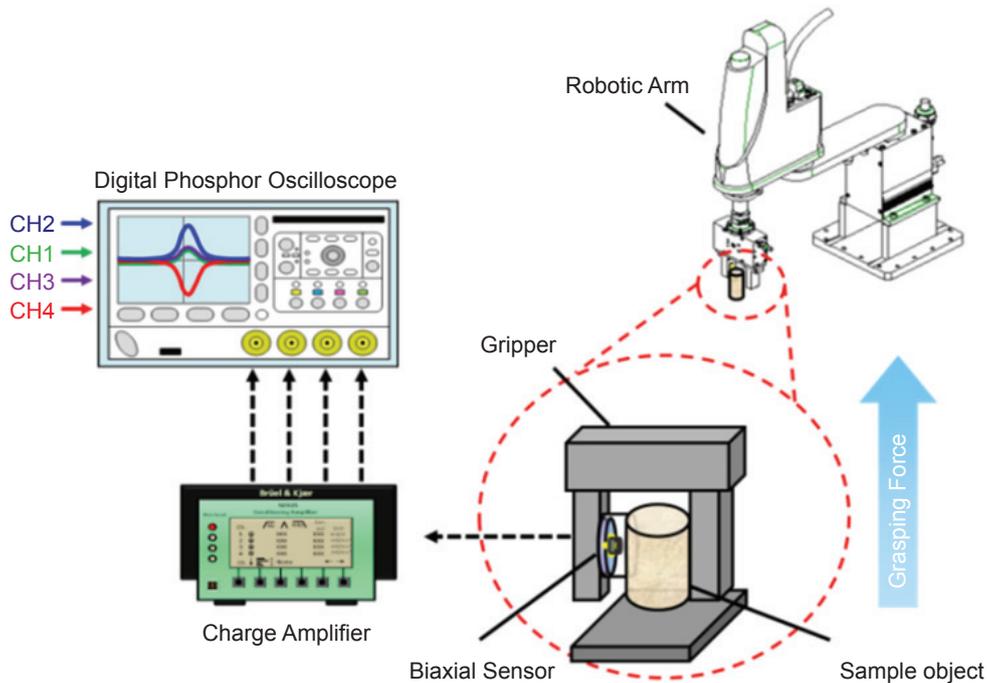


圖 13. 機械手臂抓取物體之實驗平台架構。

重量較重，物體瞬間掉落則造成抓取失敗，且根據擷取的數據圖來看，在 63–64 sec 之間發現明顯的初始滑動訊號，如圖 16 所示，透過抓取實驗發現，當抓取 500 g 時物體產生符合壓、拉應力的正負電位訊號。

五、結論

本研究已成功開發具結構化電極之軟性壓電式觸覺感測器，主要以壓電材料 PVDF 壓電薄膜作為本研究所使用的感測元件，具有可辨認雙軸初始

滑動訊號與動態側向力大小的能力，且不同於現階段所提出之感測器還可辨識物體在多角度滑動之方向。此感測器不僅簡易製作之外，亦可達到辨識物體初始滑動與動態側向力大小，透過具結構分散式電極，大部分應力會經由內層結構傳遞至底部感測區域，如側向應力大於正向力時，會使結構底部產生不均勻應力分佈，分別為壓應力與拉應力，對應的輸出電壓為正電位與負電位，藉由電位資訊即可辨識物體初始滑動訊號與各角度之滑動方向。

本研究完成觸覺感測器之製作，可實際裝置於機械手臂進行抓取實驗測試，亦開發合適的後端讀

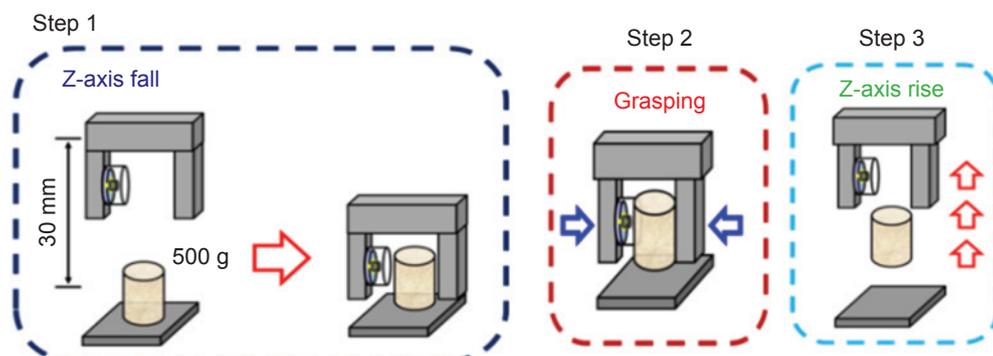


圖 14. 機器手臂抓取步驟示意圖。

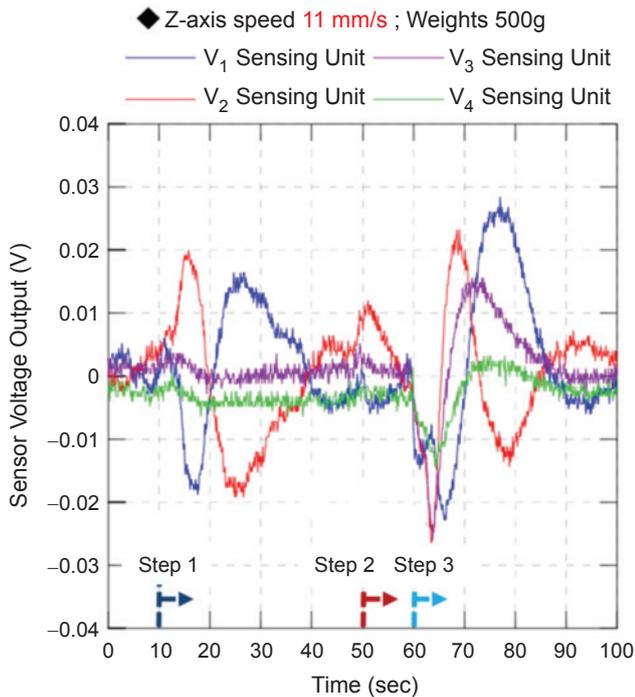


圖 15. 機器手臂抓取訊號結果圖 (a) 機械手臂抓取不同物體之動作示意圖 (b) 感測器輸出訊號圖。

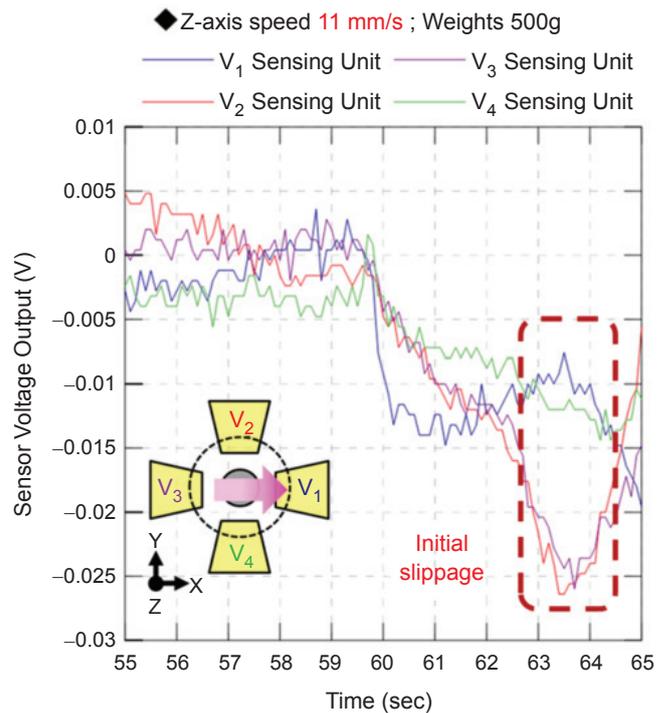


圖 16. 63—64 秒初始滑動訊號結果圖。

取模組，能夠精確控制機械手臂的最佳化接觸力量，以防止物體產生滑動訊號，經實驗證實已成功地辨識抓取兩種不同荷重的物體，當物體重量大於抓取力量時，會產生初始滑動訊號並經由感測器所檢測，且可以隨時記錄生產效率與雲端化，達到生產流程最佳化的目的，未來以自動化工業 4.0 為生產主軸，彌補現今機器人缺乏觸覺力量回饋控制。

誌謝

感謝科技部編號 NSC-100-2632-E-218-001-MY 3 計畫以及南部生技醫療器材產業聚落發展計畫編號 CY-14-10-50-102，由於科技部與軟性光電元件滾印中心以及南部醫材計畫的支援，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

1. <http://www.ifr.org/> 國際機器人聯盟。
2. T. Maeno, S. Hiromitsu and T. Kawai, Control of grasping force by detecting stick/slip distribution at the curved surface of

an elastic finger, ICRA '00 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3895, 2000.

3. K. Hosod, Y. Tada and M. Asada, Anthropomorphic robotic soft fingertip with randomly distributed receptors, *Robotics and Autonomous Systems*, **54** (2), 104 (2006).
4. 莊承鑫, 陳志緯, 具辨認多軸力量暨滑動感知之陣列式軟性觸覺感測器, 第十三屆奈米工程暨微系統技術研討會, 2009.
5. M. Sohagawa, H. Onishi, T. Kanashima, et al., Tactile array sensor with inclined chromium/silicon piezoresistive cantilevers embedded in elastomer, *TRANSDUCERS 2009 on Solid-State Sensor, Actuators and Microsystems*, 284 (2008).
6. L. Beccai, S. Roccella, L. Ascari, et al., Development and experimental analysis of a soft compliant tactile microsensor for anthropomorphic artificial hand, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **13** (2), 158 (2008).
7. V.V. Ho, D.V. Dao, S. Sugiyama and S. Hirai, Force/moment sensing during sliding motion using a micro sensor embedded in a soft fingertip, *10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, 161 (2008).
8. D.V. Dao and S. Sugiyama, Development of 4-DOF soft-contact tactile sensor and application to gripping operation of robotics fingers, *5th IEEE Conference on Sensors*, 1321 (2006).
9. C.H. Chuang, C.T. Lu and T.H. Fang, Slippage and direction sensing based on a flexible tactile sensor with structural electrodes, *2009 IEEE SENSORS*, 958 (2009).
10. H. Eun-Soo, S. Jung-Hoo, K. Yong-Jun, A Polymer-Based Flexible Tactile Sensor for Both Normal and Shear Load

Detections and Its Application for Robotics, *Journal of Microelectromechanical System*, **16** (3), 556 (2007).

11. L. Beccai, S. Roccella, L. Ascari, P. Valdastri, A. Sieber, M. Chiara Carrozza and P. Dario, Development and Experimental Analysis of a Soft Compliant Tactile Microsensor for Anthropomorphic Artificial Hand, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **13**, 158 (2008).
12. S. takenawa, A soft Three-Axis Tactile Sensor based on Electromagnetic Induction, *proc. of IEEE ICM* (2009).
13. S. Shirafuji, K. Hosoda, Detection and Prevention of Slip Using Sensors With Different Properties Embedded in Artificial Shin on the Basis of Previous Experience, *proc. of IEEE ICAR*, 459 (2011).
14. S. Warranasarn, K. Noda, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, 3D Flexible Tactile Sensor Using Electromagnetic Induction Coils, *proc. of IEEE MEMS*, 488 (2012).
15. J.-I Lee, S. Pyo, M.-O Kim, T. Chung, H.-K Lee, S.-C Lim, J. Park and J. Kim, Development of Flexible Tactile Sensor Based on Contact Resistance of Integrated Carbon Nanotubes, *proc. of IEEE MEMS*, 37 (2013).
16. C.H. Chuang, Y.R. Liou and C.W. Chen, Detection System of Incident Slippage and Friction Coefficient Based on a Flexible Tactile Sensor with Structural Electrodes, *Journal of Sensors and Actuators A*, **188**, 48 (2012).



莊承鑫先生為國立成功大學土木系博士，現任南臺科技大學機械系教授兼任滾印中心主任與奈米感測技術實驗室主任

Cheng-Hsin Chuang received his Ph.D. in the Department of civil Engineering from cheng-kung university. He is recruited by Department of Mechanical Engineering and Institute of Nanotechnology at Southern Taiwan University of Science and Technology as an Professor. and serves as the Director of Roll-to-Roll Imprinting Center for Flexible OptoElectronics (RicFoe) and the Micro and Nano Sensing Technology Lab (MANST Lab).



穆建良先生為南台科技大學機械工程所碩士班學生。

Chien-Liang Mu is currently a M.S student in the Department of Mechanical Engineering at Southern Taiwan University of Science and Technology (STUST).



陳嘉文先生為南台科技大學機械工程所碩士班學生。

Jia-Wun Chen is currently a M.S student in the Department of Mechanical Engineering at Southern Taiwan University of Science and Technology (STUST).