

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 工程學科(一)

第三名

052312

創新型全擬真低成本被動式電容觸控毛筆的設計與實現

學校名稱：桃園市立南崁高級中等學校

作者： 高二 高墨鑫	指導老師： 簡宗奇
-------------------	------------------

關鍵詞：觸控毛筆、觸控畫筆、iBrush

創新型全擬真低成本被動式電容觸控毛筆的設計與實現

Design and Implementation of an Innovative Fully-Realistic, Low-Cost Passive Capacitive Brush Stylus

摘 要

本研究徹底解決電容式觸控毛筆的擬真性問題。我們研究被動式電容觸控筆的材料與工作原理，得知材料能夠產生高電容，就能產生高靈敏度觸控感應。厚度薄、面積大以及高介電常數的材料能產生高電容，都是良好的電容式觸控材料。這結果推翻了「電容觸控原理是基於材料的導電性或靜電傳導能力」的假說。有別於導電刷毛(碳纖維)筆頭的乾式觸控筆，我們直接將真實毛筆改造成觸控毛筆，利用「溼潤軟毛筆頭」具有高電容特性以及電容串並聯原理，開發出「全真軟毛被動式電容觸控筆」。得到與真實毛筆書寫過程相同筆性、筆觸與藝術效果，是目前擬真度最高的觸控毛筆。這個創新設計製程簡單且不需電源，因此具有節能與低成本的優點。

壹、前言

一、研究動機

「觸控技術」被廣泛用於現代手機和平板電腦，成為生活中不可或缺的工具。很多學生或藝術家都會利用觸控筆(例如Apple pencil)在平板電腦上寫筆記或畫圖。觸控裝置的普及同時帶動了電子書畫的發展。然而硬式觸控筆缺乏傳統毛筆所具有的動態彈性與自然筆觸，無法將傳統筆毛彈性、筆法與數位技術精準結合。

小學五年級開始，每日中午我都會到校長室跟著校長學習書法，期間為了臨摹方便、增加學習書法的樂趣和不想弄髒衣服，便開始接觸電子書法。例如使用「王羲之書法字典」與「Zen Brush」兩款書法應用軟體(APP)在手機上練習書法。後來也用「Infinite Painter」軟體在平板上練習畫圖。這些書畫應用程式都能夠把觸控面板變成宣紙或畫紙。透過手指或觸控筆，就能隨時隨地練習書畫，方便又環保。美中不足之處是失去了用筆毛書寫作畫那樣的觸感。尤其無法練習書法的筆法，體驗不到點、橫、豎、鉤、挑、彎、撇、捺的毛筆筆性，缺乏真實感。當時心裡想：「如果能夠用毛筆直接在平板上寫書法，那該多好!」即便現在的美術課，心裡依然想著：「如果有觸控毛筆(畫筆)，就能夠將傳統筆毛的彈性、筆法與數位技術精準結合，在觸控面板上重現自然筆性與筆法。讓電子書畫變得更具真實感。」這個念

頭一直埋藏在心中，驅使自己經常上網觀看自製觸控筆的影片[1]。看完後對於哪些材料能夠當作觸控材料？手機觸控原理又是如何運作？更是百思不解，決定深入探究。

二、文獻回顧

觸控螢幕是現代電子設備的核心技術，根據不同的應用需求，主要有電阻式、電容式和紅外線 (IR) 觸控螢幕。以下是它們的工作原理與優缺點比較[2-6]。

(一) **電阻式觸控螢幕原理**：由兩層透明薄膜（通常為 PET 塑膠與玻璃）組成，中間有一層微小間隙或間隔點。兩層內側塗有導電材料（氧化銦錫 ITO，室溫電阻率約 $1.5 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ ）。工作原理是透過「機械壓力」讓感測器偵測位置。當手指按壓螢幕上層導電薄膜時，兩層導電膜接觸，使電阻降低，該處有電流通過，感測器便可知道接觸點位置。應用範圍有：ATM機器、自動販賣機、「個人數位助理 (PDA)」。

(二) **電容式觸控螢幕原理**：基本構造如圖1[7]，其工作原理是依賴手指與觸控面板之間的「電容耦合(capacitive coupling)」進行感應，偵測手指觸控點位置。螢幕表面覆蓋一層透明的導電材料（氧化銦錫 ITO），形成靜電場。因為人體和手指都是電容器，當手指電容器碰到觸控面板電容器時，靜電電荷在兩電容器之間傳導流動直到「靜電平衡」，此時每個電容器的電位相同，這個過程稱為「電容耦合」。感測器偵測到電容變化量，據此判斷觸控的位置。當戴手套或使用非觸控筆觸碰面板時，沒有反應，是因為手指具有高電容，而這些物品不是，因此電容耦合後，電容變化量太小，感測器無法偵測到訊號，所以無法產生觸控感應。



圖1. 電容式觸控面板構造示意圖[7]

電容式觸控螢幕又分為兩類：

1. **表面電容式 (Surface Capacitive)**：需要直接觸碰螢幕，不支援多點觸控。陳奕君 (2013)介紹其結構如圖2所示[8]。在玻璃基材上下兩面鍍上透明導電薄膜(ITO)電極，上電極作為感測電極，其上方覆蓋一層二氧化矽(SiO_2)介電層作為電容器；操作時需對其施加一個電壓，形成均勻穩定的電場。下電極提供靜電遮蔽功能，避免外部雜訊干擾。當手指觸摸螢幕時，手指與 SiO_2 之間電容耦合會影響該區域的電荷分佈，改變該處的電容。面板邊緣四個角落的感測器偵測電容的變化量，計算觸控位置。當觸碰位置愈近時，其電容變化值愈大[8]。



圖2. 表面式電容觸控結構示意圖[8]

2. 投射電容式 (Projected Capacitive)：現今手機使用的多點觸控螢幕都是這類螢幕。其構造如圖3[8]和圖4[9]所示。陳奕君(2013) [8]指出將表面電容式觸控結構中的上層感測電極，改為上下雙層的X-Y電極網格，觸控面板縱橫鋪設許多表面帶靜電的電極陣列，每個交叉點形成一個微小的電容。最常見的網格電極是菱形狀電極，彼此交錯排列成網格。圖3紅色這層負責X方向感測，藍色這層負責Y方向感測，透過捕捉電極間電容變化來定位手指觸控位置。當手指接近時，它會改變該區域的電容大小，感測器透過X電極與Y電極的電容變化量來確定觸控位置。因此可支援多點觸控，靈敏度高。應用範圍有：智慧型手機、平板電腦、筆記型電腦、互動式資訊站 (Kiosk)。

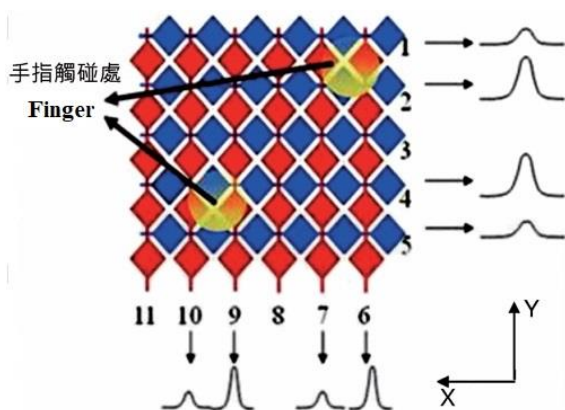


圖3. 投射式電容觸控面板電容分佈圖 [8]

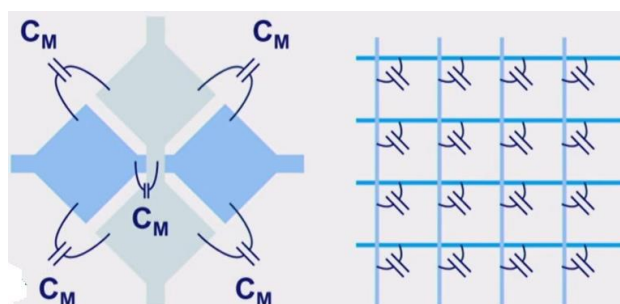


圖4. 投射式電容觸控面板電容分佈圖 [9]

(三) 紅外線 (IR) 觸控螢幕原理：工作原理是透過螢幕邊緣的紅外線 LED 和感測器來建立一個不可見的光柵。當手指或物體觸碰螢幕時，會阻擋光束，感測器偵測到被遮擋的位置並計算出觸控點。其應用範圍有：互動式電子白板、大型顯示器、遊戲設備、智慧電視。

綜合上述，電阻式觸控螢幕具有便宜、適用於惡劣環境，但缺乏靈敏度和多點觸控功能。電容式觸控螢幕則是反應靈敏、支援多點觸控，適合智慧型手機和平板，但無法用手套或普通筆操作。紅外線觸控螢幕適用於大型顯示器，可用任何物體觸控，但可能受強光干擾，價格較高。我們用表1來對這三種觸控螢幕特性做一比較：

表1. 電阻式、電容式與紅外線觸控螢幕比較表 [2; 8-12]

比較項目	電阻式觸控	電容式觸控	紅外線觸控
觸控偵測方式	透過壓力導致兩層接觸	透過靜電場變化	透過紅外線光束中斷
輸入方式	手指、觸控筆、任何物體	手指或專用電容觸控筆	手指、觸控筆、任何物體
多點觸控支援	限制較多	支援 (PCAP 投射式)	支援
觸控靈敏度	低	高	高
螢幕清晰度	略低 (因為有多層結構)	高	高
耐用性	使用久了可能會磨損	耐刮、耐用	非常耐用
環境適應性	防塵、防水、耐高溫	可能受灰塵、水影響	受灰塵與強光影響較大
成本	低	中到高	高
常見應用	ATM、工業設備、PDA、Simon智慧型手機	智慧型手機、平板電腦	互動式看板、遊戲機、大型螢幕

(四) 觸控螢幕技術的發展與回顧 [2-6; 13]

透過表1我們得知目前在手機、平板電腦和工業界的手持電腦中，最廣泛使用的觸控螢幕是電阻式和電容式兩類。以下針對這兩類「觸控螢幕技術」的演進做回顧。歷史學家認為 1965年至1967年間，在英國馬爾文皇家雷達研究所工作的E.A. Johnson開發出了「電容式觸控螢幕」，它被認為是歷史上第一台手指驅動的觸控顯示器[3; 4]。Johnson (1965) 在「電子快報 (Electronic Letters)」上發表的文章「觸控顯示器——一種新型的電腦輸入/輸出裝置(Touch display-a novel input/output device for computers)」概述了當今許多個人電子裝置所使用的一種電容式觸控螢幕[14]。並於1968年發表觸控技術應用在航空管制(ATC)的論文[4]。

Sam Hurst (1971) 發明了「觸控感測器(touch sensor)」，隨後創立了 Elographics 公司，並將這個感測器裝置命名為「Elograph」。這是1973年全球發佈的 100 種最重要的新技術產品之一。儘管「Elograph」不像現代觸控螢幕那樣透明，但它代表了觸控技術發展的第一步。1974年，Elographics公司在「Elograph」感測器基礎下，推出了第一個透明的「電阻式觸控螢幕」並提交專利申請(如圖5 [15])。於1977年獲得發明專利。這是世界上第一款真正的觸控螢幕。此技術屬於壓力感測的電阻觸控技術，利用觸控的力量，讓導電層接觸下方 X 和 Y 軸的單獨層，然後將座標傳輸到電腦。它是最廣泛使用的觸控技術之一。1977 年，西門子公司提供資金給Elographics公司開發出第一個曲面玻璃觸控感應器介面。該設備最初被稱為「觸控顯示器」。1994 年 2 月 24 日該公司更名為 Elo Touch Solutions。

多倫多大學Nimish Mehta (1982) 發明了一種「觸控板(touch tablet)」設備，如圖6[16]。該設備採用磨砂玻璃，後面裝有攝影機，可以識別螢幕上的陰影和暗點。隨後，美國電腦藝術家 Myron Krueger (1985) 利用這種手勢互動設計了一種可以追蹤手部運動的光學

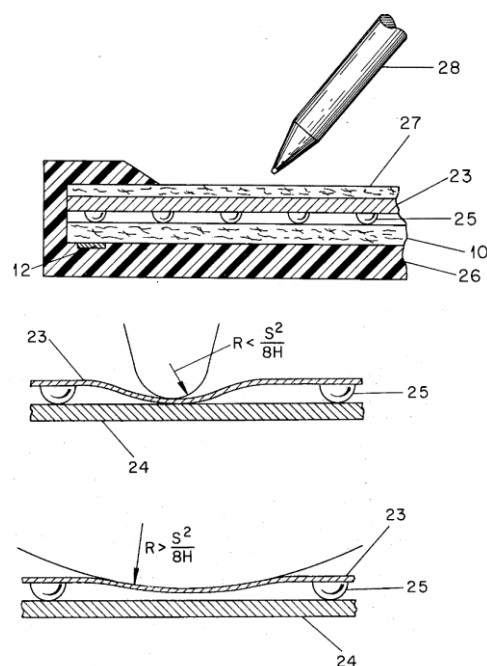


圖5.電阻式觸控裝置示意圖
(Hurst專利[15])

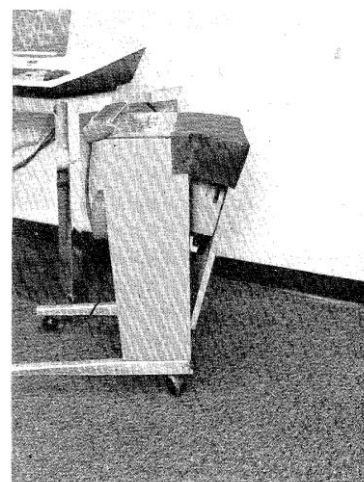


圖6. Nimish Mehta觸控板設備[16]

系統。它最初被稱為 Video Place，後來更名為 Video Desk[17]。該系統使用投影機和攝影機來追蹤手、手指及其所屬的人。然而，與「真正的」多點觸控技術不同，它無法感知誰或什麼東西在觸摸它[3]。

美國惠普(Hewlett-Packard)公司於 1983 年推出了一款採用觸控技術的家用電腦 HP-150[18]，自此，觸控螢幕開始商業化。這台電腦配備了一個 9 英寸的CRT(映像管)顯示螢幕，邊緣有紅外線 (IR) 偵測器，可以檢測到用戶的手指何時與螢幕互動。因為紅外線感測器會吸附灰塵，通常一次「觸摸」會阻擋多個感測器，系統無法分辨出真正的觸摸發生在哪裡？

技術真正向前邁進一大步的是美國貝爾實驗室的工程師 Bob Boie (1983)，他利用CRT(映像管)上的「電容陣列」創造了一種新的透明觸控覆蓋層。這一進步導致出現了今天所看到的「電容式觸控技術」[3]。貝爾實驗室認為他在1984 年發明了第一個「[多點觸控螢幕](#)」[19]。他的多項專利都以 Robert A. Boie 名義申請，主要針對設備，包括各種光學開關、感測器、數據連接器、掃描儀以及觸控螢幕[4]。

九十年代，觸控技術開始被引進手機、掌上電腦等手持裝置。蘋果公司於1987年開始開發Newton「個人數位助理 (PDA)」平台，內建手寫辨識軟體。並於1993年8月推出第一部裝有Newton作業系統(OS)的產品，這部PDA具有電阻式觸控螢幕、紅外線、手寫輸入等功能。1998年2月27日停產。1993年，IBM 和 BellSouth 公司共同推出了世界上第一款智慧型手機 Simon (圖7)[13]，它具有可讓用戶撥打電話號碼的觸控介面外，還具有記事本、日曆和傳真功能、分頁功能、電子郵件、約會安排、通訊錄、計算器以及使用觸控筆操作「電阻式觸控螢幕」來瀏覽選單和輸入資料。這是首批採用電阻式觸控螢幕技術的手機之一[13]。1996 年Palm 公司以 Pilot 系列進入「個人數位助理 (PDA)」市場，率先推出電阻式觸控顯示器技術[3]。



圖7. 第一支智慧型手機 Simon (圖片來源：[13])

美國德拉瓦(Delaware)大學研究生 Wayne Westerman (1999) 發表其博士論文，題為「在多點觸控表面的手部追蹤、手指辨識與和弦操控 (Hand tracking, finger identification, and chordic manipulation on a multi-touch surface)」[20]。該論文詳細介紹現今所知「[電容式多點觸控技術](#)」的機制。隨後，他成立FingerWorks 公司，開始生產基於手勢的產品-iGesture pad；允許單手操作 PDA 設備。2005 年FingerWorks 被蘋果公司收購，並於

2007 年將這項技術廣泛應用於蘋果iPhone手機和音樂播放器iPod中[3]，並迅速成為智慧型手機的業界標準[4]。至此，電容式多點觸控技術成為移動裝置的主流。可以說，智慧型手機的普及是 21 世紀的標誌性特徵。

(五) 硬式觸控筆控技術的發展[11; 21; 22]

觸控筆(Stylus Pens)是一種專為觸控螢幕而設計的工具，它能夠比手指更精確地與觸控螢幕進行互動。它是人機互動的重要工具，早期觸控筆以模仿鋼筆為主，有不同類型。其中電容式觸控筆模仿手指觸摸。主動式觸控筆需要電源並提供壓力靈敏度等功能。藍牙觸控筆透過藍牙連接，實現專門的功能。盤狀觸控筆具有清晰的筆尖，可精確控制，而細點觸控筆則具有更鋒利的筆尖，可進行細緻的工作。底下對觸控筆發展歷程作一簡單回顧[11; 21; 22]。依照觸控筆需要電源與否，可以區分主動式(需要電源)和被動式觸控筆。主動和被動出觸控筆有各自的優點和缺點，如表2所示。

表2. 主動式和被動式觸控筆的比較

特徵	主動式觸控筆	被動式觸控筆
精度和響應度	更精確且響應速度更快	精度低於主動式觸控筆
內建電池	需要內建電池	無需內建電池
相容性	由於標準不同，相容性有限	與電容式觸控螢幕普遍相容
功能	附加功能(例如壓力敏感度、傾斜支援)	基本功能(如手指)
價格	較貴	較便宜

不同類型觸控筆都有獨特的功能和優點。以下是常見類型的概述：

1. 電阻式觸控筆

- (1) 早期概念－1960~1980 年：電阻式觸控螢幕最初被概念化用於偵測表面上的物理壓力。這些系統基於兩層導電材料，中間由一層絕緣空氣或間隔物隔開。當施加壓力(例如使用觸控筆)時，各層會接觸，從而完成電路並精確定位接觸位置。
- (2) 商業應用－1980~1990 年：早期的電阻式螢幕應用於「個人數位助理 (PDA)」和工業手持設備，使用觸控筆提供精確的輸入。主要優勢包括價格便宜、精度高、在工業環境中耐用。
- (3) 普及－1990 年以後：像 Palm Pilot的PDA裝置，將電阻式觸控筆帶入手寫辨識和選單導航的用途。此階段觸控筆是被動式裝置，為了精確起見，其筆尖通常較窄。電阻式觸控筆的優點是具有高準確度和精確度，特別是手寫或繪畫等精細任務。它與任何輸入工具相容(例如手指、觸控筆、甚至手套)。它的局限性則是僅限於單點輸入，缺乏多點觸控功能。易磨損，表面容易出現刮痕。僅依賴壓力輸入，限制了觸覺反應。

2. 電容式觸控筆

- (1) 基礎研究－1970~2000年代：電容式觸控螢幕最初是為了偵測螢幕附近的手指所造成的電容變化而開發的。早期應用著重於手指觸摸介面而不是觸控筆。
- (2) 觸控筆與電容式觸控螢幕的整合－2000~2010年：「電容式多點觸控」系統的出現(例如 2007 年的 Apple iPhone)，凸顯電阻式螢幕的局限性，以及對響應更快、更耐用的系統的需求。電容式觸控筆旨在模仿手指的電容特性，同時提供精確度。
- (3) 主動式智慧型觸控筆－2010年以後：Wacom、Apple 和 Microsoft開發具有壓力敏感度、傾斜檢測和無線連接功能的主動式電容觸控筆(如Apple pencil)。主動式觸控筆將電容觸控與附加電子元件結合，實現了防手掌誤觸和可自訂按鈕等進階功能。

電容式觸控的優勢在於多點觸控功能、支援手勢和同時輸入。它的局限性則是需要高電容材料輸入，限制輸入方式。被動式電容觸控筆缺乏精確度，主動式電容觸控筆透過傾斜偵測和壓力敏感度等功能增強了互動性。

3. 藍牙觸控筆 [23]

這種觸控筆使用藍牙連接到您的裝置。其優點是：它們提供壓力靈敏度和可自訂按鈕等額外功能，提高精度和控制力。缺點則是需要藍牙配對比較耗電。多了藍牙模組與電源需求，與被動式觸控筆相比，成本較高。

(六) 軟性刷毛觸控筆 (Brush Stylus)

刷毛觸控筆是一種專為數位繪畫設計的觸控筆，其筆頭類似於傳統毛筆，通常由「合成纖維」或「導電刷毛」製成，能夠模擬真實筆毛的筆觸與壓感變化。這類觸控筆廣泛應用於數位藝術、書法與設計領域，使創作者能夠在觸控螢幕上更自然地進行繪畫或書寫。

1. 現有電容式刷毛觸控畫筆

- (1) 在網路商店和YouTube影片搜尋，當前電容式觸控畫筆有 Sensu Brush Stylus [24; 25]、BuTouch Professional[26; 27]和 Nomad Brush[28; 29] 等產品，它們結合傳統畫筆設計與觸控筆技術。特色包括「導電刷毛(碳纖維)筆頭」、輕量化設計以及與觸控螢幕的相容性。
- (2) 導電刷毛的限制與挑戰：與傳統毛筆相比，這些「導電刷毛(碳纖維)」觸控筆都是「乾式觸控筆」，無法與沾有墨汁或顏料的毛筆與畫筆完全擬真。且運筆的壓力與傾斜感應能力有限。小尺寸筆刷在細節處理方面的精度較低。難以模擬真實毛筆柔軟且動態的彈性，尤其無法展現毛筆筆法的變化。
- (3) 價格高：Sensu 和BuTouch的刷毛觸控畫筆網路定價，每支大約台幣1千到2千元。

而Nomad則是每支台幣約3萬元。這個價格太貴，無法普及推廣。

- (4) 經濟效益低：刷毛觸控毛筆與畫筆，僅能當作觸控筆使用，而無法同時沾墨水或水彩在紙上作畫寫書法。單價高，用途單一，不符合經濟效益。

2. 濕式觸控毛筆(畫筆)

如果要完全擬真毛筆，那麼一定要讓筆毛沾水才能做到。比利時Hasselt大學Vandoren et.al (2009)發表「使用真實濕筆毛的互動式數位繪畫系統」的論文[30]。說明使用真實畫筆沾水，在紅外線觸控螢幕上面畫圖，比較乾、溼筆毛繪畫的擬真效果如圖8[30]所示。相比乾畫筆產生的微弱圖像

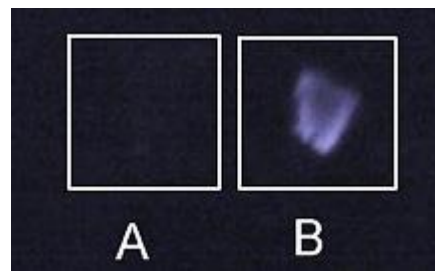


圖8. 乾(A)與濕(B)筆毛在紅外線觸控螢幕繪畫的圖案比較 [30]

(A)，濕畫筆的圖像(B)則清晰可見，不同位置的接觸強度，也能夠清楚地表現出圖案的明暗。它能夠清晰區分濕畫筆與紅外線觸控螢幕之間的「接觸」與「非接觸」狀態，也就是能夠解析出「筆力輕重」。即便是輕輕碰觸螢幕的小型畫筆，也能輕鬆地將筆跡轉換成紅外線信號軌跡，而懸空畫筆或接觸乾燥物體則不會被偵測到訊號。

此外使用真實畫筆沾水，本就是全擬真方式進行畫圖。濕潤的接觸界面也和使用真實顏料進行繪畫時的筆觸類似。但是紅外線觸控螢幕價格昂貴，且紅外線易受塵埃干擾，不是目前觸控裝置的主流技術，仍然有美中不足之處等待克服。

回顧電容式多點觸控螢幕與電容式觸控筆的演進，迄今尚未有一支低成本全擬真且不需要電源的電容式觸控毛筆與畫筆，可以在這種螢幕上練習書畫。雖然電容式導電刷毛觸控筆的擬真度已經非常好，但是乾筆毛在書寫過程中，筆觸還是無法像毛筆沾水那樣真實流暢。

三、研究目的(Purpose)

為了實現「用真實毛筆與畫筆在電容式觸控面板上練習書畫的願望」，本研究重點在設計並實現一款「低成本」且具備「全擬真(溼式筆毛)」的「被動式電容觸控毛筆與畫筆」。探索觸控毛筆的設計、功能與潛在應用。結合傳統書法藝術與現代科技，提高數位藝術學習的操作體驗。基於此，本研究將分成幾個面向做探討：

- (一) 探討觸控筆材料特性，以及觸控技術的基本原理。
- (二) 設計並自製全擬真被動式電容觸控毛筆與畫筆。
- (三) 分析觸控毛筆的機械與數位屬性。比較觸控硬筆與觸控毛筆書寫動態的表現能力。
- (四) 探討觸控毛筆在數位藝術、設計和教育領域的應用與優勢。
- (五) 發掘當前技術的局限性，並提出未來發展的改進方向。

貳、研究設備與器材

一、實驗1. 如何選擇觸控材料：被動式電容觸控材料的研究

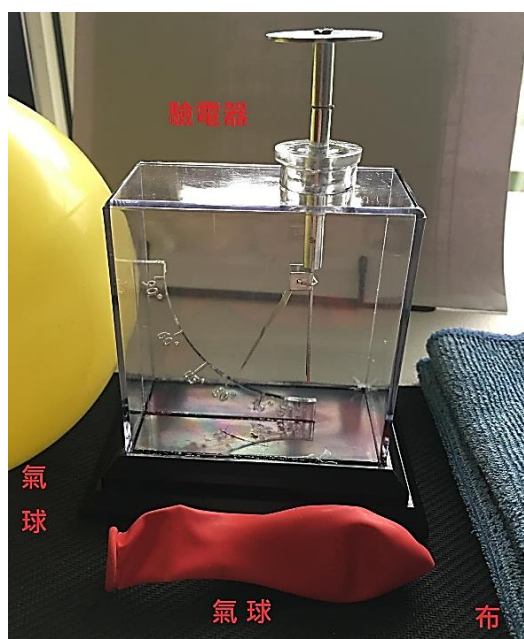


圖9 驗電器 [自製圖]



圖10. 電容式觸控筆材質實驗器材 [自製圖]

實驗1使用「蘋果iPad 6平板電腦」作為實驗用的電容式觸控面板。其它設備與器材有：

- (1)「驗電器」、氣球和布，用來摩擦起電並判斷材料是否能夠傳導並消散靜電如圖9所示。
- (2)「三用電錶」測量材料的電阻，判斷材質是否導電？
- (3) 游標尺、螺旋測微儀。測量觸控筆頭的直徑、厚度與長度。
- (4) 尖頭鑷子。
- (5) 各種自製(DIY)觸控筆頭的材料：棉花棒、鋁箔、陶瓷電容器、(鉛筆)木頭、橡皮擦、抗靜電袋、寶特瓶PET薄片、麥克筆筆蓋、PP塑膠紙、一字螺絲起子、被動式觸控硬筆(具有導電矽膠筆頭)等，如圖10所示。

二、實驗2. 設計並製作被動式電容觸控毛筆

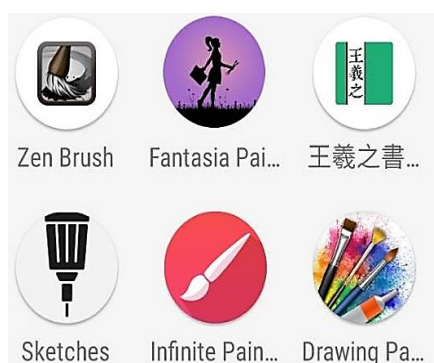


圖11. 書法與繪圖APP軟體 [自製截圖]



圖12. 測試裝置示意圖 [31]



圖13. 機械手臂握毛筆書寫測試示意圖 [31]

硬體設備：毛筆和水彩畫筆若干支、自來水、鋁箔紙、金屬抗靜電袋、棉花棒、iPad 6 平板電腦、安卓手機。APP軟體有：王羲之書法字典、Zen Brush兩款書法APP，以及Infinite Painter和Fantasia Painter繪圖APP。如圖11所示。

三、實驗3. 自製觸控毛筆與觸控硬筆的效能比較

第三部份實驗需要能夠測量觸控筆在平板電腦上面動態書寫的數據變化。這套專業測試設備是由義隆電子(觸控IC設計公司)所提供，他們自行改裝機台並撰寫測試程式「Elan Touch Innovation (2016版)」而成，可以測量觸控筆書寫過程的感應壓值以及筆觸面積。

軟體設備有：(1) Sketchpad (Win10作業系統版本)，能夠讓觸控筆在平板上面寫字的應用軟體。(2) Elan Touch Innovation (2016版本)，能夠擷取觸控面板輸出數據的軟體。

硬體設備有：(1)微軟公司「Surface Go平板電腦」，作為觸控面板使用。(2) 線測機 (型號DT-500F)。線測機與市面DT-500F點膠機功能是類似的，都是3D機械手臂。可以做3D寫字或點膠的動作。將點膠機的點膠頭，更換成夾觸控筆的裝置就成線測機，能讓機器握住觸控筆執行寫字畫圖的動作。測試系統如圖12和圖13 [31]。(由於此套測試設備屬於義隆電子公司私有，基於公司營業秘密保護，無法進行拍照，只能以文獻[31]類似的設備示意。)

參、研究過程與方法

我們重複網路上「自製觸控筆」影片的實驗[1; 32-36]，運用「類推法」設計並製作觸控毛筆。過程中發現影響被動式電容觸控筆的可能變因有：(1)觸控材料的導電性與靜電傳導性質；(2) 材料的電容大小；(3)觸控筆筆頭面積[37]；(4)筆頭材料的厚度。本研究針對這些變因設計實驗，驗證網路上關於觸控材料性質與觸控原理的說法是否正確？從實驗歸納結論並用定量理論證明觸控毛筆運作的物理原理。

一、實驗1 如何選擇觸控材料：被動式電容觸控材料的研究

(一) 實驗1-1 電容式觸控材料性質(1)-導電性探討

實驗目的：(1)確認哪些材料適合製作成被動式電容觸控筆？(2)驗證網路上認為「電容式觸控材料是『導電材料』」的說法是否正確？

(二) 實驗1-1 研究方法

1. 操控變因：觸控筆筆頭材料。應變變因：對於觸控面板是否有觸控感應。
2. 控制變因：(1) 筆頭材料面積(4 cm^2)。(2) 包覆鋁箔的筆桿。(3)蘋果 iPad 6 平板電腦。

3. 如何判斷材料是導體還是絕緣體? (1) 使用三用電錶測量電阻確認材料能否導電?當電阻太大超過三用電錶測量範圍時，我們用符號 ∞ 代表。(2)精確做法是透過查表得到待測材料的電阻率，一般定義導體的電阻率 $\leq 10^{-3}\Omega\cdot m$ ；絕緣體 $\geq 10^8\Omega\cdot m$ [38]。
4. 我們沒有精密測量介電常數的儀器，僅能透過手冊與網路查詢得到數值。
5. 實驗表單設計如下(×代表否；✓代表可)：

筆頭材料	電阻率 $\rho (\Omega\cdot m)$	相對介電常數 k	材質特性	觸控感應
				✓ or ×
				✓ or ×

6. 將筆桿材料換成(鉛筆)木頭，以及用手指抓取筆頭(把手指當筆桿)，重複上述步驟 1-5。

(三) 實驗1-2 電容式觸控材料性質(2)-靜電傳導性質

實驗目的: 驗證「電容式觸控材料是良好『靜電傳導材料』」的假說是否正確?

(四) 實驗1-2 研究方法

1. 操控變因：觸控筆頭的材料。應變變因：對驗電器是否具有靜電傳導的反應。
2. 控制變因：(1) 筆頭材料面積(4 cm^2)。(2) 包覆鋁箔的筆桿。(3) 氣球和布摩擦起電材料。
3. 實驗設計是參考網路實作派 (2022)「測試抗靜電材料」的實驗方法[39]。
4. 實驗步驟: (1) 將氣球摩擦布產生靜電。(2) 將帶電氣球靠近驗電器，讓驗電器金屬表面正負電荷分離。(3) 同時用手指輕觸驗電器頂端金屬。(4)將手指和氣球移開。此時驗電器的兩金屬片分開如圖 9。(5) 將待測材料輕碰驗電器上方金屬，觀察驗電器下方兩金屬片是否合起來?「是」代表待測材料能夠傳導靜電，或稱材料具有抗靜電性質，因此能夠讓驗電器上的電荷消散離開。

(五) 實驗1-3 觸控筆筆頭面積與觸控感應關係的研究

將實驗1-1中能夠作為觸控筆材料的物質，選擇幾種材料，進行筆頭截面積對觸控感應的實驗。觀察觸控筆頭大小是否影響觸控感應?

(六) 實驗1-3 研究方法

1. 操控變因：觸控筆筆頭材料的面積。應變變因：是否有觸控感應。
2. 控制變因：(1) 觸控筆頭材料、(2) 觸控筆頭材料的厚度、(3) iPad 6 平板電腦
3. 實驗表單設計如下(×代表否；✓代表可)：

材料筆頭截面直徑(mm)	能觸控感應
2	✓ or ×
4	✓ or ×

(七) 實驗1-4 觸控材料厚度與觸控感應關係的研究

在觸控面板上面覆蓋厚度不同的幾種材料，探討材料厚度影響手指或觸控筆的靈敏度。

藉由這個實驗了解為何人體戴布質手套無法使用電容式觸控面板。

(八) 實驗1-4 研究方法

1. 操控變因：觸控面板上覆蓋材料的厚度。應變變因：是否有觸控感應。
2. 控制變因：(1) 手指(或觸控筆)、(2) 觸控筆頭材料的面積(4 cm²)、(3) iPad 6 平板電腦。
(4)實驗時手指必須用力按壓覆蓋面板上不同厚度的筆頭材料。
3. 實驗表單格式設計如下(×代表否；✓代表可):

材料厚度(mm)	能觸控感應
1張0.1875mm	✓ or ×
2張	✓ or ×

二、實驗2. 設計並製作被動式電容觸控毛筆

當我們在YouTube看見「用鋁箔包覆棉花棒沾水DIY(自製)電容式觸控筆」的影片時[34; 35]，我們產生了設計觸控毛筆的靈感。「如果把棉花棒換成毛筆，把鋁箔包覆毛筆筆桿，用軟毛筆頭代替棉花沾水，是否也能當作觸控筆？」

這裡就是要用實驗來驗證這個類推想法是否可行？將毛筆包覆適合的觸控筆材料(如鋁箔、靜電袋)做成觸控毛筆，再將毛筆沾水濕潤，重複**實驗1-1**的實驗過程與方法，驗證哪一種筆桿和筆頭的材料組合能夠觸控感應？哪一種結構可行？並且把設計完成的觸控毛筆在Zen Brush、Infinite Painter書法和繪畫應用軟體上寫字畫圖，定性驗證書寫效果。

三、實驗3.自製觸控毛筆與觸控硬筆的效能比較

實驗目的在於透過科學儀器測量數據做客觀比較。對觸控硬筆和自製觸控毛筆沾水書寫「永」字做比較。永字在書法中筆畫少筆法多，包含：點(側)、橫(勒)、豎(努)、鉤(趯去一)、挑(提或策)、撇(掠)、啄(右短撇)、捺(磔去ㄣ)八種運筆方法。最能表現出書法「運筆」時的筆勁和抑揚頓挫，適合用來測試觸控筆書寫過程的動態表現能力。

實驗系統採用「可程控3D機器手臂觸碰面板測試法」。操作流程如圖14。操作時，將Surface Go平板電腦放置DT-500F(線測機)機台上，並讓機器手臂夾住觸控筆，由程控3D機械手臂在平板上寫字。過程中力道變化的感應壓值(電容變化大小的訊號)，從平板輸出端口，透過「Elan Touch Innovation」軟體擷取數據存成Excel檔，並畫數據折線圖。

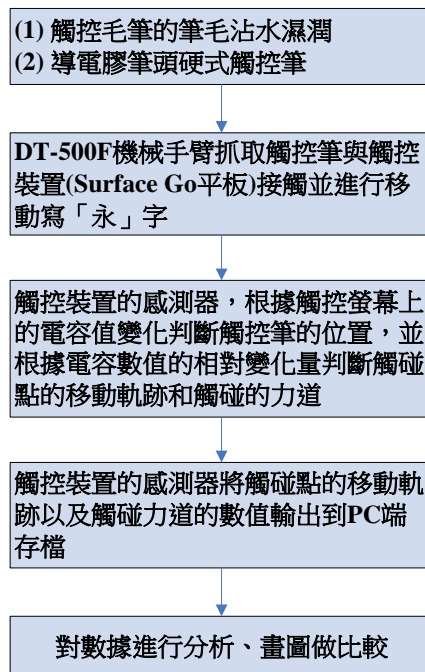


圖14. 觸控筆效能測試流程 [自製圖]

肆、研究結果

一、實驗1. 被動式電容觸控筆材質的研究

由實驗結果得到「能夠產生高電容的材料，就是良好的電容式觸控材料。」厚度薄、面積大以及「高介電常數的材料」都具有高電容，都是良好的觸控材料。

(一) 實驗1-1和1-2 電容式觸控材料性質的實驗結果

表3. 不同材質筆頭的觸控感應結果 (是✓；否×；△有效應但不明顯)

筆頭材料	電阻率 $\rho (\Omega \cdot m)^{*3}$	相對介電 常數 k^{*7}	材質特性	觸控 感應	傳導 靜電
觸控硬筆	$2 \sim 10^{*1}$	10-2000	導電矽膠(矽膠+導電碳黑) $^{*1} \rightarrow$ 導電	✓	✓
石墨棒 (//Basal平面) (⊥Basal平面)	電阻 $\approx 2.1\Omega$ $(2.5 \sim 5) \times 10^{-6}^{*3}$ $(3.0 \times 10^{-3})^{*3}$	12-15	石墨 \rightarrow 導體	✓	✓
鉛筆包覆鋁箔	$(2.65 \times 10^{-8})^{*3} \rightarrow 0$	∞	鋁箔 \rightarrow 金屬導體	✓	✓
抗靜電袋 *2	外層: ∞ 內: $2.65 \times 10^{-8}^{*3}$	外層2.2-2.4 內層 $\rightarrow \infty$	外層: PE聚乙烯和PET聚酯 \rightarrow 絕緣體 內層: 鋁箔(Al) \rightarrow 金屬導體	✓	✓
棉花沾蒸餾水	1.82×10^9 (純水)	80	~純水(極性分子) \rightarrow 絕緣體	✓	✓
棉花沾食鹽水	≈ 0.21 (海水) *3	6.1	NaCl \rightarrow 電解質 \rightarrow 導電	✓	✓
棉花沾酒精	$\approx 1.95 \times 10^7$ [40]	24.3 [40]	酒精 \rightarrow 非電解質(極性分子) \rightarrow 絕緣體	✓	✓
陶瓷電容器	∞	電容 $0.47\mu F$	高介電陶瓷 \rightarrow 絕緣體	✓	✓
(鉛筆)木頭	$\infty(10^{14} \sim 10^{16})^{*3}$	2~6	乾木頭(非極性分子) \rightarrow 絕緣體	×	✓
麥克筆筆蓋	$\infty(\sim 10^{13})$	2.0~2.6[41]	PP(聚丙烯, 非極性 $^{*4}) \rightarrow$ 絕緣體	×	×
透明塑膠紙	$\infty(\sim 10^{13})$	2.0~2.6	PP聚丙烯(非極性 $^{*4})$ 薄片 \rightarrow 絕緣體	✓	×
橡皮擦(塊狀)	$\infty(10^{16} \sim 10^{17})^{*5}$	1.4	PE聚乙烯(非極性聚合物) $^{*4} \rightarrow$ 絕緣體	×	△
寶特瓶PET 薄片	$\infty(10^{21})^{*3}$	$(2.9 \sim 3.4)^{*6}$	PET(polyethylene terephthalate, 極性 聚合物、薄膜電容 $^{*4,6}) \rightarrow$ 絕緣體	✓	×
一字螺絲起子	1.0×10^{-7}	∞	鐵(金屬) @起子垂直按壓! \rightarrow 導體	×	✓
一字螺絲起子	1.0×10^{-7}	∞	鐵(金屬) @起子水平按壓! \rightarrow 導體	✓	✓
氣球	$10^{14} \sim 10^{15}$	3.0~4.0	天然乳膠 \rightarrow 絕緣體	✓	×

*1. 導電矽膠就是在高溫硫化加入補強劑、導電助劑 C_2H_2 (乙炔碳黑)、結構抑制劑、硫化劑等，藉此讓原本屬於絕緣特性的矽膠擁有通電並導電的效果[42; 43]。

*2. 金屬抗靜電袋結構：鋁金屬層、聚乙烯(PE)和聚酯(PET)靜電耗散層、防止磨損的塗層[44]。

*3. 純水(ultrapure water)電阻率 $\sim 1.82 \times 10^9 \Omega \cdot m$ 。參閱「電阻率與電導率 - 維基百科」[45]。

*4. 分子內正電荷與負電荷的質心不一致者稱為極性分子(如水及氨)。PET(寶特瓶)是極性聚合物。而聚乙烯、聚丙烯和聚苯乙烯等聚合物沒有極性。通常極性分子具有較高介電常數[46]。

*5. 聚乙烯(PE, polyethylene)的電阻率很高，體積電阻率的值為 10^{16} 至 $10^{17} \Omega \cdot m$ (在 $20^\circ C$ 時)[47]。

*6. 薄膜電容常見的四種「介電材料」有: PET、PEN、PPS 和 PP[48; 49]。

*7. 材料相對介電常數，是查閱相對介電常數表的文獻資料所得到的[41; 49-51]。

*8. 導體電阻率 $\leq 10^{-3} \Omega \cdot m$ ；絕緣體 $\geq 10^8 \Omega \cdot m$ [38]

1. 不同筆頭觸控材料，對於用手抓「鋁箔包覆鉛筆(木頭)的筆桿+筆頭」和用手指直接

抓住筆頭的實驗結果均相同。詳細實驗結果如表 3。

2. 無包覆鋁箔的純粹(鉛筆)乾木頭筆桿，不管哪一種材質的筆頭，都不能觸控感應。
3. 導電材質的筆頭都能產生觸控感應。例如：導電矽膠、鋁箔、石墨、食鹽水。
4. 絕緣體材質的筆頭有些能夠產生觸控感應。例如：陶瓷電容器筆頭、沾酒精的棉花。
5. **實驗結果推翻了「電容式觸控材料是『導電材料』」的假說。**純水、酒精、陶瓷、PP 薄塑膠紙、PET 薄片和天然乳膠都是無法導電的絕緣體，卻都是良好的觸控材料。這結果推翻網路上認為「電容式觸控原理是基於觸控材料的導電性」的說法。
6. 再看表3靜電傳導的實驗結果。令人意外的是乾木頭的靜電傳導效果(帶電荷的驗電器閉合快慢程度)和手指、鋁箔一樣好，卻不能觸控感應。氣球、寶特瓶PET薄片和聚丙烯(PP)塑膠紙都無法傳導靜電(帶電荷的驗電器不閉合)，卻能產生觸控感應。**實驗結果推翻「電容式觸控材料是良好『靜電傳導材料』」的假說。**
7. 上述說明了「電容式觸控原理是基於觸控材料的靜電傳導特性」的說法不正確。嚴謹說法：當兩電容(面板和手指)碰觸，產生「靜電傳導」直到「靜電平衡」稱為「電容耦合」，兩物體電容大小會決定靜電平衡的電荷分配量，大電容分配較多的電荷(第 14-(1)論述中證明)。當電容耦合產生電容的變化量，大於面板感測器所能偵測到的閾值，才能產生觸碰感應。電容耦合大小決定觸控與否，而非材料單一的靜電傳導。
8. 第 5、6、7 的論述，**推翻了「電容觸控原理是基於材料的導電性或靜電傳導能力」**這樣的說法。那麼電容觸控真正的原因是甚麼呢？我們從表 3 介電常數這欄數據，加上多數發生觸控感應較靈敏的材料有：金屬、石墨、水、酒精和陶瓷等高介電常數(> 6)的材料。我們可以歸納出「高介電常數的材料是良好的觸控材料。」但是介電常數不是很大(< 4)的 PP 透明塑膠紙、PET 薄片和氣球卻能夠產生觸控感應，這是怎麼一回事？這是因為它的厚度很薄，也能產生很大的電容，**實驗 1-4** 會仔細探討材料厚度與觸控感應的關係。因此，我們可以更精確地說：「**能夠產生高電容的材料，都能產生極佳的電容觸控感應，才是良好的觸控材料。**」高介電常數、厚度薄、面積大的材料，都能夠產生較大的電容，因此較容易產生電容式觸控感應。
9. 一字螺絲起子水平與垂直按壓，結果不同。水平按壓與平板的觸控面積遠大於垂直按壓，所以能觸控感應。這牽涉到筆頭與平板接觸面積的因素，在**實驗 1-3** 中作探討。
10. PP 塑膠紙的相對介電常數不是特別高，卻能觸控感應。抗靜電袋製成的筆頭，外層是絕緣的聚乙烯，內層是金屬鋁箔，這樣的筆頭也能產生靈敏的觸控感應。這些都牽涉到金屬與絕緣薄膜的等效串聯電容與厚度問題，將在**實驗 1-4** 中作深入探討。

11. 另外，聚丙烯(PP)材質的麥克筆筆蓋不能觸控感應，而 PP 塑膠袋薄片卻能觸控感應。相同材質，厚度越薄，電容越大。因此，PP 塑膠袋比 PP 麥克筆筆蓋電容更大，所以可以觸控感應。再次說明電容的確與厚度有關係。會在**實驗 1-4**作探討。
12. 綜合上面 1~11 的論述，我們得到結論：**能夠產生高電容的材料，才是良好的觸控材料**。因此在厚度與面積固定下，高介電材料才是最佳電容式觸控材料。在觸控面板業界，相對介電常數大於觸控玻璃的介電常數 6 [49-51]，就可以稱為高介電材料。一般將金屬相對介電常數視為無窮大，所以產生觸控感應的靈敏度也是最大。這是因為相對介電常數 k 是物質對電場的**極化反應能力**，越大代表越能削弱電場。金屬中的自由電子移動會完全抵銷電場，表示其**極化能力是無限大**，所以 $k_{\text{金屬}} \rightarrow \infty$ 。
13. 底下我們從巨觀電容耦合理論來定量解釋上述結論。觸控材料(手指)碰觸面板的物理機制，從「投射式自電容感測」觸控面板設計來看(測量感測器對地的電容變化)，其實就是兩個電容並聯。Microchip 公司(2021) <<電容式觸摸原理、設計挑戰和解決方案培訓教程>>影片 [52]，詳細解析觸控面板設計原理，影片中清楚顯示手指觸碰面板的物理機制如圖 15。藍色方框內手指圖示代表手指電容 $C_{\text{手指}} = C_F$ ，藍色方框以外代表觸控面板的電路設計與電容分佈，碰觸前感測器(sensor)偵測到電容 $C_{\text{感測器(前)}} = C_p$ (寄生電容 C_p 就是觸碰前電路中各元件存在的總電容)。當手指觸碰面板後偵測到電容 $C_s = C_{\text{感測器(後)}} = C_p + C_F$ 。可以簡化成圖 16 兩個電容並聯模型方便說明。

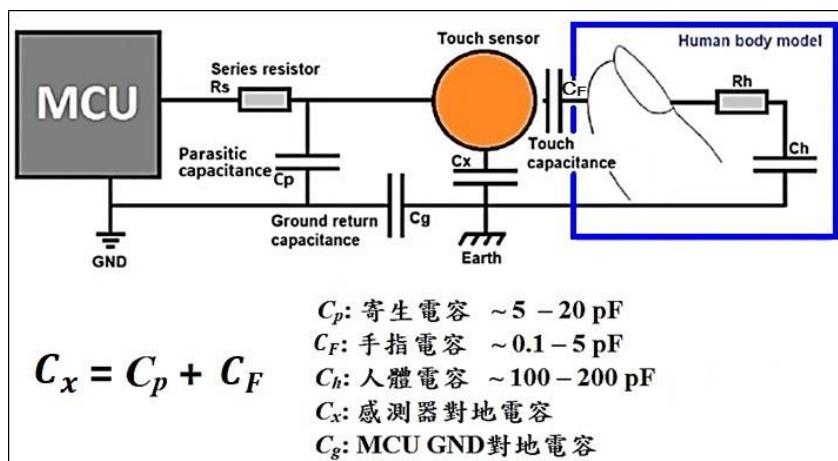


圖 15. 自電容感測觸控電路示意圖 (來源:Microchip 公司[52])

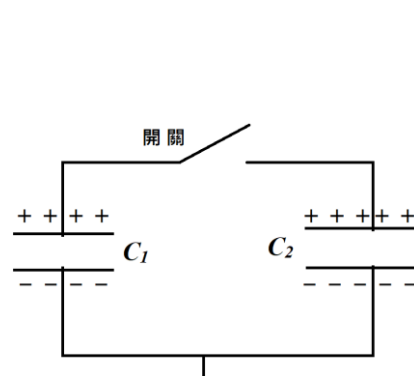


圖16. 兩電容接觸時電容耦合電路示意圖 [自製圖]

圖 16 中面板電容 $C_{\text{面板}} = C_1$ 、手指電容 $C_{\text{手指}} = C_2$ 。手指未觸碰面板，觸控面板感測器偵測到電容 $C_{\text{感測器(前)}} = C_{\text{面板}}$ ；手指觸碰面板，感測器偵測到並聯後總電容為：

$$C_{\text{感測器(後)}} = C_{\text{並聯}} = C_{\text{面板}} + C_{\text{手指}} = C_p + C_F \quad \text{----- (1)}$$

$$\text{觸控前後電容變化量: } \Delta C_{\text{感測器}} = C_{\text{感測器(後)}} - C_{\text{感測器(前)}} = C_{\text{手指}} = C_F \quad \text{----- (2)}$$

- (1) 手指(觸控材料)碰觸面板，面板感測器偵測到電容增加量 $\Delta C_{\text{感測器}}$ 恰好等於手指電容 C_F 。 \Rightarrow 觸控材料的電容 C_F 越大，電容變化量 $\Delta C_{\text{感測器}}$ 越大，觸控感應越靈敏。
- (2) 當手指觸碰面板， $C_{\text{感測器(後)}} = (C_{\text{面板}} + C_{\text{手指}}) \geq C_{\text{感測器閾值}}$ 時，發生觸控感應。當電容 $C_{\text{手指}}$ 不夠大， $C_{\text{感測器(後)}} = (C_{\text{面板}} + C_{\text{手指}}) < C_{\text{感測器閾值}}$ 時，無法產生觸控感應。
- (3) 這樣就定量證明「能產生高電容的材料，就是良好的電容式觸控材料」。
14. 這裡再從微觀的「電容耦合(兩電容靜電平衡)」來定量說明。觸控感應的原理是基於「帶有高電容」的物體與面板(電容)碰觸，最終「靜電平衡」使得兩物體的電位相等，電容和電量改變，面板的感測器偵測到電容變化，產生觸控感應。藉此偵測觸控位置。圖 16 中，假設物體 1 為觸控面板電容 C_1 ，帶電量 Q_1 、電位 V_1 (假設接地處電位為零，所以 V_1 也代表電位差)。物體 2 為觸控材料(手指或觸控筆) 電容 C_2 ，帶電量 Q_2 、電位 V_2 。當按下開關，兩電容接觸，根據靜電平衡原則，最終兩者的電位會相等(V_f)。兩物體最終電量、電容分別為 Q_{1f} 、 C_{1f} ； Q_{2f} 、 C_{2f} 。

根據電荷守恆和電容定義($C = \frac{\text{電量}}{\text{電位差}} = \frac{Q}{V} \Rightarrow Q = CV$)：

$$Q_{\text{總電荷}} = Q_1 + Q_2 = Q_{1f} + Q_{2f} = C_1 V_f + C_2 V_f = (C_1 + C_2) V_f = C_{\text{total}} V_f$$

$$\Rightarrow V_f = \frac{Q_{\text{總電荷}}}{C_{\text{total}}} = \frac{Q_{\text{總電荷}}}{C_1 + C_2} = \frac{Q_1 + Q_2}{C_1 + C_2} \text{ 且 } C_{\text{total}} = C_1 + C_2 \Rightarrow \text{兩電容並聯 (與巨觀結果相同)}$$

$$\Rightarrow C_{\text{感測器(後)}} = C_{\text{total}} = C_1 + C_2 = C_{\text{面板}} + C_{\text{手指}} = C_{\text{並聯}} \Rightarrow \text{與(1)式結果相同。}$$

$$\text{物體 1 最終電量：} Q_{1f} = C_1 V_f = C_1 \frac{Q_{\text{總電荷}}}{C_1 + C_2} = Q_{\text{總電荷}} \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) = (Q_1 + Q_2) \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right)$$

$$\text{物體 2 最終電量：} Q_{2f} = C_2 V_f = C_2 \frac{Q_{\text{總電荷}}}{C_1 + C_2} = Q_{\text{總電荷}} \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} \right) = (Q_1 + Q_2) \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} \right)$$

- (1) $Q_{1f} : Q_{2f} = C_1 : C_2 \Rightarrow$ 靜電平衡時，兩物體的電位相等 (V_f) $\Rightarrow Q_f \propto C$ (正比關係) \Rightarrow 觸控材料接觸面板達靜電平衡時，材料的電容越大分配到越多電量。光靜電傳導不足以解釋觸控感應，端看材料自身電容是否夠大？在靜電平衡過程中電容越大分配到越多電荷，從面板上吸走越多電荷，感測器電容變化越大，感應越靈敏。

$$(2) \Delta Q_2 = Q_{2f} - Q_2 = Q_{\text{總電荷}} \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} \right) - (Q_{\text{總電荷}} - Q_1) = -[Q_{\text{總電荷}} \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) - Q_1] = -\Delta Q_1 \Rightarrow$$

說明靜電平衡過程中保持電荷守恆。一方電荷流出量等於另一方的電荷流入量。

$$(3) \Delta C_{\text{感測器}} = \Delta C_1 = C_{\text{total}} - C_1 = (C_1 + C_2) - C_1 = C_2 = C_{\text{手指}} = C_F \Rightarrow \text{與(2)式結果相}$$

$$(4) \Delta V_1 = V_f - V_1 = \frac{Q_{\text{總電荷}}}{C_1 + C_2} - \frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{C_1 + C_2} - \frac{Q_1}{C_1} \Rightarrow \text{透過微觀電容耦合定量分析，可以計算觸控面板感測器電壓的變化量} \Delta V_1。$$

(二) 實驗1-3 觸控筆筆頭大小與觸控感應關係的實驗結果

1. 根據實驗 1-1 結果。我們選擇鋁箔、抗靜電袋、濕棉花三種筆頭，進行筆頭面積對電容式觸控感應的影響。結果如表 4:

表4. 筆頭面積大小與觸控感應的關係 (是✓；否×)

鋁箔筆頭 直徑(mm)	能觸控感應	濕棉花筆頭 直徑(mm)	能觸控感應	抗靜電袋筆頭 直徑(mm)	能觸控感應
2	×	2	×	2	×
3	×	3	×	3	×
4	✓	4	✓	4	✓
5	✓	5	✓	5	✓
6	✓	6	✓	6	✓
7	✓	7	✓	7	✓
8	✓	8	✓	8	✓

2. 實驗結果顯示筆頭截面直徑要求 $\geq 4\text{mm}$ 才能觸控感應。觸控筆頭的截面直徑 $\leq 3\text{mm}$ ，就無法與面板觸控感應。證實網路上要求「觸控筆筆頭直徑至少 $\geq 6\text{mm}$ 」的說法正確 [37]。各廠牌螢幕觸控解析度不同，品質較好的螢幕，筆頭截面直徑可以到 4mm 還能觸控感應。⇒ 結論：被動式電容觸控筆頭面積太小，無法觸控感應。
3. 這是因為電容大小與面積成正比，觸控材料面積越大，電容越大，越容易觸控感應。
4. 投射電容式觸控面板 X-Y 網格電極間的電容器密度，是另一個影響觸控筆頭面積的因素，由於各廠牌觸控面板設計方式不同，面板上電容器分佈密度(觸控解析度)也不同，導致接受觸控筆頭面積也不同。筆頭太小，可能無法正確觸碰到面板上的電容器，無法產生電容耦合，就無法發生觸控感應。這點從鋁箔筆頭面積實驗以及一字螺絲起子垂直按壓面板沒有感應可以看出。另外介電常數視為無窮大的鋁箔，理應電容夠大，應該要有觸控感應。但是當其筆頭直徑 $\leq 3\text{mm}$ ，實驗結果仍然無法觸控感應。

(三) 實驗1-4 觸控材料厚度與觸控感應關係的實驗結果

1. 實驗結果如表 5 和表 6 所示。除了金屬鋁箔厚度到了 64 張厚度(0.704 mm)仍然能夠感應外。其餘材質到達一定厚度時就無法觸控感應。結果表明筆頭材質厚度越厚，觸控效果越差。厚度越薄，觸控感應越好。連低介電常數的衛生紙和影印紙($k \approx 2$) [49; 51]，以及聚丙烯(PP)塑膠紙($k = 2.2 \sim 2.6$) [41]，在厚度很薄的情況下，依然能夠觸控感應。
2. 因為電容大小與厚度成反比。所以相同材質和面積的聚丙烯透明塑膠紙(薄片厚度 $\approx 0.03\text{mm}$ /張)與聚丙烯麥克筆筆蓋(厚度=筆蓋長度 $\approx 25\text{mm}$)，塑膠紙能夠觸控感應，麥克筆筆蓋卻不行。估算筆蓋的厚度約為塑膠紙的 833 倍，筆蓋產生的電容只有塑膠紙的 $\frac{1}{833}$ 倍，從這個比較就能看出觸控材料厚度對觸控感應的影響。
3. 金屬鋁箔即便 64 層厚度(0.704mm)比聚丙烯透明塑膠紙 16 張厚度(0.475mm)厚，仍然

能夠觸控感應。因為金屬相對介電常數視為無窮大(∞)，遠大於聚丙烯塑膠紙($k \approx 2.2 \sim 2.6$)，所以厚度對金屬鋁箔的電容大小影響不大。另外對金屬而言，截面積固定，厚度增加，表面積反而增加，電容反而更大，更容易產生觸控感應。

- 金屬抗靜電袋是由聚乙烯(PE)和聚酯(PET)靜電耗散層，兩層中間包覆金屬鋁薄膜而成。屬於複合材料的電容組成。其等效電容遠比單一鋁薄膜的電容來得低。因此會有一個極限厚度無法觸控感應。

表5. 觸控材料厚度與觸控感應的關係 (是✓；否×)

鋁箔 厚度(mm)	觸控 感應	抗靜電袋 厚度(mm)	能觸控 感應	聚丙烯透明塑膠紙 厚度(mm)	觸控 感應
1張 (0.011mm)	✓	1 張 (0.0547mm)	✓	1 張 (0.0297mm)	✓
2 張	✓	2 張	✓	2 張	✓
4 張	✓	4 張	✓	4 張	✓
8 張	✓	8 張	✓	8 張	✓
16 張	✓	16 張	✓	16 張 (0.475mm)	×
32 張	✓	32 張 (1.75mm)	×	32 張 (0.95mm)	×
64張 (0.704mm)	✓	64張 (3.50mm)	×	64 張 (1.90mm)	×

表6. 觸控材料厚度與觸控感應的關係 (是✓；否×)

衛生紙厚度(mm)	能觸控感應	影印紙厚度(mm)	能觸控感應
1張 (0.125mm)	✓	1 張 (0.10mm)	✓
2 張	✓	2 張	✓
3 張	✓	3 張	✓
4 張	✓	4 張	✓
5 張	✓	5 張	✓
6 張	✓	6 張	✓
7 張 (0.875mm)	×	7 張 (0.70mm)	×
8 張 (1.00mm)	×	8 張 (0.80mm)	×

二、實驗2 設計並製作被動式電容觸控毛筆

(一) 濕棉花棒觸控筆的類推實驗結果

從實驗1-1確認：手握「包覆鋁箔的棉花棒沾水」可以做觸控筆。將棉花筆頭更換成毛筆筆頭，把棉花棒筆桿換成毛筆竹筆桿，包覆不同材料，進行觸控感應實驗。結果如表7。

- 「乾棉花和乾筆毛筆頭」或「包覆筆桿材料與筆頭不接觸」均無法產生觸控感應。
- 「毛筆竹筆桿貼覆透明膠帶(非高電容材料)」⇒ 無法產生觸控感應。
- 「濕棉花和濕筆毛筆頭」包覆「高電容材料」，搭配「包覆筆桿材料與筆頭接觸」才能產生觸控感應。例如包覆鋁箔或抗靜電袋的毛筆沾水，才能產生觸控感應。而一般毛筆沾水或貼透明膠帶的觸控毛筆沾水，還是無法讓平板發生觸控反應。

4. 實驗證明「包覆鋁箔的濕棉花棒觸控筆」類推成「包覆鋁箔的濕筆毛觸控毛筆」的想法可行。甚至用「包覆金屬抗靜電袋的濕筆毛觸控毛筆」也可以當觸控毛筆。

表7. 自製電容式觸控毛筆 (是✓；否×)

觸控筆筆頭材料	筆桿材料	包覆筆桿材料與筆頭是否接觸	能觸控感應
棉花(乾)	棉花棒筆桿包覆鋁箔	✓	×
筆毛(乾)	毛筆竹筆桿	✓	×
筆毛(乾)	毛筆竹筆桿包覆鋁箔	✓	×
棉花(濕)	棉花棒筆桿包覆鋁箔	✓	✓
筆毛(濕)	毛筆竹筆桿包覆鋁箔	✓	✓
筆毛(濕)	毛筆竹筆桿包覆抗靜電袋	✓	✓
筆毛(濕)	毛筆竹筆桿貼覆透明膠帶	✓	×
棉花(濕)	棉花棒筆桿包覆鋁箔	×	×
筆毛(濕)	毛筆竹筆桿	×	×
筆毛(濕)	毛筆竹筆桿包覆鋁箔	×	×
筆毛(濕)	毛筆竹筆桿包覆抗靜電袋	×	×

(二) 全擬真電容式觸控毛筆與畫筆的設計與製作

運用上述「包覆鋁箔的濕棉花棒觸控筆」的類推實驗結果，我們就能輕易設計並自製一款全擬真被動式電容觸控毛筆與水彩筆如圖17所示。觸控毛筆結構如圖18。詳細說明如下：

1. 「自製全擬真電容式觸控毛筆」包含：筆桿本體、軟毛筆頭及導電片。筆桿本體的握持範圍可供使用者握持。使用者手握觸控毛筆時，至少一手指能接觸到此位置。
2. 「筆桿本體」具有筆桿筆頭端與尾端，且筆桿本體是自筆頭端延伸至筆桿尾端，進而形成一長條狀結構，可以是圓柱體、方柱體、矩形柱體、三角形柱體或其它多邊形柱體，且不限於此。筆桿本體內部可為實心結構或中空結構。本設計筆桿本體直接取用真實毛筆或水彩筆筆桿，因此具有全擬真毛筆或水彩筆的握持感覺。此外筆桿本體不同處的截面大小可以不相同，意即筆桿本體各處的寬度可以不同。



圖17.自製觸控毛筆與水彩筆[自製圖]

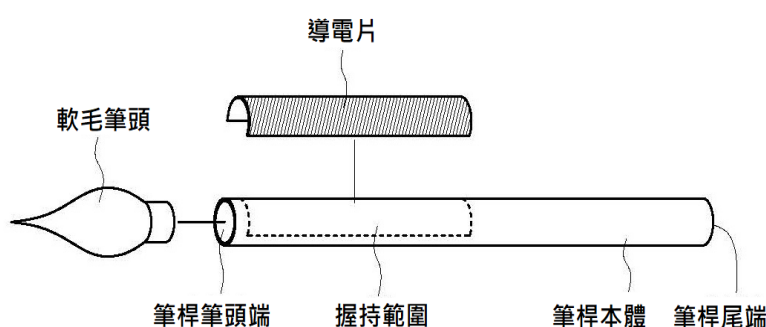


圖 18. 自製全擬真電容式觸控毛筆結構圖[自製圖]

3. 「軟毛筆頭」連接於筆桿本體，鄰近筆頭端握持範圍。軟毛筆頭可透過各種可行的方式與筆桿本體連接在一起，例如黏接、樞接、卡合、鎖固和塗佈等。軟毛筆頭的材質是可供液態物質(例如水、酒精)附著的任意材質。濕軟毛筆頭才能讓觸控毛筆達到全

擬真毛筆的書寫效果。所以設計是基於「濕式觸控毛筆與畫筆」設計，使用時必須將軟毛筆頭沾水濕潤或沾其它高介電常數的液體，就能在電容式觸控面板上書寫或畫圖。

4. 「導電片」貼附於筆桿本體上，鄰近於筆桿筆頭端。導電片長度必須覆蓋部份軟毛筆頭和全部「握持範圍」。寬至少與握持範圍部份重疊。製作時導電片同時貼附在握持範圍和軟毛筆頭尾端。導電片在筆桿本體上的位置必須讓使用者在握持筆桿本體時，至少部分肌膚(例如一手指)能夠觸碰到導電片的位置。

底下詳細說明各元件材質特性與要求：

1. 關於「液態物質(觸控毛筆墨水)」的特性：液態物質必須是具備高介電常數的液體。可為「酒精、蒸餾水、自來水、食鹽水、電解質溶液」等。
2. 關於「筆桿本體」的材質：可為絕緣體、金屬導體和半導體材質，例如木頭，塑膠材質筆桿等。如果筆桿本體採用金屬殼體，就能取代導電片功能。在此情況下，觸控毛筆結構中就不需要導電片。
3. 關於「軟毛筆頭」的材質：可採用各種常規的軟毛筆頭，可包含金屬絲、碳纖維毛、光纖維和動物毛，例如鬃毛、狼毫、羊毫、雞毫、兼毫或胎毫等材質，或該等材質的任意組合。軟毛材質筆頭設計，可全擬真實體毛筆或水彩筆，相較於現有觸控硬筆，可提供更加真實的運筆起伏的力道，因此可呈現更好的擬真效果。
4. 關於「導電片」的材質：包含金屬導體材料(相對介電常數視為 ∞)。例如錫箔、鋁箔。導電片外圍可包覆一層薄片的絕緣材料，例如塑膠紙。即便導電片外圍包覆絕緣的介電物質，本設計依舊可透過濕潤軟毛筆頭而具備足夠的電容耦合產生觸控感應。

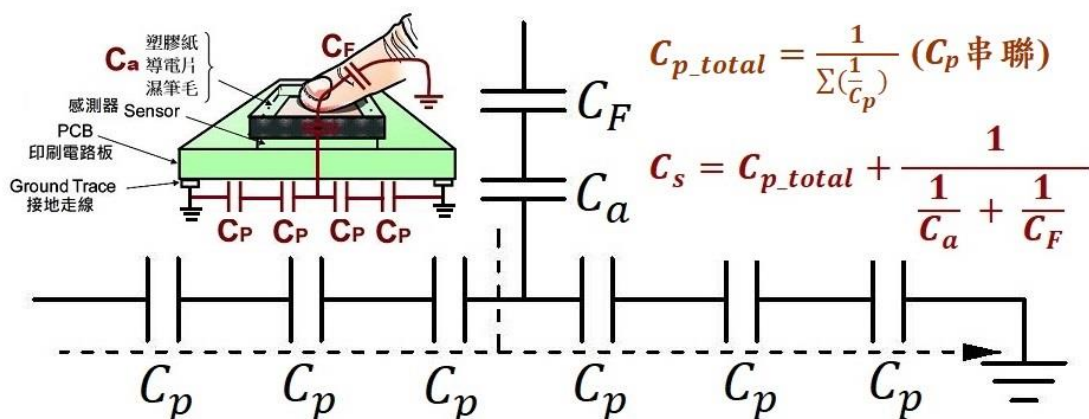


圖19. 投射電容式觸控面板自電容感測觸控毛筆的電容組合示意圖(來源:Microchip公司[53])

投射電容式觸控感應電容有兩種感測方式：自電容(感測器對地電容變化)與互電容(感測器電極之間的電容變化)。自電容感測觸控面板與自製全擬真觸控毛筆的觸控作用原理如下：

1. 圖 19[53]表示投射電容式觸控面板自電容感測方式。X 或 Y 軸線上每個電容 C_p 呈串聯

排列。 C_F 代表手指電容。 C_a 代表觸控毛筆濕筆頭、導電片和塑膠紙三種材質串聯連接的總電容(等效電容)： $\frac{1}{C_a} = \frac{1}{C_{\text{濕筆毛}}} + \frac{1}{C_{\text{導電片}}} + \frac{1}{C_{\text{塑膠紙}}}$ -----(3)

2. 自電容式感測的標的是整條 X 或 Y 軸線的電容值變化，在觸控毛筆未碰觸面板前，感測器偵測到軸線上的總電容 $C_{s0} = C_{p_total} = \frac{1}{\Sigma(\frac{1}{C_p})}$ (C_p 串聯總電容)。
3. 當只有手指觸碰面板時，感測器偵測到電容值 $C_s = C_{p_total} + C_F$ (並聯)
4. 在手握觸控毛筆(濕筆毛)碰觸面板時，其電容串並聯方式如圖 19 所示。可以看成電容 C_a 與手指電容 C_F 串聯，再與軸線上的整體串聯電容 C_{p_total} 並聯，其總電容即為感測器偵測到的電容值 C_s ，可表示為： $C_s = C_{p_total} + \frac{1}{\frac{1}{C_a} + \frac{1}{C_F}} \equiv C_{s0} + C_{TF}$ (兩電容並聯)

上式 $C_{TF} = \frac{1}{\frac{1}{C_a} + \frac{1}{C_F}}$ 。從(3)式 \Rightarrow 當觸控材料電容 $C_{\text{濕筆毛}}$ 、 $C_{\text{導電片}}$ 或 $C_{\text{塑膠紙}}$ 越大 $\Rightarrow \frac{1}{C_a}$ 越小

$\Rightarrow C_{TF}$ 越大 $\Rightarrow C_s$ 越大 \Rightarrow 越容易讓 $C_s \geq C_{\text{感測器閾值}}$ \Rightarrow 越容易觸控感應。藉此就證明了高電容材料，就是良好的觸控毛筆材料。同時說明了全擬真觸控毛筆外圍即便包覆一層絕緣介電物質(例如塑膠紙)，亦可在觸控面板上進行觸控感應。

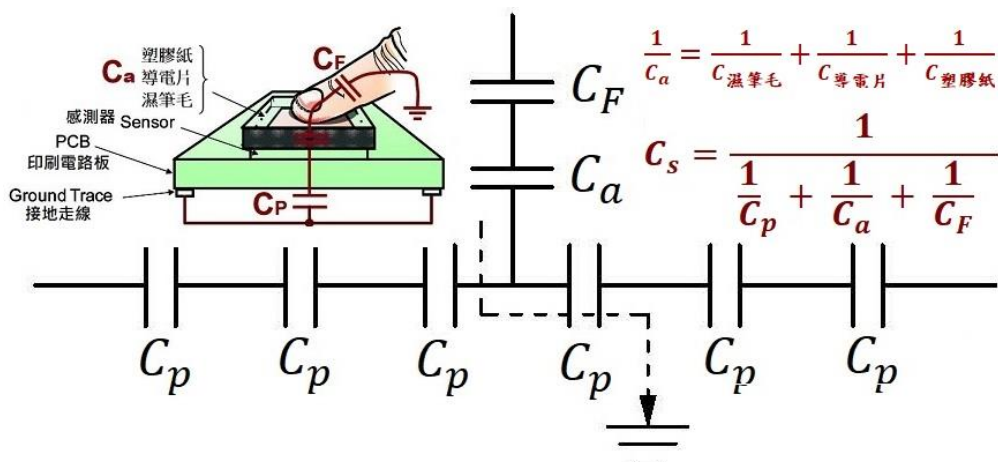


圖20.投射電容式觸控面板互電容感測觸控毛筆的電容組合示意圖(來源:Microchip公司[53])

若是以互電容的方式進行感測，當手握觸控毛筆再接觸面板產生電容耦合時，由於原來感測器 C_s 僅為單一 X、Y 交錯點的電容(C_p)，手指電容 C_F 的加入，變成了與原來電容串聯的情形，所以手指觸碰後整體 C_s 的電容值反而是減少的，如圖 20 所示。詳細說明如下：

1. 未觸控前，互電容式感測的標的是單一 X、Y 交錯點的電容值變化。 $C_{s0} = C_p$
2. 在手握觸控毛筆(濕筆毛)碰觸面板時，可以看成手指電容 C_F 、電容 C_a 和面板單一電容 C_p 串聯總和 $\Rightarrow C_s = \frac{1}{\frac{1}{C_p} + \frac{1}{C_a} + \frac{1}{C_F}}$ (其中 $\frac{1}{C_a} = \frac{1}{C_{\text{濕筆毛}}} + \frac{1}{C_{\text{導電片}}} + \frac{1}{C_{\text{塑膠紙}}}$) -----(4)
3. 從(4)式 C_p 與 C_F 固定不變 \Rightarrow 當觸控材料電容 $C_{\text{濕筆毛}}$ 、 $C_{\text{導電片}}$ 或 $C_{\text{塑膠紙}}$ 越大 $\Rightarrow \frac{1}{C_a}$ 越小 $\Rightarrow C_s$

越大 \Rightarrow 越容易讓 $C_s \geq C_{\text{感測器閾值}}$ \Rightarrow 越容易觸控感應。藉此就證明了高電容材料，就是良好的觸控毛筆材料。得到與自電容感測方式相同的結論。

三、實驗3. 自製被動式電容觸控毛筆與硬式觸控筆效能比較

(一) 自製觸控毛筆動態書寫定性測試結果

自製觸控毛筆動態寫書寫影片如圖21QR碼連結 (依規定改以影片截圖，取代QR 碼連結)：

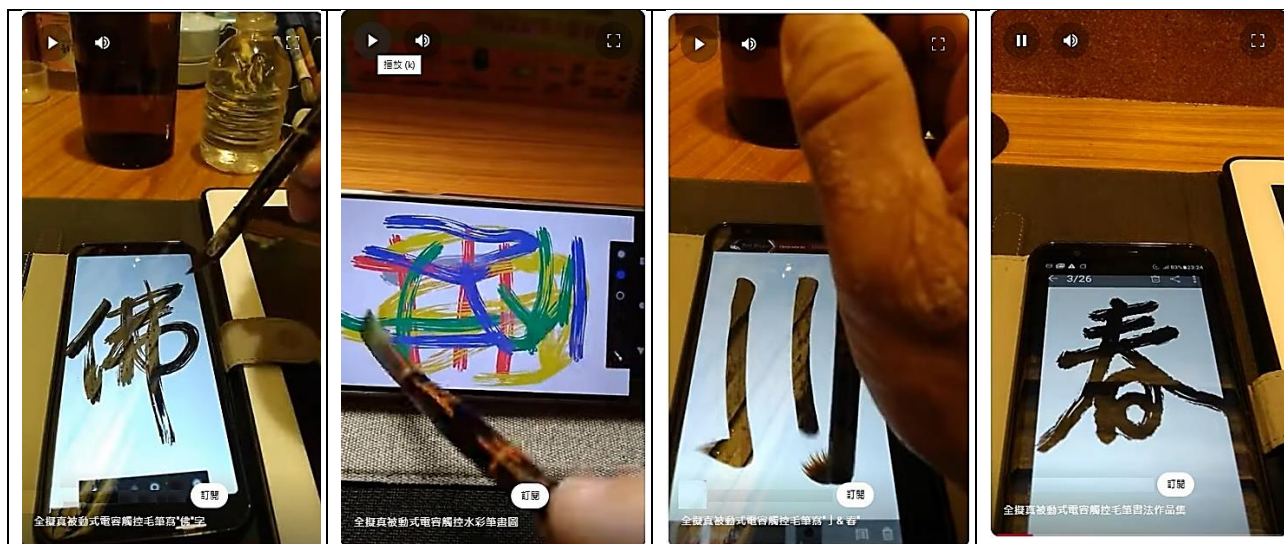


圖21. 自製觸控毛筆/水彩筆動態書寫影片截圖 [自製圖]

1. 書法：全擬真被動式電容觸控毛筆寫"佛"字。
2. 繪畫：全擬真被動式電容觸控水彩筆畫圖。
3. 書法：全擬真被動式電容觸控毛筆寫"川"春"。
4. 全擬真被動式電容觸控毛筆書法作品集。

從影片中目視判斷：自製觸控毛筆或水彩筆與真實毛筆寫字或水彩筆沾顏料畫圖的筆觸完全一樣，的確可以做到全擬真效果。再看作品圖檔(圖22)。作品未經圖片處理，直接從手機書寫完畢存檔。最後質感、效果與真實書畫作品非常接近，擬真效果非常好。



圖22. 自製被動式電容觸控毛筆完成的書法與繪畫作品 [自製手機截圖]

(二) 自製觸控毛筆動態書寫定量分析結果

實驗進行時，發現DT-500F機械手臂目前的精密度，還無法達到像人那樣書寫變化多端且筆法複雜的書法，表現不出毛筆抑揚頓挫快慢的筆性。改以人工書寫「永」字進行測試。由同一人手握自製觸控毛筆(沾水濕潤即可，不需要太多水分)和觸控硬筆在平板上進行寫字的動態測試。實驗結果如圖23~26所示。從實驗數據圖我們可以得到如下的結果：

1. 「觸控靈敏度」比較：圖 23 和圖 24 表示觸控筆在書寫過程中的感應壓值變化，自製觸控毛筆極大與極小值座標 $Max_{\text{毛筆}}$ (86,2586)、極小值 $Min_{\text{毛筆}}$ (16,93)；觸控硬筆 $Max_{\text{硬筆}}$ (67,623)、 $Min_{\text{硬筆}}$ (54,2)。觸控毛筆的最小感應壓值 93，比觸控硬筆最低壓值 2 大。觸控毛筆最大感應壓值 2,586，遠大於觸控硬筆最大壓值 623。⇒證明不管在觸控面板上輕按或重壓觸控筆，觸控毛筆的觸控靈敏度都比觸控硬筆更高。

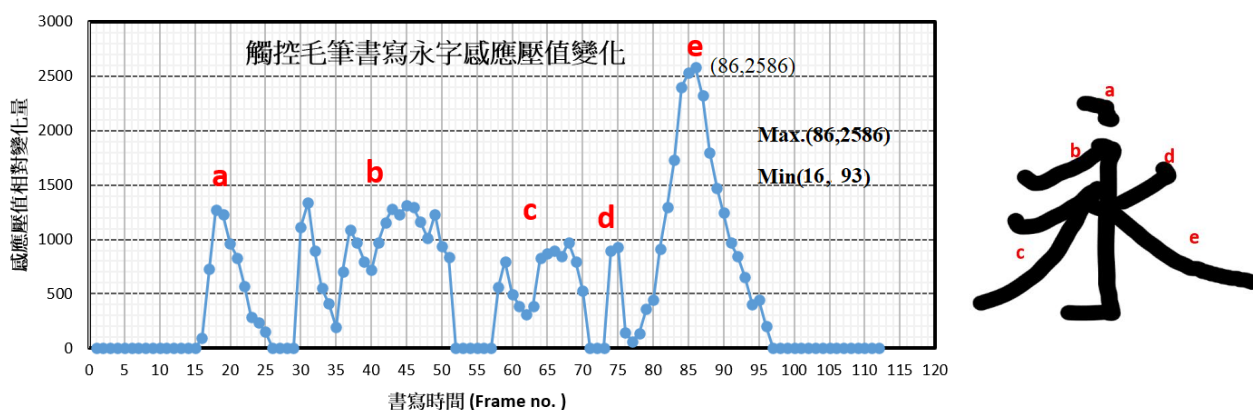


圖23. 自製被動式電容觸控毛筆書寫「永」字過程的相對感應壓值變化圖 [自製數據圖]

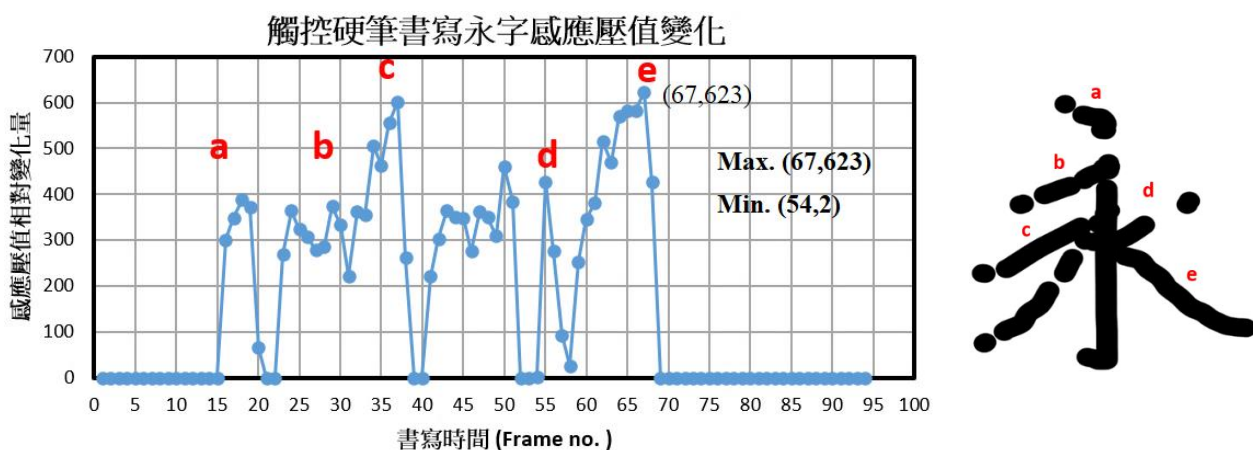


圖24. 觸控硬筆書寫「永」字過程的相對感應壓值變化圖 [自製數據圖]

2. 「輕重變化精細度」比較：觸控筆對書寫輕重的精細度或稱解析度，代表書寫過程的「筆法變化」。觸控毛筆感應壓值的最大變化量為 $\Delta_{\text{max 毛筆}} = 2,586 - 93 = 2,493$ 。

而觸控硬筆的最大變化量為 $\Delta_{\max \text{ 硬筆}} = 623 - 2 = 621$ 。⇒顯示觸控毛筆在動態書寫過程中，用筆輕重變化達到 2,493 個單位(階)，而觸控硬筆僅有 621 個單位(階)，大約相差 4 倍。也就是觸控毛筆輕重變化精細度比觸控硬筆好 4 倍。因此得知在書寫過程中，自製濕式觸控毛筆提頓的「筆法變化」更優於觸控硬筆。

3. 「書寫連續性」比較：從 EXCEL 數據檔中得到觸控毛筆在書寫「永」字過程中，面板能夠偵測到 68 個非零的感應壓值，而觸控硬筆是 47 個。從圖 23 和圖 24 兩個圖形的點分佈也能看出觸控毛筆的數據比較密集。代表自製的觸控毛筆對於觸控面板書寫的連續性或說流暢性要比常規觸控硬筆來得好。而我們目視平板上寫下的「永」字圖像，自製觸控毛筆的確看起來連續性也是比較好。
4. 「書寫力道」比較：圖 25 和圖 26 顯示兩種觸控筆在書寫過程中的筆觸面積變化。觸控毛筆的筆觸面積介於 1~15，硬式觸控筆則是介於 1~9。因為觸控筆按壓面板的力道越大，筆觸面積越大。所以這項數據表明觸控毛筆在書寫過程中，用筆的抑揚頓挫，輕重起伏變化較大，因而得到較大的筆觸面積變化量。

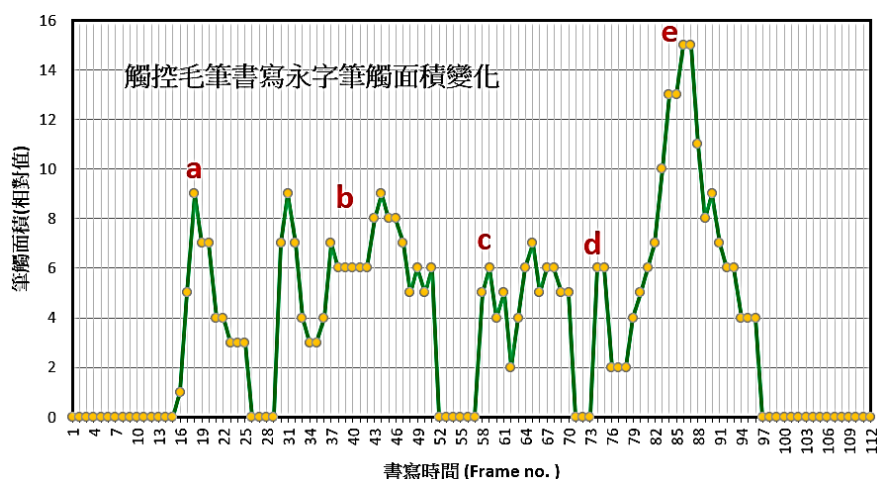


圖25. 自製被動式電容觸控毛筆書寫「永」字過程的筆觸面積變化圖 [自製數據圖]

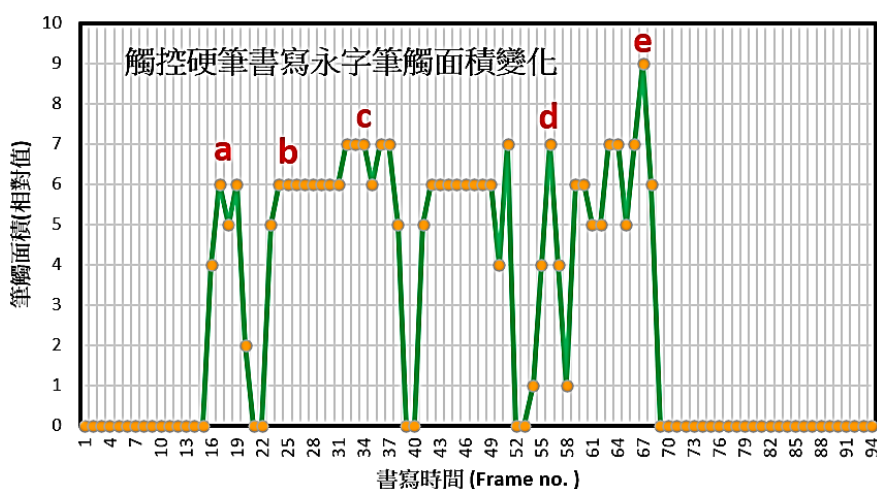


圖26. 觸控硬筆書寫「永」字過程的筆觸面積變化圖 [自製數據圖]

伍、討論

一、乾、濕式被動式電容觸控毛筆比較

透過實驗結果，我們歸納出「能夠產生高電容的材料，都是良好的電容式觸控材料。」因此，厚度薄、面積大的金屬導體與高介電常數絕緣材料，是最佳的電容式觸控材料。結合「包覆鋁箔的濕棉花棒」也能當作觸控筆的實驗結果，讓我們選擇「水」作為高電容觸控材料。因為液態水除了是高介電常數材料，並且具有厚度薄、面積大的高電容特性。

「水」不僅解決了乾筆毛不能觸控感應的問題，同時巧妙地解決全擬真毛筆的問題。要百分之百具有真實毛筆的書寫觸感，就要使用真實毛筆沾水書寫才能達成。因此，本研究藉由水具有高電容性質，直接將真實毛筆改造成觸控毛筆，讓真實毛筆瞬間變成全擬真觸控毛筆。這種製程比市面上使用導電刷毛或碳纖維筆頭的乾式觸控毛筆，製程更容易成本更低，並且擬真效果更勝一籌。此外本研究設計的觸控毛筆一筆兩用，可同時在紙張和觸控面板上書寫畫圖。茲將乾、溼兩款電容式觸控毛筆/畫筆以及真實毛筆的優劣整理成表8。

表8. 乾、溼被動式電容觸控毛筆/畫筆與真實毛筆/畫筆比較

項目	自製濕式觸控毛筆/畫筆	坊間乾式觸控毛筆/畫筆	真實毛筆
運作原理	依靠濕筆毛和高介電筆桿與電容式觸控螢幕互動	依靠導電刷毛與電容式觸控螢幕互動	透過沾取墨水或顏料後，在紙上作畫
壓力感應	✓與真實毛筆相同	⚠壓感不夠變化筆劃粗細	✓透過手部力量用筆起伏
筆毛材質	與真實毛筆相同	導電纖維、金屬絲	天然毛(狼毫、羊毫)或合成毛
筆觸表現	✓與真實毛筆相同	乾筆毛分叉筆劃變化有限	✓毛筆尖齊圓健，筆觸自然
多功能性	✓觸控筆和毛筆兩用	⚠只能當觸控筆使用	⚠只能當毛筆使用
環保性	✓無紙張浪費，數位環保	✓無紙張浪費，數位環保	✗需要紙張、顏料
價格	與真實毛筆相同	台幣1,000~30,000元	台幣200~600元
筆觸靈活性	✓與真實毛筆相近	✗乾筆毛分叉沒有筆鋒	✓筆毛可自然變形
墨水效果	⚠依賴數位軟體模擬	⚠依賴數位軟體模擬	✓墨水可控制濃淡
筆法變化	✓與真實毛筆相同	✗乾筆毛分叉沒有筆鋒表現	✓可控制筆鋒、筆壓
數位繪畫	✓直接數位作畫	✓直接數位作畫	✗需掃描才能轉為數位圖像
動態書寫效果 (影片截圖)	 [自製影片截圖]	 影片截圖[29]	 影片截圖[54]

二、數位書畫擬真性問題

數位書畫透過觸控筆、書畫模擬軟體與高解析度的觸控螢幕(數位畫布)，模擬傳統毛筆書畫的筆觸與效果。以下從幾個角度探討數位書畫的擬真性(Realism)。

(一) 觸控筆的擬真性問題 – 筆法與筆觸

觸控硬筆難以呈現毛束分叉的毛刷感、乾濕過渡、提頓起伏等複雜筆性。無法模擬毛筆

的非線性特性(例如隨機毛束分叉與回彈)的問題。本研究透過濕式電容式觸控毛筆的設計，已經百分之百做到全擬真毛筆的效果。徹底解決電容式觸控毛筆的擬真性問題。

(二) 書畫應用軟體(APP)的擬真性問題

數位書畫透過軟體演算法與壓感技術，模擬筆法形狀、線條粗細、墨色濃淡，目前已能重現一定程度的筆法變化。例如Zen Brush書法軟體，以及繪圖軟體Infinite Painter。但是有些軟體的演算法，無法擬真呈現出真實毛筆和畫筆寫字畫圖的效果。如圖27，這是使用自製濕式電容式觸控毛筆，在「王羲之書法字典」APP上臨摹「春」字的作品。與圖22使用Zen Brush寫「春」的作品比較，明顯看出這裡「春」字最後一筆的「捺」，就無法表現出用力「頓挫」再收筆的效果。而Zen Brush軟體中的捺，就表現得非常好，與真實書法相差無幾。因此數位書法的擬真性，除了全擬真觸控毛筆外，還必須搭配好的全擬真書畫軟體，才能做到真正的全擬真數位書畫。底下列出軟體擬真的問題：



圖27.電子書法臨摹[自製手機截圖]

1. **多層處理性能瓶頸：**模擬複雜筆法與墨水行為需要大量計算資源，現有設備在多圖層與即時計算中易受觸控面板和觸控筆性能限制。
2. **跨平台相容性與數據保存格式互通性不足：**不同軟體之間的筆刷設定、筆觸數據不易互通，導致作品在不同平台無法無縫轉換。
3. **筆法模擬性：**目前數位書畫筆法難以呈現真實毛筆的濃淡、乾濕、斷續特性。無法完整偵測筆鋒的角度、旋轉、力度與速度。尤其在筆觸延遲、觸控精度上需要改善
4. **筆勢與筆法識別：**軟體難以精準區分不同的書法筆勢，影響筆法細節的呈現。
5. **寫意特效模擬：**在動態墨水擴散(如宣紙上的墨水流動)難以精確呈現。對於潑墨、飛白、濃淡變化的表現力不足，難以呈現中國書畫的氣韻生動。高解析度筆觸與動態墨水模擬會導致書寫過程中筆跡延遲，特別是大尺度創作或高速揮毫時，流暢性不足。

三、 未來研究方向

(一) 濕式被動式電容觸控毛筆改良

1. **改良觸控墨水：**除了用自來水當作觸控墨水外，酒精或是某種清潔面板的液體，如果具備高介電常數，那麼就能夠同時用作觸控墨水和清潔面板玻璃兩用。
2. **改良包覆觸控毛筆筆桿的材料：**將原本導電片加塑膠紙複合材料，改用具有高電容特性的單一材質透明貼紙，或改用具有工業設計美感的貼紙。

3. 研究擬真畫紙(宣紙)的透明薄片材料，除了讓電子書寫觸感更真實，還可以在書寫時加一片這種透明薄片在觸控螢幕上，防止筆毛沾水太多時滲透到觸控裝置內。
4. 本研究尚未對乾式觸控毛筆與自製濕式觸控毛筆進行動態書寫效能定量分析。日後有預算購買國外的乾式觸控毛筆，再進行這部份的定量數據比較。

(二) 數位書畫擬真性的研究

1. **新式觸控面板：**(1)在文獻回顧提到「紅外線觸控螢幕」搭配真實毛筆沾水書寫的研究報告[30]，這種方式的觸控毛筆擬真性最高，屬於從觸控面板屬性解決數位書畫問題。(2)「**壓電感應觸控面板**」[55]或許是未來解決數位書畫很好的解決方案。此類面板基於**石英或壓電陶瓷**在受到機械壓力時會產生電壓的變化，藉此偵測觸控輸入。機械壓力輸入方式最能真實表現觸控筆的力道，透過壓電效應將機械壓力轉換成電壓變化，同時具有多點觸控感應的功能。集電阻式與電容式觸控面板優點於一身。能呈現任何觸控筆筆性圖案。是擬真性最高的觸控面板，非常值得研究。
2. **優化數位書畫軟體演算法：**(1) 優化筆壓與墨色控制的耦合演算，結合**筆壓、速度與接觸時間**，實現墨水的動態吸收和擴散。(2) 採用 **GPU** 加速演算法，利用圖形處理單元提升筆觸與墨水的即時渲染效率，減少筆觸延遲。(3)優化**流體動力學演算法**，模擬墨水與紙張之間的互動行為，提升墨跡暈染、漸層與流動效果。(4) 優化**筆跡的局部計算**，針對筆觸與紙張的接觸區域進行重點渲染，提升大畫布的計算速度。

陸、結 論

一、 研究新穎性

本研究新穎性在於設計並實現一款具備下列特性的「電容式」觸控毛筆：

- (一) **全擬真性：**本研究採用真實毛筆/水彩筆改造成觸控毛筆，完全擬真展現書法筆法與真實毛筆筆觸，能夠用於各種書法和繪畫的APP應用軟體，呈現完美化的書法和繪畫效果。
- (二) **節能減碳：**被動式觸控毛筆不需要電源、紙張、顏料和墨水。
- (三) **低成本：**使用被動式觸控技術與高電容導電貼片的加工方式，來降低製作成本。
- (四) **多功能性：**毛筆與觸控筆一筆兩用，能同時在紙上和電容式觸控面板上書寫作畫。
- (五) **高相容性：**有別於Apple pencil僅能搭配單一廠牌、某些型號的觸控裝置。本研究設計的被動式電容觸控毛筆，適用各廠牌型號的電容式觸控裝置。

二、研究價值

(一) 融合數位科技與藝術傳承

1. **筆法與力道的記錄與分析**：透過全擬真觸控毛筆，能夠精確記錄書畫過程中的筆速、筆壓、角度，為書法筆法、力道解析與筆跡鑑定提供數據支持。方便將藝術家的筆法和力道數據數位化保存。
2. **提供訓練 AI 的數據**：上述數據可用於訓練 AI，有利於開發「AI 書法家(機械手臂)」。
3. **傳統藝術的數位重現**：如果古代就有觸控毛筆和觸控面板，就能詳實記錄王羲之的用筆力道與筆法變化的數據，配合圖形辨識技術(記錄字形結構)，未來就有可能透過 AI 書法家，用機械手臂還原王羲之寫字的樣貌。

(二) 藝術教育應用

1. **書畫示範教學**：教師使用全擬真觸控毛筆在觸控黑板上寫字畫圖演示給學生觀摩。
2. **AI 智能書畫教學**：透過全擬真觸控毛筆產生即時數位數據，能即時監測學生筆順和筆法。結合 AI 還能即時回饋筆法、評量與糾錯，提高學習效率。方便線上書畫教學。

(三) 商業價值與市場潛力

1. **數位創作市場擴展**：觸控毛筆為數位書畫、電子簽名、數位設計提供新型輸入工具，開拓創意產業新領域。例如動漫、國畫、手寫簽名工具。
2. **電腦字型個性化與客製化需求**：書法家透過全擬真觸控毛筆書寫的字型，就是數位字型，方便公司快速製作電腦中文字型(例如華康中文字型公司)。並且容易製作客製化、個人化的電腦中文字型，具有商業潛力。

最後我們用「全擬真被動式電容觸控毛筆」的SWOT分析圖來總結本研究，如圖28。

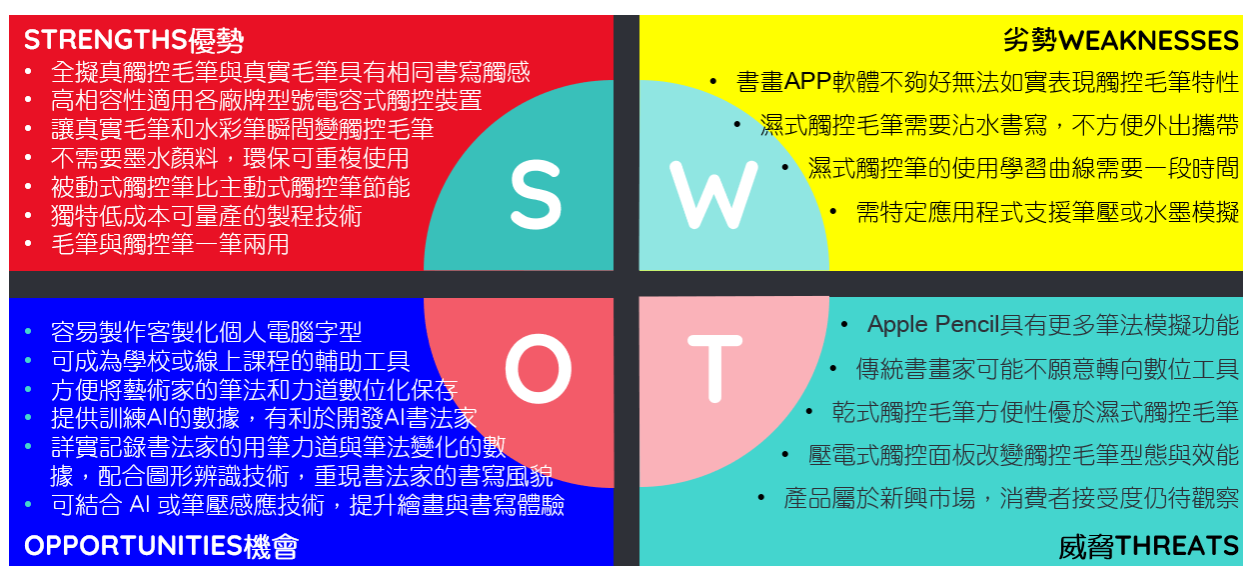


圖28. 全擬真被動式電容觸控毛筆的SWOT分析圖 [自製圖]

柒、參考文獻資料

1. 未知作者. *DIY被動式電容觸控筆*. YouTube. <https://reurl.cc/Eg0nnk>; <https://reurl.cc/kMKrXG>; <https://reurl.cc/1XN33p>; <https://reurl.cc/xpVLpN>; <https://reurl.cc/vpR0Ll>
2. 顧鴻壽. (2014). *觸控面板技術及其應用*. 五南圖書出版.
3. Unknown Author. (2024). *A Brief History of Touchscreen Technology*. Zytronic Corporation. <https://reurl.cc/oVEpZq>
4. Unknown Author. (2024). *The Evolution of Touchscreen Technology*. Microtouch Corporation. <https://reurl.cc/NbKnGk>
5. Unknown Author. (2023). *Touchscreens: Past, Present, and Future*. Displays2Go Company. <https://reurl.cc/INKIZ9>
6. 未知作者. (2013). *手指,筆,多元化觸控輸入技術與應用發展*. 電子時報. <https://reurl.cc/qnWXMN>
7. 川村康文、林雯. (2024). 觸控面板的原理. In *物理角色圖鑑* (pp. 104-105). 漫遊者文化.
8. 陳奕君. (2013). *觸控背後的世界*. 台灣大學電機系. <https://reurl.cc/KdIEEn>
9. 林秀豪、陳伯綸. (2019). *指尖下的大世界*. 一傳十文教. <https://etrans.tw/program/211>
10. 高聖弘. (2008). *感測電路結構各展所長,電容式觸控技術百家爭鳴*. 新通訊元件雜誌. <https://reurl.cc/d141dM>
11. Dormehl, L. (2021). *Tracing the history and evolution of the stylus*. DigitalTrend Corporation. <https://reurl.cc/V0bnjR>
12. Meyyarasu, N., Dalton, G., & Abinaya, S. (2015). A review on touch Sensor screen system. *International journal of Engineering Research and science Technology*, 1, 1-14.
13. 未知作者. (2023). *IBM Simon*. 維基百科. <https://reurl.cc/d14OIV>
14. Johnson, E. A. (1965). Touch display—a novel input/output device for computers. *Electronics letters*, 1(8), 219-220. <https://doi.org/10.1049/el%3A19650200>
15. Hurst, G. S., & Colwell, J., William C (1974). *Discriminating contact sensor*. <https://reurl.cc/XZKxgg>
16. Mehta, N., Smith, K., & Holmes, F. (1982). Feature extraction as a tool for computer input. ICASSP'82. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing,
17. Krueger, M. W., Gionfriddo, T., & Hinrichsen, K. (1985). VIDEOPLACE—an artificial reality. Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems,
18. Unknown Author. (1983). *HP-150* Wikipedia. <https://reurl.cc/M6lxq3>
19. Boie, B. (2013). *Pen and Tablet, 1989 - AT&T Archives - touchscreen drawing over telephone lines*. YouTube, AT&T Tech Channel. <https://reurl.cc/b3pWKy>
20. Westerman, W. (1999). *Hand tracking, finger identification, and chordic manipulation on a multi-touch surface* University of Delaware]. <https://reurl.cc/74znRb>
21. Unknown Author. (2025). *Stylus (computing)*. Wikipedia. <https://reurl.cc/vpRXRL>
22. Buxton, B. (2011). *Some Milestones in Computer Input Devices:An Informal Timeline* Bill Buxton's Blog. <https://reurl.cc/1XNzRD>
23. Hemang. (2024). *What is a Stylus Pen? Benefits, Types of Stylus Pen*. <https://reurl.cc/eGKaNW>
24. bonJOIE. (2025). *Sensu Artist Brush & Stylus觸控畫筆*. 樂天市場. <https://reurl.cc/Y4KQda>
25. Erin. (2019). *Sensu Brush and Stylus Review*. YouTube. <https://reurl.cc/qnRMkN>
26. 未知作者. (2025). *Professional 2 - 數位畫筆手寫筆*. Amazon.com. <https://reurl.cc/O5KDN7>
27. Ducrepitu s.r.o. (2023). *Professional Digital Painting Brush Stylus - BuTouch*. YouTube. <https://reurl.cc/eGKaDQ>
28. Nomad. (2025). *Nomad Brush: Paintbrush Stylus / Paint Anywhere!* Nomad Co. <https://www.nomadbrush.com/>
29. Lee, D. (2012). *Nomad FLeX and Microsoft Fresh Paint on Vimeo*. Vimeo.com. <https://vimeo.com/54833468>

30. Vandoren, P., Claesen, L., Van Laerhoven, T., Taelman, J., Raymaekers, C., Flerackers, E., & Van Reeth, F. (2009). FluidPaint: an interactive digital painting system using real wet brushes. Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces.
31. Catt, D. (2024). *Drawing machine brush pen test*. <https://reurl.cc/M6KDR4>
32. Unknown Author. (2016). *Engineer Your Own Stylus*. YouTube. <https://reurl.cc/xpVLpN>
33. Unknown Author. (2021). *Stylus : how to make a stylus at home*. YouTube. <https://reurl.cc/vpR0Ll>
34. Ho, C. (2015). 棉花棒也能當螢幕觸控筆?! 超簡單DIY示範! YouTube. <https://reurl.cc/Eg0nnk>
35. 未知作者. (2022). 4 種方法自製觸屏筆，總有一種適合你. YouTube. <https://reurl.cc/1XN33p>
36. 未知作者. (2015). 鉛筆+ 鋁箔紙 觸控筆輕鬆DIY. Youtube. <https://reurl.cc/oVMgVg>
37. 未知作者. (2022). 如何挑選合適觸控筆？觸控筆種類與原理解密！8款電容式觸控筆完整實測！. Gechic.com. <https://reurl.cc/G52lXp>
38. 吳錫玠. 第二十二章 電子學, 高三物理講義 台中一中. <https://reurl.cc/xpVk1b>
39. 未知作者. (2022). 木頭也能抗靜電？7 種材料抗靜電測試大賽. 實作派. <https://reurl.cc/qnAqWE>
40. Unknown Author. (2024). *Ethanol (data page)*. Wikipedia. <https://reurl.cc/nq8Qvn>; <https://reurl.cc/INxEyv>
41. Unknown Author. (2025). *Electrical Properties of Plastic Materials* Professional Plastics Pte Ltd. <https://reurl.cc/ZZkye6>
42. 未知作者. (2023). 導電矽膠條是什麼？從矽膠與導電性帶你了解！. 上陽電子公司. <https://reurl.cc/26RvW4>
43. 未知作者. (2025). 導電矽膠片. 通用矽酮公司. <https://reurl.cc/M6KGRW>
44. 未知作者. (2023). 內層與外層金屬型抗靜電袋的比較. DigiKey.com. <https://reurl.cc/O5KeV3>
45. 未知作者. (2024). 電阻率與電導率. 維基百科. <https://reurl.cc/6jne5d>
46. 未知作者. (2013). 新開發之非極性/極性聚合物相容化之量產製程. 材料世界網. <https://shorturl.at/F9JWG>
47. Unknown Author. *Thermal and Electrical Properties of PE*. Qenos eXsource. <https://reurl.cc/741QA1>
48. Yang, A. (2024). 介電材料表現各異，薄膜電容選擇有撇步. 新通訊元件雜誌. <https://reurl.cc/362EQL>
49. 未知作者. 相對電容率. 維基百科. <https://reurl.cc/Egl2oR>
50. Unknown Author. *Dielectric Constant (DC value) Table*. Endress Hauser AG. <https://reurl.cc/kMjml9>
51. 未知作者. *DIELECTRIC CONSTANT REFERENCE GUIDE* 介电常数参考表. <https://reurl.cc/36EN7j>
52. Chen, T. (2020). 電容式觸摸原理、設計挑戰和解決方案培訓教程. Microchip Technology Inc.,. <https://reurl.cc/mR5W7l>
53. 未知作者. (2011). *Microchip 人機介面解決方案*. Microchip Technology Inc. <https://reurl.cc/86xzWg>
54. 李宣鴻. (2021). 智永千字文. Youtube. <https://reurl.cc/7KzZdN>
55. 未知作者. (2025). 壓電觸控板解決方案. 益登科技公司. <https://www.edomtech.com/zh-tw/solution-detail/piezo-haptic-trackpad-solution/>

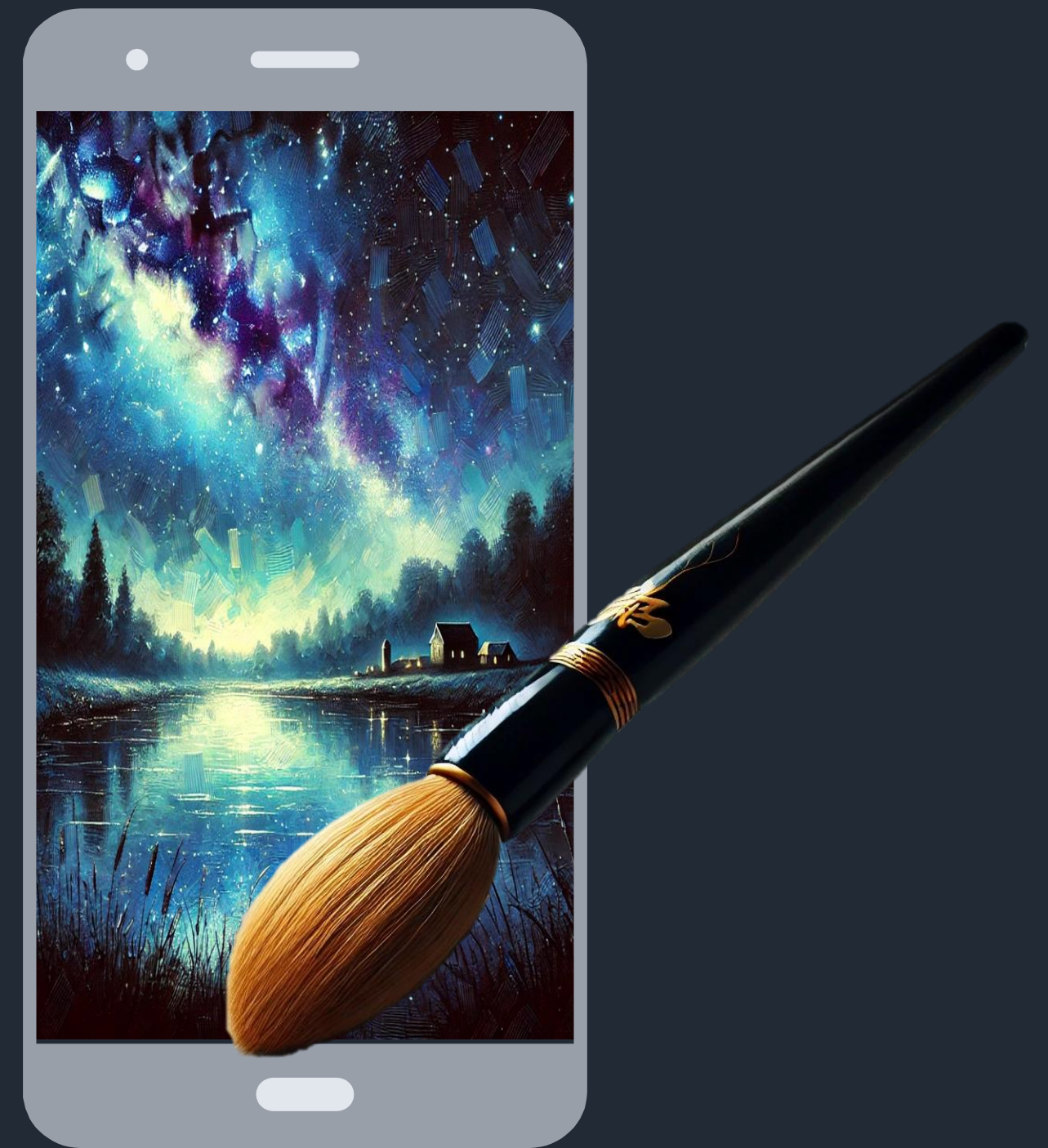
【評語】 052312

1. 本作品由書法愛好起心動念，希望在電子平板上亦能使用擬真之毛筆或筆刷，進行寫作或是繪畫。
2. 藉由文獻/網路探討驗證不同材質的筆頭，過程中發現一般常識的謬誤或是不嚴謹之處，進而新增變因來驗證且推翻原假說，提出屬於本研究創新性的歸納與發現，實屬難得，值得鼓勵。
3. 本作品亦有製作出工程原型：擬真濕潤軟毛筆，實際用於iPad 平板上撰寫或繪製筆跡，足以證實所開發系統的可靠性；最後並探討筆觸壓力跟作品應用極限，科學探討完整。
4. 未來應用將藝術家筆觸數位保存之願景，顯見參賽學生對於本技術應用性與對相關研究領域貢獻有所掌握。

作品海報

創新型全擬真低成本被動式 電容觸控毛筆的設計與實現

**Design and Implementation of an Innovative Fully-
Realistic, Low-Cost Passive Capacitive Brush Stylus**



摘要 Abstract

本研究徹底解決電容式觸控毛筆的擬真性問題。我們研究被動式電容觸控筆的材料與工作原理，得知材料能夠產生高電容，就能產生高靈敏度觸控感應。厚度薄、面積大以及高介電常數的材料能產生高電容，都是良好的電容式觸控材料。這結果推翻了「電容觸控原理是基於材料的導電性或靜電傳導能力」的假說。有別於導電刷毛(碳纖維)筆頭的乾式觸控筆，我們直接將真實毛筆改造成觸控毛筆，利用「溼潤軟毛筆頭」具有高電容特性以及電容串並聯的原理，開發出「全擬真被動式電容觸控毛筆」。得到與真實毛筆書寫過程相同筆性、筆觸與藝術效果，是目前擬真度最高的觸控毛筆。這個創新設計製程簡單且不需電源，因此具有節能與低成本的優點。

文獻回顧 Literature Review

電容式觸控螢幕原理
靜電電荷在兩電容器間靜電傳導直到靜電平衡稱電容耦合。手指與面板之間電容耦合導致感測器偵測到電容變化，確認手指觸控點位置。



圖1. 電容式觸控面板構造示意圖[7]

投射電容式觸控原理
上下雙層X-Y電極網格交叉點形成一個微小電容。紅色層負責X方向感測，藍色層負責Y方向感測。透過捕捉電極間電容變化來定位觸控位置。

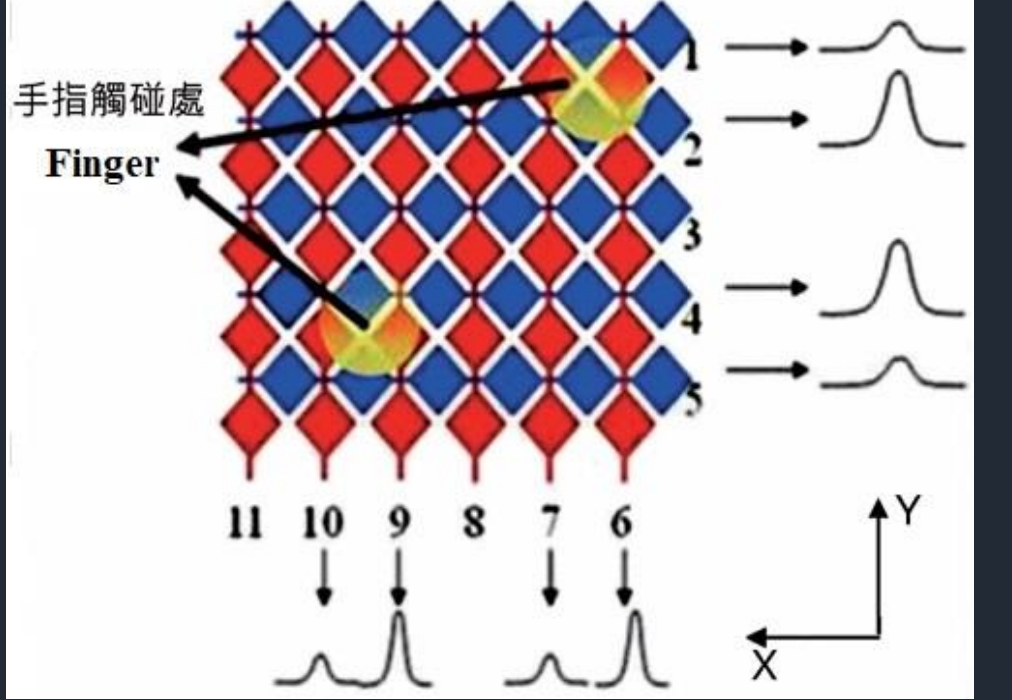


圖3. 投射式電容觸控面板示意圖[8]

動機與目的 Motivation & Purpose

為了實現「用真實毛筆在電容式觸控面板上練習書法與繪畫的願望」，本研究重點在於設計並實現一款具備低成本且全擬真(溼式筆毛)的被動式電容觸控毛筆。



1. 探討觸控材料特性以及觸控技術的基本原理
2. 設計並自製全擬真被動式電容觸控毛筆
3. 分析觸控毛筆書寫動態的表現能力
4. 探討觸控毛筆在數位藝術教育的應用與優勢
5. 發掘當前技術的局限性並提出未來發展方向

設備與器材 Equipment & Materials



圖11-12. 觸控筆測試裝置示意圖 [31]

研究方法 Research Methodology

我們重複「自製觸控筆」網路影片的實驗[1;32-36]，運用類推法設計並製作觸控毛筆。過程中發現影響被動式電容觸控筆的可能變因有: (1)觸控材料的導電性與靜電傳導性質; (2)觸控筆筆頭的面積[37]; (3)筆頭材料厚度。本研究設計實驗，驗證網路各種觸控原理的說法是否正確?從實驗歸納結論並用定量理論證明觸控毛筆運作的原理。

1. 如何選擇觸控材料?被動式電容觸控材料的研究

- ✓ 1-1. 驗證電容式觸控材料是「導電材料」的假說
- ✓ 1-2. 驗證電容式觸控材料是良好「靜電傳導材料」的假說

筆頭材料	電阻率 ρ ($\Omega \cdot m$)	相對介電常數 k	材質特性	觸控感應	靜電傳導
石墨棒	$2.5 \sim 5 \times 10^{-6}$	12-15	導體	✓	✓
木頭	$\infty (10^{14} \sim 10^{16})$	2~6	絕緣體	✗	✓
PET薄片	$\infty (10^{21})$	2.9~3.4	絕緣體	✓	✗

- ✓ 1-3 & 1-4. 材料面積、厚度和觸控感應的關係

筆頭材料截面直徑(mm)	筆頭材料厚度(mm)	能觸控感應
2	1張0.1875mm	✓ or ✗
4	2張	✓ or ✗

2. 設計並製作被動式電容觸控毛筆

- 包鋁箔濕棉花棒
- 包鋁箔濕毛筆
- 包抗靜電袋濕毛筆

觸控筆筆頭材料	筆桿材料	包覆筆桿材料與筆頭是否接觸	觸控感應
棉花(乾)	棉花棒筆桿包覆鋁箔	✓	✗
筆毛(乾)	毛筆竹筆桿	✓	✗
筆毛(乾)	毛筆竹筆桿包覆鋁箔	✓	✗
棉花(濕)	棉花棒筆桿包覆鋁箔	✓	✓
筆毛(濕)	毛筆竹筆桿包覆鋁箔	✓	✓
筆毛(濕)	毛筆竹筆桿包覆抗靜電袋	✓	✓
筆毛(濕)	毛筆竹筆桿貼覆透明膠帶	✓	✗
棉花(濕)	棉花棒筆桿包覆鋁箔	✗	✗
筆毛(濕)	毛筆竹筆桿	✗	✗
筆毛(濕)	毛筆竹筆桿包覆鋁箔	✗	✗
筆毛(濕)	毛筆竹筆桿包覆抗靜電袋	✗	✗

3. 自製觸控毛筆與觸控硬筆的效能比較

- 線測機→「可程控3D機器手臂觸碰面板測試法」
- 動態書寫「永」字的數據→感應壓值 & 筆觸面積

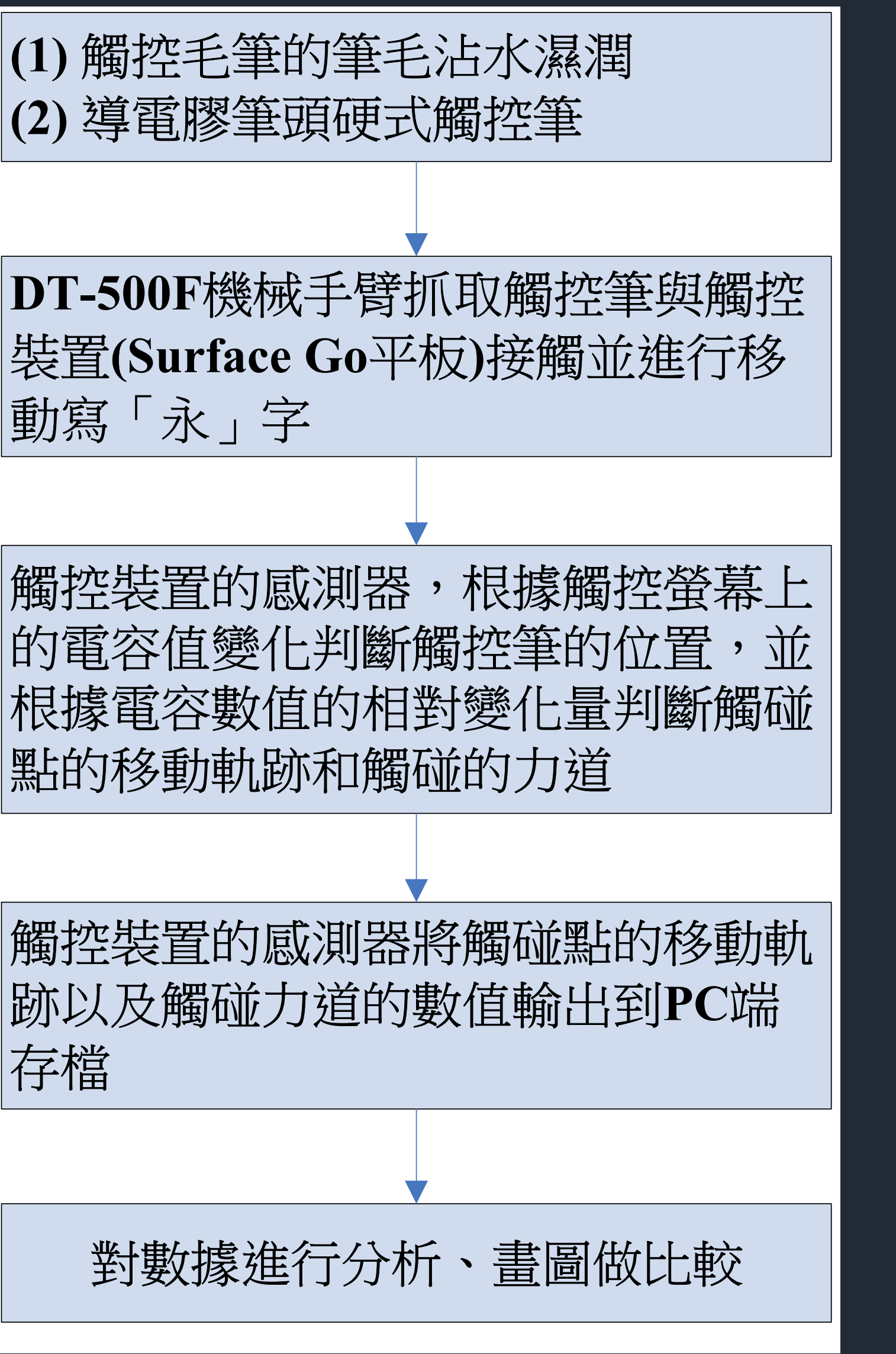
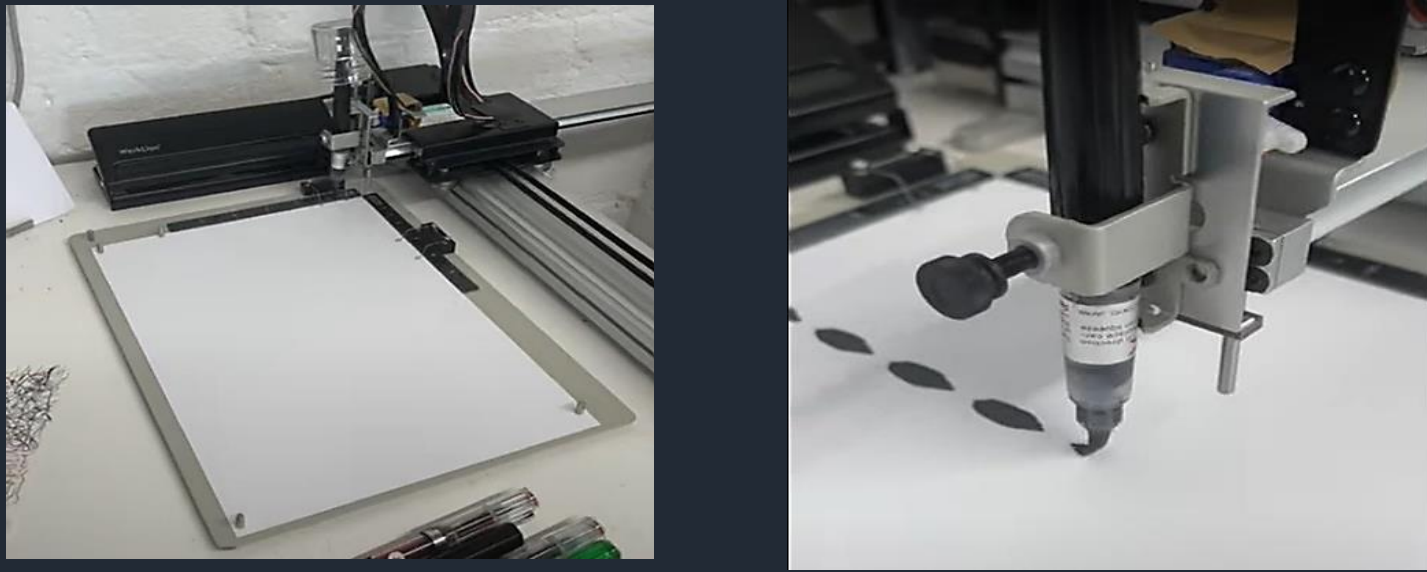


圖14. 觸控筆效能測試流程



動態書寫測試圖 (文獻[31]模擬示意)

研究結果 Research Result

×不可觸控感應

- 木頭筆桿+任何筆頭
- 絕緣體:乾木頭,PP筆蓋,PE橡皮擦
- 一字螺絲起子垂直按壓

✓可觸控感應

- 導體:金屬、石墨
- 高介電絕緣體:陶瓷
- 低介電(薄)絕緣體:PET,PP塑膠紙、氣球

△無感應或無靜電傳導

- 木頭(×✓),
- PET和PP紙(✓×)
- PP筆蓋(××)

電容 ∝ 相對介電常數

1. 筆頭面積太小
無法觸控感應
2. 電容 ∝ 面積

1. 筆頭厚度太厚
無法觸控感應
2. 電容 ∝ (1/厚度)

高介電常數、厚度薄
面積大⇒ 高電容

高電容材料就是好的
電容式觸控材料

筆頭材料	電阻率ρ (Ω·m)	相對介電常數	材質特性	觸控感應	傳導靜電
觸控硬筆	2~10	10-2000	導電矽膠(矽膠+導電碳黑)→導體	✓	✓
石墨棒 (//Basal平面) (⊥Basal平面)	電阻≈2.1Ω (2.5~5×10 ⁻⁶) (3.0×10 ⁻³)	12-15	石墨→導體	✓	✓
鉛筆包覆鋁箔	(2.65×10 ⁻⁸)→0	∞	鋁箔→金屬導體	✓	✓
抗靜電袋	外層:∞ 內層:2.65×10 ⁻⁸	外層2.2-2.4 內層→∞	外層:PE聚乙烯和PET聚酯→絕緣體 內層:鋁箔(Al)→金屬導體	✓	✓
棉花沾蒸餾水	1.82×10 ⁹	80	~純水(極性分子)→絕緣體	✓	✓
棉花沾食鹽水	~0.21(海水)	6.1	NaCl→電解質→絕緣體	✓	✓
棉花沾酒精	1.95 ×10 ⁷	32.6	酒精→非電解質(極性分子)→絕緣體	✓	✓
陶瓷電容器	∞	電容0.47μF	高介電陶瓷→絕緣體	✓	✓
(鉛筆)木頭	∞(10 ¹⁴ ~10 ¹⁶)	2~6	乾木頭(非極性分子)→絕緣體	×	✓
麥克筆筆蓋	∞ (~10 ¹³)	2.0~2.6[40]	PP(聚丙烯,非極性)→絕緣體	×	×
透明塑膠紙	∞ (~10 ¹³)	2.0~2.6	PP(聚丙烯,非極性)薄片→絕緣體	✓	×
橡皮擦(塊狀)	∞ (10 ¹⁶ ~10 ¹⁷)*5	1.4	PE(聚乙烯,非極性聚合物)→絕緣體	×	△
寶特瓶薄片	∞(10 ²¹)	2.9~3.4	PET(polyethylene terephthalate極性)→絕緣體	✓	×
一字螺絲起子	1.0×10 ⁻⁷	∞	鐵(金屬)@起子垂直按壓!→導體	×	✓
一字螺絲起子	1.0×10 ⁻⁷	∞	鐵(金屬)@起子水平按壓!→導體	✓	✓
氣球	10 ¹⁴ ~10 ¹⁵	3.0~4.0	天然乳膠→絕緣體	✓	×

推翻了「電容式觸控原理是基於材料的導電性或靜電傳導能力」的假說

鋁箔筆頭直徑(mm)	觸控感應	濕棉花筆頭直徑(mm)	觸控感應	抗靜電袋筆頭直徑(mm)	觸控感應
2	×	2	×	2	×
3	×	3	×	3	×
4	✓	4	✓	4	✓
5	✓	5	✓	5	✓
6	✓	6	✓	6	✓
7	✓	7	✓	7	✓
8	✓	8	✓	8	✓

鋁箔厚度(mm)	觸控感應	抗靜電袋厚度(mm)	觸控感應	PP透明塑膠紙厚度(mm)	觸控感應	衛生紙厚度(mm)	觸控感應	影印紙厚度(mm)	觸控感應
1張(0.011mm)	✓	1張(0.0547mm)	✓	1張(0.0297mm)	✓	1張(0.125mm)	✓	1張(0.10mm)	✓
2張	✓	2張	✓	2張	✓	2張	✓	2張	✓
4張	✓	4張	✓	4張	✓	3張	✓	3張	✓
8張	✓	8張	✓	8張	✓	4張	✓	4張	✓
16張	✓	16張	✓	16張(0.475mm)	×	5張	✓	5張	✓
32張	✓	32張(1.75mm)	×	32張(0.95mm)	×	6張	✓	6張	✓
64張(0.704mm)	✓	64張(3.50mm)	×	64張(1.90mm)	×	7張(0.875mm)	×	7張(0.70mm)	×
						8張(1.00mm)	×	8張(0.80mm)	×

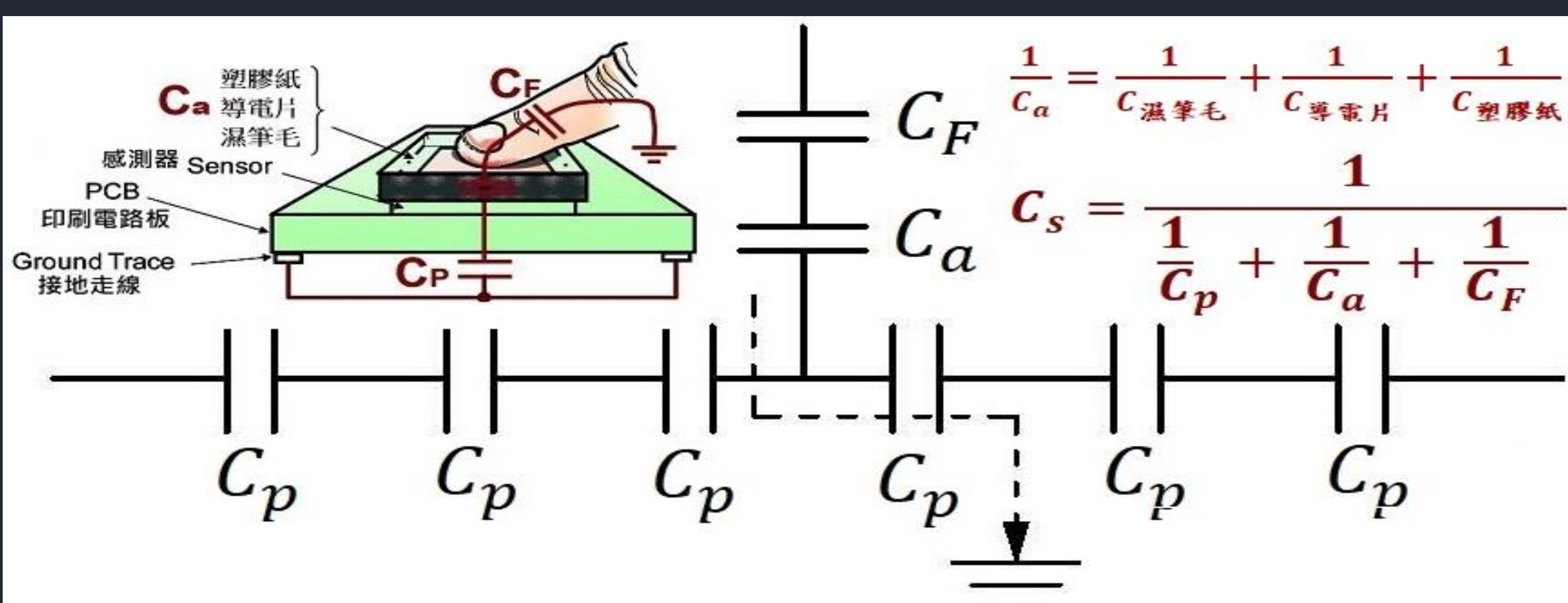
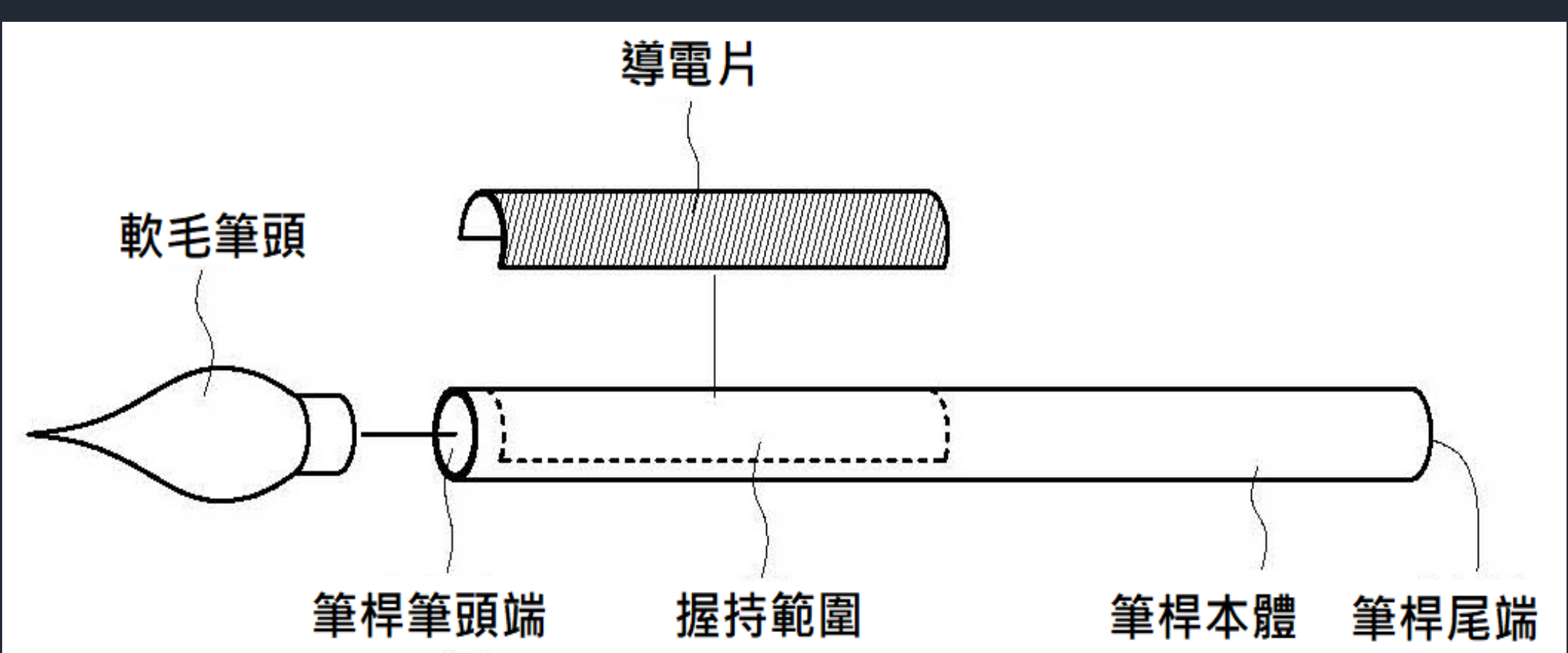


圖17~18. 自製全擬真被動式電容式觸控毛筆/水彩筆與其結構圖(自製圖) 圖20.投射電容觸控面板互電容感測觸控毛筆示意圖[53]

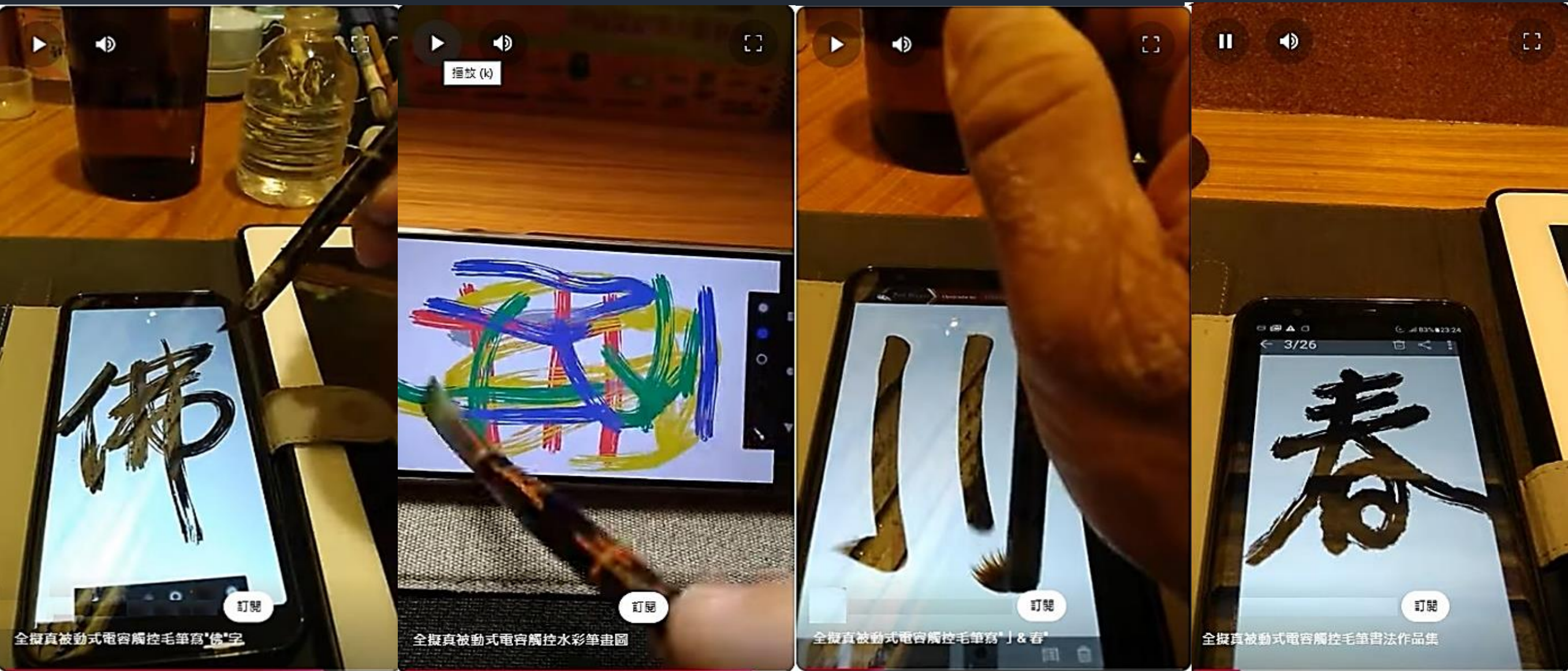
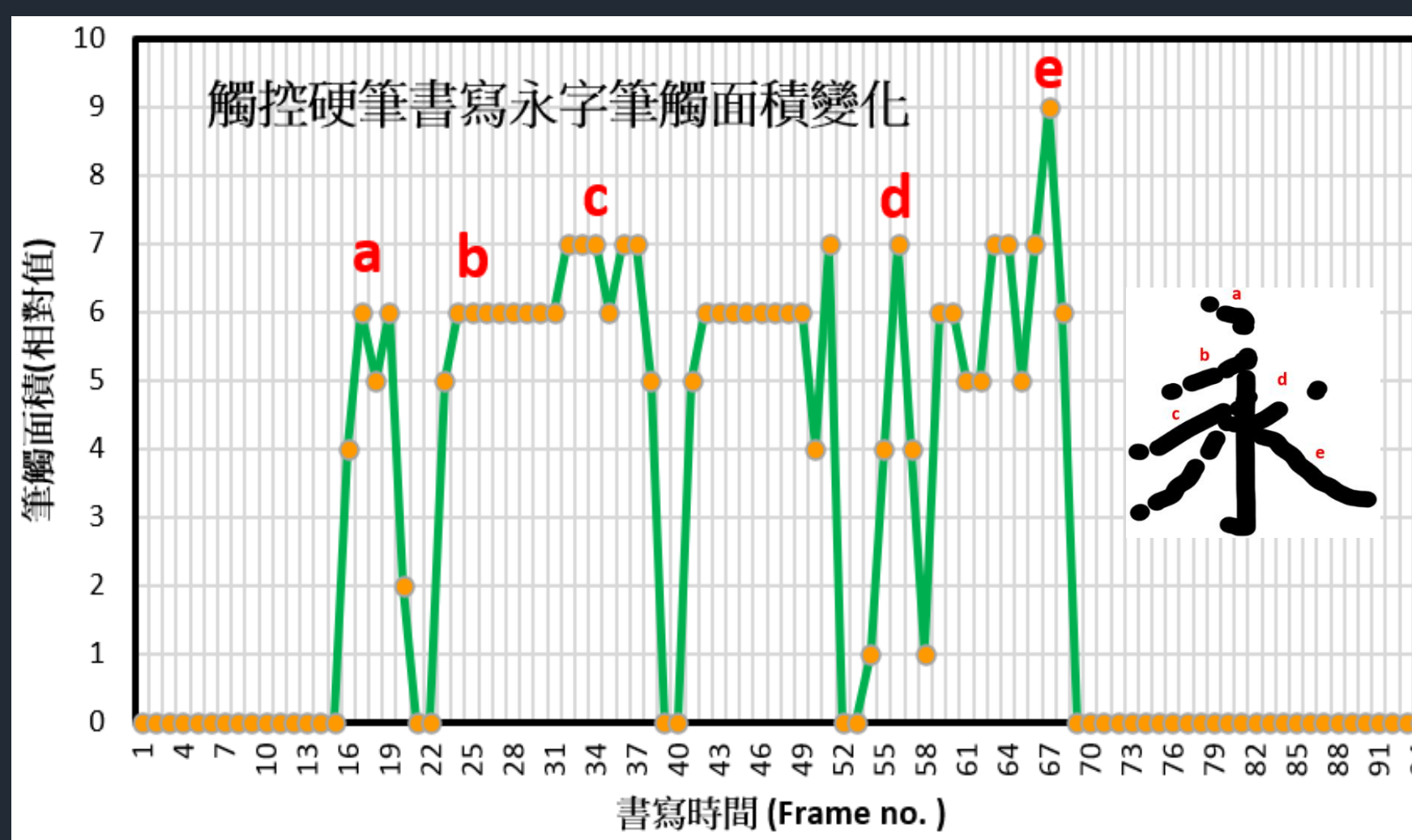
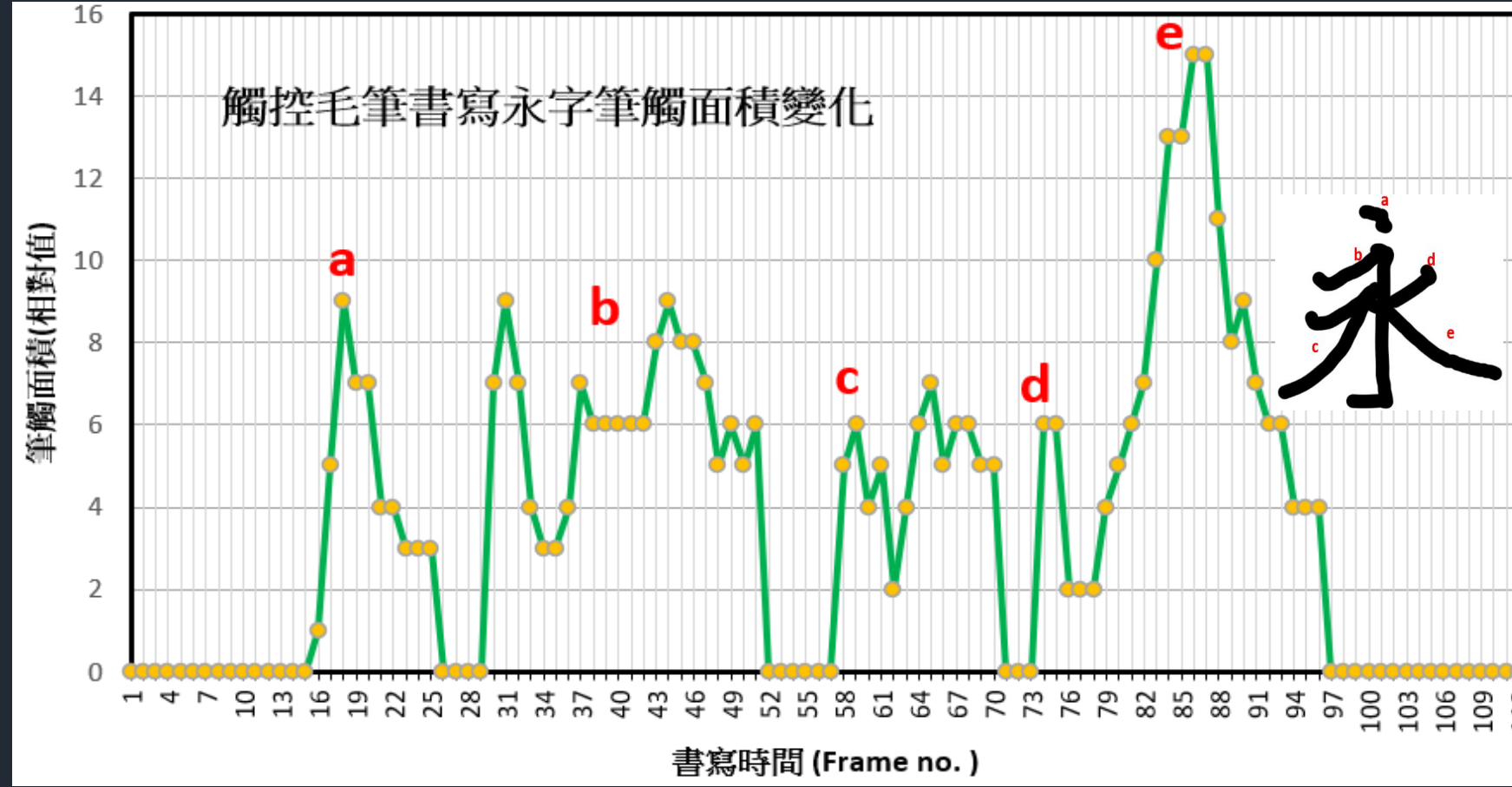
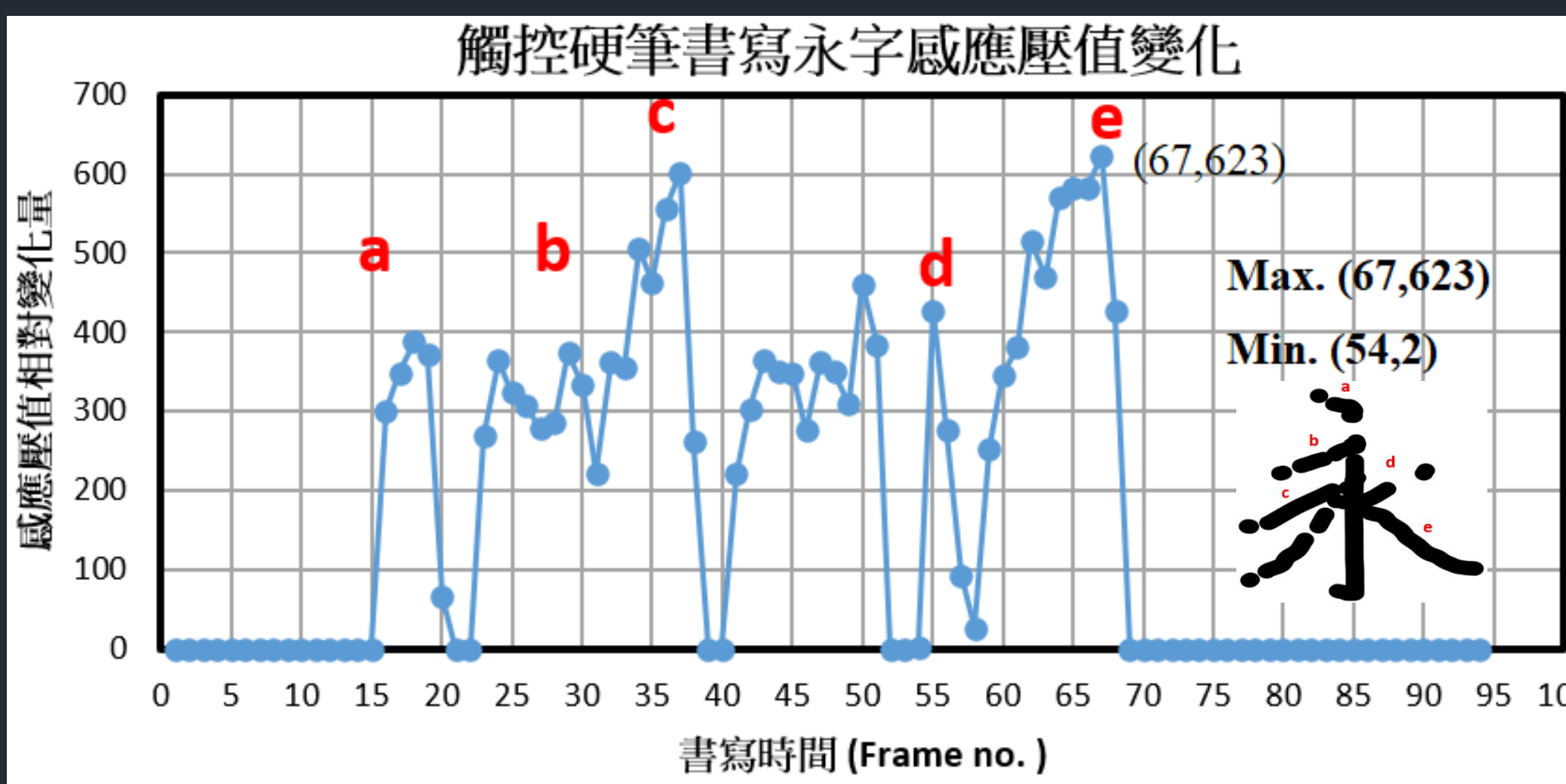
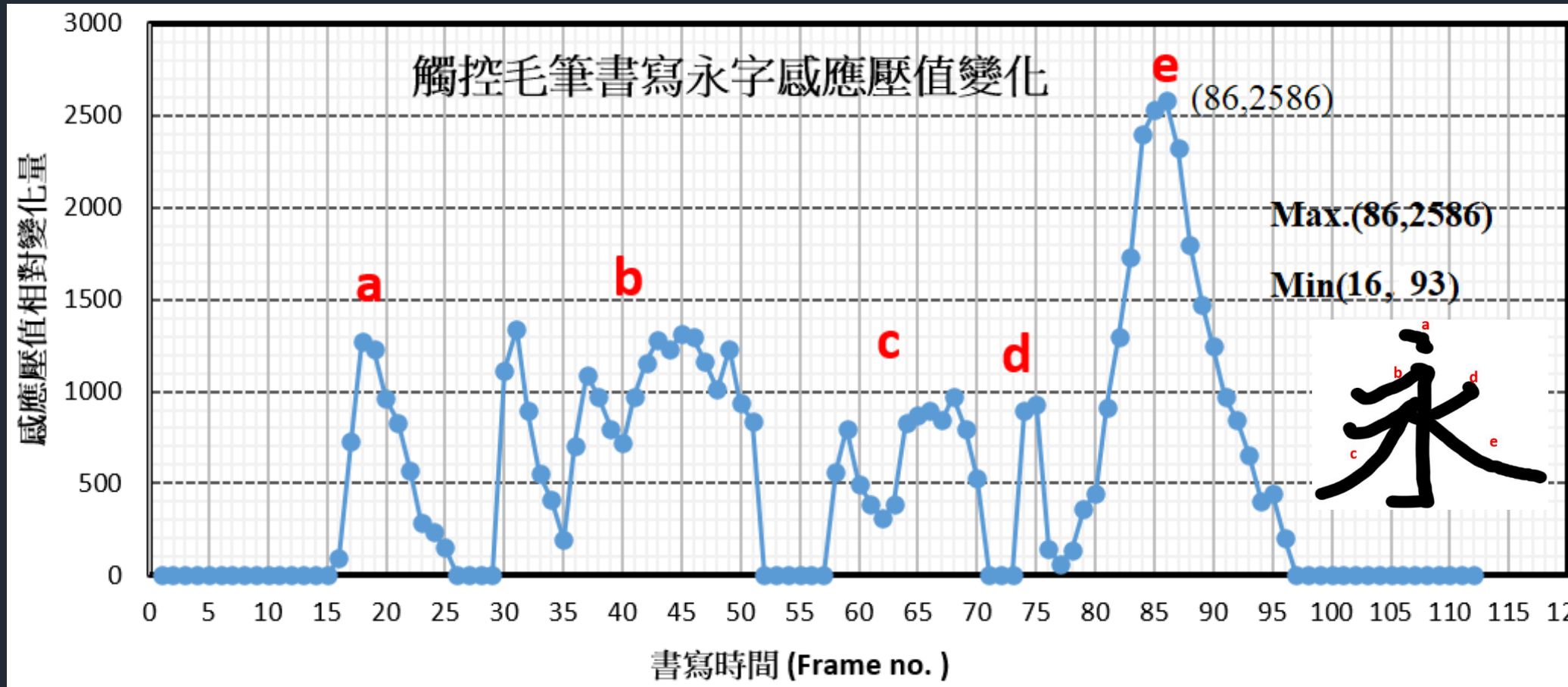


圖21. 自製全擬真電容式觸控毛筆/水彩筆動態書寫(自製影片截圖) 圖22. 自製電容式觸控毛筆/水彩筆完成的作品(自製手機截圖)

1. 「觸控靈敏度」比較
毛筆: Max(2586) · Min(93)
硬筆: Max(623) · Min(2)
→觸控毛筆輕或重的感應壓值都比硬筆大→觸控靈敏度大
2. 「輕重變化精細度」比較
△毛筆 = 2,586 - 93 = 2,493 (階)
△硬筆 = 623 - 2 = 621 (階)
→觸控毛筆輕重精細度比觸控硬筆大
3. 「書寫連續性」比較:
(1)非零感應壓值: 觸控毛筆68個, 觸控硬筆47個。(2)目視結果
→毛筆書寫連續性(流暢性)較好
4. 「書寫力道」比較:
毛筆筆觸面積1~15, 觸控硬筆1~9。
→觸控筆按壓力道越大筆觸面積越大



討論 Discussion

「水」不僅解決了乾筆毛不能觸控感應的問題，同時巧妙地解決毛筆全擬真的問題。本研究設計的觸控毛筆一筆兩用，可同時在紙張和觸控面板上書寫畫圖。茲將乾、溼兩款觸控毛筆/畫筆以及真實毛筆的優劣整理成下表。

比 較 項 目	自製濕式觸控毛筆/畫筆	坊間乾式觸控毛筆/畫筆	真 實 毛 筆
運作原理	依靠濕筆毛和高介電筆桿與電容式觸控螢幕互動	依靠導電刷毛與電容式觸控螢幕互動	透過沾取墨水或顏料後，在紙上作畫
壓力感應	✔ 與真實毛筆相同	⚠ 壓感不夠變化筆劃粗細	✔ 透過手部力量用筆起伏
筆毛材質	與真實毛筆相同	導電纖維或金屬絲	天然毛(狼毫,羊毫)或合成毛
筆觸表現	✔ 與真實毛筆相同	乾筆毛分叉筆劃變化有限	✔ 毛筆尖齊圓健，筆觸自然
多功能性	✔ 觸控筆和毛筆兩用	⚠ 只能當觸控筆使用	⚠ 只能當毛筆使用
環 保 性	✔ 無紙張浪費，數位環保	✔ 無紙張浪費，數位環保	✘ 需要紙張和顏料
價 格	與真實毛筆相近	台幣1,000~30,000元	台幣200~600元
筆觸靈活度	✔ 與真實毛筆相同	✘ 乾筆毛分叉沒有筆鋒	✔ 筆毛可自然變形
墨水效果	⚠ 依賴數位軟體模擬	⚠ 依賴數位軟體模擬	✔ 墨水可控制濃淡
筆法變化	✔ 與真實毛筆相同	✘ 乾筆毛分叉沒有筆鋒表現	✔ 可控制筆鋒、筆壓
數位繪畫	✔ 直接數位作畫	✔ 直接數位作畫	✘ 需掃描才能轉為數位圖像
動態書寫效果 (影片連結或影片截圖)	 自製影片截圖	 影片截圖[29]	 影片截圖[54]

未來研究方向

- 濕式被動式電容觸控毛筆改良
 - 改良觸控墨水(具清潔面板的溶液)
 - 具美感的高介電包覆貼紙
- 數位書畫擬真性的研究
 - 硬體：新式壓電感應觸控面板(壓力→電壓)→任何觸控筆都能呈現出自己的筆性圖案
 - 優化數位書畫軟體演算法：
 - 優化筆壓與墨色控制的耦合演算，結合筆壓、速度與接觸時間，實現墨水的動態吸收和擴散。
 - GPU 加速演算法利用圖形處理單元提升筆觸與墨水的即時渲染效率，減少筆觸延遲。
 - 優化流體動力學演算法，模擬墨水與紙張之間的互動行為，提升墨跡暈染、漸層與流動效果。
 - 優化運筆軌跡的局部計算，針對筆觸與紙張的接觸區域進行重點渲染，提升大畫布的計算速度。

結論 Conclusion

研究新穎性

- 全擬真性: 用真實毛筆/水彩筆改造成觸控毛筆
- 節能減碳: 不需要電源、紙張、顏料和墨水
- 低成本：高電容貼片加工成本，較碳纖維筆毛低
- 多功能性: 真實毛筆與觸控筆一筆兩用
- 高相容性: 適用各廠牌型號的電容式觸控裝置

研究價值

- 將藝術家的筆法和力道數據數位化保存
- 提供訓練AI的數據: 有利於開發AI書法家(機械手臂)
- 傳統藝術的數位重現: 透過AI書法家還原寫字樣貌
- 書畫示範教學: 在觸控黑板上書寫畫圖給學生觀摩
- AI智能書畫教學: 即時回饋筆法、評量與糾錯
- 數位創作市場擴展: 數位書畫與電子簽名市場
- 電腦字型個性化與客製化需求

STRENGTHS優勢

- 全擬真觸控毛筆與真實毛筆具有相同書寫觸感
- 高相容性適用各廠牌型號電容式觸控裝置
- 讓真實毛筆和水彩筆瞬間變觸控毛筆
- 不需要墨水顏料，環保可重複使用
- 被動式觸控筆比主動式觸控筆節能
- 獨特低成本可量產的製程技術
- 毛筆與觸控筆一筆兩用

SWOT

劣勢WEAKNESSES

- 書畫APP軟體不夠好無法如實表現觸控毛筆特性
- 濕式觸控毛筆需要沾水書寫，不方便外出攜帶
- 濕式觸控筆的使用學習曲線需要一段時間
- 需特定應用程式支援筆壓或水墨模擬

OPPORTUNITIES機會

- 容易製作客製化個人電腦字型
- 可成為學校或線上課程的輔助工具
- 方便將藝術家的筆法和力道數位化保存
- 提供訓練AI的數據，有利於開發AI書法家
- 詳實記錄書法家的用筆力道與筆法變化的數據，配合圖形辨識技術，重現書法家的書寫風貌
- 可結合 AI 或筆壓感應技術，提升繪畫與書寫體驗

THREATS威脅

- Apple Pencil具有更多筆法模擬功能
- 傳統書畫家可能不願意轉向數位工具
- 乾式觸控毛筆方便性優於濕式觸控毛筆
- 壓電式觸控面板改變觸控毛筆型態與效能
- 產品屬於新興市場，消費者接受度仍待觀察

參考文獻資料 Reference

1. 未知作者. DIY被動式電容觸控筆. YouTube. <https://reurl.cc/Eg0nnk>; <https://reurl.cc/kMKrXG>; <https://reurl.cc/vpROLI>

2. 顧鴻壽. (2014). 觸控面板技術及其應用. 五南圖書出版.

3. Unknown Author. (2024). A Brief History of Touchscreen Technology. Zytronic Corporation. <https://reurl.cc/oVEpZq>

4. Unknown Author. (2024). The Evolution of Touchscreen Technology. Microtouch Corporation. <https://reurl.cc/NbKnGk>

5. Unknown Author. (2023). Touchscreens: Past, Present, and Future. Displays2Go Company. <https://reurl.cc/INKIZ9>

6. 未知作者. (2013). 手指,筆,多元化觸控輸入技術與應用發展. 電子時報. <https://reurl.cc/qnWXMN>

7. 川村康文、林雯. (2024). 觸控面板的原理. 物理角色圖鑑 (pp. 104-105). 漫遊者文化.