

東海大學電機工程學系

碩士論文

三維觸控感測器的設計與製作

Design and Fabrication of a Touch  
Sensor Applied in Three Dimensions

研究生:陳柏翰

指導教授:黃宇中 博士

中華民國一零四年六月

東海大學電機工程學系碩士學位  
考試委員審定書

電機工程學系研究所 陳柏翰 君所提之論文

三維觸控感測器的設計與製作

經本考試委員會審查，符合碩士資格標準。

學位考試委員會 召集人：江政達 (簽章)

委員：劉日新

江政達

黃守中

中華民國 104 年 06 月 30 日

## 誌謝

在進行研究以及寫作論文的過程中，歷經了許多人的幫助，要感謝的人非常多。首先要感謝我的指導教授黃宇中老師，在研究的過程中指引我方向，並傳授寶貴的研究經驗，讓我解決實驗中的難題，順利完成研究。除此之外，老師平常培養我解決問題的能力，並給予我關心與鼓勵，使我在研究所期間獲得成長，在此致上最深的感謝與敬意。

感謝我的同學又禎與俊毅，和我一起學習與研究，並在實驗時給予我幫助。感謝我的學長莆壬和聖聰，教我待人處事的圓融。感謝實驗室的學弟昱元以及益豪，時常陪我討論並提供意見。感謝我的同學勝發，在實驗時給予我支援。還有實驗室的崑峻、華健、先昱，感謝你們平常的陪伴與幫助。

最後要感謝我的家人，在研究所期間給予我支持與鼓勵，讓我無後顧之憂的進行學習，並在我遭遇瓶頸時給予關心，使我重拾繼續前進的勇氣，我才能夠順利度過難關，完成學業。謹以此篇論文獻給所有關心並幫助我的人，祝福你們快樂與安康。

## 摘要

本論文探討一種電容式的三維觸控設計，從平面電容觸控原理中，找出一種能應用於球體表面的觸控方式。基於單導電層觸控原理，在球表面鋪設各種形狀的銅箔電極，透過模擬軟體分析觸控效應。並以手指實際測試，驗證觸控座標解析的準確性。實務測試以本研究所設計的 PCB 板線路將一觸控半球體連接 Cypress 數據處理器作量測。其分析結果建構出一個以方位角  $\varphi$  與手指電容  $C_F$  來計算天頂角  $\theta$  的三維曲面數據資料結構，方位角  $\varphi$  由質心公式導出，最終得出球體表面的觸控座標位置，實驗結果證實此半球觸控感測器具實用性。

關鍵字:電容式觸控、三維觸控、球面

## Abstract

A capacitive three-dimensional touch design was examined in this study. The concepts of surface capacitive touch technology were reviewed to identify a touch method that can be applied to spherical surfaces. Based on touch designs with single conductive layers, the researchers laid copper electrodes of various shapes onto a spherical surface and used a simulation software to analyze touch effects. A physical test using finger touching was also conducted to evaluate the accuracy of the design's touch coordinate analysis capability. The test was conducted on a printed circuit board designed by the Institute, where a touch hemisphere was linked to a Cypress data processor for analysis. The results were used to fabricate a data structure that could calculate the zenith angle ( $\theta$ ) of three-dimensional surfaces using the azimuthal angle ( $\phi$ ) and finger capacitance ( $C_F$ ), where the azimuthal angle ( $\phi$ ) was deduced using a center of mass formula. This data structure was used to determine the touch coordinate positions of spherical surfaces. The test results obtained in this study verify the practicality of hemispherical touch sensors.

Keyword: Capacitive touch, Three-dimensional touch, Spherical

# 目錄

誌謝.....	i
摘要.....	ii
Abstract.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vii
表目錄.....	xi
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機與目的.....	2
1.3 論文架構.....	4
第二章 電容式觸控原理.....	6
2.1 電容觸控感應.....	6
2.1.1 平行板電容.....	7
2.1.2 介電層.....	9
2.1.3 高頻電容等效電路.....	10

2.2 表面電容式觸控 .....	12
2.3 投射電容式觸控 .....	12
2.3.1 自電容感測 .....	14
2.3.2 互電容感測 .....	15
2.4 單導電層二維電容板 .....	15
2.4.1 電極元件 .....	16
2.4.2 迴旋積分 .....	17
第三章 三維觸控感測器設計 .....	19
3.1 三維半球表面電容式觸控佈局 .....	19
3.1.1 半球表面座標 .....	19
3.1.2 類三角形電極樣式 .....	21
3.1.3 U 型電極樣式 .....	22
3.2 觸控座標計算 .....	25
3.2.1 方位角 .....	25
3.2.2 天頂角 .....	26
3.3 電容計數量測 .....	27
3.3.1 量測平台 .....	27
3.3.2 CapSense Sigma-Delta 量測方法 .....	29

第四章 量測與分析 .....	32
4.1 三角形電極元件量測 .....	32
4.1.1 平面之三角形電極 .....	33
4.1.2 平面貼合之等腰三角形電極 .....	36
4.1.3 CSD 量測等腰三角形電極 .....	37
4.2 半球表面類三角形電極 .....	39
4.3 半球表面 U 型電極 .....	42
4.4 半球表面電極陣列 .....	43
4.5 觸控半球實體 .....	48
第五章 結論與未來展望 .....	50
5.1 結論 .....	50
5.2 未來展望 .....	50
參考文獻 .....	51



## 圖目錄

圖 1 各式觸控技術普及率之趨勢[1].....	1
圖 2 投射電容式觸控之商業應用趨勢[1].....	3
圖 3 紅外線影像感測之球形多點觸控顯示器[2].....	4
圖 4 抓握球之虛擬互動[3].....	4
圖 5 電容觸控感應等效模型[4].....	6
圖 6 電容觸控感測示意圖 .....	7
圖 7 平行板電容 .....	7
圖 8 電容之高頻等效電路[6].....	10
圖 9 阻抗向量.....	11
圖 10 電容等效電路頻率響應關係[6].....	11
圖 11 表面電容式觸控板.....	12
圖 12 電極間電場分布圖 .....	13
圖 13 手指與電極電力線連接圖 .....	14
圖 14 自電容觸控等效圖 .....	15
圖 15 互電容觸控等效圖 .....	15
圖 16 單導電層電容式觸控樣式 .....	16

圖 17 單個三角形電極元件與長方形上部電極 .....	17
圖 18 迴旋積分[6].....	17
圖 19 上部為三角電極透過迴旋積分反求出下部電極元件[6] .....	18
圖 20 乘積與迴旋積分之結果[9].....	18
圖 21 球座標系 .....	19
圖 22 球表面類三角形電極樣式 .....	21
圖 23 球表面類三角形陣列 .....	22
圖 24 球表面 U 型電極陣列 .....	23
圖 25 手指覆蓋於球表面 U 型電極之模型 .....	24
圖 26 U 型電極手指觸摸位置與覆蓋面積關係 .....	24
圖 27 觸控半球模型 .....	26
圖 28 CYPRESS 之電容感測示意圖[4] .....	28
圖 29 手指觸摸之 CX 計數改變示意圖[4].....	29
圖 30 CSD 觸控電路框架圖[4].....	29
圖 31 觸碰與非觸碰時的電容初始計數變化[4].....	30
圖 32 CY3280 感測器電路板[10] .....	31
圖 33 平面單導電層三角形電極測試 .....	34
圖 34 上下夾層剖面結構圖 .....	34

圖 35 直角與等腰三角形電極位置與量測電容值關係圖 .....	35
圖 36 貼合之等腰三角形電極 .....	36
圖 37 貼合後之結構剖面圖 .....	37
圖 38 單導電層電極貼合與壓合之比較 .....	37
圖 39 手指位置覆蓋面積變化模擬 .....	38
圖 40 CSD 量測之手指位置與電容計數差值以及覆蓋面積變化關係 .....	38
圖 41 及時量測手指移動位置對應之電容計數 .....	39
圖 42 實作球表面類三角形電極元件 .....	40
圖 43 手指位置天頂角 $\theta$ 與電容計數差值 $CF$ 關係圖 .....	40
圖 44 及時量測球表面類三角形電極上手指移動與 $CF$ 關係 .....	41
圖 45 球表面 U 型電極元件 .....	42
圖 46 U 型電極上手指位置和電容計數差值 $CF$ 關係 .....	43
圖 47 手指沿五條 $\varphi$ 曲線移動測試示意圖 .....	44
圖 48 不同方位角偏移之 $\theta$ - $CF$ 曲線 .....	45
圖 49 不同方位角偏移之天頂角與電容計數差值的三維關係圖 .....	46
圖 50 半球表面三個 U 型電極陣列 .....	47
圖 51 手指沿天頂角 $30^\circ$ 滑動之 $CF$ 變化 .....	47
圖 52 模擬的 U 型電極陣列之觸控半球設計 .....	49

圖 53 實作的 U 型電極陣列觸控半球 .....49



## 表目錄

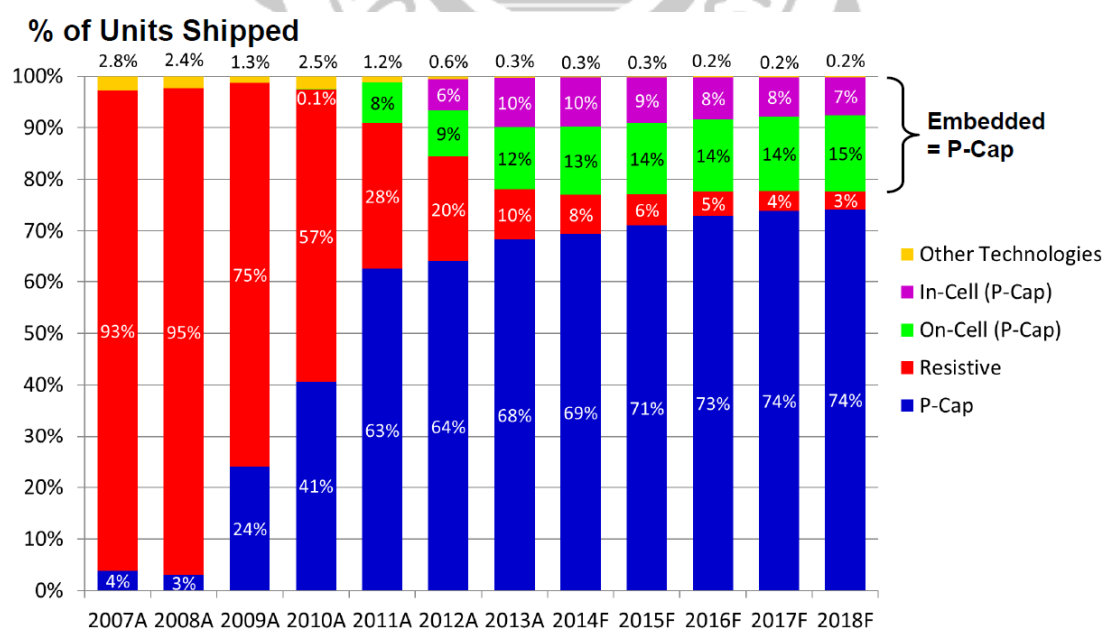
表格 1 常見物質介電常數表[5].....	9
表格 2 LCR 測試儀器規格.....	32



# 第一章 緒論

## 1.1 前言

觸控技術的出現，對人類與電子設備的互動方式帶來了很大改變，由於良好的直接操作性與輕巧靈活地運用方式，目前觸控技術已被廣泛的使用在生活中的各項產品。在早期，諸如 PDA、手機等電子產品上使用的是電阻式的觸控技術，必須使用指尖或筆尖按壓造成 PET 膜凹陷，使上下導電層接觸導電，偵測 X 軸與 Y 軸電壓訊號之變化，計算出觸控位置座標。然而，因為電阻式面板的光線穿透率較低，加上不適用於多點觸控方案，在應用受限的情況下漸漸式微，如圖 1 所示，取而代之成為主流的是投射電容式觸控技術。



Source: DisplaySearch Touch-Panel Market Analysis Reports 2008-2014

圖 1 各式觸控技術普及率之趨勢[1]

投射電容式觸控是在觸控板上印刷的透明電極陣列，由於人的身體亦是優良的導體，因此當手指觸摸觸控板，手指與電極之間的電容便會增加，此時偵測電極的靜電容量變化，就可以計算出手指觸控位置。由於靠指腹操作，因此觸控體驗較佳，並且有著低功耗、使用壽命長、可應用於曲面，以及極佳的光線穿透率等優點，適用於多點觸控。使用限制在於，絕緣體接觸面板是不會運作的，所以穿戴手套時無法操作觸控板。

由於應用面廣，加上能做曲面設計，因此本論文將以投射電容式觸控為主軸來進行三維觸控感測器的研究。

## 1.2 研究動機與目的

目前電容式觸控技術的研究主要在三種層面：

第一種是觸控感測電極圖形之布局的創新與改良，新的圖形設計必須搭配一套相應的座標演算法，才能進行觸控點位置的解析運算。第二種是材料之研發改良，目前觸控面板的透明電極所使用的材料以銦錫氧化物(Indium tin oxide, ITO)為主，然而近期已經有新的材料製成之觸控面板，比如奈米銀線、奈米碳管等材料。第三種是觸控介面之創新，如使用金屬網格技術製成之具良好彎曲特性，可彎折的曲撓式觸控面板、或是增加 z 軸手指遠近判別的懸浮式觸控。此類型的創新將為使用者帶來不同的觸控體驗，或許會改變觸控介面的應用生態。

觸控產業所蘊含之商機是十分巨大的，然而一般集中在消費性電子產品，如手機、平板等應用上。但在近年來，商業用途的觸控設備的成長亦十分迅速，圖 2 顯示了投射電容式觸控在商業運用模式上的

趨勢，可以看見，在工廠設備方面的需求是逐年成長的。然而，普通的平面觸控介面已經慢慢無法滿足工廠設備需求，因此新型態的三維觸控技術將以此為契機漸漸展現出重要性，屆時，觸控應用將不再被平面所限制，進而使用在更多種類型的裝置上。

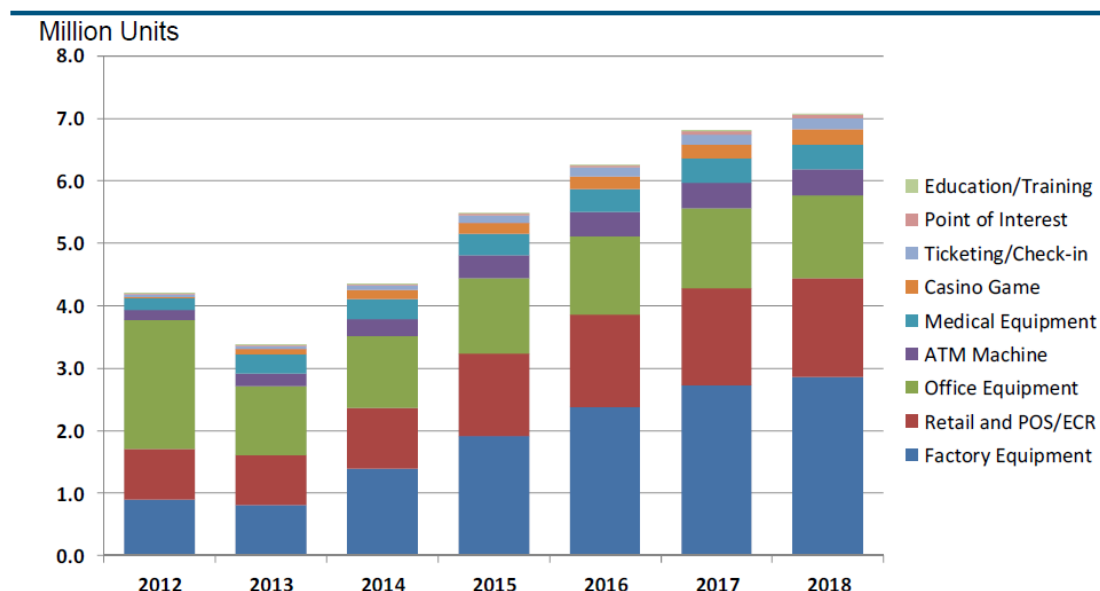


圖 2 投射電容式觸控之商業應用趨勢[1]

球體被認為是一種可嘗試的三維真實觸控介面，近幾年開始有球體上的觸控應用研究。在 2008 年 Benko、Wilson 與 Balakrishnan 提出一種使用紅外線影像感測技術的球形多點觸控顯示器[2]，如圖 3 所示，它可以在球體上呈現投影畫面，並偵測出手指觸控位置。這種新式的球形多點觸控顯示器為使用者帶來全新的互動體驗，然而此種設計體積龐大，無法小型化，且易受接觸干擾，9000 美金的造價也稍嫌昂貴，因此普及不易。2013 年，Han 提出一種電容式觸覺感應球[3]，其球體表面鋪設交錯的電極陣列長條。當手抓握住球體時，可以從電極與人體間產生之電容效應辨別出人體接觸的位置分布，以此分析出手抓握球的方式，形成一種人與虛擬世界互動的有效方法。



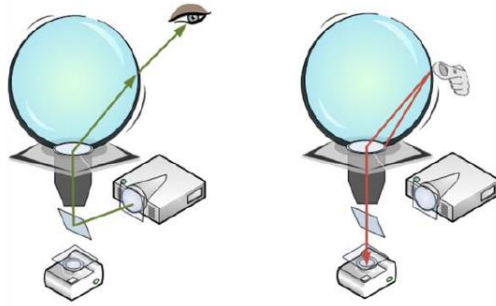


圖 3 紅外線影像感測之球形多點觸控顯示器[2]

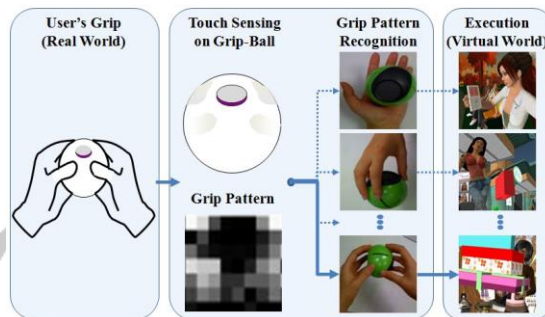


圖 4 抓握球之虛擬互動[3]

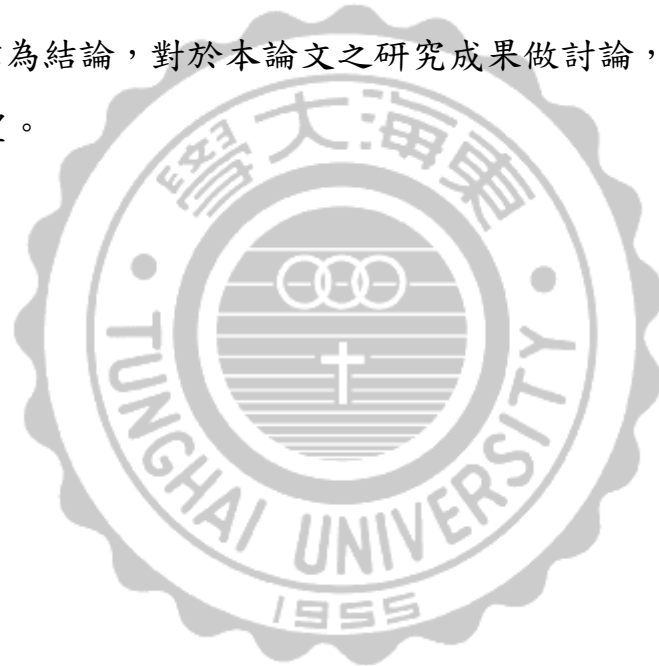
為了跟上這股潮流，本論文以投射電容式技術，研究一種新式的三維觸控半球設計，並達到以下四點：

1. 體積小型化，可以一手掌握的大小。
2. 精確的觸控感應，靈敏度高。
3. 簡易有效的觸控電極布局。
4. 成本低廉。

### 1.3 論文架構

本論文共分五章，第一章為緒論，此章節包括了前言、研究動機以及論文架構。在此章裡介紹觸控之應用趨勢，並且說明研究動機和

論文整體結構。第二章為電容式觸控原理的探討，從各種電容觸控方法中，找出適合用於三維半球表面觸控感測的方案。第三章為三維觸控感測器的設計方法，在 3.1 章節中使用數學模型以及 CAD 軟體分析，設計出適合的半球表面電極樣式，3.2 章為觸控點座標之計算以及修正公式，在 3.3 章節討論電容量測，講述使用 CYPRESS 的 PSOC 架構所建立的電容感測數值化之方法。第四章為量測分析，使用 LCR 測試儀與第三章介紹之電容感測方法，量測所製作的電極元件以及半球表面之電極陣列，並解析量測數據，驗證觸控位置檢測演算法的正確性。第五章為結論，對於本論文之研究成果做討論，最後是對於研究的未來展望。



## 第二章 電容式觸控原理

### 2.1 電容觸控感應

電容式觸控感應是指，當手指接近由金屬電極組成的感測器板時所產生的靜電容量變化。一個簡易的電容觸控感應等效模型如圖 5 所示，其覆蓋層即為一層介電質，而手指相當於平行板電容的上部電極。因此當電容感應發生時，可將其視為一個平行板電容效應。

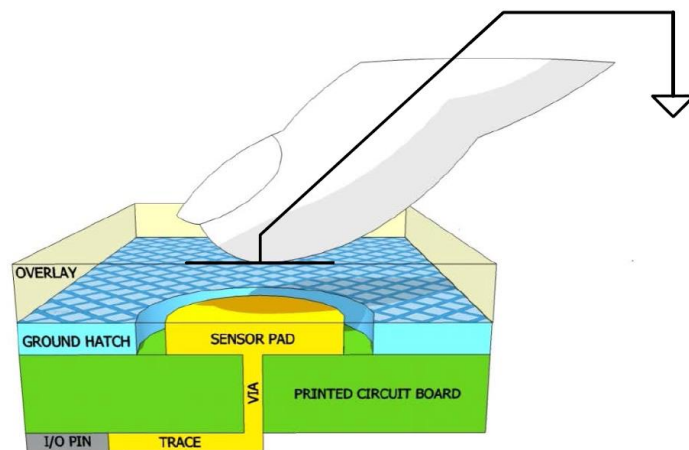


圖 5 電容觸控感應等效模型[4]

手指接觸感測器板時，所產生之等效於平行板的手指電容，稱為  $C_F$ 。而在感測器板上，除了平行板電容效應外，手指接觸到覆蓋層亦會與附近其他導體之間產生邊緣電場。然而這些邊緣電場的作用與平行板電容之電場相比非常微弱，因此在一般情況下忽略不計即可。

即使手指未觸摸感測器板，感測器的 I/O 引腳上仍具有一定大小的寄生電容，此電容定義為  $C_P$ 。 $C_P$  包含了兩個元素：其一是電容感測控制器內部之寄生元件；其二是感測器板、線路、過孔以及系統內部

的導體，比如接地層(GND)、其他走線、外殼或底座中的任何金屬導體之間的電場耦合。電容感測控制器所測量到的數值，即為感測器引腳的總電容，稱為 $C_X$ 。

當手指未碰觸感測器板時:  $C_X = C_P$

當手指碰觸感測器板時:  $C_X = C_P + C_F$

$C_P$ 通常情況下會大於 $C_F$ 一個量級，在調校一個電容感應系統時， $C_P$ 的大小亦是一個必須考慮的重要因素。

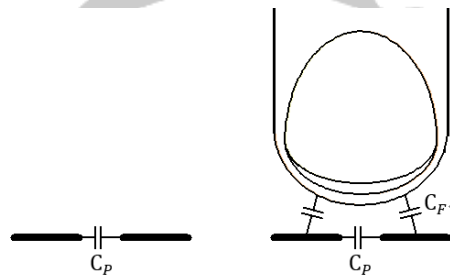


圖 6 電容觸控感測示意圖

### 2.1.1 平行板電容

由於手指接觸感測器板時可等效於一個平行板電容模型，因此可以從平行板電容來分析手指觸控發生時，其 $C_F$ 大小的影響因素。

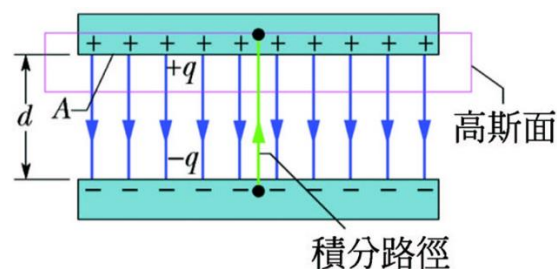


圖 7 平行板電容

討論一個中間沒有介電質的平行板電容:

$$\text{由高斯定律: } \varepsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q \quad (2.1)$$

$$\rightarrow E = \frac{q}{\varepsilon_0 A} \quad (2.2)$$

兩極板之間的電位差:

$$V = V_f - V_i = - \int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (2.3)$$

$$V = - \int_-^+ E \cos(180^\circ) ds = E \int_-^+ ds = Ed \quad (2.4)$$

將(2.2)與(2.4)帶入平行板電容公式:

$$C_F = \frac{q}{V} = \frac{\varepsilon_0 EA}{Ed} \quad (2.5)$$

$$\rightarrow C_F = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \quad (2.6)$$

討論中間有介電層之平行板電容，其電位差不變:

$$\text{高斯定律: } \varepsilon_0 \varepsilon_r \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q \quad (2.7)$$

$$\text{電場: } E = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r A} \quad (2.8)$$

將(2.4)與(2.8)帶入平行板電容公式:

$$\text{得出: } C_F = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \quad (2.9)$$

$\varepsilon_0$ : 真空介電常數，大小為  $8.854187817 \times 10^{-12}$  (F/m)

$\varepsilon_r$ : 介電層材質的介電系數

A: 重疊區域面積，即手指覆蓋面積

d: 介電層厚度

由最後得出之(2.9)式可知， $C_F$ 大小與介電層的介電系數 $\epsilon_r$ 以及手指與感測器板重疊之面積  $A$  成正比，與介電層厚度  $d$  成反比。由於感測器板上覆蓋之介電層在設計完成後就無法改變，因此在設計階段就必須考慮其材質之介電系數與厚度對手指電容感測所帶來的影響。

除此之外，在有貼合的情況下，必須將貼合膠材質之介電系數與厚度一起考慮進去。此時新的手指電容 $C_F'$ 相當於初始手指電容 $C_F$ 與膠層手指電容 $C_{F_g}$ 串聯。

## 2.1.2 介電層

表格 1 常見物質介電常數表[5]

介質名稱	空氣	聚苯乙烯顆粒	洗衣粉	奶粉	環乙醇	ABS 顆粒	丙烯酸樹脂
介電常數	1	1.05~1.5	1.1~1.3	1.8~2.2	2	1.5~2.5	2.7~6.0
介質名稱	乾燥煤粉	石膏	食用油	尿烷	異氰酸脂	環氧樹脂	麵粉
介電常數	2.2	1.8~2.5	2~4	6.5~7.1	7.5	2.5~6.0	2.5~3.0
介質名稱	濕沙	氯	膠乳	丙酮	甘油	氯化鉀	稻米
介電常數	15~20	21	24	20~30	37	4.6	3~8
介質名稱	液態煤氣	塑膠粒	玻璃片	汽油	柴油	丙酮	工業酒精
介電常數	1.2~1.7	1.5~2	1.2~2.2	1.9	2.1	19.5~20	16~31
介質名稱	糧食	乾燥沙	瀝青	甲醚	丁醇	乙醇	飛灰
介電常數	2.5~4.5	3~4	4~5	5	11	24	1.5~1.7
介質名稱	乙醇	炭灰	礫石	甲醇	硫酸	PVC 粉末	生橡膠
介電常數	2.5	25~30	25~30	30	84	1.4	2.1~2.7
介質名稱	鉛粉	瀝青	碳酸鈣	硫酸鈣	水泥	煤粉	PE (聚乙稀) 顆粒
介電常數	1.6~1.8	2.5~3.2	1.8~2.0	5.6	1.5~2.1	1.2~1.8	1.5
介質名稱	原料玻璃	砂糖	液態乙烷	氧化鐵	煤油	尼龍	PP (聚丙烯) 顆粒
介電常數	2.0~2.5	1.5~2.2	5.8~6.3	14.2	2.8	4~5	1.5~1.8
介質名稱	砂	亞硫酸鈉	糖	甲苯, 液體	植物油	小麥粉	水
介電常數	3~5	5	3	2.0~2.4	2.5~3.5	2.2~2.6	48~80
介質名稱	硫酸鋁	苯, 液體	氯化鈣	二氧化碳	氨水	咖啡粉	焦炭
介電常數	6	2.3	11.8	1.6	2	2.4~2.6	1.1~2.2
介質名稱	穀物	重油	鹽酸	液氮	礦物油	油漆	玉米廢渣
介電常數	3~8	2.6~3.0	4~12	1.4	2.1	5~8	2.3~2.6
介質名稱	皂粉	澱粉					
介電常數	1.2~1.5	2~5					

介電層材質選用關係著 $C_F$ 之大小，觸控板通常選用介電常數 $\epsilon_r$ 為1.5~4之間的材質。其中，最被廣為使用的是鋼化玻璃以及PET(聚對苯二甲酸乙二醇酯)。PET的優勢在於相較其他材質可以做到更薄，所以厚度 $d$ 可以更小，也意味著 $C_F$ 可以更大。除此之外，PET的成本也比現有的塑料以及玻璃材質低廉。

### 2.1.3 高頻電容等效電路

在討論電容時，亦須考慮其頻率效應，一個高頻等效電路[6]如圖8所示，電路中含有三種寄生元件，分別為串連電感 $L_s$ ，串連電阻 $R_s$ ，以及並聯電阻 $R_p$ 。其中， $R_p$ 相當於電容介電質的絕緣電阻，而兩個串聯之寄生元件 $L_s$ 和 $R_s$ 則來自引線的兩端、介電層以及電極板。

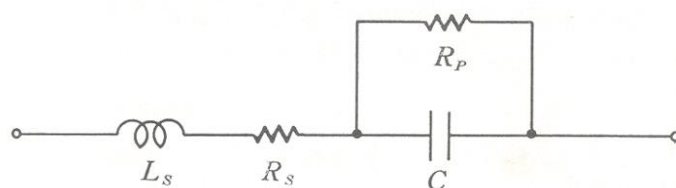


圖 8 電容之高頻等效電路[6]

在此等效電路中，若 $L_s$ 之值極小，且 $R_p$ 之值趨近無限大的情況下，則可以將等效電路簡化，使阻抗變為 $R_s$ 與 $X_c$ 的串聯。其阻抗向量如圖9所示。

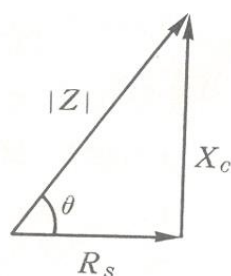


圖 9 阻抗向量

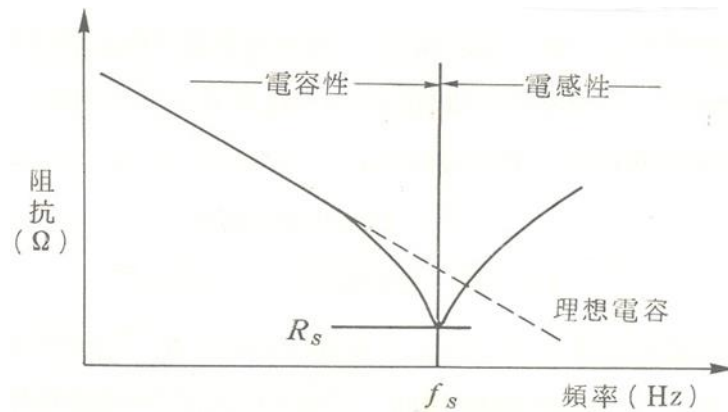


圖 10 電容等效電路頻率響應關係[6]

然而，在實際情況下，寄生電感 $L_s$ 存在，因此電容器具有諧振頻率(self-resonance frequency) $f_s$ 。圖 10 顯示了電容等效電路頻率響應之關係曲線，當電路信號的頻率高於 $f_s$ 時，電容器將會在電路上呈現出電感性；當信號頻率低於 $f_s$ ，電容的有效電容量 $C_{eff}$ 與頻率的關係為下式：

$$C_{eff} = \frac{C}{1 - (\frac{f}{f_s})^2}, \quad f < f_s \quad (2.10)$$

C:低頻信號時的電容量

f:電路工作頻率

$f_s$ :等效諧振頻率

(2.10)式中可以發現，當電路工作頻率越接近於 $f_s$ 時，其有效電容值 $C_{eff}$ 會大幅的上升。



## 2.2 表面電容式觸控

表面電容式觸控面板的結構是由一片單層的大型的透明導電 ITO (銻錫氧化物) 膜以及位於四個角落的電極構成。觸控板運作時，施加相同的電壓到角落的四個電極上，使整個面板形成均勻電場，全部都是同相位時，不會有電流流動。而當手指觸摸到觸控面板時，電流從四個角落通過手指流動，則距離手指觸控點越近的電極，電流值會越大，因此由四個角落電極量測到的電流比例來做計算，即可解析出觸控點。表面電容式觸控板上經手指流過人體的電流非常小，不會對人體造成危害，其缺點是容易受水滴影響。

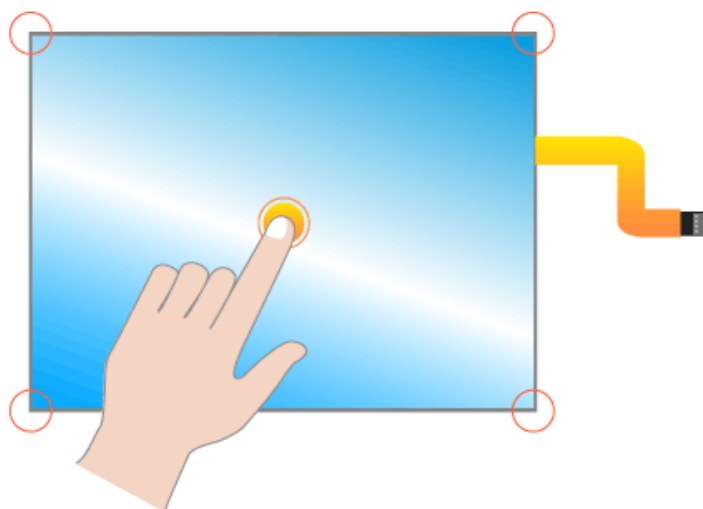


圖 11 表面電容式觸控板

## 2.3 投射電容式觸控

所謂的投射電容式觸控，是量測觸控板上鋪設的 ITO 透明電極與接近的手指或其它導電物間產生的電容感應，藉由觸控 IC 的運算後，解析出觸控位置座標[7]。

以結構來區分的話，投射式電容觸控板可分成單層或雙層兩種，ITO 電極以 X、Y 軸彼此交錯的方式形成陣列，這些 ITO 電極的外部分別由金屬導線耦接至觸控感測 IC 上。如圖 12，在沒有被手指接觸的情況時，電極與電極之間的電場分佈是固定的，每個電極之間都會有一個固定的耦合電容 $C_p$ 。

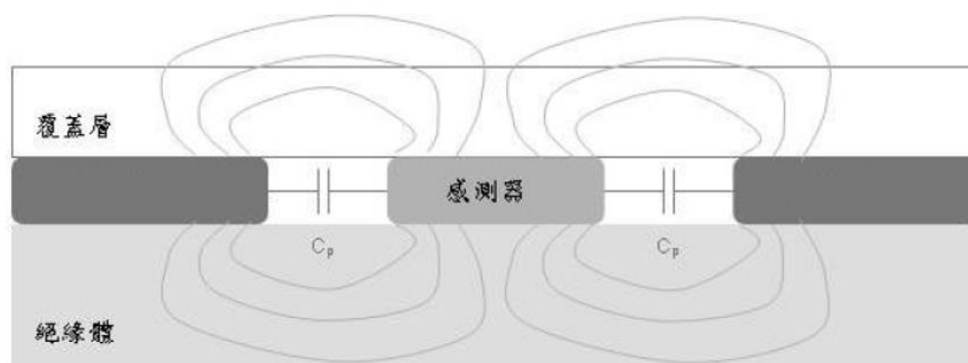


圖 12 電極間電場分布圖

人屬於優良的導體，因此手指接觸到面板時，在觸控面板上的 ITO 電極與手指間，會產生一個手指電容 $C_F$ 。原本固定分佈在每個電極間的電場，會因為手指電容 $C_F$ 的產生導致部分電力線被手指吸收而產生變化，造成 X 與 Y 軸上線間電容改變。由於電力線呈投射狀分佈，故被稱為投射式電容觸控。

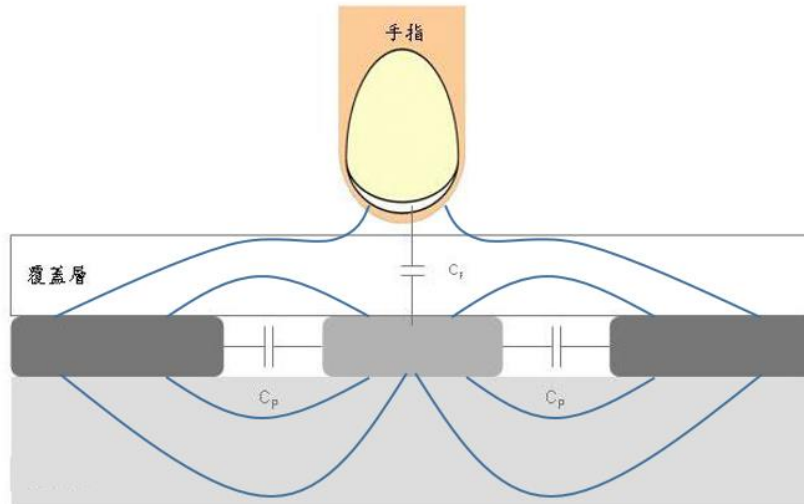


圖 13 手指與電極電力線連接圖

在投射式電容觸控板上單點觸控時，會有一條 X 軸線與一條 Y 軸線的電容值產生變化，因此分析電容變化的兩個軸線，其交錯之位置即為觸控點。觸控面板上 X 與 Y 軸線的分佈通常比顯示器面板的解析度疏鬆。為了使觸控 IC 感測到的座標位置與顯示面板的解析度相同，因此必須對感測板的 X 軸線與 Y 軸線之間再做內插法運算處理，則可以得到準確性更高的觸控座標點顯示。由於是在軸交錯間區域做內差運算補點，因此通常比電阻式整面觸控板的內插運算準確許多。

投射式電容觸控的有兩種感測方式：一種是自容式，另一種則是互容式。兩者的不同之處在於：自容式感測的是整條 X 軸或 Y 軸電極的電容變化，而互容式感測的是軸交錯點的電容變化。

### 2.3.1 自電容感測

在自電容感測下，當手指接觸產生感應電容時，由於原來感測的  $C_X$  是整條軸線串聯的電容  $C_{P\_total}$ ，而手指電容  $C_F$  加入時，等於並聯了

一個新的電容，因此觸碰感應發生，整體 $C_X$ 的電容值是變大的(圖 14)。

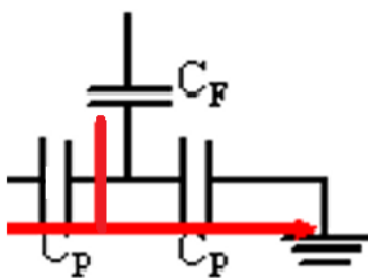


圖 14 自電容觸控等效圖

$$\text{其量測電容值: } C_X = C_{P\_total} + C_F \quad (2.11)$$

### 2.3.2 互電容感測

互電容感測量測的是電極之間的電容，當手指接觸電極時，原來的 $C_X$ 為單條 X 軸與 Y 軸交錯點的線間電容 $C_P$ ，因為手指電容 $C_F$ 加入與原來電容形成串聯，所以原本的 $C_X$ 電容會因觸碰而變小(圖 15)。

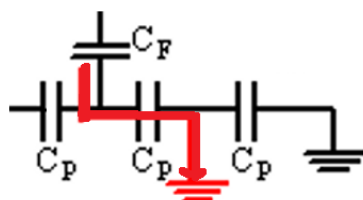


圖 15 互電容觸控等效圖

$$\text{其量測電容值: } C_X = C_P - C_F \quad (2.12)$$

## 2.4 單導電層二維電容板

在 1978 年，由美國的 Herbert 等人提出了單導電層的電容式觸控 [8]，其設計是在二維平面以等間距鋪設多組對插並互補的直角三角形電極。偵測出觸碰產生容值變化之第 N 個電極做為 X 軸座標判斷，

藉由三角形電極之電容值與覆蓋面積幾何變化關係計算出 Y 軸座標，此方法是最早運用於平面觸控的電容式技術，屬於自電容觸控。

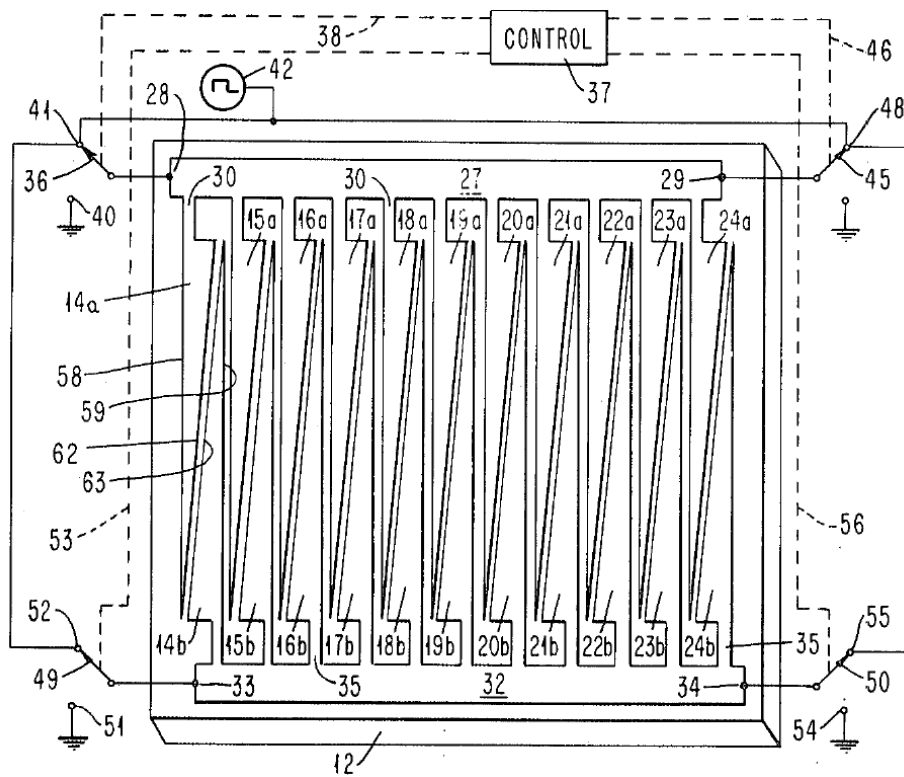


圖 16 單導電層電容式觸控樣式

單導電層觸控技術的優勢在於，製造程序少、布局複雜度低，因此良率相較於雙導電層技術來得高許多，且成本較為低廉。也因為良率以及成本優勢，直到現今仍有許多觸控廠商使用，並衍生出了各種改良式的布局。

#### 2.4.1 電極元件

對於單導電層觸控板中的單個電極元件來說，在介電層之間距為等值情況下，其量測之電容變化，若是與上部拾取電極(手指)和下部電極覆蓋面積有關的話(圖 17)，則上部電極移動位置時與量測電容變化值之關係可以使用數學中的迴旋積分來表示。



圖 17 單個三角形電極元件與長方形上部電極

## 2.4.2 迴旋積分

迴旋積分以圖 18 來呈現，其中  $f(x)$  為下部電極元件形狀，是一個幾何變化的函數，而  $g(x)$  則為上部電極， $\tau$  是一個變異函數，第三個圖是上部電極從  $-\infty$  到  $+\infty$  掃描時的乘積，第四個圖則顯示此迴旋積分的結果，關係如下式所示

$$f(n) * g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)g(x - \tau)d\tau \quad (2.13)$$

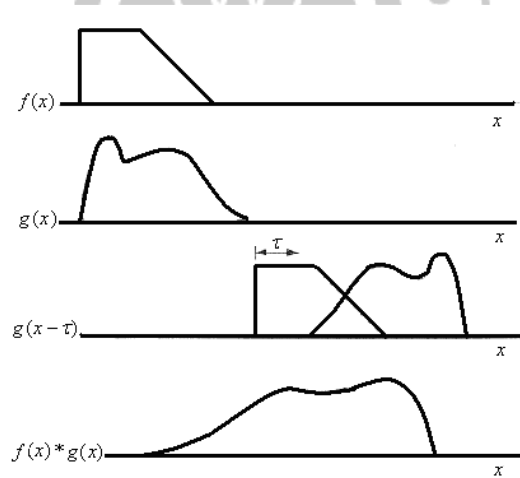


圖 18 迴旋積分[6]

而利用反迴旋積分(圖 19)，可以先定出上部三角形拾取電極的形狀  $g(x)$ ，以及想要得到的輸出結果  $c(t)$ ，就可求出下部表面電容元件形狀  $f(x)$ ，此結果可由 MATLAB 求出。

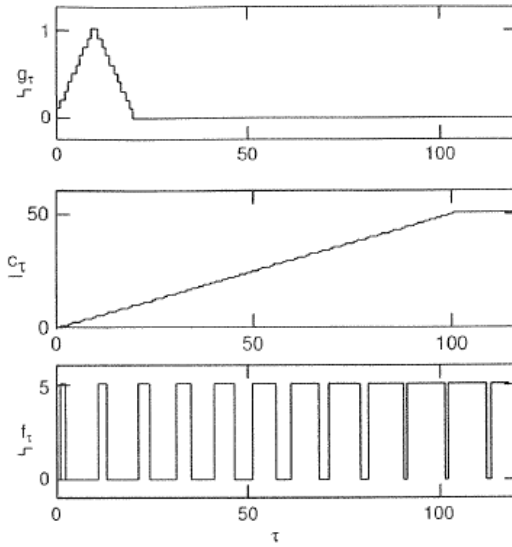


圖 19 上部為三角電極透過迴旋積分反求出下部電極元件[6]

而圖 17 之長方形上部電極與三角形下部電極之位置與電容變化值之結果，可使用迴旋積分來表示(圖 20)。

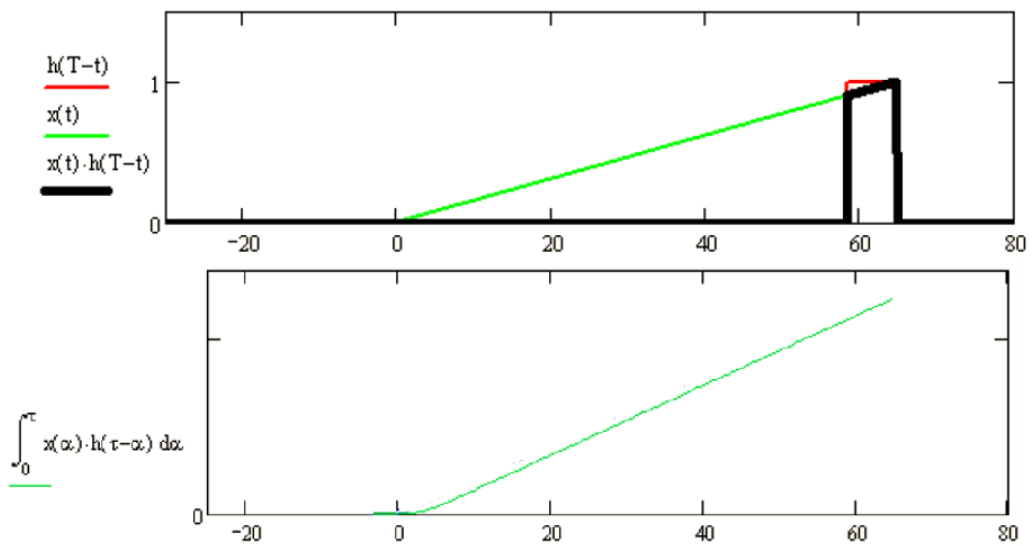


圖 20 乘積與迴旋積分之結果[9]

## 第三章 三維觸控感測器設計

### 3.1 三維半球表面電容式觸控佈局

#### 3.1.1 半球表面座標

在討論三維半球表面電容式觸控佈局之前，應先定義出半球表面的座標系。由球座標系為基礎， $(r, \theta, \varphi)$ 可以表示一個點 P 在三維空間位置的三維正交坐標系。

在球坐標系(圖 21)中，原點與點 P 之間的徑向距離為  $r$ 。原點到點 P 的連線與正  $z$ -軸之間的夾角為天頂角  $\theta$ 。而原點到點 P 的連線，在  $xy$ -平面的投影線，與正  $x$ -軸之間的夾角為方位角  $\varphi$ 。

方位角之範圍： $0 \leq \varphi < 2\pi$

天頂角之範圍： $0 \leq \theta \leq \pi$

徑向距離  $r \geq 0$

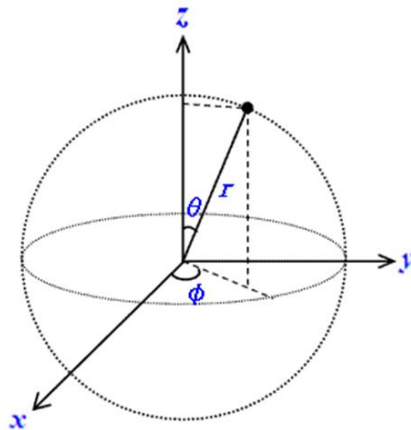


圖 21 球座標系

若為半球表面座標系，則  $r$  為一固定不變值，在定位半球表面之



觸控點座標時，只需考慮  $\varphi$  與  $\theta$  的大小。因為半球是立於  $x$ - $y$  平面上，即  $z \geq 0$ ，因此觸控座標天頂角之範圍為： $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ 。

將半球座標轉換為直角座標系，可得三維空間上球表面的  $(x, y, z)$  座標點，其轉換公式如下：

$$x = r \sin \theta \cos \varphi \quad (3.1)$$

$$y = r \sin \theta \sin \varphi \quad (3.2)$$

$$z = r \cos \theta \quad (3.3)$$

$$\text{條件: } \begin{cases} 0 \leq \varphi < 2\pi \\ 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ r \text{ 恆定} \end{cases}$$

對於三維半球表面上任一直角座標點，轉變為球座標系：

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3.4)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right) = \arccos\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right) \quad (3.5)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (3.6)$$

計算球表面座標時， $r$  恆為固定值，定位出  $(x, y, z)$  座標，經(3.4)、(3.5)、(3.6)式換算即可變換成球座標  $(r, \theta, \varphi)$ 。

### 3.1.2 類三角形電極樣式

由第二章中敘述之單導電層三角形電極陣列，做為可量測之觸控電容元件必須滿足以下條件：

1. 電極上覆蓋之介電層厚度為固定值。
2. 滿足條件 1，則上部電極(手指)於電極圖形上移動時，其覆蓋面積變化與量測電容大小成正比，並可將其關係畫成一具線性趨勢之曲線。

以單導電層觸控原理為基礎，將其概念帶入三維空間的球表面進行設計。首先，利用 CAD 軟體 PTC Creo2.0 做出一個半球模型，其直徑為 80mm。接著將一個等腰三角型投影在球表面上，用投影出的面積做成球表面類三角形銅箔電極如圖 22。

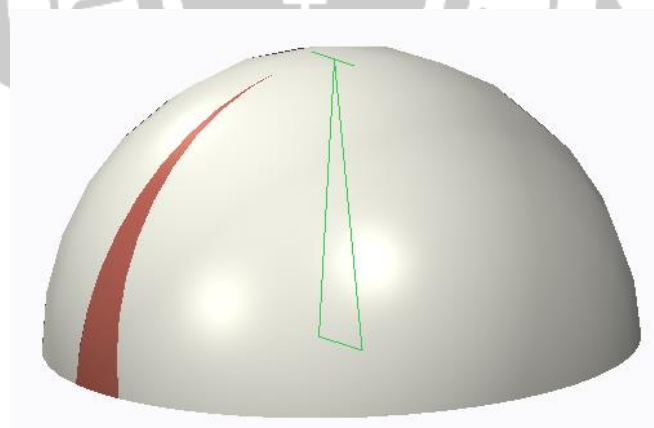


圖 22 球表面類三角形電極樣式

雖然單個類三角形元件的手指位置對面積覆蓋率之變化曲線呈現出優異之線性趨勢，符合前述條件。但在環繞半球體組成陣列的情況下(圖 23)，彼此間隔了很大的間隙區域。當手指觸碰半球，落在間隙區域時不會偵測到電容變化，即無法解析觸控位置。由於此項缺陷，

因此用三角形投影方式做出的球表面電極設計方法不可行。



圖 23 球表面類三角形陣列

### 3.1.3 U 型電極樣式

為了在球表面設計出彼此等間距、不會有空隙變化的電極陣列，故使用反向作法。先製作出直徑為 80mm 的銅箔半球，之後對其進行等間距切割，並去除掉間隙部分，留下來的區塊即為銅箔電極陣列(圖 24)。在此處設計的半球表面模型被分割成 18 個相等的電極，每個電極中心線角度差為  $20^\circ$ 。因為其形狀具有很大的弧度，與 3.1.2 所設計之球表面類三角形電極有很大區別，故將其命名為球表面 U 型電極。



圖 24 球表面 U 型電極陣列

然而在討論此 U 型電極樣式是否適合作為半球表面的電容式觸控時，必須考慮單個電極元件在被手指覆蓋時，其手指覆蓋位置與覆蓋面積的關係。由圖 24 之 U 型電極陣列中單獨分析一個電極，製作成簡易的手指覆蓋模型(圖 25)，在此模型中，U 型電極的底部長為 11mm，其電極頂端之天頂角為  $12.3192^\circ$ ，底部天頂角為  $90^\circ$ ，而手指覆蓋形狀設為一個直徑 11mm 的圓。

當手指模型於 U 型電極中心線移動時，方位角  $\varphi$  固定，其手指觸碰中心點之天頂角  $\theta$  大小將影響覆蓋面積大小。在此處設定手指沿中心線從電極底部移動至頂端，即手指中心點從天頂角  $90^\circ$  移動至  $12.3192^\circ$ ，其覆蓋面積變化曲線如圖 26。從此曲線可以看出，手指位置與覆蓋面積的趨勢呈現正相關，後半部曲線下落，是因為天頂角  $\theta$  超過  $82.1233^\circ$  以後，手指模型超過了球表面 U 型電極底部範圍。

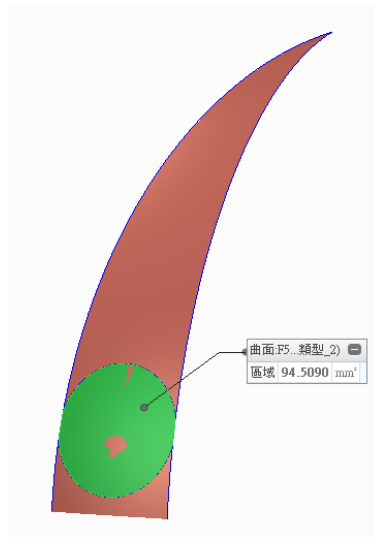


圖 25 手指覆蓋於球表面 U 型電極之模型

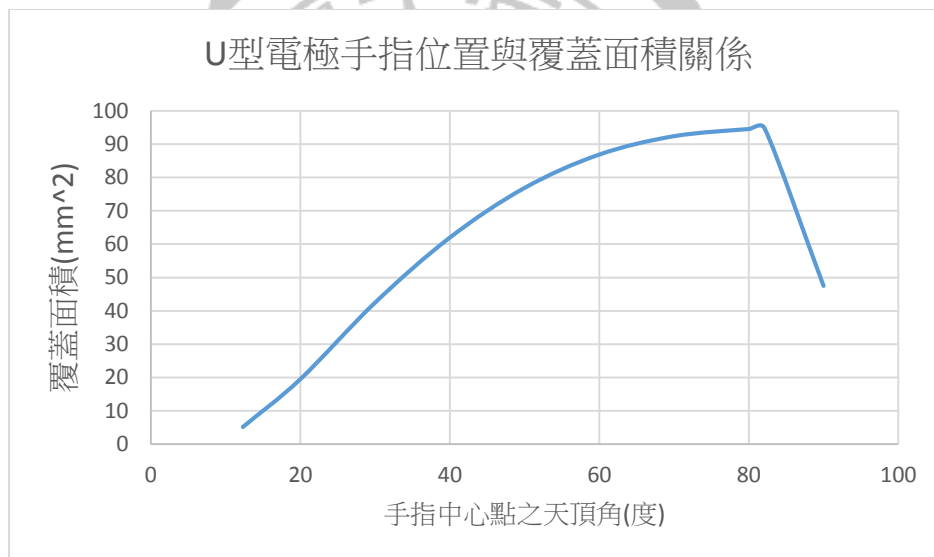


圖 26 U 型電極手指觸摸位置與覆蓋面積關係

由於覆蓋面積大小關係著手指觸控時，量測到之電容值大小，而球表面 U 型電極與手指覆蓋中心點的天頂角 $\theta$ 呈現正向趨勢關係，因此可以推論手指位置之天頂角 $\theta$ 與觸控發生時的電容量測值大小呈正相關性，在第四章會對於此關係做實際測試，驗證此推論。

## 3.2 觸控座標計算

由 3.1.1 節中之半球表面座標推算中，可以知道分析手指觸控位置必須得出一組球座標 $(r, \theta, \varphi)$ ，如有需要亦可將其轉換為直角坐標系的 $(x, y, z)$ 。在此章節將說明 3.1.3 章節提出的半球表面 U 型電極陣列其天頂角 $\theta$ 與方位角 $\varphi$ 的求法。

### 3.2.1 方位角

在一個觸控半球模型(圖 27)中，其表面鋪設 N 個 U 型電極，每個電極被一曲線分為對稱的兩半，此曲線稱為中心線。每個電極中心線間隔之角度為 $\frac{360^\circ}{N}$ ，中心線上任一點座標的方位角相同，若以第一個電極的中心線作為初始方位角 $0^\circ$ ，則第 i 個電極之中心方位角 $\varphi_i$ 為 $\frac{360^\circ(i-1)}{N}$ 。因此在觸控半球上進行手指觸碰感測時，電極陣列中量測出最高電容變化的第 i 個電極，視為手指觸碰覆蓋的主電極，即找出觸控座標方位角： $\varphi = \frac{360^\circ(i-1)}{N}$ 。

然而，上述之方法量測出的方位角不夠精細，僅能找出手指觸碰點大致的方位角。而修正的方法則是，將 N 個電極量測到的電容變化全部列入考慮，以質心的概念來計算出方位角：

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^N C_{F,i} \times \left[ \frac{360^\circ(i-1)}{N} \right]}{\sum_{i=1}^N C_{F,i}} \quad (3.7)$$

$C_{F,i}$ : 第 i 個電極量測到的手指電容

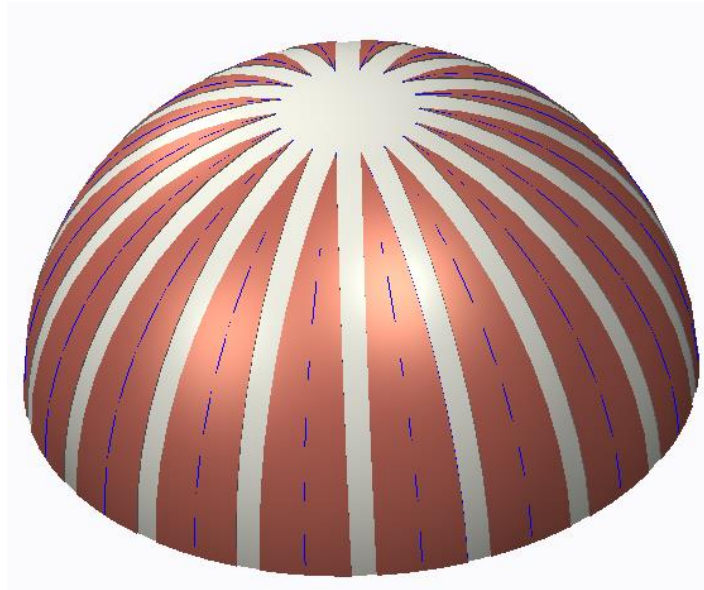


圖 27 觸控半球模型

### 3.2.2 天頂角

觸控點座標之天頂角 $\theta$ 計算與方位角 $\varphi$ 有關，在以(3.7)式計算出方位角 $\varphi$ 之值後，即清楚觸碰點位於第 $i$ 個電極上，對應第 $i$ 個電極的 $\theta-C_F$ 關係曲線，則可計算出天頂角 $\theta$ 。然而 $\theta-C_F$ 曲線是觸控點恰位於電極中心線上時的理想曲線，因此必須給予修正，首先計算偏離中心線之角度。

偏離中心線之角度： $\varphi_D = \varphi - \varphi_i$

$\varphi_i$ :已知觸碰於第 $i$ 個電極的中心線角度

以此角度做偏離補償再帶入 $\theta-C_F$ 關係曲線，即可求出較精準的天頂角 $\theta$ 值。

### 3.3 電容計數量測

#### 3.3.1 量測平台

本研究使用 Cypress 的 PSoC 架構來建立量測平台，其優點在於以下三點：

1. 快速的設計流程。
2. 彈性的設計，可隨時進行參數調整。
3. 精確的電容量測。

使用的電路板為 CY3280-20x66，規格如下：

- 具備 36 個 CapSense
- 運作時自動環境補償
- 檢測觸摸最低可至 0.1pF
- 抗噪性:500mV 的雜訊
- 掃描頻率 125ms 情況下，每個傳感器 28uA 的電流
- M8C 處理器:運行速度 4MIPS，24MHz 的 clock
- 32KB 暫存器與 2KB 的 RAM
- 內部振盪器(IMO):6/12/24MHz  $\pm$  5%
- 全速 USB - 符合 12 Mbps 的 USB2.0 標準
- I2C - 主控 (100KHz) 和器件 (最高 400KHz)
- 工作電壓:1.71 ~ 5.5V



■ 溫度範圍:-40°C~85°C

PSoC 的觸碰感測技術是藉由測量控制器上的每一個 I/O 接腳的電容來運作。圖 28 顯示，每一個傳感器接腳上的總電容都可以視為等效集成電容，而  $n$  個傳感器可以量測  $C_{X1} \sim C_{Xn}$ 。電路板中的 CY8C20xx6A/AS/H，將量測出的  $C_X$  的都轉換成數據，並存儲起來以供後端運算處理使用。當手指接觸於觸控感測板上時，其  $C_X$  會因為手指與感測器板產生耦合電容而上升(圖 29)，這個上升的手指電容大小即為  $C_F$ 。

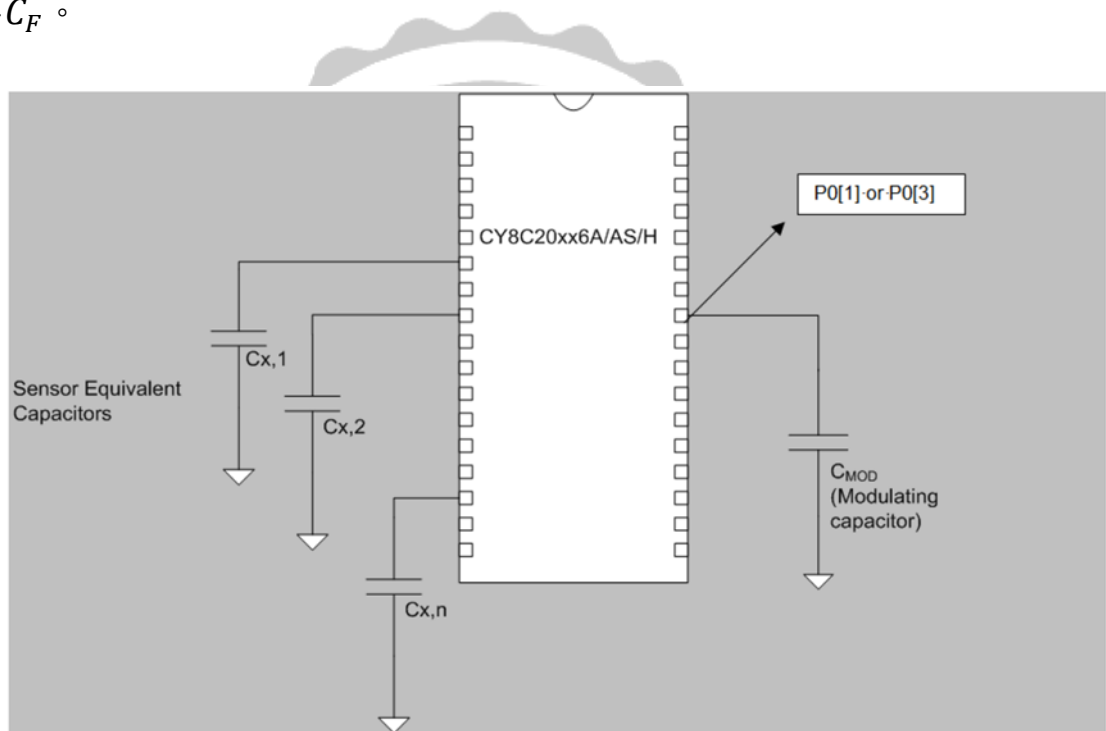


圖 28 CYPRESS 之電容感測示意圖[4]

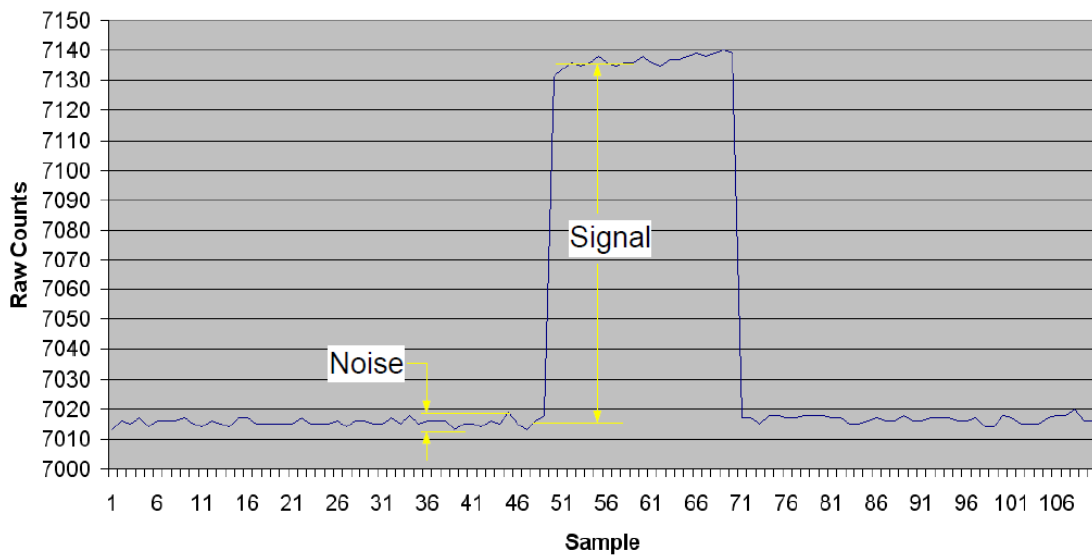


圖 29 手指觸摸之 $C_X$ 計數改變示意圖[4]

### 3.3.2 CapSense Sigma-Delta 量測方法

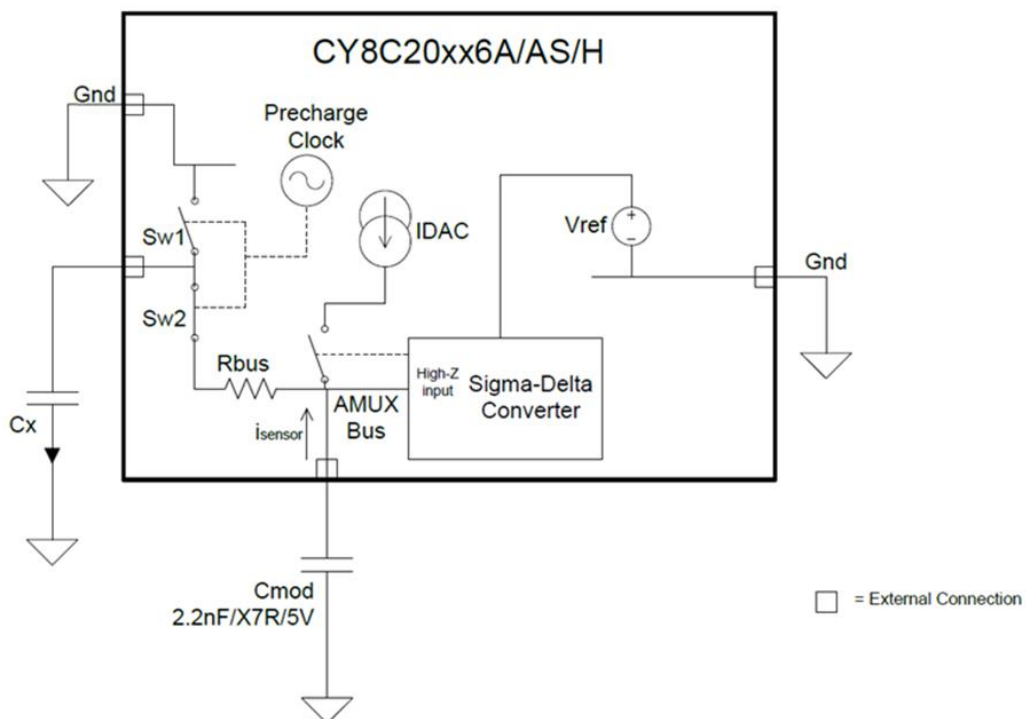


圖 30 CSD 觸控電路框架圖[4]

CapSense Sigma-Delta (CSD) 方法[4][10]是將感測電容 $C_X$ 併入一個開

關電容電路中。而感測器( $C_X$ ) 分別通過由預充電時鐘來驅動的兩個開關:Sw1 和 Sw2 , 連接至模擬復用器(AMUX) 。由 AMUX 總線路分走電流 $i_{\text{sensor}}$  ,  $i_{\text{sensor}}$ 的數量級與 $C_X$ 的大小成正比。由 Sigma-Delta 轉換器對 AMUX 總線路的電壓進行採樣, 產生出調製位流, 控制 AMUX 充電的恆電流源( $I_{DAC}$ ), 使 AMUX 總線路的平均電壓維持在  $V_{ref}$ 。感測器從調製電容( $C_{mod}$ ) 流出電荷 $i_{\text{sensor}}$ 。  $C_{mod}$  與 Rbus 形成一個低通濾波器。

保持 AMUX 平均電壓為穩定值( $V_{ref}$ ) 時, Sigma-Delta 轉換器保持平均的充電電流( $I_{DAC}$ ) 與 $i_{\text{sensor}}$  相互匹配。Sigma-Delta 轉換器在感測器掃描週期中存儲位流, 累計結果即為數位輸出, 此輸出稱為初始計數, 與 $C_X$ 大小成正比。手指觸摸然後釋放傳感器的過程中, 會得到連續掃描結果, 並可繪製出 CSD 原始計數。而手指觸摸感測器會導致 $C_X$  上升(圖 31), 增加的手指電容即為 $C_F$ 。

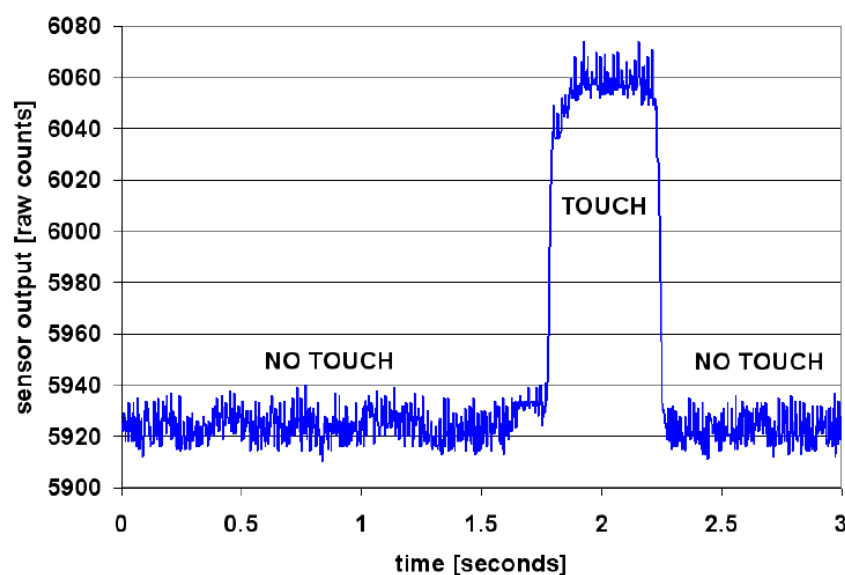


圖 31 觸碰與非觸碰時的電容初始計數變化[4]

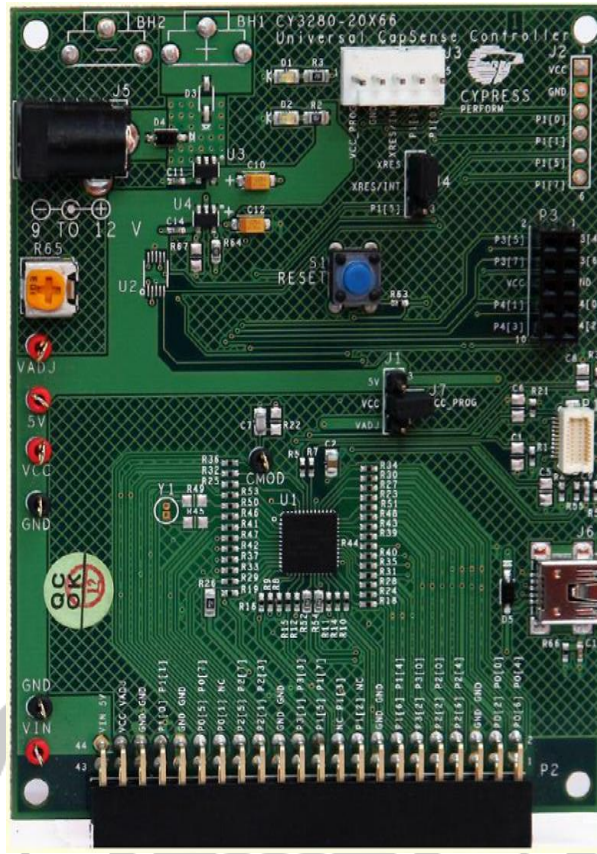


圖 32 CY3280 感測器電路板[10][10]

## 第四章 量測與分析

本章節將從單個表面電容元件之特性開始量測，從平面延伸至半球表面，逐一剖析各種形狀之電極元件對電容數值量測的影響，分析出最理想的電極元件形狀。最後將理想的電極形狀於球表面組成陣列進行量測，量測得到的電容計數數值套入本論文 3.2 章節所提出的半球表面觸控位置解析演算法計算位置座標，並驗證其結果。

### 4.1 三角形電極元件量測

對於單導電層觸控板的電極元件之測試，其重點在於，當上部電極(手指)在元件上沿 Y 軸方向移動時，覆蓋面積產生改變，所量測到的電容計數數值是否有相對應之幾何變化，以及此變化關係，做為位置檢測之依據，是否有足夠的辨識度。

在此實驗中，首先使用 LCR meter 來對平面觸控板的電極元件進行簡單的測試，其規格如下。

表格 2 LCR 測試儀器規格

GW/LCR-815B/LCR 測試儀	
頻率測試範圍	120Hz, 1kHz
信號電平的測試:	1V, 50mV (Cp mode only)

阻抗測試範圍-R	1mΩ ~ 19.00MΩ
電容測試範圍-C	0.1pF ~ 19.00mF
電感測試範圍-L	0.1 μ H ~ 1900H
介質損耗角測試範圍-D	0.001 ~ 1.900
基本精確度	0.2% - 0.3%

#### 4.1.1 平面之三角形電極

在一個簡易的手指觸碰電極的等效平行板電容實驗中，測試兩種形狀的電極。第一種是直角三角形，因為可以上下顛倒互補，等間距排列成陣列時可以填滿矩形範圍，因此這種電極形狀被廣泛的應用於平面的單導電層觸控板中。第二種是等腰三角形，此種形狀無法直接填滿矩形範圍，因此在平面觸控板設計中較少被使用，然而這種形狀具備對稱性，較接近三維觸控半球上電極元件的設計概念。

首先以一個長方形的銅箔電極作為上部電極(代替手指)，其長 20mm，寬 10mm，而下部電極為一個長 60mm、寬 10mm 的直角三角形銅箔電極(圖 33 左)，銅箔厚度皆為 25um。使用厚度為 80um 的 PET 膜片作為中間的介電質，PET 之介電係數為 3.1，其剖面結構如圖 34。

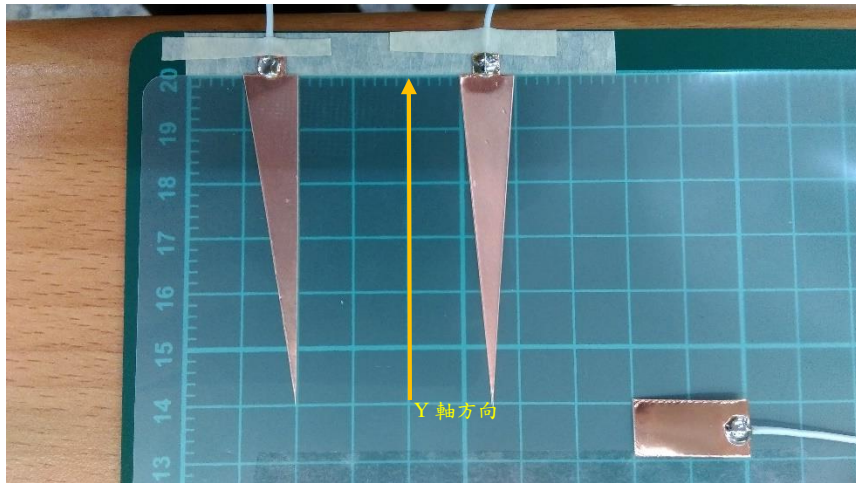


圖 33 平面單導電層三角形電極測試



圖 34 上下夾層剖面結構圖

在上部長方形電極與下部直角三角形電極各連接一條引線，以 GW/LCR-815B/LCR 測試儀量測其電容值。將上部電極放置於下部電極上，從尖端沿 Y 軸方向移動，紀錄其電容量測值，並將其變化關係繪製成曲線(圖 35 藍)。

改變下部電極，置換成一長 60mm、寬 10mm 的等腰三角形電極(圖 33 右)，其上部長方形電極與介電層 PET 不變。將上部電極沿 Y 軸方向移動，紀錄其電容量測值，並將其變化關係繪製成曲線(圖 35 橘)。

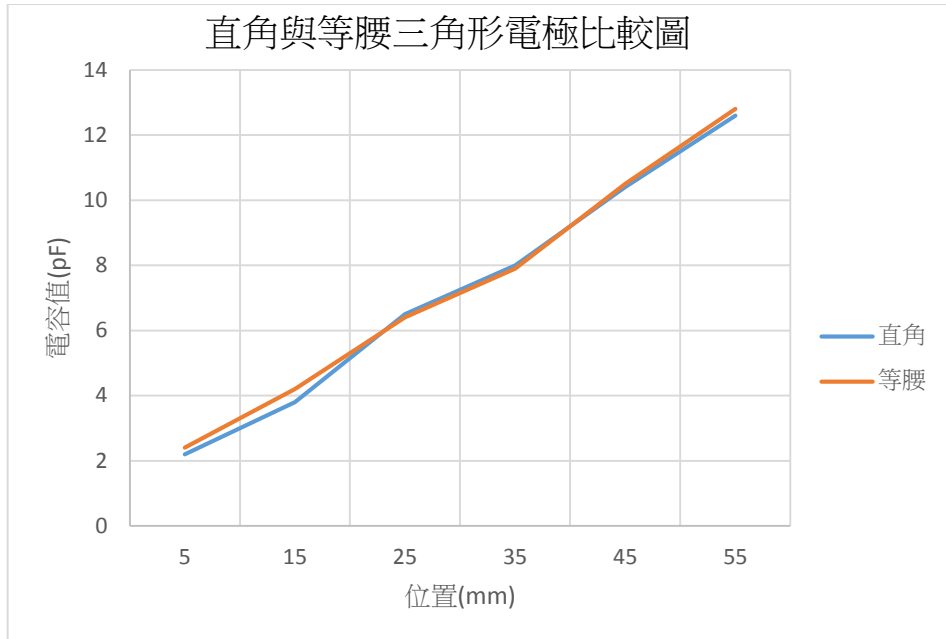


圖 35 直角與等腰三角形電極位置與量測電容值關係圖

從圖 35 可以觀察出，當上部電極由下往上移動時，覆蓋面積逐漸變大，因此電容量測值基本呈現性趨勢上升。由於兩種形狀的電極其位置移動與面積覆蓋率的變化相等，因此兩種形狀的電極量測結果非常接近。此實驗說明了，不同形狀的電極，若覆蓋位置移動時的單位面積變化率相等，則會有相同的電容變化率。其誤差主要在於 PET 薄膜與銅箔僅壓合住，並沒有黏合，因此實測時，等效電容的厚度無法確保是固定不變的，可能在實驗中會有空隙夾雜空氣。



#### 4.1.2 平面貼合之等腰三角形電極



圖 36 貼合之等腰三角形電極

由於 4.1.1 節中發現到不準確的原因，因此進行修正來改善此情況，以貼合膠將 PET 薄膜與下部電極黏合起來，再次進行等腰三角形電極的量測(圖 36)。使用的貼合膠為 3M 的 8004P 貼合膠，其厚度為 39 $\mu\text{m}$ ，結構是上下兩層壓克力膠，中間為 PET 薄膜，貼合後等效平行板電容的剖面如圖 37。

將上部電極沿 Y 軸方向移動，紀錄其電容量測值，將其變化關係繪製成曲線(圖 38 藍)，並與壓合之等腰三角型電極(圖 38 橘)進行比較。

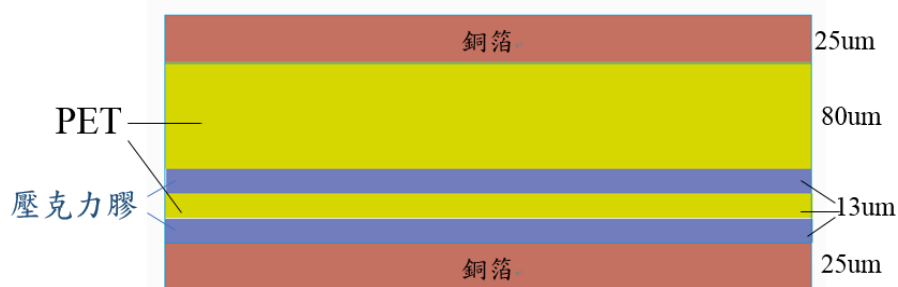


圖 37 貼合後之結構剖面圖

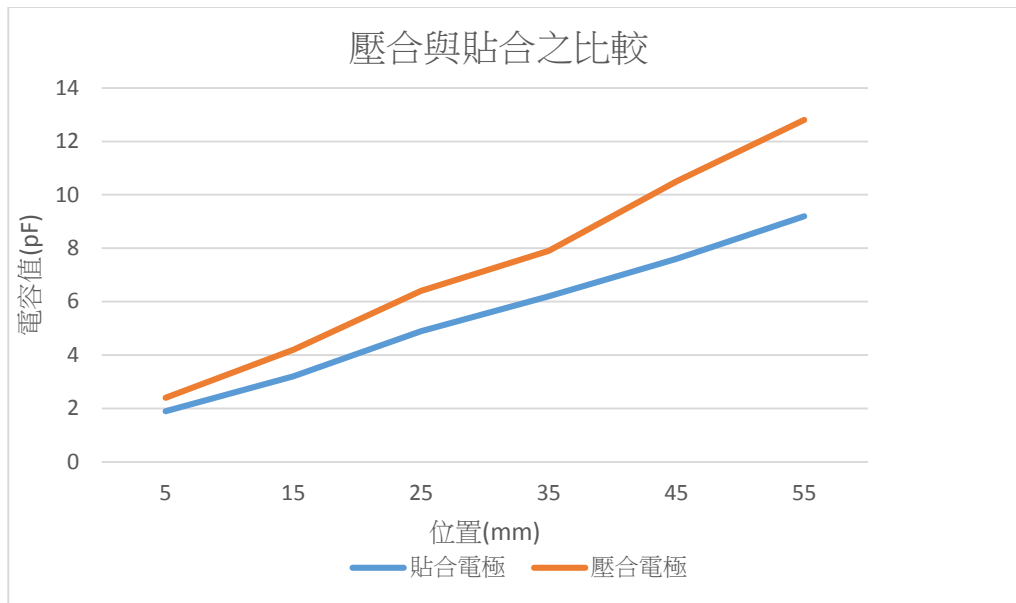


圖 38 單導電層電極貼合與壓合之比較

由於加入貼合膠的緣故，因此相同覆蓋面積情況下，貼合的電容量測值會比壓合時小。然而，其上部電極覆蓋位置與電容值的關係曲線更加穩定，呈現更漂亮的線性關係，顯示有貼合佳的狀況下，其量測更為準確。因此，之後的實驗都是以介電層貼合於下部電極元件的方式來進行。

#### 4.1.3 CSD 量測等腰三角形電極

在手指未觸碰時，電容計數量測值 $C_x$ 等於電路內部的寄生電容 $C_p$ ，當手指觸碰時，產生手指觸碰電容 $C_F$ ，此時的電容計數量測值 $C_x=C_p + C_F$ ，因此真正的手指引發之電容 $C_F=C_x-C_p$ ，即量測電容差值。

以真實手指進行碰觸，並以 3.3.2 章節所架構之 CSD 量測法觀察手指觸碰位置沿 Y 軸變化時，其對應的電容計數差值 $C_F$ 大小繪製一關係曲線(圖 40 橘)。

使用 PTC Creo 軟體模擬直徑 10mm 的圓形手指觸碰貼合的等腰三角形電極元件，沿 Y 軸位置變化時對應之覆蓋面積變化(圖 39)，並將其模擬結果畫成曲線加入圖 40 做比較

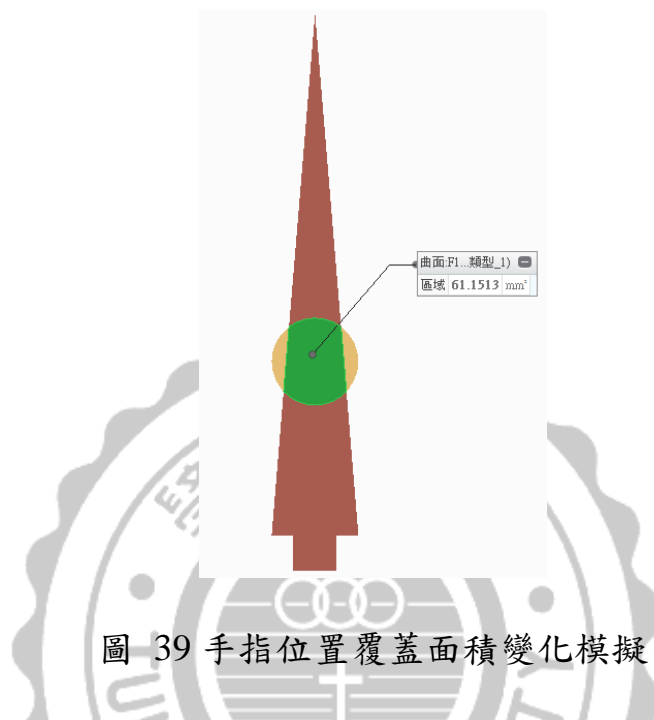


圖 39 手指位置覆蓋面積變化模擬

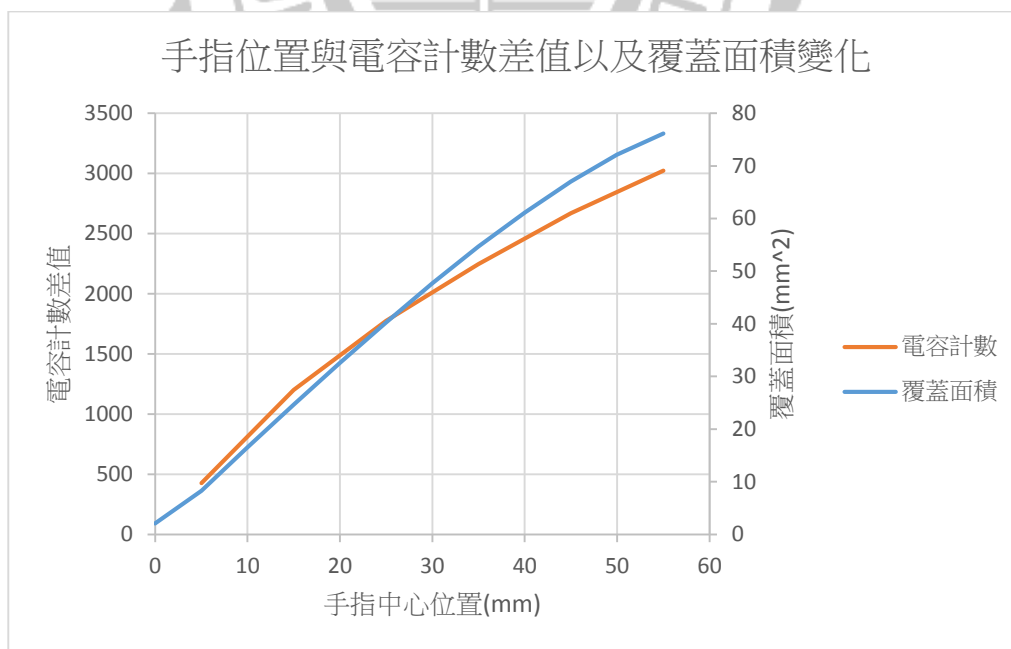


圖 40 CSD 量測之手指位置與電容計數差值以及覆蓋面積變化關係

量測結果證實，手指觸碰面積的改變，其 $C_F$ 大小亦更隨其變化，而三角形的設計又會使手指位於不同 Y 軸位置時，接觸面積成趨勢變化，因此可以反過來由 $C_F$ 的大小推算出手指此時的觸控 Y 軸座標位置。

在真實觸控環境下，比起靜態的碰觸後手指不動，更多情況下是手指於觸控板上滑動。在此處進行手指以等速率沿 Y 軸滑動的測試，在 4 秒內從三角形電極的底部滑至頂端，其結果顯示於 Cypress 的即時數據採集器上(圖 41)。可以看出於單位時間下，手指移動位置有產生對應的電容大小變化，手指離開則恢復為初始寄生電容。

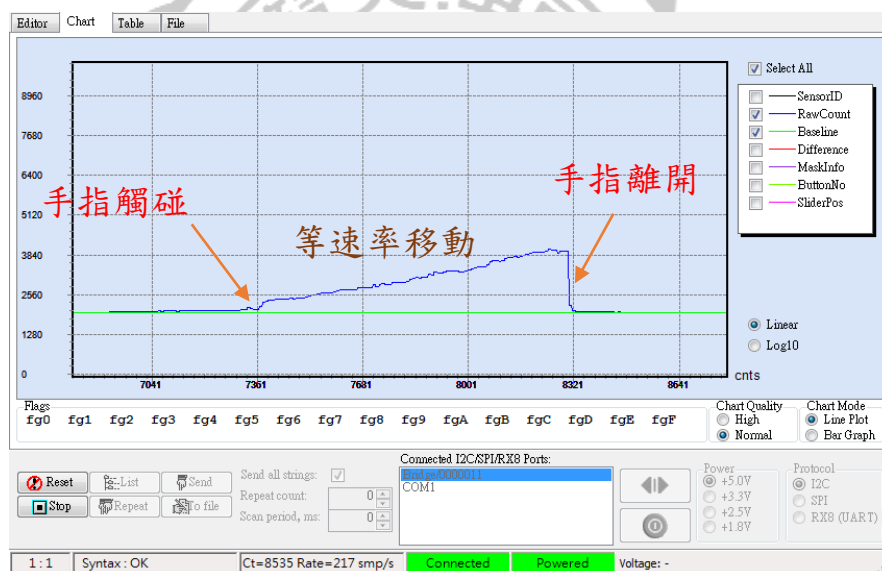


圖 41 及時量測手指移動位置對應之電容計數

## 4.2 半球表面類三角形電極

由 4.1 的等腰三角形電極為基礎概念，於直徑 80mm 的半球表面上鋪設一類三角形的銅箔電極，其底邊長 11mm，並在其上覆蓋 PET 材質的薄膜介電層(圖 42)，焊接導線連接於 CY3280 電路板，以 CSD

量測法進行手指觸控實驗。在半球表面的電極元件上，手指沿著電極中心線，即每個觸控點座標方位角 $\varphi$ 皆為相等情況下，由底部到頂端的天頂角 $\theta$ 變化與量測的手指電容計數之差值 $C_F$ 的關係，其觸控點天頂角度範圍為： $20^\circ \sim 82^\circ$ ，將其關係繪製成曲線(圖 43)。

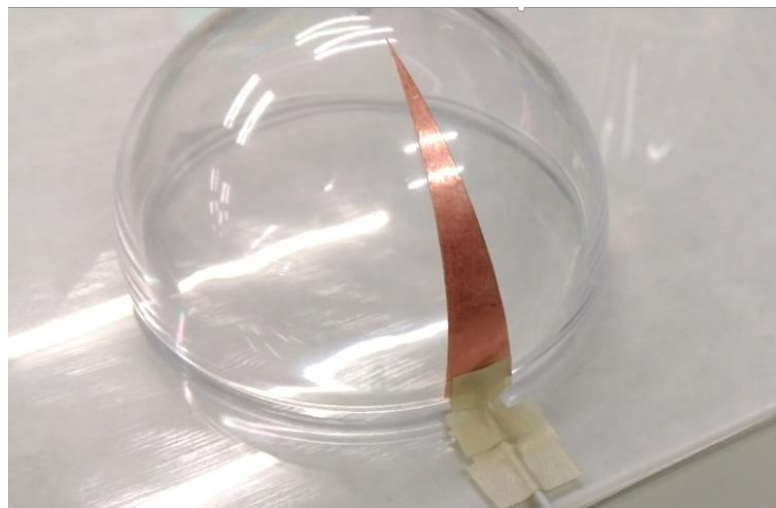


圖 42 實作球表面類三角形電極元件

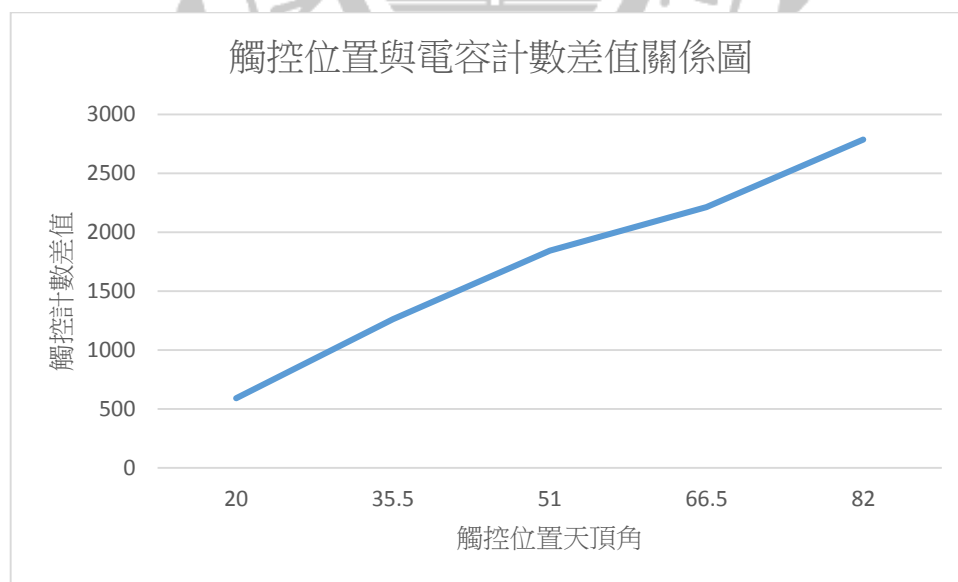


圖 43 手指位置天頂角 $\theta$ 與電容計數差值 $C_F$ 關係圖

其量測結果顯示，在半球表面的類三角形電極元件會有與平面時相似的特性，手指觸控點不同導致覆蓋面積變化，影響了 $C_F$ 的大小，且呈現一正向成長的趨勢。

然而也發現，在觸碰點超過中間( $\theta = 51^\circ$ )以後，其 $C_F$ 的變化趨勢有點減緩，其原因可能是手指在後半部電極面積較大的區塊無法完整覆蓋住面積所致。因為球體並非平坦面，在有弧度的情況下，其接觸面積邊緣處會有些許空隙產生，使量測到的 $C_F$ 比預期稍小。

在此也進行一次等速率的手指移動的 $C_F$ 量測，首先必須將半球固定住，以防止手指移動過程中，半球受力產生些許位移。由於球表面觸控下，手指較容易滑開，因此以較慢的速度，在五秒內沿著電極中心線移動天頂角範圍  $20^\circ \sim 82^\circ$ ，其結果顯示於 Cypress 的即時數據採集器上(圖 41)。可以看出於單位時間下，手指移動位置有產生對應的電容大小變化，手指離開則恢復為初始電容。

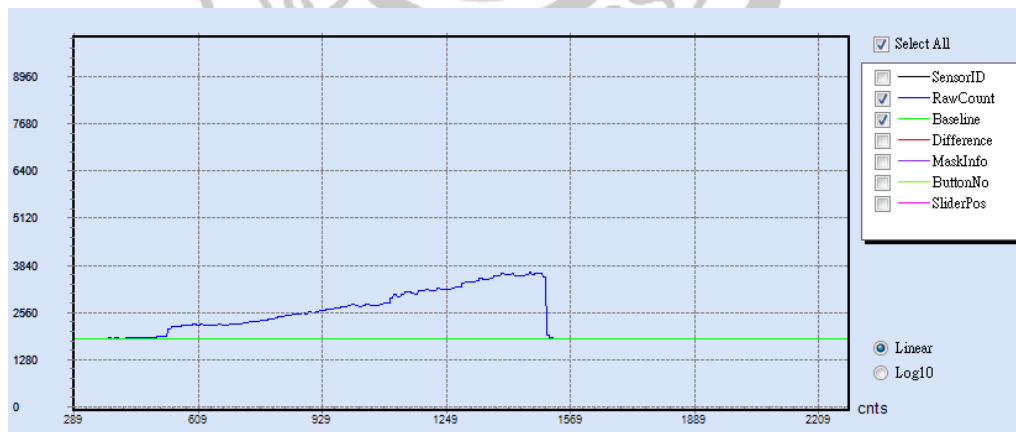


圖 44 及時量測球表面類三角形電極上手指移動與 $C_F$ 關係

半球表面的類三角形電極樣式可以滿足以 $C_F$ 之大小計算天頂角 $\theta$ 的需求，優異的線性趨勢可以有很好的鑑別度，但是因為其製作成球

表面的陣列時有著過大的間隙，導致其實用性不高，故以此為基礎，設計出形狀能填滿半球表面的 U 型電極樣式。

### 4.3 半球表面 U 型電極

在 3.1.3 章節中討論到此種電極樣式能完整覆蓋半球表面，且彼此保持等間隔。在直徑 80mm 半球表面鋪設 U 型銅箔電極，並覆蓋一層 PET 薄膜(圖 45)。於電極底部焊接導線連接於 CY3280 電路板，以 CSD 方法進行量測，讓手指於電極的中心線上移動，記錄從底部天頂角 $\theta = 82.1233^\circ$ 移動到頂端天頂角 $\theta = 20^\circ$ 時的 $C_F$ ，將其關係繪製成曲線(圖 46 橘)，並與 3.1.3 節中所模擬的手指觸摸天頂角 $\theta$ 與覆蓋面積關係做比較。

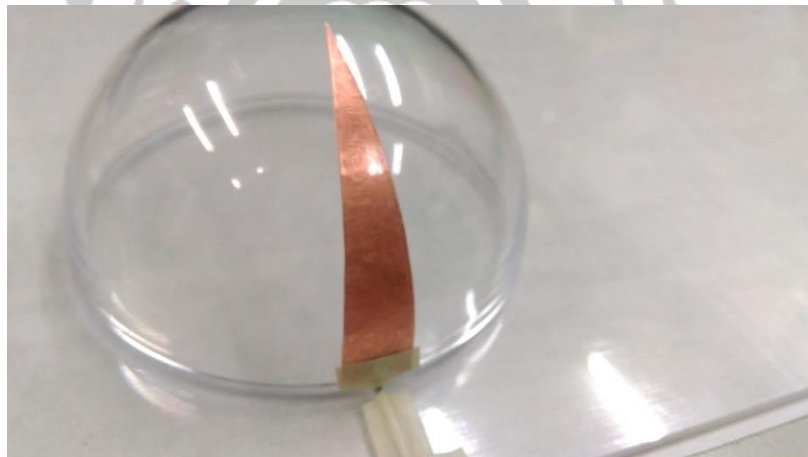


圖 45 球表面 U 型電極元件

手指覆蓋面積與電容計數差值趨勢

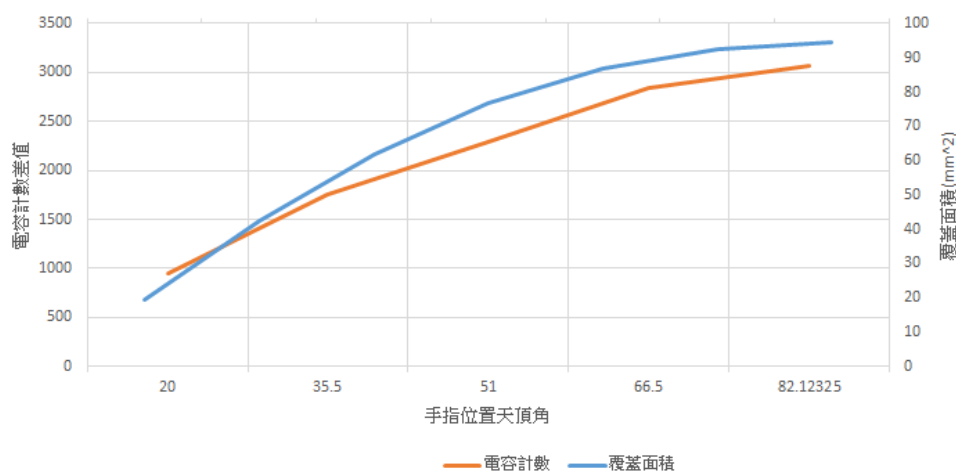


圖 46 U 型電極上手指位置和電容計數差值  $C_F$  關係

可以觀察出手指於半球表面 U 型電極上移動時，其面積覆蓋變化率與電容計數差值  $C_F$  呈現相同的成長趨勢，因此手指觸控點天頂角  $\theta$  可以從量測到的  $C_F$  反推得知，符合 3.1.3 節中的推論。

#### 4.4 半球表面電極陣列

4.3 章節中討論的結果是當手指在半球表面 U 型電極中心線上 (即  $\varphi = \varphi_i$ ) 時， $C_F$ - $\theta$  的變化關係。然而在真實觸控時，手指觸控點並不一定在 U 型電極中心線上，因此必須考慮  $\varphi \neq \varphi_i$  的情況，才能精確計算出真正的手指觸控點天頂角  $\theta$ 。

在一個被分割成 18 個 U 型電極的觸控半球中，每個電極的中心線相差  $20^\circ$ ，則其中第  $i$  個電極的觸控量測手指範圍為  $\varphi_i \pm 10^\circ$ ，超過此範圍則表示較偏向鄰近電極，不應以此電極的電容量測作為天頂角  $\theta$  之判斷。



討論 18 個電極中被觸控的第  $i$  個電極，並已計算出其方位角  $\varphi$ ，而其電極的中心線方位角為  $\varphi_i$ ，則可以計算出觸控點偏離中心線方位角度：

$$\varphi_D = \varphi - \varphi_i, (\varphi_D \leq 10) \quad (4.1)$$

可以知道，當  $\varphi_D$  越大時，表示觸控點越偏離此 U 型電極的中心線，量測到的  $C_F$  也會越小。為了更加深入的了解其關係，在 U 型電極上讓手指分別沿著五個方位角曲線移動進行實驗(圖 47)，量測從底部天頂角  $\theta = 82.1233^\circ$  移動到頂端天頂角  $= 20^\circ$  時的  $C_F$  變化，並將結果繪製成曲線(圖 48)。

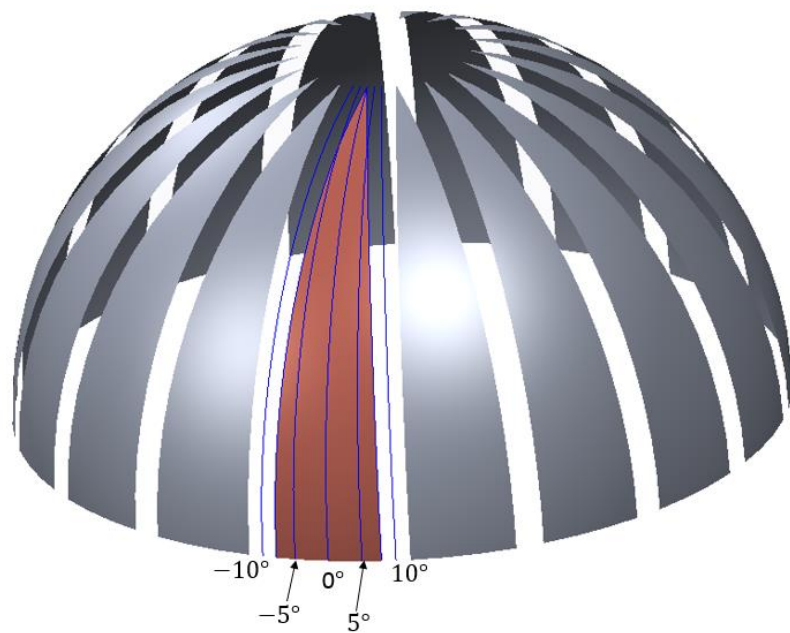


圖 47 手指沿五條  $\varphi$  曲線移動測試示意圖

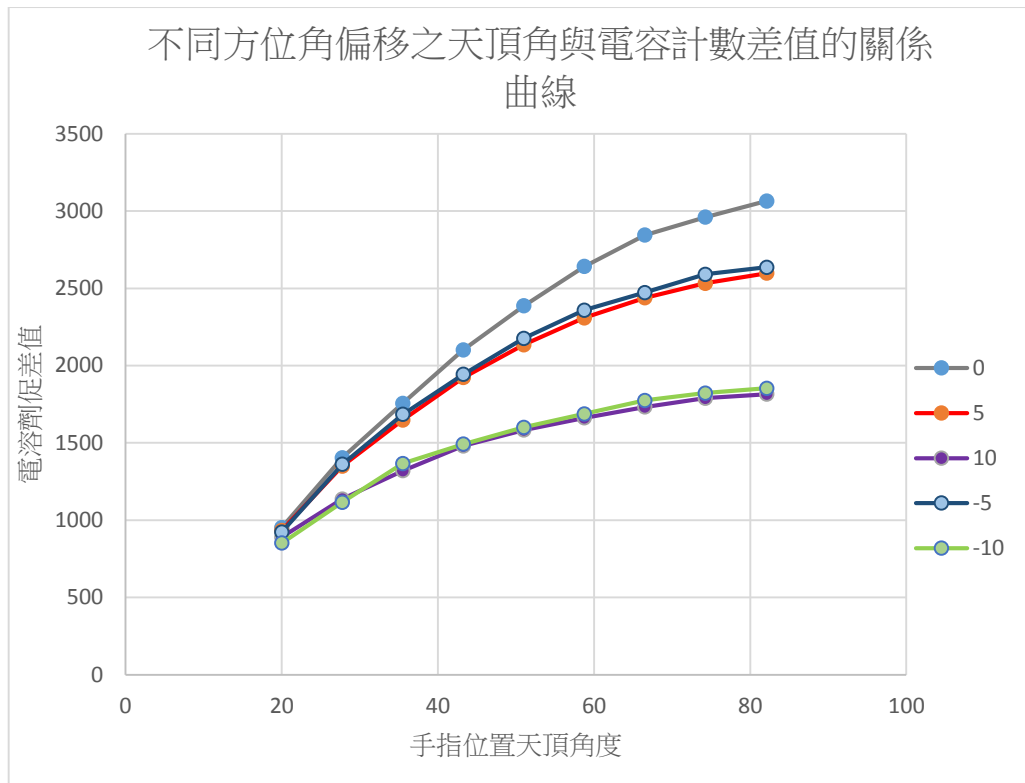


圖 48 不同方位角偏移之 $\theta$ - $C_F$ 曲線

可以發現當偏離中心線的方位角 $\varphi_D$ 越大時，天頂角 $\theta$ 對應的 $C_F$ 趨勢確實相對變小，而其 $\theta$ - $C_F$ 曲線關係仍然可作為天頂角的 $\theta$ 之判斷。最後將此關係進行內插運算，製作出一完整的三維曲面關係圖(圖 49)來呈現偏移方位角 $\varphi_D$ 、天頂角 $\theta$ 以及 $C_F$ 三者的關係。

此三維關係曲面即是半球表面 U 型電極上手指觸控點天頂角 $\theta$ 的判斷依據，當手指觸控時，只要計算出觸控點的方位角 $\varphi$ ，即可知曉偏移方位角 $\varphi_D$ ，再帶入量測到的 $C_F$ 即可計算出手指觸控點的天頂角 $\theta$ 。

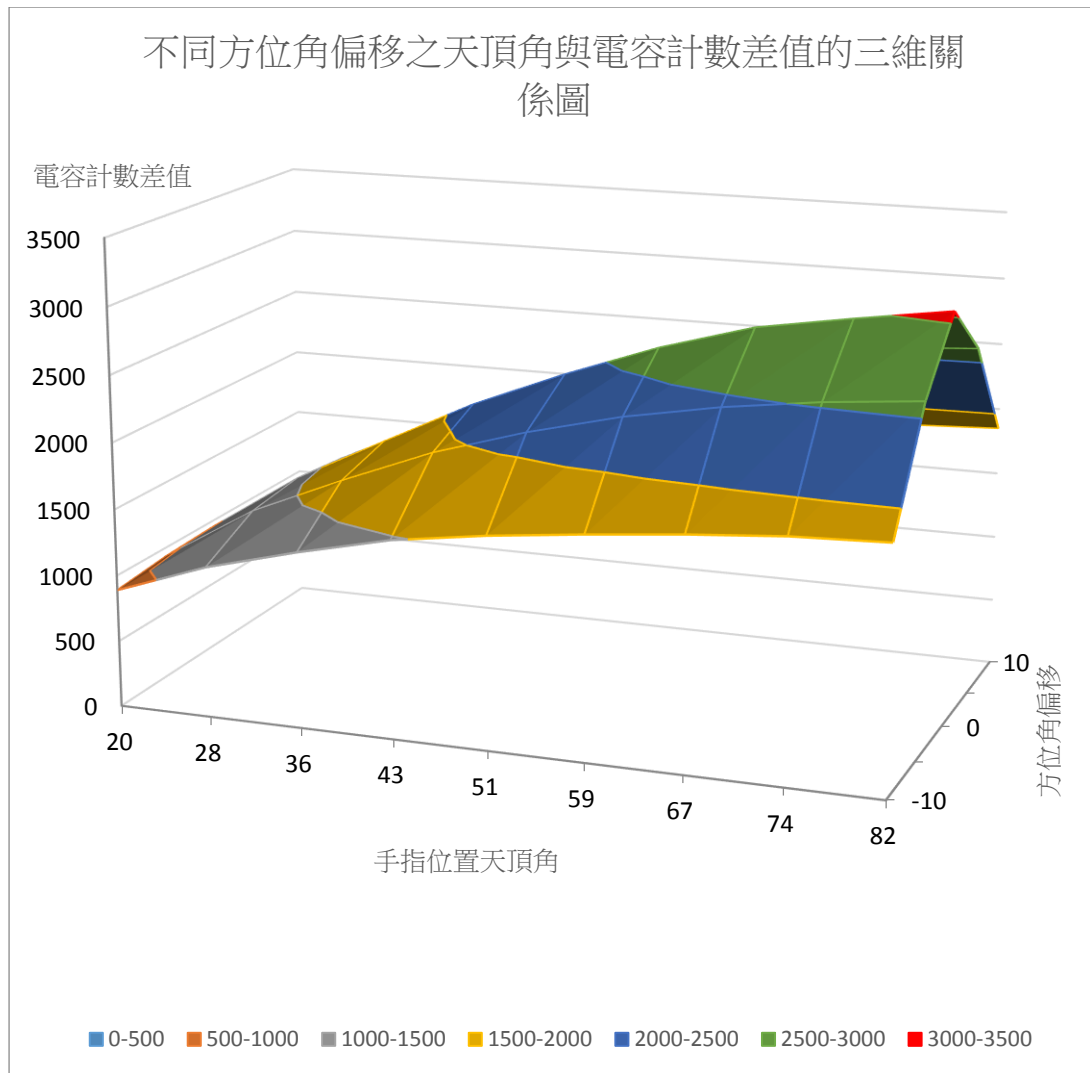


圖 49 不同方位角偏移之天頂角與電容計數差值的三維關係圖

最後則是驗證多個電極排列時的量測情況，在半球表面製作三個 U 型電極(圖 50)，中心線間隔  $20^\circ$  排成陣列，每個 U 形電極之底部弧長為 11mm，弧長橫跨角度為  $15.753^\circ$ ，電極頂端天頂角  $12.3192^\circ$ ，底部天頂角  $90^\circ$ ，並覆蓋一層介電層 PET 薄膜。

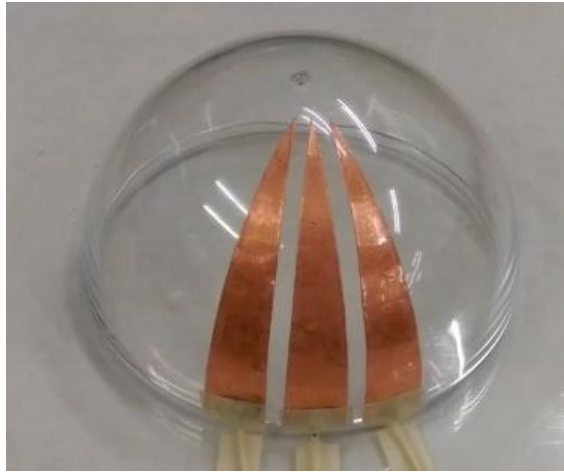


圖 50 半球表面三個 U 型電極陣列

在此陣列中，定義左邊第一個 U 型電極的中心線之方位角為初始方位角  $\varphi_1$ ， $\varphi_1 = 0^\circ$ 。第二個 U 型電極中心線之方位角為  $\varphi_2$ ， $\varphi_2 = 20^\circ$ ，第三個 U 型電極中心線之方位角為  $\varphi_3$ ， $\varphi_3 = 40^\circ$ 。分別在底部焊接導線連接至 CY3280 開發板，以 CSD 方法進行量測。在測試中，手指從第一個 U 型電極邊緣沿天頂角  $30^\circ$  滑動至第三個 U 型電極邊緣，觀察方位角改變時，三個 U 型電極各自的  $C_F$  變化(圖 51)。

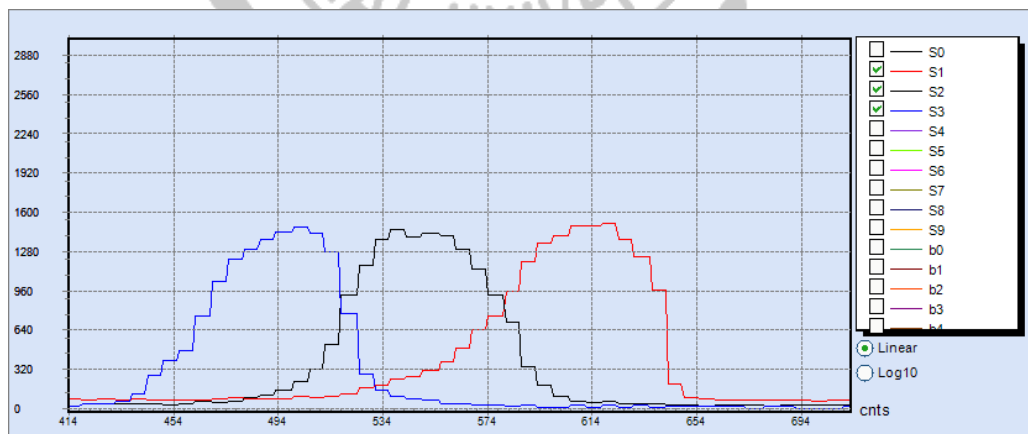


圖 51 手指沿天頂角  $30^\circ$  滑動之  $C_F$  變化

量測的三條數據線皆有一個突起的峰值，是手指移動時經過電極中心線時，量到之最大 $C_F$ 值，由於三個電極形狀相同，故量測到最大 $C_F$ 一大致相等。當手指來到第二個電極的中心線時(第二個峰值)，與左右相鄰電極距離相等，可以發現到另兩條數據線正好交錯於一點。 $C_F$ 為 950 時，數據線亦有兩個交點，是手指滑動時恰巧經過第一個與第二個電極間隙中間，以及第二個電極與第三個電極間隙中間時，兩電極分別有相同手指覆蓋面積所致。

量測數據呈現了在天頂角固定時，方位角 $\varphi$ 變化下，各個電極量測到的 $C_F$ 變化，對應到圖 49 的 $\varphi_D-\theta-C_F$ 關係曲面中，發現結果完全符合。

#### 4.5 觸控半球實體

在驗證了球表面 U 型電極陣列之可行性後，則可以將其製作出成品，其中，陣列中的電極個數依先前設計一樣設為 18 個，形狀亦相同，而頂端缺口部分則可以鋪設一個圓形曲面電極來作為球頂點的量測，而此球頂電極與 U 型電極陣列一起運作下，可以將手指觸控量測範圍更加提升。在各電極之間加入 GND 細線分隔，則可以減少手指臨近卻未觸碰到，但吸引到些許電力線引發的電容感應，能使手指觸碰電容感測更加穩定。

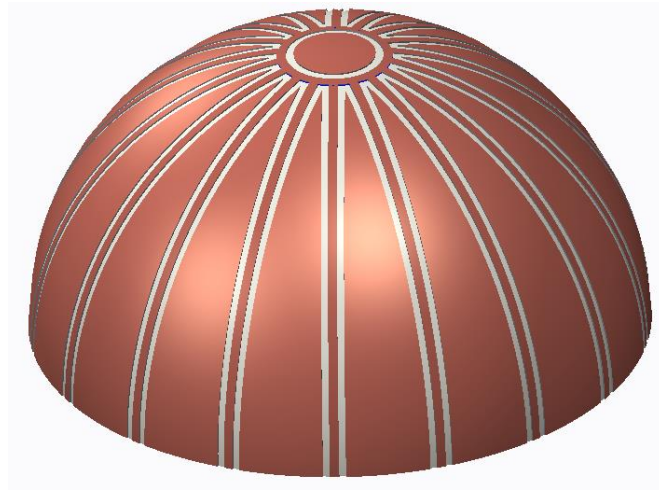


圖 52 模擬的 U 型電極陣列之觸控半球設計



圖 53 實作的 U 型電極陣列觸控半球

## 第五章 結論與未來展望

### 5.1 結論

類三角形電極雖然在單個元件的測試下 $C_F$ - $\theta$ 曲線有良好的線性趨勢，但是做成陣列時則顯現出其較大空隙處會導致觸控失誤。而改良過後製作的半球表面 U 型電極不會出現此缺陷，其 $C_F$ - $\theta$ 曲線亦具備足夠的鑑別度，且在以偏移方位角 $\varphi_D$ 修正後，建構出的三維曲面關係，使天頂角 $\theta$ 的計算更加精準，可以確實解析出手指觸碰的三維半球表面座標點。

球表面單層 U 型電極的設計因為布局方式並不複雜，因此製作成本也相當低廉，其設計概念也可用於不同形狀的三維曲面，比如角椎體表面或是橢圓球體表面。

### 5.2 未來展望

三維觸控半球屬於較新穎的觸控介面，因此應用仍相當受限，在未來的後續研究可以朝應用層面發展。比如將小型化的觸控半球應用於電玩搖桿上，取代傳統電阻式搖桿的二維方位控制並具備手勢控制功能，也可以與搖桿做結合，在搖桿上製作小型的觸控半球，使單手就可以進行兩個二維的方位控制。

除此之外，還可以應用在工廠設備、航太領域以及虛擬互動系統等平面觸控無法滿足需求的地方，為觸控領域帶來更大的可能性。

## 參考文獻

- [1] Geoff Walker, June 1, 2014, Fundamentals of Projected-Capacitive Touch Technology, Intel Corporation.  
[www.walkermobile.com/Touch\\_Technologies\\_Tutorial\\_Latest\\_Version.pdf](http://www.walkermobile.com/Touch_Technologies_Tutorial_Latest_Version.pdf)
- [2] Benko, H., Wilson, A. D., and Balakrishnan, R. “Sphere: multi-touch interactions on a spherical display.” In Proceedings of the 21st annual ACM symposium on User interface software and technology, UIST '08, ACM (2008), 77–86.
- [3] Seungju Han and Joonah Park, “Grip-Ball: A Spherical Multi-Touch Interface for Interacting with Virtual Worlds”, 2013 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 600 – 601.
- [4] Cypress Semiconductor, “Getting Started with CapSense® ”, Document No. 001-64846 Rev, 2015.
- [5] 勝群半導體， 2015 年，  
[http://www.holtek.com.tw/chinese/tech/faq/BS80xB\\_faq.htm](http://www.holtek.com.tw/chinese/tech/faq/BS80xB_faq.htm)
- [6] L.K.Baxter, ” Capacitive Sensors Design and Applications”, 1997.
- [7] 楊瑞賢，HannStar TR0410，投射電容式觸控面板原理介紹，2010 年。
- [8] H.Dym, and M. Krakinowski, “Capacitive two dimensional tablet with single conductive layer”, U.S. Patent, No. 4087625, 1978.



[9] 黃仲強，一種表面電容元件之研究，國立交通大學碩士論文，  
2008 年。

[10] Cypress Semiconductor , “CY3280-20x66 Universal CapSense®  
Controller Kit Guide”, No. 001-67447 Rev, 2011.

