

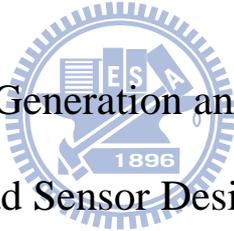
國立交通大學

電子工程學系

碩士論文

以統計方法產生的觸控板感測器模型與最佳化

Statistical-Based Model Generation and Optimization for Touch
Pad Sensor Design



指導教授： 陳宏明 教授

研究生： 王俊凱

中華民國九十八年八月

以統計方法產生的觸控板感測器模型與最佳化

Statistical-Based Model Generation and Optimization for Touch

Pad Sensor Design

研究生：王俊凱

Student : Chun-Kai Wang

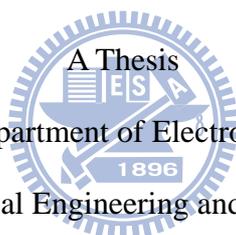
指導教授：陳宏明

Advisor : Hung-Ming Chen

國立交通大學

電子工程系

碩士論文



Submitted to Department of Electronics Engineering
College of Electrical Engineering and Computer Science

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Electronics Engineering

June 1997

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年八月

Statistical-Based Model Generation and Optimization for Touch Pad Sensor Design

Student: Chun-Kai Wang

Advisor: Prof. Hung-Ming Chen

Department of Electronics Engineering
Institute of Electronics
National Chaio Tung University

Abstract

To provide users in consumer electronic products more convenient interface, there are kinds of sensors applied in modern electronic products. Touch pad is the most popular one, and it can be classified into three kinds: capacitance-type, resistance-type, and real time camera. We will focus on the capacitance-type touch pad and propose a methodology to accelerate the design flow in this thesis. In a capacitance-type touch pad, we design sensors in trace shape and place them crossed in horizontal and vertical directions. Once a finger is closing to a sensor, the electrical field changing will affect the capacitance value of the sensor. The processor will collect the capacitance value of all traces and calculate the coordinate where the finger locates.

The quality of a touch pad is decided by two measures. One is the sensitivity of detecting whether a finger exists or not. The other is the resolution of finger coordinates. We can improve touch pad quality by modifying sensor layout. In the flow of sensor layout optimization, we must take time for capacitance extraction once the layout is modified. The state-of-art capacitance extraction is to solve Poisson equation in 3D or random walk-based method (Monte Carlo). Both of them are time-consuming. To reduce the number of capacitance extraction, we propose a statistical methodology that constructs a capacitance model relying on some results of capacitance extraction. And by applying this model, we can generate the optimal layout design of sensor.

以統計方法產生的觸控板感測器模型與最佳化

研究生： 王俊凱

指導教授： 陳宏明 教授

國立交通大學

電子工程學系 電子研究所碩士班

摘要

為提供消費者更簡單、直覺使用介面的電子產品，感測器的使用越來越普遍，觸控板就是最常見的一種。依據感測模式，我們可以把觸控板分成三類：電容式、電阻式，以及即時影像捕捉式。本論文針對電容式觸控板分析，試圖提出一加速設計流程的方法。在電容式觸控中， x 方向、 y 方向各有數條感測器，在手指沒有靠近的時候，感測器即有一基本電容值；一旦手指靠近感測器，電場的改變，會使感測器的電容值變化，稱為感應電容值。處理器在收集不同位置感測器的感應電容值後，可估計出手指所在的座標。

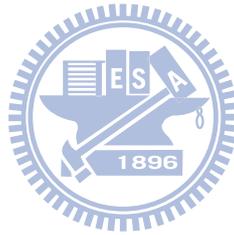
如何衡量觸控板的品質，有兩主要項目。第一，觸控板對手指有無的感應靈敏度；第二，觸控板對手指位置的解析度。針對上述項目，我們能藉由感測器的佈局調整做某種程度的改善；然而在感測器佈局最佳化的過程中，每次改變佈局後都需重新抽取電容以驗證偵測效果。目前抽取電容有兩種主要方式：在三維空間中解波松方程、隨機遊走法(蒙地卡羅)，皆相當耗時。為減少抽取電容的數目，本篇論文提出一統計方法，選擇特定情形做抽取電容，並以其結果建立電容模組，再利用此電容模組做最佳化，找出佈局設計。

目 錄

中文提要	.....	i
英文提要	.....	ii
目錄	.....	iii
表目錄	.....	iv
圖目錄	.....	v
Chapter 1	Introduction.....	1
Chapter 2	Background.....	2
2.1	Basic Structure of Touch Pad.....	2
2.2	Sensitivity.....	3
2.3	Linearity.....	6
2.4	Capacitance Extraction.....	10
Chapter 3	Model Construction.....	11
3.1	Design of Experiments.....	11
3.2	W/O Finger Model.....	12
3.2.1	For A Specific Size.....	13
3.2.2	Array Extension.....	15
3.3	W/ Finger Msodel.....	17
3.3.1	Self Capacitance.....	19
3.3.2	Mutual Capacitance.....	22
Chapter 4	Model Verification.....	25
4.1	W/O Finger Model Result.....	25
4.2	W/ Finger Model Result.....	27
Chapter 5	Optimization.....	31
5.1	Particle Swarm Optimization.....	31
5.2	Optimization Result.....	31
Chapter 6	Conclusions and Future Work.....	36
參考文獻	.....	37

表目錄

表 3-1 Experiments of W/ Finger Model.....	18
表 4-1 模型結果 v.s. 模擬結果.....	25
表 5-1 Optimization Criterion of Case 1	31
表 5-2 Optimization Result of Case 1	32
表 5-3 Optimization Criterion of Case 2	32
表 5-4 Optimization Result of Case 2	33
表 5-5 Optimization Criterion of Case 3	33
表 5-6 Optimization Result of Case 3	34



圖目錄

圖 2.1 二層感測器的觸控板構造	2
圖 2.2 單層感測器的觸控板側視	2
圖 2.3 觸控板電容網路	3
圖 2.4 手指與感測器作用示意	4
圖 2.5 靈敏度	6
圖 2.6 感應電容與手指位置示意	7
圖 2.7 以多條感應電容值之重心估算手指位置	8
圖 2.8 線性度	9
圖 3.1 二層感測器的觸控板構造	11
圖 3.2 Central Composite Design.....	12
圖 3.3 Array Extension	12
圖 3.4 單層感測器觸控板構造	13
圖 3.5 變數 Space.....	14
圖 3.6 Experiments of w/o Finger Model.....	14
圖 3.7 Array Extension Experiments.....	15
圖 3.8 Array Extension Method.....	17
圖 3.9 手指與感測器作用示意	18
圖 3.10 感測器佈局有規律性，取單位區域.....	18
圖 3.11 參數：W/ Finger Model Self: Space, f_x , f_y	19
圖 3.12 參數：W/ Finger Model Self: Space, Area, Perimeter	20
圖 3.13 參數：W/ Finger Model Self: Space, Area, fedge, dedge	21
圖 3.14 參數：W/ Finger Model Self 手指與感測器未重疊: Space, dist1, dist2	22
圖 3.15 參數：W/ Finger Model Orthogonal	23
圖 3.16 參數：W/ Finger Model Parallel:	24
圖 4.1 W/o Finger Model 散佈圖	25
圖 4.2 W/ Finger Model Self 散佈圖	27
圖 4.3 W/ Finger Model Shield 散佈圖	28
圖 4.4 W/ Finger Model Orthogonal 散佈圖	29
圖 4.5 W/ Finger Model Parallel 散佈圖	30
圖 5.1 Sensitivity and Linearity v.s QSpace Sweep for Optimization Case 1	32
圖 5.2 Sensitivity and Linearity v.s QSpace Sweep for Optimization Case 2.....	33
圖 5.3 Sensitivity and Linearity v.s QSpace Sweep for Optimization Case 3.....	34
圖 5.4 Sensitivity and Linearity v.s P_x Sweep for Optimization Case 3.....	35
圖 5.5 Sensitivity and Linearity v.s P_y Sweep for Optimization Case 3.....	35

Chapter 1 Introduction

觸控式面板在電子產品要求簡便的使用介面的趨勢下，幾乎無處不在。一個好的觸控板，除需有具備良好的感測力，也要求能準確計算使用者實際手指的位置。依據感測模式，我們可以把觸控板分成三類：電容式、電阻式，以及即時影像捕捉式。本論文針對電容式觸控板討論。

電容式觸控板利用感測器在使用者手指靠近時產生感應電容的性質達到一些功能。要有一個感應良好的電容式觸控板，需分析手指與感測器間的作用。常見的方法是以電容萃取的模擬工具進行分析，然而電容萃取所需的計算量很大，往往在設計過程中花費過多的時間在等待其計算結果上。本篇論文提出一統計方法，利用有限的電容萃取結果建立電容式觸控板的電容模型，加速設計的流程，並利用所建立之模型，對電容式觸控板的感測器佈局進行靈敏度與線性度的分析與最佳化。

我們會在第二章介紹基本的電容式觸控板架構、電容萃取的模擬技術。在三、四章中我們將介紹如何以實驗設計的方式建立電容模型，以及模型的結果。並以此模型基礎，在第五章裡最佳化感測器的佈局設計。

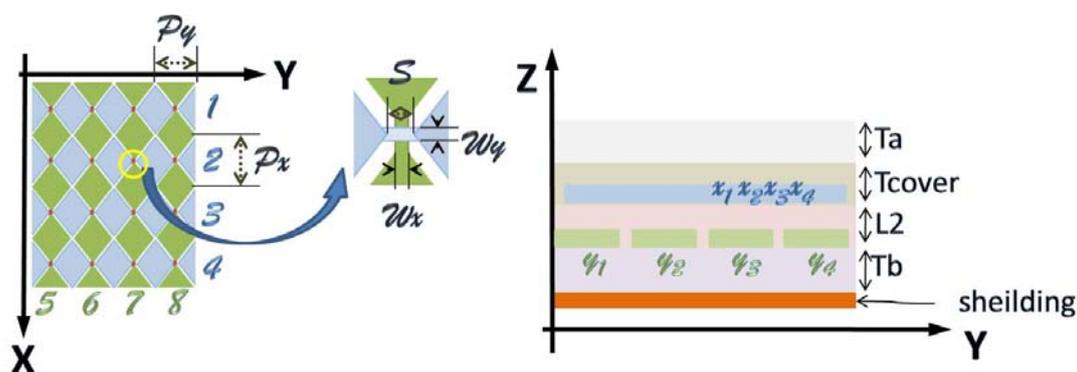


Chapter 2 Background

本章在 2.1 節將先介紹觸控板基本構造。在 2.2 節、2.3 節介紹並定義觸控板的靈敏度與線性度，為兩衡量觸控板品質的指標。最後在 2.4 節介紹我們所使用的電容萃取方式。

2.1 Basic Structure of Touch Pad

圖 2.1 為一 4x4 二層感測器的電容式觸控板架構。感測器如圖 2.1(a)所示，由數個菱形串接，於 x 軸方向、y 軸方向，各串成四條。Px、Py 分別為 x、y 方向串接菱形的間格週期，S 為兩串接菱形最接近的頂點距離，Wx、Wy 為串接橋樑的寬度。圖 2.1(b)為側視圖，感測器與遮避層為金屬，其餘各層為絕緣層，根據不同需求有不同厚度。上層感測器 x1~x4 與下層感測器 y1~y4，以 L2 層隔開。



(a) 俯視圖

(b) 側視圖

圖 2.1 二層感測器的觸控板構造

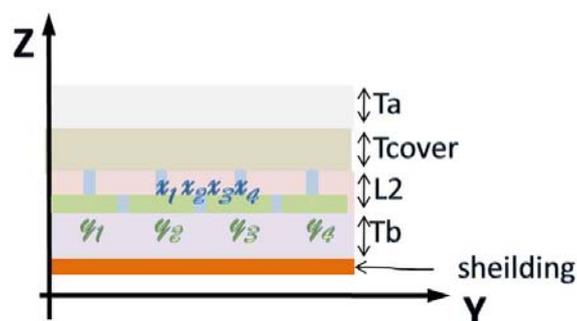


圖 2.2 單層感測器的觸控板側視

除二層結構，亦有單層結構。圖 2.2 為單層感測器的側視圖。單層的俯視結

構與二層相同，不同處在菱形串接時，由於兩方向串接會交叉，如圖 2.1(a)放大圖，因此其中一層需跨接。圖 2.2 中 $x1\sim x4$ 為跨接感測器，以下論文我們稱其上層感測器， $y1\sim y4$ 稱下層感測器。

由於二層結構的 $L2$ 較單層結構的 $L2$ 大一個數量級以上，手指較靠近上層感測器，上、下層的感應電容值差異較大。相同 T_{cover} 、 T_a 厚度之下，單層結構的底層感測器也會有較清晰的感應量。本論文將以單層結構為主

將菱形串接的感測器簡化為長矩形，則一 4×4 觸控板如圖 2.3(a)所示，每個感測器可視為一個節點，而兩個感測器之間的互感為一個電容，形成如圖 2.3(b)所示，一網狀電容系統[1]。當處理器在看一個感測器的電容值時，其他的感測器節點會接地，如圖 2.3(c)以讀取感測器 $x2$ 為例。

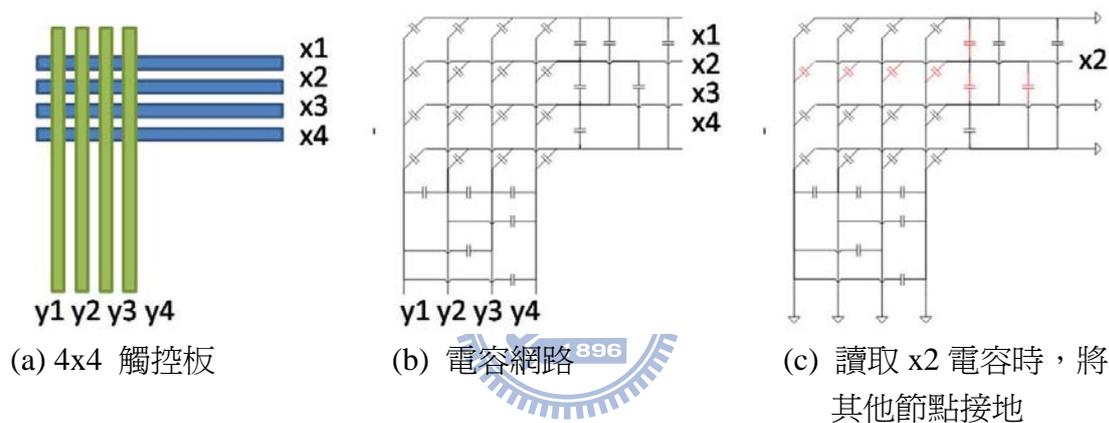


圖 2.3 簡化的觸控板構造

2.2 Sensitivity

接下來我們談如何加強觸控板的品質，首先是偵測手指有無的靈敏度。

在沒有手指靠近的時候，感測器有一初始電容值 C 。當有手指靠近時，新增一節點代表手指，以讀取圖 2.3 之 $x2$ 電容為例，電容值即為 $(C_{x2x1}+C_{x2x3}+C_{x2x4}+C_{x2y1}+C_{x2y2}+C_{x2y3}+C_{x2y4})+ C_{x2finger}$ ，這個電容值與初始電容值 C 的差異我們稱為 dC 。 dC 的貢獻可分為：手指與感測器間的感應電容、感測器間的感應電容。手指與感測器間的感應電容為正值，感測器間的感應電容值為負值，因手指會吸走部分自 $x2$ 走到其他感測器的電力線，如圖 2.4 所示。

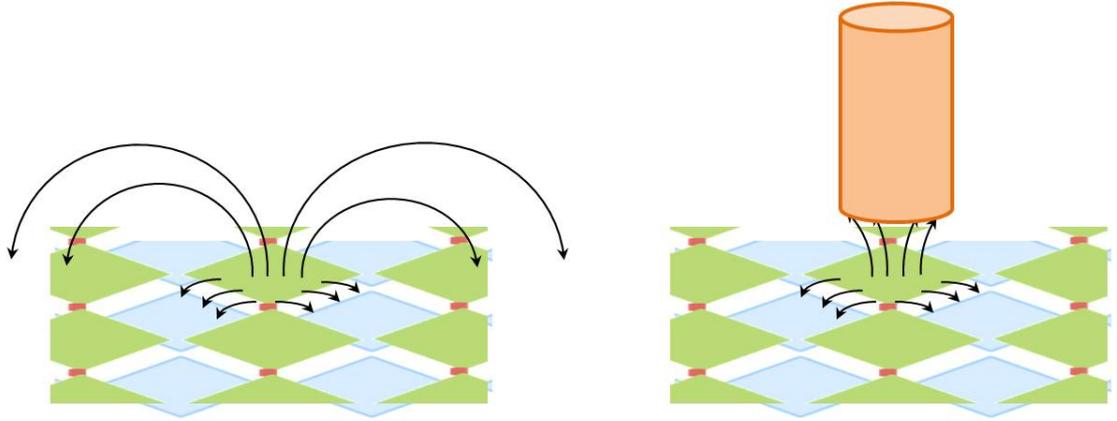


圖 2.4 當手指靠近觸控板時，會將原指向其他感測器的電力線吸走，造成感測器間的感應電容值下降。

靈敏度與 dC/C 有很大的關係：

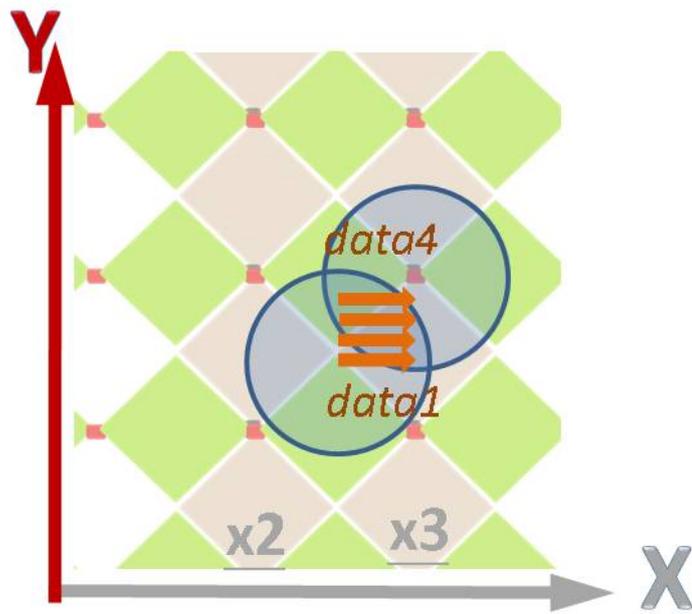
$$C = \sum C_{coupling} \Big|_{w/o \text{ finger}} \quad (1)$$

$$dC = \sum C_{coupling} \Big|_{w/ \text{ finger}} - \sum C_{coupling} \Big|_{w/o \text{ finger}} = C_{x2-finger} + \sum_{trace} (C_{x2-trace} \Big|_{w/ \text{ finger}} - C_{x2-trace} \Big|_{w/o \text{ finger}}) \quad (2)$$

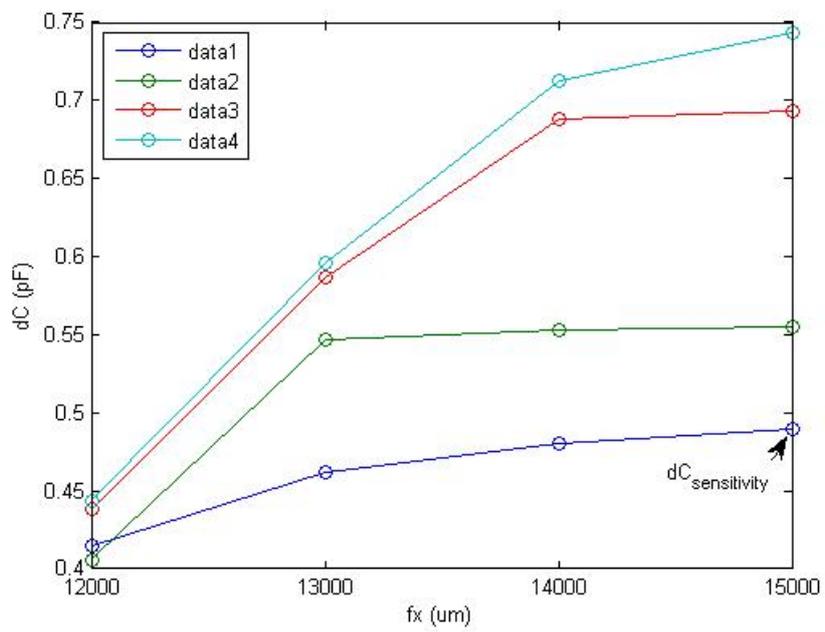
由於處理器會先讀到整個感測器的感應值，再將各感測器的背景值減去。若 dC/C 越小，對感應電容值的解析就越差。

接下來，我們定義本論文的靈敏度。我們已知靈敏度與 dC/C 相關，而 C 為無手指時感測器電容值，剩下 dC 該選擇手指在何處時的感應值尚未決定。我們稱這個值為 $dCsensitivity$ 。由於感測器佈局有規律性，我們只需考慮單位區域，如圖 2.5(a) 在單位區域內，以 1mm 間格掃動手指，在 P_x 、 P_y 等於 6000um 的例子中，我們可將手指的掃動依平行 x 軸方向分為四條，圖 2.5(b)(c) 分別為手指半徑 4000um、2500um 時 dC 結果。

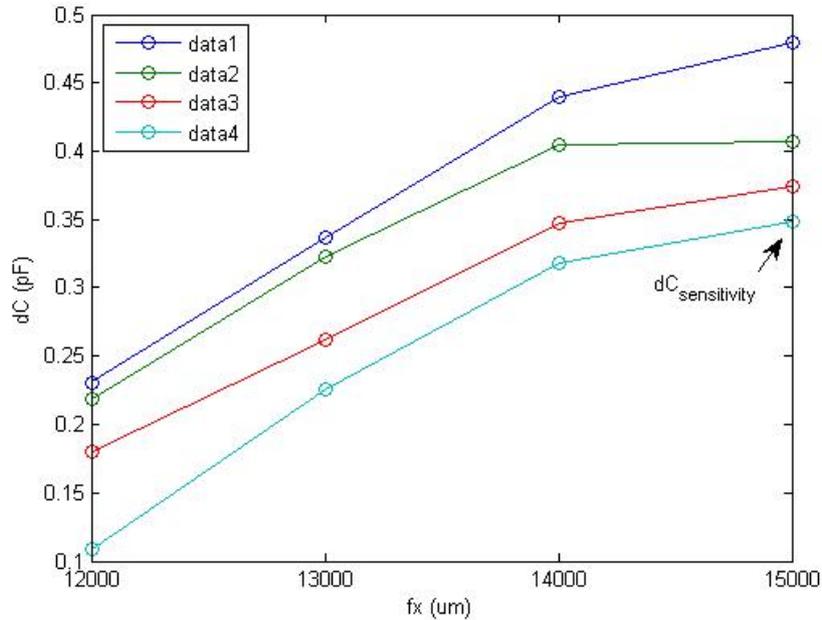
我們定義 $dCsensitivity$ 為手指圓心落於感測器中心軸線的最小的感應量，如圖 2.5(b)，即在 $fx=15000um$ 時選擇 data1 為 $dCsensitivity$ 。隨手指半徑與基本菱形的比例不同，我們取 $dCsensitivity$ 的點也會改變，這是由於手指與感測器相對幾何形狀的不同所造成感應情形的不同，如圖 2.5(c) 時所選的 $dCsensitivity$ 為 data4，不同於圖 2.5(b) 所選的 data1。



(a)



(b)



(c)

圖 2.5 定義靈敏度的 $dC_{sensitivity}$ 。(a)因感測器佈局規律，我們在單位區域內，以 1mm 間格掃動手指，在 $P_x \cdot P_y = 6000\mu m$ 時，可將掃動分為 4 條線，data1~data4。(b)手指半徑=4000um。 $dC_{sensitivity}$ 為手指圓心落於感測器中心軸線的中最小的感應量，在這個例子中，感測器中心軸線落在 $x=15000\mu m$ ，我們選擇 data1 在此處的值為 $dC_{sensitivity}$ 。(c)手指半徑=2500um。我們選擇 data4 在 $x=15000\mu m$ 的值為 $dC_{sensitivity}$

儘管手指靠近後，感測器間的感應量會降低，但總體來說，由於手指與感測器間的增量較大，此時可讀到的電容值還是較初始電容值多。為增加與手指的感應量，我們可以選擇：加大感測器、縮小手指與感測器的距離。第一個方案，由於觸控板的大小是固定的，加大感測器會使感測器間間距縮短，而感測器間相互的感應電容卻會因此變大；仔細觀察其變化趨勢， dC 隨感測器面積大小線性變大， C 隨間距變小的二次反比變大，可見在感測器大小、感測器間距的調整中， dC/C 存的在一極大值需要尋找。至於第二個方案，要縮小手指與感測器的距離，就需使用較薄的保護層，而保護層的厚度還是有一定限制，否則就失去保護的意義。這些可能的選擇便是感測器佈局的課題。

2.3 Linearity

手指位置的解析度是另一個重要的指標。針對提升解析度的困難處，我們先從只有一個感測器的狀況談起。圖 2.6(a)為手指從上方往下方移動的情形，由於

手指的形狀趨於圓形，在移動的過程中，手指與感測器的重疊區域大小會漸漸飽合，而手指與感測器的感應量就像這個漸漸飽合的情形，一直到圓心正落感測器上方時達最大值，之後再對稱的變小；相對理想的手指形狀如圖 2.6(b)所示，如果手指是三角形，隨著手指的移動，感應電容會呈線性增加；然而手指的形狀卻不可能是三角形的。如圖 2.6(a) 中的非線性感應，會造成我們對手指位置解析的困難。

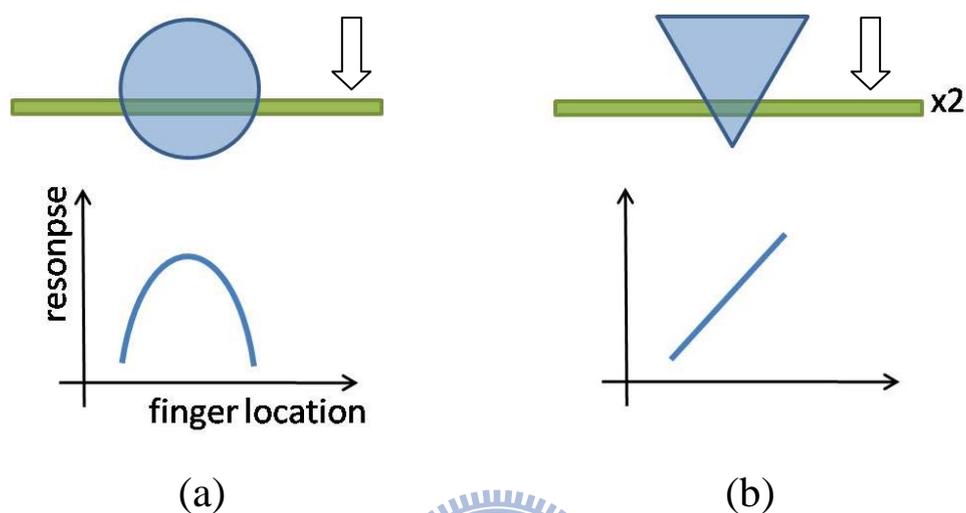


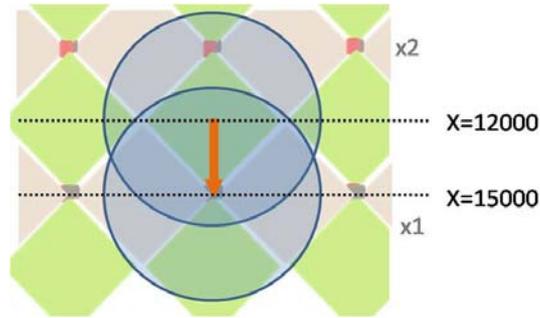
圖 2.6 「感應電容-手指位置」示意圖，手指由上方往下方移動。(a) 圓形手指。
(b) 三角形手指。

我們實際在估計手指位置時，並不只靠一個感測器的資訊，而是根據多條感測器，以重心計算，如感測器 x_1 、 x_2 、 x_3 感應時：

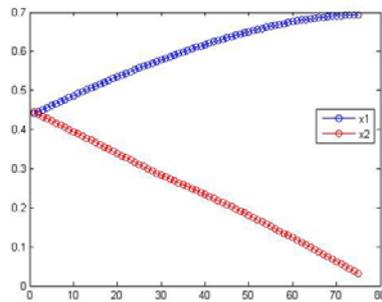
$$fx_predicted = \frac{x_1 \times dC_{x1} + x_2 \times dC_{x2} + x_3 \times dC_{x3}}{dC_{x1} + dC_{x2} + dC_{x3}}$$

圖 2.7，由 x_1 與 x_2 的感應電容值估計位置時， x_2 的感應量呈線性下降， x_1 的感應量上升卻呈一飽合趨勢， x_1 與 x_2 感應量不對等的增減，使手指位置的估算無法呈理想線性。

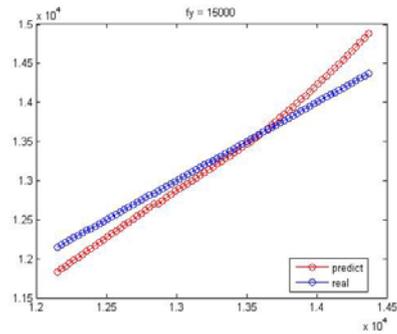
儘管較多的感應資訊讓位置的估算更有利；然而，對相同的手指大小，要有更多感測器感應，就需要將感測器本身的大小、感測器間的距離調小，這又與先前的靈敏度問題互為 trade-off。



(a)



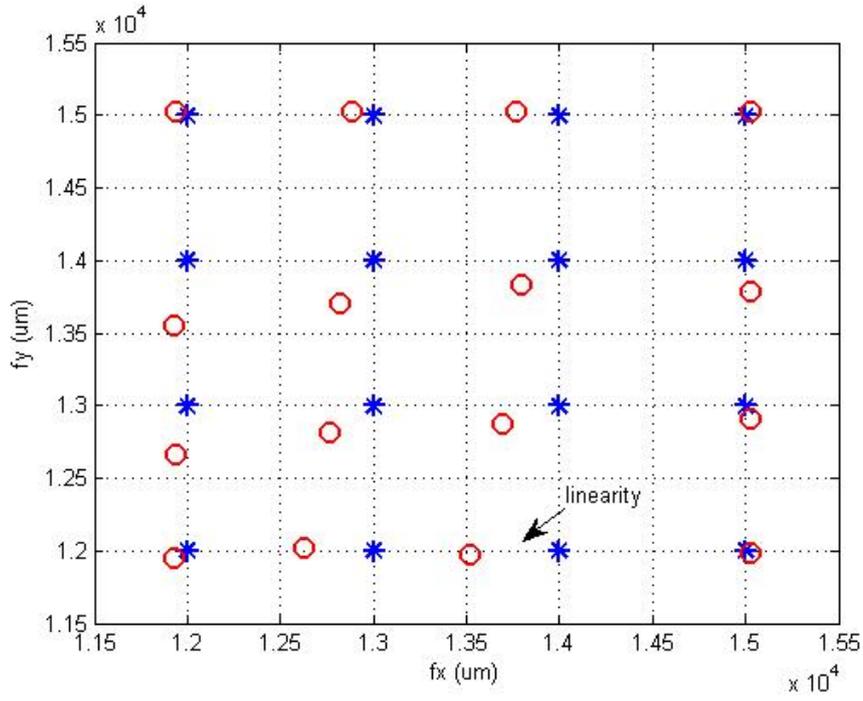
(b)



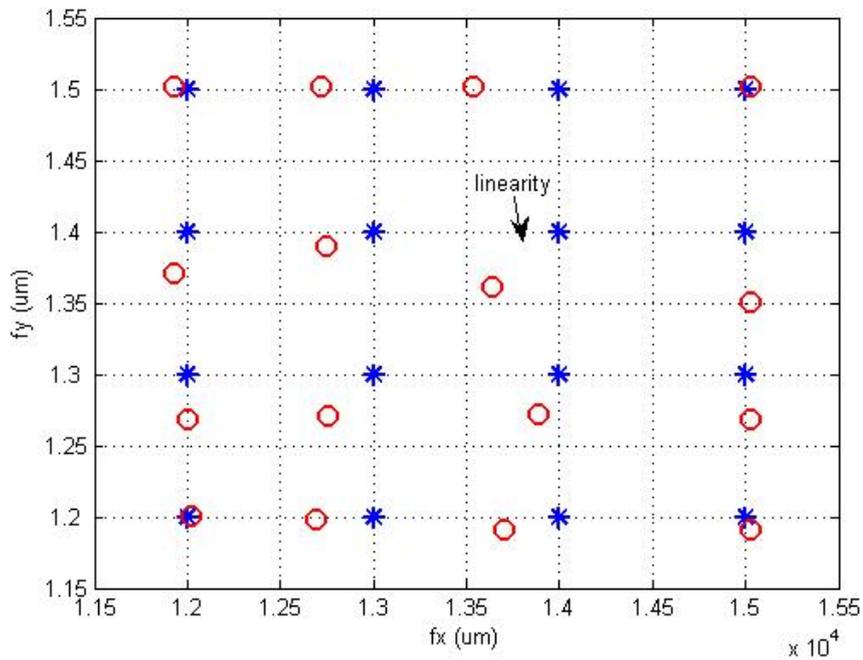
(c)

圖 2.7 多條感應電容值，以重心估算手指位置。(a)手指移動方式(f_x 、 f_y 為手指的圓心座標)： $f_x=12000 \rightarrow 15000$ ， f_y 固定。(b)手指以(a)方式移動時 x_1 與 x_2 感應電容值的變化。(c)以重心公式計算手指位置的結果呈紅線(predict)所示，實際手指位置為藍線(real)。

最後我們定義本論文中的線性度。如前節定義靈敏度時，我們利用單位區域內手指掃動的結果，圖 2.8 用兩個例子對照實際手指位置、計算手指位置。圖 2.8 中藍色星號為實際手指位置，紅色圈為計算手指位置，圖 2.8(a)為 $P_x \cdot P_y=6000\mu\text{m}$ ， $Q\text{Space}=283\mu\text{m}$ ， $f_r=5000\mu\text{m}$ ，我們選擇實際位置與計算位置差異最大的值為 linearity ，其值越大表示其誤差越大；在這個例子中即選擇 $(f_x, f_y)=(14000, 12000)$ 處， $\text{linearity}=425\mu\text{m}$ ；圖 2.8(b)為 $P_x \cdot P_y=6000\mu\text{m}$ ， $Q\text{Space}=1414\mu\text{m}$ ， $f_r=5000\mu\text{m}$ ，選擇 $(f_x, f_y)=(14000, 14000)$ 處實際位置與計算位置的差異， $\text{linearity}=951\mu\text{m}$ 。



(a)



(b)

圖 2.8 在單位區域內以 1mm 為間格，手指掃動。定義 linearity 為這些掃動點中實際位置與計算位置差異最大的值(a) P_x 、 $P_y=6000\mu m$ ， $QSpace=283\mu m$ ， $fr=5000\mu m$ 。選擇 $(fx, fy)=(14000, 12000)$ 處， $linearity=425\mu m$ 。(b) P_x 、 $P_y=6000\mu m$ ， $QSpace=1414\mu m$ ， $fr=5000\mu m$ 。選擇 $(fx, fy)=(14000, 14000)$ 處， $linearity=951\mu m$ 。

2.4 Capacitance Extraction

電容萃取的方式有兩種：Fast Integral Equation Methods[2]及隨機遊走法[3]。Fast Integral Equation Method 基本的概念是將兩節點的電位差設為一伏特，則兩節點電容值為節點上所存電荷，並在三維空間中解波松方程，求得金屬表面之電荷量。其應用在觸控板的模擬，其計算量大。隨機遊走法為一蒙地卡羅法，要達到一定準度，需要大量的實驗，同樣需要大量的時間。本篇論文中，我們使用的電容萃取工具：Ansoft Q3D 7.0，屬於 Fast Integral Equation Methods 一類。



Chapter 3 Model Construction

於此論文中，我們將完成如圖 3.1 所示，分別對有手指與沒有手指的情形，建立觸控板的電容模型，並以此模型為基礎，對觸控板感測器佈局作最佳化。在此章中，3.1 節將介紹基本的實驗設計概念，並於 3.2 節說明我們如何對無手指時的觸控板電容建模，3.3 節說明如何對有手指時的情形建模。

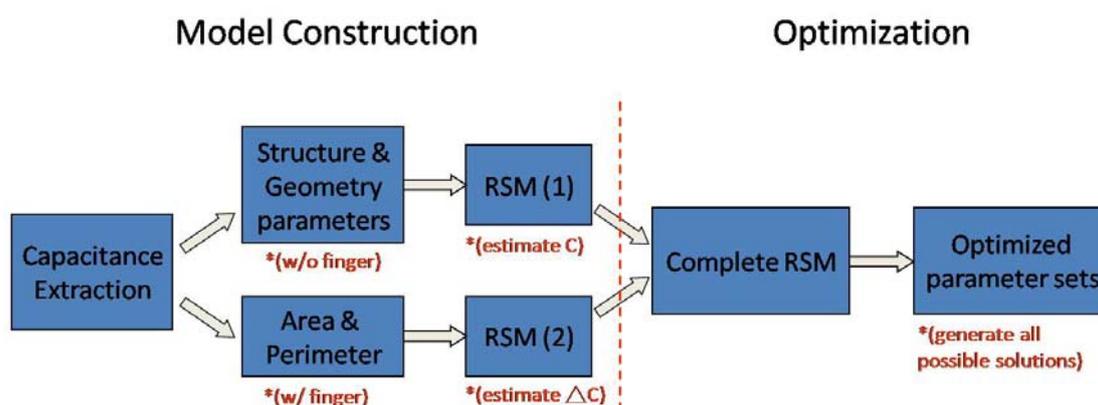


圖 3.1 本論文提出為電容式觸控板電容值建模，並利用此模型最佳化流程。

3.1 Design of Experiments

對一個由多變數描述的系統，我們可藉迴歸分析，建立反應曲面模型 (Response Surface Model)[4][5][6]：

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 1 & & & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

y 是一 $n \times 1$ 向量，代表 n 個實驗結果。 x 為一 $n \times m$ 矩陣，由各組實驗的因子組合而成，行數 m 由我們欲建模型之階數決定。 B 為一 $m \times 1$ 向量，是對應 x 的係數； x 與 b 相乘得一多項式即我們的模型。其誤差為 ε ，以最小平方法將誤差最小化，我們可定出 b 值。

中央合成設計(Central Composite Design)為常用的二階模型實驗設計方法。利用部分因子或全因子，加上軸點與中心點。以二變數取全因子為例，共取九點。如圖 3.2，三種常見的中央合成設計。

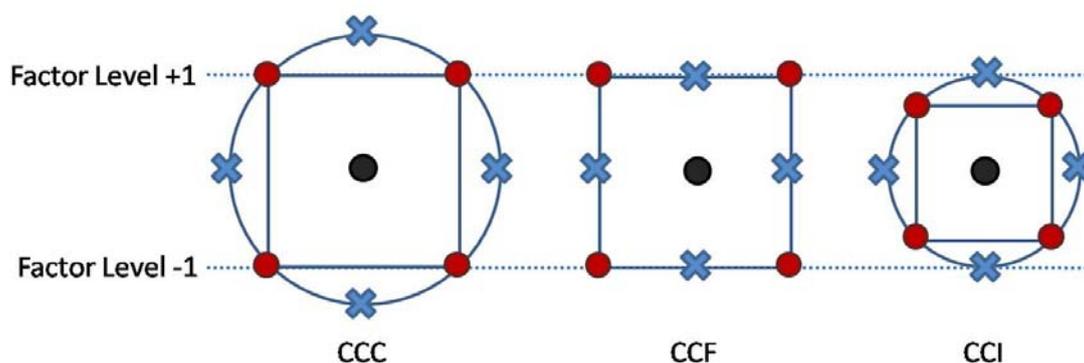


圖 3.2 Central Composite Design: Circumscribed(CCC)、Face Centered(CCF)、Inscribed(CCI)

3.2 W/O Finger Model

本節中我們先在 Section 3.2.1 中，對單層感測器結構，上層、下層各有 5 條感測器的情形建模。然而，不同大小的觸控板，一感測器所串接菱形的數目也會改變；如圖 3.3。在 Section 3.2.2 中，我們將利用 Section 3.2.1 的結果，針對感測器數目變化時的情況作調整。

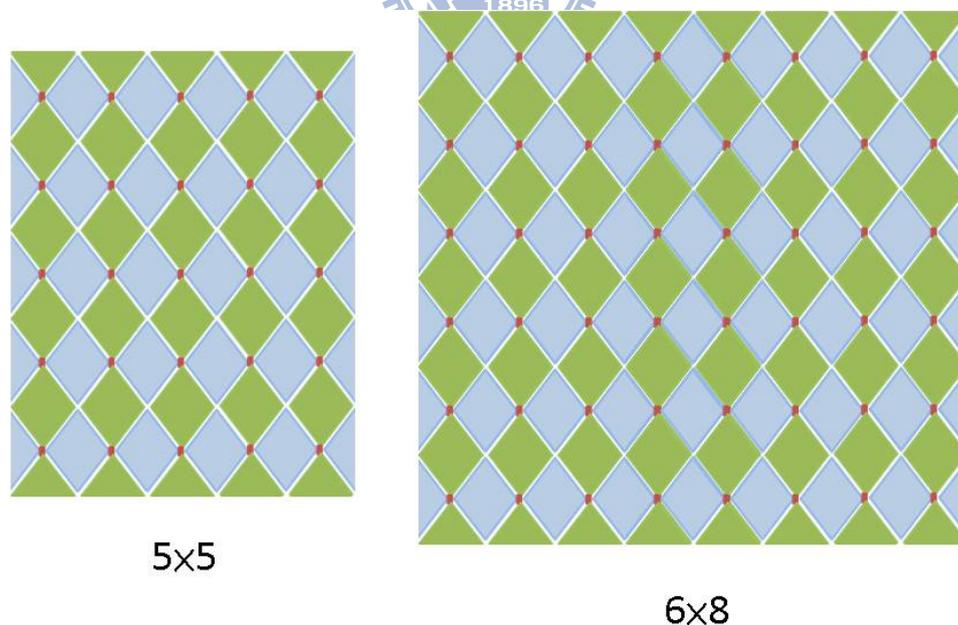


圖 3.3 兩不同大小的觸控板，但其基本菱形構造相同。

3.2.1 For A Specific Size

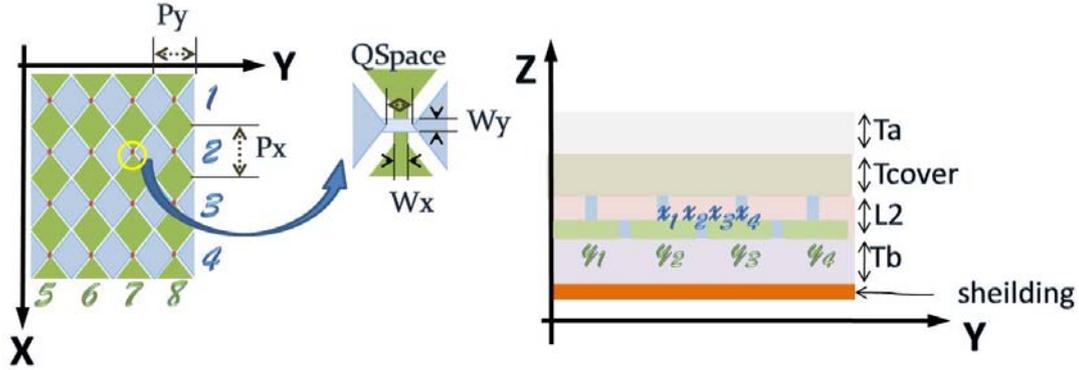


圖 3.4 單層感測器觸控板構造

對一以菱形串接成的感測器，我們能以 P_x 、 P_y 、 $QSpace$ 、 W_x 、 W_y 描述其平面佈局，如圖 3.4。y 方向感測器串接在本層，而 x 方向感測器的串接需跨過 y 方向感測器的串接處，故需先於垂直方向打 via，以橋接方式相連，橋高約 $2\mu\text{m}$ 。各層的厚度，由於製程上通常僅存幾種選擇，我們便以描述平面佈局的五個變數為主。

在平面佈局中，我們又將 W_x 、 W_y 固定，原因如下。對一感測器，手指未靠近時的電容值，主要由鄰近的其他感測器貢獻，因為前述橋高僅 $2\mu\text{m}$ ，故菱形串接處形成的平板電容值一旦面積大，就會衝高。無手指時的電容值大，會造成靈敏度的降低。為避免這樣的情形，我們將 W_x 、 W_y 的固定於一較小值。

由於主要的電容貢獻來自鄰近感測器，將原有變數 S ，描述串接菱形兩頂點距離，做一轉換，以兩相鄰菱形，其邊的距離，為一新的變數，稱 $Space$ 。如圖 3.5。

$$Space = \frac{QSpace}{2} \times (\tan \theta + 1) \times \cos \theta$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{Py - QSpace}{Px - QSpace}$$

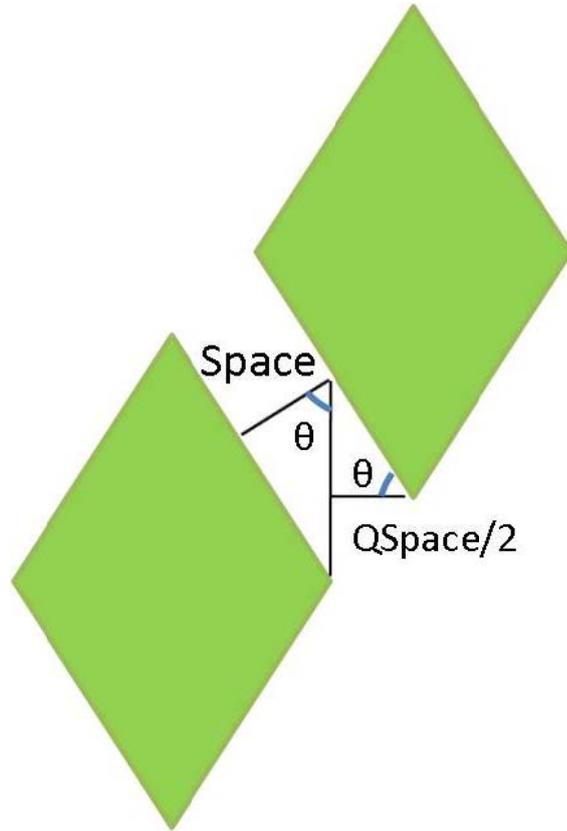


圖 3.5 變數 Space

最後，我們以三個變數： P_x 、 P_y 、Space，做 Central Composite Design – Face Centered 全因子取點建模，如圖 3.6。

圖 3.6 P_x 、 P_y 、Space，以 CCF 取點。

P_x 水準範圍：4000~7500。

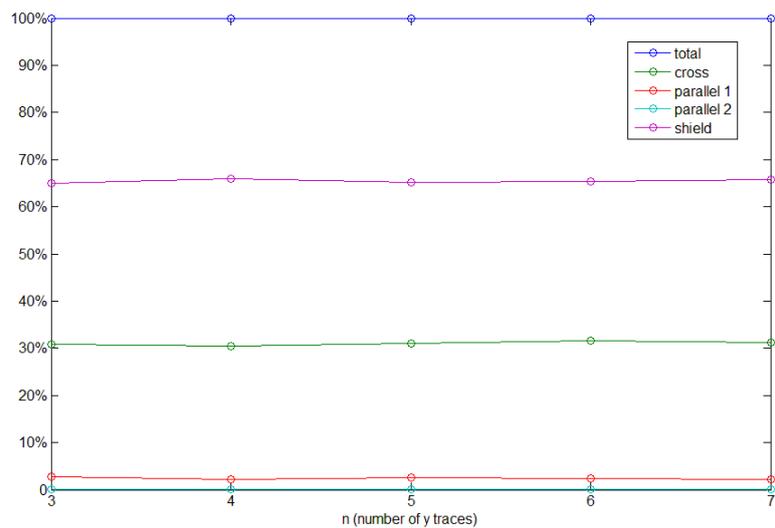
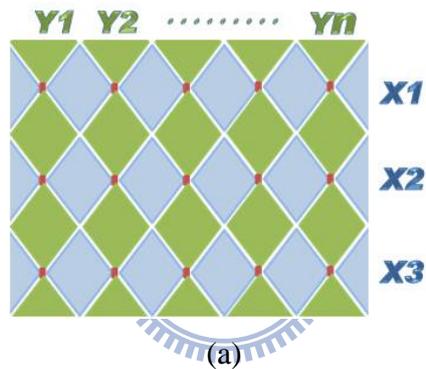
P_y 水準範圍：4000~7500。

Space 水準範圍：200~1000

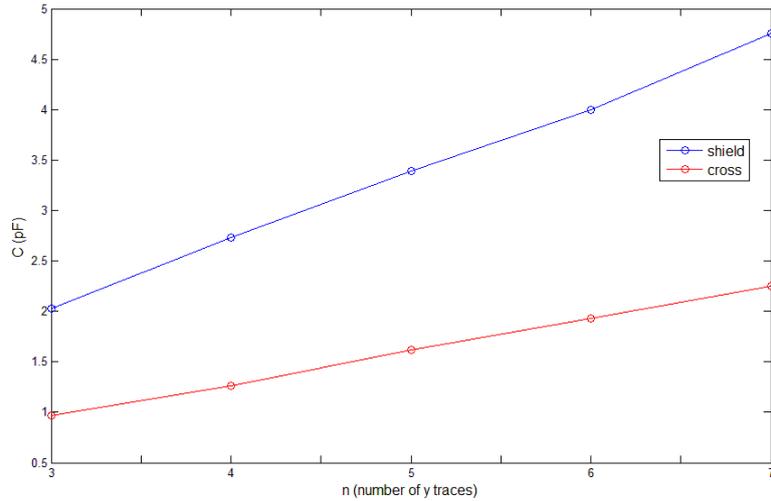
3.2.2 Array Extension

有了前節 5x5 的結果後，我們希望在不同感測器數目的觸控板上作推廣。針對這樣的情形，我們先在幾個大小不同的觸控板，如圖 3.7(a)：3xn, n = 3~7，重複上一節的方法。觀察其電容值變化。

根據感測器相對位置，我們將之分會四類：cross、parallel1、parallel2、shield。cross 為垂直相交的感測器，見圖 3.7(a)以 x1 感測器為例，y1、y2...等，所有 y 方向感測器皆屬此類；而 parallel1 則是平行相鄰的感測器，如 x1 與 x2；parallel2 是平行而中間隔一感測器的情形，如 x1 與 x3；最後的 shield 為感測器與底部遮避層的感應電容。



(b)



(c)

圖 3.7 固定基本菱形，觀察電容在感測器數目改變時的變化。

(a)調整觸控板 y 方向的感測器數量 $n=3\sim 7$ 。

(b)cross、parallel1、parallel2、shield /總電容比值 v.s. n

(c) cross、shield 電容值 v.s. n

觀察圖 3.7(b)，各電容所佔的比重在不同 y 方向感測器數目的情形，呈一恆定比例。圖 3.7(c)中，電容值則與 y 方向感測器數目呈線性關係。我們便利用電容隨感測器延伸串接呈線性關係的性質來預測電容值。

在確認電容隨感測器延伸串接時，非線性效應極小，可以線性方式估計延伸時電容值後。我們以五組：5×5、6×6、7×7、8×8、9×9 為基礎，先各自以 Section 3.2.1 方法建立其無手指的電容模型，其後若遇上不同大小的觸控板再利用此五組結果線性估計，如圖 3.8。

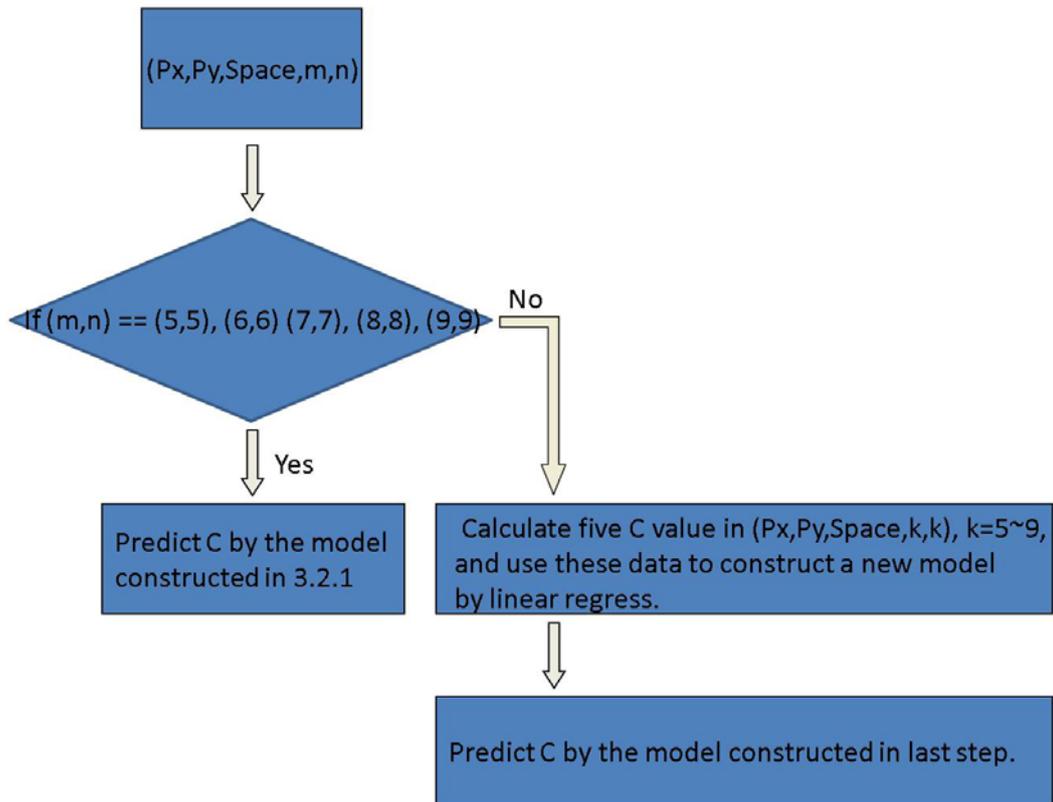
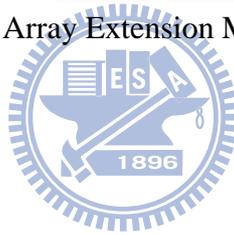


圖 3.8 Array Extension Method.



3.3 W/ Finger Model

由於當手指靠近時，除手指與感測器有感應電容，亦會將原本感測器間互感的電力線吸走，造成感測器互感的降低，如圖 3.9。我們將手指與感測器的感應稱為 *self*，手指對感測器間的影響稱為 *mutual*。

$$\delta C = \overbrace{C_{xk, \text{finger}}}^{\text{Self}} + \overbrace{\sum_{i=1, i \neq k}^m (C_{xk, xi} - C_{xk, xi}')}^{\text{Mutual}}$$

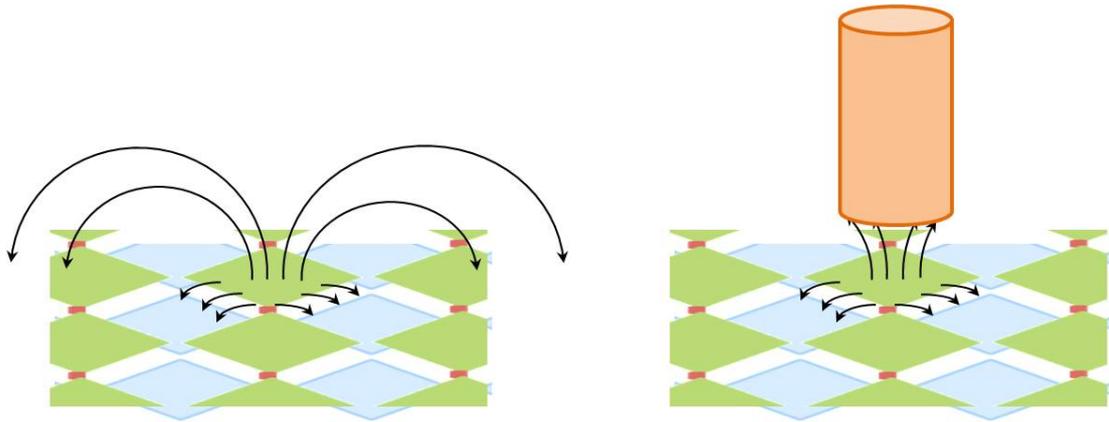


圖 3.9 當手指靠近觸控板時，會將原指向其他感測器的電力線吸走，造成感測器間的感應電容值下降。

在對各種情況的電容建模討論前，我們先說明我們取點的方式。由於我們所欲建模之觸控板其感測器由菱形串接的構造，有其規律性，在單位區域內，如圖 3.10 紅框所示，我們以 1mm 為單位作手指掃動。如 P_x 、 $P_y=6000\mu\text{m}$ 時，x 方向、y 方向各取 4 點，(12000, 13000, 14000, 15000)，總共 16 點。

除手指掃動外，我們還有三個因子： Space 、 fr (手指半徑)、 pitch ，皆作三個位準的取點。其中 $\text{pitch} = P_x = P_y$ 。如表 3.1 所示，共 369 個實驗。

表 3.1 有手指情況所作的實驗

Pitch (um)	Space (um)	Finger Sweep in the unit range (points)
6000	200, 600, 1000	16
5000	200, 600, 1000	16
4000	200, 600, 1000	9

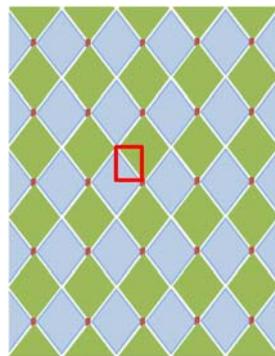


圖 3.10 由感測器佈局的規律性，取單位區域。

3.3.1 Self Capacitance

而描述手指方面，我們將手指簡化爲一圓柱體，以圓心座標(f_x, f_y)、圓半徑 f_r 描述之。由於基本菱形的大小、兩對角線長度都不是固定的，若以 f_x 、 f_y 作爲模型的參數，會受此項變因干擾，如圖 3.11 所示，以 f_x 、 f_y 爲參數所建模型會有很大的誤差。

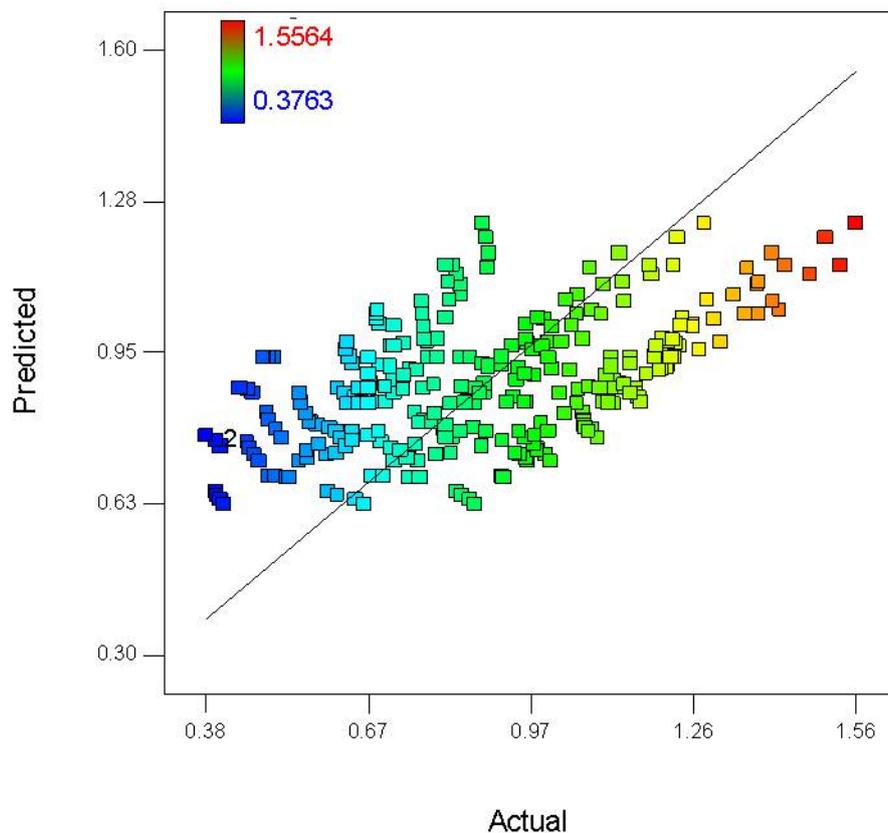
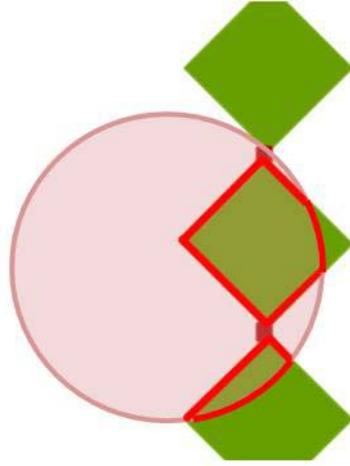
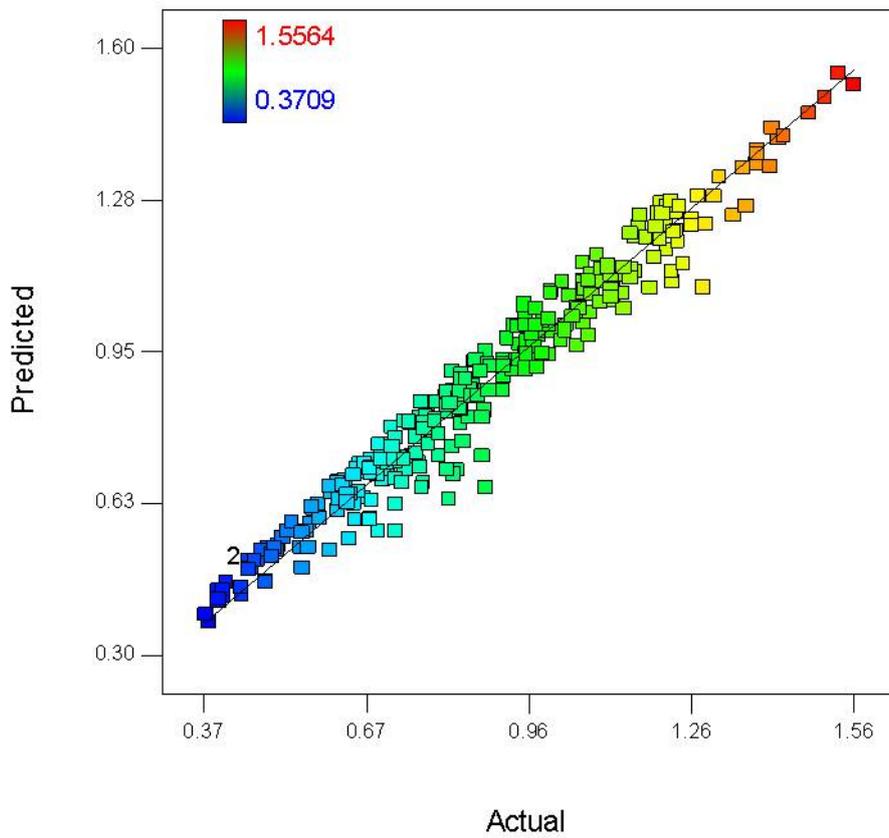


圖 3.11 Actual v.s. Predicted：以 Space、 f_x 、 f_y 作模型參數。

考慮手指與感測器間電容，一部分爲平板電容，另一部分則爲外圍影響，我們遂考慮以手指與感測器重疊的面積、重疊區域的周長爲模型參數，如圖 3.12 所示，其結果明顯較好。進一步考慮手指靠近時將原本走向其他感測器的電力線吸走，而菱形面上出發的電力線需垂直金屬表面則朝正 z 方向，而在菱形邊上出發的電力線由於有切角的關係，其走向並非朝正 z 方向，。於是我們將重疊區域的周長，再分爲：屬於手指圓弧上的的邊長(f_{edge})、屬於菱形邊上的邊長(d_{edge})，如圖 3.12。

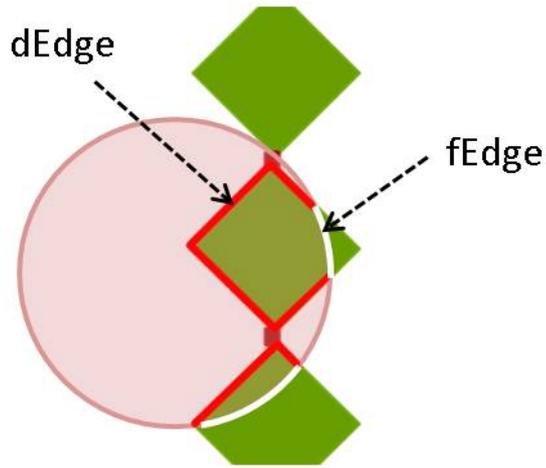


(a) Area 即紅框圍繞區域面積。Perimeter 為兩紅框的總周長。

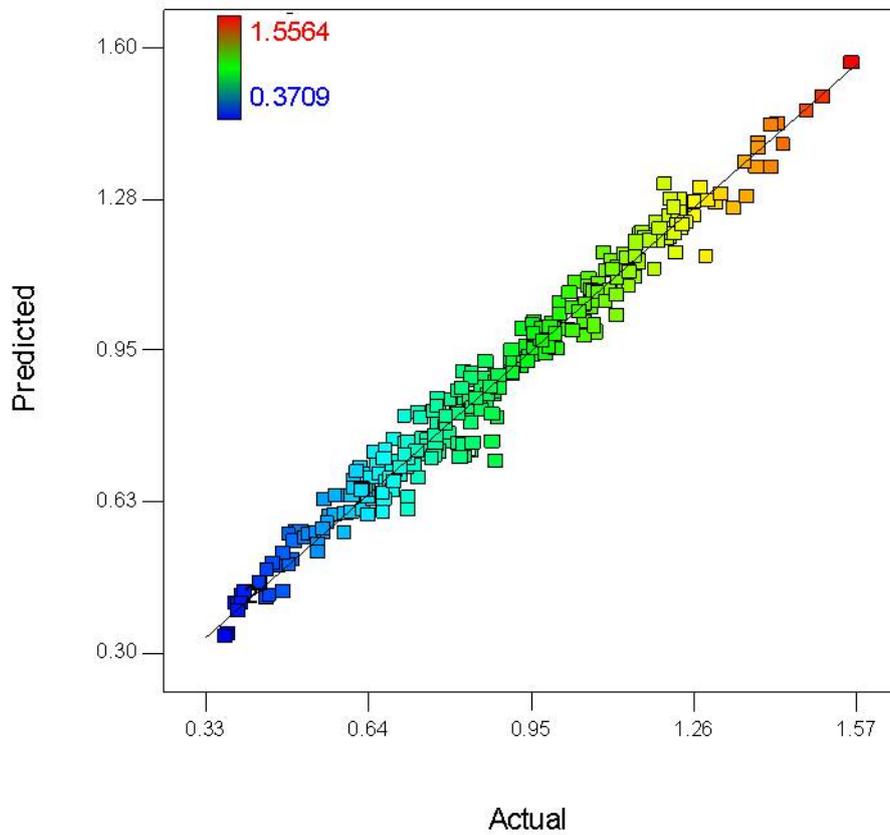


(b) Actual v.s. Predicted

圖 3.12 以 Space、Area、Perimeter 作模型參數。



(a) fedge 為白色弧長。dedge 為紅色線長。



(b) Actual v.s. Predicted

圖 3.13 以 Space、Area、fedge、dedge 作模型參數。

另考慮手指靠近感測器，但未與之重疊的情形，如圖 3.14。

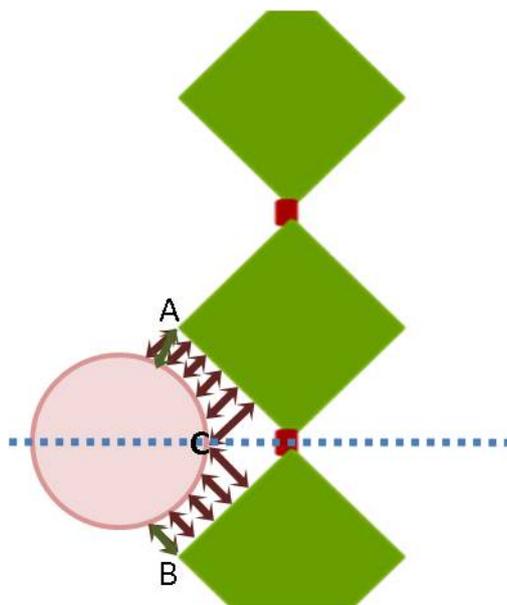


圖 3.14 手指與感測器未重疊時，使用參數：Space、dist1(綠線)、dist2(紅線)描述手指與感測器距離，綠線為其箭頭所指菱形頂點(A、B)與手指的最短距離，紅線為手指投影至菱形邊長之距離。

手指直徑較菱形對角線(串接方向)長時，手指與感測器最短距離為手指到某一菱形的頂點。然而，若手指較小且其最右端(如圖 3.14 中 C 點)，則與感測器的最短距離出現在弧上某點投影至菱形邊。於是我們將這兩種情形各以 dist1、dist2 代表。

3.3.2 Mutual Capacitance

手指影響感測器間互感，我們依據感測器間相對位置分類，shield：感測器與遮避層、orthogonal：x 方向感測器與 y 方向感測器(上層感測器與下層感測器)、parallel：平行方向且相鄰的感測器(同層感測器)。

3.3.2.1 Shield

使用與前節 Self 相同的參數：Space、Area、fedge、dedge。

3.3.2.2 Orthogonal

如圖 3.15，我們將之分成二種情況：(a)手指同時重疊於兩感測器上、(b)手指與其中一條感測器重疊。

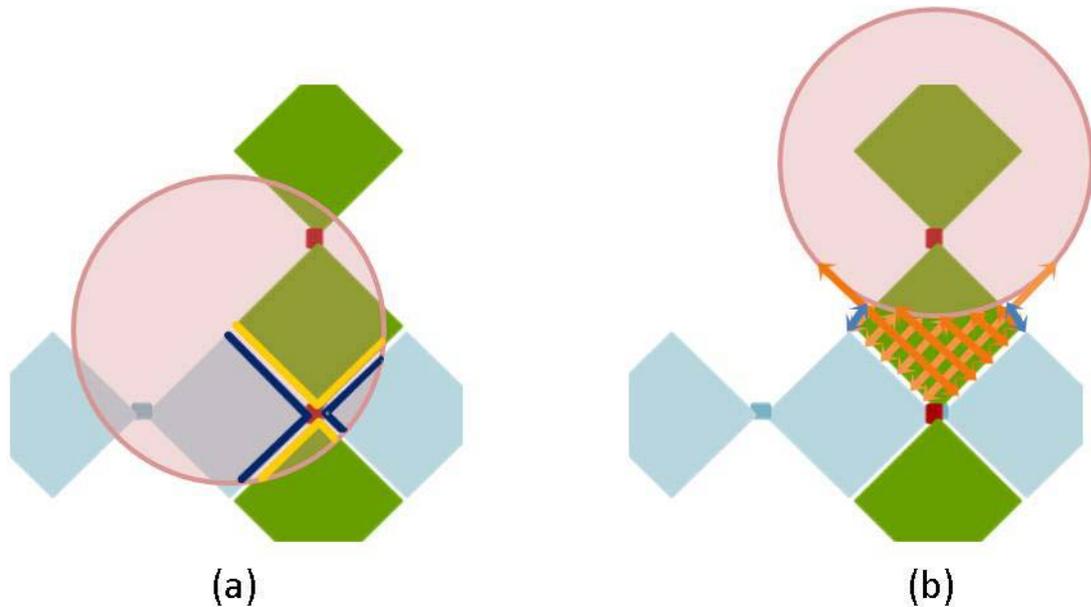


圖 3.15 相互垂直的兩個感測器：

(a)手指同時重疊於兩感測器上。建模參數： $Space$ 、 $Area1$ 、 $Area2$ 、 $edge1$ 、 $edge2$ 。

(b)手指與其中一條感測器重疊。建模參數： $Space$ 、 $Area1$ 、 $dist1$ 、 $dist2$ 。

在(a)情況下，我們用以建模的參數： $Space$ 、 $Area1$ (手指與上層感測器兩菱形重疊面積)、 $Area2$ (手指與下層感測器兩菱形重疊面積)、 $edge1$ (重疊區域內，上層感測器相鄰於下層感測器的邊長，如圖 3.15(a)中的黃色線長)、 $edge2$ (重疊區域內，下層感測器相鄰於上層感測器的邊長，如圖 3.15(a)中的藍色線長)。

在(b)情況下： $Space$ 、 $Area$ (手指與感測器近相鄰處菱形重疊面積)、 $dist1$ (手指與未重疊感測器，相鄰頂點的距離，如圖 3.15(b)藍色線長)、 $dist2$ (手指投影於其未重疊感測器近端邊上的面積，如圖 3.15(b)之橘色區域)。

3.3.2.3 Parallel

如圖 3.16，我們將平行而相鄰的感測器分成三種情況： (a) 手指同時重疊於兩感測器上、 (b) 手指與其中一條感測器重疊。

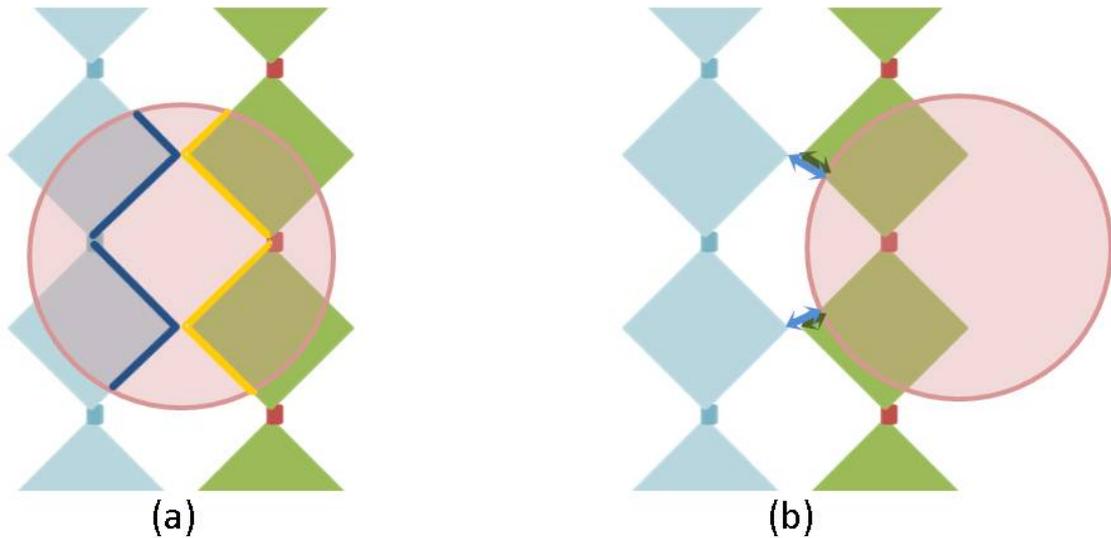


圖 3.16 兩平行相鄰的感測器：

(a)手指同時重疊於兩感測器上。建模參數：Space、Area1、Area2、edge1、edge2。

(b)手指與其中一條感測器重疊。建模參數：Space、Area1、dist1、dist2。

在(a)情況下，我們用以建模的參數：Space、Area1(手指與右感測器重疊面積)、Area2(手指與左感測器重疊面積)、edge1(重疊區域內，右感測器對左感測器相鄰的邊長，如圖 3.16(a)中的黃色線長)、edge2(重疊區域內，左感測器對右感測器相鄰的邊長，如圖 3.16(a)中的藍色線長)。

在(b)情況下：Space、Area(手指與感測器重疊面積)、dist1(手指與重疊之感測器，相鄰頂點的距離，如圖 3.16(b)綠線長)、dist2(手指與未重疊感測器近端邊上頂點距離，如圖 3.16(b)之藍線長)。

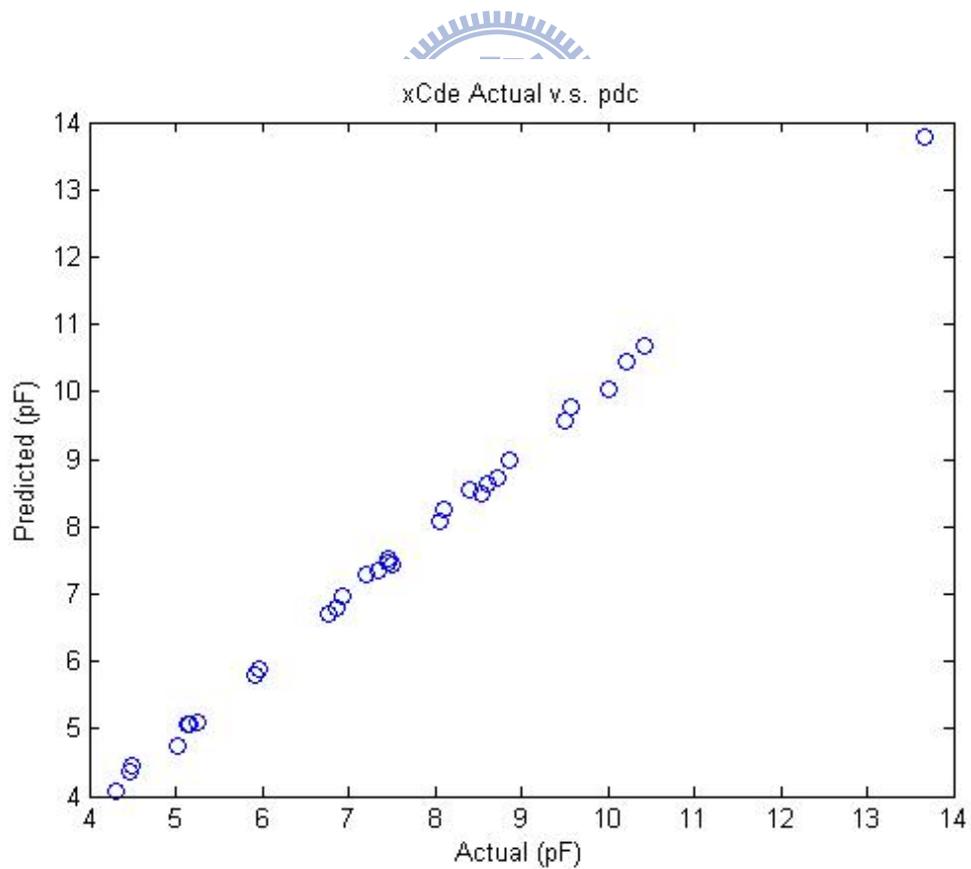
Chapter 4 Model Verification

4.1 W/O Finger Model Result

在 Central Composite Design 中，我們取因子水準於+1、-1、以及 0。在檢查我們的模型時，我們則將因子水準取於+0.5、-0.5、以及 0。共取得 30 點。模型的結果如表 1。圖 4.1 為模擬結果與模型結果的散佈圖。

表 4.1 w/o finger model 與 Q3D 比較

	Bottom Sensor		Top Sensor	
	Actual	Predict	Actual	Predict
Mean	7.5985	7.6082	7.5978	7.6049
Std. Dev.	2.1353	2.2370	2.1361	2.2383



(a)

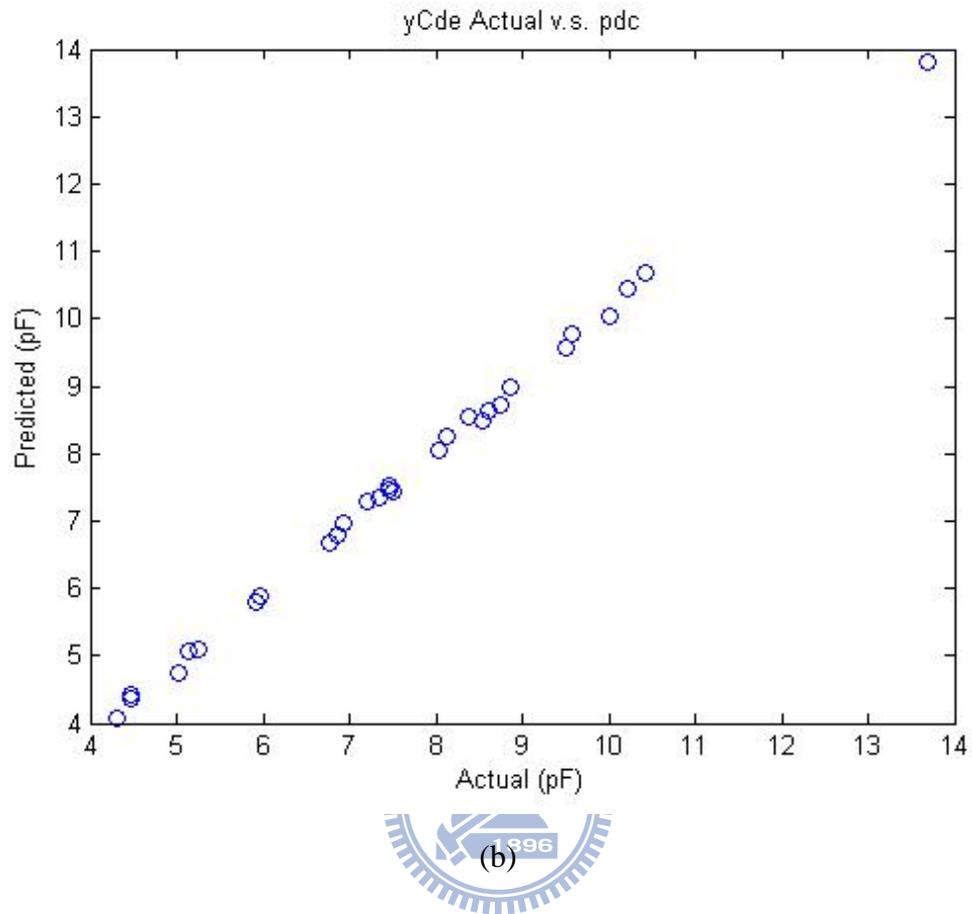


圖 4.1 w/o finger 散佈圖：模擬結果 v.s.模型結果。(a)上層感測器 (b)底層感測器.

4.2 W/ Finger Model Result

Self Capacitance

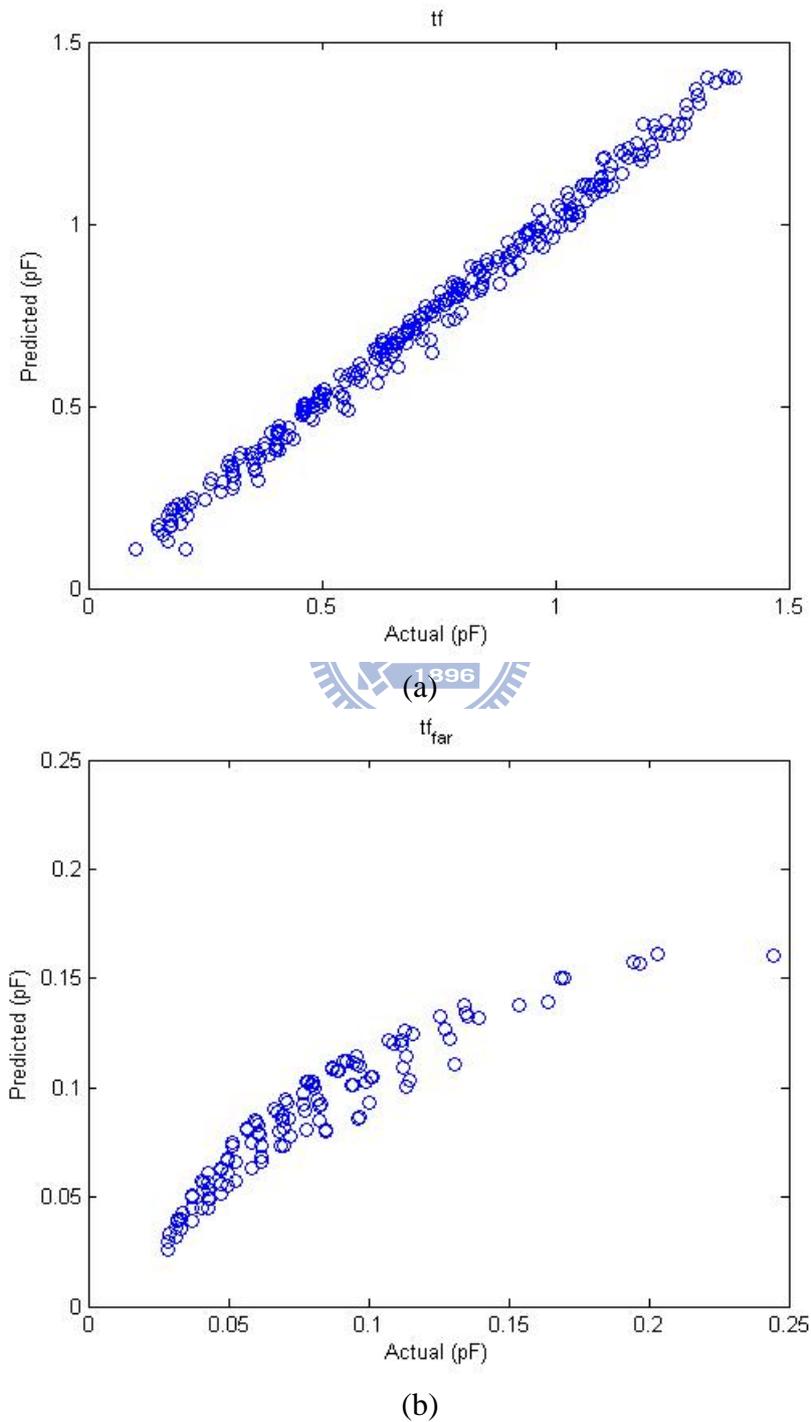


圖 4.2 Self 散佈圖：(a)手指與感測器有重疊。(b)手指與感測器無重疊。

Shield Capacitance

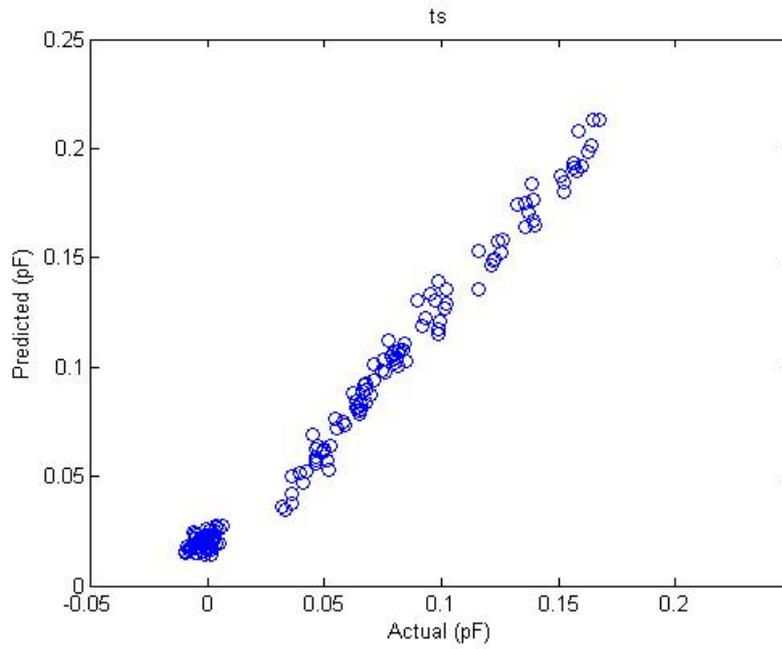
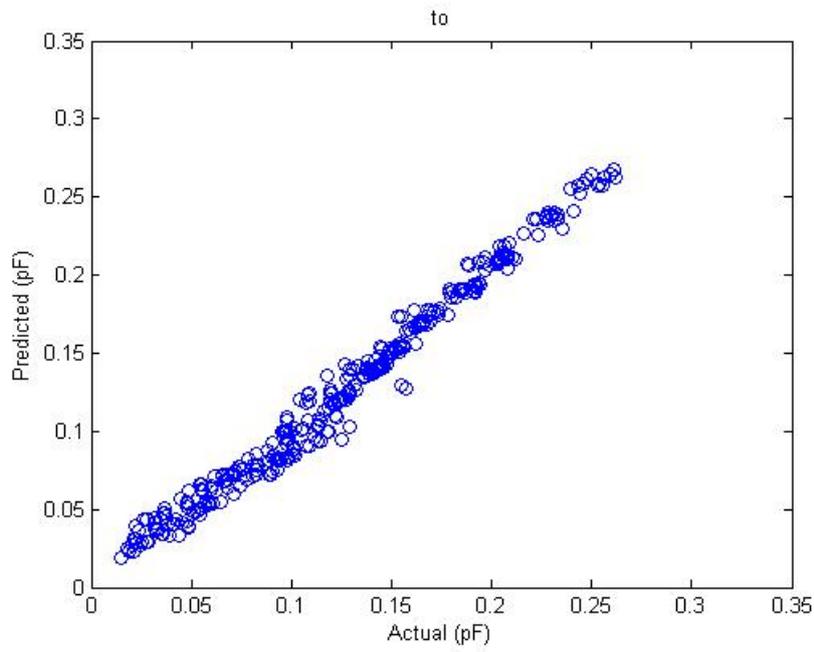
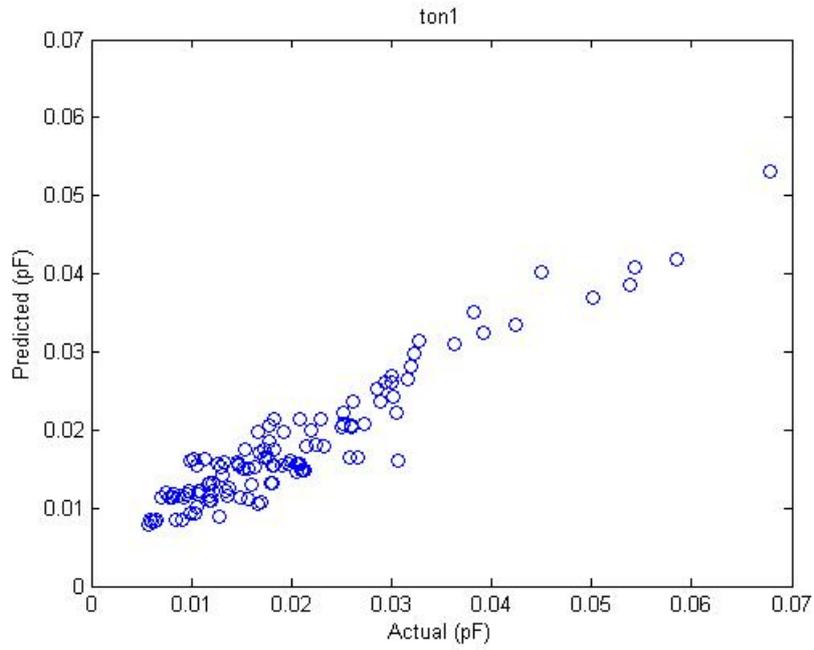


圖 4.3 Shield 散佈圖

Orthogonal Capacitance



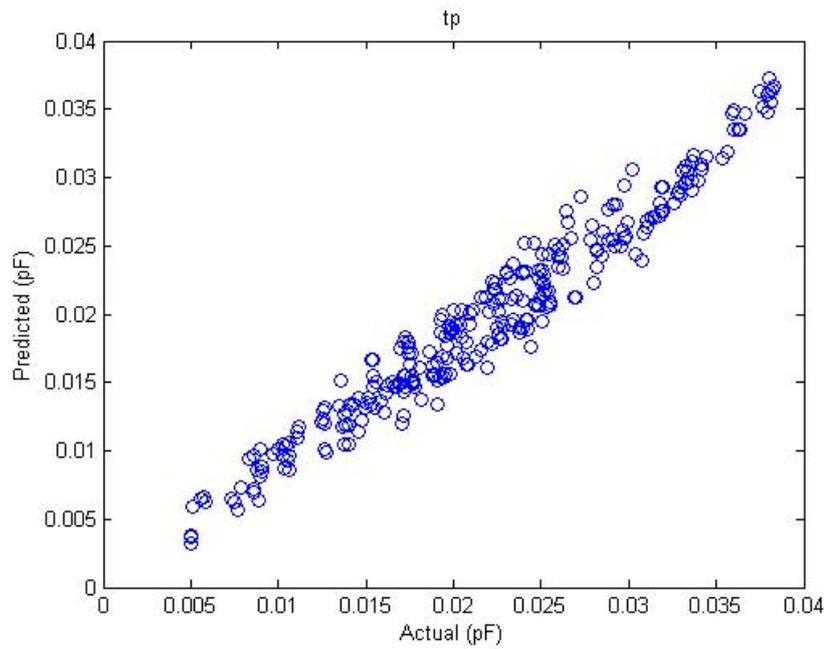
(a)



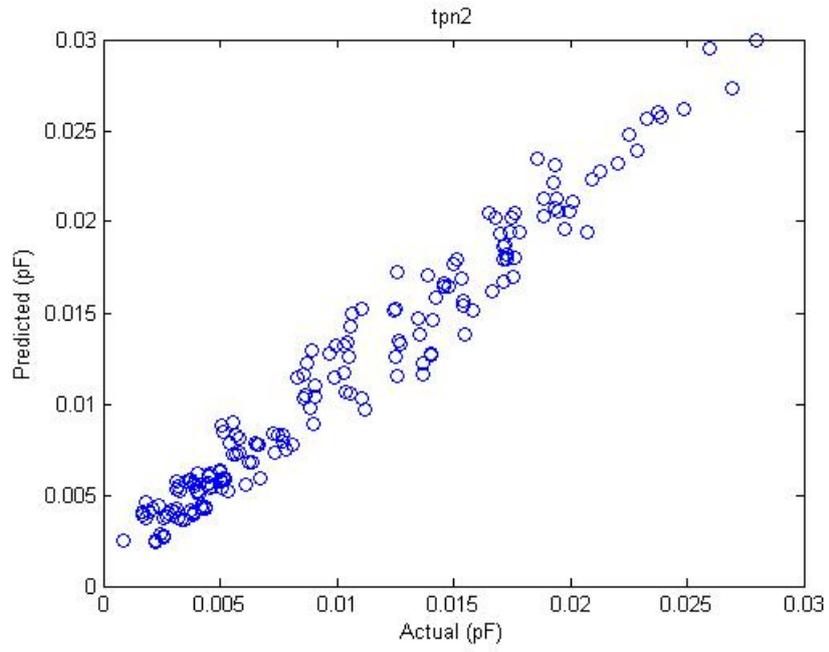
(b)

圖 4.4 Orthogonal 散佈圖：(a)手指與兩感測器皆重疊(b)手指僅與一感測器重疊

Parallel Capacitance

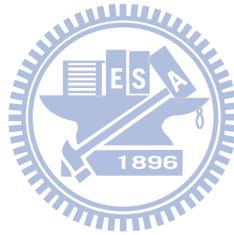


(a)



(b)

圖 4.5 Parallel 散佈圖：(a)手指與兩感測器皆重疊(b)手指僅與一感測器重疊



Chapter 5 Optimization

在觸控板之感測器佈局上，我們希望對靈敏度或線性度做最佳化。可調整的變數： P_x 、 P_y 、以及 $QSpace$ ，是一個多維的問題；另外手指進入時的感應電容雖已知跟 P_x 、 P_y 有關，但我們所建的模型並不直接以 P_x 、 P_y 為參數，這導致我們並不清楚此最佳化問題的曲面特性，因此我們以粒子群最佳化[7]來解此問題。

5.1 Particle Swarm Optimization

粒子群最佳化演算法將個體視為空間中飛行的質點。標準的流程如下：首先隨機初始化一群粒子，並對每個粒子在環境中的適應力做出評價，每個粒子會有其飛行速度，此飛行速度根據其慣性、個體的飛行經驗、群體同伴的飛行經驗，動態的調整。在粒子群飛行的過程中，每個粒子會紀錄自己所經歷過最好的位置，並不斷更新全粒子群經歷過的最好位置。一直到達成結束條件。

5.2 Optimization Result



我們有三個最佳化的例子：調整單一變數滿足敏感度後對線性度做最佳化、調整三變數滿足敏感度後對線性度做最佳化、調整三變數滿足線性度後對敏感度做最佳化。以下將一一陳述。

調整單一變數滿足敏感度後對線性度做最佳化。表 5.1 中，我們將 P_x 、 P_y 設為定值 5500um，調整 $QSpace$ 於區間[283, 1414]，要求在手指半徑等於 4000um 時，敏感度在 0.05 以上，找出此時最好的線性度。結果如表 5.2，其中線性度為 546um。在圖 5.1 中，可發現任何 $QSpace$ 都無法滿足敏感度在 0.0375，於是我們找出最佳敏感度，在 $QSpace$ 等於 1012um 處。

表 5.1 變數範圍與最佳化目標

Variable And Range	283 < $QSpace$ < 1414 $P_x = 5500$ $P_y = 5500$ $fr = 4000$
Criterion	Sensitivity > 0.0375

表 5.2 最佳化結果

QSpace(um)	Px(um)	Py(um)	Sensitivity of Top Sensor	Sensitivity of Bottom Sensor	Linearity(um)
1012	5500	5500	0.0370	0.0394	546

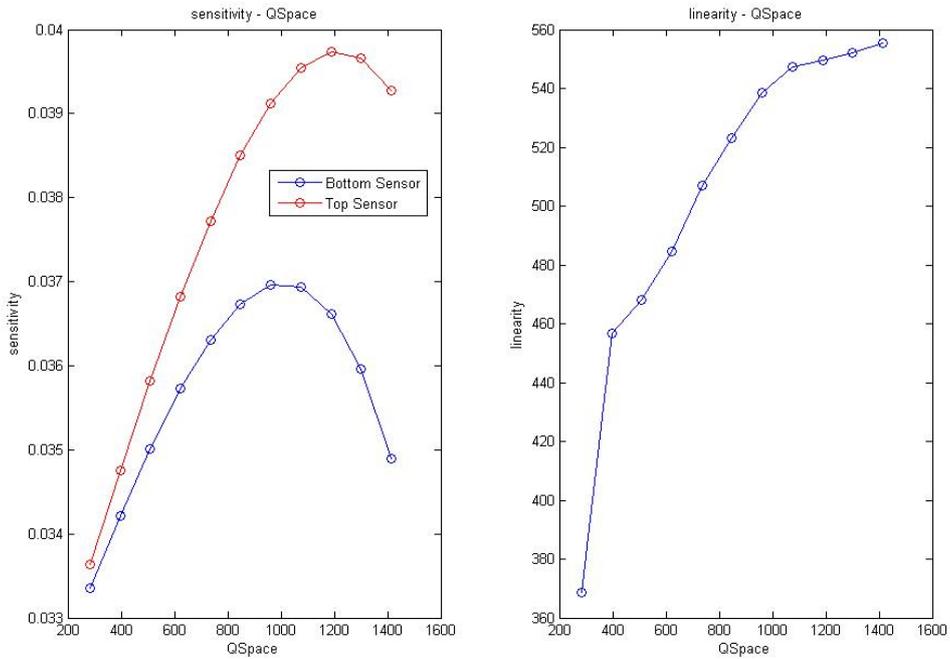


圖 5.1 sensitivity v.s. QSpace、linearity v.s. QSpace

調整三變數滿足敏感度後對線性度做最佳化。表 5.3 中，我們調整 Px 於區間[5400, 5600]、Py 於區間[5400, 5600]、QSpace 於區間[283, 1414]，要求在手指半徑等於 4000um 時，敏感度在 0.035 以上，找出此時最好的線性度。結果如表 5.4，其中線性度為 400um。在圖 5.2 中，可發現 QSpace 在大於約 500um 處皆可符合敏感度要求，而這個例子中，線性度隨 QSpace 越小越好，於是我們找出 QSpace 於 486um 處同時符合每感度要求並有最好的線性度。

表 5.3 變數範圍與最佳化目標

Variable And Range	283 < QSpace < 1414 5400 < Px < 5600 5400 < Py < 5600 fr = 4000
Criterion	Sensitivity > 0.035

表 5.4 最佳化結果

QSpace(um)	Px(um)	Py(um)	Sensitivity of Top Sensor	Sensitivity of Bottom Sensor	Linearity(um)
486	5448	5435	0.0351	0.0359	400.1

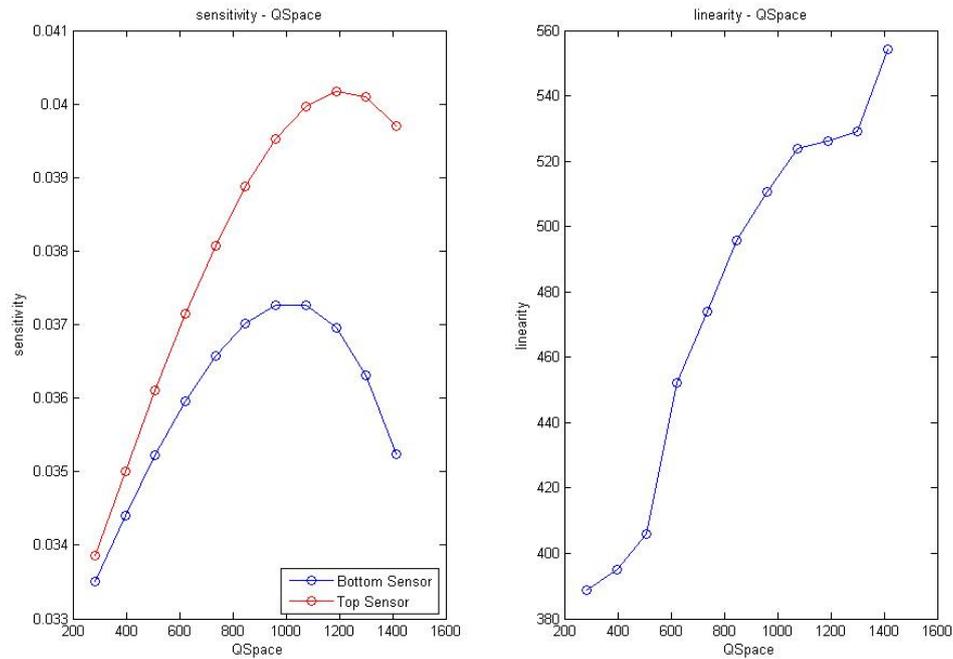


圖 5.2 sensitivity v.s. QSpace、linearity v.s. QSpace

調整三變數滿足線性度後對敏感度做最佳化。表 5.5 中，我們調整 Px 於區間[5400, 5600]、Py 於區間[5400, 5600]、QSpace 於區間[283, 1414]，要求在手指半徑等於 4000um 時，線性度誤差在 550um 以下，找出此時最好的敏感度。結果如表 5.6，其中線性度為 400um。在圖 5.3 到圖 5.5 中，可發現在 Px=5453um，Py=5440um 時，QSpace 在 1300um 以下，可達到線性度誤差<550 的目標，而在此 QSpace 範圍中最好的靈敏度約在 1000um，與結果相符。對 Px，在 QSpace=1038um，Py=5440um 時，Px<5500um 可達到線性度目標。對 Py，在 QSpace=1038um，Px=5453um 時，5420um<Py<5480um 可達到線性度目標。

表 5.5 變數範圍與最佳化目標

Variable And Range	$283 < QSpace < 1414$ $5400 < Px < 5600$ $5400 < Py < 5600$ $fr = 4000$
Criterion	Linearity < 550

表 5.6 最佳化結果

QSpace(um)	Px(um)	Py(um)	Sensitivity of Top Sensor	Sensitivity of Bottom Sensor	Linearity(um)
1038	5453	5440	0.0372	0.0398	525

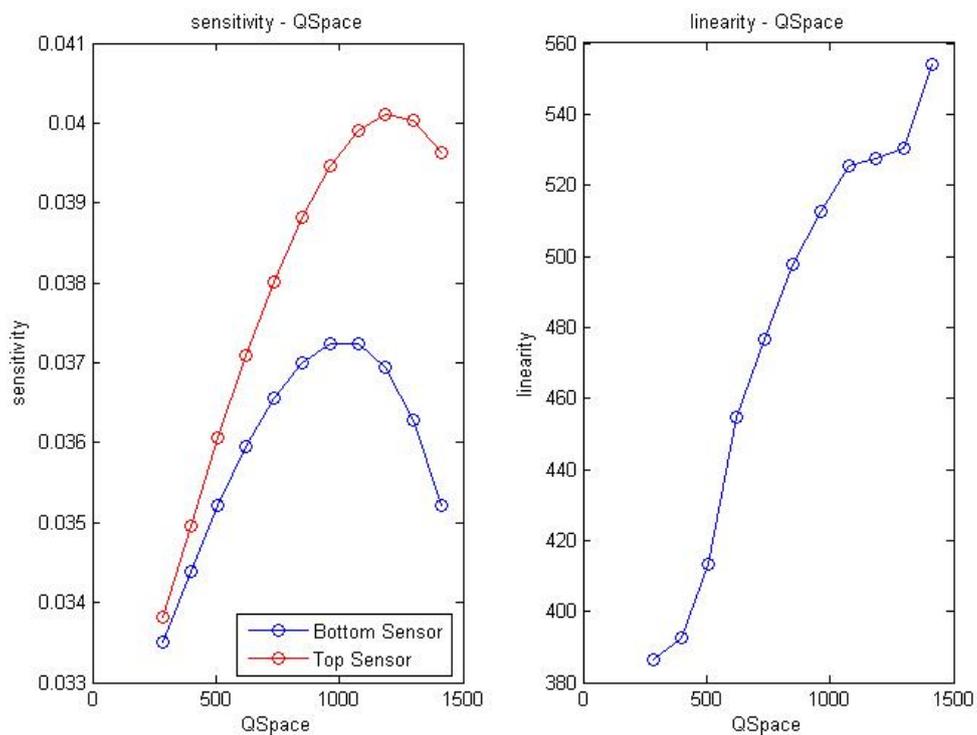


圖 5.3 sensitivity v.s. QSpace 、 linearity v.s. QSpace

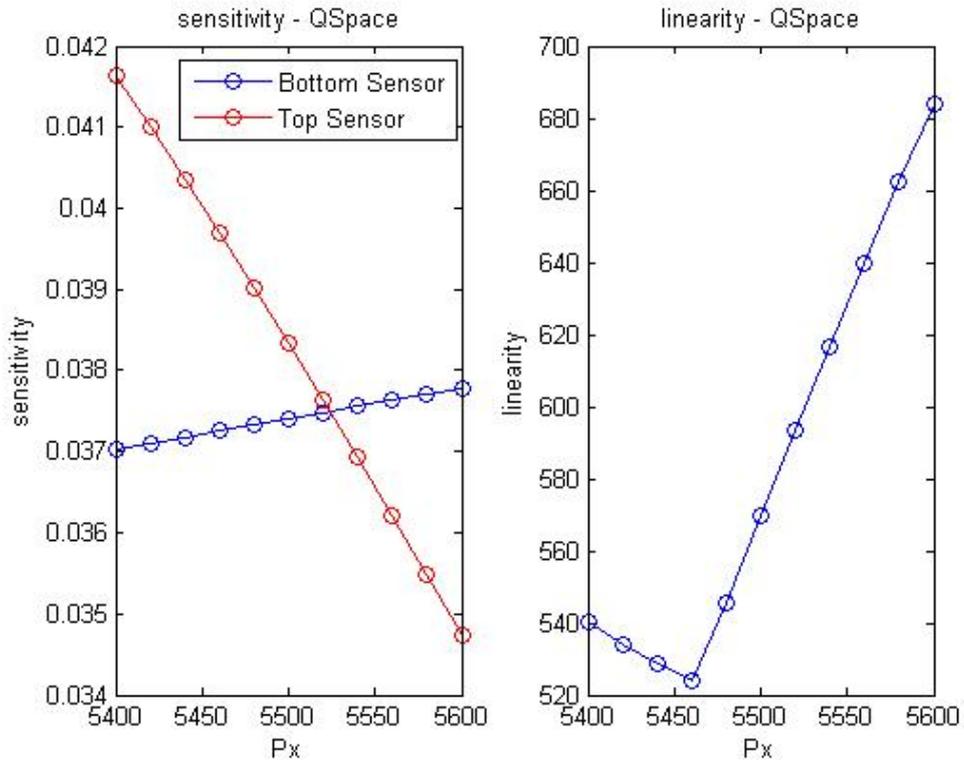


圖 5.4 sensitivity v.s. P_x 、 linearity v.s. P_x

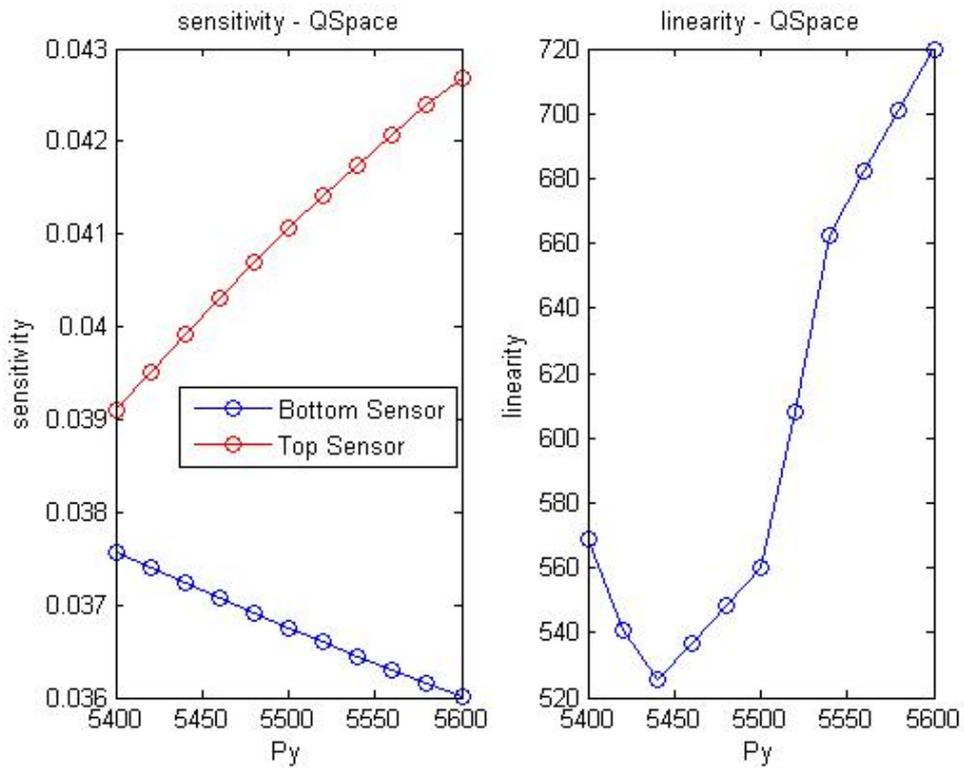


圖 5.5 sensitivity v.s. P_y 、 linearity v.s. P_y

Chapter 6 Conclusions and Future Work

本篇論文中，我們利用 Ansoft Q3D 7.0 為電容萃取工具，將電容式觸控板二分為沒有手指(固有電容)、有手指(感應電容)，對固有電容，以中央合成設計建立二階反應曲面模型，對感應電容，先將描述觸控板感測器佈局、手指的參數作變數轉換，以此新變數建立感應電容的二階反應曲面模型，可提升對感測器佈局結果的預測效率。最後，利用此模型，我們針對觸控板的靈敏度與線性度，做感測器佈局的最佳化。

在第三章中，我們對感應電容的實驗設計，是在規律的感測器佈局上在單位區域內以固定間格掃動手指的位置。然而以中央合成設計看感應電容的實驗設計，轉換變數，如：重疊面積、重疊區域周長……等，並非獨立變數，使實驗設計無法自在的取極值、中心值的組合。感應電容實驗設計是否可以找到更有效率的方式，可以進一步討論。

本論文以改變感測器佈局的方式最佳化觸控板的線性度。然而，處理器在讀取感測器電容後減去其背景值，此背景值的大小亦會影響觸控板的線性度。利用這個性質，設定背景值時僅考慮感測器雜訊，而在數位電路部分設定一個新變數，此變數可以是正數或負數，較背景值更靈活。由於不同的手指大小有對應適合的變數值，若觸控板可知目前使用者手指大小，即可動態調整此變數值。

參考文獻

- [1] LK. Baxter, *Capacitive Sensors Design and Applications*, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, 1997.
- [2] K. Nabors and J. White (1991). "FastCap: a multipole accelerated 3-D capacitance extraction program." *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems* 10(11): 1447-1459.
- [3] Le Coz, Y. and R. Iverson (1992). "A stochastic algorithm for high speed capacitance extraction in integrated circuits." *SOL. ST. ELECTRON.* 35(7): 1005-1012.
- [4] R. H. Myers and D. C. Montgomery, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiment*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002
- [5] Engineering Statistics Handbook [Online]. Available: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook>
- [6] A. Kahng and R. Topaloglu (2008). "DOE-Based Extraction of CMP, Active and Via Fill Impact on Capacitances." *Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on* 21(1): 22-32.
- [7] J. Kennedy, and R. C. Eberhart. (1995). Particle swarm optimization. *Proc. IEEE Int'l. Conf. on Neural Networks, IV*, 1942–1948. Piscataway, NJ: IEEE Service Center.