

國立清華大學 電機工程學系  
實作專題研究成果報告

Adaptive beamforming technology for  
flexible ultrasound array patches:  
simulation study

適用於軟性超音波陣列貼片之可適性  
波束成形技術: 模擬研究

專題領域： 系統領域

組 別： B445

指導教授： 李夢麟

組員姓名： 林宸羽、邱燁駿

研究期間： 113年 3月 5日至 113年 11月 22日止，共 8 個月

## Abstract

In recent years, advancements in technology and increasing demand have driven the development of flexible ultrasound array patches, bringing 24-hour wearable ultrasound imaging closer to realization. This innovation offers new possibilities for continuous health monitoring. Unlike traditional rigid ultrasound probes used in clinical settings, flexible ultrasound patches are designed with soft materials that adjust their curvature in response to human movements or postural changes. This characteristic makes it challenging to directly apply conventional ultrasound imaging techniques. Specifically, traditional Delay-and-Sum (DAS) beamforming methods cannot accommodate the geometric shifts caused by changes in curvature, resulting in the loss of delay calculation reference points. This leads to degraded imaging quality, making it impossible to produce high-resolution and stable ultrasound images.

To address this challenge, we conducted a series of simulation experiments using the ultrasound simulation software tool Field II. In the MATLAB environment, we first defined the geometric configurations of the ultrasound probes and selected different array types based on research requirements, including Linear Arrays and Convex Arrays. We simulated the process of pulse waveform emission by the probes and set spatial positions and dimensions for target objects to replicate real-world clinical scenarios. Subsequently, we generated and received ultrasound data (Channel Data) and used the DAS algorithm to perform beamforming, ultimately producing the corresponding imaging results.

During the research process, we initially used a Linear Array to simulate and generate an idealized reference image, serving as the benchmark for evaluating image quality in subsequent steps. We then conducted simulations using a Convex Array, which better resembles the design structure likely to be adopted by future flexible patches. For the Channel Data obtained from the Convex Array, we further employed autocorrelation analysis and aimed to incorporate JAX to accelerate the optimization process, enhancing image resolution and stability. Preliminary results indicate potential, but improvements in image clarity and clinical applicability are still needed to achieve more efficient and stable imaging with flexible ultrasound patches.

## 摘要

近年來，隨著科技的進步與需求的提升，軟性超音波陣列貼片的開發使 24 小時隨身穿戴式超音波影像技術愈發接近實現。這種技術的出現為持續性的健康監測提供了新的可能性。然而，與傳統臨床使用的硬性超音波探頭不同，軟性超音波陣列貼片因其柔軟的材質設計，會隨著人體的動作或姿態改變而改變其曲率大小，這種特性使得傳難以直接應用統超音波成像技術。具體而言，傳統基於 Delay-and-Sum 的波束成像技術無法適應貼片曲率變化所導致的幾何位置偏移，從而失去了延遲計算的基準點，進一步影響了成作品質，無法生成高解析度且穩定的超音波影像。

為了解決這一挑戰，我們使用超音波模擬系統的軟體工具 Field II，進行了一系列的模擬實驗。在 MATLAB 環境中，我們首先定義了超音波探頭的幾何形狀，並根據研究需求選擇了不同的陣列類型，包括線性陣列（Linear Array）和凸形陣列（Convex Array）。我們模擬了探頭髮射脈衝波形的過程，同時設置了超音波目標物的空間位置和目標物大小，這些參數的設定旨在模擬臨床場景中的真實應用情境。接著，我們生成並接收了超音波數據（Channel Data），並利用 Delay-and-Sum 算法對接收到的數據進行波束成像計算，最終生成出對應的影像結果。

在研究過程中，我們首先使用線性陣列模擬生成了一幅理想化的基準圖像，該圖像作為後續評估成作品質的參考標準。隨後，我們利用凸形陣列進行模擬，這一陣列形狀更接近於未來軟性貼片可能採用的設計結構。針對凸形陣列接收到的 Channel Data，我們進一步採用自相關方法(autocorrelation)進行分析，並希望結合 JAX 加速優化流程，提升影像解析度與穩定性。初步結果顯示方法具備潛力，但成像清晰度與臨床應用性仍有待改進，以實現更高效且穩定的軟性貼片成像技術。

# 目錄

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| 1. 研究背景與動機 .....                      | 1 |
| 2. 研究目的.....                          | 1 |
| 3. Research Methodology .....         | 1 |
| 3.1. DAS beamforming .....            | 1 |
| 3.1.1. 訊號發射與接收 :.....                 | 1 |
| 3.1.2. 延遲計算 :.....                    | 2 |
| 3.1.3. 延遲復原與加總 :.....                 | 2 |
| 3.2. Simulation tool : Field II ..... | 3 |
| 3.3 JAX : .....                       | 4 |
| 3.3.1 自動微分與梯度計算 :.....                | 4 |
| 3.3.2 JIT 編譯優化運算速度 :.....             | 5 |
| 3.3.3 優化器與超音波陣列形狀更新 :.....            | 5 |
| 4. Experimental Results.....          | 5 |
| 4.1 貼片無形變的成像結果 (理想情況) :.....          | 5 |
| 4.2 優化形變貼片的成像結果 :.....                | 5 |
| 5. Conclusion .....                   | 7 |

# 1. 研究背景與動機

隨著科技的進步與健康監測需求的提升，24 小時隨身穿戴式超音波影像技術的實現變得愈加可行，其中軟性超音波陣列貼片的開發更是其中的關鍵突破。相比傳統硬性超音波探頭，軟性貼片因其柔軟材質設計，能更好地適應人體表面，但也帶來了新的挑戰。由於貼片曲率會隨人體動作改變，傳統的 Delay-and-Sum 波束成像技術難以處理這種幾何位置的動態變化，導致影像解析度下降且不穩定。為了應對這些挑戰，研究如何改進波束成像技術以適應軟性貼片的特性，對於實現高解析度、穩定的超音波影像具有重要意義。

# 2. 研究目的

本研究旨在針對軟性超音波貼片開發適應其曲率變化的波束成像方法。我們通過使用 Field II 模擬軟體進行超音波成像模擬，分析不同幾何形狀陣列的成像特性，並結合 JAX 技術優化運算過程，探索提高影像解析度與穩定性的方案。最終目標是為軟性貼片設計提供技術支持，實現能適應人體動態特性的高效成像技術。

# 3. Research Methodology

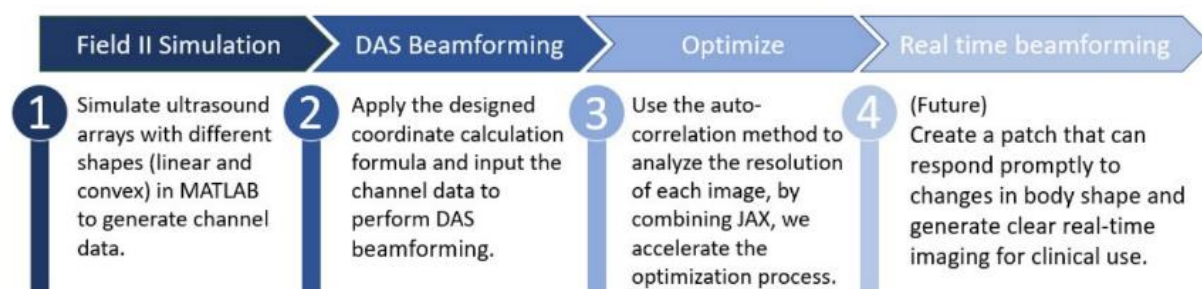


Fig. 1-1 研究流程圖

## 3.1. DAS beamforming

DAS (delay-and-sum) beamforming，是一種廣泛應用於超音波、雷達和聲納等成像系統中的波束成形技術。DAS 透過將來自不同探測元件的信號延遲後相加，將訊號聚焦，以獲得高品質的影像。具體步驟如下：

### 3.1.1. 訊號發射與接收：

貼片發射平面波脈衝 (ex:sine impulse, gauss impulse)，打向目標物，並接收碰觸目標物散射回彈的訊號，形成 channel data。貼片接收到的訊號有著相同的波型 (發射波型)，但因回彈路徑不同造成延遲也不相同。

### 3.1.2. 延遲計算：

貼片發射與接收訊號的範圍為一個平面，我們可以將其當成一個 x-z 平面 (width & depth)，座標化目標物與貼片的距離，並進行延遲計算。

$$\text{Delay} = \frac{\|(Z_{\text{pixel}} - Z_{\text{element}})^2 + (X_{\text{pixel}} - X_{\text{element}})^2\|}{\text{sound speed}}$$

因為實驗中模擬的貼片形狀為彎曲型，凹口朝向目標物，因此貼片座標計算無法使用傳統 DAS 成像技術的方法(x 座標水平計算；z 座標當0)。而是以曲率半徑做一個圓弧，接著標出貼片上的每個 traneiver 的極座標，接著轉成直角座標當成每個 traneiver 的 x、z 座標。

$$x = R_{\text{con}} * \cos\left(\left[\frac{-\pi}{2} - \frac{\text{length}}{2 * R_{\text{con}}} + \frac{\text{length}}{R_{\text{con}}} * \frac{i_{\text{element}}}{N_{\text{element}} - 1}\right]\right)$$

$$z = R_{\text{con}} * \sin\left(\left[\frac{-\pi}{2} - \frac{\text{length}}{2 * R_{\text{con}}} + \frac{\text{length}}{R_{\text{con}}} * \frac{i_{\text{element}}}{N_{\text{element}} - 1}\right]\right) + R_{\text{con}}$$

( $R_{\text{con}}$  為彎曲貼片的曲率半徑；length 為貼片的總長度；

$N_{\text{element}}$  為貼片上的 traneiver 總數量； $i_{\text{element}}$  為計算中的第 i 個 traneiver)

目標物座標與貼片座標間的距離，除上聲速，即為該目標點的預期延遲。因實際情況中目標物屬於未知，我們是根據掃出來的影像來判斷，所以延遲的計算與復原是以建立的 x-z 平面的每個座標點與貼片 traneiver 座標進行計算。

### 3.1.3. 延遲復原與加總：

我們得到的 channel data 為時間軸，裡面為訊號的大小。將 x-z 平面每個座標點對應的延遲復原回去，將其加總即可將訊號聚焦，產生出高品質影像。

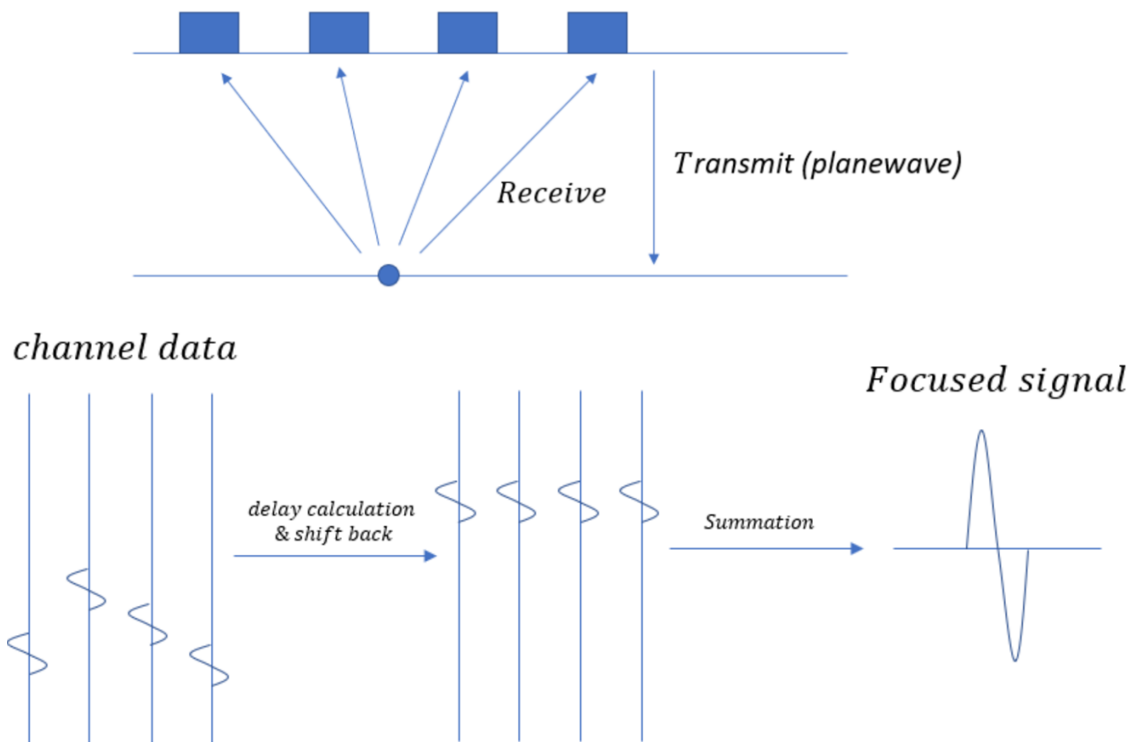


Fig. 2-1 Delay and Sum 示意圖

### 3.2. Simulation tool : Field II

Field II 是一個在 matlab 運行的程式，它可以計算大量 transceiver 發射、接收訊號 (瞬間或連續) 的情形，因此用於超音波模擬。

模擬時要先進行參數的設置，以下為本組模擬時設置的參數：

1. **中心頻率**  $f_0 = 3\text{MHz}$ ，超音波頻率越高解析度越高，穿透深度下降；頻率越低穿透深度提升，但解析度降低，3MHz 屬於低中頻段，適合穿透較深的組織（如腹部和心臟）同時保持一定的解析度。
2. **採樣頻率**  $f_s = 100\text{MHz}$ ，要有效採樣，須滿足 Nyquist Sampling Frequency ( $f_s > 2f_0$ )，讓  $f_s$  遠高於  $f_0$  能精確定位回波信號的到達時間。
3. **聲速**  $c = 1540\text{m/s}$ ，在人體不同組織中，聲速有小幅變化，而 1540m/s 是一個標準假設值，若聲速設定不正確，會導致焦點偏移或圖像失真。
4. **波長**  $\lambda = c / f_0$ ，波長是由聲速和頻率決定。
5. **element width**  $= \lambda$ ，element width 與波長相等，可提高指向性，減少旁瓣 (sidelobe) 效應。
6. **element height**  $= 5\text{mm}$ ，過小的高度會導致波束過寬，影響橫向解析

度，高度 5 mm 常用於一般超音波換能器，提供合理的聲束聚焦

7. **element 間距**  $kerf = width / 20$ ， $kerf$  過大會增加旁瓣，但太小會增加製造難度。
8. **焦點**  $focus = [0, 0, 10\text{ m}]$ ，要做的模擬無法聚焦特定位置，故將焦點設大。
9. **element 總數量**  $N_{elements} = 128$ ，陣列中 element 數量越多，波束方向性越好，但計算量增加。128 是 array 的常用數量，兼顧性能與成本。

模擬分為兩個部分，理想成像以及要處理的模糊成像。模擬理想的成像，貼片為水平形狀 (linear array)，聚焦無窮遠，發射脈衝為 sine impulse，打向目標再接收訊號。利用 Field II 的 `calc_scat_multi` 函式可以直接得到貼片 channel data，再將得到的 channel data 輸入到我們撰寫的 DAS beamforming code 做成像。

接著則是模擬軟性貼片會遇到的情況，也就是形變，我們是以凸型貼片 (convex array) 模擬，發射接收貼片皆為凸型，一樣是將 channel data 帶入到我們撰寫的 DAS beamforming code 做成像。但這時因 DAS 的延遲是以水平貼片計算，所以在復原加總的過程訊號沒辦法完全聚焦，產生出的影像也會有模糊的情形。

### 3.3 JAX :

JAX 是一個專為高效數值計算和機器學習設計的 Python 函式庫。JAX 主要的特色在於它能夠在 CPU、GPU 和 TPU 等多種硬體上進行加速運算，並且支持自動微分、自動向量化和 Just-In-Time (JIT) 編譯，能將 Python 程式碼轉化為高效的低階運算，尤其適合深度學習、數值優化等場景。

在這個專題中，我們使用 JAX 來加速 Delay-and-Sum beamforming 與探頭形狀優化的過程。具體使用方式如下：

#### 3.3.1 自動微分與梯度計算：

我們利用 JAX 的 "grad" 函數來計算 loss function 的 gradient。透過這個 gradient，我們可以更新超音波陣列的探頭位置，以最小化 loss function，使得最終成像效果更加精確。

### 3.3.2 JIT 編譯優化運算速度：

我們使用 JAX 的 "jit" 函數將數值運算進行 JIT 編譯，特別是在優化過程中的 loss function 與 gradient 計算，這樣的編譯顯著提高了多次重複計算時的運算效率，進而提高運算速度。

### 3.3.3 優化器與超音波陣列形狀更新：

在探頭形狀的優化過程中，我們使用 optax 內的 Adam 進行優化。Adam 是一個優化演算法，我們選擇此優化器的原因是因為它能適應不同 learning rate，且能適應 gradient 變化頻繁和變化穩定的狀況，進而根據 gradient 進行探頭形狀更新，使相位誤差下降，換句話說，可以使 loss function 降低，逐漸收斂，進而達到趨近真實的貼片形狀。

## 4. Experimental Results

### 4.1 貼片無形變的成像結果 (理想情況)：

當貼片為水平形狀時，貼片 transceiver 座標位置與 DAS 座標計算公式算出的座標相同，延遲計算最為精準，訊號最為集中，auto-correlation 值最高，產生的影像解析度也最佳 (linear auto correlation =  $6.6746 \times 10^{-32}$ )

### 4.2 優化形變貼片的成像結果：

用於模擬的 convex array，其曲率半徑為 0.06 m。當用於 DAS 座標計算公式的  $R_{convex}$  越精準 (接近模擬的 convex array 曲率半徑)，延遲計算會越精準，訊號也會越集中，預期 auto-correlation 值會越高，影像解析度也越佳。

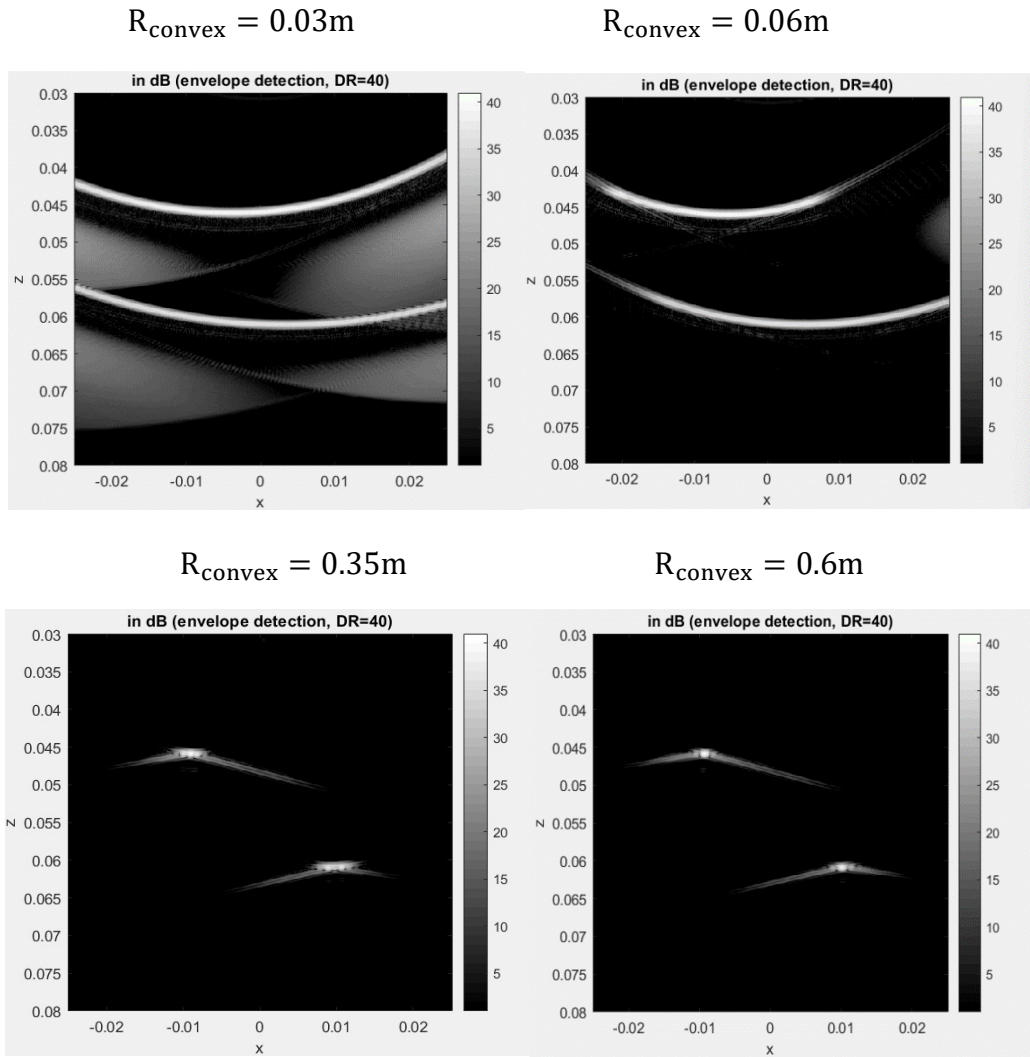


Fig 4-1 Beamformed image of different  $R_{convex}$

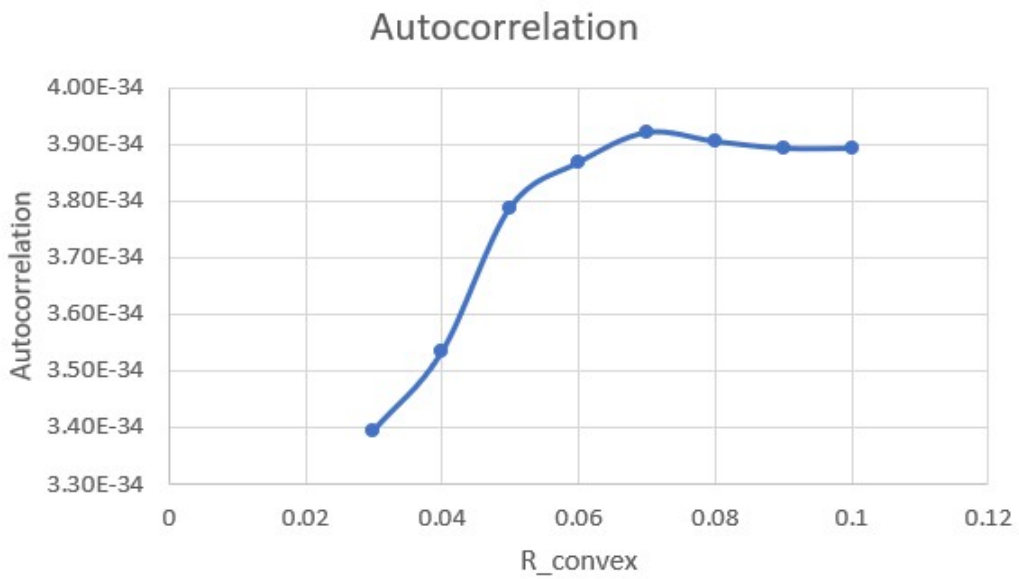


Fig. 3-6 Autocorrelation v. s.  $R_{convex}$  趨勢圖

從趨勢圖可以看出， $R_{\text{convex}}$  小於 convex array 設定的曲率半徑時，auto correlation 會隨著  $R_{\text{convex}}$  增加而快速增加，當  $R_{\text{convex}}$  與 convex array 的曲率半徑相差不大時，auto correlation 會達到高峰，隨後漸漸下降。auto correlation 越高，代表訊號強度越高，即為在相同的發射訊號下，訊號越集中，因此圖片的解析度也會越佳。所以我們假設較高的 auto correlation 會帶來更好的波束形成效果，因此對 auto correlation 進行優化。但是在呈現的影像中，圖片的解析度卻沒有與 auto correlation 呈現正相關，推測應為成像參數未調整完善有關。

## 5. Conclusion

本次研究為結合機器學習與常用成像技術開發的新型成像技術，可以應用在未來的醫學治療，有重要意義。我們為傳統的 DAS 成像技術設計新的 x、z 座標計算公式，並將成像後得到的 channel data 引入 python，利用 auto-correlation 作為優化迭代的參數以及 JAX 加速優化過程。但在最終結果的呈現上，並不符合我們的預期，當 DAS x、z 座標公式計算出作為基準點的 x、z 座標與貼片的座標最接近時，成像解析度應為最佳，auto-correlation 的值也會達到最高。但實際上 auto-correlation 的確達到高峰，產生的成像卻相當模糊，解析度甚至比未優化的成像還差。

新型成像技術有相當的潛力，後續研究會著重於解決成像問題，並持續改良用於 DAS 中的 x、z 座標計算公式。可以做為 DAS 優化的參數還有 speckle brightness、phase error 等，不同參數的優化效果也會有區別。本次研究會持續開發，提升新型成像技術的正確性與完整性，讓貼片有不同的形變時也能有清晰的影像。

## 6. Review and reflection

參與專題是大學生涯中最具挑戰性且最具成就感的一次經歷。相較於課程中的期末專案，專題的難度與複雜度大大提升，所需的前置準備與知識學習也更為龐大。專題並非按照傳統課程設計，由老師一步步教導基礎知識，而是需要我們主動學習，自己探索相關領域的知識，閱讀大量論文，並將學到的理論付諸實踐。這種從零開始的過程雖然困難重重，但也帶來了寶貴的學習機會與成長。

本組專題內容聚焦於結合機器學習與傳統成像技術，開發應用於生醫影像中的新型成像技術。初次接觸生醫相關知識會感到相當陌生，我們必須從基礎開始學習。例

如專題中的 Delay-and-Sum (DAS) Beamforming，這是一種廣泛應用於超音波成像的技術，能將多路訊號聚焦到目標點上，生成高品質的影像。在傳統方法中，DAS 基準點計算方法需要固定的參考點，但應用於軟性貼片時，由於貼片會隨著人體動作而變形，原本的基準點失去效用，因此無法清晰成像。

為了解決這一問題，我們嘗試結合機器學習技術，設計出一種全新的 DAS 座標計算公式，利用優化迭代的方式來動態更新基準點。我們引入了自相關 (auto-correlation) 作為影像品質的評估指標，並將 JAX 整合進來加速計算。在專題過程中團隊經常遇到理論與實踐不符的情況，有些方法在實驗中行不通，但我們沒有因此氣餒，而是反覆調整與改進，將不可行的路徑逐一排除。這個過程不僅提升自主學習能力，也讓我們學會在面對困難時保持穩定心態，嘗試以多角度解決問題。除了技術層面的學習與應用，我們也體會到合作的重要性，我們定期開會檢討進度，並相互分享自己的研究成果和心得，這樣的團隊合作不僅提高了效率，也讓我們在技術上有了更多的突破。

雖然專題的最終成果仍有未竟之處，例如我們發現 auto-correlation 的值達到高峰時，影像解析度卻不如預期清晰。但這並未減損我們對專題的熱情與信心。相反地，這些問題為我們後續的研究提供了方向。未來我們計畫繼續改進 DAS 座標公式，並探索其他影像品質優化指標，例如 speckle brightness 和 phase error 等，進一步提升成像技術的準確性與穩定性。這次經歷將成為未來科研工作的重要基石，無論是技術上還是心理上，都是一次寶貴的累積。