

Simulation Design of a Wearable Ultrasonic Bladder Volume Estimator

可穿戴式超音波膀胱尿量估計器之模擬設計

組別：A109

指導教授：李夢麟

組員姓名：簡瑞萱、張蘭云

Abstract

適時的排尿對於一般人來說是再正常不過的事，但對於老年人或是得到某些疾病的人來說可能就不是一件容易的事，這時就會需要藉由一些輔助的儀器來幫助他們，像是測量餘尿量來了解是否有把尿排空以及告訴他們現在是否該去排尿了。

在本專題研究中，我們想要設計出一個可穿戴式的超音波尿量估計器，首先，我們從膀胱超音波 B-mode 影像的模擬出發，利用 field-II 軟體模擬並找出對於計算體積最重要的幾條 A-line。在這之中我們發現其實只要取得 x-z 切面中的兩條 A-line 和 y-z 切面中的兩條 A-line，即可算出整個體積，並不需要 B-mode 影像。因此，我們設計的可穿戴式超音波尿量估計器會以量測這 4 條 A-line 為主，而能將陣列探頭簡化為 4 個單一的超音波探頭來取得所需的 A-line 資訊。接下來，為了找到最佳的探頭大小和中心頻率，我們改變這兩個參數來跑模擬，比較它們之間的誤差後，我們得出最佳的探頭大小為 7.5mm，而中心頻率則是 1MHz，在這樣的參數設定之下，我們可將估算的體積誤差降到 10%之內。

Introduction

市面上已經有公司做出了可攜式的超音波尿量估計器，且使用的探頭數目只有四個，但並無相關文獻說明如何在這樣的限制下做到估算膀胱體積並保有一定的精準度。因此在此專題裡，我們希望自行設計一套可攜式的超音波膀胱尿量監測器，熟悉這樣系統的設計技術。我們將利用 field-II 模擬膀胱超音波、估算膀胱體積，以此來重現出此儀器的功能。

臨床上，目前主要以婦科使用的曲線陣列探頭(curved linear array)掃描膀胱影像來進行尿量估計。估計的方法為轉動超音波探頭取得兩個膀胱切面，三個方向資訊，以橢圓公式估計尿量。在探頭數有限的可攜式膀胱尿量估計器的設計上，我們想要解決下列臨床上估算方法的問題：

1. 超音波探頭需要傾斜及轉動
2. 醫院使用的超音波儀器無法攜帶且使用不易

(一) 膀胱體積計算

我們發現，只要固定4個探頭位置就能計算出膀胱體積，若要計算膀胱尿量我們需要取得圖1中4個固定的探頭 (element1~element4)所測量到的 $z'_1 \sim z'_4$ 。接著利用橢圓體積公式估計膀胱體積，平面橢圓公式是 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ ，其中 x 、 y 代表在 x - y 平面上橢圓的某一點的 x 座標與 y 座標，而 a 和 b 分別為橢圓的長軸和短軸。兩剖面的長短軸公式推導如下。

a. 對 sagittal-axial 剖面(圖1左)：

$$\begin{cases} \frac{x_1^2}{a_x^2} + \frac{\left(\frac{z'_1}{2}\right)^2}{z_x^2} = 1 \\ \frac{x_2^2}{a_x^2} + \frac{\left(\frac{z'_2}{2}\right)^2}{z_x^2} = 1 \end{cases}, x_1 = 1(\text{cm}), x_2 = 2(\text{cm}) \Rightarrow z_x = \sqrt{\frac{\left(\frac{z'_1}{2}\right)^2 \times 2^2 - \left(\frac{z'_2}{2}\right)^2}{2^2 - 1}} (\text{cm})。$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{z'_1}{2z_x}\right) \Rightarrow a_x = \frac{1}{\cos(\sin^{-1}(\frac{z'_1}{2z_x}))} (\text{cm})。$$

b. 對 longitudinal-axial 剖面(圖1右)也是相同推導方式，可得：

$$z_y = \sqrt{\frac{\left(\frac{z'_3}{2}\right)^2 \times 2^2 - \left(\frac{z'_4}{2}\right)^2}{2^2 - 1}} (\text{cm}), a_y = \frac{1}{\cos(\sin^{-1}(\frac{z'_3}{2z_y}))} (\text{cm})$$

c. 膀胱體積 = $\frac{4}{3} \pi \cdot a_x \cdot a_y \cdot z_x$ 。

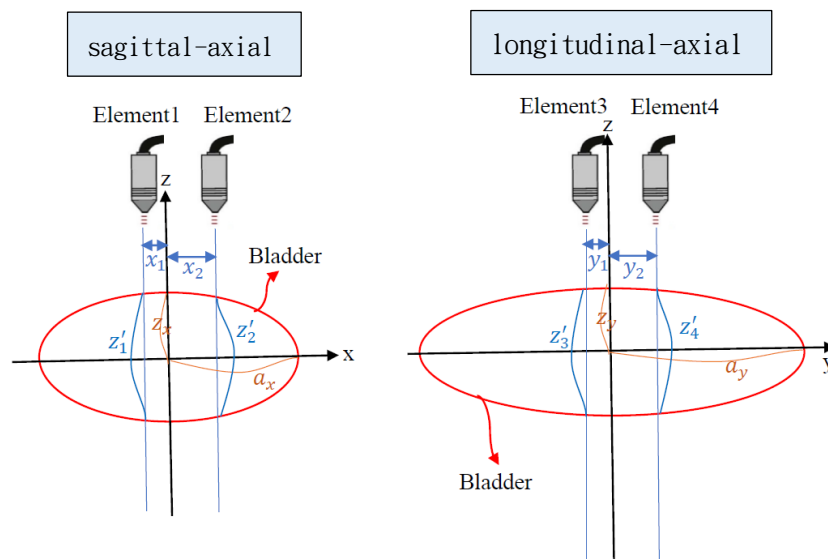


圖1 sagittal-axial(sagittal view)及 longitudinal-axial(transverse view)

(二) 系統設計

1. 系統參數選擇

我們需要選擇的系統參數包括換能器的半徑和中央頻率(f_0)，由於市面上的可攜式尿量估計器有2.13吋×1.38吋(5.14cm×3.51cm)因此我們推估內部的4個探頭應有一定半徑大小，在模擬時我們先使用相同的中央頻率並且模擬半徑為6mm~8.5mm的換能器對300ml~350ml的膀胱仿體做模擬。此外，該產品以無線的方式連接手機的應用程式，因此中心頻率應該落於1MHz~2MHz以降低所需類比數位轉換器之取樣率，所以我們分別針對中心頻率為1MHz與2MHz，體積變化由175ml到400ml做模擬。根據模擬的結果，我們找出最佳的換能器半徑為7.5mm，而中心頻率則是1MHz。

2. 建立模擬系統

我們所設計的模擬膀胱尿量估計系統會先利用 Matlab 建立不同膀胱體積的 sagittal view(15cm×10cm)和 transverse view(15cm×10cm)兩個剖面，在其中以 rand()函數模擬人體內的散射點，並將膀胱內部散射值設為0，膀胱壁部分設為1，再平移膀胱位置，建立出膀胱仿體資料(圖2)。

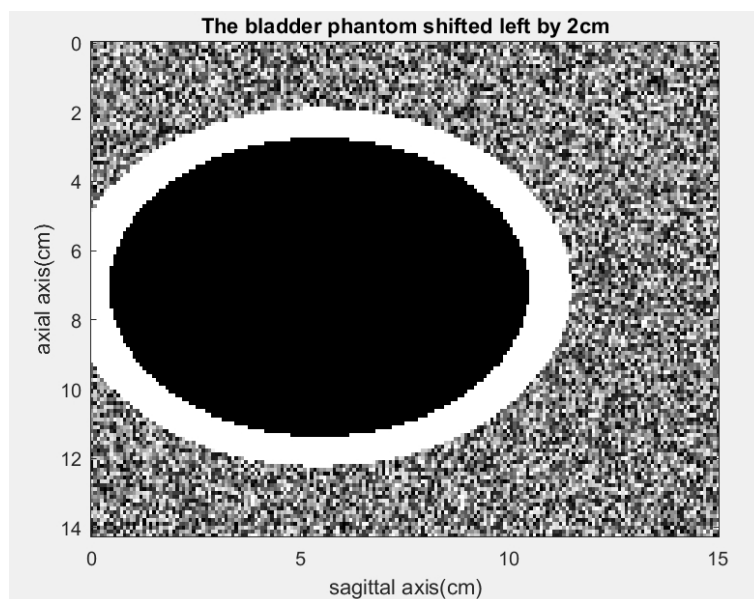


圖2 膀胱平移後之剖面圖

接下來我們使用 field-II ultrasound simulator 作為模擬工具，設定好所有參數之後，載入之前建立的仿體資料並取得 A-line 訊號，再來我們針對取得的 A-line 訊號作分析(圖3)，找出兩膀胱壁之間的距離以估算膀胱體積。首先，我們對 A-line 做 Hilbert transform 和 normalization 再對它做絕對值，完成 envelope detection 後，為了能夠

確定膀胱壁的位置在哪裡，我們使用最常見的 moving average filter 讓訊號變得較平滑，使高頻的訊號衰弱，僅留下低頻的資訊。之後，為了降低雜訊並方便接下來做峰值分析，所以我們將平滑後的訊號做二值化(binary thresholding)，二值化訊號兩個高起的地方為膀胱壁的位置，我們將膀胱長度定義為兩膀胱壁之間的距離，計算出膀胱的深度資訊 z' ，並與理論值比較，再將 z' 乘上校正倍數做為新的 z' 。

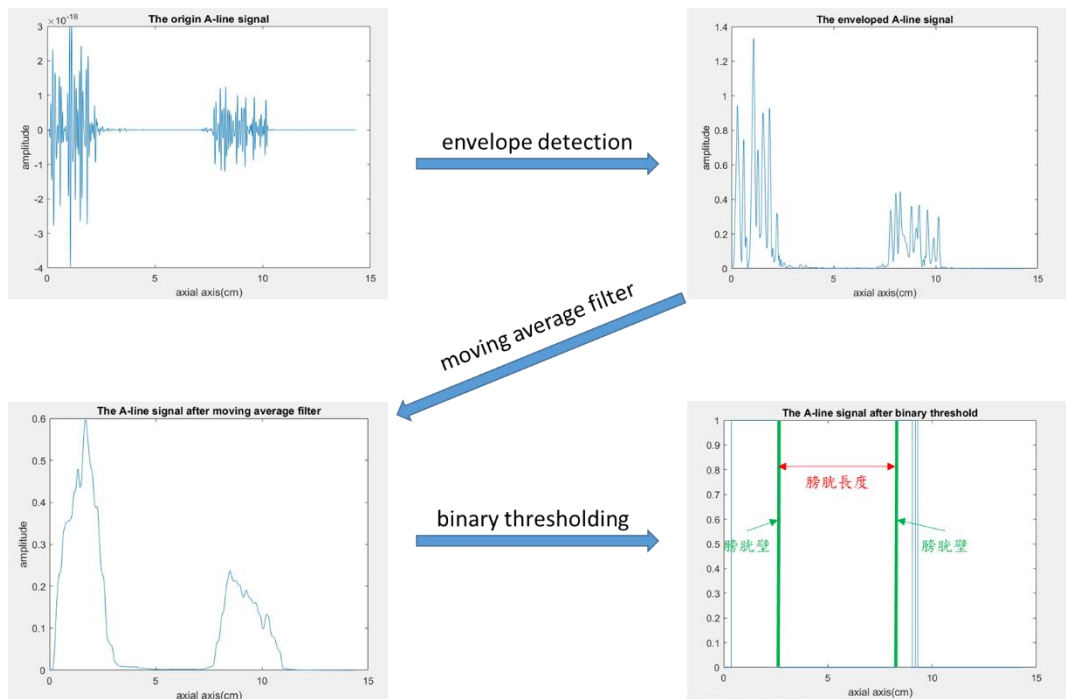


圖 3 對 A-line 所做之訊號處理流程

得到膀胱的深度資訊 z' 後，我們即可用前面所推導出來的公式來計算膀胱仿體中兩個剖面分別的長軸和短軸，並估算出整個膀胱的體積，最後，將模擬的結果與實際值做比較，計算不同參數下模擬膀胱體積的誤差，從中找出最佳的換能器半徑大小及中心頻率。

3. 實驗結果

在同一中央頻率中($f_0=1\text{MHz}$ 、 2MHz)，讓體積從300ml變化到350ml，換能器半徑從6mm~8.5mm取其標準差最小者作為換能器的半徑，因在校正時會比較準確。從圖4可以看出7.5mm的換能器無論在1MHz或是2MHz的標準差都是最小的，因此選擇7.5mm作為換能器的半徑。

Volume(ml) \ element size(mm)	289	301	314	325	339	351	標準差
6	29.05721	40.7698	27.9665	42.2892	9.3571	-2.2768	17.66492
6.5	-13.8033	-7.8865	-13.1211	2.7657	-3.2969	-10.5447	6.382283
7	-10.5099	-18.4043	-12.3041	-5.3828	3.5187	-2.4423	7.777806
7.5	-11.6585	-3.11519	-6.2747	-3.3342	-10.5819	-3.0674	3.909694
8	-10.2316	-11.4012	4.6661	-1.5801	-10.0810	-15.5194	7.437625
8.5	-13.5865	-3.3288	-8.7686	-13.2969	-16.3080	-14.4928	4.770394

Volume(ml) \ element size(mm)	289	301	314	325	339	351	標準差
6	-7.1964	-5.3997	-0.5408	-8.6133	-16.3456	-14.1307	5.791035
6.5	-16.9986	-2.8610	-1.1345	-1.3117	-2.8273	-9.8356	6.341551
7	-2.6087	-14.3852	-16.5694	-16.5694	-9.5483	-23.2977	7.059803
7.5	-7.3077	-8.2844	-8.8226	-8.8226	-2.2739	-13.5083	3.601941
8	-4.6393	-8.8171	-6.6732	-6.6732	-17.7059	-17.7059	5.834654
8.5	-8.1077	-11.6771	-9.5785	-9.5785	-20.5080	-20.508	5.678015

圖 4 中心頻率 1MHz(上)及 2MHz(下)時不同換能器半徑膀胱體積估計誤差(%) 比較

由圖5可以看出在換能器半徑相同的狀況下，膀胱體積從175ml變化到400ml時，無論中央頻率為1MHz或2MHz時誤差變化都差不多，因此我們選擇1MHz作為換能器的中央頻率，以在日後的系統所需的ADC sampling rate比較小。

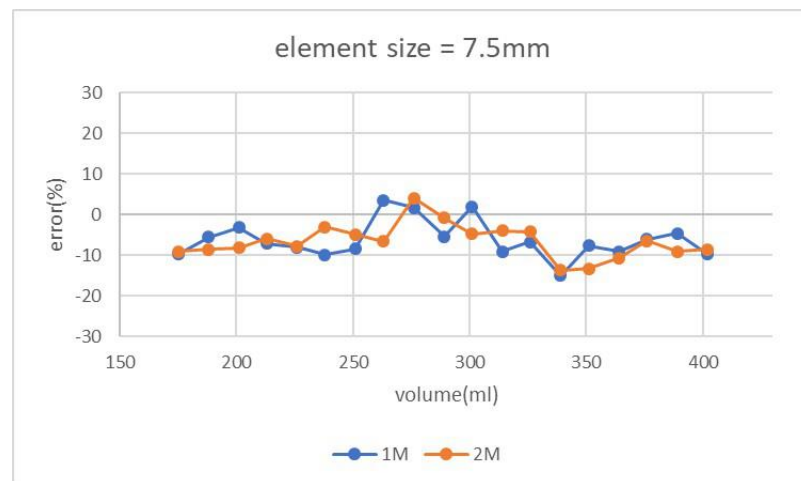


圖 5 相同換能器半徑不同中央頻率的比較

因我們取膀胱壁的距離時是取內側的位置，而量測取得的 A-line 在膀胱壁的信號相當是超音波系統的 impulse response 和膀胱壁區域捲積而得，因此我們得到的 z' 會比實際的值來的小。我們將測到的 z' 與理想值做比較，重複五次，得出兩者的比例關係後做平均，再在做模擬的時校正 z' ，使其接近實際值。

使用中央頻率 1MHz、換能器半徑 7.5mm，element1~element4 測

出的 z' 分別除上 0.968、0.96、0.963、0.952，再經由估算膀胱體積的公式算出體積並計算出與理想值的誤差，重複五次並平均，得到測量出的體積與理想體積的平均誤差在 $\pm 10\%$ 之內。

心得感想

這個專題可以說是困難重重，從完全沒用過的模擬軟體 Field-II 到幾乎完全沒有參考資料的題目，好險在這兩個學期中，每週跟老師的 meeting、討論和相關課程學到的新知識都讓我們的專題有一定的進展。雖說這個題目幾乎沒有參考資料，但也讓我們學到了如何從枝微末節去推敲並解決問題，很開心能夠做這個專題，不僅很有趣也很有成就感。

而在這個專題之中，我們也用到了很多大一、大二時在課堂上學過，但卻不知道可以用在哪裡的知識，經過專題的訓練，我們對於以前學的東西有更進一步的了解，不再只是課本上的一行公式而已，而是可以將它實際的應用在自己的設計上。最後，要謝謝老師、學長這一路上給我們的幫助，耐心地告訴我們可以怎麼做，指導我們完成這個專題，讓我們在這兩個學期內收穫良多。