

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

高操控性自主式水下載具淺海域作業系統之整合技術研究 (III)

--- 子計畫三：自主式水下載具視覺系統設計與 影像導航之研究 (III)

Study on the Vision System Design and Image-based Navigation for Autonomous Underwater Vehicles (III)

計畫編號：NSC 88-2611-E-002-018

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

主持人：鄭勝文 國立台灣大學造船及海洋工程學研究所

中文摘要

針對自主式水下載具(AUV)外部環境導航所需三維成像聲納，本文採相互垂直的發射/接收陣列及接收陣列所構成的複合式十字型換能器陣列型式，整合傳統脈波回響法(pulse-echo method)及音波全像術(acoustic holography)成像技巧，提出一個符合 AUV 使用條件的三維前視聲納架構，於傳統扇形掃瞄聲納附加另一垂直接收陣列，同步量測回波音壓及相位資訊，重建物體 C 掃瞄影像。本文依據音波全像術理論，建立菲涅耳成像演算法軟體、接收陣列設計步驟及電路圖，並針對設計結果進行成像性能數值模擬。初步結果顯示，本文提出之構想在實用上具備充分的可行性。

Abstract

A new concept of 3-D forward looking sonar for underwater vehicles is proposed. The system is based on two crossed linear arrays of transducers, one horizontal transmitting/receiving array, acts as the conventional sector-scan sonar, and one vertical receiving array. The vertical receiver elements listen simultaneously while transmitter elements pulsed in sequence. The received data constitutes a hologram and will be converted to the C-scan image by using a reconstruction algorithm based on the area holography. A software for image reconstruction, a design procedure for the vertical receiving array are presented. Results of numerical simulation on sonar performance are also presented

1. 前言

1.1 研究背景

AUV 前視聲納的概念圖如 Fig. 1 所示，以鼻端為基準之距離稱為徑距(range)，而徑距之直角方向，水平者為經向(azimuth)、上下者為緯向(elevation)，則徑距-經向

面之影像，為最常見的雷達及聲納影像顯示方式，稱為平面位置指示(PPI; Plane Position Indicator)，或稱 B 掃瞄，另外，經向-緯向面者，稱為橫斷面影像(cross-range image)，或稱 C 掃瞄，相當於光學影像之情形。能夠同時獲取 B 及 C 掃瞄之音波成像系統，一般稱為三維聲納(3-D sonar)，目前可見於大型載人深海潛航器(deep-sea submersible)之前視聲納及海洋研究調查船之窄音束測深聲納，均採相互垂直的發射及接收相位陣列(十字形陣列)架構，利用可適音束構成(adaptive beam forming)技術操控音束大小及掃瞄方向，通常須具備複雜的發射音束控制電路及求取接收音束所需高速計算硬體(Fumo, 1997)，從系統體積、複雜性、重量及消耗能量因素之考量，並不適用於 AUV，至今雖有研究案例可尋(如 Cushieri, 1992)，未見實用例。針對此問題點，本文作者(Cheng, 1996)依據音波全像(acoustic holography)提出適用於十字形陣列之另一成像演算邏輯，感測元件採線性陣列，數位訊號處理實施傅利葉轉換，即可獲取 C 掃瞄，大幅度簡化了系統需求，並探討消除陣元有限大小效應提升影像解析度之方法(Cheng, 1998)。由於音波全像術成像法必須量測精確的相位資訊，適用距離短(小於 30m)，加上本質上不易獲取 B 掃瞄，無法單獨構成三維前視聲納。鑑於此，本文提出一個整合傳統脈波回響法(pulse-echo method)及音波全像術之成像法構想，使用水平發射/接收線性陣列及垂直接收線性陣列所構成的十字形陣列，同時獲取 B 及 C 掃瞄，可充分利用現階段已成熟的扇形掃瞄聲納(sector-scan sonar)技術，彌補音波全像術成像法之不足。

1.2 研究目的

本文採傳統扇形掃瞄聲納附加另一垂直接收線性陣列之方式，依據音波全像術理論，撰寫 C 掃瞄成像軟體，進行系統特性分析，據以建立水下載具三維前視聲納最佳設計步驟及性能評估方法。

$$g(x_H, y_H, z_H; x_0, y_0) = \frac{1}{i\lambda} \frac{\exp(ikr)}{r} \frac{z_H}{r} \quad (5)$$

$$G(f_x, f_y, z_H) = \exp(i2\pi f_z z_H) \quad (6)$$

其中

$$r = \left[(x_H - x_0)^2 + (y_H - y_0)^2 + z_H^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$f_z = \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \quad (8)$$

$k = 2\pi/\lambda$ 為波數(wave number), λ 為波長。

將(6)式代入(4)式, 可由 p_H 求出 p_0 , 進而求得物體影像。上述由量測面音場重建物體影像之方法, 在此稱為“正解成像”。

由於正解成像過程中對量測面實施正及逆傅利葉轉換各一次, 影像大小恆與量測面大小相同, 與距離 Z_H 無關, 而影像解析度為 $\lambda Z_H/a$ (Cheng, 1996), 因此, 隨著距離增大, 能觀察到範圍逐漸縮小, 像質愈差, 實用意義不高。

2.2 菲涅耳成像演算法

(5)式所示波傳格林函數中, 假設距離 Z_H 遠大於量測面尺寸 a_x 及 a_y 時, 則可對(7)式作二項式展開, 得

$$r \cong z_H + \frac{1}{2z_H} \left[(x_H - x_0)^2 + (y_H - y_0)^2 \right] + \frac{1}{8z_H^3} \left[(x_H - x_0)^2 + (y_H - y_0)^2 \right]^2 + \dots \quad (9)$$

由於全像術之成像品質取決於相位之正確性, 因此, 依據菲涅耳近似 (Fresnel approximation), (5)式中指數部分之 r 取(9)式右側之前兩項近似, 其他取 $r = Z_H$, 將所得格林函數 g 代入(1)式並作整理後可得(Nagai, 1983)

$$p_H(x_H, y_H, z_H) = c(x_H, y_H, z_H) \int_{x_0} \int_{y_0} p_0(x_0, y_0) \cdot b(x_0, y_0) \exp \left[-\frac{i2\pi}{\lambda z_H} (x_0 x_H + y_0 y_H) \right] dx_0 dy_0 \quad (10)$$

其中

$$b(x_0, y_0) = \exp \left[\frac{ik}{2z_H} (x_0^2 + y_0^2) \right] \quad (11)$$

$$c(x_H, y_H, z_H) = \frac{\exp(ikz_H)}{i4\pi\lambda z_H} \exp \left[\frac{ik}{2z_H} (x_H^2 + y_H^2) \right] \quad (12)$$

由於(14)式右側積分為傅利葉轉換型式, 故可改寫

得

$$p_0(x_0, y_0) = \frac{1}{b(x_0, y_0)} \text{IFT} \left[\frac{P_H(u_x, u_y)}{C(u_x, u_y)} \right] \quad (13)$$

$$\text{其中, } u_x = \frac{x_H}{\lambda z_H}, u_y = \frac{y_H}{\lambda z_H}, \quad (14)$$

P_H 及 C 各為 p_H 及 c 作變數轉換者。

將(13)式所得 p_0 及已知之 p_H 代入(2)式, 可求得物體影像。而上述由量測面音場 p_H 重建物體影像之方法, 在此稱為“菲涅耳成像”, 其主要特徵如下:

a. 最短成像距離之限制

由(9)式可知, 菲涅耳近似所造成之相位誤差, 在下式成立之條件下可忽略:

$$\frac{2\pi}{\lambda} \frac{1}{8z_H^3} \left[(x_H - x_0)^2 + (y_H - y_0)^2 \right]^2 \leq 2\pi \quad (15)$$

當量測面尺寸 $a_x = a_y = a$ 時, 取 $x_0 = y_0 = 0$ 及 $x_H = y_H = a/2$, 即相位差最大路徑, 則由(15)式可得最小距離比為

$$(z_H/a)_{\min} = (a/32\lambda)^{1/3} \quad (16)$$

b. 重建所得物體影像之尺寸

由於(13)式代表空間域與空間頻率間之關係, 故設 $a_x = a_y = a$, 及 x 與 y 方向取樣點數 $N_x = N_y = N$ 時, (14)式表示頻寬為 $[BW]_x = [BW]_y = \frac{a}{\lambda z_H}$, 此

對應於空間域之取樣間隔 $d_i = \frac{\lambda z_H}{a}$, 即影像尺寸為

$$a_i = \frac{\lambda z_H}{a} \cdot N \quad (17)$$

由(17)式可知, 菲涅耳成像之視野, 類似光學透視成像 (perspective imaging), 隨觀測距離增大, 實用上較為有利。

2.3 圓錐全像術與面全像術之相關

上述音波成像邏輯中, 量測面音場即對應於全像術之全像圖 (hologram), 只要全像圖所含振幅及相位資訊近似, 無論何種探頭架構, 可適用同一成像法。依據 Wells(1971) 及 Chao(1996) 研究結果顯示, 十字型陣列 (圓錐全像術; conic holography) 及單發多收 (面全像術) 之情形, 如 Fig.4 所示, 全像圖上任一點 (x_H, y_H, z_H) 與物體反射點 $(x_0, y_0, 0)$ 間之波傳路徑長度各為

$$\left\{ \begin{array}{l} R_c = \left[(x_H - x_0)^2 + y_0^2 + z_H^2 \right]^{1/2} \\ \quad + \left[x_0^2 + (y_H - y_0)^2 + z_H^2 \right]^{1/2} \\ R_a = \left[x_0^2 + y_0^2 + z_H^2 \right]^{1/2} \\ \quad + \left[(x_H - x_0)^2 + (y_H - y_0)^2 + z_H^2 \right]^{1/2} \\ \text{令 } R_o = \left[x_0^2 + y_0^2 + z_H^2 \right]^{1/2} \end{array} \right. \quad (18)$$

3.2 距離與影像解析度及物體尺寸之關係

本節假設發射及接收陣元均為點狀進行計算。Fig. 6 顯示 D1 型物體在不同距離下重建所得影像。由於 $(Z_H/a)_{min} = 1.26 > 1$ ，因此， $Z_H/a = 1$ 時所得影像呈現較嚴重的疊影(ghost)， $Z_H/a = 2$ 時有明顯改善， $Z_H/a = 4$ 時則因物體相對變小，較為模糊。當物體大於量測面時(如 M2 型物體)，如 Fig. 7 所示， $Z_H/a = 1$ 時僅能觀測到部分物體，而 $Z_H/a = 2$ 及 4 時，由於訊雜比(SNR)下降，四周之對比及解析度呈劣化情形。

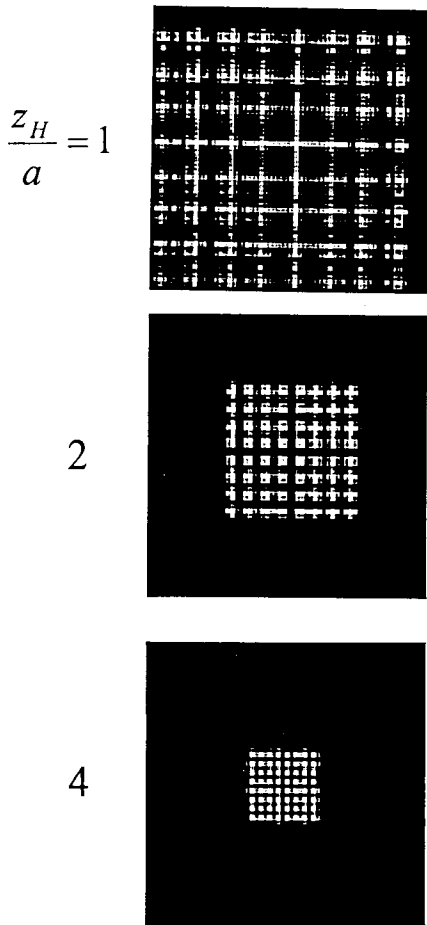
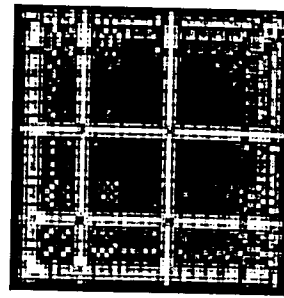
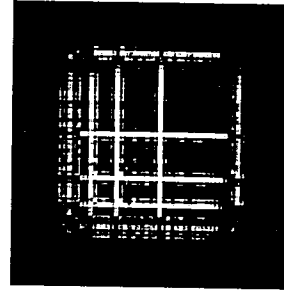


Fig.6 重建影像 (點狀發射陣元，物體：D1)

$$\frac{z_H}{a} = 1$$



2



4

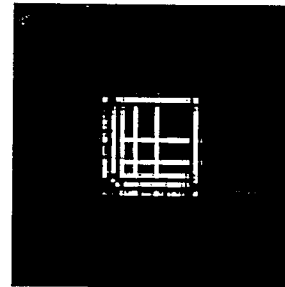


Fig.7 重建影像 (點狀發射陣元，物體：M2)

3.3 像質改善—補零處理

補零處理(zero padding)常見於數位影像處理中，使用目的依空間域或頻率域而不同；本文採用的非涅耳成像演算法，由於量測所得全像圖為空間頻率域複變訊號，在其外周補零(將 $N \times N$ 放大為 $\beta N \times \beta N$ ，增加部分均為零)，相當於增加頻寬，經逆傅利葉轉換成空間域後，重建所得影像尺寸不改變，但像素大小成爲 $1/\beta$ 。因此，如果成像系統之固有解析度尚未完全呈現時，補零將使影像更為清晰。Fig. 8 表示 Fig. 6 中 $Z_H/a = 4$ 時物體 D1 重建影像經處理後之結果($\beta=4$)，像質有明顯的改善。

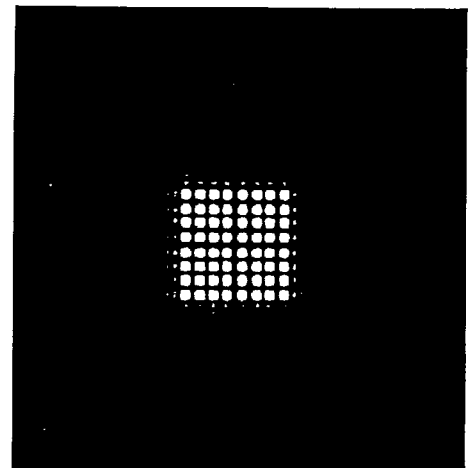


Fig. 8 補零處理 (點狀發射陣元，物體：D1， $Z_H/a = 4$ ， $\beta=4$)

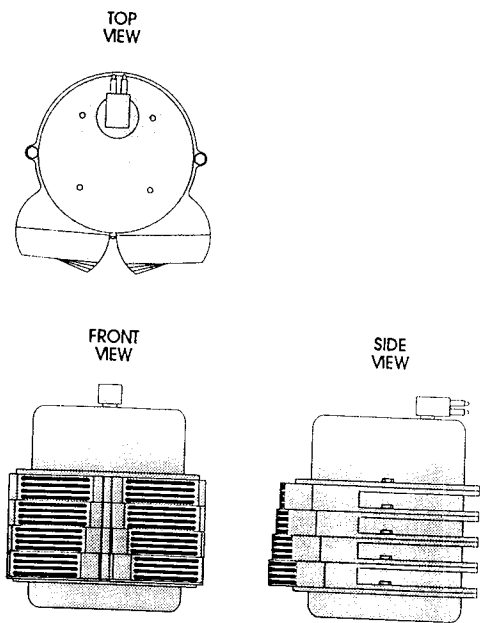


Fig. 11 扇形掃瞄聲納外觀

接收陣列之電路設計如 Fig.12 所示。將扇形掃瞄聲納作動時之發射陣元觸發同步訊號，輸入接收陣元之觸發電路，即可同時取得量測面全像圖，進而利用數位信號處理器(DSP)進行非涅耳成像，重建物體面影像。

使用上述三維前視聲納，針對 Fig. 5 所示 D1 型物體進行成像，結果如 Fig.13 所示，而經補零處理後，像質有明顯改善(Fig. 14)。發射陣元有限大小效應造成的疊影及模糊問題，與 Fig.9 之情形相同。又， $Z_H/a = 1$ 時，由於觀測距離小於 $(Z_H/a)_{\min}$ 值，像質不佳。

5. 結論

本文獲得以下結論：

1. 於傳統的扇形掃瞄聲納附加另一接收陣列，整合脈波回響法及音波全像術成為水下載具三維前視聲納之構想，經數值模擬驗證結果顯示，實用上具備充分可行性。
2. 依據音波全像術成像理論，建立非涅耳成像演算法，不但可利用高速傅利葉轉換技巧，縮短計算時間，且特性上相當於光學透視成像，利於水下觀測及導航。
4. 像質改善方面，除補零處理外，針對發射陣元有限大小效應造成的疊影及模糊問題，必須依據陣元空間響應函數實施逆摺積處理。
5. 建立接收陣列設計步驟，依據前視聲納使用性能需求及扇形掃瞄聲納規格，可決定接收陣列之主要設計參數值。

參考文獻

- [1] Chao, M.K. (June 1996), Ph.D. Dissertation, National Taiwan University,.
- [2] Cheng, S.W., M.K. Chao and G.M. Hwang(1996) "Basic Study on Imaging Sonar for Underwater Vehicles - Application of Synthetic Aperture Acoustic Imaging Techniques," Proceeding of 18th Conference On Ocean Engineering in R.O.C., pp. 1003-1013.
- [3] Cheng, S. W, M.K. Chao and J.Guo(Dec.1998), "Design of an Imaging Sonar System Using Wells Cross Array and Acoustic Holography for Underwater Vehicles," Proceedings of 1st Conference on UnderSea Technology. Taipei, pp. 112-120.
- [4] Cushieri, J.M. and P. Chao(Dec. 1992) "3-D Sonar System for UUS" Sea Technology, pp. 47-53.
- [5] Sutton, J.P. etc. (June 1997) "Massively Parallel Digital Transmitter" Sea Technology, pp. 55-60.
- [6] Goodman, Joseph W.(1968), *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill, Inc.
- [7] Sutton, Jerry L.(1979) "Underwater Acoustic Imaging," Proceeding of the IEEE, Vol.67, No.4, pp.554-566.
- [8] Urlick, Robert J., 1983, *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill, Inc.
- [9] Wells, W.H.(1971) "Acoustical imaging with linear transducer arrays," *Acoustical holography*, Vol. 2.