

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

利用虛擬麥克風的參數估計作為噪音防治之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2213-E-009-063-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：國立交通大學電信工程學系(所)

計畫主持人：謝世福

共同主持人：鄭張權

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 10 月 24 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

利用虛擬麥克風的參數估計作為噪音防治之研究

Study on active noise control using virtual microphones

計畫編號: NSC 94-2213-E-009-063

執行期限: 94 年 08 月 08 日至 95 年 07 月 31 日

主持人: 謝世福 交通大學電信系副教授

共同主持人: 鄭張權 中國科大電通系助理教授

摘要

“麥克風”在主動式噪音防治的應用上，是極為重要的元件，它主要的用途是監測“噪音的能量”。由於麥克風的位置的選擇是很關鍵的，以避免噪音感測不良，但這個限制因素，經常造成設計者的困擾。我們在理論上進一步探討虛擬麥克風在不同位置，不同反射係數時對 ANC 的影響及適用性。首先，我們利用映像法模型(image method) 模擬密閉房間中的多個不同位置的“音源-麥克風”脈衝響應，利用這些響應，反推尋求(可以產生這些)脈衝響應的參數(例如房間的尺寸、牆壁的反射係數)。這些參數被估計，那麼音源-虛擬麥克風之間的脈衝響應即可產生獲得。我們用這個函數當作基礎，討論虛擬麥克風在不同反射係數時對 ANC 的影響及適用性，較以往的經驗式，更有所幫助。

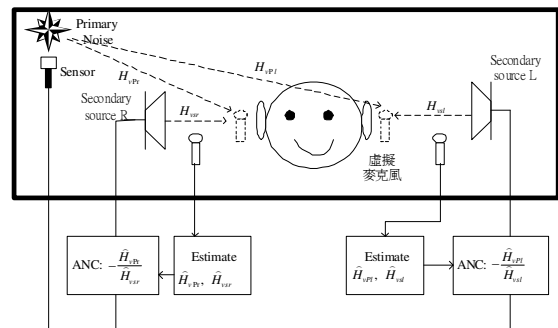
ABSTRACT

The concept of virtual microphone is to provide a quiet zone within an enclosure while a monitoring microphone cannot be placed physically due to some limitations. Current work obtains the virtual microphone's transfer functions via common-pole model and 1-dimensional linear interpolation on the zeros of some measurable transfer functions from physically known transfer functions. We aim to find a closed form formula relating the parameters of the enclosure, such as reflection coefficients, source locations, etc., which can be more useful and insightful than empirical assumptions and results of previous research.

關鍵詞: 主動噪音防治、虛擬麥克風、映像法模型

一、虛擬麥克風在噪音防治應用的緣由與目的

在主動式噪音防治的應用上，麥克風的位置的選擇是很關鍵的[2]- [3]。在實用上，麥克風位置的限制因素，經常造成設計者的困擾，因此近年來有許多文獻討論虛擬麥克風的可能性 [4]-[10]。圖一 討論虛擬麥克風，應用在車內區域噪音控制的概念圖。假設我們希望駕駛者不要受到引擎噪音(Primary noise) 的干擾，故只需要確保駕駛者的二耳區域範圍內，消除噪音即可 [1]。但由於麥克風不適宜太靠近駕駛者的耳朵，因此我們假想有二個虛擬麥克風置於二耳區域範圍內，此時我們利用真實的麥克風(置於可接受的位置)估計這二個虛擬麥克風和各音源間的頻率響應，如分別為 H_{vPl} , H_{vPr} 和 H_{vsl} , H_{vsr} ，並依這些頻率響應來設計 ANC 濾波器，以使得位在虛擬麥克風處的噪音被消除。這個目的等效將麥克風置於駕駛者的二耳旁。



圖一 虛擬麥克風在噪音防治模型的應用

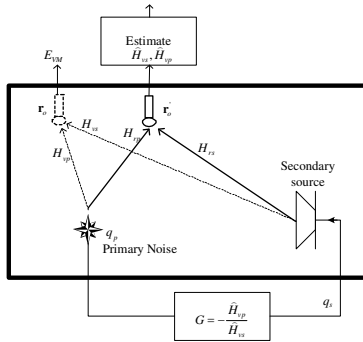
我們簡化噪音控制方塊圖，如圖二，ANC Filter G

可以暫時假設為： $G = -\frac{\hat{H}_{vp}}{\hat{H}_{vs}}$ 利用 Least-squares 求得

近似解。虛擬麥克風處的噪音頻率響應 E_{VM} 表示為：

$$E_{VM} = H_{vp} + GH_{vs} = H_{vp} - \frac{\hat{H}_{vp}}{\hat{H}_{vs}} H_{vs} \text{ 當 } \hat{H}_{vs} \approx H_{vs}$$

且 $\hat{H}_{vp} \approx H_{vp}$ 時 $E_{VM} \approx 0$ 即表示位於 \mathbf{r}_o 的噪音為零。



圖二 虛擬麥克風在單一區域噪音控制的方塊圖

Y. Haneda [5] 指出當房間牆壁的反射係數較高時，由於共振的現象，房間不同位置的脈衝響應，以 ARMA 模型表示時，會呈現共極點 (Common pole) 的情形，故推論脈衝響應的數學模型如下：

$$\hat{H}(z, x) = \sum_{i=0}^{P/2} \left[\frac{A_i(x)}{1 - p_{ci} z^{-1}} + \frac{A_i^*(x)}{1 - p_{ci}^* z^{-1}} \right] \quad (1)$$

$$A_i(x) = B_i \cos(k_i x) \quad (2)$$

其中 B_i 是複數， k_i 是 Wave number。在 (1) 尋找共極點 p_{ci} 是關鍵的問題。若假設 p_{ci} 可以獲得，則 (2) 中 B_i 及 k_i 可以由實際量測出的脈衝響應 $H(z, x_k)$ 比對 $\hat{H}(z, x_k)$ 之後求得，當 B_i 及 k_i 被求得後，在一維空間變化下的虛擬麥克風脈衝響應的估計可以表示為

$$\hat{H}(z, x_{VM}) = \sum_{i=0}^{P/2} \left[\frac{B_i \cos(k_i x_{VM})}{1 - p_{ci} z^{-1}} + \frac{B_i^* \cos(k_i x_{VM})}{1 - p_{ci}^* z^{-1}} \right] \dots \dots \dots (3)$$

由於(3)的獲得是藉由其他多個不同位置的“音源-麥克風”頻率響應(利用真實的麥克風測量)，尋求此房間的共極點參數，再藉由一維空間(假設虛擬和真實的麥克風的擺置都在同一直線上)的內插，求得音源到虛擬麥克風”的頻率響應。我們在理論上(而不是上述的 Empirical 經驗法則)進一步探討虛擬麥克風在不同位置，不同反射係數及不同的頻率範圍時對 ANC 的影響及適用性。首先，我們利用映像法模型(image method)模擬密閉房間中的多個不同位置的“音源-麥克風”脈衝響應，利用這些響應，反推尋求(可以產生這些)脈衝響應的參數(例如房間的尺寸、牆壁的反射係數，麥克風的位置等)。如果這些參數可以被準確估計，那麼音源-虛擬麥克風之間的脈衝響應即可產生獲得，我們希望觀察參數準確估計對虛擬麥克風的影響。我們估計在二維空間的的反射係數，是相當接近的。因為這個結果是從映像法的數學模型出發推論得到的，用這個函數當作基礎，來討論 ANC 的影響及適用性，應該較以往的經驗更有所幫助。

二、映像法(Image method)模擬模型

首先，我們利用映像法模型(image method) 模擬密閉房間中的多個不同位置的“音源-麥克風”脈衝響應(實用上是由真實的音源-麥克風測量)。其次，利用這些響應，反推尋求(可以產生這些)脈衝響應的參數(例如牆壁的反射係數等)。最後，如果這些參數可以被準確估計，那麼音源-虛擬麥克風之間的脈衝響應即可產生獲得，我們觀察參數準確估計對虛擬麥克風的影響。

(A).密閉空間的脈衝響應

模擬密閉三度空間聲源與感測器之間的脈衝響應最有名的方法是“映像法”表示為

$$h(t) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\beta_{x1}^{|m-i|} \beta_{x2}^{|m|} \beta_{y1}^{|l-j|} \beta_{y2}^{|l|} \beta_{z1}^{|k-n|} \beta_{z2}^{|n|}}{4\pi R} \delta\left(t - \frac{R}{c}\right) \quad (4)$$

其中

$$R = \left| (1-2i)x_p - x_l + 2mL_x + (1-2j)y_p - y_l + 2lL_y + (1-2k)z_p - z_l + 2nL_z \right|$$

是聲源與感測器之間的距離，各位於 (x_p, y_p, z_p) 和 (x_l, y_l, z_l) 。 (L_x, L_y, L_z) 是房間的尺寸。

$(\beta_{xi}, \beta_{yi}, \beta_{zi})$ 是密閉房間中牆的反射係數。 c 是音速 ($343m/s$ at $20^\circ C$)。

(B). 以 ARMA 模型分析脈衝響應的參數

我們將會利用這些得到的響應，來反推尋求脈衝響應的參數，例如房間的尺寸、牆壁的反射係數。

(1). 房間尺寸的估計

脈衝響應以 ARMA 模型表示如下：

$$\hat{H}(z) = \sum_{n=0}^{P/2} \left[\frac{A_i}{1 - p_n z^{-1}} + \frac{A_i^*}{1 - p_n^* z^{-1}} \right] \quad (5)$$

(5)式中極點(pole)為 p_n 可以表示為 $p_n = r_n e^{j\omega_n}$ ，而其中 ω_n 可以等效於房間的共振頻率，而房間的共振頻率可以表示為：

$$\hat{\omega}_n^2 = c^2 \left[\left(\frac{n_x \pi}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y \pi}{L_y} \right)^2 + \left(\frac{n_z \pi}{L_z} \right)^2 \right] \quad (6)$$

其中 (n_x, n_y, n_z) 是整數。在(6)中我們分別考慮

$(n_x, 0, 0)$ 、 $(0, n_y, 0)$ 和 $(0, 0, n_z)$ 三種情形：當

$(n_x, 0, 0)$ 時，房間的共振頻率只和房間的 x 軸的尺寸有關，即 $\hat{\omega}_{nx} = n_x \frac{c\pi}{L_x}$ 。同理，當 $(0, n_y, 0)$ 和 $(0, 0, n_z)$

時，房間的共振頻率只和房間的 y 和 z 軸的尺寸有關，

即 $\hat{\omega}_{ny} = n_y \frac{c\pi}{L_y}$ 和 $\hat{\omega}_{nz} = n_z \frac{c\pi}{L_z}$ 。我們發現其中

$(\hat{\omega}_{nx}, \hat{\omega}_{ny}, \hat{\omega}_{nz})$ 呈現整數倍數的規則性，而能被辨識

(其他的共振頻率 ω_n 沒有這個規則性)，因此房間的尺寸可以被估計如下：

$$\hat{L}_x = \frac{1}{N} \sum_{n_x=1}^N n_x \frac{c\pi}{\hat{\omega}_{nx}}$$

$$\hat{L}_y = \frac{1}{N} \sum_{n_y=1}^N n_y \frac{c\pi}{\hat{\omega}_{ny}}, \quad \hat{L}_z = \frac{1}{N} \sum_{n_z=1}^N n_z \frac{c\pi}{\hat{\omega}_{nz}}$$

(2). 房間反射係數的估計

在本節我們希望由脈衝響應來估計房間的反射係數，我們發現脈衝響應的幅度

$$\frac{\beta_{x1}^{|m-i|} \beta_{x2}^{|m|} \beta_{y1}^{|l-j|} \beta_{y2}^{|m|} \beta_{z1}^{|k-n|} \beta_{z2}^{|m|}}{\bar{R}}$$

是 \bar{R} 的函數，為非線性。

假設取樣時間為 $T = \frac{L_x}{cM_x}$ ，為分析方便起見，我們

令 $\bar{h}[n] = 4\pi \bar{R} h[n]$ ，它的 $(n_x, 0, 0)$ 、 $(0, n_y, 0)$ 和

$(0, 0, n_z)$ 三種情形的三個 z 轉換可以表為

$$\bar{H}(z) = \frac{(z^{k_p} + \beta_x z^{-k_p}) + (z^{-k_l} + \beta_x z^{-2M_x} z^{-k_l})}{1 - \beta_x^2 z^{-2M_x}}$$

上式脈衝響應函數的分母，呈現共極點 (Common pole)

的情形，即 pole 的值與音源及麥克風的位置無關，這個結果與前述的經驗式，現象是一致，但我們可以由嚴密的數學解析獲得。由於在(6)式中僅和 X 軸相關的 $\hat{\omega}_{nx}$ (pole 的 phase) 已被辨識，因此和 X 軸相關的 pole p_{nx} 亦可以被辨識，當 $z = p_{nx}$ 時，可以表示為

$$1 - \beta_x^2 (r_{nx} e^{j\omega_{nx}})^{-2M_x} = 0$$

，因此房間的反射係數可以

估計為： $\hat{\beta}_{nx} = \hat{r}_{nx}^{\hat{M}_x}$ 取 N 個平均值，反射係數可以估

$$\hat{\beta}_x = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{r}_{nx}^{\hat{M}_x}$$

三、電腦模擬和結論

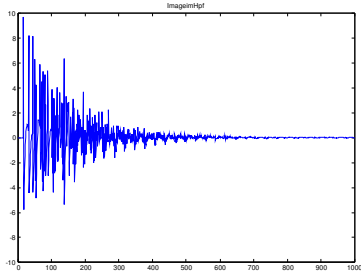
我們驗證在二維空間的情形，首先我們模擬“聲源與感測器”之間的脈衝響應如圖三所示。其中

$$(L_x, L_y) = (1, 1.5) \times 3.43m, \quad (\beta_x, \beta_y) = (0.9, 0.9),$$

$$(x_p, y_p) = (0, 0), \quad (x_l, y_l) = (2, 0) \times 3.43m,$$

$$(M_x, M_y) = (10, 15) \text{ 以及 } T = \frac{L_x}{cM_x} = \frac{1 \times 3.43}{343 \times 10}$$

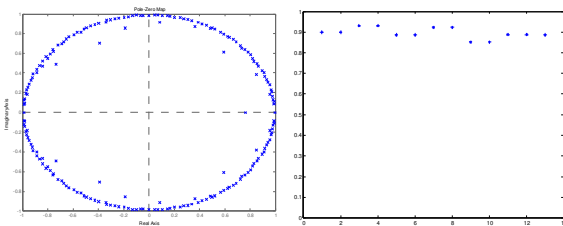
$$f_s = 1000Hz。$$



圖三. 二維空間“聲源與感測器”之間的脈衝響應

圖三 的脈衝響應以 ARMA 模型表示時，其中極點

(pole) $p_n = r_n e^{j\omega_n}$ 的分佈情形，如所示。

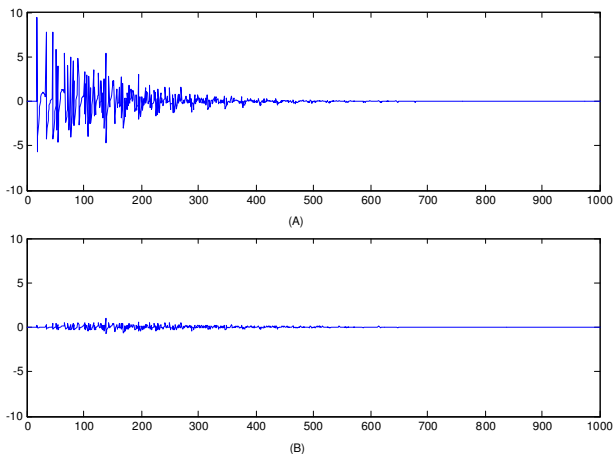


圖四. 極點(pole)的分佈 圖五.估計的反射系數

當實際的反射系數 $\beta_x = 0.9$ 時我們估計的反射系數

$\hat{\beta}_x = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{r}_{nx}^M = 0.89$ ，是相當接近的。圖六(A)

是估計的脈衝響應 \hat{h} 圖六(B)是與實際 h 的誤差由電腦模擬的結果當反射系數誤差為 0.01 時 \hat{h} 誤差的均方值為 **-17.89dB**。當反射系數誤差為 0.03 時 \hat{h} 誤差的均方值為 **-9.93dB**。



圖六. (A)估計的脈衝響應 \hat{h} (B)與實際 h 的誤差

REFERENCE

- [1] S. M. Kuo and D. R. Morgan, *Active Noise Control Systems—Algorithms and DSP Implementations*. New York: Wiley, 1996
- [2] C. F. Ross, “The control of noise inside passenger vehicles,” in *Proc. Recent Advances in Active Control of Sound Vibration*, 1991, pp. 671–681.
- [3] S. J. Elliott, P. A. Nelson, I. M. Stothers, and C. C. Boucher, “In flight experiments on the active control of propeller-induced cabin noise,” *J. Sound Vibration*, vol. 140, no. 2, pp. 219–238, 1990.
- [4] Durand R. Begault, *3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia AP Professional*, 1994.
- [5] Y. Haneda, et al., “Common-acoustic-pole and zero modeling of head-related transfer functions,” *IEEE Trans. On Speech and Audio Processing*, Vol. 7, No. 2, p 188-195, March 1999.
- [6] J.Garcia-Bonito. et al, “Generation of zones of quiet using a virtual microphone arrangement,” *J. Acoust. Soc. Am.* 101(6), p 3498-3516, June 1997.
- [7] C. Kyriakakis, “Virtual microphones and virtual loudspeakers for multichannel audio,” *International conf. on consumer electronics*, June 2000 , p 404-405
- [8] Colin D. et al, “Active noise control in a free field with virtual sensors,” *J. Acoust. Soc. Am.* 109(1) , p 232-243, January 2001
- [9] S.J. Elliott and et al, “A virtual microphone arrangement for local active sound control,” 1st international conference on motion and vibration control, Yokohama, p 1027-1031, 1992
- [10] C. Kyriakakis, “Virtual microphones for multichannel audio application,” *IEEE international conf. on multimedia and expo*, 2000, p 11-14 2000