

頻率跟隨反應：探索聽覺處理與學習的一扇窗
Frequency Following Response:
A Window into Auditory Processing and Learning

Enoch Hsin-Ho Huang and Yu Tsao

Research Center for Information Technology

Academia Sinica

Taipei, Taiwan

enoch.huang@citi.sinica.edu.tw yu.tsao@citi.sinica.edu.tw

摘要

頻率跟隨反應 (Frequency-Following Response, FFR) 是聽力學 (Audiology) 及認知神經科學 (Cognitive Neuroscience) 等領域所關注的一種聽覺電生理訊號，它可以幫助理解腦皮質下 (Subcortical) 區域的聽覺處理與學習，而它的特點是和誘發刺激音具有鎖相 (Phase Locking) 關係。FFR 訊號主要源自腦幹裡中腦的下丘 (Inferior Colliculus) 部位的反應，可透過頭皮電極和相關設備測量並記錄。本文以語音訊號處理的角度介紹 FFR 和相關研究，包括聽覺處理與聽覺電生理等背景知識，並介紹人工電子耳 (Cochlear Implant) 與相關的電誘發頻率跟隨反應 (Electrically-evoked Frequency-Following Response, eFFR)，說明其中的挑戰與機會，以提供參考與啟發。

Abstract

The frequency-following response (FFR) is a type of auditory electrophysiological signal that has gained attention in audiology, cognitive neuroscience, and related fields. It can help understand subcortical auditory processing and learning. The FFR signal exhibits a phase-locking relationship with the stimulating sound. It primarily originates from the response of the inferior colliculus (IC) in the mid-brain, part of the brainstem, and can be measured and recorded using scalp electrodes and appropriate equipment. This article introduces the FFR from the perspective of speech signal processing and covers background knowledge on auditory processing and auditory electrophysiology. The cochlear implant (CI) and the related electrically-evoked frequency-following response (eFFR) signal are also introduced, highlighting their challenges and opportunities to offer new insights for readers.

關鍵字：聽覺腦幹反應、聽覺電生理、人工電子耳、頻率跟隨反應、語音訊號處理

Keywords: Auditory Brainstem Response, Auditory Electrophysiology, Cochlear Implant (CI), Frequency-Following Response (FFR), Speech Signal Processing

1 緒論

聽覺是人類重要的感官，它使人透過聲音理解所身處的環境，並透過語言與他人溝通。聽覺感官可分為周邊聽覺系統 (Peripheral Auditory System) 以及中樞聽覺系統 (Central Auditory System)，前者是從外耳到內耳的部分，在醫學上已有相當豐富的認識 (Pickles, 2013)；後者包含從聽神經至大腦聽覺皮質 (Auditory Cortex) 的範圍，其構造解剖相當精細，而聽覺電生理 (Auditory Electrophysiology) 的研究可幫助人一窺聽覺神經處理與學習機制的奧妙 (楊義良等人, 2020)。

聽覺電生理訊號的發展，主要來自於耳鼻喉科與神經科學兩類領域專家的貢獻 (楊義良等人, 2020)。對於耳鼻喉科 (Otorhinolaryngology) 及聽力學 (Audiology) 而言，由刺激音產生的神經訊號稱為聽覺誘發反應 (Auditory Evoked Response, AER)；而對於神經科 (Neurology) 和神經科學 (Neuroscience) 的角度來說，聽覺誘發電位 (Auditory Evoked Potential, AEP) 的擷取方式是腦電圖 (Electroencephalography, EEG) 的特例 (楊義良等人, 2020)。

在聽覺電生理相關領域中，頻率跟隨反應 (Frequency-Following Response, FFR) 近年來受到的學者們的關注，因為它可用來觀察聽覺腦幹 (Auditory Brainstem) 的聲音處理機制，特別是聆聽經驗對於聽覺神經系統的影響 (Kraus et al., 2017)。此外 FFR 訊號僅需數個非侵入式 (Noninvasive) 表面電極置於頭部即可量測，相較腦電圖，只需要較少電極、較少頻道的 FFR，因此在實驗步驟上更為簡便，所需運算與儲存的資料也較少，因此在科學研究與臨床應用上具有發展的優勢。

本文以循序漸進的方式為具有語音訊號處理等背景的讀者介紹 FFR，內容包括了聽覺系統、聽覺電生理訊號、FFR 訊號的量測及其與聆聽經驗的關係，以及人工電子耳 (Cochlear Implant, CI) 的電誘發頻率跟隨反應 (Electrically-evoked Frequency-Following Response, eFFR)。本文除了說明 FFR 對於聽覺腦幹神經可塑性 (Neuro-plasticity) 的影響，所介紹的相關的生物機制也可對機器學習領域的專家學者提供一些參考與啟發。

2 聽覺系統與聽覺電生理

在說明頻率跟隨反應之前，首先介紹與聽覺系統與電生理相關的背景知識。

2.1 聽覺系統與聽覺電生理

聽覺感官可分為周邊聽覺系統 (耳朵) 和中樞聽覺系統 (神經系統) 兩部分：

2.1.1 周邊聽覺系統

表1說明人耳由外耳、中耳、內耳三部分組成：外耳包括耳殼 (又稱為耳廓) 和外耳道，主要負責將空氣分子振動為形式的聲波收集、加強並引導至中耳。中耳的鼓膜接收空氣分子的波動，透過三塊聽小骨 (Ossicles) 運用槓桿原理將機械波傳遞往內耳。內耳包括負責聽覺的耳蝸和負責平衡的前庭系統，螺旋狀的耳蝸中猶如一個分頻濾波器組，將其中以液體傳播的機械波編碼為聽神經的電訊號。耳蝸的基底膜扮演了重要的角色，它隔開了分別充滿著內淋巴液 (Endolymph) 和外淋巴液 (Perilymph) 的兩個管狀腔室，藉由聲音行進波 (Traveling Wave) 傳遞，帶動基底膜 (Basilar Membrane) 上的毛細胞 (Hair Cells) 的擺動，使得機械波轉換為神經性的電脈衝訊號的形式，透過聽覺神經路徑 (Auditory Neural Pathway) 傳遞至大腦。因此，聲音的機械波在耳朵中的傳導介質分別是氣體 (外耳)、固體 (中耳)、液體 (內耳)，如表1。

部位	構造	聲音傳導介質
外耳	耳殼、外耳道	氣體
中耳	鼓膜、聽骨	固體
內耳	耳蝸、前庭系統	液體

表 1: 人耳的主要構造

2.1.2 中樞聽覺系統

中樞聽覺系統又稱為聽覺神經系統 (Auditory Nervous System)，主要部分是位於聽神經和大腦皮質之間的聽覺神經路徑 (Auditory Neural Pathways)。耳蝸將聲音訊號轉換為神經

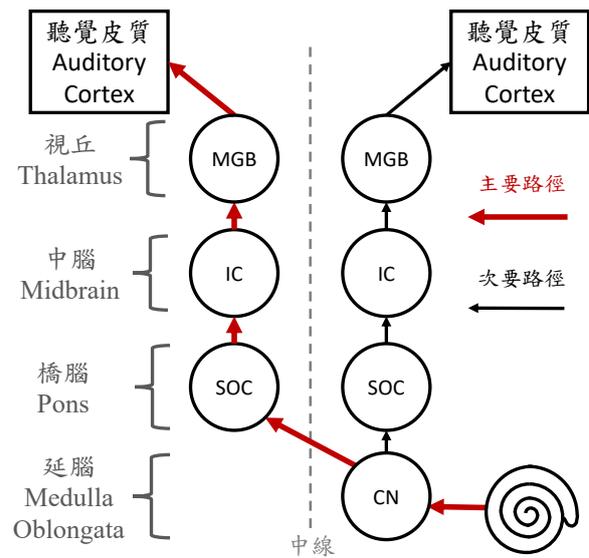


圖 1: 中樞聽覺路徑 (Central Auditory Pathway) (Huang, 2023)，其中的神經核團分別是：CN (Cochlear Nucleus): 耳蝸神經核；SOC (Superior Olivary Complex): 上橄欖複合體；IC (Inferior Colliculus): 下丘；MGB (Medial Geniculate Body): 內側膝狀體。自 CN 開始的傳遞路徑，主要是經由對側 SOC 往上，次要路徑則是經由同側。

脈衝的形式，以便在聽覺神經路徑中傳遞。聽覺神經與前庭神經組成了前庭耳蝸神經 (Vestibulocochlear Nerve)，即第八對腦神經 (Cranial Nerve VIII)，經過數層功能有如中繼站的神經核團 (Nuclei)，最終抵達大腦聽覺皮質。聽神經的傳導包含了兩個方向，分別是往大腦方向傳入 (Afferent) 路徑和反方向的傳出 (Efferent) 路徑，本文僅介紹往大腦方向的聲音傳入路徑。

中樞聽覺傳導路徑如圖1，自耳蝸起，經過同側延腦 (Medulla Oblongata) 中的耳蝸神經核 (Cochlear Nucleus, CN)，分為依照是否穿越中線 (Midline) 分為對側與同側路徑，其中多數的神經纖維通往對側，因此稱為主要路徑，而位在較神經纖維的同側則是次要路徑。這兩側的路徑皆經過位在橋腦 (Pons) 的上橄欖複合體 (Superior Olivary Complex)、中腦 (Midbrain) 的下丘 (Inferior Colliculus, IC)，此時離開腦幹進到大腦的部位，經過視丘 (Thalamus) 的內側膝狀體 (Medial Geniculate Body, MGB)，抵達聽覺皮質 (Pickles, 2013)。

2.2 聽覺電生理訊號

中樞聽覺路徑除了解剖學上對於構造與連接的認識，電生理訊號可幫助理解聽覺神經系統對於誘發訊號的反應。人體中有許多不同種類的

聽覺電生理訊號，學者們發現，依照從刺激音到聽覺誘發電位出現的時間，可分為早潛時 (Early Latency)、中潛時 (Middle Latency)、晚潛時 (Late Latency) 反應 (Plourde, 2006)。由於這些客觀的電位反應不會受到個案的意識所影響，因此近年來在臨床與認知相關領域越來越受到重視。

在刺激音後約 15 ms 內誘發的短潛時反應中，聽覺腦幹反應 (Auditory Brainstem Response, ABR) 在臨床上是相廣泛使用的聽力和聽神經的檢查方法，通常採用短聲刺激音進行誘發 (楊義良等人, 2020)。ABR 可客觀地檢查聽力，例如對於無法以言語表達的嬰幼兒，自動 ABR 檢查設備對於聽力異常具有相當不錯的判斷能力，已於納入新生兒聽力篩檢 (陳瑞玲等人, 2015)。此外，ABR 也可以判斷成年人的聆聽閾值，在聽損者的資格或保險失能鑑定等方面廣泛地採用。

有別於以短聲刺激音產生的 ABR，另一種以短語音刺激產生的短潛時反應，可稱為複合性聽覺腦幹反應 (Complex ABR) 或頻率跟隨反應 (Frequency-Following Response, FFR)，主要是腦皮質下 (Subcortical) 的中腦下丘的反應 (Kraus et al., 2017)。雖然 ABR 有相當成熟的臨床應用，但它的誘發刺激音不是存在於真實生活中的聲音，因此採用語音刺激更能反應實際的聆聽情形。由於 FFR 在臨床上的應用還不如 ABR 清楚明確，因此有不少學者在深耕與探索中。

3 頻率跟隨反應 (FFR)

FFR 出現已久，近年來重新受到學者們的重視 (Skoe and Kraus, 2010; Kraus et al., 2017; Jaxsens et al., 2024)，介紹如下。

3.1 誘發語音訊號

FFR 實驗以短語音透過耳機播放給受測者的聆聽，例如 /da/ 是常見的刺激音，因為它包括了子音跟具有週期性音高 (Pitch) 的母音，而且在大多數語言中都有這個音節 (Kraus et al., 2017)。雖然刺激語音的時間長度很短，通常在數十到數百個毫秒，然而在嚴謹的實驗設計上，一般而言語料的語言和成年人受測個案的母語最好仍要一致。

在英文研究方面，除了以 /da/ 短音作為刺激語料，有學者研究單純母音 /a/、/i/ (Aiken and Picton, 2008; Jeng et al., 2024)，或比較 /həd/、/hid/、/hüd/ 比較三個音節中母音的 FFR 表現差異 (Xu et al., 2023)。此外，也有研究是以 /ba/、/da/、/ga/ 等子音為主 (Hornickel et al., 2009)。

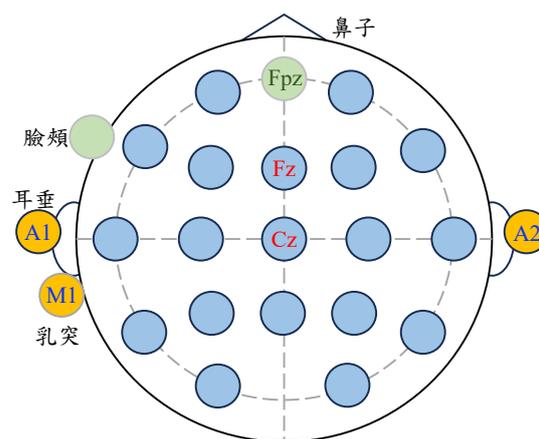


圖 2: 國際 10-20 系統 (19 個淺藍色腦波電極與 2 個參考電極) 與 FFR 和 ABR 的電極位置 (頭頂 Cz 或額頭 Fz; 負極: 耳垂 A1 或乳突 M1, 地極: 眉心 Fpz 或臉頰)。淺色圓圈表示不屬於國際 10-20 系統的 ABR 或 FFR 量測電極位置。

在中文的研究方面，台灣曾有學者採用「姨」(一ˇ, /yí/) (Jeng et al., 2011) 語音進行 FFR 實驗，而在美國也曾有針對以中文為母語者進行實驗，這些個案同時是 11 歲以後才學習英文的雙語者，所採用的刺激語音是「一」的四個聲調，包括「衣」(一, /yī/)、「姨」(一ˇ, /yí/)、「椅」(一ˇ, /yǐ/)、「易」(一、, /yì/) (Krishnan et al., 2005)。

3.2 電極位置

FFR 和 ABR 訊號量測的表面電極黏貼位置通常相同，皆是與腦電圖中的電極位置有關。圖 2 顯示一般腦電圖常用的國際 10-20 系統 (International 10-20 System)，包括 19 個頻道與 2 個參考電極，其中的特定位置與 FFR 和 ABR 的量測位置有關。一般而言，只要三個電極即可表示一個頻道，通常的位置是：正極：Cz 或額頭 Fz；負極：耳垂 A1 或耳後乳突 M1，地極：眉心 Fpz 或臉頰。

3.3 訊號處理

由於 FFR 訊號很微小 (≤ 100 nV)，因此容易受到人體本身和環境中的電訊號干擾 (Jeng et al., 2023)，一種解決的方法是將多次重覆刺激得到的誘發反應進行訊號平均 (Signal Averaging)，例如 1000 次至 6000 次，以消弱背景雜訊的影響 (Skoe and Kraus, 2010)。錄製 FFR 訊號所的儀器，需支援訊號的放大、濾波與錄製等功能 (Jeng et al., 2024)。

為了改善 FFR 的訊號處理，學者們提出了一些採用機器學習的方法，例如隱藏式馬可夫模型 (Hidden Markov Model, HMM) (Llanos et al., 2017, 2019)、支援向量機 (Support Vec-

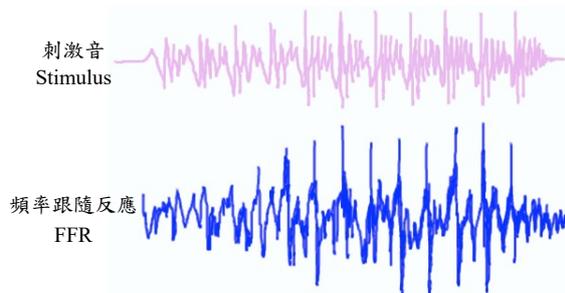


圖 3: 刺激音與理想的 FFR 訊號呈現鎖相 (Phase Locking) 關係 (Kraus et al., 2017)。

tor Machine, SVM) (Xie et al., 2019) 和音源分離非負矩陣分解 (Source Separation Non-negative Matrix Factorization, SSNMF) (Jeng et al., 2023, 2024), 希望更有效且準確地偵測出 FFR 訊號, 理想的結果如圖 3, 可以觀察到刺激音與 FFR 訊號呈現鎖相 (Phase Locking) 關係。

3.4 FFR 與聆聽經驗

研究發現以刺激音誘發的 FFR 反應會受到聆聽經驗的影響, 換句話說, 以聽覺腦幹的中腦下丘為主等神經網路是具有學習能力和可塑性的, 因此可觀察到 FFR 反應與聲音的學習有關連性, 可參考以下語言、音樂和閱讀等例子。

以語言為例, 可以塑造對於聲調的 FFR 反應 (Kraus, 2021)。曾有學者針對不同母語的正常聽力個案進行實驗, 結果發現以中文為母語的受測者相較於英文母語者, 在 FFR 波形的音高強度和追蹤的正確性更佳 (Tracking Accuracy) (Jeng et al., 2011), 顯示若從小聆聽聲調語言, 聽覺腦幹部位的神經網路已具備音高和語音聲調的學習能力, 在進入大腦前已進行過相關聽覺訊號的前處理。

在音樂的聆聽部分, 音樂經驗可以增進腦幹的聲音處理。例如, 對於有接受音樂訓練的兒童, 其 FFR 反應中的訊號雜訊比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 較未接受音樂訓練的兒童更高 (Skoe and Kraus, 2012)。此外, 對於沒有中文語言背景受測者, 其中的音樂家相較於非音樂家的 FFR 訊號, 較忠實地反應出對於音高的變化 (Wong et al., 2007)。因此, 這些研究都說明了音樂對於聽覺腦幹的可塑性 (Kraus and Chandrasekaran, 2010)。

此外, 一個有意思的研究是關於閱讀障礙 (Dyslexia)。對於聽力正常卻患有閱讀障礙的兒童, 在聆聽多次相同刺激音實驗中, 他們的 FFR 反應會有不一致性, 換句話說, 即使是播放相同的聲音, 但他們每次聽到的會有

些不同。研究指出, 使用課堂調頻系統 (FM System) 搭配類似助聽器的聆聽輔助裝置 (Listening Aid) 一年後, 即使這些聽力正常的兒童不再配戴聽力的情況下, 仍可以有效減少他們 FFR 反應上的變異性, 進而提高閱讀能力和語音意識 (Speech Awareness), 也證實了這些在個案身上的改變是包括了皮質下的神經性學習結果。(Hornickel et al., 2012; Kraus et al., 2017)。

4 人工電子耳頻率跟隨反應

本節介紹與人工電子耳相關的電誘發頻率跟隨反應 (Electrically-evoked Frequency-Following Response, eFFR)。

4.1 人工電子耳簡介

人工電子耳又稱為人工耳蝸 (Cochlear Implant, CI), 是目前對重度聽損者最有效的聽覺輔具。由於大多數重度聽損者已無法聽到助聽器所放大的聲音, 因此透過手術植入將電極陣列耳蝸內後, 可產生特定的電刺激形式 (Stimulating Patterns) 使神經脈衝訊號通過聽覺神經系統來感受到聽力。電子耳是近半個世紀以來在醫學工程領域中相當偉大的發明 (Zeng et al., 2008; Clark, 2015; Wilson, 2019), 目前全球植入人工電子耳的使用者已超過一百萬人 (Zeng, 2022), 而在台灣的電子耳醫療經驗也相當地成熟 (吳哲民與鄒詠婷, 2015)。雖然電子耳可成功地幫助重度聽損恢復溝通能力, 不同電子耳使用者的語音理解度差異 (Variability in Speech Intelligibility) 相當大 (Wilson, 2019), 能夠呈現個體差異表現的 FFR 訊號或許有機會提供較客觀的分析與解釋。

電子耳的系統架構如圖 4, 分為體外和體內兩部分。是一種使用電流刺激的聽力輔具。電子耳在人體外的部分是可以更換與升級的, 包括了聲音處理器 (Sound Processor) 和發射線圈。聲波由聲音處理器的麥克風所接收, 經過類比數位轉換 (Analog-to-Digital Converter) 和數位訊號處理, 以線圈發射無線電訊號至體內, 經接收解碼後, 由電極產生電流刺激聽神經。為了改善聆聽效果, 電子耳的訊號處理方法在持續地改良中, 例如噪音消除 (Noise Reduction) (Lai et al., 2017) 和聲音編碼策略 (Sound Coding Strategy) (Huang et al., 2021, 2024), 隨著深度學習與人工智慧科技的發展不斷前進 (黃心和、吳昭民與曹昱, 2023)。在電子耳的體內部分, 在接收到體外的無線電後, 以植入在耳蝸內的電陣列 (例如最普遍的設計是 22 個電極), 依照音高位置的不同刺

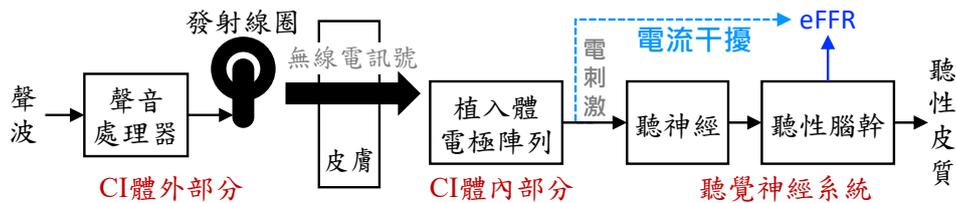


圖 4: 人工電子耳系統 (體外與體內部分)、聽覺神經系統、電誘發頻率跟隨反應 (eFFR) 訊號，以及 CI 電刺激對於 eFFR 的電生理訊號造成干擾的示意圖。

激聽神經，所產生的動作電位 (Action Potentials) 經過聽覺腦幹的神經路徑達到大腦的聽覺皮質而感受到聲音。

4.2 電誘發頻率跟隨反應

CI 使用者的聽覺腦幹也有 FFR 反應，不同的是刺激的訊號來源是電流，因此稱為 eFFR (Electrical FFR) 反應，有別於一般以聲音做為刺激訊號的 aFFR (Acoustic FFR) (Venâncio et al., 2022)。

電誘發頻率跟隨反應 (eFFR) 可用於評估人工電子耳使用者的聽覺腦幹處理，幫助理解神經系統對於聽力個體差異的影響，由於 CI 是以電刺激 (Electric Stimulation) 而非聲刺激 (Acoustic Stimulation) 產生反應，故訊號處理的電干擾挑戰更大，如圖4中藍色虛線表示電流干擾，可能改變原本的 eFFR 波形。因此有學者提出模板刪減法 (Template Subtraction) 方法來消除電刺激干擾 (Gransier et al., 2024)，或是嘗試國際 10-20 標準的其他電極位置 (Van Canneyt et al., 2017)。此外，也有學者提出讓正常聽力個案聆聽 CI 聲碼器 (Vocoder) 以及低通濾波器 (Lowpass Filter) 所結合的模擬語音，以評估電聲雙模聆聽 (Bimodal) 的效果 (Xu et al., 2023)。

因為相較於一般以聲音誘發的 FFR，eFFR 實驗能更直接的進行電刺激訊號的控制，但電刺激訊號也容易干擾 eFFR 訊號，因此在聽覺電生理訊號處理與聲音編碼與學習的領域既是挑戰也是機會

5 討論與結論

FFR 的研究除了幫助研究人員了解聽覺相關的神經機制，也可了解如何透過聲音訓練幫助聽損者與閱讀障礙者進改善其生活品質，對於聲音感知的生理及心理機制也能促進更深入的認識。由於人工電子耳的電聽覺 (Electric Hearing) 可提供聲聽覺 (Acoustic Hearing) 較無法觀察到的一些面向，值得更多的探索。

FFR 的重要推手是美國西北大學的 Nina Kraus 教授，她和團隊在神經科學與聽力學有許多的貢獻。Kraus 教授曾主編了一本關

於 FFR 的工具書《The frequency-following response: A window into human communication》(Kraus et al., 2017)，也撰寫了一本針對一般大眾的科普性質的書籍《Of Sound Mind》(中譯：《大腦這樣「聽」》，天下文化，2022 年) (Kraus, 2021)，其中包括了相當豐富的參考文獻，希望藉此推廣關於 FFR 的知識，使更多人了解甚至投入相關的研究。

在生成式人工智慧 (Generative Artificial Intelligence) 崛起的今日 (Feuerriegel et al., 2024)，FFR 相關研究的發現提醒著我們重新檢視對於現有科技和對聽覺生理 (Auditory Physiology) 的認識。人工神經網路 (Artificial Neural Networks) 日新月異，它們的設計最初是模仿生物神經網路 (Biological Neural Networks)，而此二種神經網路均有值得再思之處 (Hasson et al., 2020)。隨著人工智慧與機器學習等技術快速發展並應用到聽力保健 (Hearing Healthcare) 相關領域 (Lesica et al., 2021) 時，推陳出新的網路架構與仿生設計的初衷似乎漸行漸遠。此外，生理上的聽覺傳導路徑通常被視為剛性的神經訊號傳輸通道，(Pickles, 2013)，然而，研究證據指出聽覺路徑本身即是具有可塑性的神經網路，包括 FFR 相關的研究，顯示相關的神經網路是可以透過聆聽的訓練或經驗而調整輸出至大腦的聽覺神經訊號。從訊號處理的角度而言，透過訓練而增强的前端聽覺路徑，是有助於後續大腦聽覺處理的 (Kraus et al., 2017)，若能透過觀察 FFR 等電生理訊號的客觀結果，為聽損者等人士發展有效改善聽覺神經處理的聽力訓練或復健方法，值得更深入的探索。

本文是從語音訊號處理的角度對於 FFR 的回顧性文章，除了提供聽覺系統和電生理學的背景知識，也介紹相關的研究成果。FFR 不僅能顯示腦幹樞紐位置的下丘的反應，也可呈現個體的差異和學習的影響。除了以聲音刺激的 FFR 反應，人工電子耳使用者對於電刺激的 eFFR 反應也是值得探討的議題。期盼能對於語言、聽力、和聲音訊號處理等專業背景的研究人員帶來一些啟發。

參考文獻

- Steven J Aiken and Terence W Picton. 2008. Envelope and spectral frequency-following responses to vowel sounds. *Hearing research*, 245(1-2):35–47.
- Graeme M Clark. 2015. The multi-channel cochlear implant: Multi-disciplinary development of electrical stimulation of the cochlea and the resulting clinical benefit. *Hearing research*, 322:4–13.
- Stefan Feuerriegel, Jochen Hartmann, Christian Janiesch, and Patrick Zschech. 2024. Generative ai. *Business & Information Systems Engineering*, 66(1):111–126.
- Robin Gransier, Robert P Carlyon, Matthew L Richardson, John C Middlebrooks, and Jan Wouters. 2024. Artifact removal by template subtraction enables recordings of the frequency following response in cochlear-implant users. *Scientific reports*, 14(1):6158.
- Uri Hasson, Samuel A Nastase, and Ariel Goldstein. 2020. Direct fit to nature: an evolutionary perspective on biological and artificial neural networks. *Neuron*, 105(3):416–434.
- Jane Hornickel, Erika Skoe, Trent Nicol, Steven Zecker, and Nina Kraus. 2009. Subcortical differentiation of stop consonants relates to reading and speech-in-noise perception. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(31):13022–13027.
- Jane Hornickel, Steven G Zecker, Ann R Bradlow, and Nina Kraus. 2012. Assistive listening devices drive neuroplasticity in children with dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(41):16731–16736.
- Enoch Hsin-Ho Huang. 2023. *Investigations of cochlear implant sound coding strategies based on auditory physiology and deep learning*. National Central University, Taoyuan, Taiwan.
- Enoch Hsin-Ho Huang, Rong Chao, Yu Tsao, and Chao-Min Wu. 2024. Electrodenet—a deep-learning-based sound coding strategy for cochlear implants. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 16(1):346–357.
- Enoch Hsin-Ho Huang, Chao-Min Wu, and Hung-Ching Lin. 2021. Combination and comparison of sound coding strategies using cochlear implant simulation with mandarin speech. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 29:2407–2416.
- Laura Jacxsens, Lana Biot, Carles Escera, Annick Gilles, Emilie Cardon, Vincent Van Rompaey, Willem De Hertogh, and Marc JW Lammers. 2024. Frequency-following responses in sensorineural hearing loss: A systematic review. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 25(2):131–147.
- Fuh-Cherng Jeng, Hsiung-Kwang Chung, Chia-Der Lin, Brenda Dickman, and Jiong Hu. 2011. Exponential modeling of human frequency-following responses to voice pitch. *International journal of audiology*, 50(9):582–593.
- Fuh-Cherng Jeng, Tzu-Hao Lin, Breanna N Hart, Karen Montgomery-Reagan, and Kalyn McDonald. 2023. Non-negative matrix factorization improves the efficiency of recording frequency-following responses in normal-hearing adults and neonates. *International Journal of Audiology*, 62(7):688–698.
- Fuh-Cherng Jeng, Katie Matzdorf, Kassy L Hickman, Sydney W Bauer, Amanda E Carriero, Kalyn McDonald, Tzu-Hao Lin, and Ching-Yuan Wang. 2024. Advancing auditory processing by detecting frequency-following responses through a specialized machine learning model. *Perceptual and Motor Skills*, 131(2):417–431.
- Nina Kraus. 2021. *Of sound mind: How our brain constructs a meaningful sonic world*. MIT Press.
- Nina Kraus, Samira Anderson, and Travis White-Schwoch. 2017. *The frequency-following response: A window into human communication*. Springer.
- Nina Kraus and Bharath Chandrasekaran. 2010. Music training for the development of auditory skills. *Nature Reviews Neuroscience*, 11(8):599–605.
- Ananthanarayan Krishnan, Yisheng Xu, Jackson Gandour, and Peter Cariani. 2005. Encoding of pitch in the human brainstem is sensitive to language experience. *Cognitive Brain Research*, 25(1):161–168.
- Ying-Hui Lai, Fei Chen, Syu-Siang Wang, Xugang Lu, Yu Tsao, and Chin-Hui Lee. 2017. A deep denoising autoencoder approach to improving the intelligibility of vocoded speech in cochlear implant simulation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 64(7):1568–1578.
- Nicholas A Lesica, Nishchay Mehta, Joseph G Manjaly, Li Deng, Blake S Wilson, and Fan-Gang Zeng. 2021. Harnessing the power of artificial intelligence to transform hearing health-care and research. *Nature Machine Intelligence*, 3(10):840–849.
- Fernando Llanos, Zilong Xie, and Bharath Chandrasekaran. 2017. Hidden Markov modeling of frequency-following responses to Mandarin lexical tones. *Journal of neuroscience methods*, 291:101–112.

- Fernando Llanos, Zilong Xie, and Bharath Chandrasekaran. 2019. Biometric identification of listener identity from frequency following responses to speech. *Journal of neural engineering*, 16(5):056004.
- James O. Pickles. 2013. *An introduction to the physiology of hearing*, fourth edition. Brill.
- G Plourde. 2006. Auditory evoked potentials. *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, 20(1):129–139.
- Erika Skoe and Nina Kraus. 2010. Auditory brain stem response to complex sounds: A tutorial. *Ear and hearing*, 31(3):302–324.
- Erika Skoe and Nina Kraus. 2012. A little goes a long way: How the adult brain is shaped by musical training in childhood. *Journal of Neuroscience*, 32(34):11507–11510.
- Jana Van Canneyt, Michael Hofmann, Tom Francart, and Jan Wouters. 2017. Frequency following responses in cochlear implant users. In *Conference on Implantable Auditory Protheses, Date: 2017/07/16-2017/07/21, Location: Lake Tahoe, USA*.
- Leonardo Gleygson Angelo Venâncio, Mariana de Carvalho Leal, Laís Cristine Delgado da Hora, Silvana Maria Sobral Griz, and Lilian Ferreira Muniz. 2022. Frequency-following response (ffr) in cochlear implant users: a systematic review of acquisition parameters, analysis, and outcomes. In *CoDAS*, volume 34, page e20210116. SciELO Brasil.
- Blake S Wilson. 2019. The remarkable cochlear implant and possibilities for the next large step forward. *Acoustics Today*, 15(1):53–61.
- Patrick CM Wong, Erika Skoe, Nicole M Russo, Tasha Dees, and Nina Kraus. 2007. Musical experience shapes human brainstem encoding of linguistic pitch patterns. *Nature neuroscience*, 10(4):420–422.
- Zilong Xie, Rachel Reetzke, and Bharath Chandrasekaran. 2019. Machine learning approaches to analyze speech-evoked neurophysiological responses. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 62(3):587–601.
- Can Xu, Fan-Yin Cheng, Sarah Medina, Erica Eng, René Gifford, and Spencer Smith. 2023. Objective discrimination of bimodal speech using frequency following responses. *Hearing research*, 437:108853.
- Fan-Gang Zeng. 2022. Celebrating the one millionth cochlear implant. *JASA Express Letters*, 2(7).
- Fan-Gang Zeng, Stephen Rebscher, William Harrison, Xiaoan Sun, and Haihong Feng. 2008. Cochlear implants: System design, integration, and evaluation. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 1:115–142.
- 吳哲民與鄒詠婷. 2015. 人工電子耳綜論 (Cochlear implantation)[in Chinese]. *台灣耳鼻喉頭頸外科雜誌*, 50(4):197–210.
- 楊義良等人. 2020. 電生理聽力學 (*Auditory Electrophysiology*)[in Chinese]. 華騰文化, 台北市.
- 陳瑞玲等人. 2015. 台灣實施公費新生兒聽力篩檢之過去, 現況與未來 (The past, present and future of newborn hearing screening program in Taiwan)[in Chinese]. *台灣耳鼻喉頭頸外科雜誌*, 50(2):67–73.
- 黃心和、吳炤民與曹昱. 2023. 人工電子耳聲音訊號處理：通往人工智慧的創新旅程 (Sound processing for cochlear implants: The journey of innovation toward artificial intelligence)[in Chinese]. In *Proceedings of the 35th Conference on Computational Linguistics and Speech Processing (ROCLING 2023)*, pages 227–232.