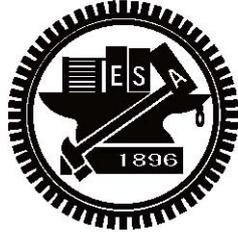


①



國立交通大學
National Chiao Tung University

出國報告（出國類別：**出國短期研究**）

②

題目：建構在EEGLab 上之最大對比
光束構成器以進行腦神經網路活動
時空造影之研究

③

服務機關：**資訊工程系**
姓名職稱：**陳永昇 副教授**
前往國家：**美國 聖地牙哥**
出國期間：**101/07/17~07/20**
101/07/27~08/14
報告日期：**102/01/15**

一、摘要 (200-300 字)

為了加強與加州大學聖地牙哥分校之間的學術交流，我們利用前往美國亞特蘭大參加計算神經科學學會年度會議的機會，於會議前、後繞道加州聖地牙哥，與該校 Swartz Center for Computational Neuroscience 的中心副主任鍾子平教授研討有關「獨立成份分析法 (Independent Component Analysis, ICA)」之相關合作議題，藉此機會與該中心相關研究人員進行交流討論，互相分享研究經驗，提升雙方的合作研究能量。在訪問期間我們合作在該中心所發展的 EEGLab 平台上開發了最大對比光束構成法，可利用腦電波訊號計算神經網路活動動態，這項技術對於運用生理訊號來分析人體對環境的感知、進而發展新一代互動介面之生活科技是非常重要的。此行也確立了雙方的合作模式，未來我們將更緊密進行雙邊研究合作，開發更進一步的基礎技術，對於頂尖研究中心「智慧型環境與生活科技」之發展目標大有助益。

二、目次

三、本文.....	4
(一) 目的.....	4
(二) 過程.....	4
(三) 心得及建議.....	8

三、本文

(一) 目的

本次短期研究的主要目的在加強與加州大學聖地牙哥分校 (UCSD) 之間的學術交流，並與該校 Swartz Center for Computational Neuroscience 的中心副主任鍾子平教授建立合作模式，針對「獨立成份分析法 (Independent Component Analysis, ICA)」之相關研究主題，與該中心相關研究人員進行交流討論，互相分享研究經驗，提升雙方的合作研究能量。

鍾子平教授是 fMRI/EEG 之獨立成份分析法全球最權威的學者之一，有非常豐富的論文著作發表在頂尖期刊如 Science、PNAS、NeuroImage、Human Brain Mapping、Journal of Neuroscience、PLoS One、Proceedings of IEEE、與 IEEE Transactions on Biomedical Engineering 等。我們規劃在鍾教授團隊所開發的 EEGLab 平台上，開發最大對比光束構成法之神經網路活動時空造影技術，並借重鍾教授實驗室的專業實驗操作者來予以驗證，以確認該技術之準確性，以期未來能應用在認知神經功能實驗與腦機介面系統中。

(二) 過程

為了節省機票旅費，我們這次的短期研究是搭配計算神經科學學會年度會議 (Annual Meeting of Computational Neuroscience Society, CNS) 一起執行。這個會議是由國際計算神經科學組織所籌辦的，為該研究領域最重要的學術會議之一，每年均吸引許多研究學者參與。今年會議地點在美國喬治亞州亞特蘭大市郊的 Decatur，借用 Agnes Scott College 的會議廳來舉辦。我們在會議前一天抵達亞特蘭大，隔天開始全程參與會議(7/21~7/26)，並發表了研究論文：“Dysfunction of cross-frequency phase-phase coupling in primary dysmenorrhea: a resting magnetoencephalographic study”。這篇論文的重點在如何利用腦磁圖來研究原發性痛經病患在休息狀態時，其腦部活動之跨頻率相位耦合的不正常現象。在會議中我們與許多研究學者分享研究心得，針對多重頻率之間的訊號分析技術與臨床應用多所討論，收穫十分豐盛。

在 UCSD 訪問的 23 天裡 (7/17~7/20, 7/27~08/14)，經過與鍾教授團隊成員密切討論，我們已在該中心所發展的 EEGLab 平台上開發了最大對比光束構成法，可利用腦電波訊號計算神經網路活動動態，這項技術對於運用生理訊號來分析人體對環境的感知、進而發展新一代互動介面之生活科技是非常重要的。針對光束構成法用以估算神經活動源的研究，我們曾經在 IEEE Transactions on

Biomedical Engineering 發表一篇論文：“Maximum contrast beamformer for electromagnetic mapping of brain activity”。這篇代表著作中提出了一個名為「最大對比光束構成法」(maximum contrast beamformer) 的腦電磁波活動源造影技術，依據單位增益 (unit gain) 及最小變異量 (minimum variance) 兩準則，在保留目標訊號源強度並同時抑制其他訊號源干擾的前提下，針對腦部皮質區進行掃描並計算其空間濾波器，準確地對腦部活動源進行時空造影。這篇論文的最大貢獻是在解決電流偶極方向的估算問題，在活化與休息狀態神經活化變異量的比值 (F 統計量) 最大化的條件下，我們推導出以封閉形式解 (closed-form solution) 的方式來決定訊號源電流偶極方向的最佳解。這個解純粹由腦電磁波訊號來估算，不僅不會受到腦結構影像估算皮質表面法向量的誤差所影響，也更能反應不同神經網路的活動動態。同時這個解僅需計算 3×3 矩陣的最大特徵值所對應的特徵向量，效率很高且為最佳解，因而可以對整個頭部空間進行全面掃描，分別計算最佳空間濾波器並得到神經活化統計量。我們提出的這個方法是創新之光束構成電流偶極方向解析解，解決了這個非良置性逆估算問題，促進了腦電磁波訊號活動源時空造影的研究領域往前邁進一步，有助於闡明神經網路活動動態與人腦功能。

在腦電波的正向模型中，用導場向量(lead field vector) $\mathbf{l}_\theta \in \mathbb{R}^C$ 代表一個參數為 $\theta = \{\mathbf{r}, \mathbf{q}\}$ 的偶極活動源(dipole source)對 C 個感測器的影響：

$$\mathbf{l}_\theta = \mathbf{G}_r \mathbf{q} , \quad (1)$$

其中 $\mathbf{G}_r \in \mathbb{R}^{C \times 3}$ 是增益矩陣，描述一個位於 $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^3$ 的偶極活動源對於 C 個感測器個影響，而 $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^3$ 則是一個描述活動源方向的單位向量。

腦波量測資料 $\mathbf{m}(t) = [m_1(t) \ m_2(t) \ \dots \ m_C(t)]' \in \mathbb{R}^C$ 是腦部整體的活動的綜合貢獻，在本研究中的正向模型將使用分散式活動源模型(distributed source model)，假設量測資料是由分散於腦中不同位置的 P 個偶極活動源 $\mathbf{s}(t) = [s_1(t) \ s_2(t) \ \dots \ s_P(t)]' \in \mathbb{R}^P$ 所貢獻的，每個活動源會有一組對應的參數 $\theta_p = \{\mathbf{r}_p, \mathbf{q}_p\}$, $p = 1, 2, \dots, P$ ，其中 \mathbf{r}_p 代表偶極活動源的位置而 \mathbf{q}_p 則是該活動源的方向。腦波量測資料 $\mathbf{m}(t) = [m_1(t) \ m_2(t) \ \dots \ m_C(t)]' \in \mathbb{R}^C$ 和活動源 $\mathbf{s}(t)$ 間的關聯可以使用一個線性式表示：

$$\mathbf{m}(t) = \mathbf{L}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) , \quad (2)$$

其中 $m_c(t)$ 是在第 c 個感測器所量到時序訊號，而 $\mathbf{L} = [\mathbf{l}_{\theta_1} \ \mathbf{l}_{\theta_2} \ \dots \ \mathbf{l}_{\theta_P}] \in \mathbb{R}^{C \times P}$ 是由 P 個不同偶極參數的導場向量 \mathbf{l}_{θ_p} 所組成的導場矩陣， $s_p(t) \in \mathbb{R}$ 是第 p 個偶極活動源在時間 t 的強度，而 $\mathbf{n}(t) \in \mathbb{R}^C$ 則是外加雜訊。

光束構成法是一種空間濾波器 \mathbf{w}_θ ，它可以在單位增益 ($\mathbf{w}_\theta^T \mathbf{l}_\theta = 1$) 的條件下針對每一個指定的位置進行訊號濾波，以求得腦部活動源訊號：

$$\begin{aligned}
y(t) &= \mathbf{w}_\theta^T \mathbf{m}(t) \\
&= \mathbf{w}_\theta^T \mathbf{m}_\theta(t) + \mathbf{w}_\theta^T \mathbf{m}_n(t) \\
&= s_\theta(t) \mathbf{w}_\theta^T \mathbf{l}_\theta + \mathbf{w}_\theta^T \mathbf{m}_n(t) \\
&= s_\theta(t) + \mathbf{w}_\theta^T \mathbf{m}_n(t)
\end{aligned}$$

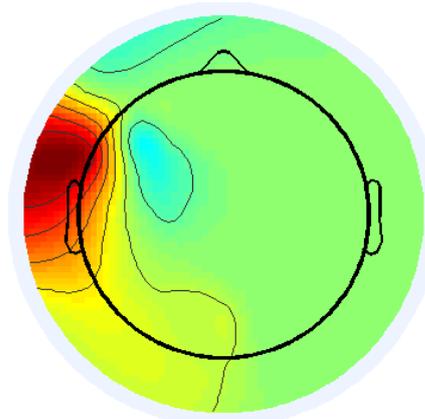
在最小化濾波能量的目標下，可以減小雜訊與非指定位置活動源所造成的影響，因而求得空間濾波器 \mathbf{w}_θ 的最佳解：

$$\begin{aligned}
\hat{\mathbf{w}}_\theta &= \arg \min_{\mathbf{w}_\theta} [E \{ \|y(t) - E \{y(t)\}\|^2 \} + \alpha \|\mathbf{w}_\theta\|^2] \\
&\quad \text{subject to } \mathbf{w}_\theta^T \mathbf{l}_\theta = 1 \\
&= \arg \min_{\mathbf{w}_\theta} \mathbf{w}_\theta^T (\mathbf{C} + \alpha \mathbf{I}) \mathbf{w}_\theta \\
&= \frac{(\mathbf{C} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{l}_\theta}{\mathbf{l}_\theta^T (\mathbf{C} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{l}_\theta}
\end{aligned}$$

而我們則可以在最大化動作與控制之活動能量對比的前提下，導出腦部活動源方向的封閉型式解：

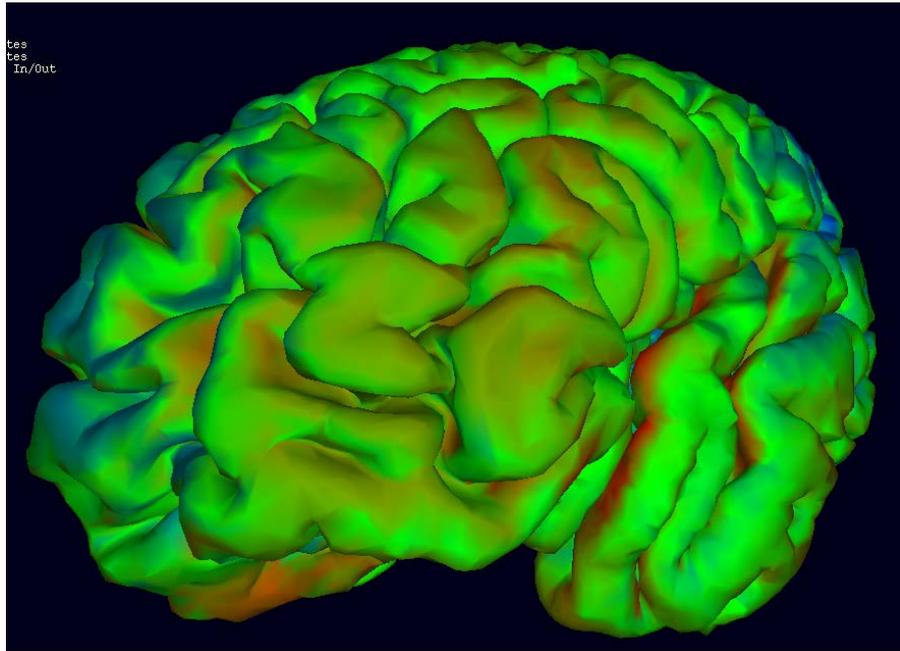
$$\begin{aligned}
\hat{\mathbf{q}} &= \arg \max_{\mathbf{q}} F_\theta = \arg \max_{\mathbf{q}} \frac{\mathbf{w}_\theta^T \mathbf{C}_a \mathbf{w}_\theta}{\mathbf{w}_\theta^T \mathbf{C}_c \mathbf{w}_\theta} \\
&= \arg \max_{\mathbf{q}} \frac{\left(\frac{\mathbf{A}_r \mathbf{q}}{\mathbf{q}^T \mathbf{B}_r \mathbf{q}} \right)^T \mathbf{C}_a \left(\frac{\mathbf{A}_r \mathbf{q}}{\mathbf{q}^T \mathbf{B}_r \mathbf{q}} \right)}{\left(\frac{\mathbf{A}_r \mathbf{q}}{\mathbf{q}^T \mathbf{B}_r \mathbf{q}} \right)^T \mathbf{C}_c \left(\frac{\mathbf{A}_r \mathbf{q}}{\mathbf{q}^T \mathbf{B}_r \mathbf{q}} \right)} \\
&= \arg \max_{\mathbf{q}} \frac{\mathbf{q}^T \mathbf{A}_r^T \mathbf{C}_a \mathbf{A}_r \mathbf{q}}{\mathbf{q}^T \mathbf{A}_r^T \mathbf{C}_c \mathbf{A}_r \mathbf{q}} \\
&= \arg \max_{\mathbf{q}} \frac{\mathbf{q}^T \mathbf{P}_r \mathbf{q}}{\mathbf{q}^T \mathbf{Q}_r \mathbf{q}}
\end{aligned}$$

在鍾教授團隊成員 Zeynep Akalin Acar 與 Cheng Cao 的協助之下，我指導來自台灣陽明大學的李品萱同學完成了該演算法在 EEGLab 上的開發，並以該團隊 Makoto Miyakoshi 博士的聲音刺激 EEG 訊號（如下圖一所示）進行測試。



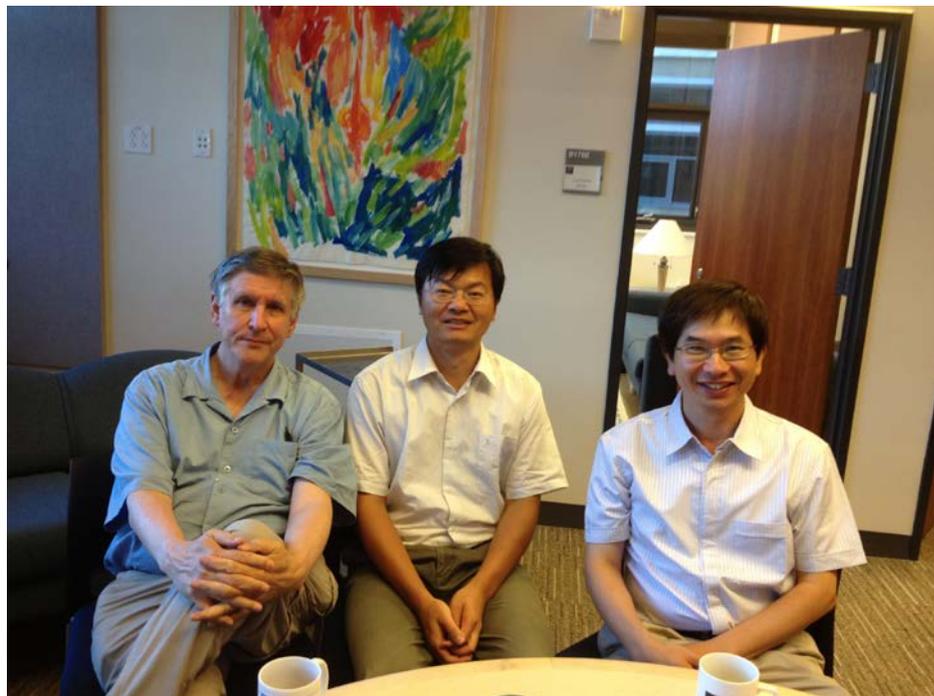
圖一：聲音刺激 EEG 訊號之空間拓樸圖。

經過 ICA 分解以去除雜訊干擾源成分後，我們所獲得的實驗結果如下圖二所示，可準確地將腦部活動源定位在主要聽覺皮質區：



圖二：利用最大對比光束構成法進行聲音刺激之腦部活動源估算結果。

在這三週的短期研究期間，我們不但達到了預定完成的目標，在該中心進行這項技術開發的專題報告，更重要的是與鍾教授及該中心主任 Scott Makeig 教授多所研討，確立了雙方的合作模式，未來我們將更緊密進行雙邊研究合作，開發更進一步的腦功能研究基礎技術。



圖三：與 UCSD SCCN 中心主任 Scott Makeig 教授（左）與副主任鍾子平教授（右）合影。

(三) 心得及建議

根據 2012 University Report，在生醫工程與生物工程領域，加州大學聖地牙哥分校是全美排名第二的頂尖大學，在神經科學的研究也是居全球領先地位，人才濟濟，設備、環境等資源相當完備，與交大有長期、密切的研究合作。透過這次的短期研究，我們在鍾教授的協助之下提升了國際視野與人脈連結、增進神經科學實驗的技巧與結果解讀能力，並結合雙方的專長完成研究與腦電波分析程式的開發。我們對於鍾教授團隊如何進行實驗室管理、認知腦電波實驗的進行、團隊默契地建立、對科學研究嚴謹的態度等等都留下很深刻的印象，整體而言收穫十分豐盛。

交通大學正在努力推動生醫工程領域的研究，在原本電機資訊工程的厚實基礎上，結合生物醫學基礎科學研究，培養兼備生醫與工程知識之高階研究人才。若能獲得如 UCSD 等頂尖大學的協助，以合作的方式進行生醫資訊與工程相關跨領域與突破性的研究，必能加速達到提升相關研發能量、開創未來新興生醫科技產業的目標。