

Frameless Stereotactic Image Guidance System을 이용한 대뇌 피질상의 두피 전극의 국소화

성균관대학교 의과대학 삼성서울병원 신경과, 원광대학교 의과대학 산본병원 신경과*

김대영 주은연 태우석 한선정* 조재욱 서대원 홍승봉

Cortical Localization of Scalp Electrodes on Three-Dimensional Brain Surface Using Frameless Stereotactic Image Guidance System

Daeyoung Kim, M.D., Eun Yeon Joo, M.D., Woo Suk Tae, Ph.D., Sun Jung Han, M.D.*,
Jae-Wook Cho, M.D., Dae Won Seo, M.D., Ph.D., Seung Bong Hong, M.D., Ph.D.

Department of Neurology, Samsung Medical Center, Sungkyunkwan University School of Medicine,

**Department of Neurology, Sanbon Medical Center, College of Medicine, Wonkwang University*

Background: The purpose of this study was to localize the cortical regions reflected by overlying scalp electrodes.

Methods: We enrolled 10 patients with epilepsy (5 males, mean age 29.7 years old). Thin slice coronal T1 weighted MR images were obtained and then scalp EEG electrodes were placed based on an international 10-20 system. Cortical locations of scalp electrodes were determined using a real-time frameless stereotactic image guidance system, *Brainsight*[®].

Results: The locations of 19 scalp electrodes were marked on the 3D rendered cortical surface of one representative patient's MRI; Fp1 (Fp2) on the anterior pole of the middle frontal gyrus, Fz on the mid-point of the interhemispheric fissure in the frontal lobe, F3 (F4) on the mid-portion of the middle frontal gyrus, F7 (F8) on the pars triangularis of the inferior frontal gyrus, Cz on the interhemispheric fissure where a lateral precentral gyrus starts, C3 (C4) scattered around postcentral gyrus, T3 (T4) on the middle temporal gyrus, P3 (P4) on the angular gyrus, Pz on the mid-point of the interhemispheric fissure in the parietal lobe, T5 (T6) on the posterior part of the inferior temporal gyrus, and O1 (O2) on the occipital pole.

Conclusions: The locations of scalp electrodes were well correlated with conventional concepts of their cortical locations. The individual differences of the scalp electrode locations may be due to the different sizes and morphologies of the brains in each of the patients. Real time cortical localization of scalp electrodes using the Frameless Stereotactic Image Guidance System may provide useful information for more accurate localization of focal cerebral activity in partial epilepsy patients.

J Korean Neurol Assoc 25(2):155-160, 2007

Key Words: Frameless stereotaxy, Scalp electrodes, EEG, MRI

Received September 20, 2006 Accepted December 11, 2006

* Seung Bong Hong, MD, PhD.

Department of Neurology, Samsung Medical Center, Sungkyunkwan University School of Medicine

50 Irwon-dong, Gangnam-gu, 135-710, Seoul, Korea.

Tel: +82-2-3410-3592, Fax: +82-2-3410-0052

E-mail: sbhong@smc.samsung.co.kr

* This study was supported by a grant of IN-SUNG Foundation for medical Research (CA68501), by a grant (no. A050462) of the Good Health R&D Project, Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea, and by a grant (M103KV010016-06K2201-01610) from Brain Research Center of the 21st Century Frontier Research Program funded by the Ministry of Science and Technology of the Republic of Korea.

서 론

뇌는 다양한 전기 활동을 보이며 이는 뇌파기(electroencephalography)로 기록할 수 있다. 뇌파는 뇌의 전기 활동을 1/1000초 단위의 높은 시간해상도(temporal resolution)로 분석할 수 있는 장점이 있지만, 공간해상도(spatial resolution)가 낮은 단점이 있다. 최근 간질을 포함한 다양한 신경학적 질환의 진단과 치료에 있어 뇌파의 단점을 극복하고 뇌파의 전기 활동을 자세히 국소화하려는 방법이 연구되고 있다. 국소화를 위해서는 뇌의 해부학적 구조상에서 두피 전극의 정확한 위치



Figure 1. Frameless stereotactic image guidance system (a real-time MRI-navigator system, *Brainsight*®)

를 아는 것이 필수적이다.¹

두피 전극의 위치를 파악하기 위해 다양한 연구가 시행되었다. 초기에는 시신 부검으로 국제 10-20 뇌파계(international 10-20 system)의 해부학적 위치를 규명하려 하였으며,² 두개 단순 엑스선(plain skull X-ray)으로 위치를 파악하기도 했다.³ 이후 뇌파 전극을 부착한 후 뇌 전산화 단층촬영(brain computed tomography)을 시행하여 전극의 위치를 연구하기도 했으며,⁴ 자기 공명 영상(magnetic resonance imaging, MRI) 촬영이 가능한 장치를 이용하여 뇌파 전극을 부착한 상태에서 뇌 MR 영상을 얻고⁵ 뇌파 전극에 상자성(paramagnetic)의 표지자를 부착하여 뇌 MRI상에서 전극의 위치를 파악하기도 했다.⁶ 그 외 초음파 펄스(ultrasonic pulse)를 이용한 frameless armless stereotactic wand를 사용하여 전극의 위치를 파악한 후 이를 환자의 MR 영상에 등록시키는 방법과⁷ magnetic digitizer를 이용하여 전극을 MR 영상에 등록시키는 방법도 소개된 바 있다.^{8,9} 뇌 MRI를 이용한 뇌파 전극의 위치 측정 방법으로 두피 전극의 정확한 위치 파악은 가능하지만,⁶ 자기장 내에서 사용할 수 있는 전극이 필요하고, 전극이 붙어 있는 상태에서 MRI를 시행해야 하므로 이미 진단적 목적으로 뇌 MRI를 시행한 환자의 경우 재촬영에 따른 비용 증가가 예상되므로 임상에서 시행하기에는 제한점이 있다.¹

본 연구에서는 아직 국내에서는 생소한, 실시간 frameless stereotactic image guidance system을 이용하여 두피 전극을 뇌의 삼차원 MR 영상에 등록한 후 그 전극의 위치를 대뇌 표면의 고랑과 이랑에 따라 국소화하였다.

대상과 방법

1. 대상

2006년 4월 1일부터 5월 31일까지 삼성서울병원에서 24시간

비디오-뇌파 검사를 위해 입원했던 10명의 간질 환자를 대상으로 하였다. 미리 시행한 뇌 MRI 결과에서 두개 및 뇌에 구조적 병변이 있거나 뇌수술을 받은 병력이 있는 환자들은 제외하였다. 대상군의 평균 연령은 29.7세(16-41세)였으며 남자 5명, 여자 5명이었다. 대상자들의 간질 증후군에 따라 전극을 부착한 위치가 다르기 때문에 모든 환자들에게 공통적으로 부착하는 국제 10-20 뇌파계에 포함된 전극들의 위치만 측정하였다.

2. 방법

1) 삼차원 MRI (three dimensional magnetic resonance imaging)의 시행

MR 영상은 1.5 Tesla General Electric SIGNA system (GE Medical System, Milwaukee, Wisc., USA)을 이용하였으며 Coronal Spoiled-Gradient-Recalled sequence (SPGR)를 포

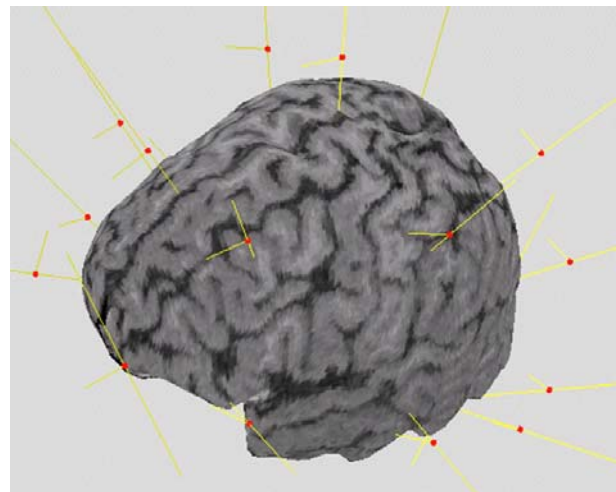


Figure 2. Registered electrodes on three-dimensional reconstructed brain MR images. Small spheres represent the position of scalp electrodes. Straight lines on the spheres represent the trajectory of the pointer.

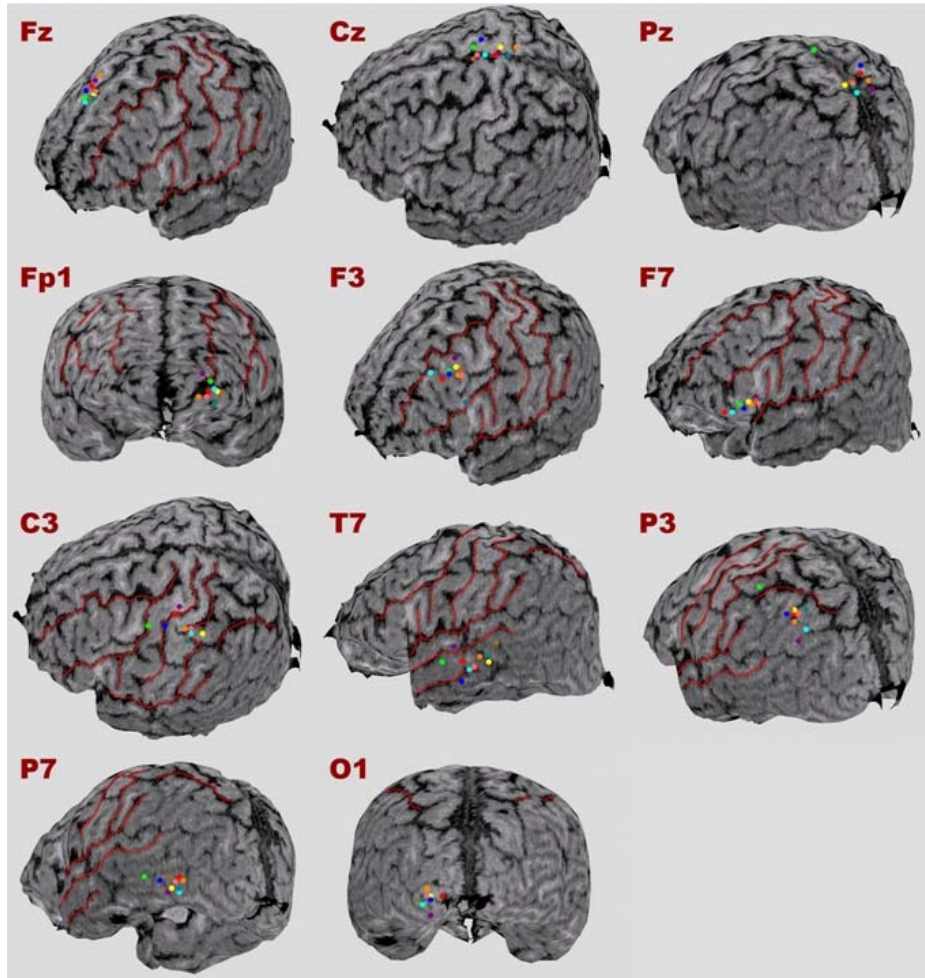


Figure 3. Location of EEG electrodes on three-dimensional rendering brain. Electrodes are marked as colored dots. Dots of each color represent the electrodes placed on a patient. The representative brain in the figure is the one of patients enrolled in the study.

함하였다. SPGR 영상은 1.6 mm의 절편 두께, 연속된 124장의 영상, 반복 시간(TR, time of repetition) 30 msec, 반향 시간(time of echo) 7 msec, 절편 간격 없음(no slice gap), 숙임각(FA, flip angle) 45도, FOV (field of view) 22 × 22 cm, matrix 256 × 192, 여기횟수(number of excitation) 1을 매개 변수로 하여 촬영하였다. SPGR 영상데이터는 DICOM3 (digital imaging and communications in medicine protocol)를 이용하여 fast-ethernet을 통해 computer workstation (Power Mac G4, Apple Computer Inc., Cupertino, CA)으로 전송하였다. 전송한 SPGR 영상은 frameless stereotactic image guidance system (Brainsight Frameless, Magne-stim co., Whitland, UK)에서 제공한 software를 이용해 curvilinear 방법으로 분할(segmentation)하였다. 뇌 외곽 형태의 굴곡을 그리면, 프로그램이 자동으로 슬라이스 간격을

보정해 주고, 미리 지정한 깊이에 따라 새로운 뇌 표면을 만들어 준다. 만들어진 삼차원 영상에는 이랑과 고랑의 구조뿐 아니라 회색질과 백색질의 분포도 자세하게 나타낸다.

2) 전극 위치의 등록(Co-registration of scalp electrodes on three-dimensional MRI surface)

Frameless stereotactic image guidance system은 정위 고정틀(stereotactic frame) 대신 적외선 위치 감지 카메라 (infrared position sensor camera, Polaris² Camera, Magne-stim Co., Whitland, UK)를 사용한다(Fig. 1).

두피 전극의 위치를 측정하기 위하여 우선 대상자의 3차원 뇌 MR 영상을 workstation에 등록시킨 후 환자의 머리에 추적자(tracker)를 부착하였다. 추적자는 3개 이상의 구체가 배열된 형태를 하고 있으며, 위치 감지 카메라는 구체들에서 반사되는

빛을 포착한다. 위치 감지 카메라에 의해 좌표 공간(coordinate space)이 설정되면 이 공간 내에서 추적자의 위치와 움직임이 감지되고 이를 workstation에서 처리한다. MR 영상에서 3개의 해부학적 지점인 코뿌리점(nasion)과 양측 귓바퀴 앞점(pre-auricular point)을 기준으로 삼았으며, 추적자가 부착된 지시기로 환자의 3개 점의 좌표를 등록하여 좌표 공간 내에서 환자의 머리가 3차원 뇌 MR 영상과 일치되도록 하였다. 대상자의 MR 영상에 위치 감지 카메라로부터 얻어진 좌표 정보를 덧씌워 관상(coronal), 시상(sagittal), 축방향(axial) MR 영상에서 추적자의 위치를 교차 확인하였다. 대상자의 실제 머리 위치와 일치하는 MR 영상이 등록되면, 추적자가 부착된 지시기를 각 전극과 평행하는 가상의 선과 직각으로 세워서, 3차원 표면 렌더링(surface rendering) MR 영상 위에 그 위치를 표시하였다(Fig. 2).

결 과

대상군 10명의 뇌 MR 영상 소견은 육안적 판독에서 모두 정상이었다. 국제 10-20 뇌파계에 따른 총 19개의 두피 전극의 위치는 전극에서 최단 거리에 있는 뇌 이랑 또는 고랑을 기준으로 결정하였다. 대상자 10명에서 획득한 두피 전극 19개의 위치를 대표적 환자의 뇌 MRI 모델(representative brain model) 위에 모두 표시하였고 이를 바탕으로 각 두피 전극의 공통적 위치를 파악하였다(Fig. 3).

Fp1과 Fp2는 이마엽(frontal lobe)의 위이마이랑(superior frontal gyrus)이 끝나는 이마극(frontal pole)에 위치하였다. F3와 F4는 중간이마이랑(middle frontal gyrus)의 뒤쪽 삼분의 일에서 이분의 일 사이에 위치하였고 F7과 F8은 아래이마이랑(inferior frontal gyrus)의 삼각부(pars triangularis)에 위치하였다. 이상의 전두전극들은 대체로 일정하게 분포하여 하나의 이랑을 벗어나지 않았다. C3와 C4는 중심앞 및 중심뒤 이랑(precentral and postcentral gyri)의 윗쪽 사분의 일에서 이분의 일에 해당하는 영역에 비교적 넓게 분포되어 있었다. 대상자 10명의 20개 대뇌반구 중에서 4개는 중심고랑(central sulcus) 위에 위치하였으며 3개는 앞중심고랑 및 이랑에, 11개는 뒷중심고랑 및 이랑에, 나머지 2개는 위마루소엽(superior parietal lobule)에 위치하였다. T3와 T4는 주로 중간관자이랑(middle temporal gyrus)의 중간 부분에 위치하였으나 20개 대뇌반구 중 4개는 각각 위관자이랑(superior temporal gyrus), 아래관자이랑(inferior temporal gyrus), 중간관자이랑의 앞쪽 삼분의 일 및 뒤쪽 삼분의 일에 위치하였다. P3와 P4는 주로 아래마루소엽(inferior parietal lobule)의 모이랑

(angular gyrus)에 분포하였으나 한 명의 대상자에서는 양쪽 모두 모서리위이랑(supramarginal gyri)에 위치하였다. T5와 T6는 주로 아래관자이랑의 뒷부분, 관자뒤통수 가장자리(temporooccipital margin)의 바로 앞부분에 위치하였다. O1과 O2는 각 대뇌반구의 뒤통수극에 위치하였다.

이마엽의 전극들의 경우 하나의 이랑 내에 비교적 균일하게 위치하고 있었으나 그 뒤쪽에 위치하는 중심, 관자, 마루, 뒤통수엽의 전극들은 대부분 이랑 2개의 폭 정도로 넓게 퍼져있었다. 전극 위치의 차이는 대부분 대상자의 차이에 따라 나타났다. T3와 T4는 같은 대상자에서도 좌우 대뇌반구 간에 차이를 보였으나 이를 제외한 나머지 전극에서는 좌우 대뇌반구 간의 두피전극의 위치 차이는 미미하였다.

정중 전극들(midline electrodes)의 경우 Fz는 이마엽의 반구간틈새(interhemispheric fissure)의 중앙 부위에 비교적 일정하게 위치하였고 Cz는 각 반구의 중심앞이랑들이 만나는 위치의 반구간 틈새에 위치하였으며 Pz는 마루엽의 반구간틈새의 중간 부위에 위치하였다. Fz보다는 Cz와 Pz가 반구간 틈새의 좌우 및 앞뒤 방향으로 넓게 흩어져 있었으나 그 정도가 이랑 하나의 폭을 넘지는 않았다.

고 찰

Frameless Stereotactic Image Guidance System을 이용한 두피 전극의 위치 측정은 뇌 영상 검사를 시행한 시간이나 두피 전극의 종류 및 위치와 관계없이 수행할 수 있으며, 실시간으로 두피 전극을 3차원 영상에 등록하고 위치를 결정할 수 있다.

본 연구에서 소개한 방법은 이전의 ultrasonic frameless armless stereotactic wand를 이용하거나⁷ magnetic digitizer를 이용하는 방법^{8,9}과 그 원리는 유사하지만, 컴퓨터 기술의 발달로 이전 방법에 비해 삼차원 영상을 처리하는 절차가 간소화되어, 소요 시간과 비용을 줄일 수 있다. 또한 실시간으로 전극의 위치를 orthogonal 영상으로 교차 확인하고 삼차원으로 재구성하여 볼 수 있어서, 위치 판정의 오류가 적고 즉각적으로 수정이 가능하다는 장점이 있다.

10명의 간질 환자에서 국제 10-20 뇌파계에 따라 부착한 19개의 전극 위치를 대뇌 표면에 국소화한 결과를 보면 통상적으로 추정되던 위치와 대체적으로 일치했다.

이마관자 전극(F7, F8)은 이마아래이랑의 삼각부에 비교적 일정하게 위치하여 잘 알려진 바와 같이 이마엽과 관자엽 앞극(anterior pole)의 전기 활동을 반영할 것으로 생각된다. 관자 전극(T3, T4)은 중간관자이랑의 중간 부위에 흩어져 있었다.

중심고랑의 위치를 반영할 것으로 추정하는 C3와 C4 전극은 예상대로 중심앞이랑과 중심뒤이랑의 상부에 흩어져 있었다. 이들은 과거의 연구의 결과와 일치하는 소견이다.⁹

두정엽의 신호를 담당하는 것으로 알려진 P3와 P4는 대부분 마루이랑에 있어서 아래마루소엽의 뇌파신호를 반영하는 것으로 나타났다. 뒤쪽 관자엽의 뇌파신호를 나타내는 것으로 알려져 있던 T5와 T6 전극은 주로 아래관자이랑 뒷부분의 pre-occipital notch에 있었다.

본 연구에서 두피 전극의 위치는 개인 간의 차이가 있었고, 뇌의 후반부(posterior head)로 갈수록 그 편차가 더 커짐을 관찰할 수 있었다. 또한 정중 전극들의 경우 frontal vertex (Fz) 보다는 central vertex (Cz)와 parietal vertex (Pz) 전극이 반구간틈새(interhemispheric fissure)에서 좌측 혹은 우측으로 조금씩 치우쳐 있었다. 이전 연구에서 보면 뇌 후반부의 정중 전극들은 두부의 정 중앙에 위치하지 않는 경우가 흔하다고 한다.^{9,10} 뒤통수점(inion)의 해부학적 위치가 사람에 따라 변이가 있고, 전극을 부착할 때 검사자가 측지로 뒤통수점을 찾아서 기준을 삼기 때문에 오차가 발생할 수 있다.

대체적으로 같은 대상자에서 좌우 대뇌반구 간의 전극의 위치차는 미미하였으나 관자엽에 위치한 전극(T3 및 T4)에서는 좌우대뇌반구 간의 차이를 볼 수 있었다. 이는 뇌 피질 구조의 해부학적 비대칭성이 관자 언어부위(temporal speech region)를 포함하는 후 실비안틈새 주변(posterior sylvian region)에서 가장 두드러진다는 과거 연구 결과와 일치한다.¹¹⁻¹³ 이들 연구에 따르면 실비안틈새의 뒤쪽 끝이 우반구에서 더 큰 각도로 위를 향하고 있으며 실비안틈새의 전체 길이도 짧다. 이에 따라 위관자이랑의 길이 및 경로도 좌우반구 간의 뚜렷한 차이가 있으며, 이것으로 관자전극의 좌우 위치차가 설명될 수 있다.

일부 대상자에서는 전극의 위치가 통상 추정되는 곳에서 크게 벗어나는 경우도 있었다. 이런 개인차는 대뇌 후반부로 갈수록 커졌으며, 그 편위는 두부의 전후 방향에서 더 뚜렷했다. 아마도 뇌 해부학적 구조의 개인차가 대뇌낫(falx cerebri)에 의해 정중선이 비교적 뚜렷이 구분되어 있는 좌우 축(left-right axis)보다는 전후 축(anterior-posterior axis)을 따라 더 커지기 때문일 것이다.

본 연구에서 전극의 부착은 실제 임상에서 일반적으로 시행되는 뇌파검사 절차와 동일하게 시행되었다. 각 대상자에서 한 차례의 전극 부착 결과만이 분석되었으며, 전극 부착은 여러 뇌파기사들에 의해 이루어졌으나 본 병원 뇌파실에서는 항상 출자를 이용하여 거리를 측정 후 전극을 붙이고 있으며 주기적으로 정도 관리를 하고 있어서 뇌파기사들에 따른 차이는 매우 적다. 한 명의 뇌파기사가 모든 대상자의 전극을 부착하는

것과 비교할 때 뇌파기사에 따른 변수가 전극의 위치에 영향을 미칠 수 있으나 그 차이는 크지 않을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 뇌 병변에 따른 고랑과 이랑의 전위(displacement)를 배제하기 위하여 뇌 MRI에서 구조적 병변이 없는 환자를 선택하였음에도 불구하고 전극 위치의 변이를 관찰할 수 있었다. 따라서 뇌에 구조적 변형이나 병변이 있는 환자의 뇌파를 판독할 경우 통상적으로 알고 있던 전극의 위치만으로 고려한다면 간질파(epileptiform discharge)의 국소화에 오류가 발생할 수 있다. 따라서 올바른 뇌파 판독을 위해서는 환자의 해부학적 뇌 구조에 대해 사전에 충분히 숙지해야 할 것으로 생각한다.

본 연구 방법은 두피에 부착시키는 뇌파 전극이 반영하는 대뇌피질의 해부학적 위치를 쉽고 간단하게 파악할 수 있게 한다. 본 방법을 이용하여 발작간기 뇌파(interictal EEG)에서 필요한 19개의 전극의 위치를 뇌 MR 영상에서 조화하려고 할 때 소요시간은 약 20분 정도이다. 통상적인 방법에서는 환자 머리의 위치를 영상에 등록할 때 필요한 기준 표식자(fiducial marker)를 별도로 붙여야 했지만 본 연구 방법을 이용할 경우 이러한 번거로움이 줄어든다. 또한 실시간으로 환자의 특정 해부학적 위치에 지시기를 위치시켜 실시간으로 MR 영상 위에서 그 위치를 확인할 수 있다. Frameless stereotactic image guidance system은 환자 개개인의 형태학적 뇌 구조를 감안하여 뇌파 전극의 위치를 정확히 측정할 수 있어서, 간질 초점의 정확한 국소화에 도움을 줄 수 있을 것으로 생각한다.

REFERENCES

1. Michel CM, Murray MM, Lantz G, Gonzalez S, Spinelli L, Grave de Peralta R. EEG source imaging. *Clin Neurophysiol* 2004;115:2195-2222.
2. Blume WT, Buza RC, Okazaki H. Anatomic correlates of the twenty electrode placement system in infants. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1974;36:303-307.
3. Hellström B, Karlsson B, Müssbichler H. Electrode placement in EEG of infants and its anatomical relationship studied radiographically. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1963;15:115-117.
4. Homan RW, Herman J, Purdy P. Cerebral location of international 10-20 system electrode placement. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1987;66:376-382.
5. Sijbers J, Vanrumste B, Van Hoey G, Boon P, Verhoye M, Van der Linden A, et al. Automatic localization of EEG electrode markers within 3D MR data. *Magn Reson Imaging* 2000;18:485-488.
6. Yoo SS, Guttman CR, Ives JR, Panych LP, Kikinis R, Schomer DL, et al. 3D Localization of surface 10-20 EEG electrodes on high resolution anatomical MR images. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1996;102:335-339.
7. Barnett GH, Kormos DW, Steiner CP, Morris H. Registration of

- EEG Electrodes with Three-Dimensional Neuroimaging Using a Frameless, Armless Stereotactic Wand. *Stereotact Funct Neurosurg* 1993;61:32-38.
8. Brinkmann BH, O'Brien TJ, Dresner MA, Lagerlund TD, Sharbrough FW, Robb RA. Scalp-recorded EEG localization in MRI volume data. *Brain Topogr* 1988;10:245-253.
 9. Towle VL, Bolaños J, Suarez D, Tan K, Grzeszczuk R, Levin DN, et al. The spatial location of EEG electrodes: locating the best-fitting sphere relative to cortical anatomy. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1993;86:1-6.
 10. Myslobodsky MS, Coppola R, Bar-Ziv J, Weinberger DR. Adequacy of the international 10-20 electrode system for computed neurophysiologic topography. *J Clin Neurophysiol* 1990;7:507-518.
 11. Geschwind N, Levitsky W. Human brain: left-right asymmetries in temporal speech region. *Science* 1968;161:186-187.
 12. Habib M, Renucci RL, Vanier M, Corbaz JM, Salamon G. CT assessment of right-left asymmetries in the human cerebral cortex. *J Comput Assist Tomogr* 1984;8:922-927.
 13. Rubens AB, Mahowald MW, Hutton TJ. Asymmetry of the lateral (sylvian) fissures in man. *Neurology* 1976;26:620-624.