

DOI: 10.4274/jarem.galenos.2020.3563

J Acad Res Med 2020;10(3):241-5

Parkinson Hastalığı için Derin Beyin Stimülasyonunda Optimal Hedef: Atlas ve Manyetik Rezonans Görüntüleme Tabanlı Stereotaktik Hedeflemenin Karşılaştırılması

Optimal Target in Deep Brain Stimulation for Parkinson's Disease: Comparison of Atlas and Magnetic Resonance Imaging-based Stereotactic Targeting

İdris Sertbaş

İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi Tıp Fakültesi, Nöroşirürji Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye

Cite this article as: Sertbaş İ. Optimal Target in Deep Brain Stimulation for Parkinson's Disease: Comparison of Atlas and Magnetic Resonance Imaging-based Stereotactic Targeting. J Acad Res Med 2020;10(3):241-5

ÖZ

Amaç: Stereotaktik nöroşirürji sırasında globus pallidus internus (GPI) ve subtalamik çekirdeğin (STN) hedef koordinatlarını belirlemek için manyetik rezonans görüntülemesi (MRG) ve atlas ölçümlerini karşılaştırmak amaçlandı.

Yöntemler: Parkinson hastalığının (PH) tedavisi için bilateral derin beyin stimülasyonu (DBS) GPI ve STN ile tedavi edilen 11 hasta çalışmaya dahil edildi. Hedef, üç boyutlu MRG'de GPI ve STN'nin doğrudan görsel olarak tanınması ile seçildi. Koordinatlar özel bir yazılım kullanılarak otomatik olarak kaydedildi ve bir matris dönüşüm işlemi kullanılarak anterior komissür-posterior komissür (AC-PC) koordinat sistemine çevrildi. Aynı GPI ve STN hedefleri, Schaltenbrand atlaslarında gösterilen beyin yapılarının konumlarına göre tanımlandı. MRG tabanlı GPI ve STN hedef koordinatları, karşılık gelen atlas bazlı koordinatlarla istatistiksel olarak karşılaştırıldı.

Bulgular: Çalışmamıza 11 hasta dahil edildi. Ortalama yaş GPI grubunda 66,6±11,72, STN grubunda 47,50±14,20 idi. AC-PC hattının ortalama uzunluğu STN grubunda 26,15±1,42 GPI grubunda 26,46±1,34 idi. Her bir koordinat ölçümünü her iki grupta oldukça benzerdi ve her ölçümün grup içi korelasyon katsayıları %90'ın üzerindeydi.

Sonuç: Çalışmamızın sonuçlarına göre MRG'de direkt görsel hedefleme ile elde edilen hedef koordinatlar ve atlaslara dayalı dolaylı hedefleme ile elde edilen hedef koordinatlar yüksek derece uyumluydu. PH'nin tedavisinde DBS için kullanılan koordinatlar her iki yöntemle de doğrulandı.

Anahtar kelimeler: MRG, derin beyin stimülasyonu, stereotaktik hedefleme, subtalamik çekirdek, globus pallidus

ABSTRACT

Objective: We aimed to compare magnetic resonance imaging (MRI) and atlas measurements to determine the target coordinates of globus pallidus internus (GPI) and subthalamic nucleus (STN) during stereotactic neurosurgery.

Methods: Eleven patients treated with bilateral deep brain stimulation (DBS) GPI and STN for the treatment of Parkinson's disease (PD) were included in the study. The target was chosen by direct visual recognition of GPI and STN in three-dimensional MRI. The coordinates were automatically saved using special software and converted to the anterior commissure-posterior commissure (AC-PC) coordinate system using a matrix conversion process. The same GPI and STN targets were identified based on the locations of brain structures shown in the Schaltenbrand atlases. MRI-based GPI and STN target coordinates were statistically compared with the corresponding atlas-based coordinates.

Results: Eleven patients were included in our study. The median age was 66.6±11.72 in the GPI group and 47.50±14.20 in the STN group. The average length of the AC-PC line was 26.15±1.42 in the STN group; and 26.46±1.34 in the GPI group. It was quite similar in both groups for each coordinate measurement, and the Intra-class Correlation Coefficients of each measurement were over 90%.

Conclusion: According to the results of our study, target coordinates obtained by direct visual targeting on MRI and target coordinates obtained by indirect targeting based on atlas were highly compatible. The coordinates used for DBS in the treatment of PD were confirmed by both methods.

Keywords: MRI, deep brain stimulation, stereotactic targeting, subthalamic nucleus, globus pallidus

ORCID ID of the author: İ.S. 0000-0002-6904-6678.

Sorumlu Yazar/Corresponding Author: İdris Sertbaş,

E-posta: idris.sertbas@yeniyuzuil.edu.tr



Geliş Tarihi/Received Date: 06.07.2020 Kabul Tarihi/Accepted Date: 16.10.2020

©Telif Hakkı 2020 Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Gaziosmanpaşa Eğitim ve Araştırma Hastanesi. Makale metnine www.jarem.org web sayfasından ulaşılabilir.

©Copyright 2020 by University of Health Sciences Turkey, Gaziosmanpaşa Training and Research Hospital. Available on-line at www.jarem.org

GİRİŞ

Parkinsonizm; bradikinezi, istirahat tremoru, rijidite ve postural instabilitenin herhangi bir kombinasyonu ile ortaya çıkan klinik bir sendromdur. Parkinsonizmin en yaygın şekli, beyindeki dopaminerjik nöronların dejeneratif kaybindan kaynaklanan ve klinik olarak asimetrik parkinsonizm ile karakterize ve kronik, progresif bir hastalık olan Parkinson hastalığıdır (PH) (1). Tanı ve tedavi sırasında hastanın semptomları ve belirtileri, yaşı, hastalığın evresi, fonksiyonel hastalık derecesi ve fiziksel aktivite ve verimlilik düzeyi dahil olmak üzere birçok faktör dikkatlice değerlendirilmelidir (2). PH'nin tedavisi farmakolojik, non-farmakolojik ve cerrahi tedavi olarak ayrılabilir.

Derin beyin stimülasyonu (DBS), ilerlemiş PH'nin tedavisi için en sık uygulanan cerrahi prosedürdür (3). Randomize, kontrollü çalışmalardan elde edilen kanıtlar, ya subtalamik çekirdeğin (STN) ya da internal globus pallidus internal (GPi) DBS'sinin, ileri PH ile ilişkili motor dalgalanmalarını ve diskineziyi hafiflettiğini göstermektedir. STN ve GPi DBS için kullanılan en yaygın hedef yapılardan ikisidir (3,4). Terapötik yararı en üst düzeye çıkarmak ve yan etkileri en aza indirmek için lead doğru yerleştirilmelidir. Hedef yapıların ameliyat öncesi lokalizasyonu doğrudan stereotaktik ameliyat öncesi manyetik rezonans görüntüleme (MRG) veya dolaylı olarak atlas koordinatlarından ve önceden tanımlanmış anatomik işaretlerden yapılabilir. Hedef çekirdeğin hastalar arasındaki anatomik değişkenliği ve nörodejeneratif hastalıkları olan hastalarda bulunabilecek bir atrofi derecesi göz önüne alındığında, doğrudan hedefleme yöntemi bireysel hastalar için tartışmasız olarak daha uygundur. Bununla birlikte, bu teknik standart MRG'de hedef noktaların sınırlı kontrastı ve göreceli olarak düşük görünürlüğü ile sonuçlanabilmektedir (5,6).

Görüntüleme yöntemlerindeki teknolojik ilerlemeler, doğrudan hedef planlamayı ve postoperatif lead lokalizasyonunu kolaylaştırmıştır, ancak elektrot pozisyonunun amaçlanan hedef koordinatlara göre intraoperatif olarak doğrulanması zordur. DBS için, en iyi hedefleme yöntemi ve herhangi bir elektrod yerleştirme yönteminin doğruluğunu belgeleyen çok az yayınlanmış veri olmakla birlikte konuyla ilgili fikir birliği yoktur (7-10). Bu çalışmanın amacı, atlas türevli verilerin MRG üzerinde doğrudan hedefleme ile karşılaştırarak güvenilirliğini araştırmak ve her tekniğin stereotaktik hedefleme için uygunluğunu değerlendirmektir.

YÖNTEMLER

Bu çalışma Dünya Tabipler Birliği Helsinki Bildirgesi "Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects", (2013 Ekim'de düzenlendi) prensiplerine uygun olarak yapılmıştır. Bu çalışma için etik komite onayı İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi Klinik Araştırmalar Etik Kurulu'ndan alınmıştır (onay numarası: 2020/02, tarih: 10.02.2020).

Bu çalışma beyin cerrahisi kliniği'ne ilaca dirençli PH nedeniyle başvuran DBS uygulanan 11 hastayı kapsamaktadır. Hastalara lokal anestezi altında GPi (n=5) ve STN'nin (n=6) sürekli uyarılması için iki taraflı elektrot implantasyonu uygulanmıştır.

Lokal anestezi altında stereotaktik çerçeve (Zamorano-Dujovny açık seramik versiyonu, Stryker Leibinger, Freiburg, Almanya), anterior komissür-posterior komissür (AC-PC) hattına dış yer işaretlerine (alt orbital halka, dış işitsel kanal) göre paralel yerleştirildi. MRG, Achieva 1.5 Tesla (Philips, Best, Hollanda) kullanılarak aksiyal T1-ağırlıklı görüntülerinde (T1-WI) AC-PC koordinatları belirlendi ve buna göre orta-komistatik nokta (AC-PC) ve AC-PC mesafesinin koordinatları hesaplandı. STN ve GPi çekirdeklerinin yeri bulunarak AC-PC hattına göre koordinatları hesaplandı. Schaltenbrand-Wahren-Atlas yine AC-PC referans noktaları olarak kullanılarak hacimsel T1-WI MRG veri setiyle birleştirildi.

Hedef sonra Schaltenbrand atlasına dayanarak seçildi (11). Bu atlarda GPi ve STN çekirdeklerinden biri seçildi, hedef tespit edildikten sonra AC ile PC'nin orta noktaları arasındaki mesafeler Schaltenbrand atlası üzerinde ölçüldü. Atlas üzerinde AC-PC hattına göre vertikal, inferior ve anterioposterior koordinatları belirlenerek DBS hedefinin yerleştirilmek istenildiği plaka seçildi.

Daha sonra ameliyathanede, stereotaktik elektrot kılavuzluk cihazı monte edildi ve önceden belirlenmiş yörünge düzeyinde 14 mm delik açıldı. Mikroelektrot kaydı kullanılmadı. Elektrot implantasyonu gerçekleştirildi. Distal elektrot uçları deri altına yerleştirildi. Genel anestezi altında iv. propofol ve remifentanil ile deri altına yerleştirilen beyin pilinin elektrotlarla bağlantısı yapıldı. Postoperatif hastalara gelişebilecek komplikasyonlar açısından kontrol amaçlı bilgisayarlı tomografi çekilmiştir.

İstatistiksel Analiz

Tüm analizler SPSS v21'de yapıldı (SPSS Inc., Chicago, IL, ABD). Örneklem büyüklüğünün küçük olması nedeniyle, Wilcoxon signed-ranks test ile koordinatları analiz edildi. Her iki yöntem için koordinatların uyumu, Cronbach's Alfa ve Sınıf-içi Korelasyon Katsayısı ile değerlendirildi. Buna göre, 0'dan düşük Sınıf-içi Korelasyon Katsayısı (ICC) değerlerinin "düşük" güvenilirliğin göstergesi olduğunu, 0,5 ile 0,75 arasındaki değerlerin "orta" düzeyde güvenilirliği, 0,75 ile 0,9 arasındaki değerlerin "iyi" güvenilirliği ve 0,90'dan büyük değerlerin "mükemmel" güvenilirliği gösterdiğini öneriyoruz (12). $P < 0,05$ istatistiksel olarak anlamlı kabul edildi.

BULGULAR

Çalışmamıza 11 hasta (4 kadın, 7 erkek) dahil edildi. Ortalama yaş GPi grubunda $66,6 \pm 11,72$, STN grubunda $47,50 \pm 14,20$ idi.

AC-PC hattının ortalama uzunluğu STN grubunda $26,15 \pm 1,42$ idi. STN için Atlas ve MRG'de belirlenen hedef koordinatlar, sağ hemisfer dx, dz ve sol hemisfer dx, dy, dz arasındaki mesafeler için "mükemmel" korelasyon gösterdi (hepsi için $p > 0,05$ ve ICC $> 0,90$) (Tablo 1).

AC-PC hattının ortalama uzunluğu GPi grubunda $26,46 \pm 1,34$ idi. GPi için atlas ve MRG'de belirlenen hedef koordinatlar sağ hemisfer dx, dy, dz ve sol hemisfer dx, dz arasındaki mesafelerde "mükemmel" korelasyon gösterdi (tümü için $p > 0,05$ ve ICC $> 0,90$) (Tablo 2).

Tablo 1. STN koordinatlarının hasta özelliklerine göre dağılımı

	Ortalama	SS	Medyan	Minimum	Maksimum	p	Cronbach's Alfa	ICC
Yaş	47,50	14,20	47,50	31,00	69,00	-	-	-
AC-PC mesafesi	26,15	1,42	26,30	23,80	27,60	-	-	-
Sağ hemisfer								
dx								
Atlas	11,82	2,13	11,15	9,70	15,90	0,109	0,995	0,992
MRG	12,08	2,29	11,50	10,00	16,50			
dy								
Atlas	2,60	2,78	1,70	0,40	8,00	0,043	0,985	0,968
MRG	3,33	2,34	2,50	2,00	8,00			
dz								
Atlas	3,67	1,36	3,80	1,40	5,00	1,000	0,992	0,993
MRG	3,67	1,51	4,00	1,00	5,00			
Sol hemisfer								
dx								
Atlas	11,58	2,76	11,00	9,00	16,60	0,078	0,992	0,984
MRG	12,08	2,46	11,50	10,00	16,50			
dy								
Atlas	2,28	2,00	1,80	0,30	5,90	0,176	0,981	0,977
MRG	2,58	1,69	2,50	1,00	5,50			
dz								
Atlas	3,03	2,06	3,55	0,30	5,00	0,109	0,989	0,985
MRG	3,33	1,86	4,00	1,00	5,00			

dx, dy, and dz x, y ve z eksenlerine sırasıyla mesafeler. p: Wilcoxon signed-ranks test için p değerleri, ICC: Sınıf-İçi Korelasyon Katsayısı, SS: standart sapma, AC-PC: anterior komissür-posterior komissür MRG: manyetik rezonans görüntüleme, STN: subtalamik çekirdek

Tablo 2. GPI koordinatlarının hasta özelliklerine göre dağılımı

	Ortalama	SS	Medyan	Minimum	Maksimum	p	Cronbach's Alfa	ICC
Yaş	66,60	11,72	71,00	48,00	78,00	-	-	-
AC-PC mesafesi	26,46	1,34	26,50	25,10	28,20	-	-	-
Sağ hemisfer								
dx								
Atlas	17,34	2,95	15,70	15,00	22,10	0,080	0,988	0,978
MRG	18,00	2,92	17,00	16,00	23,00			
dy								
Atlas	6,56	2,76	7,90	2,20	8,90	0,223	0,991	0,990
MRG	6,80	2,68	8,00	3,00	9,00			
dz								
Atlas	2,12	1,18	1,70	1,00	3,70	0,593	0,949	0,958
MRG	2,20	1,30	2,00	1,00	4,00			
Sol hemisfer								
dx								
Atlas	17,36	2,93	15,70	15,10	22,10	0,078	0,989	0,979
MRG	18,00	2,92	17,00	16,00	23,00			
dy								
Atlas	6,48	2,65	7,60	2,30	8,90	0,043	0,997	0,987
MRG	7,00	2,55	8,00	3,00	9,00			
dz								
Atlas	2,12	1,16	1,70	1,00	3,60	0,144	0,976	0,966
MRG	2,40	1,14	2,00	1,00	4,00			

dx, dy, and dz = x, y ve z eksenlerine sırasıyla mesafeler, p: Wilcoxon signed-ranks test için p değerleri, ICC: Sınıf-İçi Korelasyon Katsayısı, SS: standart sapma, AC-PC: anterior komissür-posterior komissür, MRG: manyetik rezonans görüntüleme, GPI: globus pallidus internus

TARTIŞMA

Çalışmamızın sonuçlarına göre STN ve GPi için atlas ve MRG'de belirlediğimiz hedef koordinatlar "mükemmel" korelasyon gösterdi. Buna göre, Atlas kullanılarak çoğu zaman net olarak görselleştirilmeyen DBS yapıları, MRG görüntüleme teknikleriyle doğrulanmıştır.

STN ve GPi'nin anatomik sınırlarının güvenilir bir şekilde tanımlanması, bu yapıların DBS'i için kritik bir adımdır. Atlas bazlı koordinatlar, sadece birkaç beyin örneğine dayanmakla sınırlıdır ve birkaç çalışma, bu çekirdeklerin pozisyonunda bireyler arası varyasyonları belgelemiştir. Schaltenbrand atlası, bir beyinden elde edilen ardışık beyin dilimlerinden (plakalar) oluşur. Bu atlasla bulunan yapıları dayanarak hesaplanan koordinatlar ortalama bir beyinden değil, aslında belirli bir kalınlığa sahip bir dilime karşılık gelen bir fotoğraftan elde edilir (13). Stereotaktik nöroşirürji için atlasların kullanılmasının, her beyinin özelliklerine göre veri normalizasyonuna koşullandığı kabul edilmiştir; ancak, normalizasyon süreci hakkında bir fikir birliği olmamıştır (14,15).

MRG, talamik organizasyon olan komissürlerin mükemmel görselleştirilmesine izin verir. Ayrıca, stereotaktik çerçeve tarafından üretilen görüntüleme artefaktlarını azaltırken bireysel anatomik varyasyonları da gösterir. 3-D gradyan-eko alımları ile iyi sinyale sahip milimetrik bölümler elde etmek mümkündür. Yüksek çözünürlüklü MRG radyoloğun ventrikülografi ile tanımlanan tüm anatomik yer işaretlerini invaziv olmayan bir şekilde konumlandırmasını sağlar. Ek olarak, iç kapsül gibi ventrikülogramlarda görülmeyen yapılar görselleştirilebilir (16,17). MRG'ler üzerindeki artefaktların intrakraniyal hedefleri gerçek anatomik konumlarından uzaklaştıracağı, hedef koordinatların belirlenmesinde hatalara ve sonuç olarak başarısız stereotaktik prosedürlere yol açabileceği konusundaki endişeler mevcuttur. Bununla birlikte, hassas MRG kılavuzlu stereotaktik prosedürler, homojen bir manyetik alan ve doğrusal alan gradyanlarıyla yüksek alan MRG kullanılarak yapılabilir (18,19). Yapılan bir çalışmada anatomik örnekler kullanılarak, ortalama stereotaktik hataların sırasıyla x, y ve z yönlerinde sırasıyla 0,48±0,17 mm, 0,69±0,14 mm ve 0,82±0,13 mm olduğu bildirilmiştir (18). Direkt MRG koordinatlarının güvenilirliğini bildiren diğer çalışmalar temel olarak yapının sadece koronal düzlemde görselleştirilmesi üzerine kurulmuştur ve belirli bir alt bölgeyi hedeflememektedir (20,21). PH'ler de DBS için MRG ve Atlas yöntemlerinin karşılaştırıldığı diğer çalışmada ise, çekirdeğin hem ekstenel hem de koronal düzlemlerde doğrudan görselleştirilmesini sağlayan, her iki düzlemde sınırları ilişkilendiren ve üç boyutlu bir yapı yaratan yüksek çözünürlüklü MRG'nin daha etkili olacağı sonucuna varılmıştır (7). Bu sonuçlar, fonksiyonel bir MRG prosedürünün, belirli bir stereotaktik MRG standardizasyonu ile kesinliği doğrulandıktan sonra güvenli bir şekilde gerçekleştirilebileceğini desteklemektedir. Son yıllarda yapılan bir metaanaliz sonuçlarına göre; DBS için STN'nin doğrudan hedeflemede kullanılan MRG dizilerinde düşük çözünürlük nedeniyle geometrik bozulma nedeniyle zor olduğu ancak yeni MRG teknikleriyle STN sınırlarının daha iyi tanımlanabileceği sonucuna varılmıştır. Buna göre,

özellikle duyarlılığa dayalı görüntüleme teknikleri ve görüntü rekonstrüksiyon yöntemleri, nöroşirürji uzmanlarının elektrotlarını doğru ve güvenilir bir şekilde hedeflemek için kullanabilecekleri yüksek kaliteli, artefaktsız görüntüler üretmenin yolunu gösterebilir (22).

Çalışmanın Kısıtlılıkları

Çalışmamızın limitasyonları da mevcuttur. Doğası gereği retrospektif, hasta dosya kayıtlarına dayanan bir çalışmadır. Hasta popülasyonu yeterli olmamakla beraber, objektif sonuçlar prospektif çalışmalarla elde edilebilir.

SONUÇ

Bu sonuçlar ışığında, Atlas verilerinin daha fazla hastanın referansına dayanarak normalleştirilmesi, Atlas koordinatlarını MRG hedeflerine yaklaştıracaktır. Ayrıca MRG alanında gelişen teknolojiyle birlikte artan görüntü kalitesi de stereotaktik hedeflenmenin daha doğru ve standart bir şekilde yapılmasını sağlayacaktır. Çalışmamızda belirlediğimiz hedef koordinatların hem atlas hem de MRG'de örtüşmesi, belirlediğimiz hedeflerin sonraki çalışmalar için yol gösterici olacağını düşünmekteyiz. Bu konuda yapılacak randomize-kontrollü çalışmalara ihtiyaç vardır.

DBS için belirlediğimiz hedef koordinatlar hem atlas hem de MRG'de birbiriyle örtüşmektedir. Nörodejeneratif koşullarda atrofi nedeniyle hastaların anatomisi de farklı olacaktır. Bu nedenle, hastanın kendi beyin anatomisine dayanan doğrudan bir hedefleme tekniği, DBS için ameliyat öncesi hedeflemenin daha uygun bir yolu olabilir. Doğru anatomik hedefleme, hedefin fizyolojik testi için gerekli olan keşif izlerinin sayısını da asgariye indirebilir ve böylece daha hızlı ve daha güvenli ameliyat sağlar.

Etik Komite Onayı: Bu çalışma için etik komite onayı İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi Klinik Araştırmalar Etik Kurulu'ndan alınmıştır (onay numarası: 2020/02, tarih: 10.02.2020).

Hasta Onamı: Çalışmanın retrospektif tasarımından dolayı hasta onamı alınmamıştır.

Hakem Değerlendirmesi: Editörler kurulu dışında olan kişiler tarafından değerlendirilmiştir.

Finansal Destek: Yazarlar bu çalışma için finansal destek almadıklarını beyan etmişlerdir.

Ethics Committee Approval: Ethics committee approval for this study was obtained from İstanbul Yeni Yüzyıl University Clinical Research Ethics Committee (approval number: 2020/02, date: 10.02.2020).

Informed Consent: Due to the retrospective design of the study, patient consent was not obtained.

Peer-review: Externally peer-reviewed.

Financial Disclosure: The authors declared that this study has received no financial support.

KAYNAKLAR

1. Watts RL, Koller WC. Movement disorders: neurologic principles & practice. McGraw-Hill Professional, 2004.
2. Odin P, Chaudhuri KR, Slevin J, Volkman J, Dietrichs E, Martinez-Martin P, et al. Collective physician perspectives on non-oral medication approaches for the management of clinically relevant unresolved issues in Parkinson's disease: consensus from an international survey and discussion program. Parkinsonism Relat Disord 2015; 21: 1133-44.

3. Fasano A, Daniele A, Albanese A. Treatment of motor and non-motor features of Parkinson's disease with deep brain stimulation. *Lancet Neurol* 2012; 11: 429-42.
4. Deuschl G, Schade-Brittinger C, Krack P, Volkmann J, Schäfer H, Bötzel K, et al. A randomized trial of deep-brain stimulation for Parkinson's disease. *N Eng J Med* 2006; 355: 896-908.
5. Odekerken VJ, Van Laar T, Staal MJ, Mosch A, Hoffmann CF, Nijssen PC, et al. Subthalamic nucleus versus globus pallidus bilateral deep brain stimulation for advanced Parkinson's disease (NSTAPS study): a randomised controlled trial. *Lancet Neurol* 2013; 12: 37-44.
6. Öztürk S, Kocabiçak E. Parkinson hastalığında nöromodülasyon. *Turkiye Klinikleri Phys Med Rehab* 2018; 11: 23-32.
7. Vayssiere N, Hemm S, Cif L, Picot MC, Diakonova N, El Fertit H, et al. Comparison of atlas-and magnetic resonance imaging-based stereotactic targeting of the globus pallidus internus in the performance of deep brain stimulation for the treatment of dystonia. *J Neurosurg* 2002; 96: 673-9.
8. Pinsker M, Volkmann J, Falk D, Herzog J, Steigerwald F, Deuschl G, et al. Deep brain stimulation of the internal globus pallidus in dystonia: target localisation under general anaesthesia. *Acta neurochirurgica (Wien)* 2009; 151: 751-8.
9. Schlaier J, Schoedel P, Lange M, Winkler J, Warnat J, Dorenbeck U, et al. Reliability of atlas-derived coordinates in deep brain stimulation. *Acta Neurochirurgica* 2005; 147: 1175-80.
10. Tolleson C, Pallavaram S, Li C, Fang J, Phipps F, Konrad F, et al. The optimal pallidal target in deep brain stimulation for dystonia: a study using a functional atlas based on nonlinear image registration. *Stereotact Funct Neurosurg* 2015; 93: 17-24.
11. Schaltenbrand G. Atlas for stereotaxy of the human brain. Georg Thieme 1977.
12. Koo TK, Li MY. A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *J Chiropr Med* 2016; 15: 155-63.
13. Bajcsy R, Lieberman R, Reivich M. A computerized system for the elastic matching of deformed radiographic images to idealized atlas images. *J Comput Assist Tomogr* 1983; 7: 618-25.
14. Lancaster JL, Fox PT, Downs H, Nickerson DS, Handker TA, El Mallah M, et al. Global spatial normalization of human brain using convex hulls. *J Nucl Med* 1999; 40: 942-55.
15. Davatzikos C. Spatial normalization of 3D brain images using deformable models. *J Comput Assist Tomogr* 1996; 20: 656-65.
16. Aviles-Olmos I, Kefalopoulou Z, Tripoliti E, Candelario J, Akram H, Martinez-Torres I, et al. Long-term outcome of subthalamic nucleus deep brain stimulation for Parkinson's disease using an MRI-guided and MRI-verified approach. *J Neurol Neurosurg Psychiatr* 2014; 85: 1419-25.
17. Brunenberg EJ, Platel B, Hofman PA, ter Haar Romeny BM, Visser-Vandewalle V. Magnetic resonance imaging techniques for visualization of the subthalamic nucleus: a review. *J Neurosurg* 2011; 115: 971-84.
18. Dormont D, Zerah M, Cornu P, Parker F, Aubert B, Sigal R, et al. A technique of measuring the precision of an MR-guided stereotaxic installation using anatomic specimens. *American J Neuroradiol* 1994; 15: 365-71.
19. Kondziolka D, Dempsey PK, Lunsford LD, Kestle JR, Dolan EJ, Kanal E, et al. A comparison between magnetic resonance imaging and computed tomography for stereotactic coordinate determination. *Neurosurgery* 1992; 30: 402-7.
20. Zonenshayn M, Rezai AR, Mogilner AY, Beric A, Sterio D, Kelly PJ. Comparison of anatomic and neurophysiological methods for subthalamic nucleus targeting. *Neurosurgery* 2000; 47: 282-94.
21. Cuny E, Guehl D, Burbaud P, Gross C, Dousset V, Rougier A. Lack of agreement between direct magnetic resonance imaging and statistical determination of a subthalamic target: the role of electrophysiological guidance. *J Neurosurgery* 2002; 97: 591-7.
22. Chandran AS, Bynevelt M, Lind CR. Magnetic resonance imaging of the subthalamic nucleus for deep brain stimulation. *J Neurosurgery* 2016; 124: 96-105.