

JOURNAL READING

Assessing Carpal Tunnel Syndrome With Magnetoneurography



Pembimbing :

dr. Nurtakdir Kurnia Setiawan, Sp.S, M.Sc, M.H

Disusun Oleh :

Adrian Dharmawan 2110221132

**KEPANTERAAN KLINIK DEPARTEMEN ILMU ILMU PENYAKIT SARAF
FAKULTAS KEDOKTERAN UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL
VETERAN JAKARTA RSUD dr. GUNAWAN MANGUNKUSUMO AMBARAWA
PERIODE 30 MEI 2022 – 1 JULI 2022**

LEMBAR PENGESAHAN

JOURNAL READING

Assessing Carpal Tunnel Syndrome With Magnetoneurography

Disusun untuk memenuhi syarat mengikuti ujian kepaniteraan klinik

Di departemen ilmu penyakit saraf

Rumah Sakit Gunawan Mangunkusumo Ambarawa

Disusun oleh:

Adrian Dharmawan 2110221132

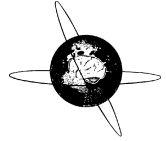
Telah disetujui oleh pembimbing

Ambarawa, Juni 2022

(dr. Nurtakdir Kurnia Setiawan, Sp.S, M.Sc, M.H)

Daftar isi tersedia di [ScienceDirect](#)

Neurofisiologi Klinis

beranda jurnal: www.elsevier.com/local/cl_inph

Menilai carpal tunnel syndrome dengan magnetoneurography



Toru Sasaki^{A,†}, Shigenori Kawabata^B, Juni Hashimoto^A, Yuko Hoshino^B, Kensuke Sekihara^B, Yoshiaki Adachi^C, Miho Akaza^D, Koji Fujita^E, Akimoto Nimura^E, Toshitaka Yoshii^A, Yuki Miyano^F, Yuki Mitani^F, Taishi Watanabe^F, Shinji Sato^F, Sukchan Kim^F, Atsushi Okawa^A

^ADepartemen Bedah Ortopedi, Universitas Medis dan Gigi Tokyo, 1-5-45 Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8510, Jepang

^BDepartemen Teknologi Lanjutan dalam Kedokteran, Sekolah Pascasarjana Universitas Kedokteran dan Gigi Tokyo, 1-5-45 Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8510, Jepang

^CLaboratorium Elektronik Terapan, Institut Teknologi Kanazawa, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1331, Jepang

^DIlmu Sistem Pernapasan dan Saraf, Ilmu Laboratorium Biomedis, Sekolah Pascasarjana Universitas Kedokteran dan Gigi Tokyo, 1-5-45 Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8510, Jepang

^EDepartemen Anatomi Sendi Fungsional, Sekolah Pascasarjana Ilmu Kedokteran dan Gigi, Universitas Kedokteran dan Gigi Tokyo, 1-5-45, Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8510, Jepang

^FGrup Bisnis Perawatan Kesehatan, Ricoh Company, Ltd., 2-3-10 Kandasurugadai Chiyoda-ku, Tokyo 101-0062, Jepang

article info

Riwayat artikel:

Diterima 30 Maret 2022

Tersedia online 9 April 2022

Kata kunci:

Magnetoneurografi

Sindrom terowongan karpal

Saraf median

Saraf digital

Kecepatan konduksi

Studi konduksi saraf

highlight

- Aktivitas saraf pada pasien carpal tunnel syndrome dapat divisualisasikan menggunakan magnetoneurography.
- Situs lesi dapat divisualisasikan menggunakan amplitudo atau kecepatan konduksi saraf.
- Magnetoneurography juga bisa memvisualisasikan perbaikan setelah operasi.

abstrak

Objektif: Untuk mengukur bidang neuromagnetik pasien carpal tunnel syndrome setelah stimulasi saraf digital listrik dan mengevaluasi fungsi saraf median dengan resolusi spasial yang tinggi.

Metode: Sistem magnetometer perangkat interferensi kuantum superkonduktor digunakan untuk merekam medan neuromagnetik di terowongan karpal setelah stimulasi listrik saraf digital tengah di 10 tangan dari sembilan pasien dengan sindrom terowongan karpal. Pasien didiagnosis berdasarkan gejala (mati rasa, kesemutan, dan nyeri) didukung oleh tanda Phalen atau Tinel positif. Teknik baru diterapkan untuk menghilangkan artefak yang diinduksi stimulus, dan distribusi arus dihitung menggunakan algoritma filter spasial dan ditumpangkan pada sinar-X.

Hasil: Pada 6 dari 10 tangan, amplitudo bentuk gelombang arus masuk dilemahkan hingga <70% atau kecepatan konduksi saraf <40 m/dtk. Hasil studi konduksi saraf konvensional normal untuk dua dari enam tangan ini. Keempat tangan yang tidak dapat didiagnosis dengan magnetoneurografi memiliki sindrom terowongan karpal parah yang dilapiskan pada neuropati perifer sekunder akibat penyakit penyerta. **Kesimpulan:** Perbaikan teknis memungkinkan magnetoneurografi untuk secara noninvasif memvisualisasikan aktivitas saraf elektrofisiologis pada pasien sindrom carpal tunnel.

Makna: Magnetoneurografi mungkin memiliki potensi untuk berkontribusi pada diagnosis rinci berbagai gangguan saraf perifer.

- 2022 Federasi Internasional Neurofisiologi Klinis. Diterbitkan oleh Elsevier BV Ini adalah artikel akses terbuka di bawah lisensi CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Singkatan: CSP, proyeksi subruang (T. umum); CTS, sindrom terowongan karpal; MNG, magnetoneurografi; NCS, studi konduksi saraf; SQUID, perangkat interferensi kuantum superkonduktor; UGRENS, batasan gain unit secara rekursif menerapkan pemfilteran spasial null-steering.

†Penulis koresponden di: Departemen Bedah Ortopedi, Universitas Kedokteran dan Gigi Tokyo, 1-5-45 Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8510, Jepang.

Alamat email: t-sasaki.orth@tmd.ac.jp (T.Sasaki), kawabata.orth@tmd.ac.jp (S. Kawabata), hash.orth@tmd.ac.jp (J. Hashimoto), hoshino.atm@tmd.ac.jp (Y.Hoshino), sekihara@nifty.com (K.Sekihara), mihonuro@tmd.ac.jp (M.Akaza), fujiorth@tmd.ac.jp (K.Fujita), nimura.orj@tmd.ac.jp (A.Nimura), yoshii.orth@tmd.ac.jp (T.Yoshii), yuki.yh.hasegawa@jp.ricoh.com (Y.Miyano), yuuki.ym.mitani@jp.ricoh.com (Y. Mitani), taishi.watanabe@jp.ricoh.com (T. Watanabe), shinji.s1.sato@jp.ricoh.com (S.Sato), sukchan.kim@jp.ricoh.com (S.Kim), okawa.orth@tmd.ac.jp (A.Okawa).

<https://doi.org/10.1016/j.clinph.2022.03.021>

1388-2457/ - 2022 Federasi Internasional Neurofisiologi Klinis. Diterbitkan oleh Elsevier BV

Ini adalah artikel akses terbuka di bawah lisensi CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Perkenalan

Pada carpal tunnel syndrome (CTS), sindrom jebakan saraf yang paling umum, saraf median terjepit di pergelangan tangan. CTS terutama didiagnosis melalui anamnesis dan pemeriksaan fisik, tetapi evaluasi elektrofisiologi objektif dapat membantu menentukan indikasi pembedahan dan menilai fungsi pasca operasi. Sensitivitas latensi motorik distal saraf median berkisar dari 29% hingga 81% sedangkan kecepatan konduksi sensorik pergelangan tangan-telapak tangan bervariasi dari 45% hingga 100% (Bulan et al., 2017). Sementara itu, Yilmaz dkk. (2017) menentukan spesifisitas latensi motorik distal saraf median menjadi 99% dan sensitivitas kecepatan konduksi sensorik pergelangan tangan menjadi 97%. Studi konduksi saraf (NCSs) terkadang tidak mendapatkan temuan abnormal, bahkan ketika ahli bedah tangan mencurigai CTS (Buchthal et al., 1974; Sedal et al., 1973; Thomas et al., 1967). Dalam kasus ini, terkadang sulit untuk memilih metode perawatan pasien tanpa bukti objektif yang mendukung pembedahan invasif. Selain itu, potensial listrik yang terekam dari permukaan tubuh dilemahkan karena kulit yang tebal atau ligamen transversal (Werner dan Andary, 2011).

Berbeda dengan rekaman potensial listrik dari permukaan tubuh, medan magnet kurang terpengaruh oleh tulang dan jaringan lunak di sekitarnya dan secara teoritis memiliki resolusi yang lebih tinggi (Trahms et al., 1989). Kelompok kami telah mengembangkan metode baru untuk memvisualisasikan distribusi arus saraf di saraf tepi dan sumsum tulang belakang menggunakan pengukuran medan neuromagnetik (Ishii et al., 2012; Sumiya et al., 2017; Ushio et al., 2019). Kami juga telah melaporkan visualisasi aktivitas elektrofisiologis di area terowongan karpal sebagai respons terhadap stimulasi saraf digital dengan pengukuran medan neuromagnetik pada individu sehat menggunakan metode common-mode subspace projection (CSP), yang merupakan metode baru untuk menghilangkan stimulus. artefak yang diinduksi (Sasaki et al., 2020). Dalam penelitian ini, kami melaporkan untuk pertama kalinya visualisasi aktivitas saraf elektrofisiologis pada pasien CTS sebagai respons terhadap stimulasi saraf digital dengan magnetoneurografi (MNG) dari permukaan tubuh.

2. Metode

2.1. Sistem MNG dan pengukuran di area carpal tunnel

Penelitian ini telah disetujui oleh Komite Etika Universitas Kedokteran dan Gigi Tokyo dan dilakukan sesuai dengan Deklarasi Helsinki dengan persetujuan tertulis dari peserta. Kami memasukkan 10 tangan dari sembilan pasien (usia rata-rata \pm SD, $65,9 \pm 12,6$ tahun; tiga laki-laki, enam perempuan) dengan CTS (CTS bilateral, 1; CTS unilateral, 8) yang didiagnosis dengan pemeriksaan tangan.

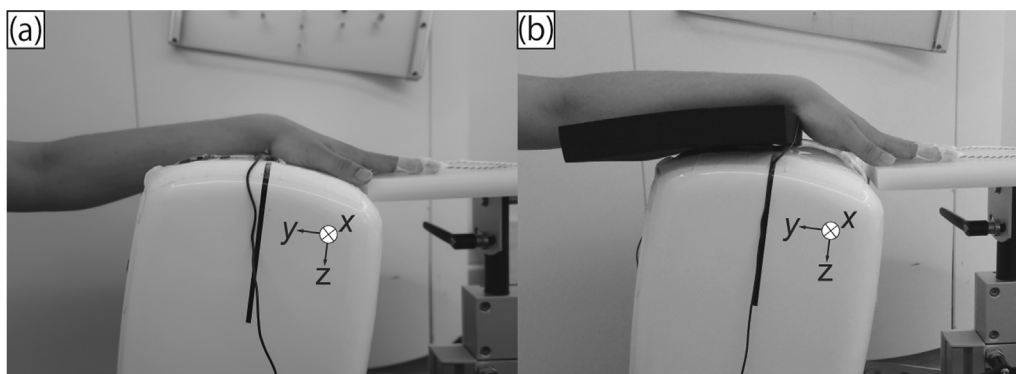
Diagnosis klinis didasarkan pada gejala CTS (mati rasa, kesemutan, dan nyeri) yang dipicu atau diperburuk oleh posisi pergelangan tangan yang berkelanjutan dan berkurang dengan gemetar tangan dan pemeriksaan CTS positif termasuk tanda Phalen atau Tinel positif. Pasien yang tidak dapat mempertahankan postur pengukuran atau yang sebelumnya menjalani operasi pelepasan terowongan karpal dikeluarkan dari penelitian ini.

Semua rekaman dilakukan di ruang yang terlindung secara magnetis menggunakan sistem magnetometer perangkat interferensi kuantum superkonduktor (SQUID), yang dikembangkan oleh Kanazawa Institute of Technology dan Ricoh Company, Ltd. (Adachi et al., 2017). Peserta duduk di kursi dan meletakkan telapak tangan mereka di lekukan permukaan sensor, seperti pada laporan sebelumnya (Gambar 1A) (Sasaki et al., 2020). Untuk mendapatkan informasi posisi pada tangan dan sensor magnetik selama pengukuran, radiografi lateral dan frontal diambil saat pasien dalam posisi pengukuran. Jari tengah dirangsang secara elektrik pada sendi interphalangeal distal (denyut gelombang persegi; 3 Hz; durasi 0,2 ms) dengan lebih dari 2-3 kali ambang sensorik (intensitas, 6-18 mA). Kami memilih jari tengah karena penelitian sebelumnya menunjukkan intensitas sinyal lebih tinggi setelah stimulasi jari tengah daripada setelah stimulasi jari telunjuk (Sasaki et al., 2020). Medan magnet yang ditimbulkan setelah stimulasi jari tengah direkam pada permukaan area palmar dalam kondisi berikut: kecepatan pengambilan sampel, 40 kHz; filter bandpass, 100–5000 Hz; dua ribu rekaman (pengukuran pertama).

Setelah pengukuran pertama, untuk mengecualikan artefak yang diinduksi stimulus dari seluruh sinyal yang diperoleh MNG sebagai respons terhadap stimulasi listrik jari tengah, kami juga mengukur medan magnet dari artefak yang diinduksi stimulus saja (pengukuran kedua). Pelat uretan 30 mm ditempatkan di antara telapak tangan dan permukaan sensor dengan posisi jari yang sama seperti pada pengukuran pertama, dan medan magnet saraf diukur dalam kondisi yang sama (Gambar 1B). Pada pengukuran kedua, jarak antara sensor dan saraf di area telapak tangan ditingkatkan, yang mengurangi sinyal dari saraf di area telapak tangan, memungkinkan isolasi sinyal yang berasal dari artefak yang diinduksi stimulus saja.

2.2. Pemrosesan sinyal

Pertama, kami menghapus artefak yang diinduksi stimulus dari seluruh sinyal MNG yang diperoleh dari pengukuran pertama dengan menerapkan algoritma CSP (Watanabe et al., 2013). Algoritma CSP adalah metode baru untuk menghitung sinyal magnetik yang berasal dari aktivitas saraf saja menggunakan seluruh sinyal magnetik pertama (sinyal saraf + artefak) dan sinyal magnetik kedua dari stimulus yang diinduksi.



Gambar 1. Metode pengukuran untuk bidang neuromagnetik. (a) Peserta meletakkan telapak tangan mereka di lekukan permukaan sensor. Kami mengukur bidang neuromagnetik setelah stimulasi listrik pada sendi interphalangeal distal jari tengah. (b) Pengukuran medan magnet artefak yang diinduksi stimulus. Pelat uretan 30 mm ditempatkan di antara telapak tangan dan permukaan sensor dengan jari pada posisi yang sama.

artefak. Algoritme filter spasial, unit gain constraint secara rekursif menerapkan null-steering spatial filtering (UGRENS), diterapkan pada sinyal magnetik yang berasal dari aktivitas saraf (sinyal magnetik yang dihilangkan artefak), dan algoritme ini dapat menghitung distribusi temporal dan spasial dari arus (Sekihara dan Nagarajan, 2015; Sasaki et al., 2020). Arus yang dihitung ditumpangkan pada sinar-X yang diambil selama pengukuran. Distribusi dan intensitas arus divisualisasikan menggunakan peta warna. Dalam metode ini, kami dapat menghitung bentuk gelombang arus pada sembarang titik seolah-olah elektroda virtual ditempatkan di sana. Kami mengatur elektroda virtual di sepanjang saraf digital dan median pada interval 10 mm. Kami menghitung bentuk gelombang arus yang tegak lurus terhadap saraf digital dan median pada titik elektroda virtual. Arus ini mencerminkan arus masuk pada titik depolarisasi (Sasaki et al., 2020). Kecepatan konduksi juga dihitung dari puncak latensi dalam bentuk gelombang arus masuk ini. Karena telah ditunjukkan bahwa perambatan arus ke dalam berhenti di lokasi lesi pada hewan percobaan (Tomori et al., 2010), lokasi lesi didefinisikan sebagai tingkat di mana amplitudo arus masuk dari titik depolarisasi menurun di bawah 70% dibandingkan dengan elektroda berikutnya atau tingkat di mana kecepatan konduksi yang dihitung dari bentuk gelombang arus masuk menurun di bawah 40 m/ S.

2.3. Studi konduksi saraf

NCS konvensional dari saraf median bilateral dilakukan menggunakan sistem potensial / elektromiografi yang ditimbulkan (MEB-2300; Nihon Kohden, Tokyo, Jepang) dengan filter bandpass diatur pada 10 Hz hingga 5 kHz untuk perekaman saraf motorik dan pada 20 Hz hingga 2 kHz untuk rekaman sensorik. Potensi aksi otot majemuk direkam dengan sepasang elektroda cangkir permukaan yang ditempatkan di atas penulik polisis brevis dengan menggunakan metode tendon perut. Rangsangan listrik supramaksimal pulsa persegi pada 0,5 Hz dengan durasi 0,3 ms disampaikan di pergelangan tangan dan siku. Titik stimulasi pergelangan tangan adalah 7 cm proksimal ke elektroda katoda yang ditempatkan pada penulik polisis brevis. Potensi aksi saraf sensorik dari saraf median direkam secara antidromik dengan sepasang elektroda cangkir yang ditempatkan di atas sendi interphalangeal distal dan proksimal jari telunjuk. Rangsangan listrik supramaksimal pulsa persegi pada 0,5 Hz dengan durasi 0,3 ms disampaikan di telapak tangan, pergelangan tangan, dan siku. Pengukuran termasuk amplitudo puncak-ke-puncak dari respons, latensi distal, dan kecepatan konduksi. Setiap pengukuran dilakukan dua kali untuk mengkonfirmasi reproduktifitas. Bentuk gelombang dengan latensi yang tidak jelas dan tidak dapat direproduksi dianggap tidak dapat diukur.

Karena temuan NCS konvensional pra operasi untuk Pasien 5 normal, kami juga merekam potensi saraf intraoperatif. Selama operasi, kami menggunakan sayatan yang lebih besar untuk mengidentifikasi lokasi lesi dan melakukan dekomresi yang memadai baik secara distal maupun proksimal. Kami secara elektrik merangsang saraf median secara perkutan (denyut gelombang persegi; durasi 5 Hz; 0,3 ms) di siku segera setelah dekomresi dan mencatat potensi setiap 1 cm di empat lokasi tepat di atas saraf. Kecepatan konduksi dihitung dari latensi setiap bentuk gelombang dan dibandingkan dengan pengukuran medan neuromagnetik pra operasi. Kami juga melakukan pengukuran medan neuromagnetik lagi pada 6 bulan pasca operasi dalam kasus ini.

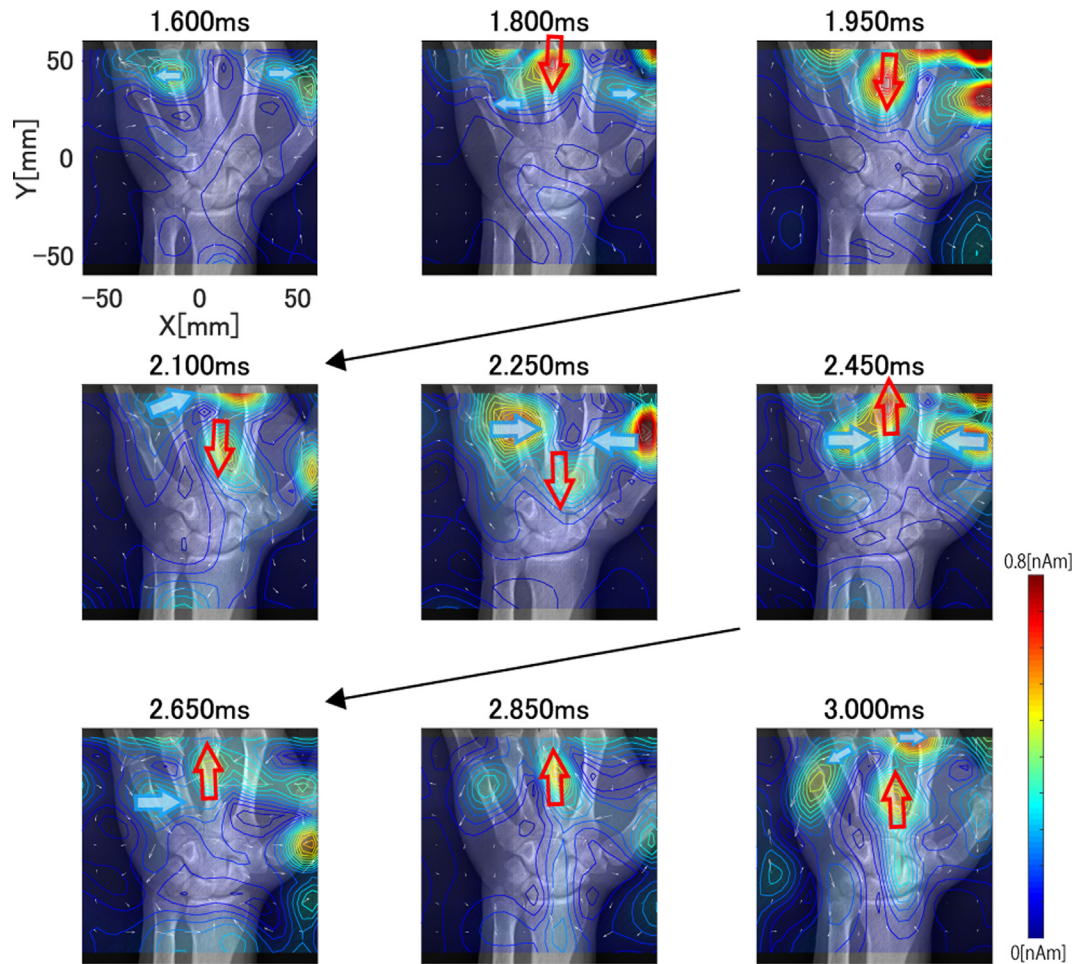
3. Hasil

Hasilnya dirangkum dalam Tabel 1. Kecuali untuk sisi kanan Pasien 3 dan 5, NCS menunjukkan neuropati fokal di area carpal tunnel. Dalam dari 10 tangan, amplitudo bentuk gelombang arus masuk yang dihitung dari hasil MNG dilemahkan menjadi

Tabel 1
Karakteristik demografi dan klinis pasien, NCS, dan hasil MNG.

Sabar	Usia (tahun)	Seks	Terpapangh samping	Penyakit penyerta	DML (m/detik)	SCV (m/dtk)	PATAH (IV)	Klasifikasi hambur	hasil MG
1	63	Pria	Kiri		4	32,8	4,9	Tingkat 2 (ringan)	Amplitudo menurun di tingkat tengah tulang metakarpal Sinyal terlalu kecil untuk didiagnosis
2	63	Pria	Benar		NE	NE	NE	Tingkat 6 (sangat parah)	Kecepatan konduksi menurun di dasar tulang metakarpal Kecepatan konduksi menurun di tingkat tengah tulang metakarpal Sinyal terlalu kecil untuk didiagnosis
3	54	Perempuan	Benar		3,1	56,5	73,8	Normal	
4	79	Perempuan	Kiri	Diabetes, artritis reumatoid	5,2	32,4	93,3	Tingkat 3 (cukup parah)	
5	62	Perempuan	Benar	Tumor ekstremitas serviks	3,7	35	6,5	Tingkat 2 (ringan)	
6	79	Pria	Kiri	Mielopati serviks	2,9	59,2	54,6	Normal	Kecepatan konduksi menurun di dasar tulang metakarpal Amplitudo menurun di tingkat tengah tulang metakarpal Amplitudo menurun di tingkat tengah tulang metakarpal Sinyal terlalu kecil untuk didiagnosis
7	43	Perempuan	Kiri		4,7	36,7	23,6	Tingkat 3 (cukup parah)	
8	81	Perempuan	Kiri	Hemodialisa, kencing manis	4	36,1	37,4	Tingkat 2 (ringan)	
9	69	Perempuan	Benar	Hemodialisis	7,6	14,2	2,6	Tingkat 3 (cukup parah)	Sinyal terlalu kecil untuk didiagnosis

DML, latensi motor distal; MNG, magnetoneurografi; NE, tidak ditimbulkan; SCV, kecepatan konduksi saraf sensorik (telapak tangan ke pergelangan tangan); SNAP, potensi aksi saraf sensorik.



Gambar 2. Arus yang dihitung dari Pasien 1. Peta arus yang dihitung ditumpangkan pada gambar sinar-X. Intensitas arus ditunjukkan oleh skala warna (merah lebih tinggi). Panah putih kecil menunjukkan vektor saat ini. Arus terdepan (panah merah mengarah ke bawah), arus trailing (panah merah mengarah ke atas), arus ke dalam (panah biru besar), dan arus keluar (panah biru kecil) disebarkan dalam arah distal ke proksimal sepanjang saraf median. Namun, arus ke dalam dilemahkan di tingkat tengah tulang metakarpal jari tengah.

kurang dari 70% atau kecepatan konduksi saraf kurang dari 40 m/s. Hasil NCS konvensional normal (Hambar, 2000) untuk dua dari enam tangan ini (tangan kanan Pasien 3 dan 5) tetapi mereka menunjukkan pola abnormal di dasar tulang metakarpal pada MNG. Pada empat tangan yang tersisa (Pasien 1 dan tangan kiri Pasien 3, 6, dan 7), hasil MNG menunjukkan pola abnormal pada tingkat pusat tulang metakarpal. Empat tangan (Pasien 2, 4, 8, dan 9) yang tidak dapat didiagnosis dengan MNG adalah pasien dengan CTS berat atau penyakit penyerta. Tangan-tangan ini ditemukan memiliki sinyal medan neuromagnetik yang terlalu kecil untuk mendapatkan informasi rinci tentang tingkat situs lesi.

Gambar 2 menunjukkan hasil Pasien 1 yang memiliki klasifikasi Bland grade 2 (Tabel 1). Arus yang direkonstruksi terdiri dari arus utama, arus belakang, dan arus masuk/keluar. Semua arus menunjukkan intensitas yang melemah di tengah tulang metakarpal jari tengah (Gambar 2). Kami menempatkan elektroda virtual di sepanjang saraf median dan menghitung bentuk gelombang untuk arus masuk. Amplitudo gelombang 7 menurun menjadi sekitar 36,9% dari gelombang 8 (Gambar 3).

Gambar 4 menunjukkan hasil Pasien 5, yang memiliki hasil normal pada NCS (Tabel 1). Arus yang direkonstruksi setelah stimulasi jari tengah terdiri dari arus terdepan, tertinggal, dan masuk / keluar. Semua arus merambat dari distal ke proksimal tanpa redaman intensitas (Gambar 4). Dalam arus masuk yang dihitung

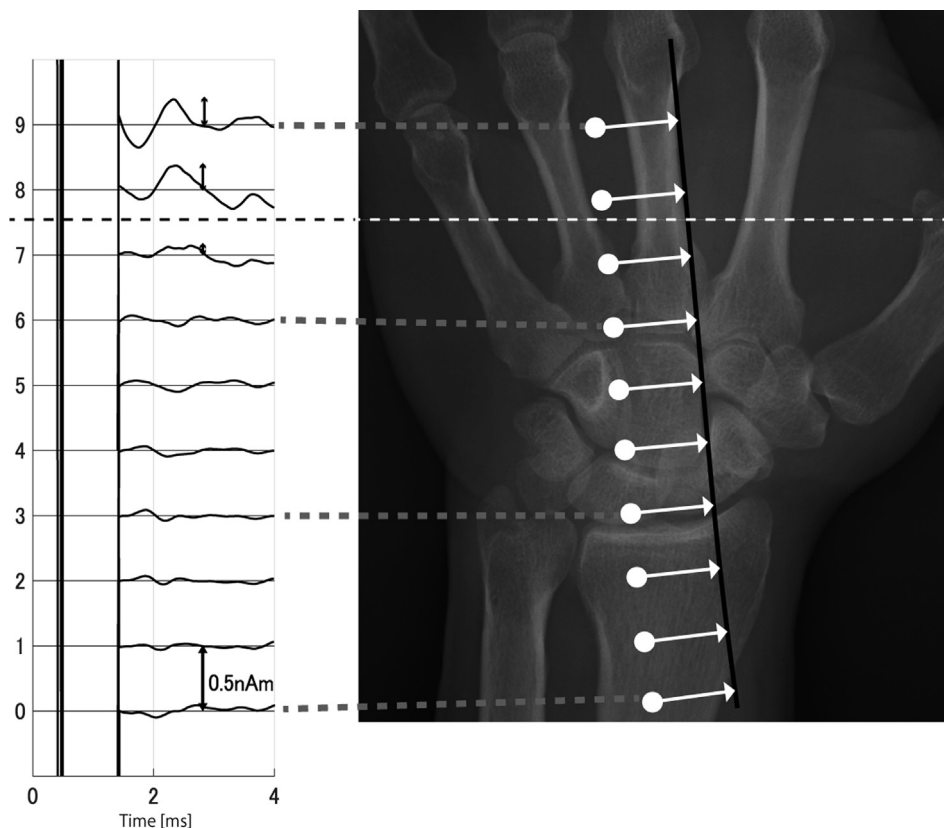
bentuk gelombang, hanya bagian dari bentuk gelombang 8 sampai 7, 7 sampai 6, dan 6 sampai 5 menunjukkan penurunan kecepatan konduksi masing-masing 37,35, 27,51, dan 38,00 m/s (Gambar 5A). Rata-rata kecepatan konduksi semua bentuk gelombang (bentuk gelombang 9 hingga 1) adalah normal (46,3 m/s).

Kami mengukur potensial aksi saraf intraoperatif untuk memeriksa blok konduksi (Gambar 5B). Selama operasi, saraf median ditemukan eritematosa dan rata di sisi distal ligamen karpal transversal. Pengukuran potensial aksi saraf mengungkapkan keterlambatan konduksi lokal di daerah ini, yang konsisten dengan hasil MNG pra operasi (Gambar 5). Kami mengulangi pengukuran medan magnet 6 bulan setelah operasi ketika mati rasa telah membaik (Gambar 6). Bentuk gelombang arus masuk yang dihitung menunjukkan pola yang sehat.

4. Diskusi

Dalam penelitian ini, kami dapat mengukur medan neuromagnetik di area terowongan karpal setelah stimulasi saraf digital dan memvisualisasikan distribusi dan penyebaran aktivitas saraf elektrofisiologis secara terperinci pada pasien CTS.

Meskipun berbagai sensor telah digunakan untuk mengukur medan magnet saraf tepi manusia (Trahms et al., 1989; Wikswa et al., 1990; Hoshiyama et al., 1999; Mackert, 2004;



Gambar 3. Bentuk gelombang dari arus yang dihitung pada "elektroda virtual" (lingkaran putih) 15 mm lateral dari jalur saraf (ke atas menuju jalur saraf). Puncak dalam bentuk gelombang setara dengan arus masuk pada titik depolarisasi. Meskipun bentuk gelombang dilakukan dalam arah distal ke proksimal, amplitudo gelombang 7 menurun menjadi sekitar 36,9% dari bentuk gelombang 8 pada tingkat tengah tulang metakarpal jari tengah.

Nakanishi et al., 2004), belum ada laporan pengukuran medan magnet di area carpal tunnel dari permukaan tubuh. Kami berhasil mengukur bidang neuromagnetik dan memvisualisasikan distribusi terperinci dari aktivitas saraf elektrofisiologis pada 6 dari 10 pasien dengan CTS yang menggunakan MNG. Hasil ini menunjukkan bahwa metode kami mungkin dapat memvisualisasikan gangguan konduksi lokal pada pasien dengan neuropati perifer ringan. Selain itu, dua jenis situs lesi diindikasikan dari bentuk gelombang arus yang direkonstruksi: satu ditemukan di tingkat pusat tulang metacarpal dan yang lainnya ditemukan di dasar tulang metacarpal. Situs lesi dengan perubahan bentuk gelombang pada tingkat pusat tulang metacarpal dapat menunjukkan bahwa neuropati meluas ke distal ke area jebakan. Namun, dalam penelitian ini,

Dalam empat kasus lainnya (Pasien 2, 4, 8, dan 9), kami tidak dapat mengukur medan neuromagnetik secara detail karena sinyal medan neuromagnetiknya kecil. Pasien 2 adalah kasus parah yang tidak dapat diukur pada NCS konvensional, dan sinyal medan neuromagnetik setelah stimulasi saraf digital diyakini tidak mencukupi. Meskipun Pasien 4 memiliki kasus CTS ringan dengan skala keparahan elektrofisiologi tingkat 2, sinyal medan neuromagnetik mungkin kecil karena neuropati perifer yang terkait dengan komorbid diabetes mellitus dan artritis reumatoid. Pasien 8 dan 9 adalah pasien hemodialisis jangka panjang dengan kecepatan konduksi saraf sensorik tertunda 14,2 m/s dan 20,1 m/s di segmen telapak tangan, dan neuropati diamati tidak hanya di segmen telapak tangan, tetapi juga di bagian distal. Dalam kasus-kasus ini,

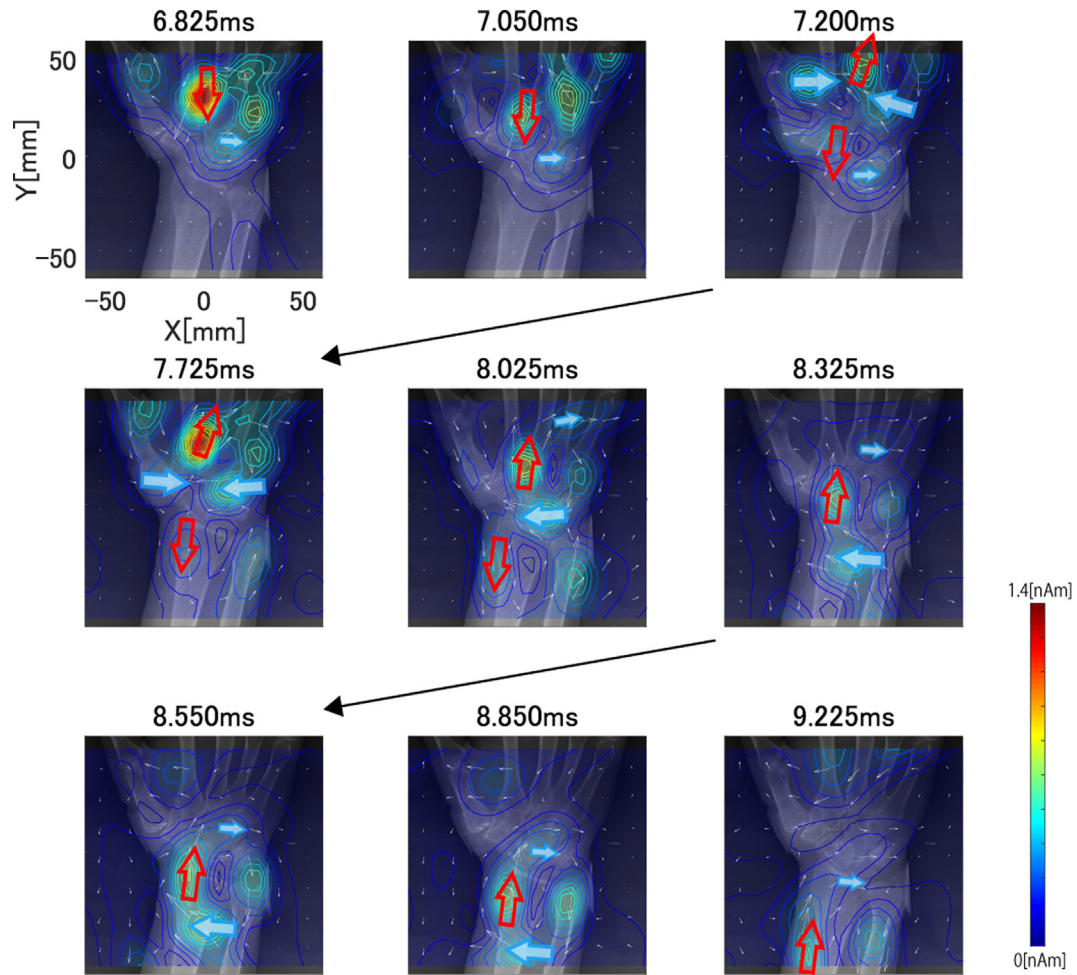
terlalu kecil untuk visualisasi aktivitas saraf elektrofisiologis. Hasil ini menunjukkan bahwa sinyal medan neuromagnetik mungkin kecil pada pasien dengan neuropati perifer berat, pasien yang menjalani hemodialisis, dan pasien dengan diabetes.

Untuk Pasien 5, kami mengikuti pengukuran 6 bulan setelah operasi dan memastikan bahwa gangguan konduksi lokal telah hilang. Metode ini dapat berkontribusi pada evaluasi elektrofisiologi pra operasi dan pasca operasi. Ada beberapa laporan pasien yang gejalanya memburuk setelah operasi CTS (Hambar, 2007). Oleh karena itu, kemampuan untuk melakukan evaluasi elektrofisiologi yang terperinci dengan memimpin dan mengikuti arus intra-akson dan arus masuk/keluar sebelum dan sesudah operasi dapat membantu mengidentifikasi penyebab hasil yang buruk dan memprediksi prognosis.

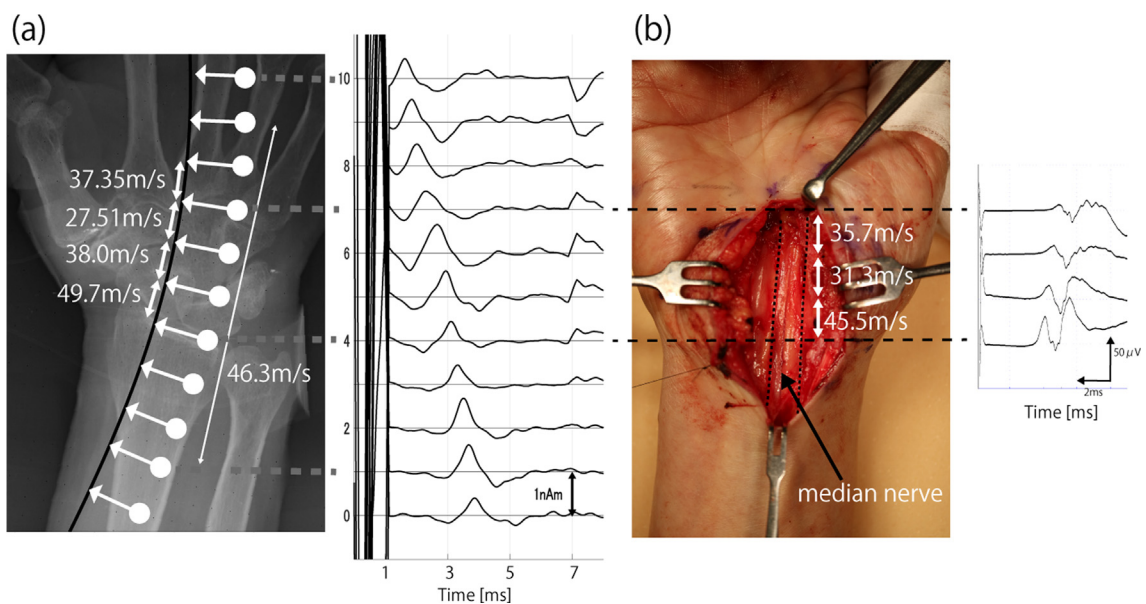
Ada beberapa keterbatasan penelitian ini. Yang pertama adalah hanya ada sedikit kasus. Kami perlu mengumpulkan dan menganalisis sejumlah besar kasus untuk menunjukkan sensitivitas, spesifisitas, dan efektivitas MNG. Kedua, sistem ini adalah perangkat yang lebih baru yang memerlukan sensor magnetik yang mahal dan ruangan berpelindung serta memiliki masalah terkait dengan frekuensi stimulasi yang tinggi dan waktu pemeriksaan yang lama.

5. Kesimpulan

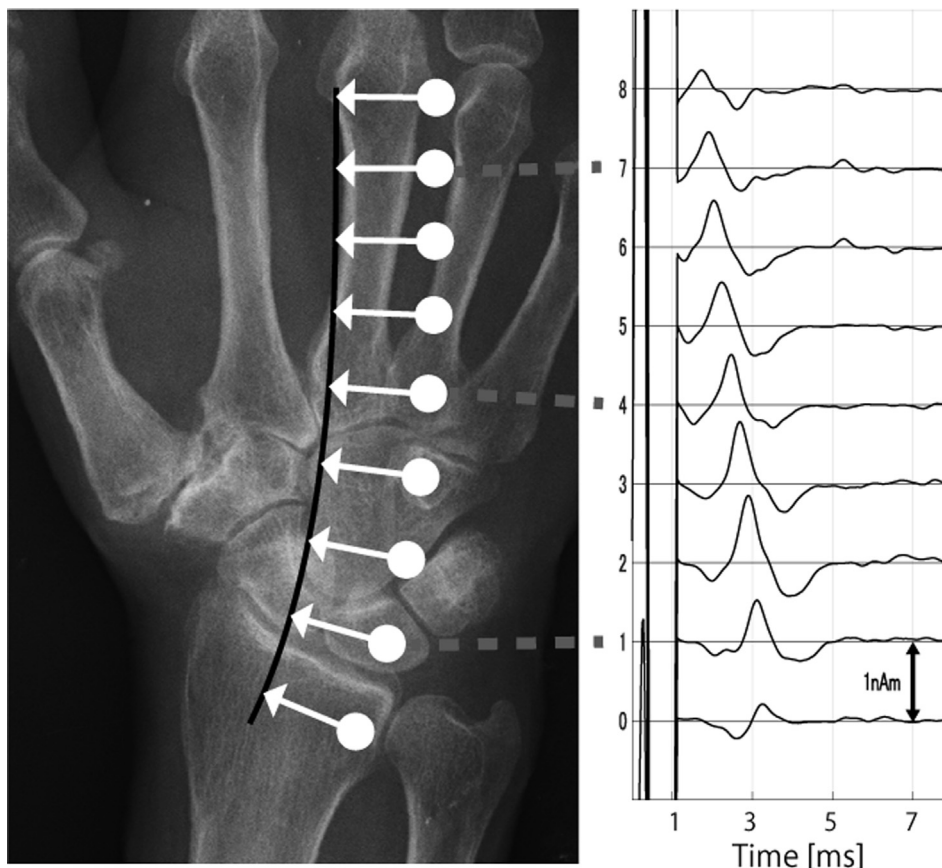
Dalam penelitian ini, kami berhasil mengukur bidang neuromagnetik setelah stimulasi saraf jari dan memvisualisasikan distribusi rinci aktivitas saraf elektrofisiologis pada pasien dengan CTS melalui perbaikan teknis yang melibatkan penghilangan artefak yang diinduksi stimulus dan analisis sumber. Penurunan intensitas arus masuk di daerah depolarisasi dan



Gambar 4. Arus yang dihitung dari Pasien 5. Arus diilustrasikan dengan cara yang sama dengan yang ada di Gambar 2. Arus leading, trailing, dan inward merambat ke arah distal ke proksimal sepanjang nervus medianus.



Gambar 5. Bentuk gelombang arus yang dihitung pada "elektroda virtual" dan potensi aksi saraf majemuk (CNAPs) sebagai respons terhadap stimulasi saraf median di siku. (a) Arus pada elektroda virtual (lingkaran putih) 15 mm lateral dari jalur saraf. Arus diilustrasikan dengan cara yang mirip dengan yang ada di Gambar 3. Amplitudo bentuk gelombang arus masuk tidak melemah. Kecepatan konduksi tertunda hanya di area terowongan karpal dengan kecepatan konduksi masing-masing 37,35, 27,52, dan 38,00 m/s dalam bentuk gelombang 8 hingga 7, 7 hingga 6, dan 6 hingga 5. (b) CNAP Intraoperatif. Mirip dengan hasil MNG pra operasi, CNAP juga menunjukkan gangguan konduksi fokal di area carpal tunnel. CNAPs, senyawa potensial aksi saraf; MNG, magnetoneurografi.



Gambar 6. Bentuk gelombang arus yang dihitung pada "elektroda virtual" di sepanjang saraf median (Pasien 5) pada 6 bulan pasca operasi. Arus diilustrasikan dengan cara yang mirip dengan yang ada di Gambar 3. Bentuk gelombang saat ini menunjukkan pola konduksi normal 6 bulan setelah operasi.

penurunan kecepatan konduksi mencerminkan neuropati saraf median di area terowongan karpal. MNG mungkin memiliki potensi untuk berkontribusi pada evaluasi berbagai gangguan saraf tepi di masa depan.

Pendanaan

Penelitian ini didukung oleh Ricoh Company, Ltd. Badan pendanaan tidak berperan dalam desain studi, pengumpulan dan analisis data, persiapan naskah, atau keputusan untuk menerbitkan.

Pernyataan kontribusi kepengarangan CRediT

TS, S. Kawabata, dan AO mengikuti Konseptualisasi dan Metodologi; TS, S. Kawabata, JH, YH, MA, KF, AN, TY, YA, Y. Miyano, Y. Mitani, TW, SS, S. Kim, dan KS melakukan kurasi data dan analisis formal; TS, S. Kawabata, JH, Y. Miyano, Y. Mitani, TW, SS, S. Kim, dan YA mengembangkan Perangkat Lunak; S. Kawabata menyumbang Akuisisi pendanaan, TS menyumbang Penulisan dan S. Kawabata dan AO berkontribusi meninjau & mengedit.

Deklarasi Kepentingan Bersaing

Para penulis menyatakan bahwa mereka tidak memiliki kepentingan keuangan yang bersaing atau hubungan pribadi yang dapat mempengaruhi pekerjaan yang dilaporkan dalam makalah ini.

Referensi

Adachi Y, Kawabata S, Fujihira J, Uehara G. SQUID multi-saluran sistem magnetospinogram dengan rekondensasi helium siklus tertutup. *IEEE Trans Appl Supercond* 2017;27:1–4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2631422>. hambar JD. Skala penilaian neurofisiologis untuk carpal tunnel syndrome. *Otot Saraf* 2000;23:1280–3. [https://doi.org/10.1002/1097-4598\(200008\)23:8<1280::bantuan-mus20>3.0.co;2-y](https://doi.org/10.1002/1097-4598(200008)23:8<1280::bantuan-mus20>3.0.co;2-y). hambar JD. Pengobatan sindrom terowongan karpal. *Saraf Otot* 2007;36:167–71. <https://doi.org/10.1002/mus.20802>. Buchthal F, Rosenfalck A, Trojaborg W. Temuan elektrofisiologi dalam jebakan saraf median di pergelangan tangan dan siku. *J Neurol Bedah Saraf Psikiatri* 1974;37:340–60. <https://doi.org/10.1136/jnnp.37.3.340>. Hoshiyama M, Kakigi R, Nagata O. Konduksi saraf tepi direkam oleh mikro sistem gradiometer (micro-SQUID) pada manusia. *Neurosci Lett* 1999;272:199–202. [https://doi.org/10.1016/s0304-3940\(99\)00589-3](https://doi.org/10.1016/s0304-3940(99)00589-3). Ishii S, Kawabata S, Tomizawa S, Tomori M, Sakaki K, Shinomiya K, Sekihara K, Sato T, Adachi Y, Okawa A. Bidang neuromagnetik konduktif di kanal tulang belakang lumbar. *Klinik Neurophysiol* 2012;123(8):1656–61. Mackert BM. Magnetoneurografi: teori dan aplikasi saraf tepi gangguan. *Klinik Neurofisiol* 2004;115:2667–76. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2004.07.028>. Bulan PP, Maheshwari D, Sardana V, Bhushan B, Mohan S. Karakteristik saraf studi konduksi pada carpal tunnel syndrome. *Neurol India* 2017;65 (5):1013–6. https://doi.org/10.4103/neuroindia.NI_628_16. Nakanishi K, Mashiko T, Fujimoto Y, Tanaka N, Iwase Y, Ishida O, Ochi M. Wide-rentang visualisasi medan magnet aksi saraf majemuk di saraf median dan ulnaris manusia dari lengan bawah hingga titik Erb. *Neurosci Lett* 2004;356(2):151–3. Sasaki T, Kawabata S, Hoshino Y, Sekihara K, Adachi Y, Akaza M, Ozaki I, Fujita K, Nimura A, Yoshii T, Miyano Y, Mitani Y, Watanabe T, Sato S, Kim S, Okawa A. Visualisasi aktivitas elektrofisiologi pada area carpal tunnel menggunakan magnetoneurography. *Klinik Neurophysiol* 2020;131(4):951–7. Sedal L, McLeod JG, Walsh JC. Lesi saraf ulnaris yang berhubungan dengan terowongan karpal sindroma. *J Neurol Neurosurg Psikiatri* 1973;36:118–23. <https://doi.org/10.1136/jnnp.36.1.118>. Sekihara K, Nagarajan SS, editor. Pencitraan otak elektromagnetik: Bayesian perspektif. Cham: Penerbitan Internasional Springer; 2015.

- Sumiya S, Kawabata S, Hoshino Y, Adachi Y, Sekihara K, Tomizawa S, Tomori M, Ishii S, Sakaki K, Ukegawa D, Ushio S, Watanabe T, Okawa A. Magnetospinografi memvisualisasikan aktivitas elektrofisiologi di sumsum tulang belakang leher. *Sci Rep* 2017;7(1).<https://doi.org/10.1038/s41598-017-02406-8>.
- Thomas JE, Lambert EH, Cseuz KA. Aspek elektrodiagnostik terowongan karpal sindroma. *Arch Neurol* 1967;16:635–41.<https://doi.org/10.1001/archneur.1967.00470240073010>.
- Tomori M, Kawabata S, Tomizawa S, Ishii S, Enomoto M, Adachi Y, Sato T, Shinomiya K, Okawa A. Diagnosis blok konduksi sumsum tulang belakang yang tidak lengkap dari permukaan kulit menggunakan sumsum tulang belakang membangkitkan medan magnet. *J Orthop Sci* 2010;15(3):371–80.
- Trahms L, Erne SN, Trontelj Z, Curio G, Aust P. Lokalisasi fungsional biomagnetik saraf tepi pada manusia. *Biophys J* 1989;55:1145–53.[https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(89\)82911-X](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(89)82911-X).
- Ushio S, Hoshino Y, Kawabata S, Adachi Y, Sekihara K, Sumiya S, Ukegawa D, Sakaki K, Watanabe T, Hasegawa Y, Okawa A. Visualisasi aktivitas listrik cauda equina menggunakan sistem magnetospinography pada subyek sehat. *Klinik Neurophysiol* 2019;130(1):1–11.
- Watanabe T, Ukegawa D, Kawabata S, Adachi Y, Sekihara K. Penghapusan stimulus-artefak yang diinduksi dalam pencitraan sumsum tulang belakang fungsional. 2013 Konferensi Internasional Tahunan ke-35 dari IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Osaka, Jepang; 3–7 Juli 2013.
- Werner RA, Andary M. Evaluasi elektrodiagnostik dari carpal tunnel syndrome. *Saraf Otot* 2011;44:597–607.<https://doi.org/10.1002/mus.22208>. Wikswo IP, Henry WP, Friedman RN, Kilroy AW, Wijesinghe RS, van Egeraat JM, et al. Rekaman intraoperatif dari medan magnet saraf manusia. Di dalam: Williamson SJ, Hoke M, Stroink G, Kotani M, editor. *Kemajuan dalam biomagnetisme*. Boston, MA: Peloncat; 1990. hal. 137–40.
- Yılmaz F, Gündüz OH, Akyüz G. Teknik perekaman Lumbrical-interoseus versus metode elektrodiagnostik rutin dalam diagnosis carpal tunnel syndrome. *Turki J Phys Med Rehabil* 2017;63(3):230–8.<https://doi.org/10.5606/tftrd.2017.311>.