

Realisierung einer schnellen und wiederholbaren Hot-Spot-Bestimmung für die robotergestützte Transkranielle Magnetstimulation mittels Kraft-Momenten-Steuerung

L. Richter^{1,2}, R. Bruder¹, A. Schlaefer^{2,3}, A. Schweikard¹

¹ Universität zu Lübeck, Institut für Robotik und Kognitive Systeme, Lübeck, Germany

² Universität zu Lübeck, Graduate School for Computing in Medicine and Life Sciences, Lübeck, Germany

³ Universität zu Lübeck, Medical Robotics Group, Lübeck, Germany

Kontakt: richter@rob.uni-luebeck.de

Abstract:

Das Robotersystem für die Transkranielle Magnetstimulation (TMS) ermöglicht eine präzise und wiederholbare Positionierung der TMS-Spule auf dem Kopf des Patienten. Um einen sicheren Einsatz des Roboters zu gewährleisten, ist oftmals eine manuelle Vorpositionierung des Roboters nötig, um einen gewünschten Stimulationspunkt zu erreichen. Mittels der Kraft-Momenten-Steuerung (KMS) ist es möglich die Spule intuitiv per Hand zu bewegen. Wir haben die KMS verwendet und erweitert, um sie für eine schnelle Hot-Spot-Bestimmung einsetzen zu können. Bei unseren Tests haben wir gezeigt, dass es einem unerfahrenen Benutzer nur schwer möglich ist, eine Hot-Spot-Bestimmung mit dem Robotersystem ohne Kraft-Momenten-Steuerung durchzuführen. Die KMS verkürzt die Dauer der Hot-Spot-Bestimmung wesentlich und ist daher entscheidend für den breiten Einsatz des Robotersystems in Klinik und Forschung.

Schlüsselworte: Medizinische Robotik, Transkranielle Magnetstimulation, TMS, Kraft-Momenten-Steuerung

1 Problem

Bei der Transkraniellen Magnetstimulation (TMS) wird das Gehirn nicht-invasiv und schmerzfrei, basierend auf dem Ferro-Magnetischen Prinzip, stimuliert. Dazu wird eine Magnetspule auf dem Kopf des Patienten über dem zu stimulierenden Cortexareal platziert [1]. Neben dem Einsatz der TMS in Forschung und klinischer Diagnose, wird besonders die repetitive Transkranielle Magnetstimulation (rTMS) für die Behandlung von verschiedenen neurologischen und psychologischen Erkrankungen, wie beispielsweise Depression, chronischem Tinnitus oder chronischem Schmerz, eingesetzt (siehe [2] für eine Übersicht).

Bei jeder Behandlung mit TMS muss die individuelle Reizstärke des Patienten vor der eigentlichen Stimulation bestimmt werden [3]. Dazu wird üblicherweise das Handareal des motorischen Kortex stimuliert und zunächst der Stimulationsort mit der besten Antwort im Muskel gesucht – der sog. Hot-Spot. Zur Bestimmung der Muskelantwort werden üblicherweise Oberflächen Elektroden am Muskel des kleinen Fingers verwendet um das Signal abzuleiten. In der Regel wird an 10-15 Stimulationsorten die zugehörige Muskelantwort gemessen. Anschließend wird der gefundene Hot-Spot zur Bestimmung der individuellen Motorschwelle des Patienten genutzt [4]. Diese Motorschwelle steht dann im direkten Bezug zur Wahl der Reizstärke für die eigentliche Stimulation. Daher ist es entscheidend nicht nur den Hot-Spot genau bestimmen zu können, sondern ihn anschließend auch punktgenau wiederverwenden zu können [5]. Neben der Wichtigkeit für den Einsatz der TMS in der Behandlung von neurologischen und psychologischen Erkrankungen, ist die genaue und zuverlässige Bestimmung eines Hot-Spots für viele Fragestellungen in der TMS-Forschung von immenser Bedeutung.

Mittels des robotisierten TMS-Systems ist es möglich Stimulationspunkte präzise wiederanfahren zu können [6]. Durch den in das System integrierten Bewegungsausgleich, bleibt der Stimulationspunkt erhalten, auch wenn sich der Patient während der Untersuchung bewegt. So kann ein einmal bestimmter Hot-Spot punktgenau wiederverwendet werden. Da das robotergestützte System auf einem Industrieroboter basiert, ist die Handhabung des Systems teilweise aufwendig. Der Roboter, mit der angebrachten TMS-Spule, muss zu Beginn manuell vorpositioniert werden. Der Nutzer wählt dann einen gewünschten Stimulationspunkt in der TMS-Software aus und lässt den Roboter anschließend, wenn eine sichere Bahn möglich ist, die Spule automatisch an diesen Punkt platzieren. Wenn der Roboter das Ziel erreicht hat, startet automatisch die Bewegungskompensation und die Stimulation kann erfolgen. Soll anschließend, die Spule an einen anderen Stimulationsort gebracht werden, muss der Nutzer den Bewegungsausgleich stoppen, einen anderen Stimulationspunkt in der TMS-Software auswählen und den Roboter dann diesen Punkt anfahren lassen. Bei der Stimulation von mehreren Stimulationspunkten, wie beispielsweise bei der Hot-Spot-Suche, kann dieser Vorgang ca. 10-15 Minuten dauern.

Um die Hot-Spot-Suche zu beschleunigen, verwenden wir die Kraft-Momenten-Steuerung (KMS), die wir kürzlich für das roboterisierte TMS-System entwickelt haben. Ein weiterer entscheidender Vorteil der KMS ist die intuitive Platzierung der Spule durch den Nutzer, wie er es ohne Robotereinsatz gewohnt ist. Per Hand kann der Nutzer die am Roboter befestigte Spule positionieren. Durch die Stellung des Roboters und die Position des Patienten, werden alle per Hand gewählten Stimulationspunkte gespeichert. So kann im Anschluss der gefundene Hot-Spot automatisch und punktgenau durch den Roboter wieder angefahren werden.

2 Methoden

Wir benutzen einen Adept Viper s850 Industrieroboter (Adept Technology, Inc., Livermore, CA, USA) und ein Polaris Spectra Navigationssystem (Northern Digital Inc., Waterloo, Ontario, Kanada). Für die Kraft-Momenten-Steuerung, haben wir das System um einen Mini45 Kraft-Momenten-Sensor (ATI Industrial Automation, Inc., Apex, NC, USA) erweitert, welcher zwischen Endeffektor und TMS-Spule installiert wurde [6]. Für die Evaluierung der Methode haben wir ein Kopfphantom aus Plastik verwendet.

Wir verwenden die Kraft-Momenten-Steuerung, um die TMS-Spule intuitiv an den Stimulationspunkt auf dem Kopf zu bringen. Im Gegensatz zur Vorpositionierung der Spule, muss bei der Verwendung der KMS für die Hot-Spot-Bestimmung darauf geachtet werden, dass die Spule direkt auf dem Kopf des Patienten aufliegt. Da die erzeugte Gegenkraft bei Kontakt der Spule auf den Kopf üblicherweise über dem Schwellwert liegt, resultiert diese Gegenkraft in eine leichte Bewegung vom Kopf weg. Wir haben deshalb eine von der auftretenden Kraft abhängige Rampe für die Roboterbewegungen umgesetzt. Diese stellt sicher, dass bei kleinen auftretenden Kräften nur minimale Roboterbewegungen verfahren werden. Dadurch wird eine Feinpositionierung der Spule auf dem Kopf ermöglicht. Größere Kräfte resultieren in größeren/schnelleren Roboterbewegungen und werden deshalb zur Vorpositionierung verwendet. Die Berechnung der inkrementellen translatorischen Roboterbewegung T abhängig von der auftretenden Kraft F , lässt sich beschreiben durch:

$$T = \text{const} * \text{factor} * F,$$

wobei *const* einen konstanten Skalierungsfaktor beschreibt. Der Rampenfaktor *factor* wird durch die folgende Fallunterscheidung berechnet:

$$\text{factor} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \|F\|_2 \leq 14N \\ \frac{1}{2} \|F\|_2 - 6, & \text{wenn } 14 < \|F\|_2 < 24N \\ 6, & \text{wenn } \|F\|_2 \geq 24N. \end{cases}$$

Entsprechend der Translationen werden die inkrementellen rotatorischen Roboterbewegungen R mittels der auftretenden Drehmomente M berechnet. Zur Hot-Spot-Bestimmung haben wir zwei unterschiedliche Modi implementiert:

1. Schnelle Hot-Spot-Suche mittels Triggersignal:

Nachdem die Spule per Hand an den Stimulationspunkt gebracht wurde und an diesem Punkt ein Stimulationspuls ausgelöst wurde, wird vom Stimulator ein Trigger-Signal an den TMS-Rechner gesendet. Die Spulenposition wird relativ zum Kopf in der TMS-Software gespeichert. Die Höhe der zugehörigen Muskelantwort kann im Ableitungsgerät abgelesen werden und wird in der TMS-Software zum Stimulationspunkt mit eingetragen. Mit der Kraft-Momenten-Steuerung können so weitere Stimulationspunkte ausgewertet werden.

2. Stabile Hot-Spot-Bestimmung durch mehrere Stimuli:

Nachdem die Spule platziert wurde, wird in der TMS-Software die aktuelle Spulenposition übernommen und gleichzeitig der automatische Bewegungsausgleich aktiviert. Dadurch können mehrere Stimulationen mit zugehörigen Muskelableitungen an demselben Stimulationsort durchgeführt werden. So ist es z.B. leicht möglich den Median aus einer gewissen Anzahl von Stimuli für die Hot-Spot-Suche zu verwenden, um Schwankungen bei der Muskelantwort zu umgehen. Nachdem der gewünschte Ableitungswert zum Stimulationspunkt eingetragen wurde, wird der Bewegungsausgleich gestoppt und der Nutzer kann die Spule zum nächsten Stimulationspunkt bewegen.

Im Anschluss an die Hot-Spot-Bestimmung kann der Hot-Spot, in beiden implementierten Modi, wieder punktgenau und automatisch mit dem Roboter angefahren werden, um dort die Reizschwellenbestimmung oder eine weitere Untersuchung durchzuführen. Da der gefundene Hot-Spot relativ zum Kopf des Patienten gespeichert wird, kann er bei folgenden TMS-Sitzungen direkt wieder durch den Roboter angefahren werden. Eine erneute Hot-Spot-Suche ist so nicht erforderlich.

3 Ergebnisse

Zur Evaluierung der Kraft-Momenten-Steuerung für die Hot-Spot-Bestimmung haben wir die Dauer einer Hot-Spot-Suche mit der Kraft-Momenten-Steuerung mit der Dauer einer Hot-Spot-Suche mit dem robotergestützten TMS-System ohne KMS verglichen. Dazu haben wir eine MCF-B65 Achtschule (MagVenture A/S, Farum, Denmark) benutzt, wie sie in vielen TMS-Studien Verwendung findet. Die Hot-Spot-Suche erfolgte mithilfe des Kopfphantoms. Eine Ableitung der Muskelantworten war für diese Evaluierung nicht erforderlich.

Wir haben drei verschiedene Szenarien untersucht. Beim ersten Szenario hatte die Spule bereits die gewünschte Orientierung und wurde dicht über dem zu untersuchenden Areal platziert (ca. 10 cm entfernt). Für das zweite Szenario wurde die Spule etwas weiter vom Zielareal entfernt (ca. 25 cm) und hatte eine leicht gedrehte Orientierung (ca. 15°). Dieses Szenario wurde noch so gewählt, dass eine sichere Roboterbahn vom aktuellen Startpunkt zum Zielareal automatisch mit der TMS-Software (ohne KMS) gefahren werden konnte, ohne dass eine manuelle Roboter-Vorpositionierung notwendig war. Das dritte Szenario sah eine manuelle Roboter-Vorpositionierung vor, um den Roboter auf einer sicheren Bahn zum Zielareal fahren lassen zu können. Dazu wurde die Spule zu Beginn ca. 50 cm entfernt und mit einer falschen (invertierten) Orientierung positioniert ($> 90^\circ$).

Bei allen drei Szenarien wurde zuerst eine schnelle Hot-Spot-Bestimmung mit der Kraft-Momenten-Steuerung durchgeführt. Dazu wurde die Spule an 9 verschiedene Stimulationspunkte über dem Zielareal platziert und jeder Punkt mit einer zufälligen Muskelantwort gespeichert und virtuell auf der Kopfoberfläche dargestellt. Danach wurde die Spule an den Ausgangspunkt des Szenarios zurück bewegt. Die Hot-Spot-Bestimmung wurde anschließend mit denselben Punkten mit der TMS-Software ohne KMS durchgeführt. Dazu wurden die Stimulationspunkte auf der Kopfoberfläche in der TMS-Software ausgewählt, die genau den vorher gespeicherten Punkten entsprechen.

Die Dauer von Bewegung ab Startposition bis zum Erreichen des neunten Stimulationspunktes wurde dabei für jeden Durchgang gemessen. Für jedes Szenario und jede Art der Steuerung wurden 5 Durchgänge gemessen.

Die gemessenen Positionierungszeiten für einen erfahrenen Benutzer sind in Abb. 1 graphisch gegenübergestellt. Die mittleren Durchgangszeiten sowie die Standardabweichungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die gemessenen Zeiten zeigen, dass mit der KMS die Positionierung im Mittel zwischen 3:00 und 3:20 min beträgt. Bei der Nutzung der reinen TMS-Software dauert die Positionierung zwischen 04:00 und 04:20, wenn keine manuelle Vorpositionierung erforderlich ist. Eine zusätzliche manuelle Vorpositionierung beansprucht etwas mehr als 01:00 min für einen erfahrenen Benutzer. Der Unterschied der Positionierungsdauer ist für alle drei Szenarien signifikant ($p = 0.00002$, $p = 0.0007$ bzw. $p = 0.0035$ bei einem gepaarten T-Test).

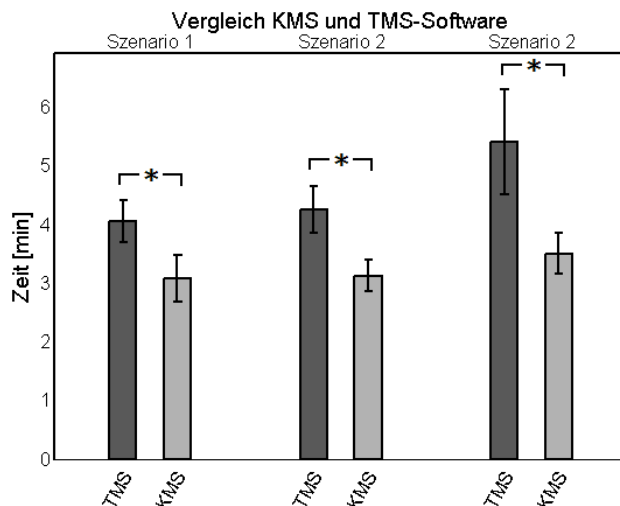


Abbildung 1: Vergleich der benötigten Positionierungszeiten eines erfahrenen Benutzers für die Hot-Spot-Bestimmung mittels der beschriebenen Kraft-Momenten-Steuerung sowie der ursprünglichen TMS-Software.

Szenario	KMS	TMS-Software
1	3:05 min ($\pm 0:24$ min)	4:04 min ($\pm 0:22$ min)
2	3:07 min ($\pm 0:16$ min)	4:15 min ($\pm 0:24$ min)
3	3:20 min ($\pm 0:21$ min)	5:24 min ($\pm 0:54$ min)

Tabelle 1: Mittlere benötigte Positionierungsdauer eines erfahrenen Benutzers für die Hot-Spot-Bestimmung basierend auf 9 Stimulationspunkten und jeweils 5 Durchgängen für die Steuerung des Roboters mittels der beschriebenen Kraft-Momenten-Steuerung sowie der ursprünglichen TMS-Software. In Klammern (mit $\pm$ gekennzeichnet) ist die Standardabweichung dargestellt.

Um die benötigte Dauer für die manuelle Vorpositionierung bei einem unerfahrenen Benutzer bestimmen zu können, haben wir einen unerfahrenen Benutzer die manuelle Vorpositionierung für Szenario 3 durchführen lassen. Dafür hatte der Benutzer zuvor eine kurze Unterweisung in die Robotersteuerung erhalten. Es wurden drei Durchgänge gemessen. Beim ersten Durchgang traf der Benutzer das Kopfphantom mit der Spule, so dass dieser Durchgang abgebrochen werden musste. Bei den beiden übrigen Durchgängen lag die reine Positionierungsdauer bei ca. 05:00 min. Eine Positionierung mit der Kraft-Momenten-Steuerung war für den unerfahrenen Benutzer in weniger als 01:00 min zu erreichen ohne mit dem Kopfphantom zu kollidieren.

4 Diskussion

Die Kraft-Momenten-Steuerung ermöglicht ungeübten Benutzern das roboterisierte TMS-System effizient zu nutzen, um von der Positioniergenauigkeit und Wiederholbarkeit des Systems profitieren zu können. Die KMS kann, neben einer Vorpositionierung der Spule, für eine schnelle Hot-Spot-Bestimmung verwendet werden. Dabei bewegt der Anwender die Spule intuitiv per Hand zu den gewünschten Stimulationspunkten auf dem Kopf. Der Roboter fährt dabei die Bewegungen des Nutzers anhand der aufgebrachten Kräfte und Drehmomente nach. So ist zu jeder Zeit die genaue Position der Spule bekannt und die Stimulationspunkte können so aufgezeichnet werden. Durch die TMS-Software können diese Stimulationspunkte, einschließlich des gefundenen Hot-Spots, automatisch und punktgenau wieder angefahren werden. Somit kann ein einmal gefundener Hot-Spot für einen Patienten wiederholt verwendet werden. Eine erneute Hot-Spot-Bestimmung ist nicht erforderlich.

Unsere Evaluierung hat gezeigt, dass sogar erfahrene Nutzer des Robotersystems ca. 1 Minute weniger Zeit für die Positionierung der Spule bei der Hot-Spot-Bestimmung benötigen, wenn sie die Kraft-Momenten-Steuerung anstatt der ursprünglichen TMS-Software verwenden. Sollte bei der TMS-Software aufgrund einer schlechten Startposition eine manuelle Vorpositionierung erforderlich sein, benötigt ein erfahrener Benutzer ungefähr 1 Minute zusätzlich. D.h. für den erfahrenen Benutzer wird nur eine leichte Beschleunigung des Ablaufs erreicht. Die üblichen TMS-Anwender sind hingegen als unerfahrene Benutzer im Hinblick auf Robotersysteme zu betrachten. Üblicherweise handelt es sich um Neurologen, Psychiater und Neurowissenschaftler. Bei unerfahrenen Anwendern besteht die Gefahr einer Kollision mit dem Kopf, wie unser Test gezeigt hat. Außerdem benötigen sie ca. 5 Minuten für eine manuelle Roboter-Vorpositionierung. Eine Positionierung mit der KMS ist in weniger als 1 Minute zu erreichen. Somit ermöglicht die Kraft-Momenten-Steuerung den Einsatz des roboterisierten TMS-Systems in der klinischen Routine und Forschung. Zusätzlich sind die Gefahren von Kollisionen mit dem Probandenkopf mit der KMS auf ein Minimum reduziert. Bei einem starken Kontakt zwischen Spule und Kopf würden die auftretenden Gegenkräfte (und Momente) dafür sorgen, dass der Roboter die Spule vom Kopf entfernt.

Im Gegensatz zu Standard-Industrierobotern, sind moderne Leichtbaurobotern bereits mit Kraftsensoren in allen Gelenken, sowie am Handgelenk ausgestattet [7]. Sie sind besonders für Applikationen im direkten Zusammenspiel zwischen Mensch und Roboter geeignet. Inwieweit sie sich für den Einsatz in der robotergestützten TMS aufgrund ihrer größeren Elastizität eignen, muss in zukünftigen Vergleichsstudien untersucht werden.

In den aktuellen TMS-Studien mit dem roboterisierten System soll zukünftig die Kraft-Momenten-Steuerung mit der schnellen Hot-Spot-Bestimmung zum Einsatz kommen um den Ablauf der Stimulation zu vereinfachen und zu beschleunigen, sowie dessen klinische Einsatzfähigkeit zu belegen. Um das robotergestützte TMS-System sicherer zu gestalten, erweitern wir die Kraftmomenten-Steuerung zur Zeit um ein Echtzeitsystem, welches im Falle einer Kollision oder eines Fehlverhaltens einen Roboter-Not-Stopp auslöst.

Danksagung

Diese Arbeit wurde teilweise durch die Graduate School for Computing in Medicine and Life Sciences, gefördert durch die Deutsche Exzellenz Initiative [DFG GSC 235/1], unterstützt.

5 Referenzen

- [1] A. T. Barker, R. Jalinous, I. L. Freeston, *Non-invasive magnetic stimulation of human motor cortex*, Lancet, 1: 8437(1106–1107), 1985
- [2] H. R. Siebner, U. Ziemann (Eds.), *Das TMS-Buch*, Springer Medizin Verlag, 2007
- [3] S. Rossi, M. Hallett, P. M. Rossini, A. Pascual-Leone, *Safety, ethical considerations, and application guidelines for the use of transcranial magnetic stimulation in clinical practice and research*, Clinical Neurophysiology, 120:12(2008 - 2039), 2009
- [4] P. M. Rossini, A.T. Barker, A. Berardelli et al., *Non-invasive electrical and magnetic stimulation of the brain, spinal cord and roots: basic principles and procedures for routine clinical application Report of an IFCN committee*. Clinical Neurophysiology, 91 (79-92), 1994
- [5] A. B. Conforto, W. J. Z'Graggen, A. S. Kohl, K. M. Rosler, A. Kaelin-Lang, *Impact of coil position and electrophysiological monitoring on determination of motor thresholds to transcranial magnetic stimulation*. Clinical Neurophysiology. 115(812–819), 2004
- [6] L. Matthäus, *A robotic assistance system for transcranial magnetic stimulation and its application to motor cortex mapping*, Ph.D. dissertation, Universität zu Lübeck, 2008
- [7] A. Albu-Schäffer, S. Haddadin, C. Ott, A. Stemmer, T. Wimböck, G. Hirzinger, *The DLR Lightweight Robot – Design and Control Concepts for Robots in Human Environments*. Industrial Robot, 34:5 (376-385).