

Ultraschall-Dickenmessung der Schädelkalotte zur Registrierung bei navigierten Eingriffen an der lateralen Schädelbasis

S.H. Tretbar¹, Ph.A. Federspil², C. Günther¹, P.K. Plinkert²

¹ Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik IBMT, St. Ingbert, Deutschland

² Klinik und Poliklinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde, Universität des Saarlandes, Homburg/Saar, Deutschland

steffen.tretbar@ibmt.fraunhofer.de

Abstract— Bei Eingriffen an der lateralen Schädelbasis bei denen CT-Datensätze zur OP-Planung und anschließenden Navigation und Registrierung genutzt werden, muss von einer Strahlenbelastung und einer nicht gegebenen Echtzeitfähigkeit dieser Systeme für den intraoperativen Einsatz ausgegangen werden. Der alternative Einsatz von Standardultraschallsystemen ist zwar nicht invasiv und arbeitet in Echtzeit, ist aber für die Weichgewebediagnostik ungeeignet und kann die Anforderungen zur Vermessung der Dicke der Schädelkalotte (Genauigkeit < 1 mm, Messbereich 1 – 10 mm) nur schwer erfüllen.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, war es nötig ein System zu entwickeln, welches an die akustischen Eigenschaften von Schädelkalotte angepasst ist und über eine spezielle HF-Datenverarbeitung (coded excitation, matched filter) zum Erreichen der Anforderungen verfügt.

Zur Bestimmung der akustischen Parameter der Schädelkalotte, wie Schallgeschwindigkeit, Absorptionskoeffizienten und akustische Impedanz, wurden in dieser Arbeit 24 humane Proben durch Transmissionsmessungen charakterisiert. An Hand dieser Parameter wurde ein Ultraschallsystem entwickelt, mit dem spezielle Signalverarbeitungsalgorithmen zur exakten Dickenbestimmung eingesetzt werden können. Durch in-vitro-Messungen mit diesem System konnte eine Genauigkeit von 0.5 mm ($\pm 5\%$) bei der Dickenbestimmung humaner Schädelpräparate nachgewiesen werden.

Durch Kopplung dieses Ultraschallsystems mit einem Trackingsystem oder einem Roboter kann dieses System zur präoperativen Planung und intraoperativen Registrierung eingesetzt werden.

Keywords— Ultraschall-Dickenmessung, Schädelkalotte, Navigation, Registrierung, HF-Signalverarbeitung, coded excitation, matched filter

Einleitung

Beim überwiegenden Teil von Eingriffen an der Schädelbasis (Kraniotomie, Trepanationen, Fräsen eines Implantatlagere, Mastoidektomie) ist es hilfreich, die Dicke der Schädelkalotte am Operations-Situs, zur Vermeidung von Duraläsionen oder Implantationsfeh-

lern, genau zu kennen. Zur Planung und Navigation dieser Eingriffe werden zunehmend optische oder elektromagnetische Navigationssysteme, die mit präoperativ erfassten CT-Datensätzen arbeiten, eingesetzt [1, 2, 5]. Diese Systeme können bei der intraoperativen Navigation in Abhängigkeit des aufgenommenen CT-Datensatzes, des eingesetzten Systems und der Patientenregistrierung nur schwer eine Genauigkeit < 1mm erreichen [2, 5]. Diese Technik ist nicht echtzeitfähig, bedarf eines hohen Zeitaufwandes und ist auf Grund der Strahlenbelastung ein invasives Verfahren.

Eine Alternative stellt der Einsatz von intraoperativen Ultraschall als nicht invasives Navigationsverfahren dar.

Materialien und Methoden

Die akustischen Parameter wurde mittels eines Transmissionsmessplatz bestimmt. Gemessen wurde in einem Wassertank mit Ultraschalltransducern (Fa. Panametrics) der Mittenfrequenzen 1 MHz, 2.25 MHz, 5 MHz und 7.5 MHz. Als Sende- und Empfangselektronik wurde ein Sende-Empfangs-Modul II des Fraunhofer IBMT eingesetzt. Mit diesem System stehen die ungefilterten HF-Daten zur weiteren Signalverarbeitung zur Verfügung. Die akustischen Parameter wurden für das Multilayersystem Kalotte, welches aus tabula externa, diploë und tabula interna besteht, betrachtet und nicht für jeden Layer einzeln.

Zur Dickenbestimmung der Schädelkalotte wurde das SEM II als Puls-Echo-System betrieben und ein Ultraschalltransducer der Fa. Ultrason mit einer Mittenfrequenz von 2.25 MHz verwendet. Um im Focus in die Probe einzukoppeln wurde ein flexibler Vorlauf mit einer Länge, die der Nahfeldlänge entspricht, zur Direktan-kopplung an die Schädelkalotte vor dem Transducer angebracht.

Es wurden 48 Messungen an 16 rechteckigen Stücken aus der regio temporalis von formalinfixierten humanen Schädelkalotten an je 3 Stellen vorgenommen. Als Referenzmessungen dienten manuelle Messungen mit einer Bügelmessschraube. Zur Bestimmung der Dicke mittels Ultraschall wurden spezielle Pulskompressionsverfahren eingesetzt, die auf dem Senden von kodierten

Signalen und anschließender Filterung der empfangenen HF-Signale basieren [4, 6].

Zur Bestimmung des Kalottenprofils ist es notwendig die Dicke der Kalotte an verschiedenen Positionen zu bestimmen. Bei der Messung mit Ultraschallsystemen wird die Zeit zwischen der ersten Reflexion (am Probeneintritt, Kalottenoberfläche) und der Reflexion am Probenaustritt (inneres Kalottenprofil) gemessen. Um diese Zeit (Δt), die die Schallwelle beim Durchlaufen des Mediums benötigt, in eine Schichtdicke an dieser Position umzuwandeln, ist die Kenntnis der Schallgeschwindigkeit (c [m/s]) nötig (Gl.1).

$$c = \frac{2d}{\Delta t} ; \quad d = \frac{c\Delta t}{2} \quad \text{Gleichung 1}$$

c [m/s] mittlere Schallgeschwindigkeit der Proben
 d [m] Probendicke
 t [s] Zeit

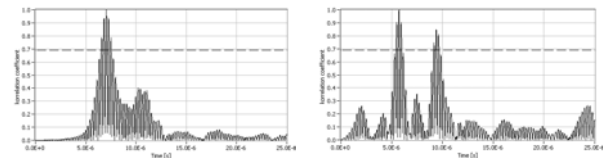
Ergebnisse

Die mittlere Schallgeschwindigkeit aus 288 Messungen beträgt $c_{\text{mean}} = 2593\text{m/s}$ (SD 276). Die mittlere akustische Impedanz beträgt 4.95 MRayl (SD 0.87). Die Reflexionsverluste betragen für eine Reflexionsmessung 10.01 dB (SD 1.68) und für eine Messung in Transmission 6.67 dB (SD 1.12). Die durchgeführten Transmissionsmessungen (N=861) ergaben nach Bereinigung der Werte um die zuvor ermittelten Reflexionsverluste einen Absorptionsverlust von $1.43\text{ dBmm}^{-1}\text{MHz}^{-1}$ im Messbereich von $0 - 10\text{ MHz}$, bei Annahme eines linearen Verlaufes der Frequenzabhängigkeit.

Durch den Einsatz eines 2.25 MHz -Transducer zur Dickenbestimmung konnten die hohen Absorptionsverluste bei einer Probendicke von $4 - 8\text{ mm}$ gering gehalten werden. Die mit dieser niedrigen Frequenz verbundenen Genauigkeitsverluste wurden durch den Einsatz der Pulskompressionstechnik kompensiert. Im Vergleich zu Standardverfahren der Ultraschalldickenmessung wurde der Ultraschalltransducer einmal mit einer Sinusschwingung seiner Mittenfrequenz angesteuert (Standard) und einmal mit einem linear frequenzmodulierten Chirp-Signal der Pulsdauer $T = 2\text{ }\mu\text{s}$ und einem Frequenzbereich von $B = 1 - 4\text{ MHz}$. Der zu erwartende Amplitudengewinn des Chirp beträgt 2.44 .

Nach der Pulskompression mit einem Korrelationsfilter wurde in der Ergebnisfunktion, analog zum Empfangssignal, die Dicke der Probe über die gemessene Laufzeit (Δt) zwischen zwei Korrelationsmaxima nach Gleichung 1 bestimmt. Die Vorteile dieser Technik werden in Abbildung 1 sehr deutlich. Bei Anwendung der Pulskompression ist das Echo vom Probenaustritt (inneres Kalottenprofil) wesentlich besser bestimmbar.

Die mittlere Abweichung für die Anwendung der Pulskompressionstechnik mittels kodierter Signale und direkter Ankopplung des Ultraschalltransducers an die Schädelkalotte beträgt 0.5 mm ($\pm 5\%$) (N=48).



(a)

(b)

Abbildung 1: empfangenes Zeitsignal einer US-Messung der Schädelkalotte, a - Signal ohne kodierte Anregung nach Korrelationsfilter, b - mit kodierter Anregung nach Korrelationsfilter

Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass es mittels Ultraschall möglich ist die Dicke der Schädelkalotte, und nach Kopplung des Ultraschallwandlers mit einem Trackingsystem, der ganzer Profile mit einer Genauigkeit von $0,5\text{ mm}$ zu bestimmen. Anhand der so erfassten Profildaten kann ein Eingriffsplanung als auch eine intraoperative Registrierung erfolgen. Allerdings ist zum Erreichen dieser Genauigkeiten eine genaue Systemspezifikation anhand einer akustischen Charakterisierung des Messmediums und der Einsatz spezieller Signalverarbeitungsalgorithmen notwendig.

Gefördert durch die DFG im Rahmen des SPP 1124 „Medizinische Navigation und Robotik“ (PL 136/5-1)

Literaturverzeichnis

- [1] M. Cartellieri, F. Vorbeck, J. Kremser, "Comparison of six three-dimensional navigation systems during sinus surgery", *Acta oto-laryngologica* vol. 121, pp. 500-504, 2001
- [2] Ph. A. Federspil et al. "Development of the First Force-Controlled Robot for Otoneurosurgery" *Laryngoscope*, vol.113, pp 465-471, 2003
- [3] F. J. Fry and J. E. Barger "Acoustical properties of the human skull", *Journal Acoustical Society of America*, Vol. 63, pp.1576-1590, 1978
- [4] P.-C. Li, E. Ebbini and M. O'Donnell, "A new filter design technique for coded excitation systems", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* vol. 39, No. 6, pp.693-699, 1992
- [5] R. Marmulla, M. Hilbert, H. Niederdellmann, "Intraoperative Präzision mechanischer, elektromagnetischer, infrarot- und lasergeführter Navigationssysteme in der computergestützten Chirurgie", *Mund- Kiefer- Gesichtschirurgie* 2 Suppl 1, pp.145-148, 1998
- [6] M. Pollakowski, "Ein Beitrag zur Anwendung der Pulskompressionstechnik in der zerstörungsfreien Materialprüfung", *Shaker Verlag Aachen*, 1993