

**5. Workshop
Automatisierungstechnische
Verfahren für die Medizin vom
15.-16. Oktober 2004 in
Saarbrücken**



**„Roboterassistierte Chirurgie der lateralen Schädelbasis
mittels ultraschallgestützter Navigation“**

U. W. Geisthoff, P. A. Federspil, P. K. Klinkert
Klinik und Poliklinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde, Universitätsklinikum des Saarlandes,
Homburg, Deutschland
E-Mail: hnougei@uniklinik-saarland.de

S. H. Tretbar
Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik, St. Ingbert, Deutschland

Band: „Tagungsband, Automed 2004“
Editors: W. I. Steudel
ISBN: 3-00-013509-X
Pages: 25-26

Roboterassistierte Chirurgie der lateralen Schädelbasis mittels ultraschallgestützter Navigation

U. W. GEISTHOFF¹, P. A. FEDERSPIL¹, S. H. TRETBAR², P. K. PLINKERT¹

¹Klinik und Poliklinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde, Universitätsklinikum des Saarlandes, Kirrberger Straße, 66421 Homburg/Saar

²Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik, Ensheimer Straße 48, 66386 St. Ingbert

E-Mail: hnougei@uniklinik-saarland.de

EINLEITUNG

Die Chirurgie der lateralen Schädelbasis verlangt aufgrund der sensiblen Strukturen, wie Innenohr und Nervus facialis, eine sehr hohe Präzision. Der in unserem Konzept verwendete Roboter (Stäubli RX130) arbeitet zwar nur mit einem geringen Fehler, jedoch wäre die Gesamtgenauigkeit des Systems bei alleiniger Verwendung einer klassischen, CT-basierten Navigation zu hoch. Unser Ansatz beinhaltet daher mehrere Sensorsysteme, von denen das Kernstück eine Ultraschallnavigation ist. In einem ersten Schritt ermittelten wir hierfür die akustischen Gewebeparameter der Schädelkalotte. Auf der Basis dieser Daten wählten wir in einem zweiten Schritt Ultraschallfrequenz und Signalverarbeitungsmechanismus.

MATERIALIEN UND METHODEN

Die akustischen Gewebeparameter von 24 formalinfixierten humanen Schädelkalotten wurden an einem Transmissionsmessplatz im Wassertank bestimmt. Eingesetzt wurden Enelement-Ultraschalltransducer (Fa. Panametrics) der Mittenfrequenzen 1, 2,25, 5 und 7,5 MHz im Focusabstand und ein Sendempfangs-Modul II des Fraunhofer IBMT mit frei einstellbarer Sendefrequenz (0,5 - 40 MHz), einem integrierten Waveformgenerator (D/A-Wandler 12 Bit / 100 MHz) zur Erzeugung von frei programmierbaren Sendeformen (Sendespannung 0 - 160 Vpp, Last 50 Ohm). Der Empfänger dieses Moduls verfügt über eine analoge Bandbreite von 10 kHz - 40 MHz, einen Dynamikbereich von bis zu 80 dB. Die empfangenen Signale wurden mit 12 Bit Auflösung und einer Samplerate von 100 MHz digitalisiert. Die Proben bestanden aus quadratischen, relativ planen Stücken der Regio temporalis mit einer Kantenlänge von 5 cm. Die Dichte dieser Proben war in einem Pycnometer vom Typ AccuPyc 1330 der Firma Micro-metrics, die Dicke mit einer Bügelmessschraube (Genauigkeit 0,01 mm) bestimmt worden. Die folgenden, weiteren Gewebeparameter wurden an o. g. Messplatz bestimmt: Schallgeschwindigkeit (c_p [m/s]), akustische Impedanz (Z_p [Mrayl]), Absorptions- (A [Np]), Transmissions- (T) und Reflexionskoeffizient (R) nach den folgenden Formeln:

$$c_p = d \cdot c_w / (d + (t_2 - t_1) \cdot c_w) \quad (1)$$

$$R = (Z_2 \cos \alpha - Z_1 \cos \beta) / (Z_2 \cos \alpha + Z_1 \cos \beta) \quad (2)$$

$$T = 2Z_2 \cos \alpha / (Z_2 \cos \alpha + Z_1 \cos \beta) \quad (3)$$

$$A(f) = \ln(p(f)/p_0(f)) / -d \quad (4)$$

$$Z_p = c_p \rho \quad (5)$$

(c_w = Schallgeschwindigkeit in Wasser / m/s; d = Probendicke / m; t_1 = Laufzeit bei Leermessung (nur Wasser) / s; t_2 = Laufzeit mit Probe / s; Z_1 = relative akustische Impedanz erstes Medium / MRayl, Z_2 entsprechend bei zweitem Medium, α = Auftreffwinkel der Schallwelle auf die Grenzfläche, β = Brechungswinkel der Schallwelle, ρ = Probedichte / Kg/m³; f = Frequenz / Hz; p_0 = empfangene Schalldruckamplitude / Pa; p = abgegebene Schalldruckamplitude / Pa).

Mit der im ersten Teil bestimmten mittleren Schallgeschwindigkeit der Proben (c_{pm}) wurde an einem Reflexionsmessplatz an 16 Proben an je drei Stellen im Folgenden anhand der Zeitdifferenz von Ein- und Austrittsecho (Δt) die Dicke der Proben (d) berechnet ($d = c_{pm} \Delta t / 2$) und mit der mittels Bügelmessschraube gemessenen verglichen. Hierzu wurde ein 2,25 MHz Schallkopf (Fa. Ultran) mit einem Aperturdurchmesser von 6,35 mm im Fokusbereich eingesetzt. Sein Schallfeld wurde im Wassertank mittels Hydrophon wie folgt bestimmt: Nahfeldlänge 13 mm, Mittenfrequenz 2,16 MHz, Fokusbereich (3 dB) 43 mm, Fokusbreite (3 dB) 3 mm. Die Messungen wurden sowohl im Wasserbad als auch mit einem flexiblen Polyurethan-Vorlauf (Dicke 13 mm entsprechend der Nahfeldlänge) durchgeführt. Neben der klassischen Puls-Echo-Methode (Burst, 2,25 MHz) wurde dabei ein aus "coded excitation" und "matched filter" bestehendes Signalverfahren eingesetzt. Die maximal erreichbare axiale Auflösung (aR) ist abhängig von der Samplerate des A/D-Wandlers (SR). Bei $SR = 100$ MHz und der in obigen Experimenten ermittelten c_{pm} ergibt sich eine maximal erreichbare axiale Auflösung (aR) von 0,26 mm ($aR = c_{pm} SR$). Als Signal wurde ein Chirp der Pulsdauer $T = 2 \mu s$, Frequenzbereich $B = 1 - 4$ MHz eingesetzt. Für linear frequenzmodulierte Signale ergibt sich ein Amplitudengewinn in Höhe der Quadratwurzel des Produktes aus Pulsdauer und Bandbreite des modellierten Frequenzbereiches [Pollakowski 1993]. Bei Einsatz des Chirps und der Autokorrelation ist dieser in Höhe von 2,44 zu erwarten.

ERGEBNISSE

In Tabelle 1 sind die bestimmten Schallgeschwindigkeiten vermerkt. Die gemessenen Werte für die Einzelfre-

quenzen liegen innerhalb des Bereiches der Standardabweichung für den Gesamtwert. Sprich: Eine Frequenzabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit (Dispersion) konnte nicht festgestellt werden. Der Gesamtwert (2593 m/s) wurde für die weiteren Berechnungen als c_{pm} eingesetzt. Die anderen akustischen Gewebeeigenschaften werden in Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 1: Schallgeschwindigkeiten von 24 Kalottenpräparaten in Abhängigkeit von der Sendefrequenz. (n = Zahl der Messungen, ansonsten Abkürzungen im Methodenteil)

f / Hz	c_{pm} / m/s	SD / %	n
1	2550	6	72
2,25	2677	5	72
5	2594	5	72
7,5	2551	5	72
alle o.g. f	2593	10	288

Tab. 2: Akustische Schalleigenschaften von 24 Kalottenpräparaten (*: Streuung um den linearen Fit von 0 - 10 MHz: 43 %)

Symbol / []	Wert	SD	n
ρ / g/cm ³	1,91	0,42	24
Z_p / MRayl	4,95	0,87	288
R	0,53	0,06	288
T	0,47	0,06	288
A(f) / 1/mmMHz	0,165	*	861

Die 16 Probenstücke, an denen die sonographische Dickenbestimmung untersucht wurde, waren bei der Messung mit der Bügelmessschraube im Mittel 4,9 mm dick (2,3 - 8,4 mm). Die Abweichungen von den mechanischen Messungen finden sich in Tabelle 3.

Tab. 3: Mittlere Abweichung der sonographischen zur mechanisch bestimmten Dicke. (Je Zeile 48 Messungen, bei denen jedoch beim klass. PE-V = klassisches Puls-Echo-Verfahren(*), nur 24 aufgrund des geringen Energieeintrages vermessen werden konnten. CEMAF = coded excitation und matched filter, + V = mit Polyurethan-Vorlauf, ansonsten normal im Wasserbad)

Verfahren	Abweichung zur mechanischen Messung / mm	SD / %
klass. PE-V*	0,9	9
CEMAF-V	0,8	8
CEMAF-V + V	0,7	7

Bei Auswertung der Daten fiel bei allen drei Methoden ein Offset auf, dessen Ursache die vorher bestimmte Schallgeschwindigkeit ist. Wird aus den in Tabelle 3

genannten Werten eine neue Schallgeschwindigkeit errechnet, ergibt sich ein Wert von 2921 m/s +/- 9 %. Wenn diese dann umgekehrt wieder zur Dickenmessung eingesetzt wird, ergeben sich die in Tabelle 4 dargestellten Werte.

Tab. 4: Mittlere Abweichung der sonographischen zur mechanisch bestimmten Dicke nach retrospektiver Bestimmung der Schallgeschwindigkeit (Beseitigung des Offsets (s. a. Tab. 3 und Text))

Verfahren	Abweichung zur mechanischen Messung / mm	SD / %
klass. PE-V*	0,7	7
CEMAF-V	0,7	8
CEMAF-V + V	0,5	5

DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

In der Sonographie sind Auflösung und die dämpfungsbedingte Eindringtiefe frequenzabhängige Größen, die sich gegenläufig verhalten. Die theoretisch höchste Auflösung bei einer klassischen Puls-Echo-Messung mit einem Ultraschallsystem beträgt eine halbe Wellenlänge. Um eine ausreichende Eindringtiefe von ca. 1 cm bei einer Verstärkung von bis zu 80 dB zu erhalten, wählten wir eine Sendefrequenz von 2,25 MHz. Um die durch diese relativ niedrige Frequenz verursachten Genauigkeitsverluste zu kompensieren, setzten wir zusätzlich ein Signalverfahren mit einem kodierten Puls (coded excitation) und einem Korrelationsfilter (matched filter) ein. Zusammenfassend ermöglichte die Abstimmung der verwendeten Untersuchungstechnik auf die akustischen Besonderheiten der Schädelkalotte eine ausreichende Untersuchungsgenauigkeit für navigationsgesteuerte Eingriffe in diesem Bereich. Mit dieser Technik ist es möglich, dreidimensionale Karten zu erstellen. Unser nächstes Ziel ist die intraoperative, automatische Erstellung dieser Karten. Die gewonnenen Informationen sollen dann mit der Bahnsteuerung des Roboters zu einem Regelkreis geschaltet werden, um so im Bereich der lateralen Schädelbasis ein Fräsen unter Schonung der sensiblen Strukturen zu ermöglichen.

Förderung

Gefördert von der DFG, SPP 1124 (PL 136/5-1)

LITERATUR

[Pollakowski1993]

M. Pollakowski, "Ein Beitrag zur Anwendung der Pulskompressionstechnik in der zerstörungsfreien Materialprüfung", Shaker Verlag, Aachen, 1993