



Doctoral Thesis

Novel ultrasound read-out for a wireless implantable passive strain sensor

Author(s):

Gattiker, Felix

Publication Date:

2009

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005958183> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 18583

Novel Ultrasound Read-Out for a Wireless Implantable Passive Strain Sensor

Dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

FELIX GATTIKER

Dipl. El.-Ing. ETH

born 21.09.1972
citizen of Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. C. Hierold, examiner

Prof. Dr. E. Mazza , co-examiner

Dr. U. Sennhauser , co-examiner

Dr. J. Neuenschwander , co-examiner

2009

Abstract

In the early 20th century the first metallic bone plates and bone screws were introduced in orthopedic surgery for the fixation of long bone fractures. When such an implant is loaded, dedicated in-vivo measuring techniques may be required in order to determine, for instance, strains or forces in the device. The measured information can be used to optimize the design of future implants, to prevent a possible overload of the implant and to assess the healing process of the fracture.

The most common in-vivo strain sensors are based on strain gauges and electromagnetic signal transmission. They contain electronic circuits, which are relatively expensive and require a special read-out unit. Therefore, a completely new strain measuring concept consisting of a *wireless implantable passive strain sensor (WIPSS)* with an *ultrasound read-out* has been developed. Currently, the WIPSS is entirely made of PMMA. However, it is even envisioned to fabricate the WIPSS from a *biodegradable material* in order to use it on an implant made of such a material as well.

The WIPSS transforms the measured strain into a varying amount of fluid inside a micro channel, whose fill level linearly depends on the strain. The micro channel has a width of 0.1 mm and is wound into a spiral with a diameter of 5 mm. The aim of this work is to find a suitable ultrasound based read-out method, which is able to determine the fill level of the micro channel through inhomogeneous, attenuating and scattering human tissue of up to 50 mm.

Under this precondition the acquired ultrasound data cannot provide the necessary lateral resolution of 0.1 mm to detect the fill level of the micro channel directly. Therefore, a novel read-out method was developed (patent application submitted). It is based on two fundamental requirements, which state: a) The quantity resulting from the areal integration of the C-scan of the micro channel linearly depends on the fill level. b) The measurement is independent of the acoustic parameters of the materials covering the WIPSS, if it is calibrated with the echo signal from a reference reflector inside the WIPSS.

We derived an analytical model, which describes the entire transmit-receive process of an ultrasound transducer performing the read-out. It accounts for various system parameters, such as transducer aperture (single element or phased array), excitation function, F-number, electronic noise, shape of the micro channel, fill level, insonification angle, attenuation and dispersion. Therefore, the model is a valuable

Abstract

tool to investigate the influence of such parameters on the read-out accuracy and to further optimize the strain measuring system.

By using this model, the validity of the proposed read-out method was analytically proven and it was shown that the measured fill level is independent of the material covering the WIPSS and the lateral resolution of the ultrasound imaging system. Moreover, read-out simulations were performed for a 5 MHz single element and a 6 MHz phased array transducer. For both transducers it was demonstrated that the read-out is applicable for tissue of up to 50 mm in thickness and for insonification angles ranging from 0° to 4° . In addition, the read-out was shown to be insensitive to broadband noise as long as the noise level is smaller than -40 dB. With regard to the read-out accuracy, these investigations showed that the fill level can be determined with maximum and mean errors typically smaller than 10 % and 5 %, respectively.

The simulations were complemented by the respective in-vitro ultrasound measurements, which were conducted by means of the immersion technique. For this purpose a setup consisting of a mechanical ultrasound scanner, a control software and a tank filled with demineralized water was built. Additionally, homogeneous tissue mimicking materials (TMM), which simulate up to 50 mm of fat and 30 mm of muscle tissue, were manufactured and placed between the transducer and the micro channel. By working with the same transducers and conditions as for the simulations, the measurements turned out to be in excellent agreement with the previously predicted results and likewise the fill level could be determined with almost the same accuracy as with the model.

In order to provide more realistic conditions, the TMMs were replaced by six different pieces of pork, which had thicknesses between 10 mm and 30 mm. The fat inclusions (inhomogeneities) in the meat caused lateral and temporal distortions of the 3D ultrasound data. By using advanced signal processing algorithms, the negative influence of these distortions on the read-out accuracy was partially compensated, whereas the overall maximum read-out error could be reduced from almost 40 % to less than 20 % and the mean error decreased from 5.8 % to 3.6 %.

The presented strain monitoring concept consisting of a strain sensor made of PMMA and an ultrasound read-out method is the first of its kind and was demonstrated to be a promising new alternative to systems based on electronic sensors and RF signal transmission. Moreover, since the read-out works with phased array ultrasound technology, it can be performed with a commercial medical ultrasound scanner, which has to be upgraded with the corresponding software. This integration in existing hardware will help to promote the acceptance of the new system in medical applications.

Zusammenfassung

Im frühen zwanzigsten Jahrhundert wurden in der orthopädischen Chirurgie die ersten metallischen Platten und Schrauben zur Stabilisierung von Knochenfrakturen eingeführt. Stehen solche Implantate unter Belastung, werden spezielle in-vivo Messmethoden benötigt, um zum Beispiel Deformationen oder Kräfte in den Implantaten zu messen. Die Messdaten können dann dazu verwendet werden, zukünftige Implantate zu optimieren, mögliche Überbelastungen vorzubeugen und den Heilungsprozess der Fraktur zu verfolgen.

Die gängigsten in-vivo Dehnungssensoren basieren auf Dehnungsmessstreifen und elektromagnetischer Signalübertragung. Sie enthalten elektronische Schaltkreise, welche verhältnismässig teuer sind und ausserdem ein spezielles Auslesegerät erfordern. Aus diesen Gründen wurde ein komplett neues Dehnungsmesskonzept entwickelt, welches aus einem drahtlosen, implantierbaren, passiven Dehnungssensor (WIPSS) mit Ultraschallauslesung besteht. Derzeit ist der WIPSS vollständig aus PMMA hergestellt. Es ist jedoch auch vorgesehen, den WIPSS aus einem biodegradierbaren Material zu fertigen, damit er an einem Implantat eingesetzt werden kann, welches ebenfalls aus einem derartigen Material besteht.

Der WIPSS besitzt als Anzeigeelement einen Mikrokanal, der mit einer Flüssigkeit gefüllt ist, deren Menge linear von der Deformation abhängt. Der Mikrokanal hat eine Breite von 0.1 mm und er ist zu einer Spirale gewickelt, deren Durchmesser 5 mm beträgt. Das Ziel der Arbeit ist es, ein ultraschallbasiertes Ausleseverfahren zu entwickeln, welches in der Lage ist, den Füllgrad des Mikrokanals zu bestimmen. Das Verfahren soll selbst dann noch funktionieren, wenn der WIPSS mit bis zu 50 mm inhomogenem, schallschwächendem und streuendem Gewebe überdeckt ist.

Unter diesen Voraussetzungen können Ultraschalldaten die notwendige laterale Auflösung von 0.1 mm nicht mehr bieten. Diese wäre jedoch nötig, um den Füllgrad des Mikrokanals direkt bestimmen zu können. Daher wurde ein neues Ausleseverfahren entwickelt (Patentanmeldung eingereicht), welches auf zwei fundamentalen Voraussetzungen basiert, die besagen: a) Die örtliche Integration des C-Scans des Mikrokanals ergibt eine Grösse, welche linear vom Füllpegel abhängt. b) Die Messung des Füllpegels ist unabhängig von den akustischen Eigenschaften des Materials, welches den WIPSS überdeckt, sofern die Messung mittels der Signale eines Referenzreflektors, der sich innerhalb des WIPSS befindet, kalibriert wird.

Zusammenfassung

Es wurde ein analytisches Modell entwickelt, das den gesamten Sende- und Empfangsprozess des Transducers beschreibt, der das Auslesen ausführt. Das Modell berücksichtigt verschieden Systemparameter, wie die Apertur, die Anregungsfunktion, die F-Nummer, elektronisches Rauschen, die Form des Mikrokanals, den Füllgrad, den Einschallwinkel sowie die Schallschwächung und Dispersion. Das Modell ist daher ein wertvolles Werkzeug, mit dessen Hilfe sich der Einfluss dieser Parameter auf die Auslesegenauigkeit bestimmen lässt und das Dehnungsmesssystem weiter optimiert werden kann.

Die Gültigkeit des vorgeschlagenen Ausleseverfahrens wurde mit dem Modell analytisch bestätigt und es zeigte sich, dass das Auslesen unabhängig ist von der lateralen Auflösung des bildgebenden Ultraschallsystems und vom Material, welches den WIPSS überdeckt. Des Weiteren wurden numerische Simulationen des Ausleseverfahrens für einen 5 MHz Einelement und einen 6 MHz Phased Array Transducer durchgeführt. In beiden Fällen konnte gezeigt werden, dass das Verfahren für bis zu 50 mm dickes Gewebe und für Einschallwinkel im Bereich von 0° bis 4° anwendbar ist. Ausserdem erwies es sich als unempfindlich auf breitbandiges Rauschen, solange dieses kleiner ist als -40 dB. Bezüglich der Auslesegenauigkeit ergaben die Untersuchungen, dass der Füllpegel mit einem maximalen und mittleren Fehler von weniger als 10 % beziehungsweise 5 % bestimmt werden kann.

Die Simulationen wurden mit entsprechenden in-vitro Experimenten ergänzt, welche mittels Tauchtechnik durchgeführt wurden. Zu diesem Zweck wurde eine Einrichtung bestehend aus einem Ultraschallscanner, einer Kontrollsoftware und einem Wassertank gefüllt mit demineralisiertem Wasser aufgebaut. Zusätzlich wurden homogene gewebeimitierende Materialien (TMM) hergestellt. Diese konnten zwischen dem Transducer und dem Mikrokanal platziert werden und simulierten den Einfluss von bis zu 50 mm Fett und 30 mm Muskelgewebe. Die Messungen wurden mit den gleichen Transducern und unter identischen Bedingungen, wie bei den Simulationen durchgeführt. Sie ergaben eine exzellente Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen, wobei der Füllpegel mit beinahe derselben Genauigkeit ermittelt werden konnte.

Um realistischere Bedingungen zu schaffen, wurden die TMMs durch sechs verschiedene Stücke Schweinefleisch ersetzt, deren Dicken sich im Bereich zwischen etwa 10 mm und 30 mm bewegten. Die Fetteinschlüsse (Inhomogenitäten) im Fleisch verursachten laterale und zeitliche Deformationen der 3D Ultraschalldaten. Mittels fortgeschrittener Signalverarbeitungstechniken konnte der negative Einfluss dieser Deformationen auf die Auslesegenauigkeit teilweise kompensiert werden. Dabei reduzierte sich der maximale Auslesefehler von beinahe 40 % auf weniger als 20 % und der mittlere Fehler nahm von 5.8 % auf 3.6 % ab.

Das präsentierte Dehnungsmesskonzept bestehend aus einem aus PMMA gefertigten Dehnungssensor und einer Ultraschallauslesemethode ist das erste dieser Art. Es wurde demonstriert, dass das Konzept eine vielversprechende Alternative ist zu den bestehenden elektrischen Sensoren mit RF Datenübertragung. Da das Ausleseverfahren mit Phased Array Technologie arbeitet, kann es mit kommerziellen medizinischen Ultraschallscannern durchgeführt werden, welche über die nötigen Softwaremodifikationen verfügen. Diese Integration in bestehende Hardware hilft die Akzeptanz des neuen Systems für medizinische Anwendungen zu verbessern.