

Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnis in photoakustischer Bildgebung

Maxim N. Cherkashin

Zusammenfassung

Photoakustische Bildgebung ist ein vielversprechendes Abbildungsverfahren, das in den letzten Jahren großes wissenschaftliches sowie klinisches Interesse erhalten hat. Das Verfahren profitiert davon, dass es die besten Eigenschaften rein optischer und rein ultraschallbasierter Bildgebungsmethoden vereint.

Das Abbildungsverfahren basiert auf der Ultraschallwellenerzeugung durch thermoelastische Ausdehnung. Im Gewebe verteilte innere Strukturen erzeugen durch optische Anregung Ultraschallwellen und können so entdeckt, lokalisiert und visualisiert werden. Dadurch wird die hohe Selektivität, Geschwindigkeit und Spezifität von optischen Methoden mit der hohen Auflösung und erreichbaren Bildgebungstiefe von Ultraschallbildgebung kombiniert.

Einer der möglichen Wege, die photoakustische Bildgebung reif für die klinische Anwendung zu machen, basiert auf der Verwendung von Halbleiterdiodenlasern als optische Quellen. Halbleiterdiodenlaser ermöglichen kostengünstige, kompakte und gut integrierte Aufbauten, die aber insbesondere in Tomographieanwendungen unter geringem Signal-Rausch-Verhältnis leiden.

Um dies zu verändern, wurden verschiedene Möglichkeiten zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnis in der photoakustischen Bildgebung im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

Einer der möglichen Wege, das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern, ist die Wechselwirkung der einzelnen Elemente der Signalerzeugungskette auszunutzen. Da die in der photoakustische Tomographie typischerweise verwendenden Ultraschallwandler im Bereich einiger Megahertz arbeiten, lässt sich die höhere Pulswiederholrate von Halbleiterdiodenlasern an den Wandler anpassen. Dadurch kann der Wandler mit einem resonanten photoakustischen Pulszug angesteuert werden. Es wird in der Arbeit gezeigt, welche Effekte diese angepasste Anregung auf die Signalstärke hat, inwiefern sie das Signal-Rausch-Verhältnis verbessern kann, und welche Nachteile dabei auftreten. Insbesondere wird gezeigt, dass die Wandler-angepasste Anregung mit photoakustischen Pulszügen in einigen Fällen zu höherem Signal-Rausch-Verhältnis als eine Ensemble-Mittellung führen kann, dass diese beiden Methoden kombiniert werden können, und in Kombination einen zusätzlichen Gewinn im Signal-Rausch-Verhältnis liefern.

Der zweite und vielversprechendere untersuchte Weg zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnis basiert auf den akustischen und optischen Eigenschaften des Gewebes. Da die photoakustischen Bildgebungssysteme gleichzeitig eine Ultraschall- und eine gepulste Lichtquelle beinhalten, und der Lichtpuls und die Ultraschallwellen durch das dasselbe Volumen des Gewebes propagieren, wurde hierfür die Licht-Ultraschall Interaktion näher betrachtet. Insbesondere wird gezeigt, dass eine laufende, quer zum Licht propagierende Ultraschallwelle zu Brechungsindexveränderungen führt, die ihrerseits die Lichtpulspropagation wesentlich beeinflussen kann. Dies gilt in klaren und streuenden Medien und in Phantomen, deren Streuungseigenschaften denen von Gewebe nahe kommen.

Diese Arbeit zeigt erstmals, dass durch quer laufende Ultraschallwellen dynamische Brechungsindexstrukturen und sich bewegende optische Wellenleiter und Wellenleitergitter geformt werden, dass diese Strukturen das gepulste synchronisierte Licht fokussieren und leiten, und dass solche Ultraschall-erzeugte Wellenleitung bis in die Tiefe von einigen Zentimeter in Phantomen mit gewebeähnlichen Streuungseigenschaften stattfindet.

Für Ultraschall-erzeugte Wellenleitung wurde eine entsprechende Erhöhung der Lichtintensität tief im streuende Phantom gezeigt. Diese Erhöhung würde zu einer größeren Stärke des photoakustischen Signals führen, und dadurch auch zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnis. Zusätzlich würden Bildauflösung und Eindringtiefe verbessert, und allgemein eine bessere Kontrolle der Lichtfortpflanzung in klaren und streuenden Medien erzielt.