

ファイバー型光周波数コムを用いた超音波センサーの開発

Development of ultrasonic sensor using fiber-based optical-frequency-comb cavity

徳島大¹, JST-ERATO 美濃島知的光シンセサイザプロジェクト², 電通大³, 佐賀大⁴
 ○増岡孝¹, 小倉隆志¹, 南川丈夫^{1,2}, 中嶋善晶^{2,3}, 山岡禎久⁴, 美濃島薫^{2,3}, 安井武史^{1,2}

Tokushima Univ.¹, JST, ERATO IOS², Univ. Electro. Commun.³, Saga Univ.⁴

T. Masuoka¹, T. Ogura², T. Minamikawa^{1,2}, Y. Nakajima^{2,3}, Y. Yamaoka⁴, K. Minoshima^{2,3}, and T. Yasui^{1,2}

E-mail: masuoka@femto.me.tokushima-u.ac.jp

http://femto.me.tokushima-u.ac.jp/

生物・医学の分野に置いて細胞や組織の深部の情報を得るためにこれまでに光学的手法や超音波を用いたイメージングが進められてきた。光学的手法では、分子選択性や高空間分解能を持つなどの特徴を持つが、光散乱の影響のため生体深部の情報を得ることが難しい。一方で、超音波を用いたイメージングでは、生体深部の情報を得ることが出来るが、空間分解能に制限が伴った。そこで近年、超音波と光のハイブリッドなイメージング手法として、光超音波イメージングが注目されている[1]。光超音波イメージングとは、光吸収体に対して、レーザーを照射した際に生じる弾性波を超音波検出器によって検出・イメージングを行う手法である。しかし現在、光超音波の検出に用いる電氣的超音波トランスデューサーの感度により、生体深部からの信号に対する感度が制限されていた。

近年、電氣的超音波トランスデューサーによる制限を回避する手法として、光学的超音波センサーが注目されている。干渉計測[2]、表面共鳴プラズモン[3]、マイクロリング共振器[4]などの光学的アプローチを用いることにより、ノイズ軽減や高速化に向けた試みがなされている。しかし、これらの計測ではいずれも光信号の強度情報というアナログ量を計測しているため、その高精度化や広ダイナミックレンジ化に限界があった。そこで、光強度よりも高精度かつ広ダイナミックレンジで計測可能な別の物理量を介して、光超音波を計測できれば、更なる高感度化が可能になり、生体深部の信号に対する感度が向上する。

そこで、本研究では光周波数コム (OFC、Optical frequency comb) を用いたセンサーに注目した[5]。OFC は、超短パルスレーザーの周波数領域において等間隔に配置された多数の光学モードを有するスペクトル構造を示す。OFC のスペクトル間隔は、超短パルスレーザーの時間領域における繰り返し周波数と正確に一致する。このパルスの繰り返し周波数は、レーザー共振器の光路長によって正確に決定される。即ち、レーザー共振器の一部をセンサーとして用いれば、OFC のスペクトル間隔あるいは繰り返し周波数として読み出す OFC センシングコムとして利用できる。

本報告では、ファイバー型 OFC センシングコムを用いて、超音波計測を試みた。光ファイバーコム共振器に超音波 (ひずみ) が与えられると、光学的共振器長が伸縮し、光コム間隔という RF 周波数信号として、光超音波を計測出来る。このようなアプローチを用いることで、光超音波を高感度・高精度・高速に取得することが可能になると期待される。

図 1 に実験装置を示す。リング型モード同期 Er ファイバーレーザー共振器を構築し、非線形偏波回転によりモード同期動作を得た ($\lambda_c=1550$ nm, $f_{rep}=26$ MHz)。レーザー出力を光検出器 (InGaAs-PD) で検出し、 f_{rep} 周波数安定化制御系と超音波計測系に分岐させる。 f_{rep} 周波数安定化制御系では、測定信号と基準信号 (周波数= f_{ref}) をミキシングし、その誤差信号に基づいて、共振器長の PID 制御が行われる。ペルチェ素子が温調によるゆっくりとした低速粗調を行う一方で、ピエゾ素子が中速微調 (周波数帯域<50Hz) を行うことにより、 f_{rep} が基準信号に位相同期される。ファイバー共振器の一部をセンシング部として、超音波トランスデューサーからの超音波 (周波数= f_s) と相互作用させると、

ファイバー共振器に微小ひずみが生じる。その結果、 f_{rep} に変調 (強度変調もしくは位相変調) がかかり、 $f_{rep} \pm f_s$ の周波数にサイドバンドが発生する (図 2)。 f_{rep} 周波数安定化制御系では、制御帯域制限のため、 $f_{rep} \pm f_s$ の信号を補正できない。したがって、超音波計測系において、このサイドバンド信号と f_{ref} ($=f_{rep}$) をミキシングすることで、 f_s の超音波信号が抽出される。

図 3 は、6 MHz~12 MHz までの超音波信号に対する測定 SN 比を示しており、十分な測定 SN 比 (40~60dB) を得ることに成功した。本研究は、JST-ERATO 美濃島知的光シンセサイザプロジェクトの助成を受けて行われました。

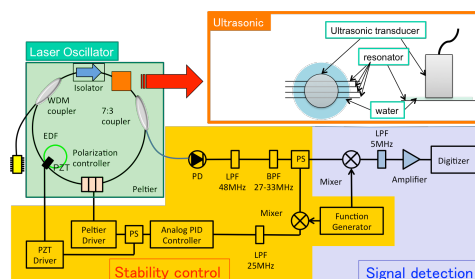


Fig. 1 Experimental setup

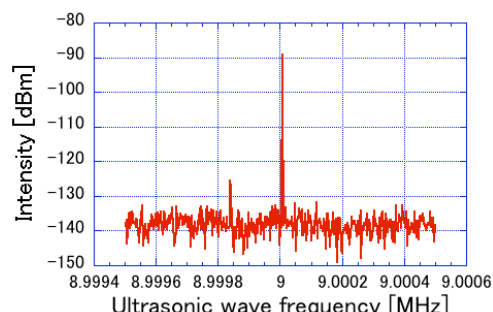


Fig. 2 Experimental result of 9MHz ultrasonic sensing.

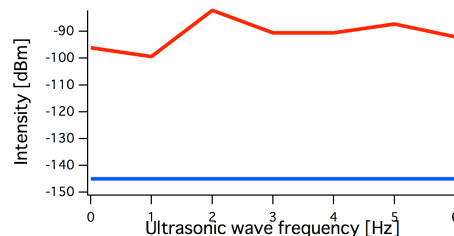


Fig. 3 Experimental result of 6MHz-12MHz ultrasonic sensing.

- 1) L. V. Wang et al., *Science* **335**, 1458-1462 (2012).
- 2) G. Rousseau et al., *J. Biomed Opt* **17**, 061217 (2012).
- 3) J. Boneberg et al., *Appl. Phys. A* **69**, 557-560 (1999).
- 4) H. Li et al., *Scientific Reports* **4**, 4496 (2014).
- 5) T.minamikawa, et al., (submitted)