



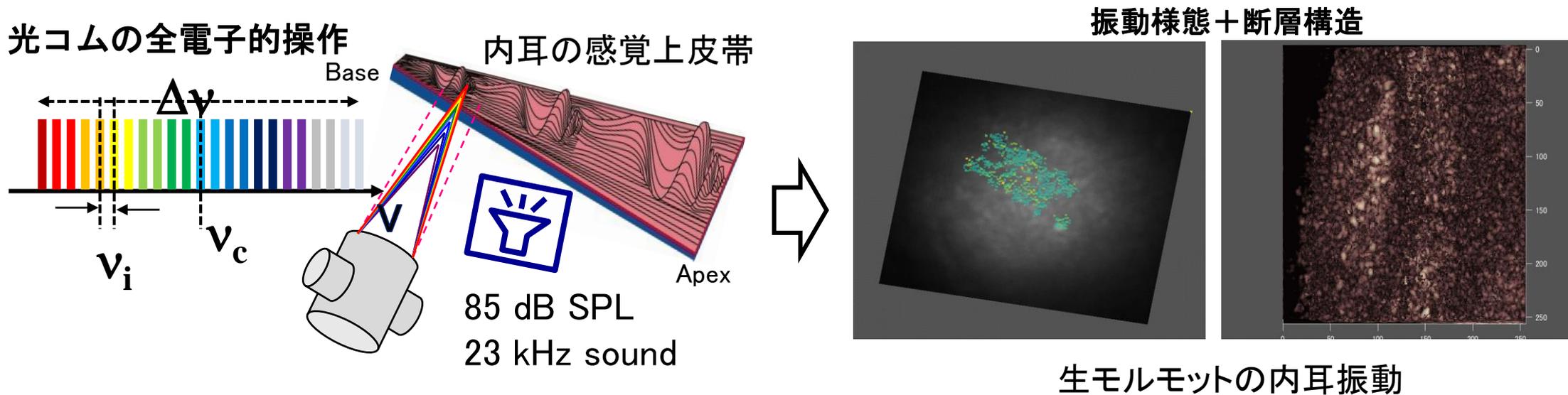
生体からインフラ分野まで応用できる 非接触・形状・断層・振動計測技術

新潟大学・工学部 工学科
電子情報通信プログラム
准教授 崔 森悦

令和2年12月17日

研究背景

「振動」と「断層」をリアルタイム同時に計測する光学装置



より高速な動き

1 ~ 10 MHz帯のサンプリング
時間分解能：< 1ms 以下

より小さい動き

変位計測制度：サブnm~pm

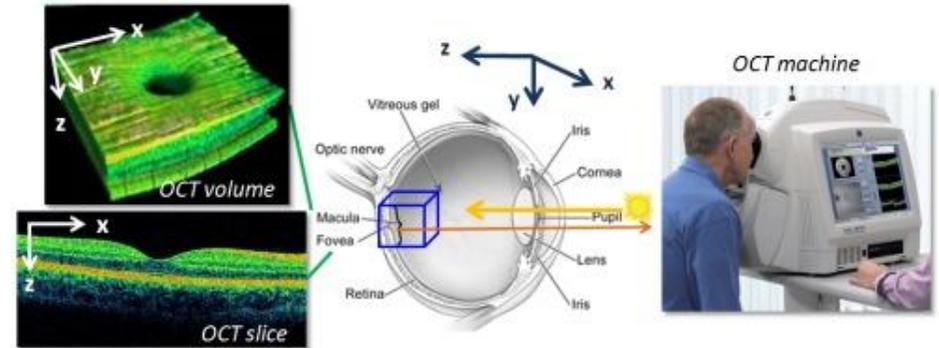
過渡現象計測

周期信号の計測から
過渡的な動きのリアルタイム計測

幅広い分野で利用できる「光エコー」の開発

従来技術とその問題点

既に実用化されている技術には、
Optical coherence tomography (OCT)
等がある



<http://www.baysteyecare.com/optical-coherence-tomography-oct/>

SD-OCT (Spectral domain optical coherence tomography)



センサー撮像速度
が律速

SS-OCT (Swept source optical coherence tomography)



波長掃引速度
が律速

従来技術とその問題点

既に実用化されている**Optical coherence tomography (OCT)**

SD-OCTは、センサーのフレームレートの制限、

SS-OCTは、光源掃引時間の制限によって、

→ **高速化の課題**があり、眼科でのイメージングに特化

→ **速い振動や高速なリアルタイム計測**

ハイスループット計測には向かない。

従来技術との比較

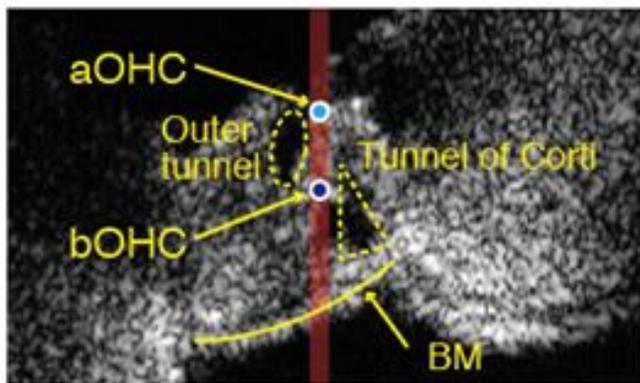
	SD-OCT	SS-OCT	本手法
方式	スペクトラル干渉	波長走査干渉	光コム干渉
検出器	1次元ラインセンサー	フォトダイオード	フォトダイオード
Scan方法	ワンショット	波長可変レーザ	周波数間隔掃引
A-scanレート	100 ~200 kHz	1 MHz (FDML)	1~10 MHz*
振動の検出限界**	50 kHz程度まで	500 kHzまで	0.5 ~ 5 MHz
OCT分解能***	1~10 μm	1~10 μm	50 μm

全電子的でリアルタイムな
高速変位計測+断層可視化

- * RFシグナルジェネレータの周波数掃引時間の性能によって決まる
- ** 振動周波数の検出限界は、A-scanレートの半分の値とした。
- *** OCT分解能は、光源の帯域によって決まる。

従来技術との比較

- 従来はスキャンレートの制限のため、100kHz以上の振動計測は困難
 - スキャンレートが**10 MHz**まで性能が向上できたため、リアルタイムな振動を断層と共に計測することが可能に。**(原理上5MHzまで計測可能)**
 - 従来のOCTではフーリエ変換処理(FFT)が必要なため、
 - 測定範囲や測定解像度を変更できな
 - 信号処理に負担がかかる。
- 本技術はFFTの必要がなく直接検出信号から高速処理できる。**



SD-OCTで計測した生体
(モルモットの内耳感覚上皮帯)
(本研究グループ撮像)

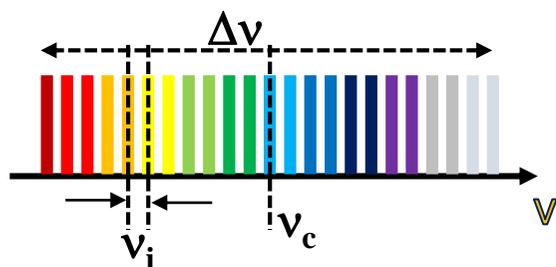
軸方向の測定範囲と解像度:
イメージセンサー、ハードウェアで固定
振動計測の限界:
イメージセンサ撮像速度 < 100kHz

**本手法は、柔軟に変更可能。
最高10Mscan/s達成!**

新技術の特長

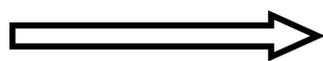
技術的な特長

光コム周波数間隔を掃引
→ 全電子的なので高速化が容易

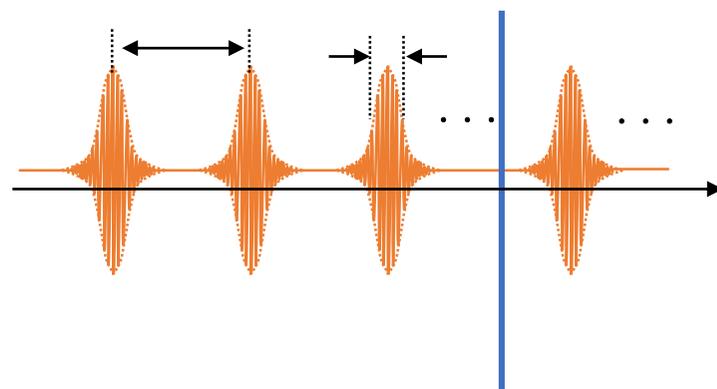


周波数間隔: v_i
中心周波数: v_c
周波数帯域: Δv

ウィナーキンチンの定理

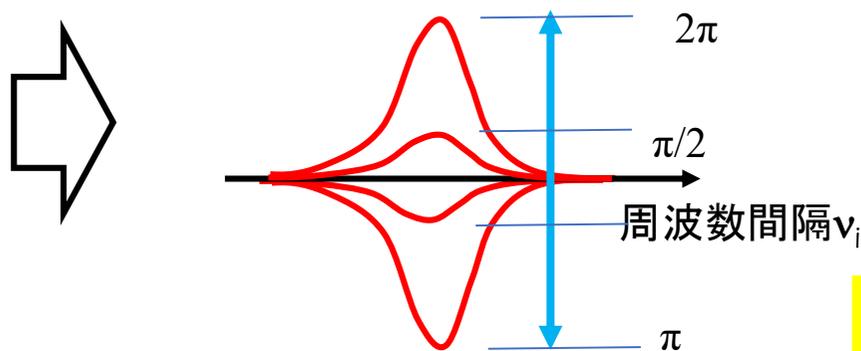


周波数間隔が変化すると、
高次干渉ピークの位置が変化する[1]



光路差を固定できる
周波数間隔を掃引

干渉ピークの包絡線が検出[2]



位相に応じてピーク振幅が変化!

ピーク位置から μm 帯の反射位置を計測

ピーク振幅から nm 帯の微小変位を計測

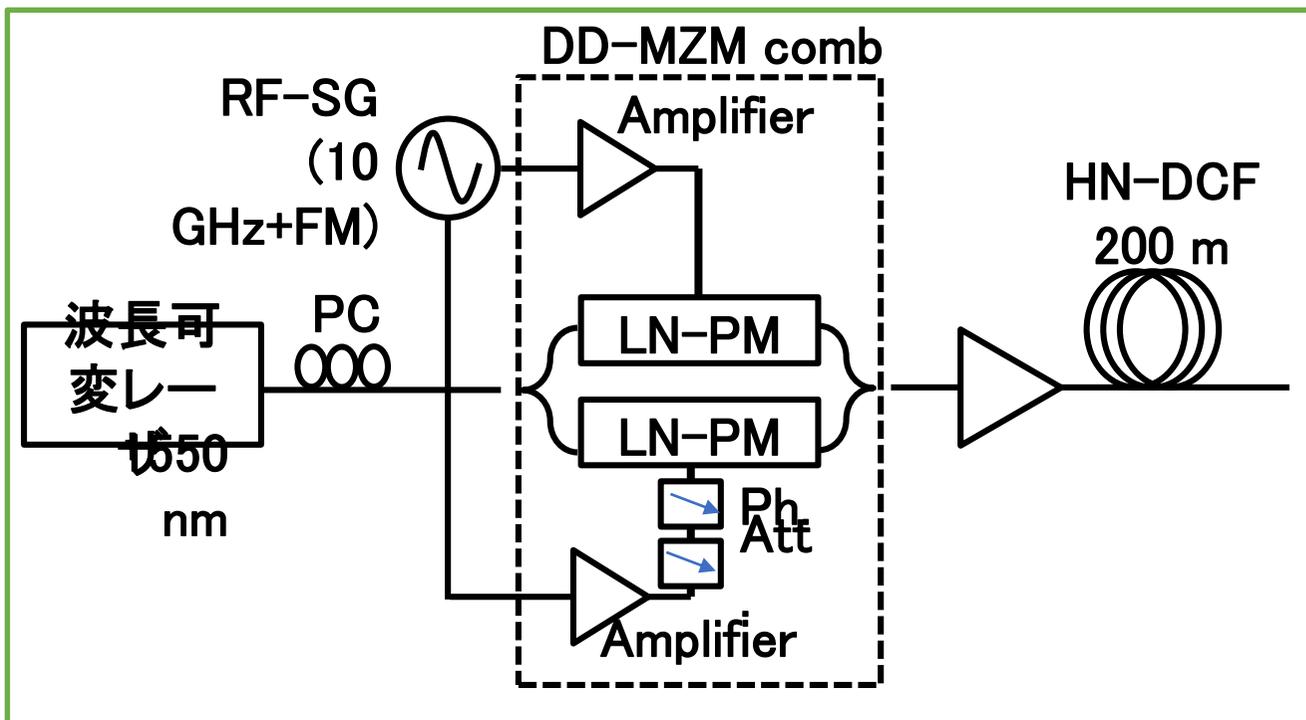
ピーク包絡線が検出されるので信号の測定点を節約できる

[1] Choi S, Yamamoto M, Moteki D, Shioda T, Tanaka Y, Kurokawa T. *Opt Lett*. 2006;31(13):1976-1978.

[2] S Choi, K Kasiwagi, Y Kasuya, S Kojima, T Shioda, and T Kurokawa, *Opt. Express* 20, 27820-27829 (2012)

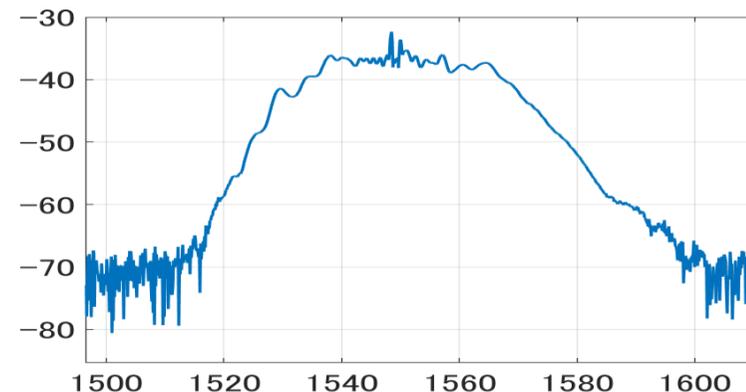
検証実験

10 GHz広帯域コム光源(DD-MZM)

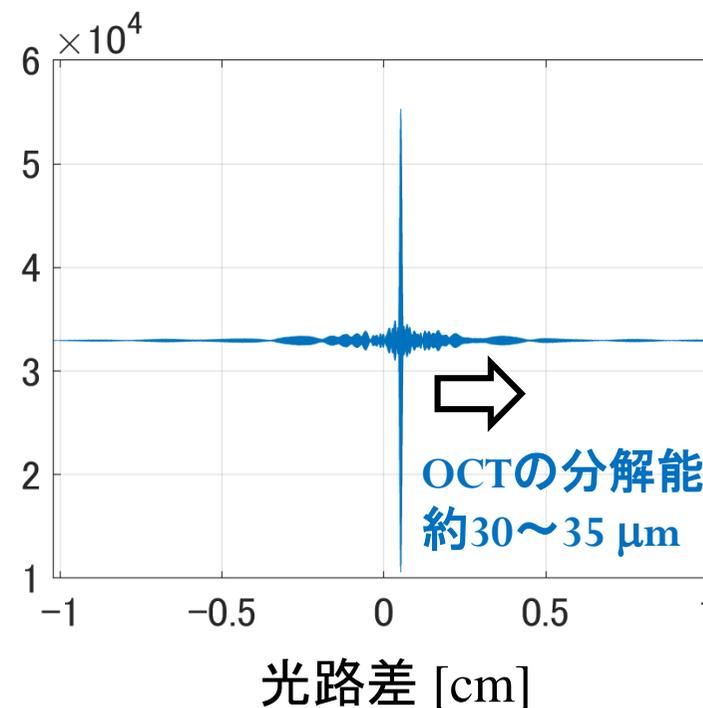


RF-SG: Radio frequency signal generator
 DD-MZM: Dual-drive Mach-Zehnder modulator
 LN-PM: Lithium niobate phase modulator
 HP-EDFA: High-power Erbium doped fiber amplifier
 HN-DCF: High nonlinear dispersion compensated fiber
 Ph.: Phase controller
 Att.: Attenuator

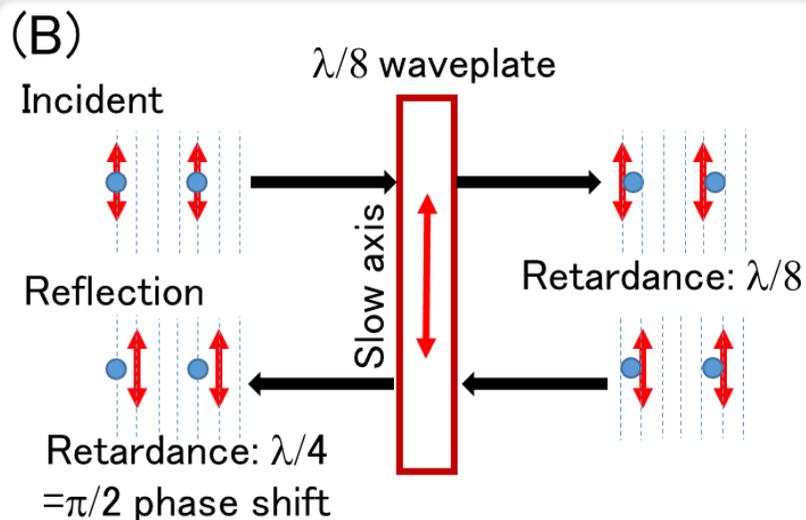
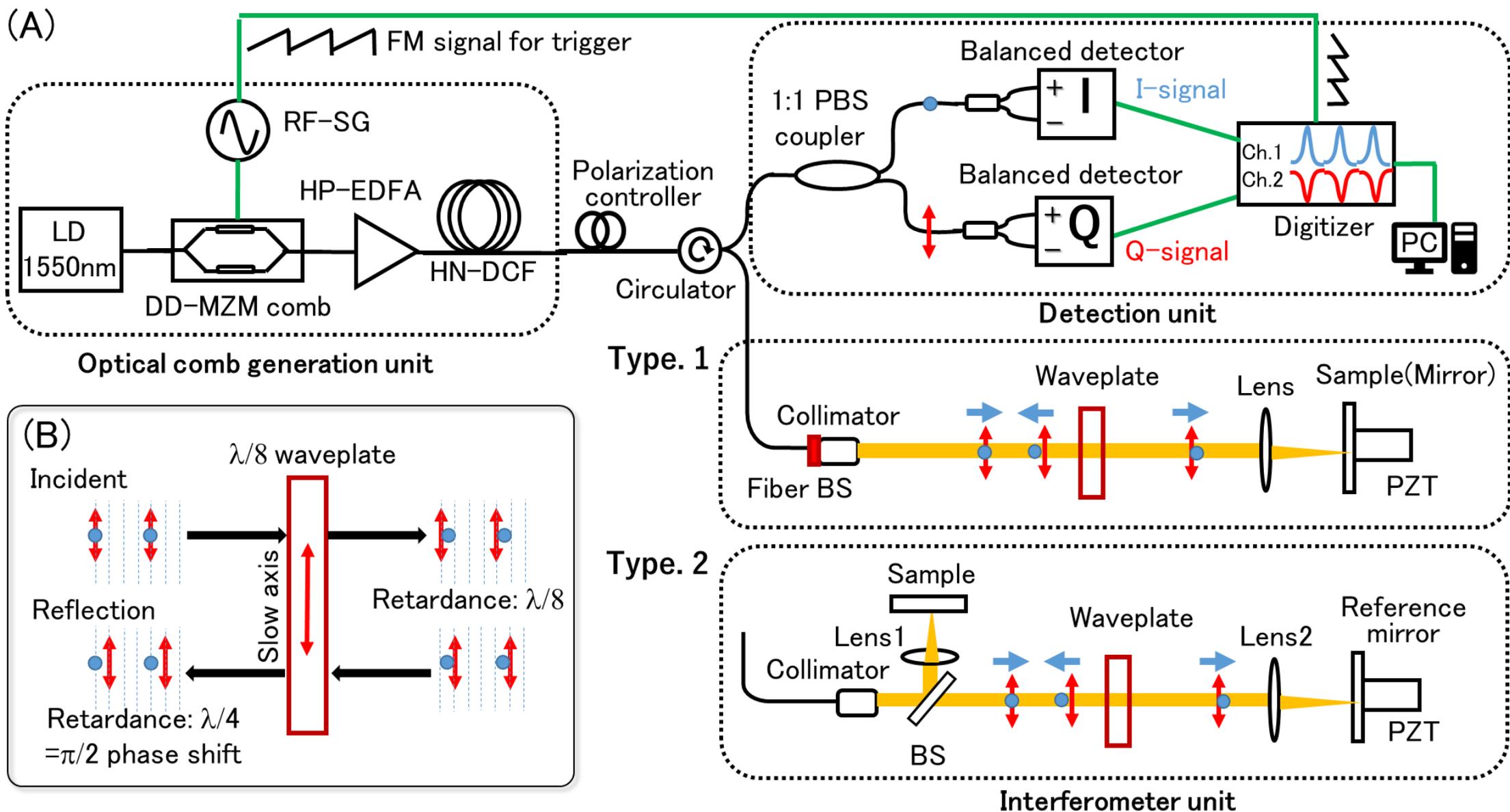
10 GHz 広帯域コムのスペクトル



コヒーレンス関数(z軸方向のPSF)



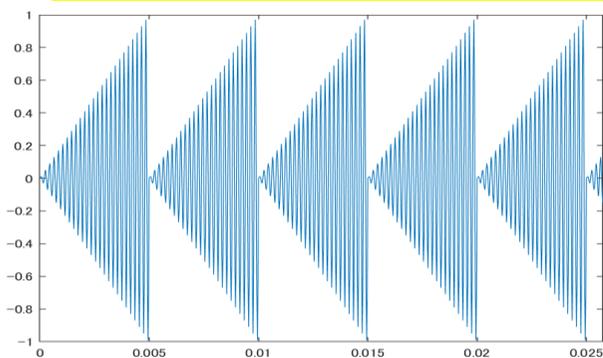
検証実験



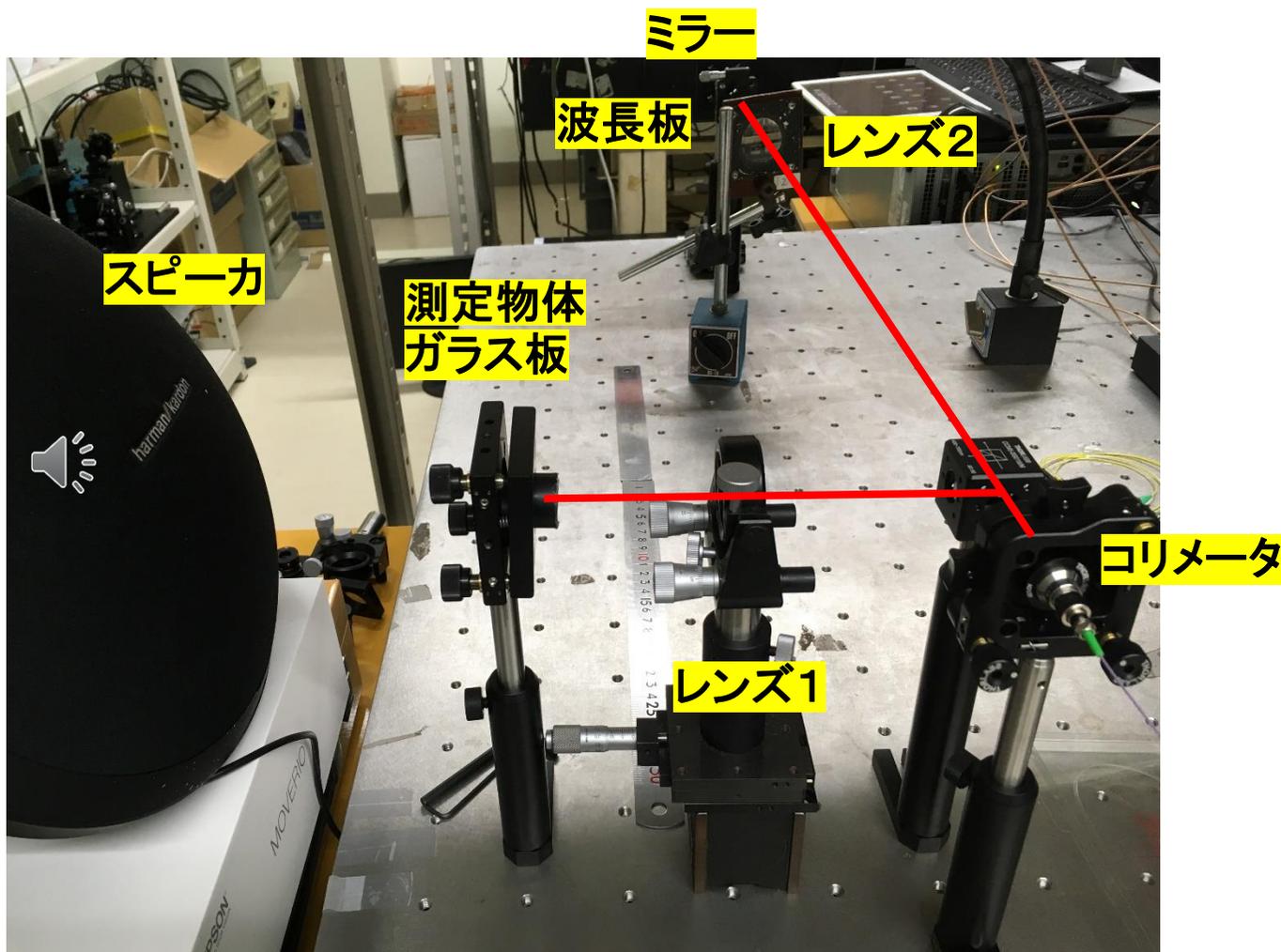
検証実験

音波によって振動する厚さ $120\mu\text{m}$ ガラス板の計測 (Scan rate: 1MHz)

スピーカに入力した音波信号

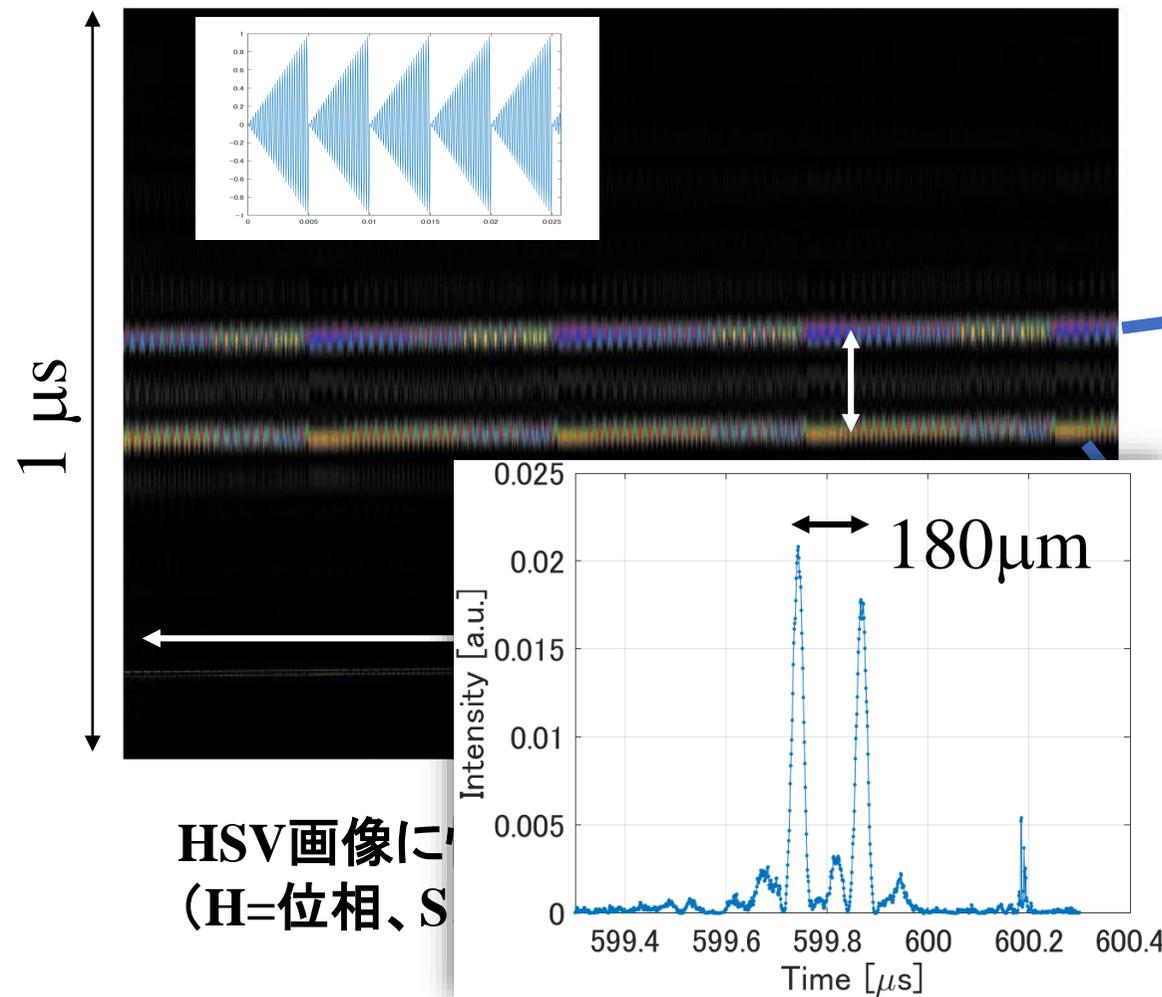


5kHzの正弦波を200Hzの三角波で振幅変調した信号

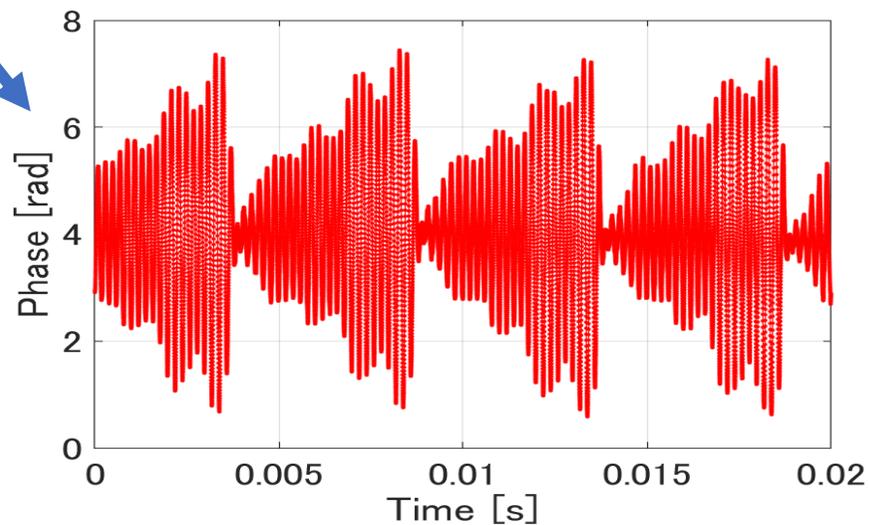
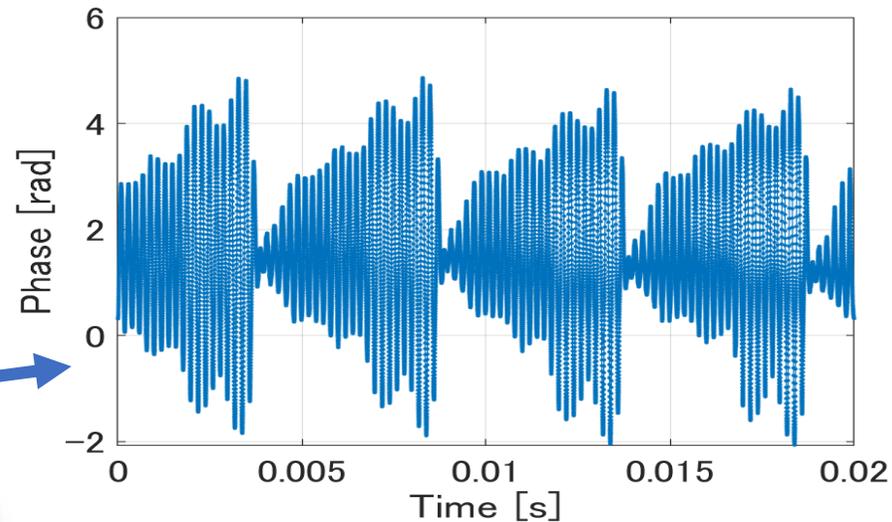


検証実験

Intensity-Phase synthesized image



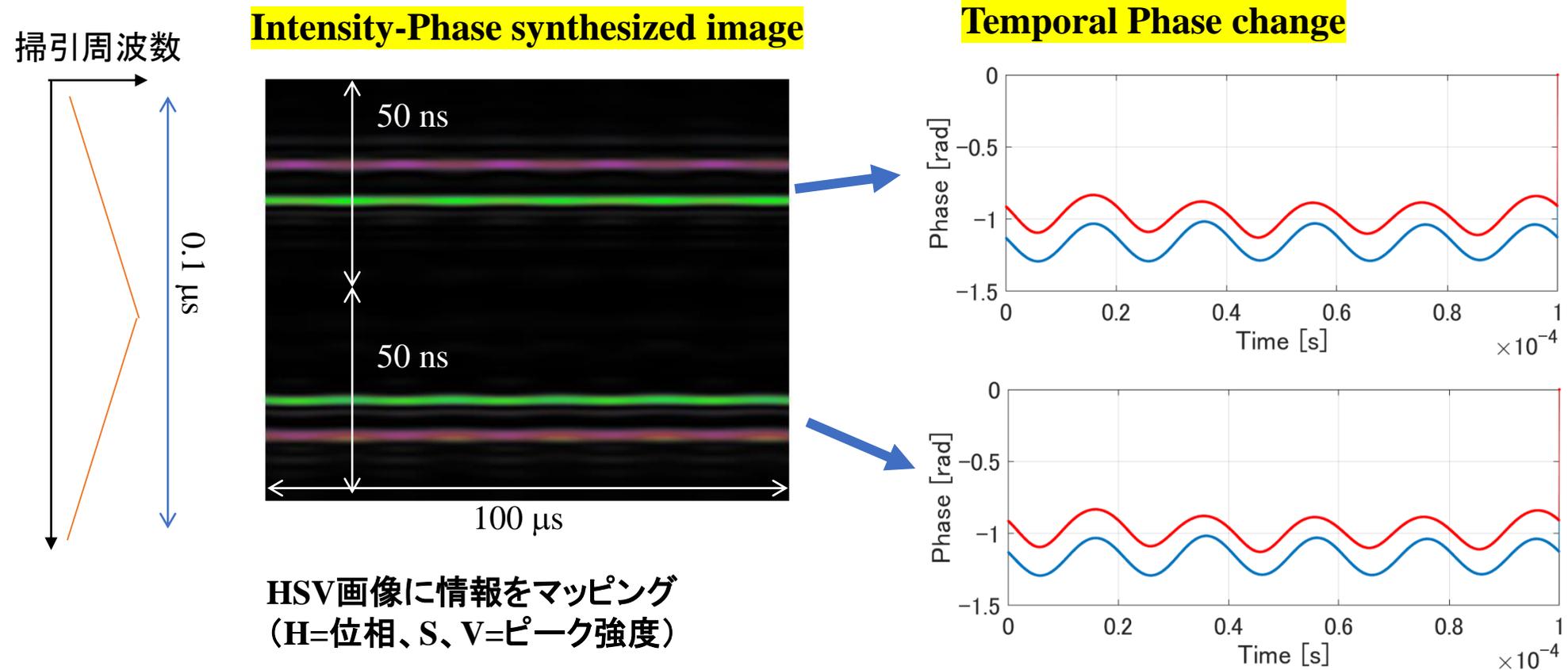
リアルタイムの過渡的位相変化を直接検出



ガラス断層像と微小振動を同時に計測できた。

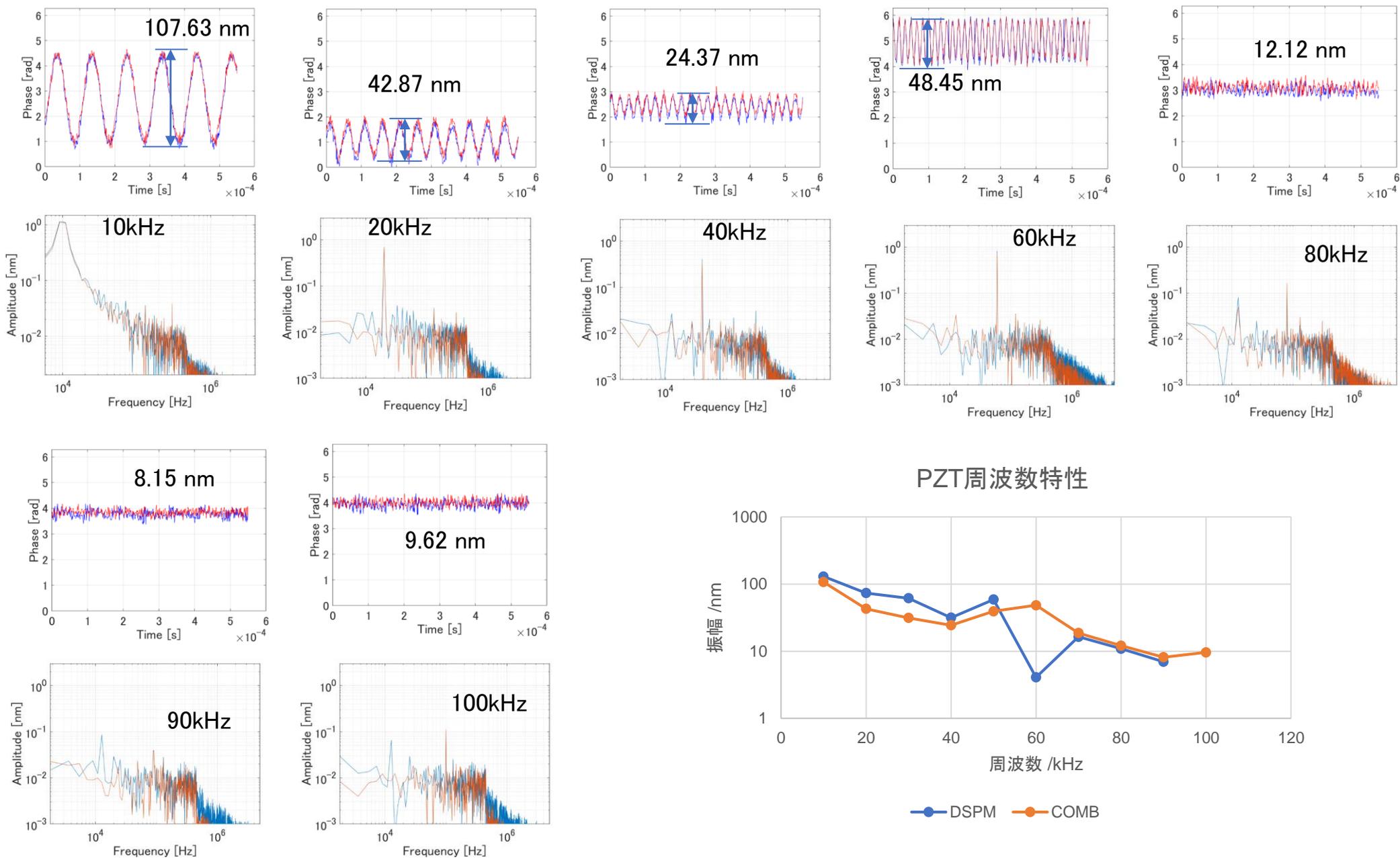
検証実験

50 kHz純音によって振動する厚さ120 μm ガラス板の計測 (Scan rate: 10MHz)



検証実験

10-100 kHzで振動するPZT素子表面の計測例 (Scan rate: 10MHz)



想定される用途①

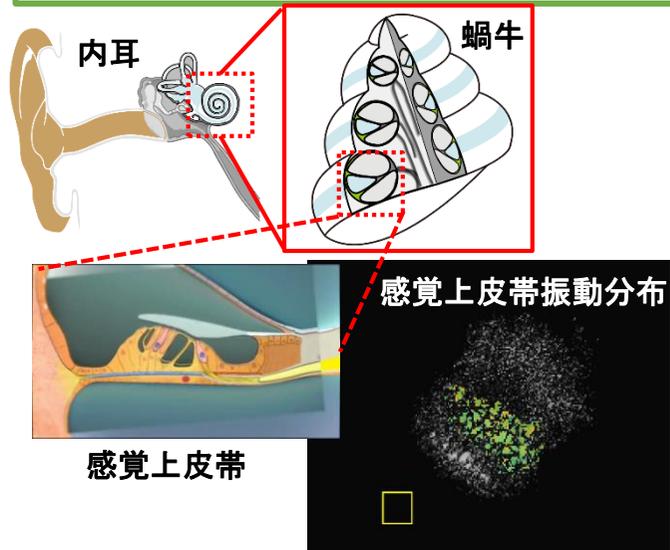
生体内のナノ振動 医療応用研究

骨伝導



1. <http://www.cosmogear.co.jp/boneconduct/>
2. GOOSERA, B07KP3CYJX

内耳感覚上皮帯振動^[1]



S. Choi, et. al., Biomed. Opt. Express 10, pp. 3317-3342 (2019)

精子鞭毛の動き

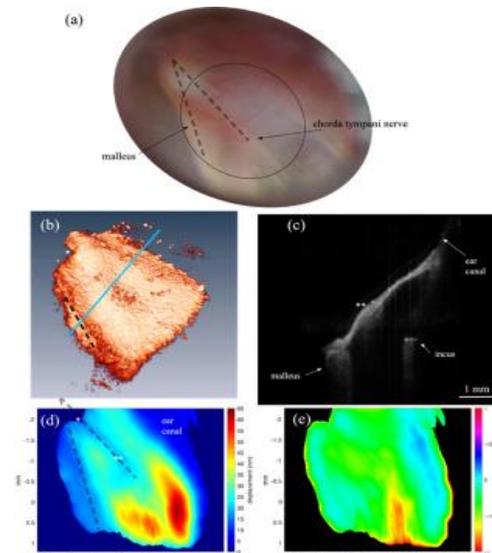
Polymaths Lab – University of Bristol



H. Gadelha, et. al., Science Advances 31 Jul 2020:Vol. 6, no. 31, eaba5168. DOI: 10.1126/sciadv.aba5168

オリンパスの顕微鏡とナックイメージテクノロジー社のハイスピードカメラを使用

鼓膜の振動



W. Kim, et. al., Biomed. Opt. Express 10, pp. 4395-4410 (2019)

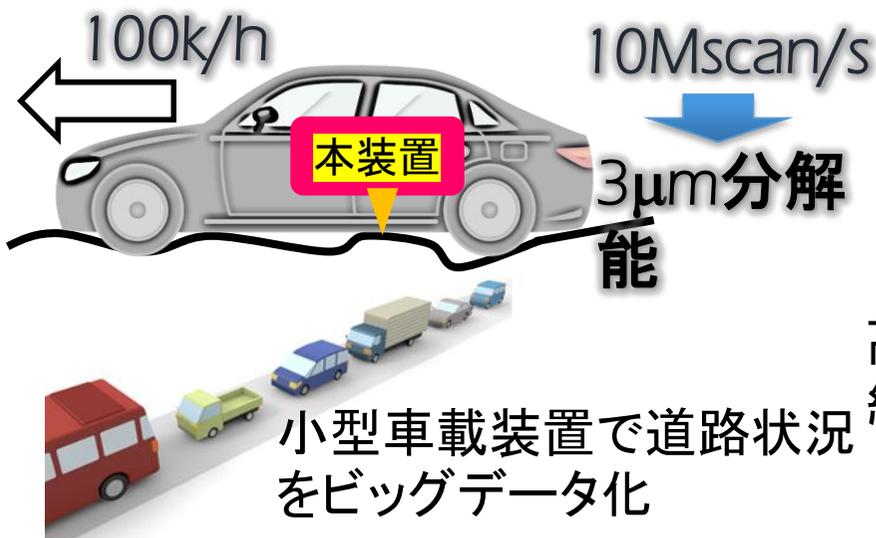
メカノバイオロジー 研究への応用

想定される用途②

高速(10Mscan/s)
インフラ検査
MEMS製品検査

高速・高精度・広範囲

道路、線路、橋梁の非破壊・
非接触ハイスループット検査



各種MEMS振動子、MEMSセンサーのテスト



形状・振動・断層
リアルタイム計測
(阪大・川野研)

透明薄膜や断層構造のMEMS振動、
微小変位を10Mscan/sの高速計測・可視化



高速移動の列車でも
線路状態をセンシング可



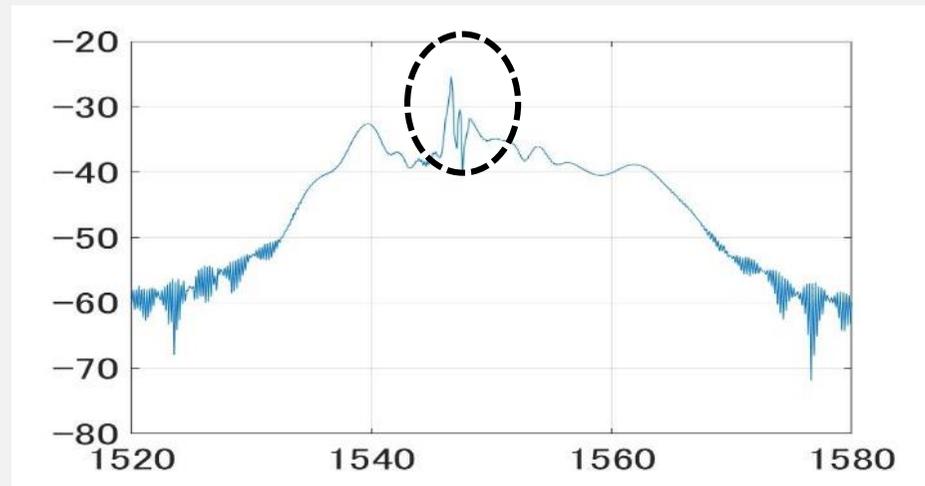
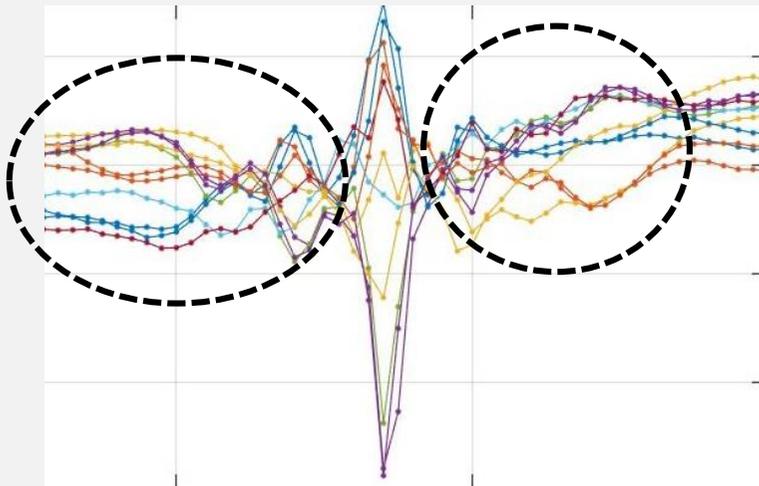
実用化に向けた課題

- 現在の開発状況
 - 測定物体の「**振動**」と「**断層**」を同時に計測する光コム干渉技術を実証
 - 周波数間隔可変、60 nm帯域の広帯域コム光を生成
 - **1~10 MHz スキャンレート, 35 μm 分解能の断層振動計測**を実証
 - 100kHz帯の振動をリアルタイムで計測できた
 - 厚さ120 μm のガラス板の断層と振動をリアルタイム計測できた
- 実用化に向けて、断層分解能を10 μm 以下に向上できるようにコムの広帯域化技術を確立する必要がある。

実用化に向けた課題

- 生体への応用では、断層分解能の向上が課題
コムの広帯域化技術を確立する必要がある。

1. 光コムの**広帯域化**と**平坦化**の達成が課題 (分解能向上、リップル除去)



解決法

- 高出力光増幅器 + 非線形分散シフトファイバの導入
- 波長フィルターによるスペクトル波形成形

実用化に向けた課題

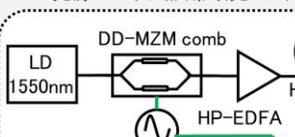
- 応用に適合したシステム構成と実装が課題
- 実用的な処理系、回路系、光学スキャン機能

2. 応用に合わせたシステムの最適化

コム光源の最適化、広帯域化

10 MHz scan rateの実現

光源ユニット(広帯域光コム)



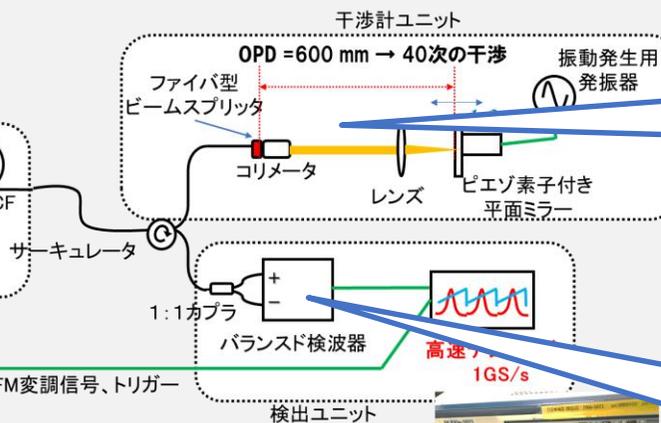
RF-SG 10 GHz±10MHz

- 変調されたRF信号を使用
- キャリア周波数10 GHz
- ±10 MHz
- 変調信号の周波数: 最高10MHz

10MHz 高速スキャン



Anritsu MG3691A



検出ユニット



Rohde&schwarz SMA100B



NI PXIe-1071, PXI-5154

実用的な光学系の実装

FPGA等
高速処理回路実装

解決法

- オプトメカニックスを駆使した「ライダー(LIDAR)」
- 高速デジタイザー、専用のFPGA、データ処理ソフト開発

企業への期待

- 未解決の高分解能化については、非線形光学技術により克服可能
- 検証実験レベルでの装置製作は可能。 実用化の装置開発は不可
(例) LIDAR技術、小型化技術、
ソフトウェアとFPGAなどの処理回路の知識とノウハウが必要
- オプトメカニクス or 処理回路実装の技術 or バイオイメージング技術を持つ、
企業との共同研究を希望。
- また、高精度LIDAR、光学式インフラ検査装置を開発中の企業、
または、OCT等の生体計測分野への展開を考えている企業には、
本技術の導入が有効と思われる。

本技術に関する知的財産権

特許出願

- 発明の名称 : 測定システムおよび測定方法
- 出願番号 : 特願2020-200889
- 出願人 : 国立大学法人新潟大学
- 発明者 : 崔森悦、任書晃、太田岳、日比野浩

産学連携の経歴

- 2014年-2015年 JSTマッチングプランナープログラム 「探索試験」
- 2015年-2016年 JST A-step事業 「探索課題」 に採択
- 2015年-2021年 AMED-CREST 採択(分担)

お問い合わせ先

新潟大学地域創生推進機構

TEL 025-262-7554

FAX 025-262-7513

e-mail; onestop@adm.niigata-u.ac.jp