

高速形状計測と振動分布計測技術の研究開発 (これまでとこれから)

森本吉春
4D センサー株式会社
代表取締役会長 CEO
(和歌山大学名誉教授)

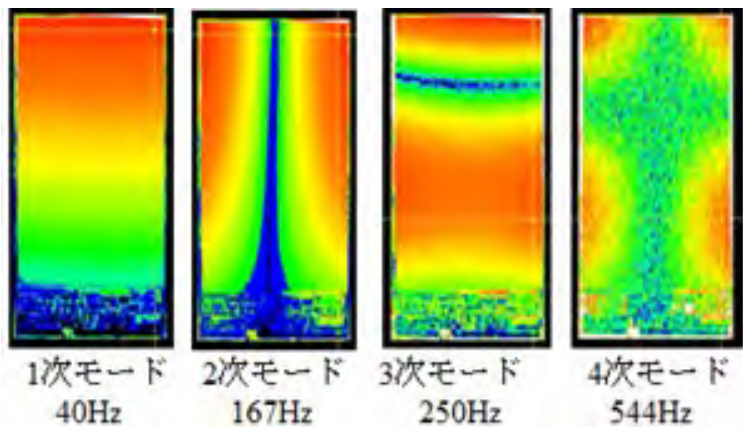
全空間画像計測コンソーシアム第 14 回セミナー
(2021 年 3 月 3 日 (水) WEB セミナー)

注：この資料は,「全空間画像計測コンソーシアム第 14 回セミナー」の資料を転載させていただきました。
ご許諾いただきました 森本様と関係者の皆様に感謝いたします。

高速形状計測と振動分布計測技術の 研究開発（これまでとこれから）



4Dセンサー(株)



片持ち平板の振動モード計測

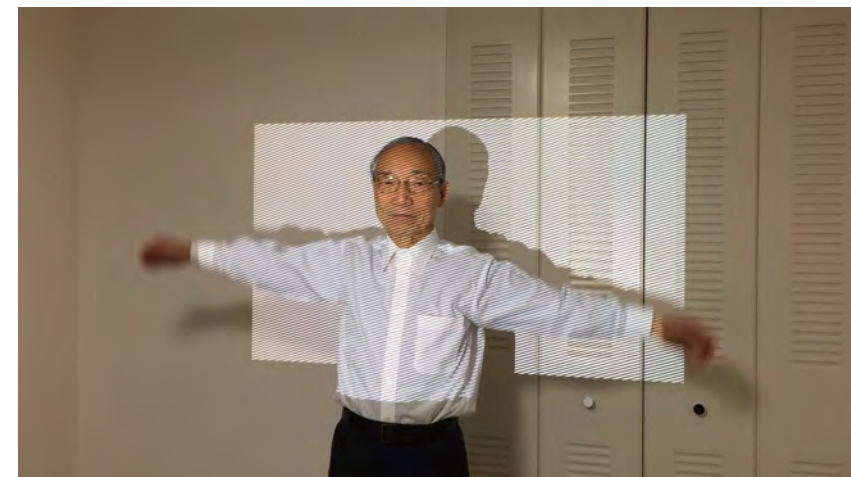
森本吉春

代表取締役会長 CEO

（和歌山大学名誉教授）

〒640-8550 和歌山市梅原579番地1
073-454-1004, 090-9993-6972(直通)

<http://www.4d-sensor.com/>
morimoto@4d-sensor.com



リアルタイム全画素モーションキャプチャ

$4D(x,y,z,t) = 3D(x,y,z) \times \text{時間軸}(t)$
高速をアピールするために4次元と命名

和歌山大学発研究開発型ものづくりベンチャー

大学の研究成果を実用化するため
(一社)モアレ研究所を設立
(2009年)



その成果を実用化する
ため株式会社を設立

- 設立年月日: 2012年2月1日
- 設立時資本金: 999万円

ベンチャーキャピタルの支援 (テック系、政府系、銀行系)

- リアルテックファンド: 東証一部ユングレナ系VC
- グローカリンク: 研究者集団リバネス系VC
- JST (科学技術振興機構): 政府より出資
- 紀陽銀行リースキャピタル: 地元銀行系VC
- 三菱UFJキャピタル: 都市銀行系VC
- JR西日本イノベーションズ: JR西日本グループ
- セイコーエプソン

資本金: 9999万円

- 高速・高精度・小型・安価な形状・変形・ひずみ・振動の計測装置の研究開発
- 和歌山大学, モアレ研究所, 4Dセンサーの特許技術の有効利用
- 開発した3Dカメラ、4Dカメラ、シャドーモアレカメラ、サンプルリングモアレカメラ、OPPA振動分布計、OPPAカメラの販売
- コンサルティングによる技術移転

3次元形状・変形・振動計測の世界拠点を目指して

- 世界最速の3Dスキャナ
- 世界一有用な振動分布計

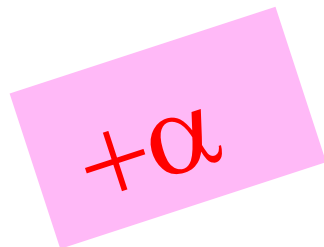
- ◆大学発研究開発型ものづくりベンチャー企業
- ◆自社及び和歌山大学の特許の利用
- ◆技術系、政府系、銀行系ベンチャーキャピタルの支援
- ◆働き方改革の導入
- ◆多くの顧客に弊社和歌山まで来ていただいている

経営の特色（新しい経営手法の導入）

- 研究開発者の大部分が外国人
- フレックスタイム
- 基本的に残業ゼロ
- 最初からプレミアムフライデーの導入
- テレワーク
- テレビ会議
- フリーアドレスオフィス
- クラウドの利用（ペーパーレス）

**オリジナリティの高い研究開発をする
新しいスタイルの会社**

メンバー(高度技術者集団)



- 自動車会社、製造業、建設会社
- 政府系研究機関、大学
- 中堅・中小企業も

◆WEB会議による打ち合わせ

◆来社による計測トライ

◆現場での計測トライ

◆カスタマイズ仕様の決定

◆コンサルティング

納入実績表

製品	顧客
4D Sensor for Factory Automation	大手製造業、大手自動車会社 、政府系研究機関
4D Sensor for Vibration	大手自動車会社、大手土木建 設会社、高速道路会社
4D Sensor for Material Test	大手建設会社、大手製造業、 大学、政府系研究機関
4D Sensor for Bridge / Tower / Infra	大手電力会社、政府系研究機 関、大手交通機関
その他	政府系研究機関、中堅・中小 企業

形状計測説明用デモ動画の例



弊社 3Dカメラの例
(この例は低速な例)

形状計測技術

- ◆ 格子投影法
- ◆ 位相解析法
- ◆ 全空間一ブル化手法

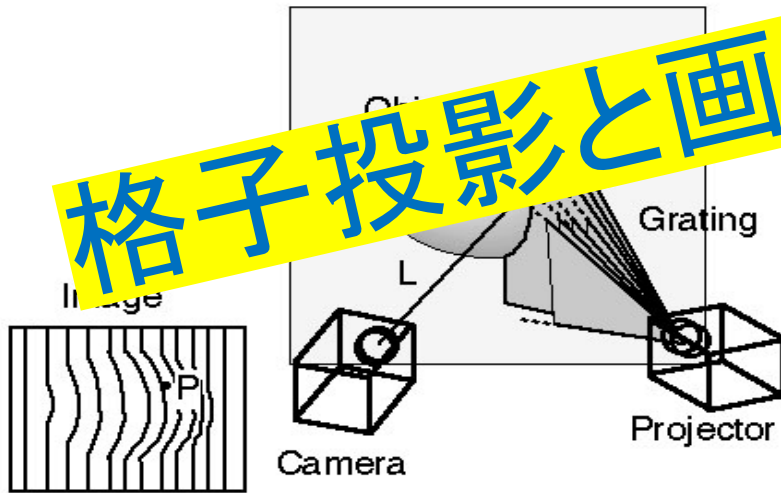
手順

1. 格子の投影
2. 位相シフト
3. 撮影
4. 位相解析
5. 3次元座標
6. 描画

格子投影法

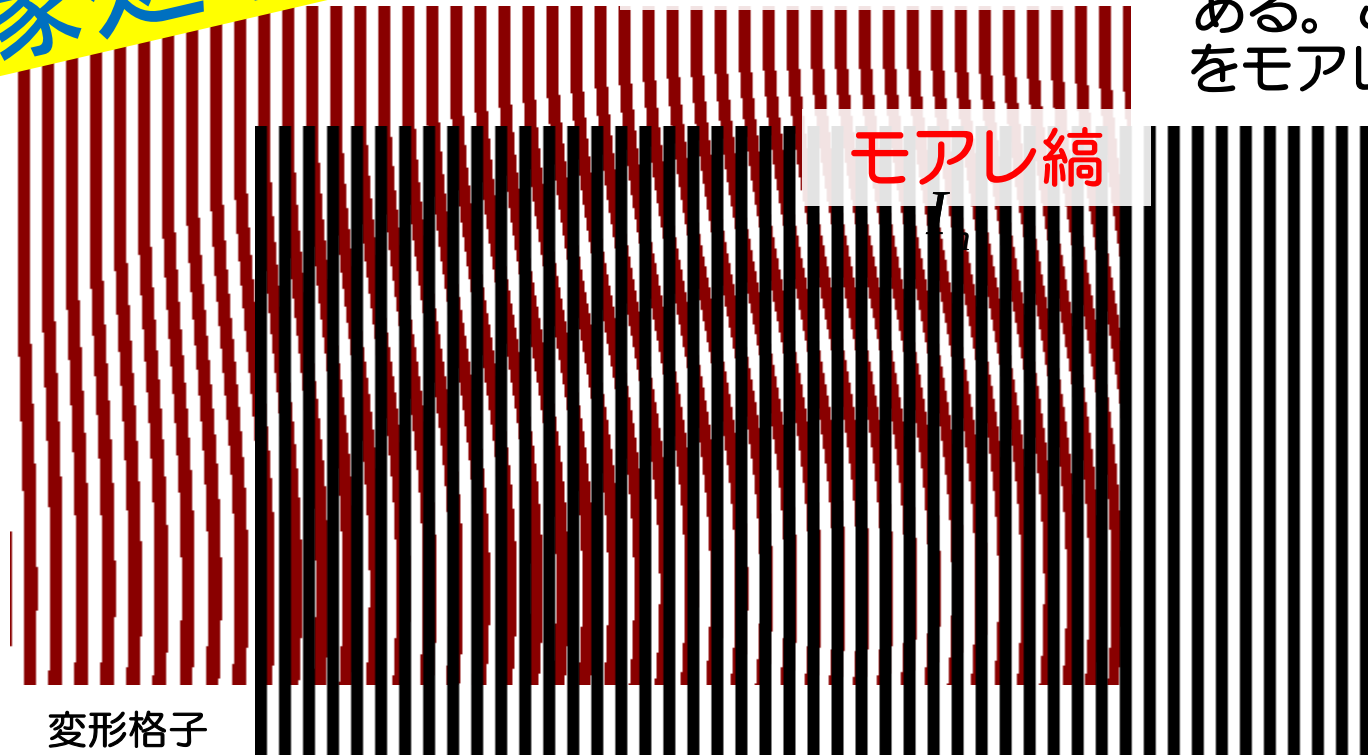
モアレ法

格子投影と画像処理により高速化



3次元物体に格子パターンを投影すると3次元形状に応じて格子線がゆがむ。

ゆがんだ格子線を解析すると形状が求められる。



モアレ縞を解析すると、形状や変形が求められる。

2つの格子を重ねると、元の格子にないパターンの縞模様が現れる事がある。この縞模様をモアレ縞という。

変形格子をテレビカメラで撮影すればカメラの画素が参照格子の働きをする。

格子や縞の位相解析

格子やモアレ縞の明るさ変化(位相)を解析

位相が高さや変形に対応

強度分布

$$I = a \cos \theta + b$$

位相シフト中の強度分布

$$I = a \cos(\theta + \alpha) + b$$

a : 振幅

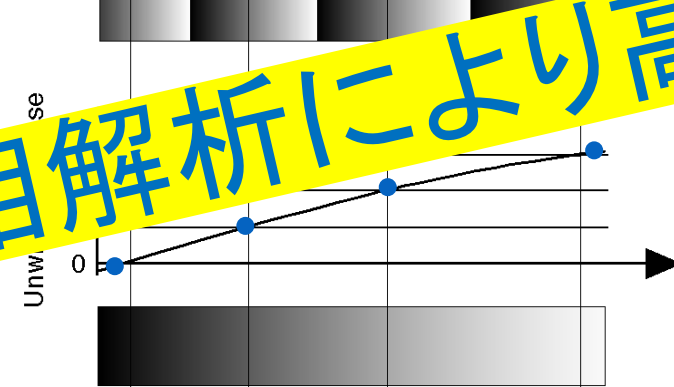
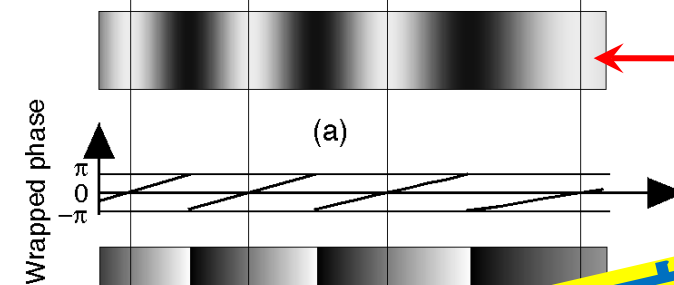
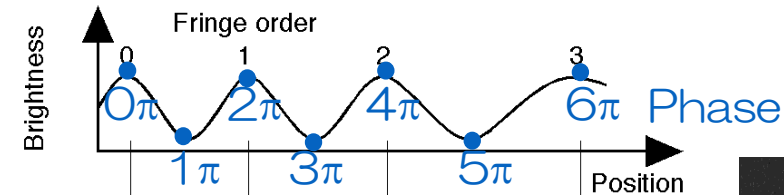
θ : 初期位相

α : 位相シフト量

b : 背景強度

- ・ 位相は1画素ごとに求められ、格子ピッチの1/100～1/1000の精度で計測可能
- ・ 位相解析により、格子ピッチの1/100～1/1000の精度で計測可能

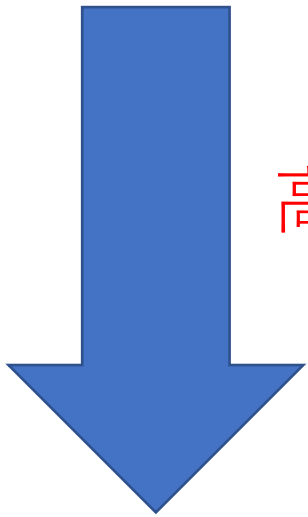
位相解析により、格子ピッチの
1/100～1/1000の精度で計測可能



強度と位相の関係

格子や縞の位相解析により高精度化

- ◆全空間テーブル化手法
- ◆光源切替位相シフト法
- ◆サンプリングモアレ法
- ◆OPPA法



高速計測技術

- 高速に形状・変形・き裂・振動を計測
- 高精度（格子ピッチの1/1000程度、精度 $2\mu\text{m}$ ）
- 高速度カメラ（300～50000fps）
- 生産ライン上の部品の検査、人体の運動計測、自動車の振動分布計測、衝突時の変形計測

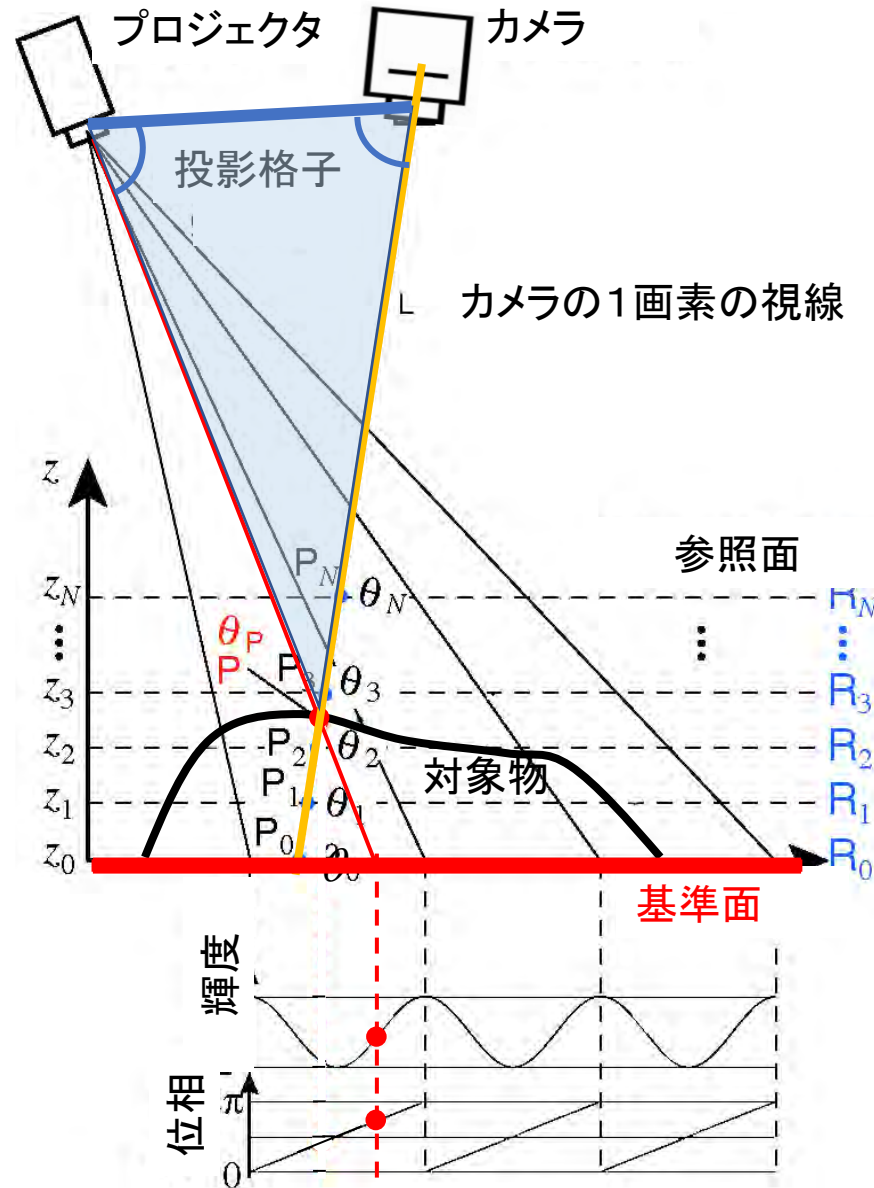
- オンライン、リアルタイム
- 動く物体の計測
- 動く物体からの計測
（ロボット、ロボットアーム）

建物や橋梁などのインフラ計測に応用

ドローン

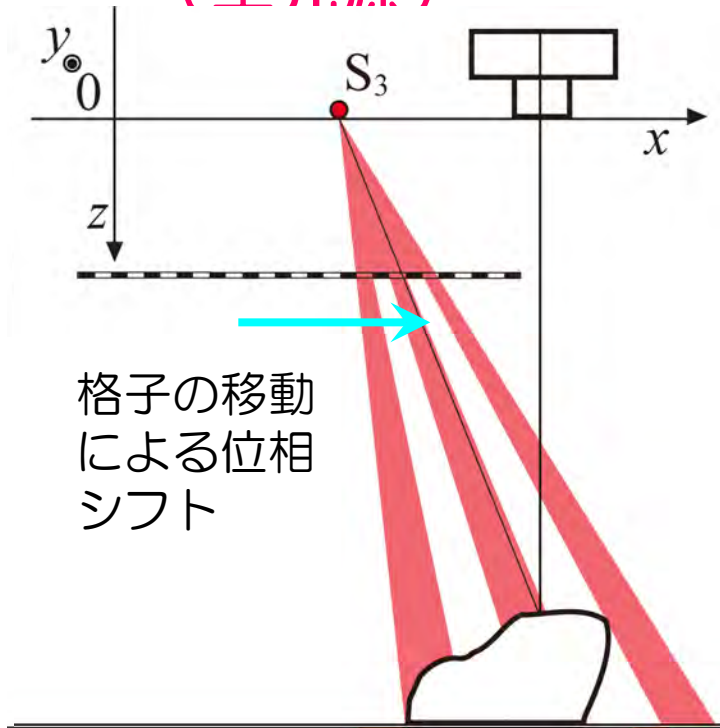
全空間テーブル化手法の原理 (和歌山大学特許)

- 三角測量の計算は時間がかかる。
- 三角測量の計算をせず、表を見るだけで座標を求める方法を提案



- 正確な座標を有する基準面をz軸に垂直に設置
- 基準面をz方向に少しずつ移動
- カメラの各画素ごとに、高さ $z_0, z_1, z_2 \dots z_N$ と位相 $\theta_0, \theta_1, \theta_2 \dots \theta_N$ の関係が得られる。
- テーブルを見れば、位相から高さzの値がすぐに求められる。(高速)
- 光学系の誤差がキャンセルされる。(高精度)

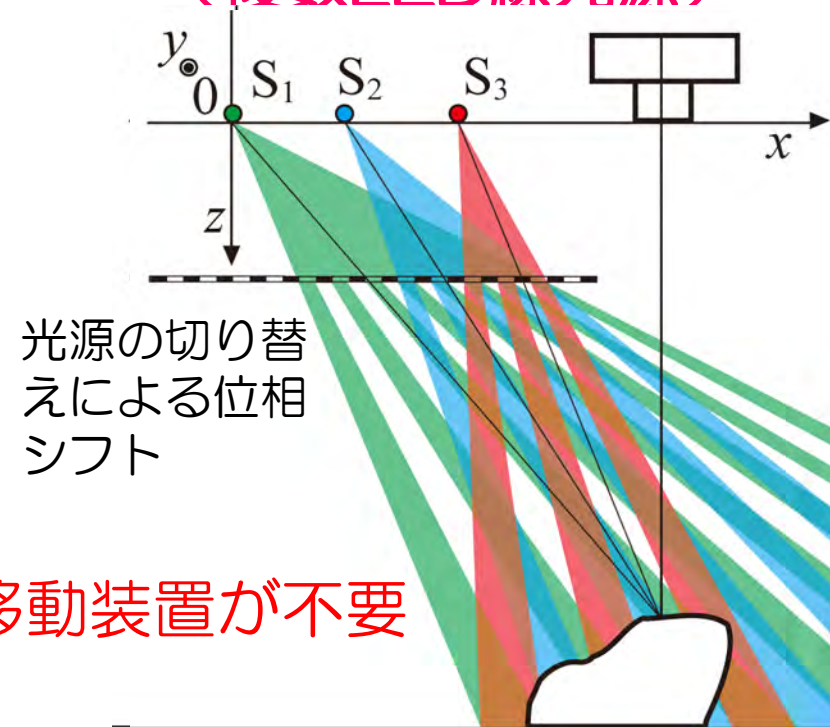
位相シフト法 (単光源)



格子の移動
による位相
シフト

高価
デリケート
超高速化不可

光源切替位相シフト (複数LED線光源)

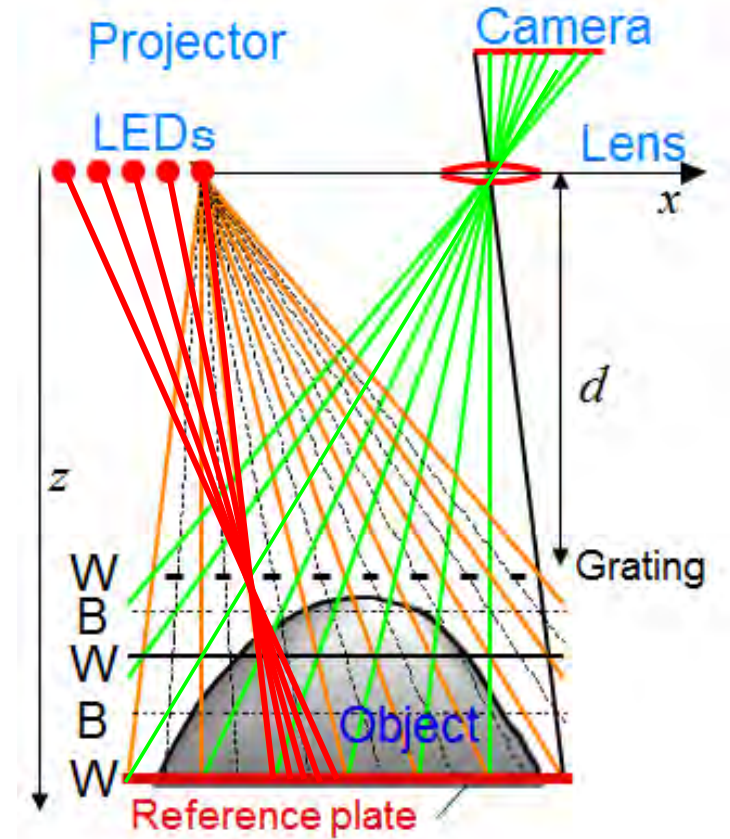


光源の切り替
えによる位相
シフト

移動装置が不要

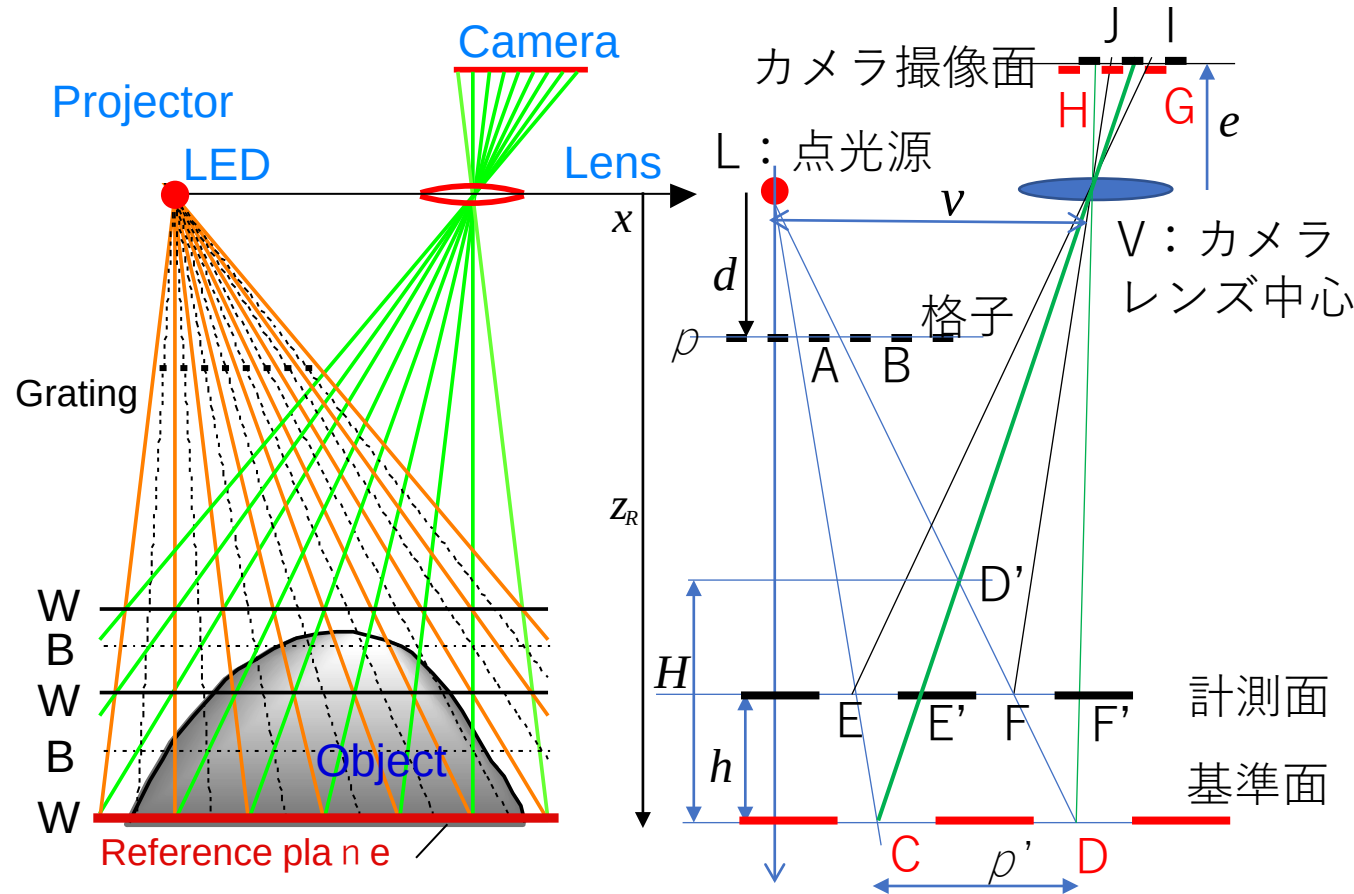
小型
安価
超高速化が可能

光源切替位相シフト シャドーモアレ法



場所によって位
相シフト量が異
なるため全空間
テーブルが必要

モアレトポグラフィの光学系において、1ピッチを N 画素に合わせると、どの高さにおいても**1ピッチが N 画素**となり、高さにより、位相のみが異なる。そこで**1ピッチ（ N 画素）**のフーリエ変換を行い、その部分の位相を求めると、高さ h がわかる。



モアレトポグラフィの光学系

$$\overline{IJ} = \overline{GH} = N \text{ pixels}$$

$$\frac{p}{p'} = \frac{d}{z_R}$$

位相差 θ と高さ h の関係

$$h = \frac{p\theta z_R^2}{p\theta z_R + 2\pi v d} = \frac{p'\theta z_R}{p'\theta + 2\pi v}$$

ダイナミックレンジ H

$$H = \frac{p z_R^2}{p z_R + v d} = \frac{p' z_R}{p' + v}$$

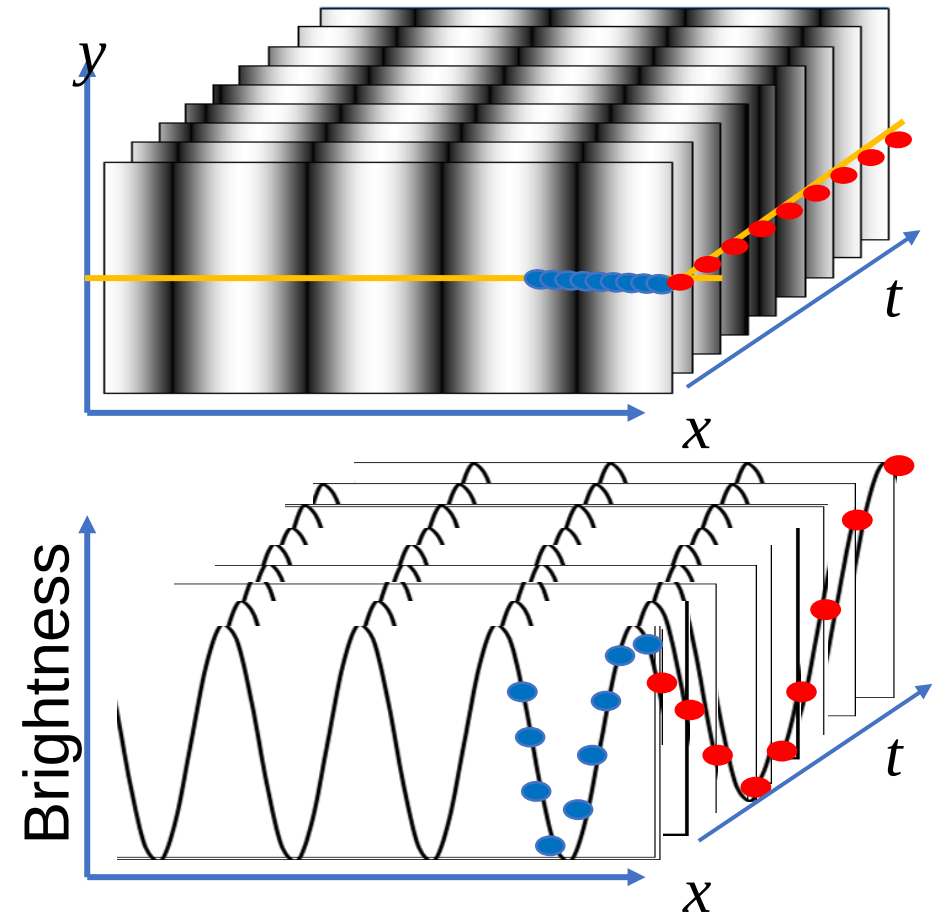
位相差 θ : 基準面の位相と計測面（物体面）の位相の差

位相シフト法（赤点の輝度を使用）

- 数枚の画像の同じ画素の輝度の時間変化を計測
- 空間分解能が良い
- 時間分解能が悪い
(動くものには適用できない)

OPPA法（青点の輝度を使用）

- 1枚の画像の複数画素の輝度の空間変化を計測
- 時間分解能が良い
(動くものも高速に計測できる)
- 空間分解能は少し悪い
- 平面状の対象物は精度が良い

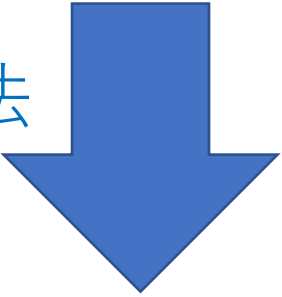


位相シフト法（赤色使用）
OPPA法（青色使用）

OPPA法のモーションキャプチャへの応用

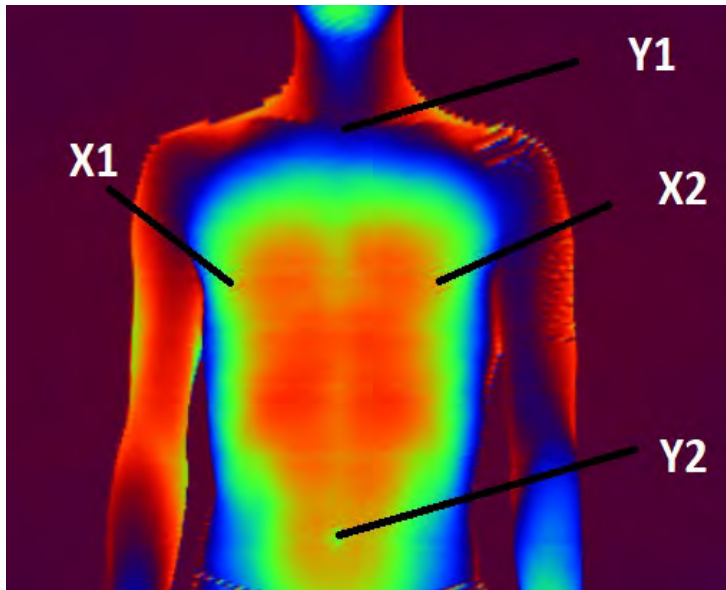
関節の動きの計測

OPPA法

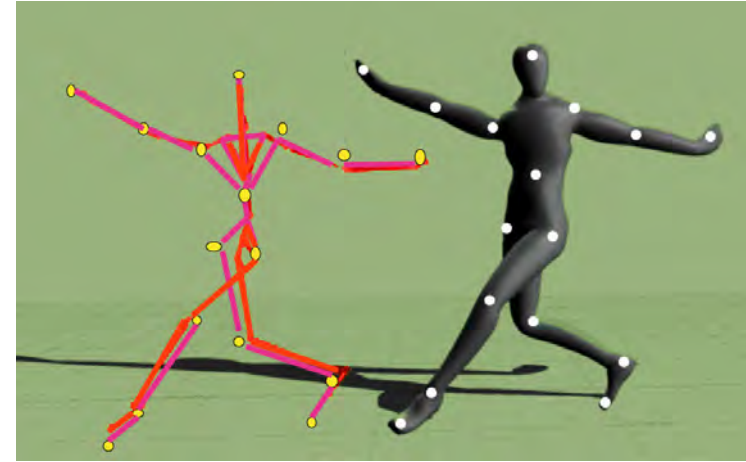


関節の座標データが得られるだけで、筋肉の動きなどはわからない。

皮膚の動きの計測



全画素の3次元座標が得られる。



ボールターゲットの位置で計測

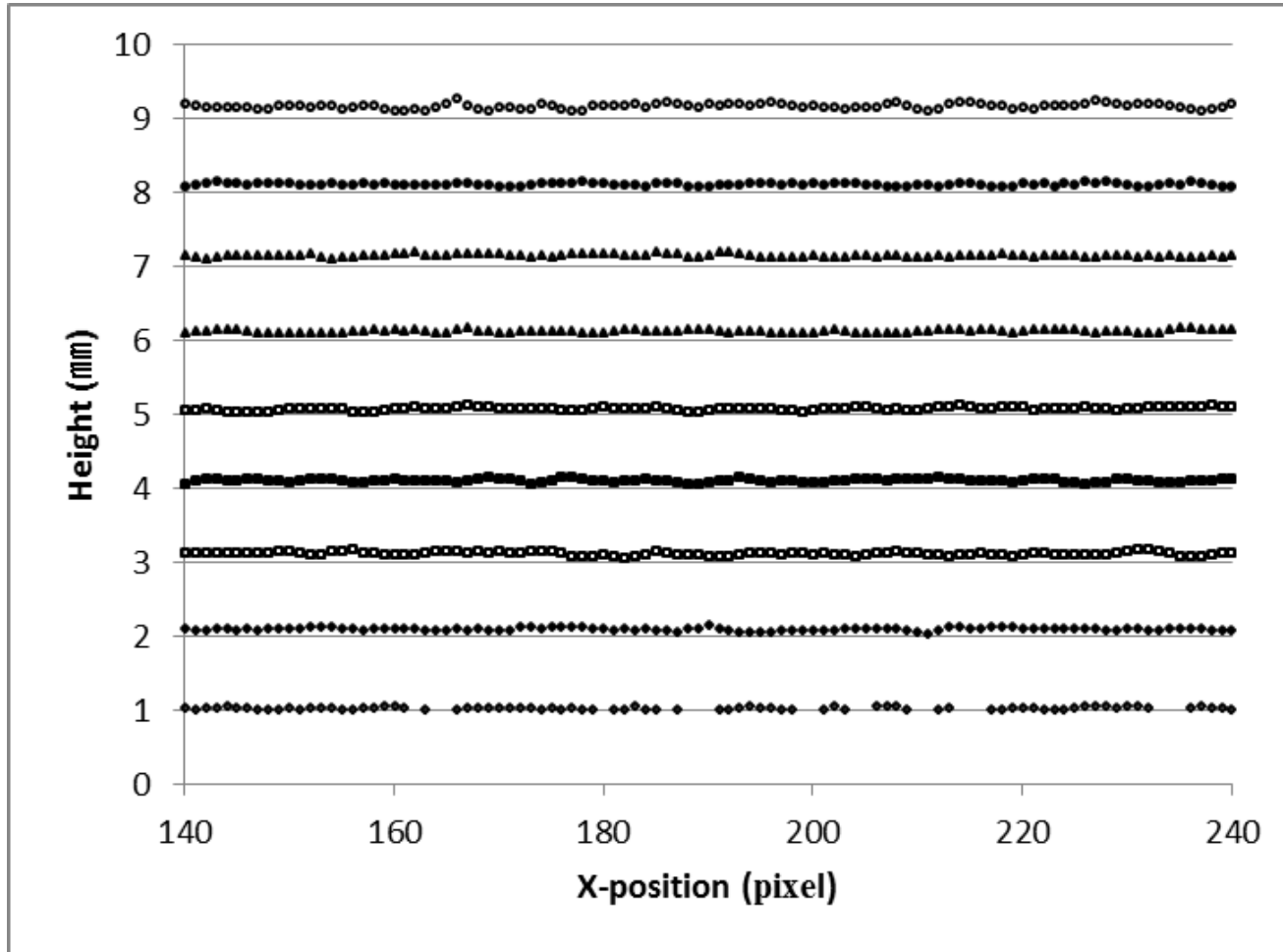
<http://www.komatsuprocess.co.jp/product/target/target.html>

- オリンピック選手の強化
- 医療の新しい診断法
- 衣服の自動採寸

モーションキャプチャの近距離での精度評価

- ・ダイナミックレンジ: 9mm
- ・標準偏差: 28 μ m
- ・ Z_R : 700mm

単位: μ m



(a) 平板の高さ分布

高さ	平均	誤差	標準偏差
1000	1109	109	20
2000	2074	74	23
3000	3084	84	20
4000	4109	109	21
5000	5111	111	21
6000	6123	123	20
7000	7111	111	21
8000	8106	106	21
9000	9135	136	28

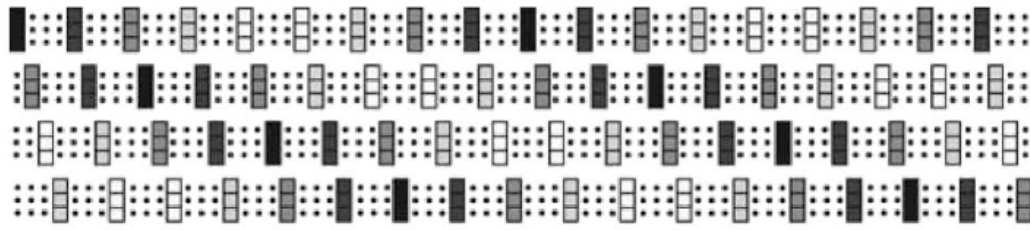
(b) 計測誤差



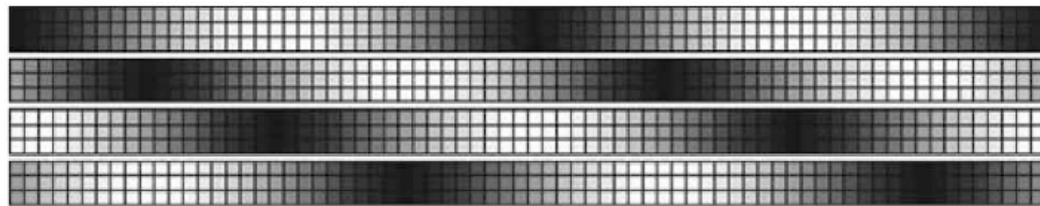
(a) Grating on specimen



(b) Image of Fig. (a)



(c) Sampled images from Fig. (b)

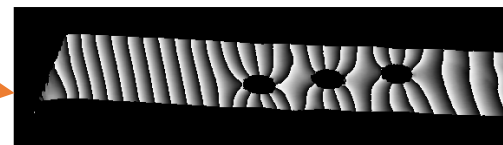
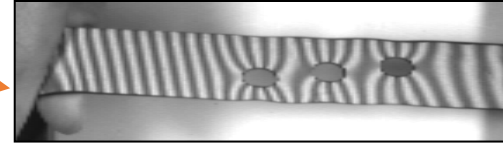
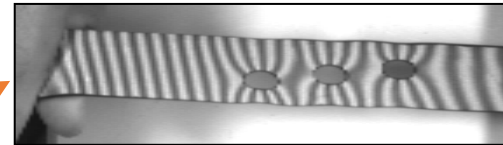
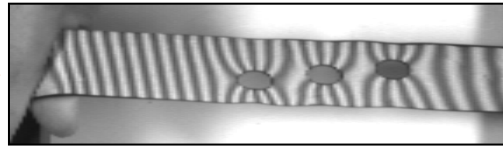
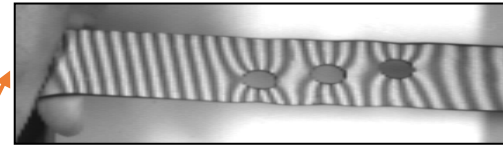
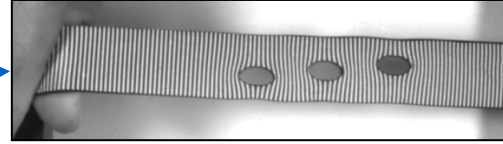


(d) Interpolated sampled images of Fig. (c)



(e) Phase of Fig. (d)

1枚の格子画像により位相の異なるモアレ縞を生成
位相解析により格子1ピッチの1/1000の精度で解析



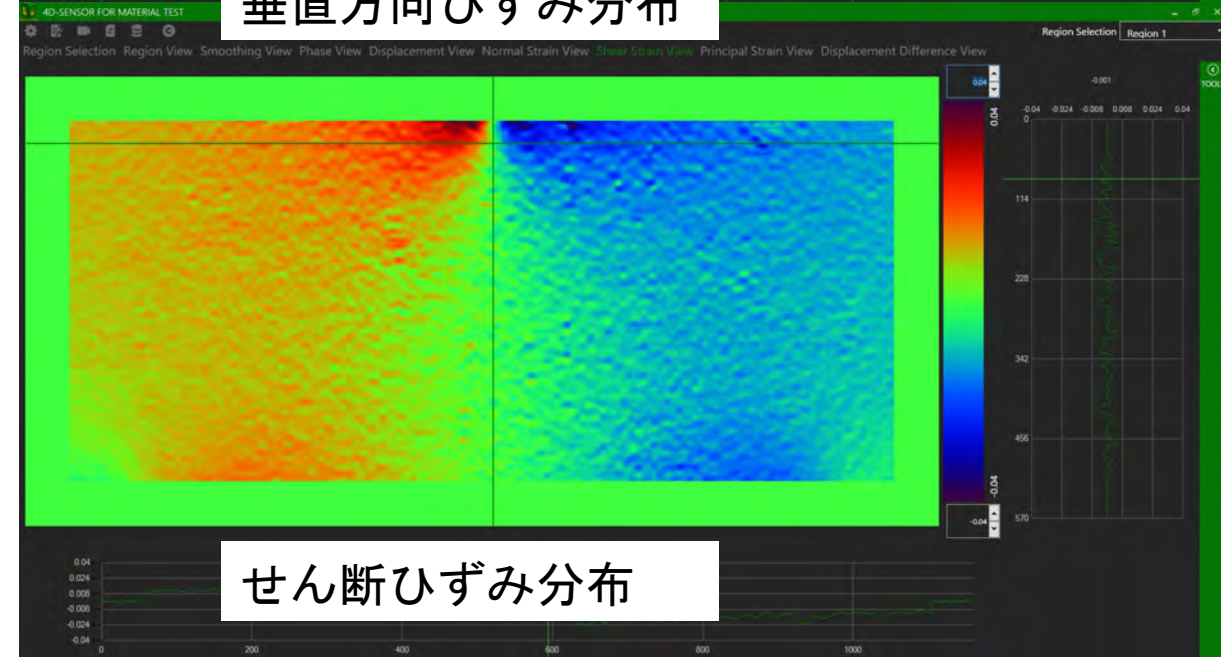
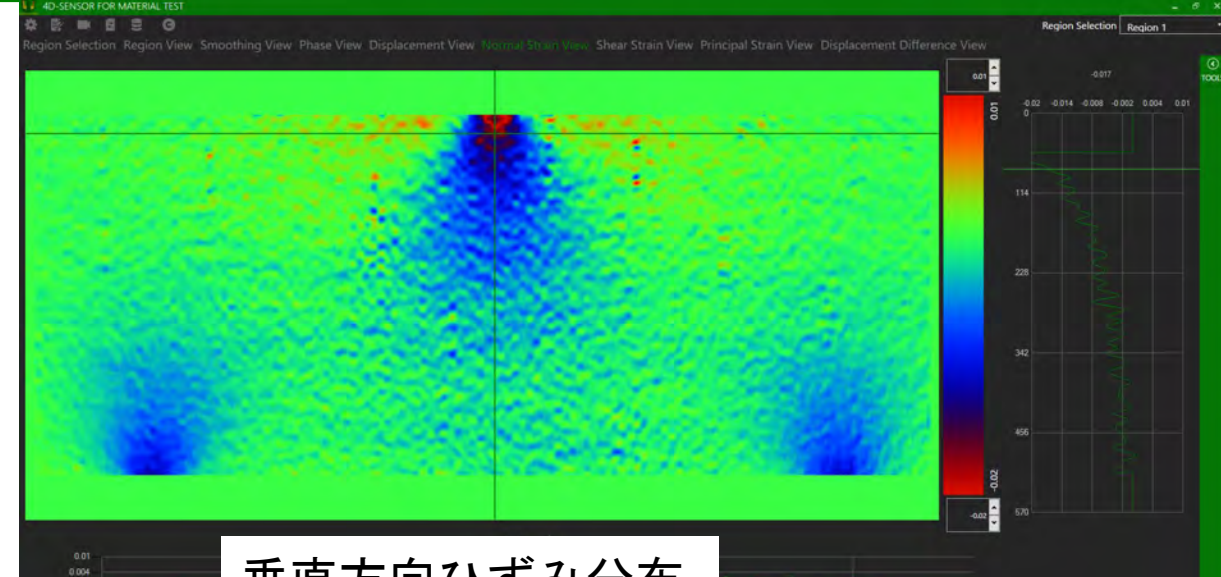
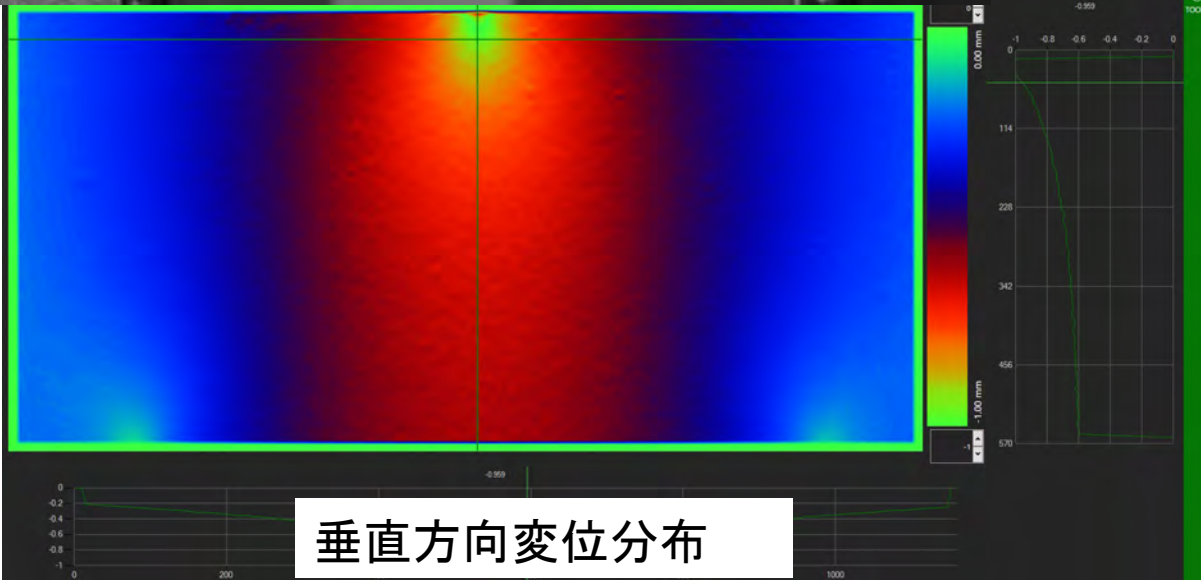
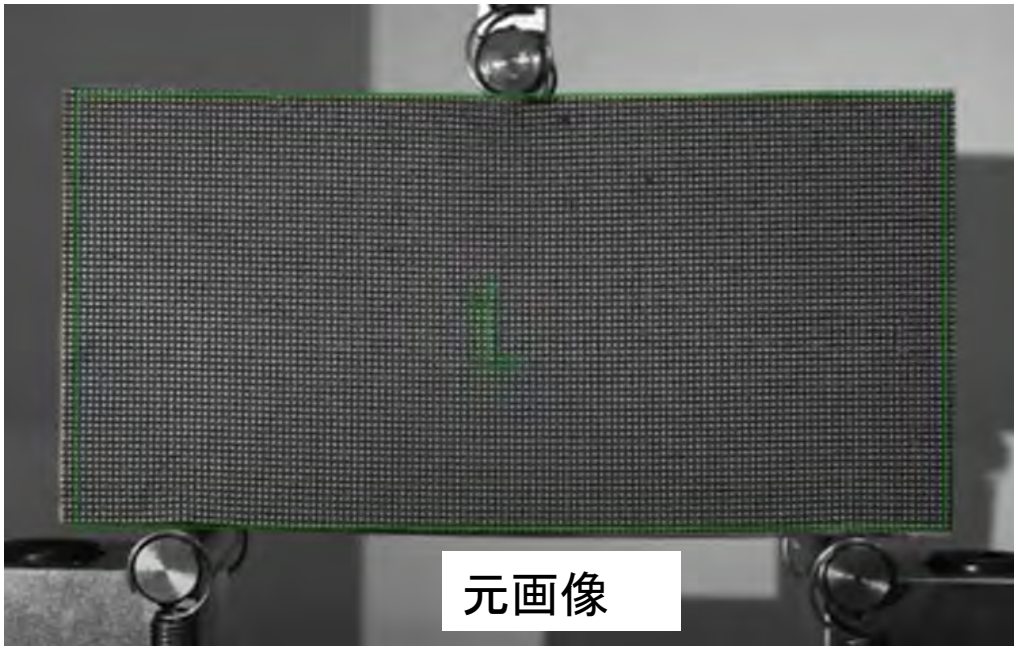
2 mmピッチ格子を
用いた精度評価実験

誤差 : $1.800 \mu m$

精度 : $0.250 \mu m$
(標準偏差)

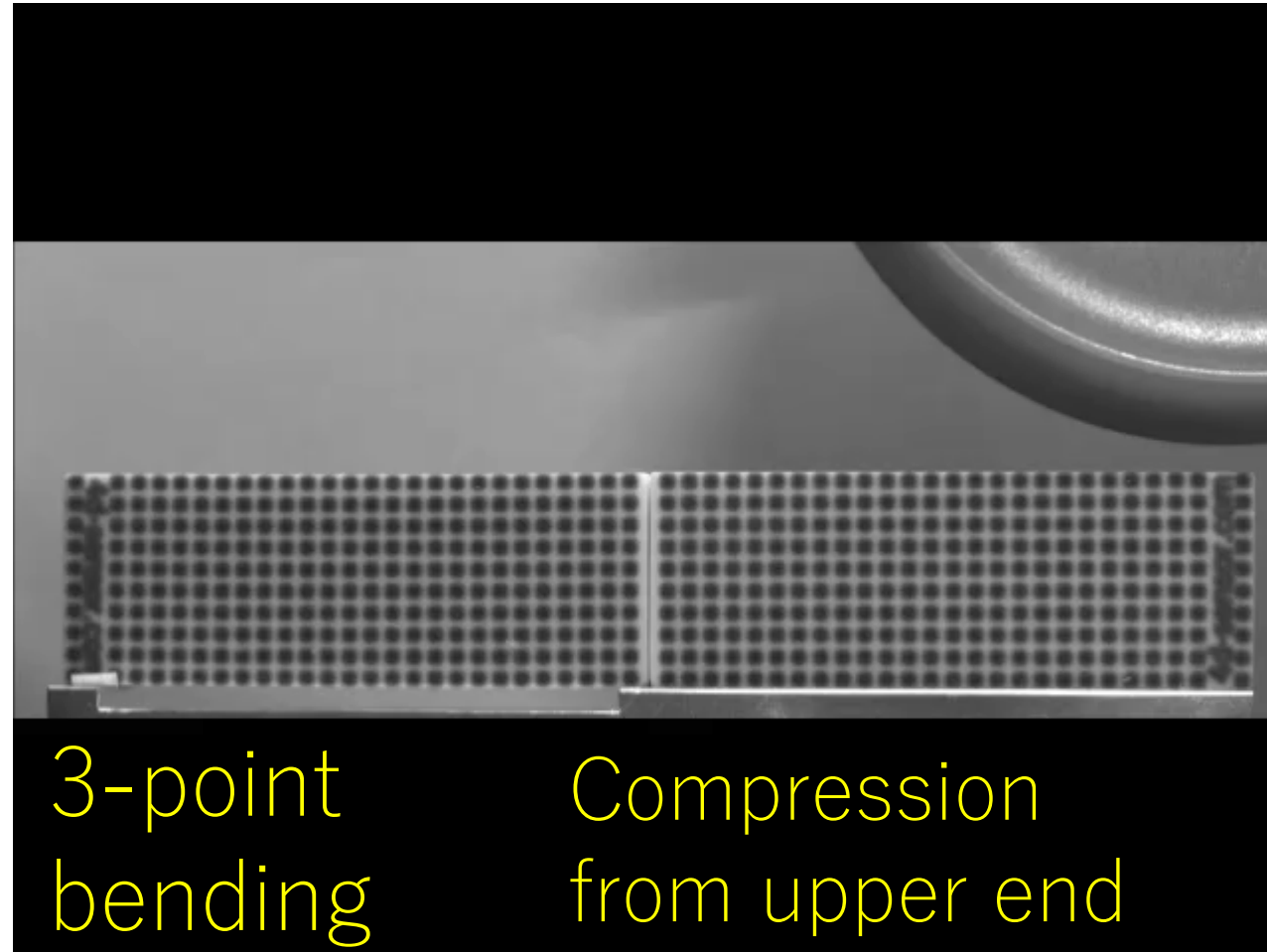


消しゴムの3点曲げ圧縮試験



消しゴムの圧縮時のリアルタイム変位分布計測

Speed: 50fps
Size: 640 × 240画素

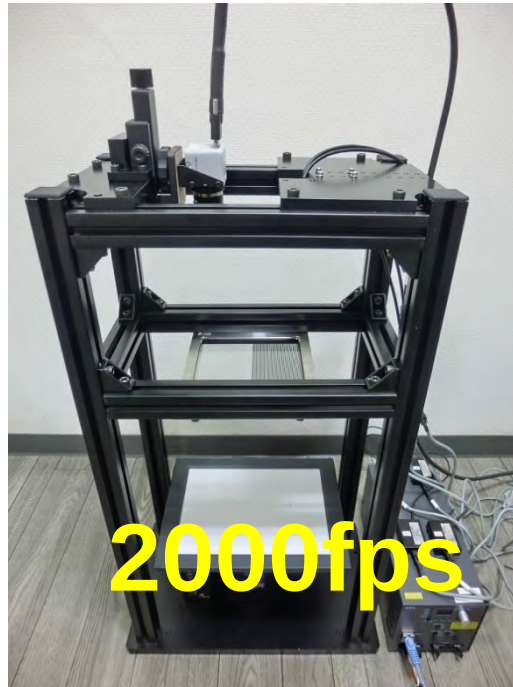


$p=2\text{mm}$

高速・高精度・小型・安価な
三次元形状・変形計測装置



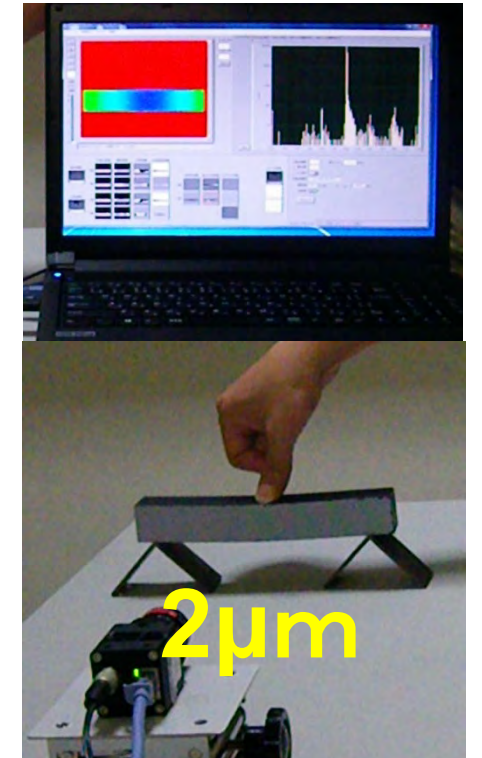
3Dカメラ
(x,y,z)



4Dカメラ
(x,y,z,t)



シャドーモアレ
カメラ



サンプリング
モアレカメラ

OPPA法を用いた計測装置

超高速・高精度な
三次元形状・変形運動計測装置



リアルタイム
モーションキャプチャー



標準振動分布計



振動分布計
平面度計

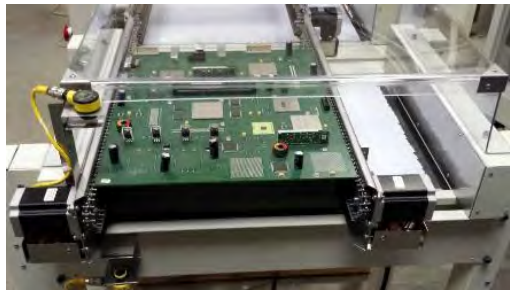
電子産業、自動車産業への応用

高速計測技術

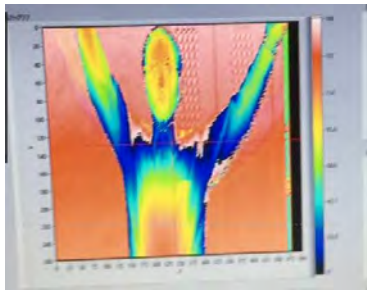
- ◆ 全空間テーブル化手法
- ◆ 光源切替位相シフト法
- ◆ OPPA法
- ◆ サンプリングモアレ法

- 高速に形状・変形・き裂・振動を計測
- 高精度（格子ピッチの1/1000程度、精度 $2\mu\text{m}$ ）
- 高速度カメラ（300～50000fps）
- オンライン、リアルタイム
- 生産ライン上の部品の検査、人体の運動計測、自動車の振動分布計測、衝突時の変形計測

● 動く物体の計測



生産ライン上の
部品の検査



人体の運動計測

● 動く物体からの計測



ドローンからの計測

● 振動物体の計測



ロボットアーム
からの計測

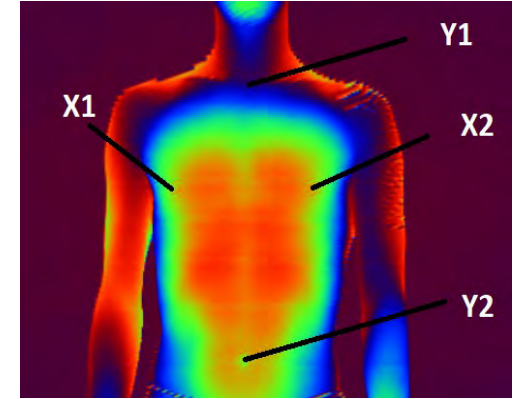


エンジンの振動

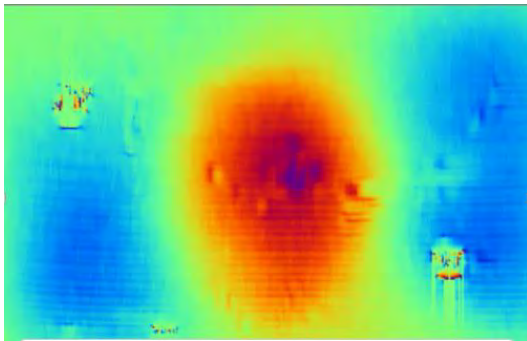
- 高速高精度 3Dスキャナー
- リアルタイム全画素3次元座標計測モーションキャプチャー
- 振動分布計
- 内部欠陥可視化



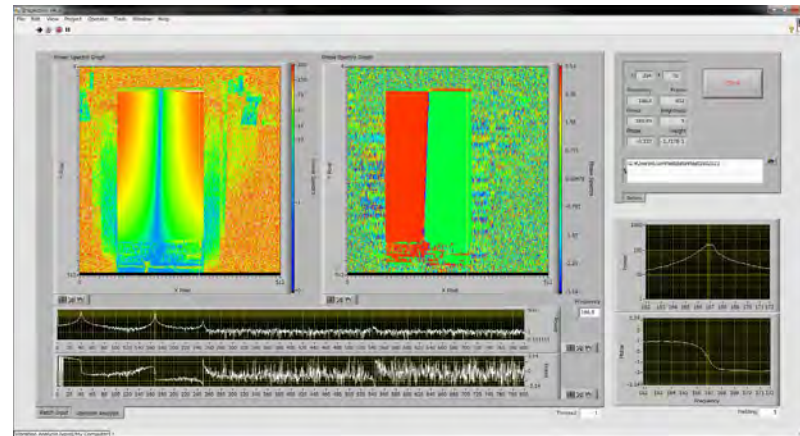
銅鐸の3D計測



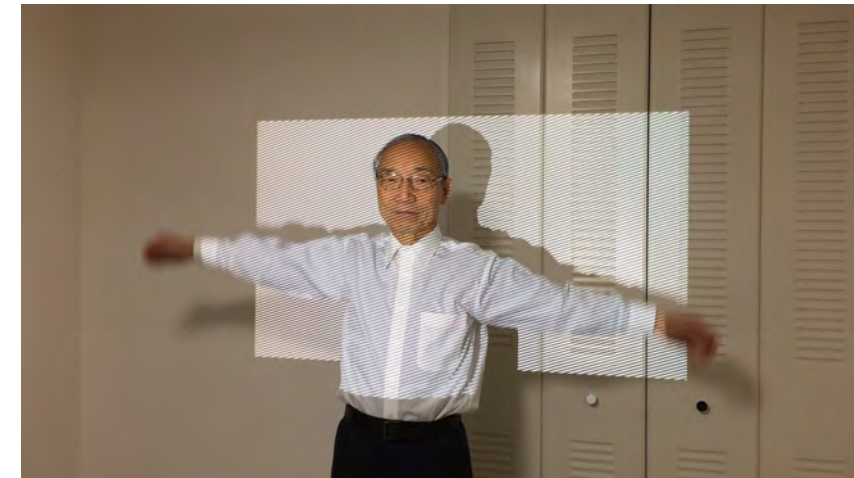
全画素3Dモーションキャプチャ



振動による内部欠陥検出



振動分布計による振動モード計測



運動する人体の計測

無線式橋梁たわみ計測装置



特徴

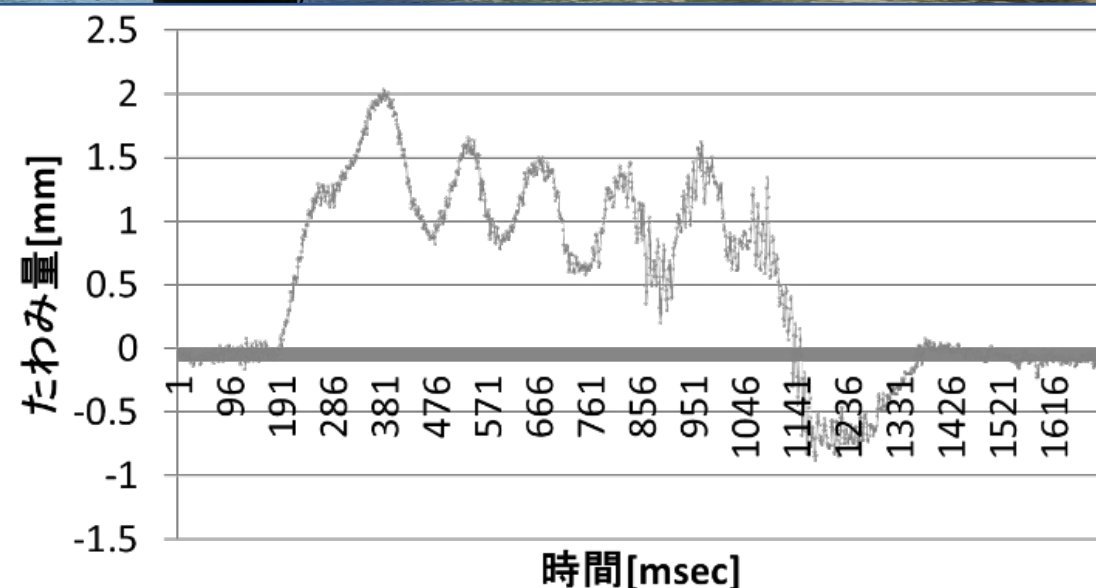
1. 装置設置および計測が楽（コードレス、遠隔操作）
2. 無線で6台同期

無線化された上記性能のインフラ構造物の
たわみ・揺れ計測装置は世界初



和歌山県那智勝浦町那智川橋梁

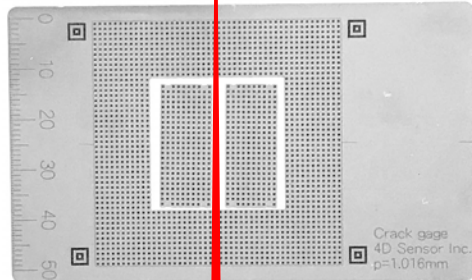
距離 10m
速度 100fps
精度 10 μ m



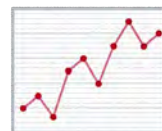


インターネットでの運用

1. 解析対象のひび割れの両側に瞬間接着剤などで格子を貼る。
2. スマホやカメラで格子写真を撮影し、ブラウザから送信
3. QRコードで格子番号を認識（予定）
4. ひび割れ幅変位増分を解析し結果をサーバーに保存
5. ひび割れ幅の時間変化のグラフをユーザーのブラウザに表示



stainless steel plate



Internet

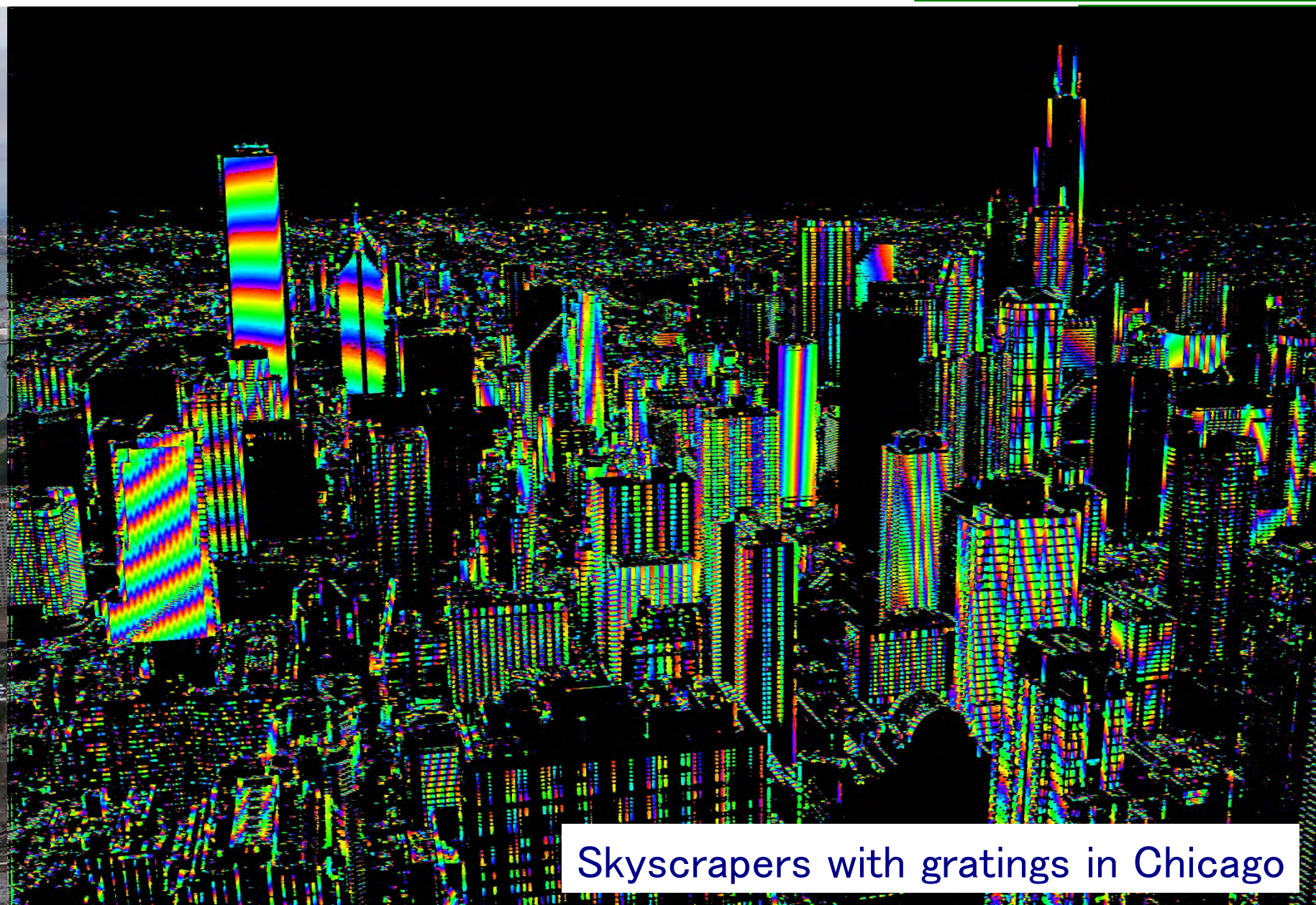
Crack
analyzer
+
Server



地震中の変形、地震後の変形

窓やタイルは格子の働きをする。

地震時のビデオ画像より、変位の時間変化の解析が可能になり、地震中の揺れ具合、地震後の傾きなどが簡単にわかる。



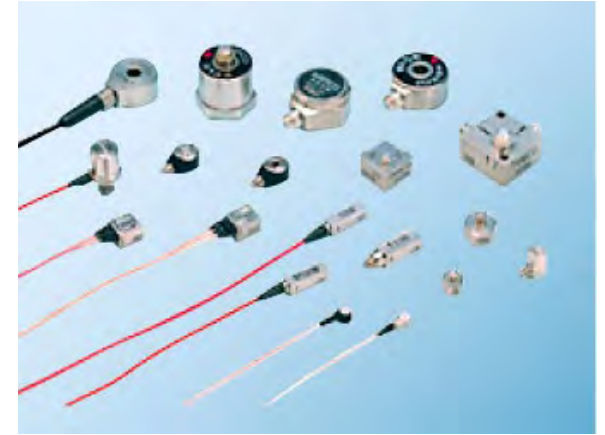
Skyscrapers with gratings in Chicago

• 点計測

加速度計やレーザー変位計などを用いた一点計測法は1点を振動させ、他の1点の応答を加速度計などで見る。この点をずらしていき、分布を見る。

複雑な手間。時間がかかる。データが粗い。同期が取れない。

加速度計などの接触の影響で誤差大。



1点計測の加速度計

• 面計測

超音波で1点毎の振動変位を計測し、その点をスキャンして面の分布を求める。

200点／秒程度

計測、解析の時間が大。過渡現象の計測は不可。高価

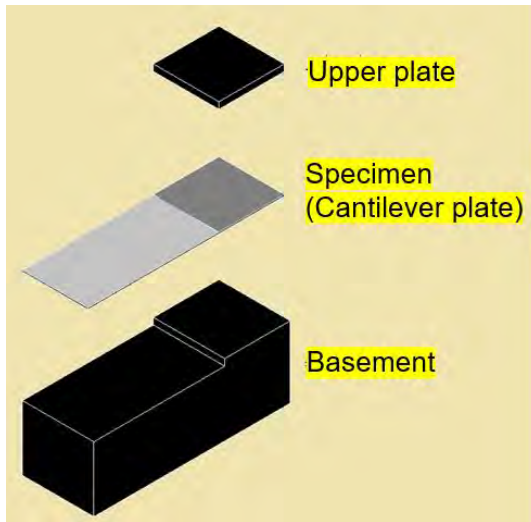


ポリテック

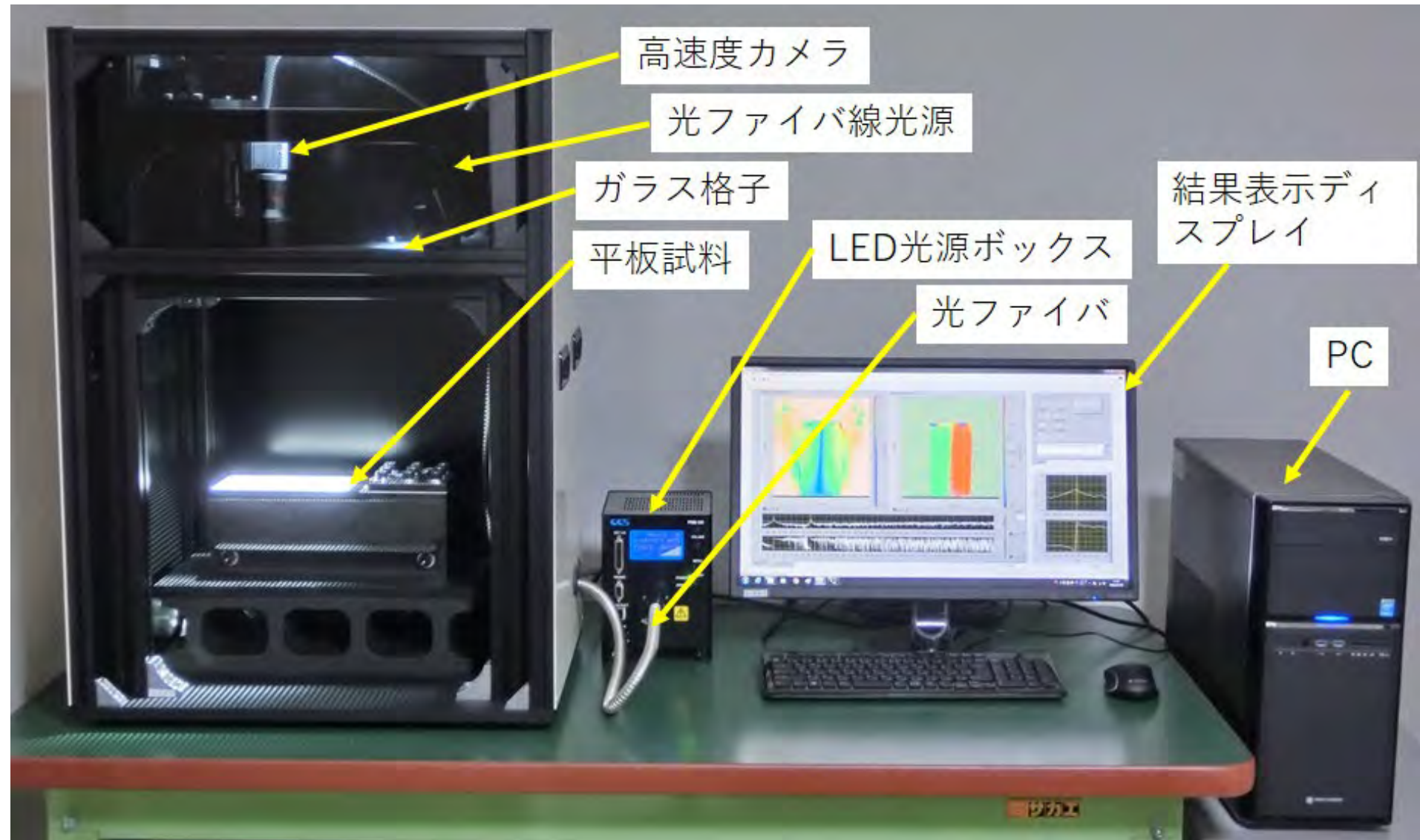
OPPA法を用いた振動分布計

高速度カメラ:
2000fps

撮影枚数:
20000frames

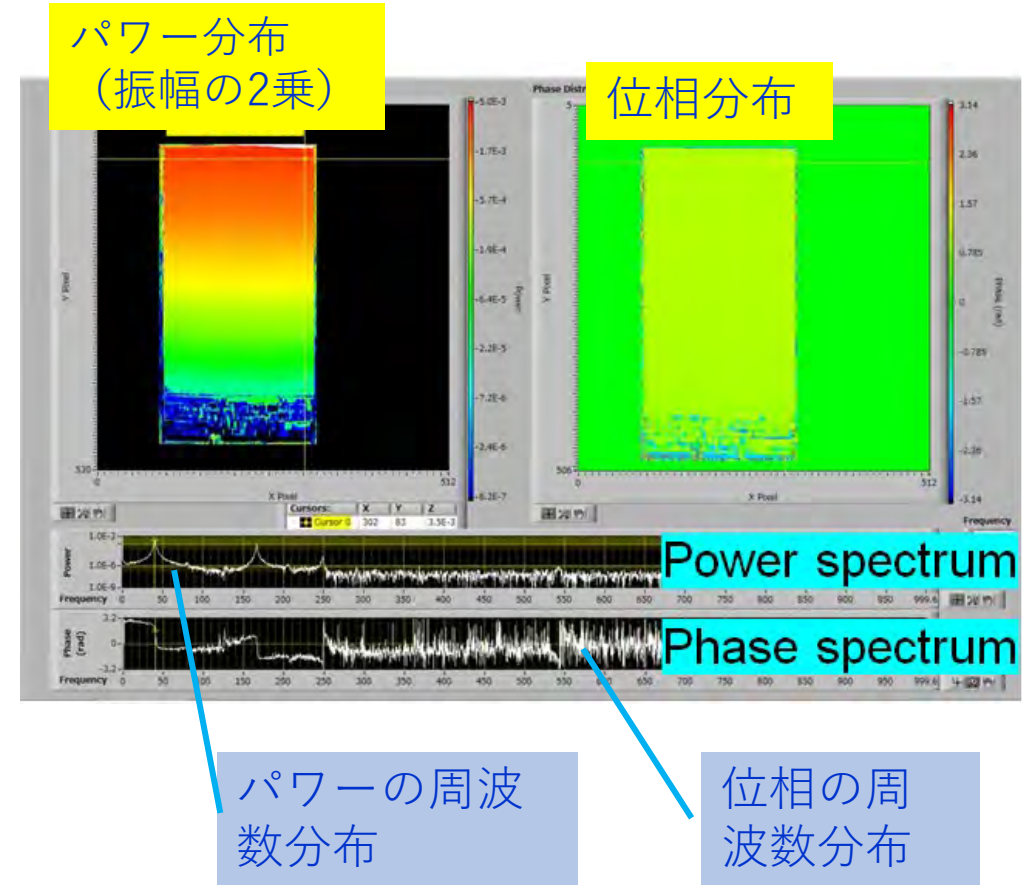
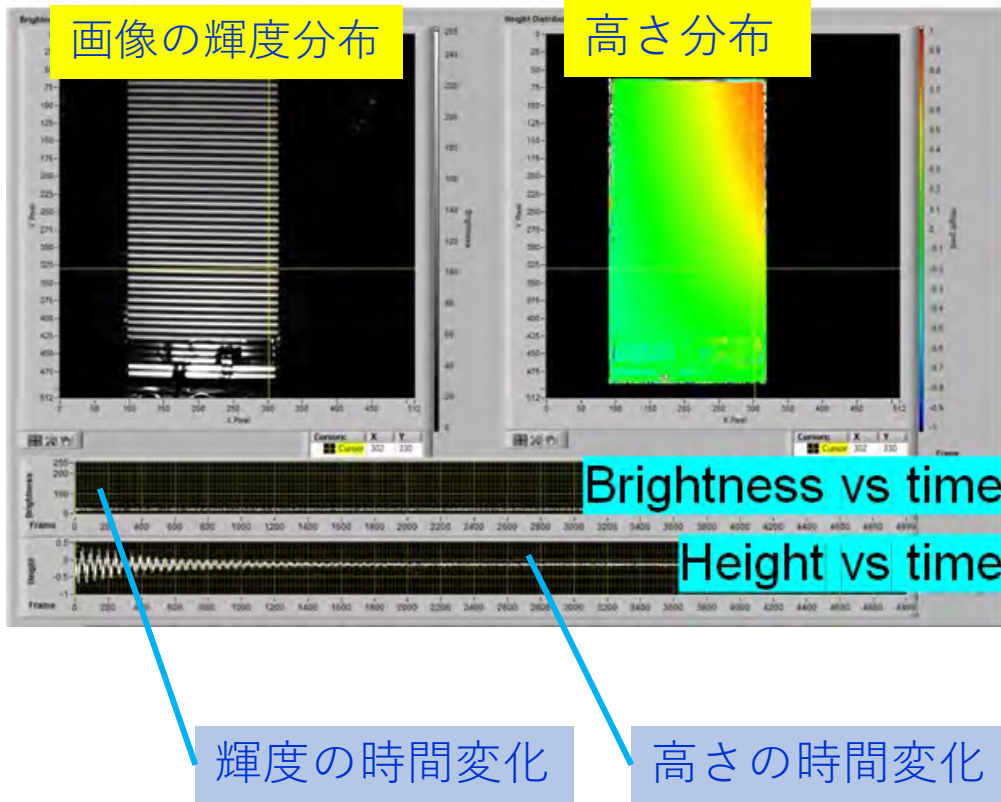


片持ち平板試料と
取付台



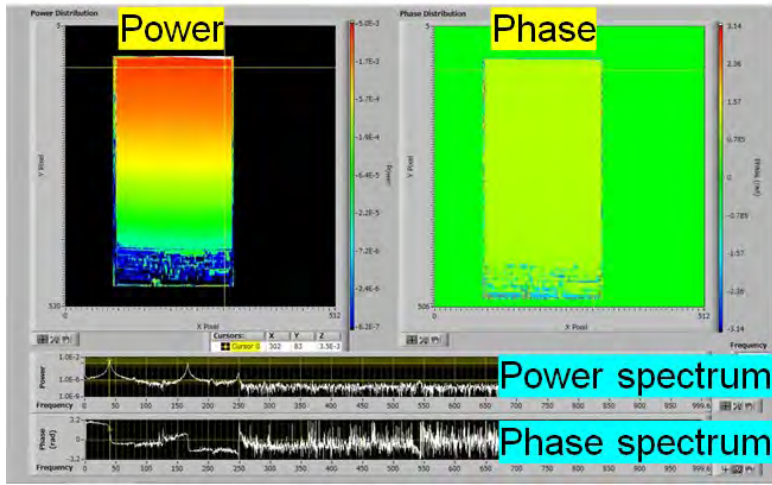
振動モード解析(2.5秒間の解析)

各画素ごとにフーリエ変換を行うことによりパワーと位相を解析

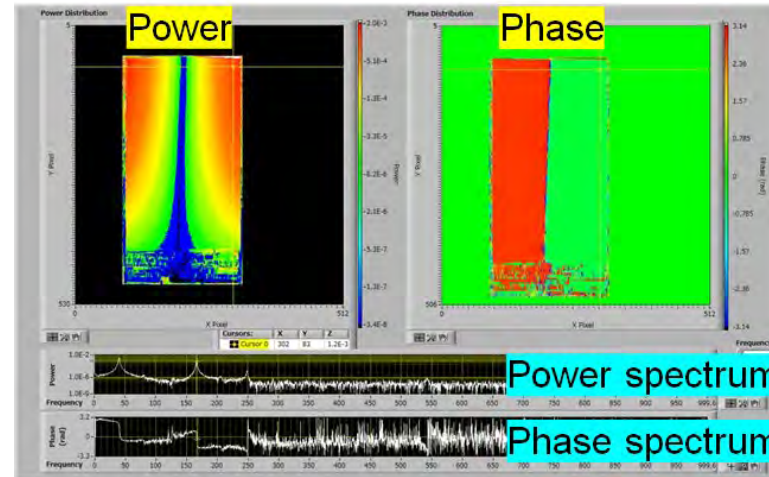


全画素におけるパワーと位相の分布

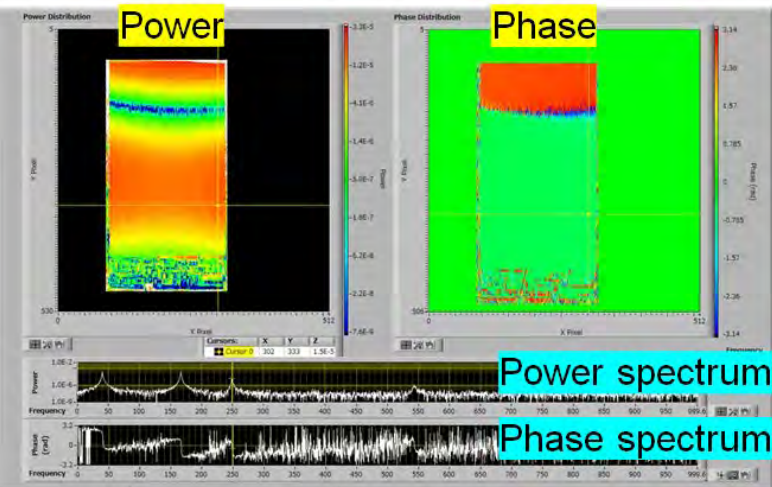
1次モード(40.0 Hz)



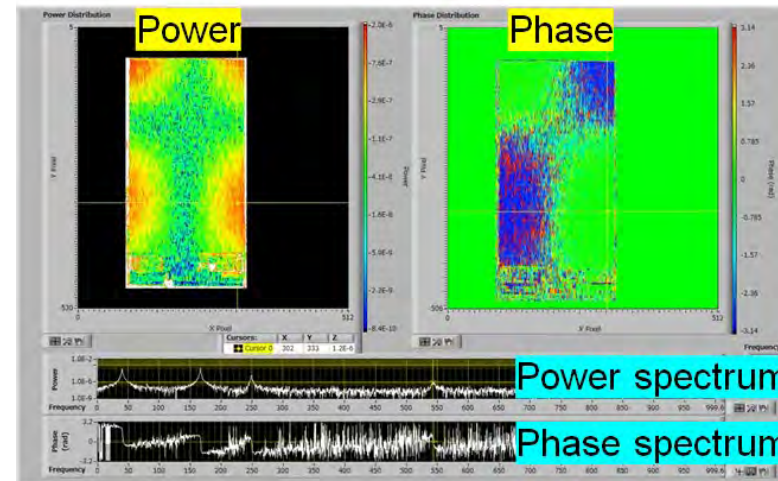
(a) 1st mode (40.0 Hz)



(b) 2nd mode (166.8 Hz)

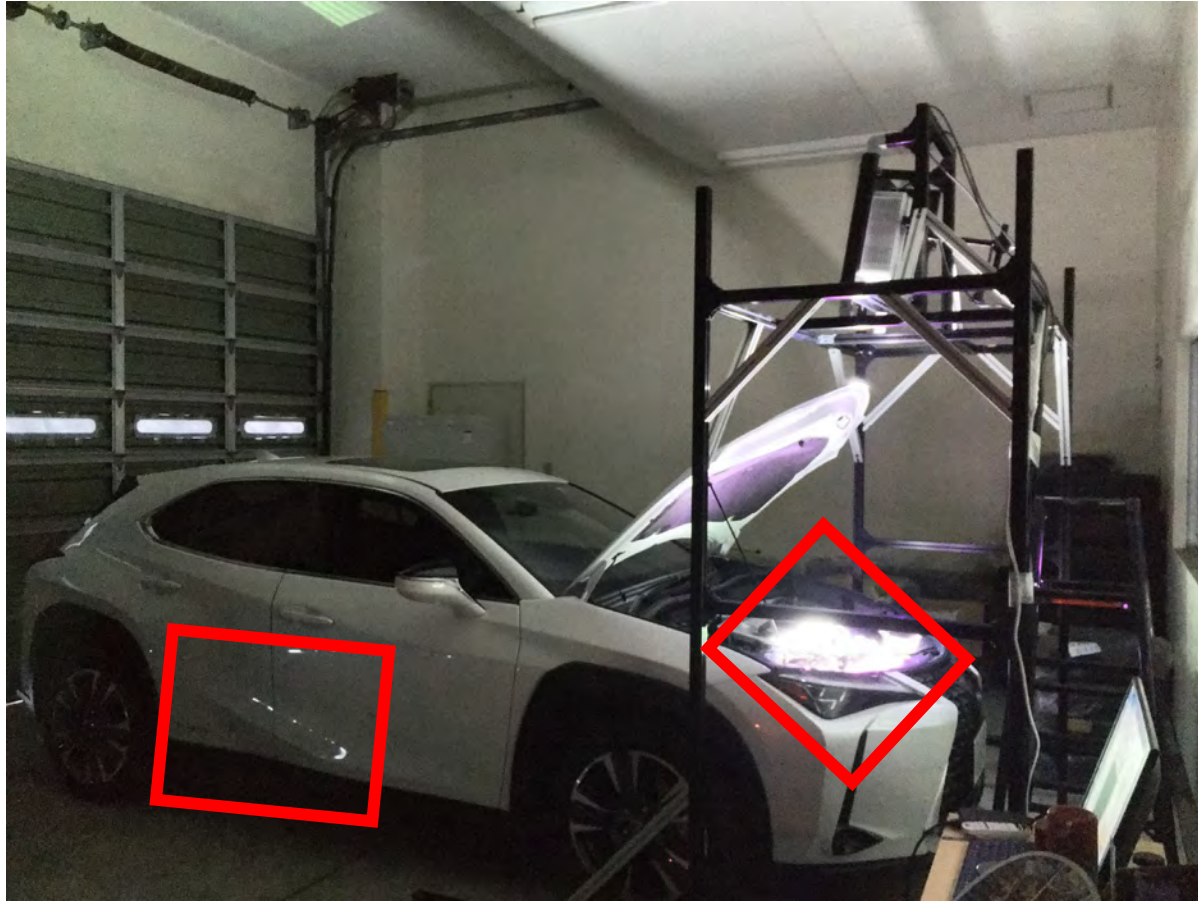


(c) 3rd mode (249.6 Hz)



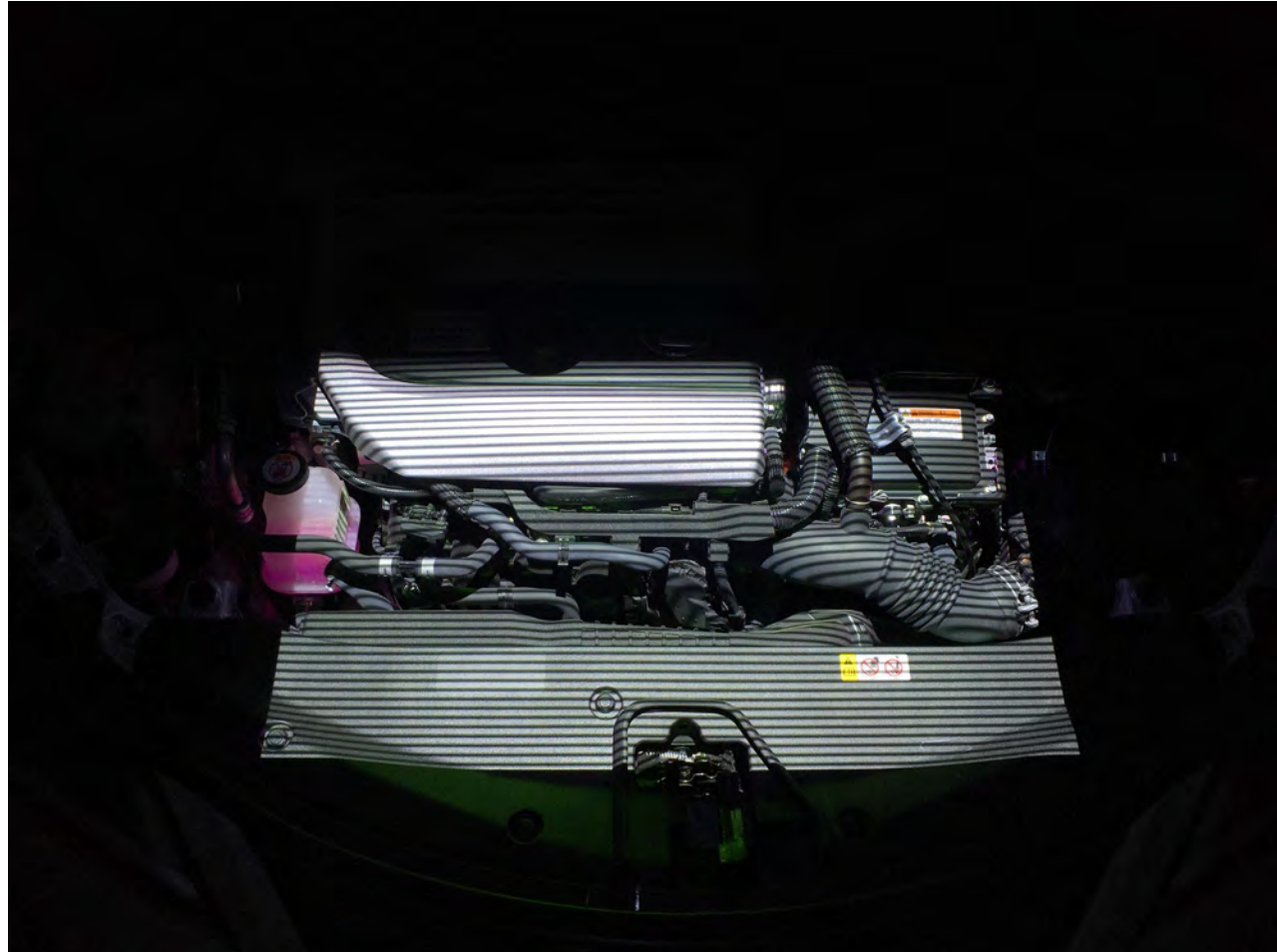
(d) 4th mode (543.6 Hz)

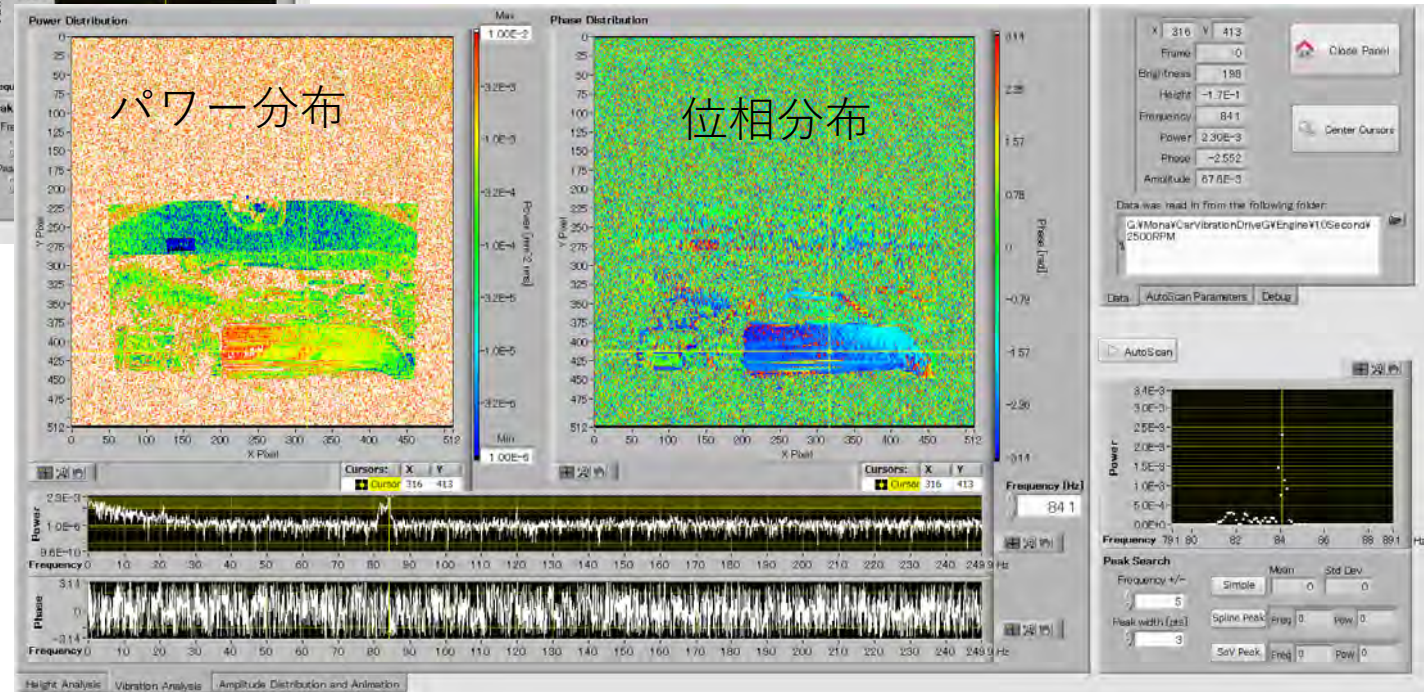
計測時間：2.5秒
解析時間：486秒



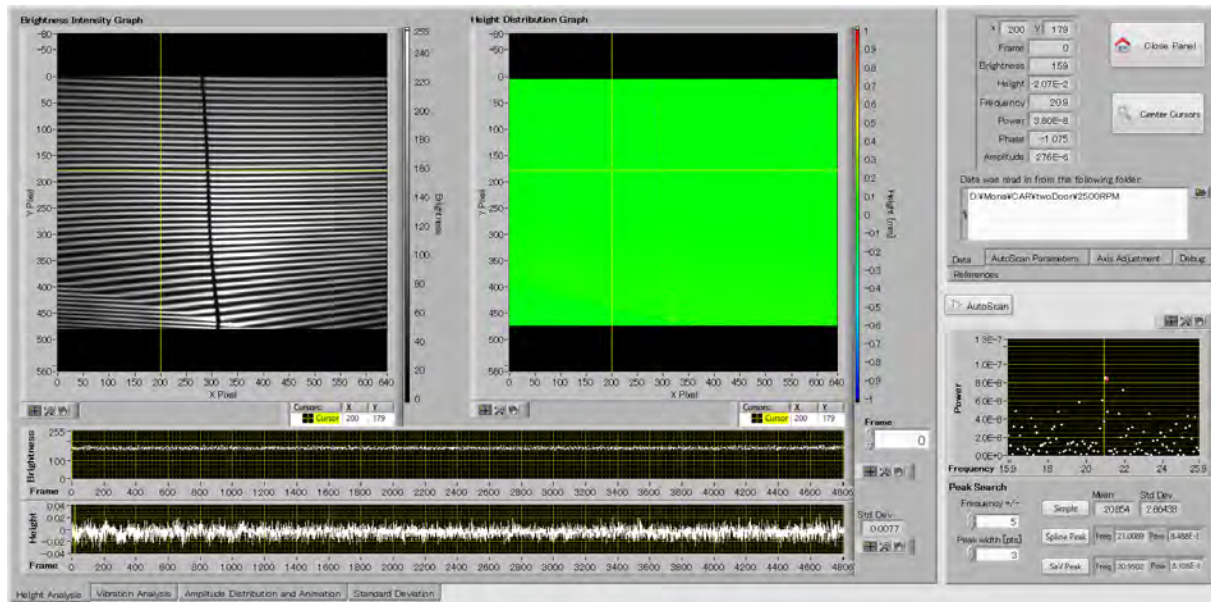
計測風景

エンジンヘッド





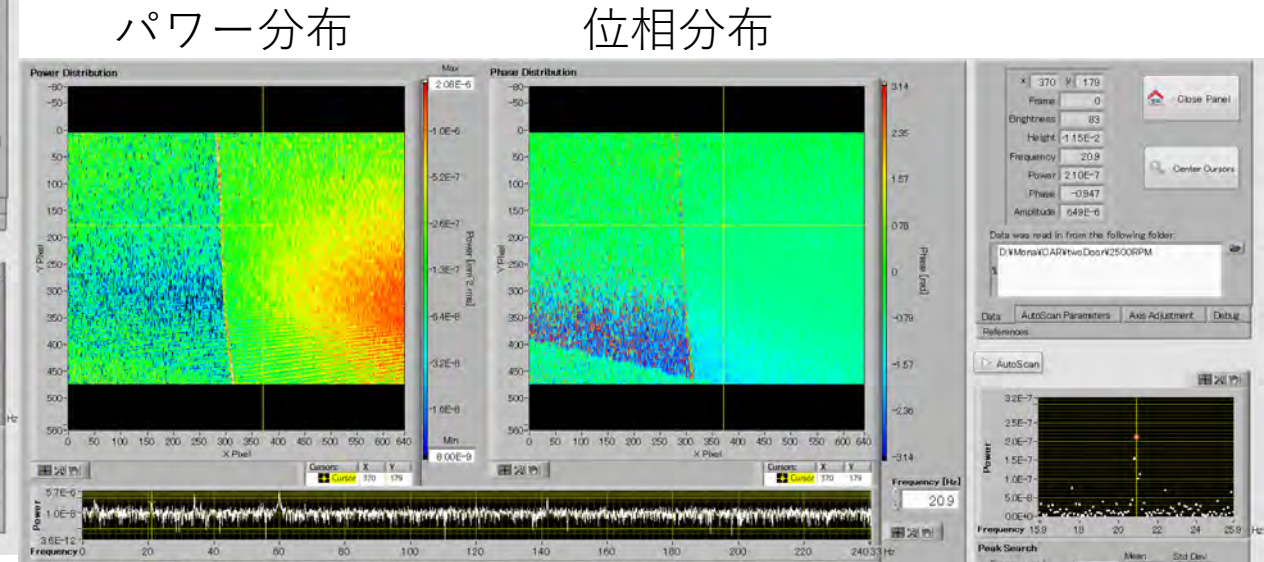
ドアの振動計測の様子



投影格子画像

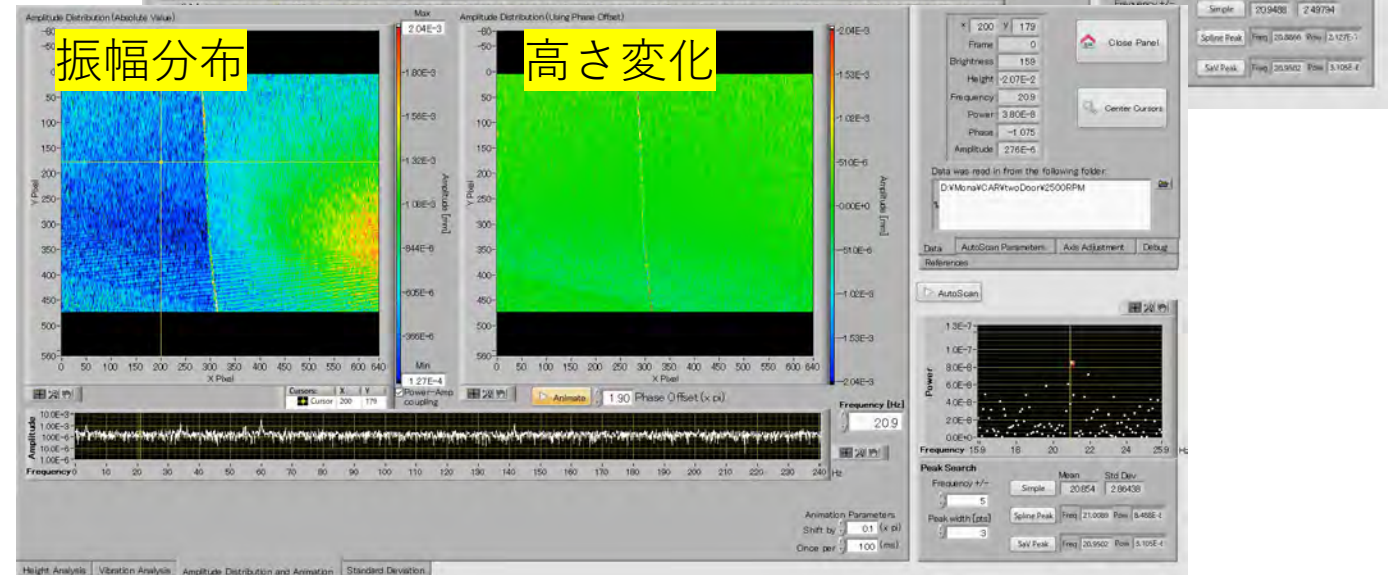
初期高さ分布

エンジン回転数：2500rpm



パワー分布

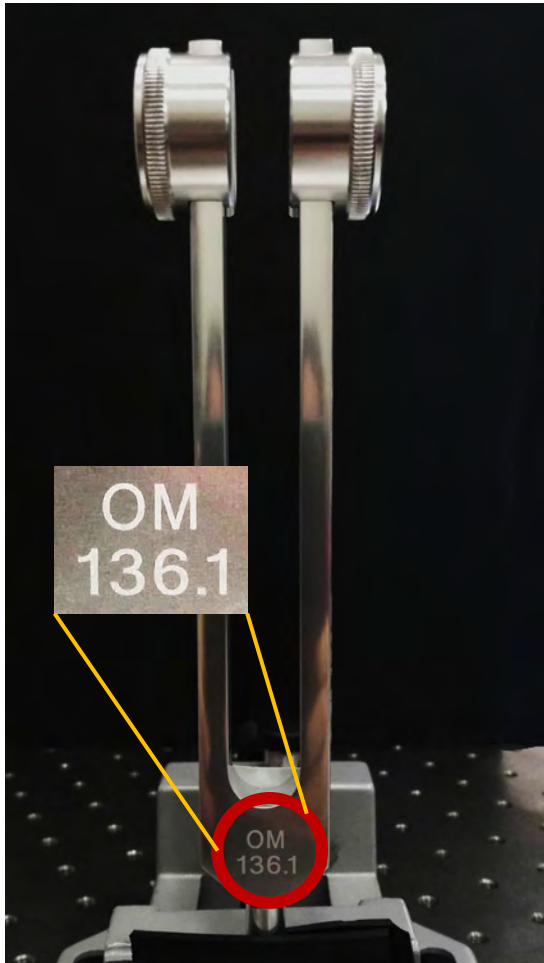
位相分布



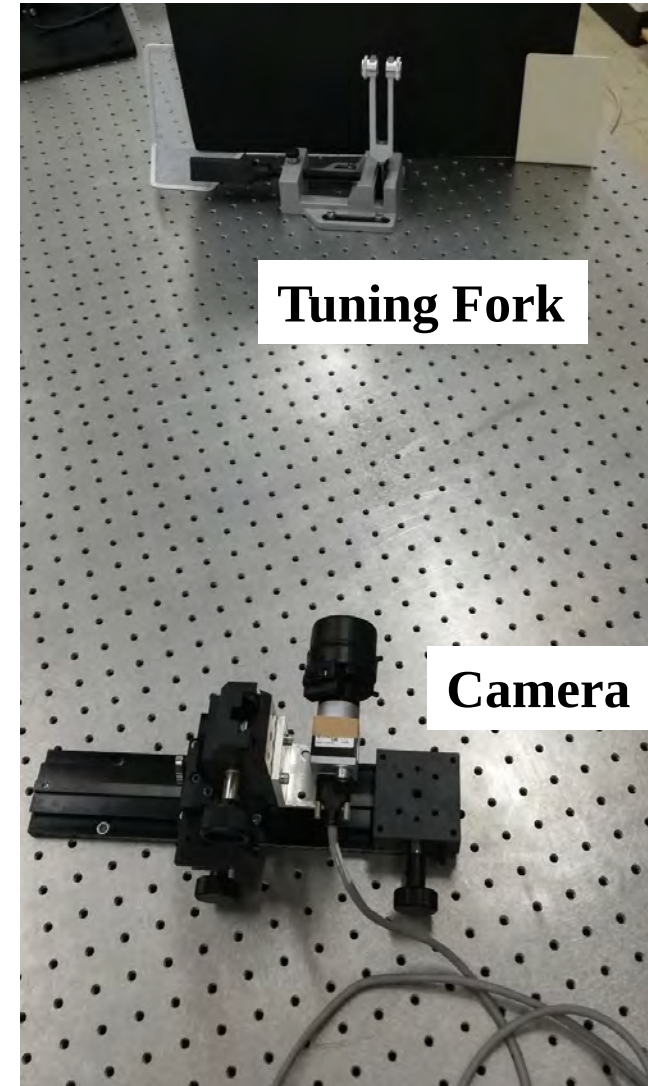
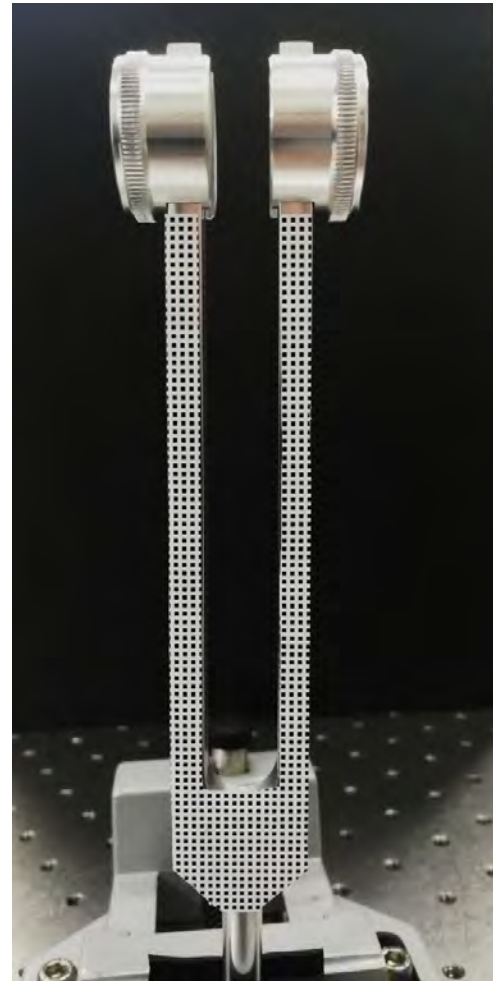
振幅分布

高さ変化

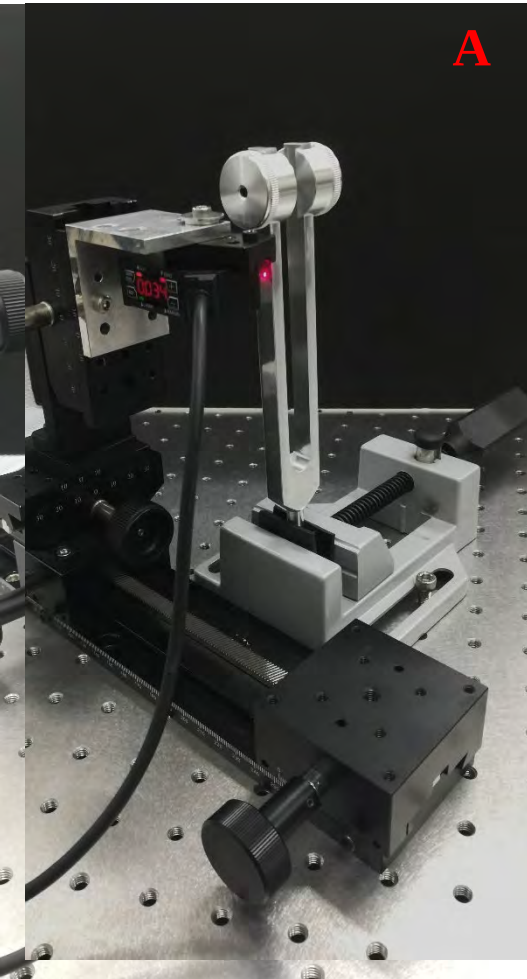
音叉の面内振動



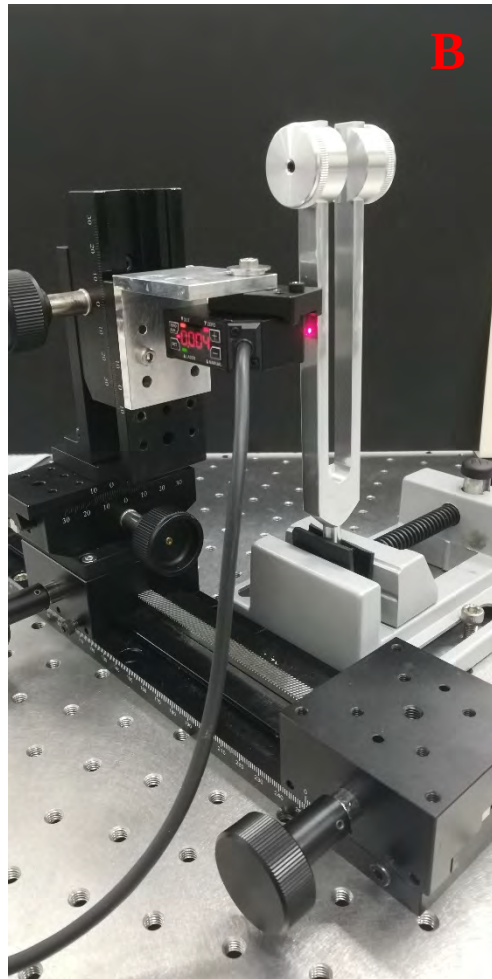
Grating pitch
size: 1.5 mm



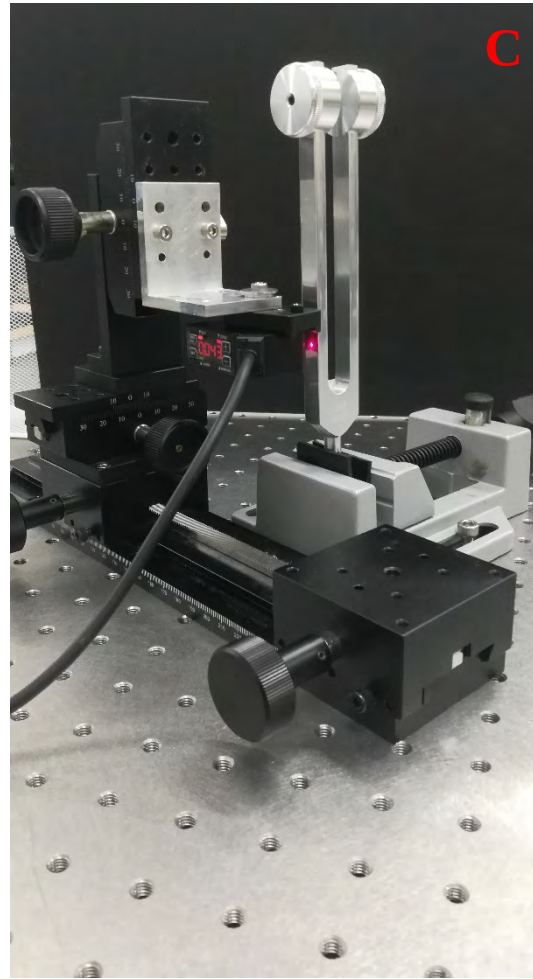
レーザー変位計による検証:



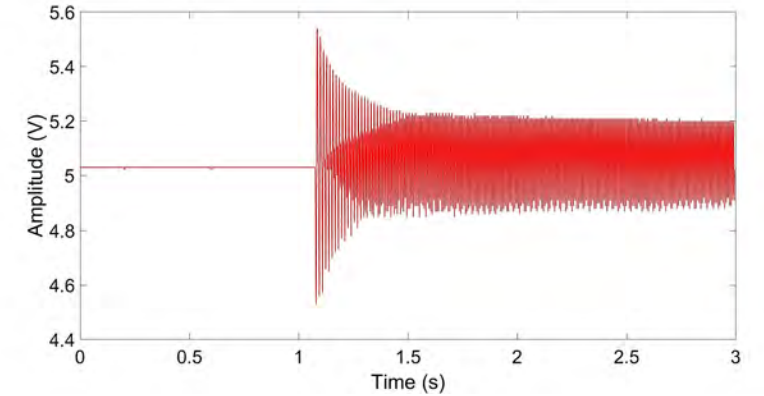
Position A



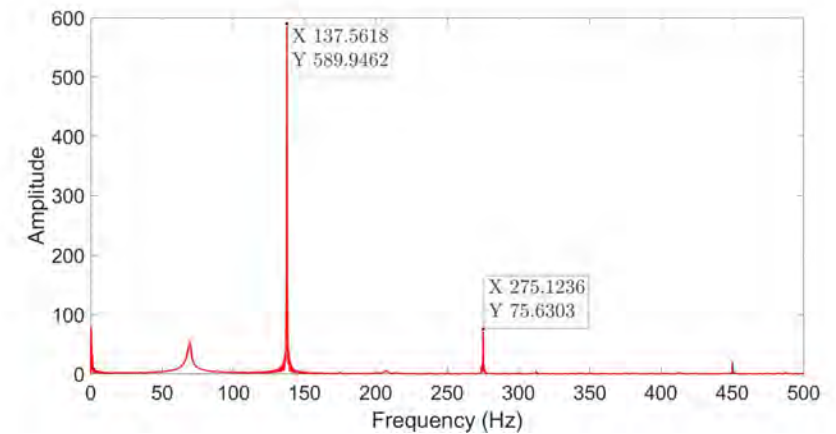
Position B



Position C

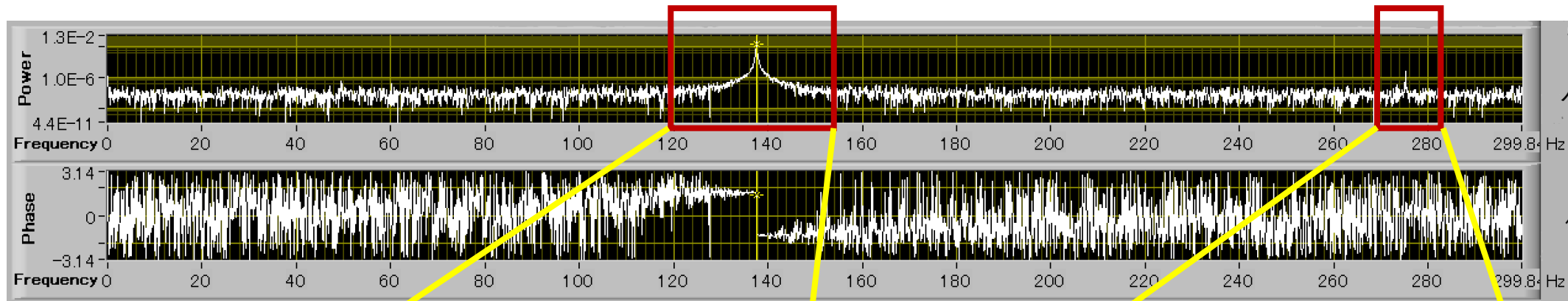


振幅の時間変化



振幅スペクトル

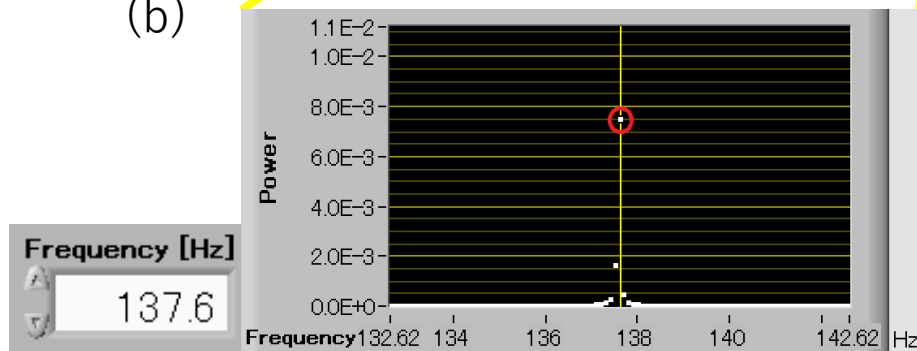
(a)



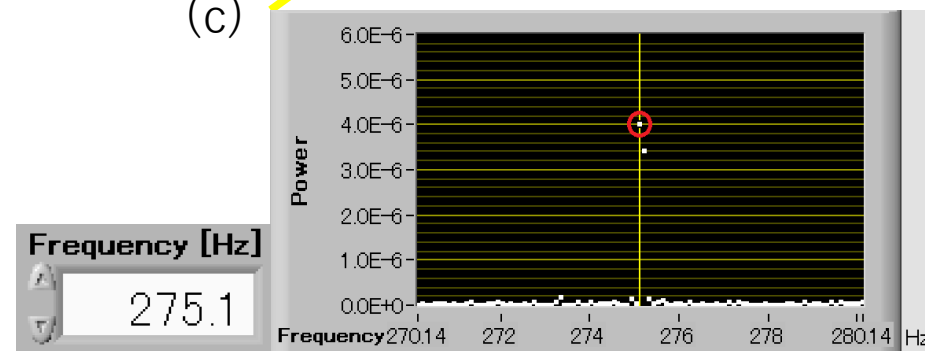
パワースペクトル

位相スペクトル

(b)



(c)



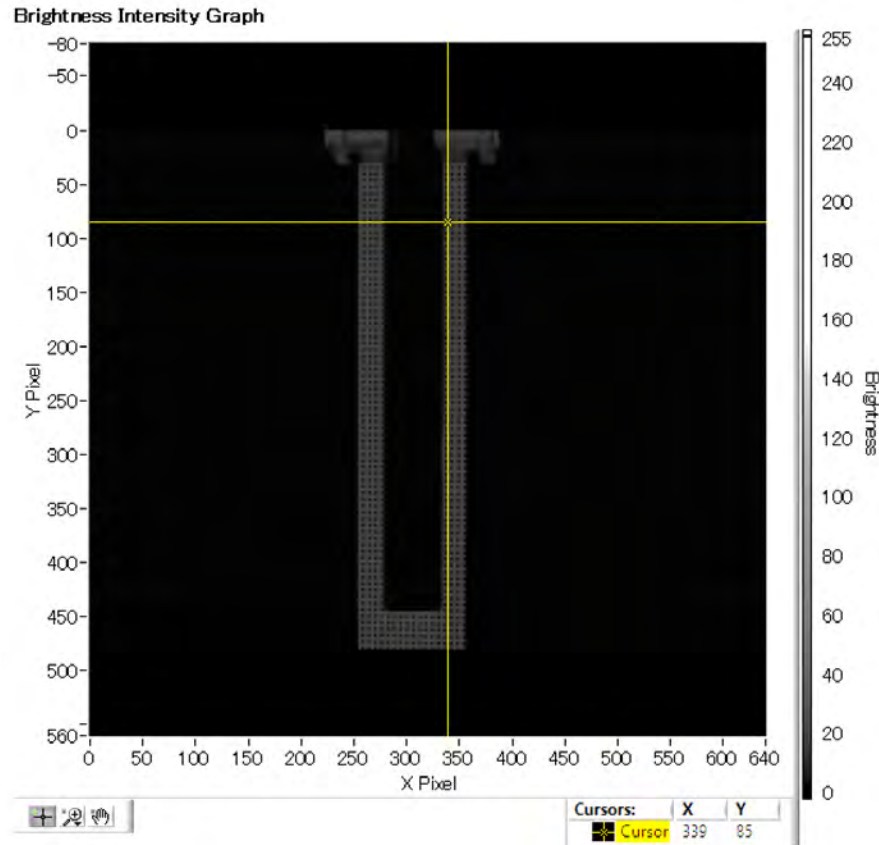
パワースペクトル拡大図

1次モード 137.6 Hz (frame375)

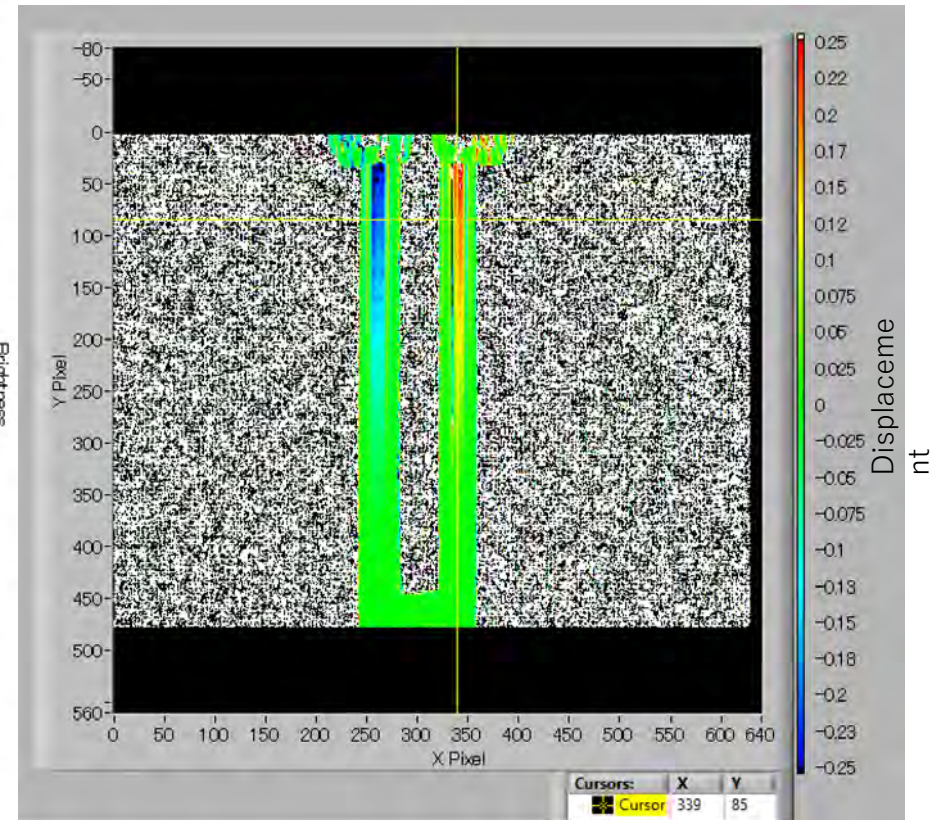
輝度分布

変位分布

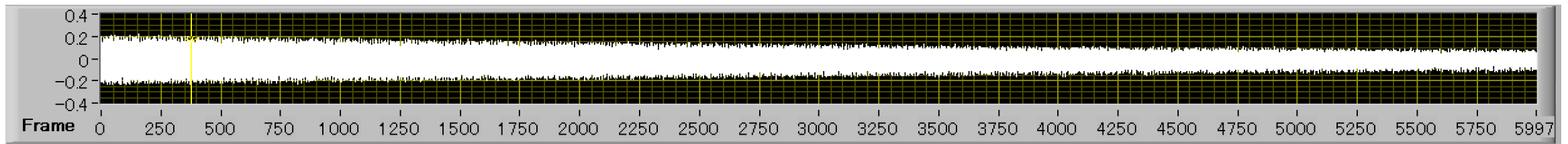
Brightness
Intensity Graph



Graph of
Displacement
in X direction



Waveform of
Displacement
in X direction

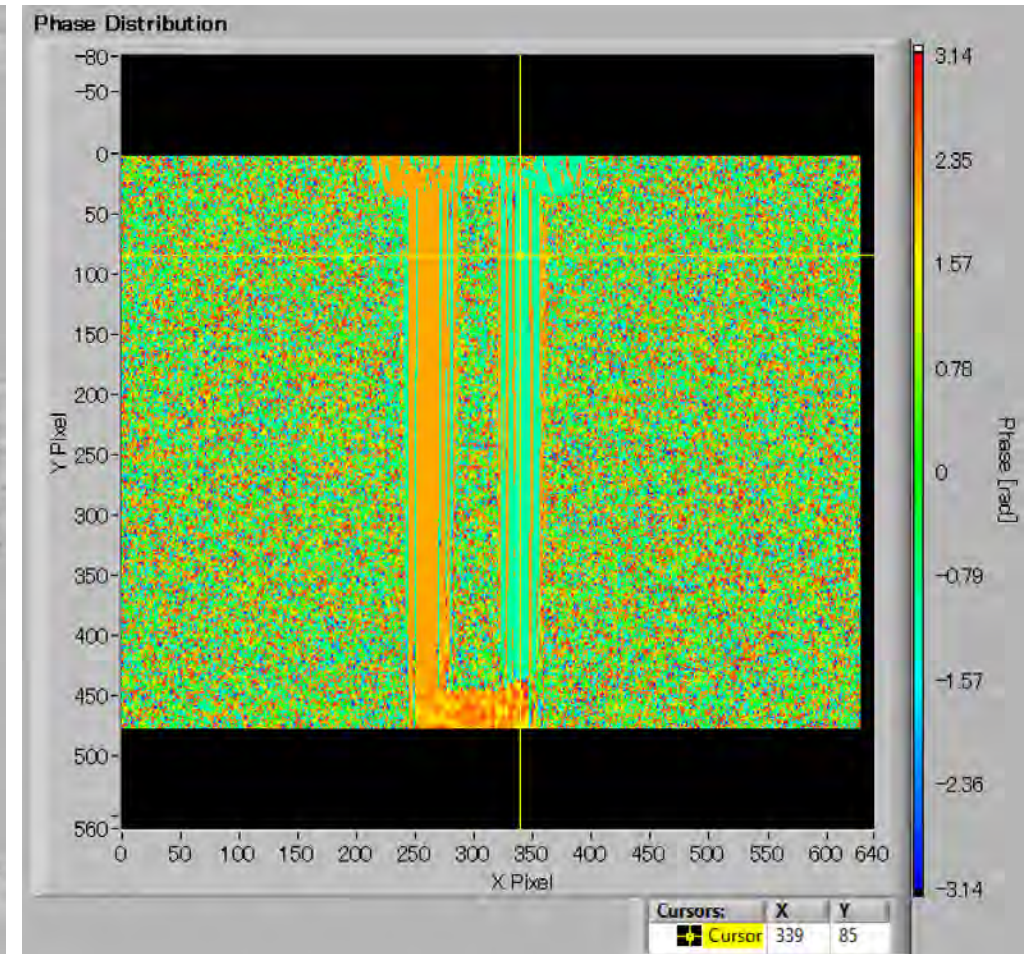
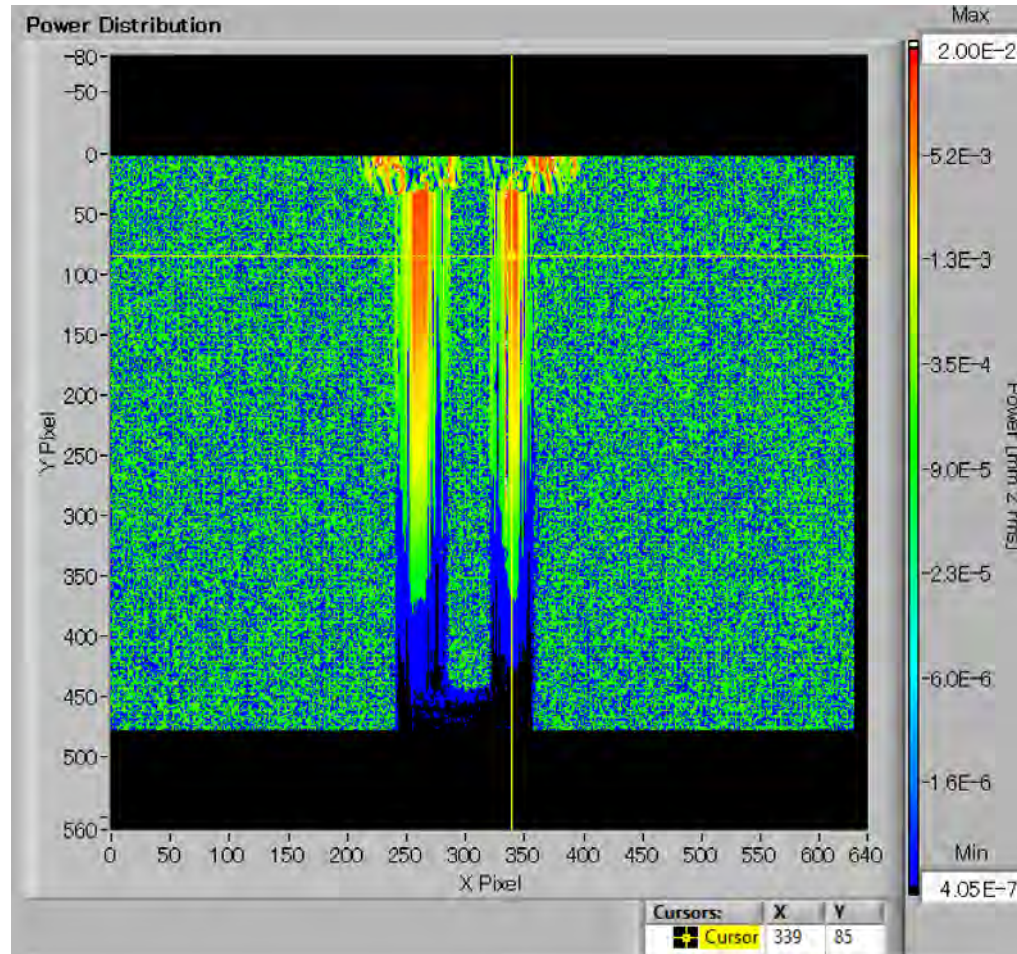


変位の時間変化

1次モードのパワーと位相の分布

パワー分布

位相分布



X	339	Y	85
Frame	375		
Brightness	17		
Height	1.78E-1		
Frequency	137.62		
Power	7.47E-3		
Phase	-1.008		
Amplitude	122E-3		

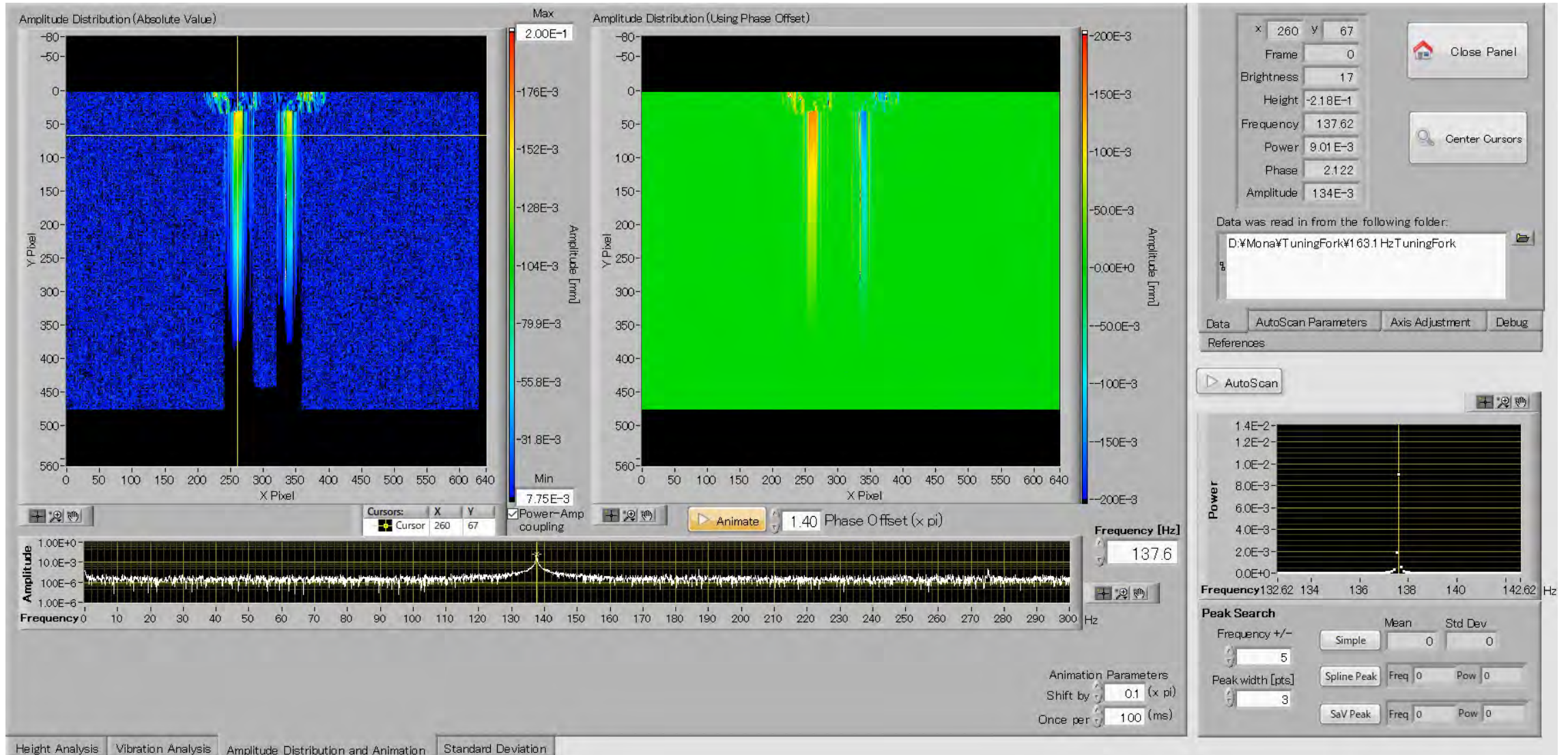
Selected Pixel Specification

Power and Phase Distribution Graph

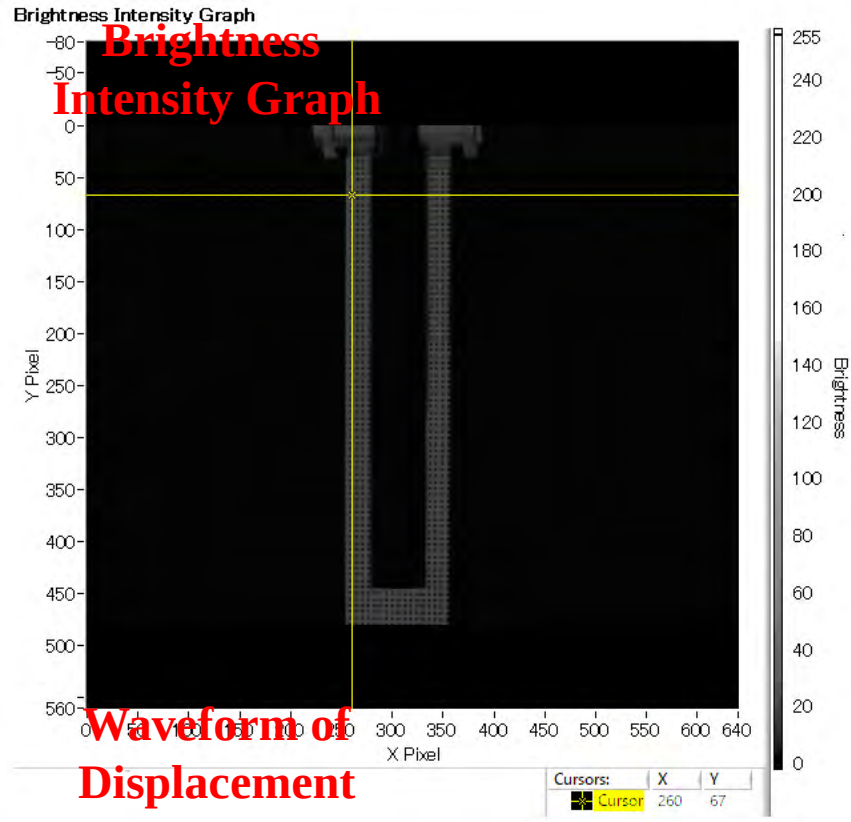
1次モードの1サイクルの変化アニメーション表示

振幅分布

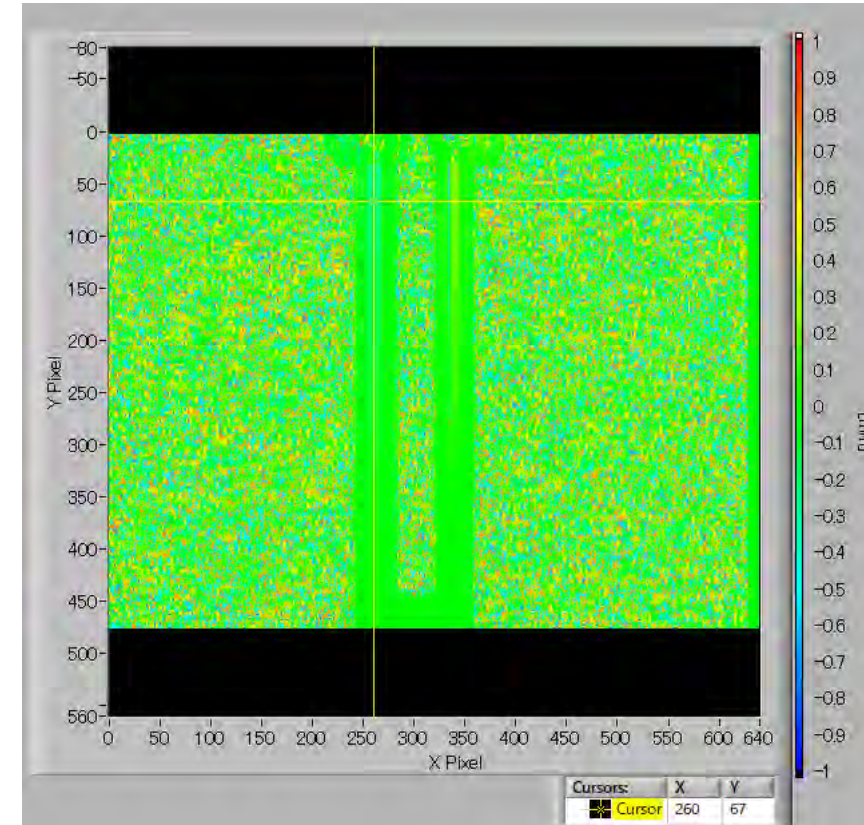
変位分布の1サイクル変化



輝度分布

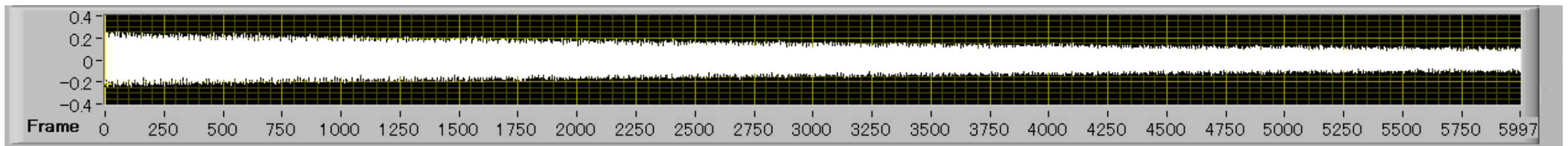


変位分布



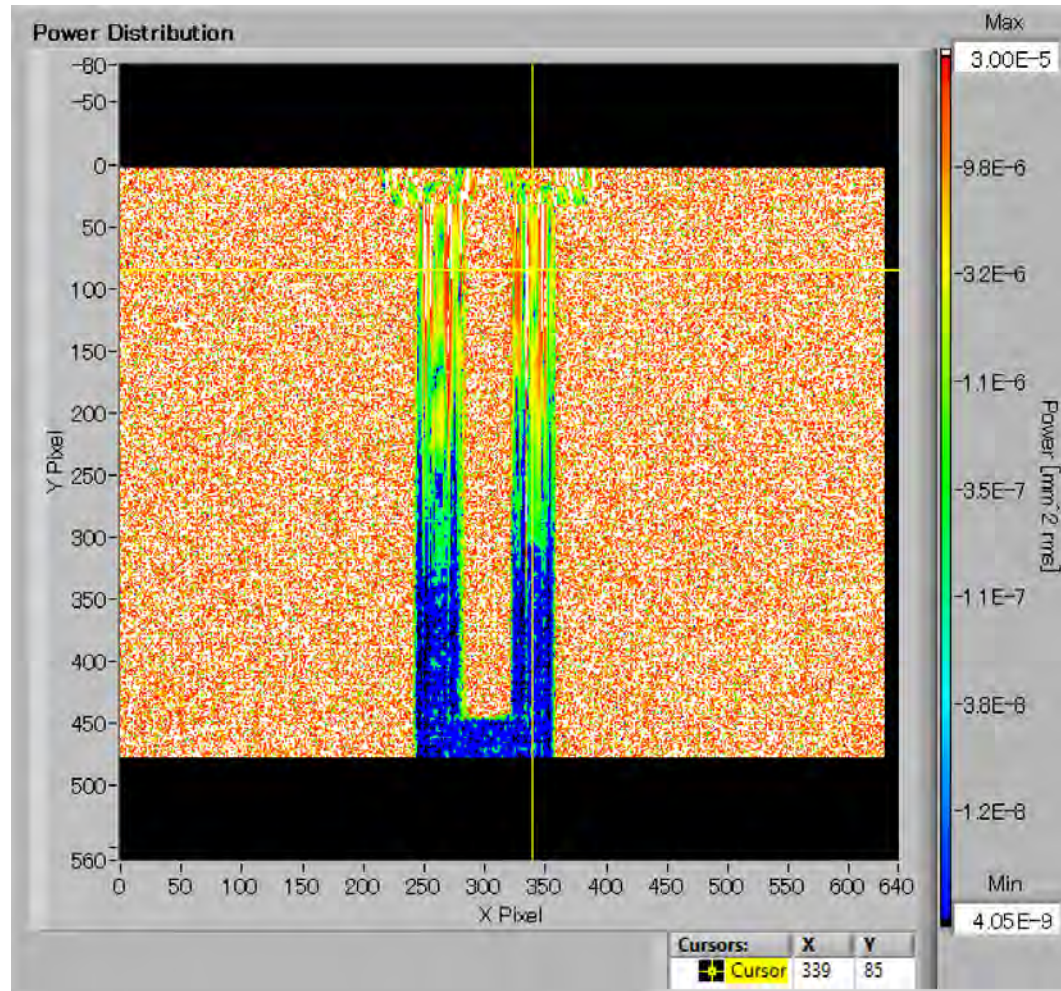
Graph of Displacement in X direction

変位の時間変化

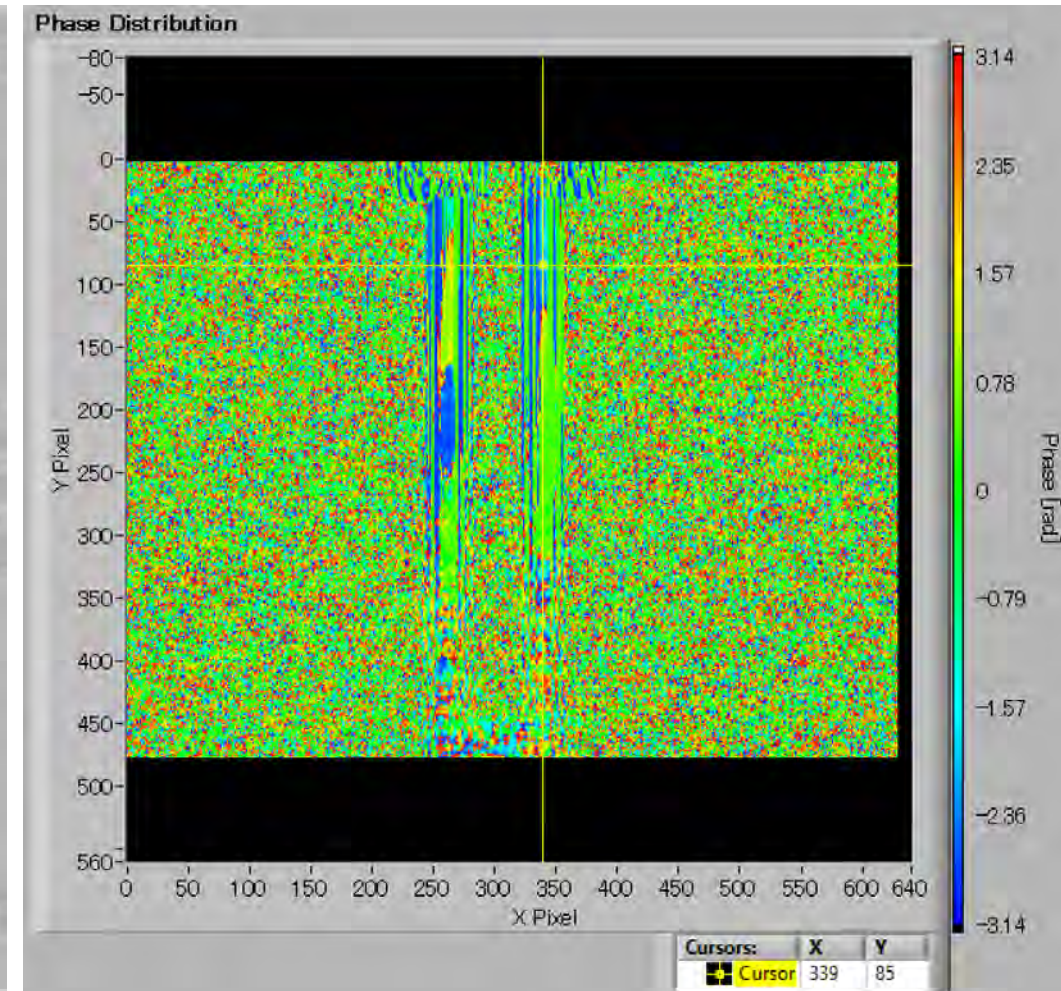


2次モードのパワーと位相の分布

パワー分布



位相分布



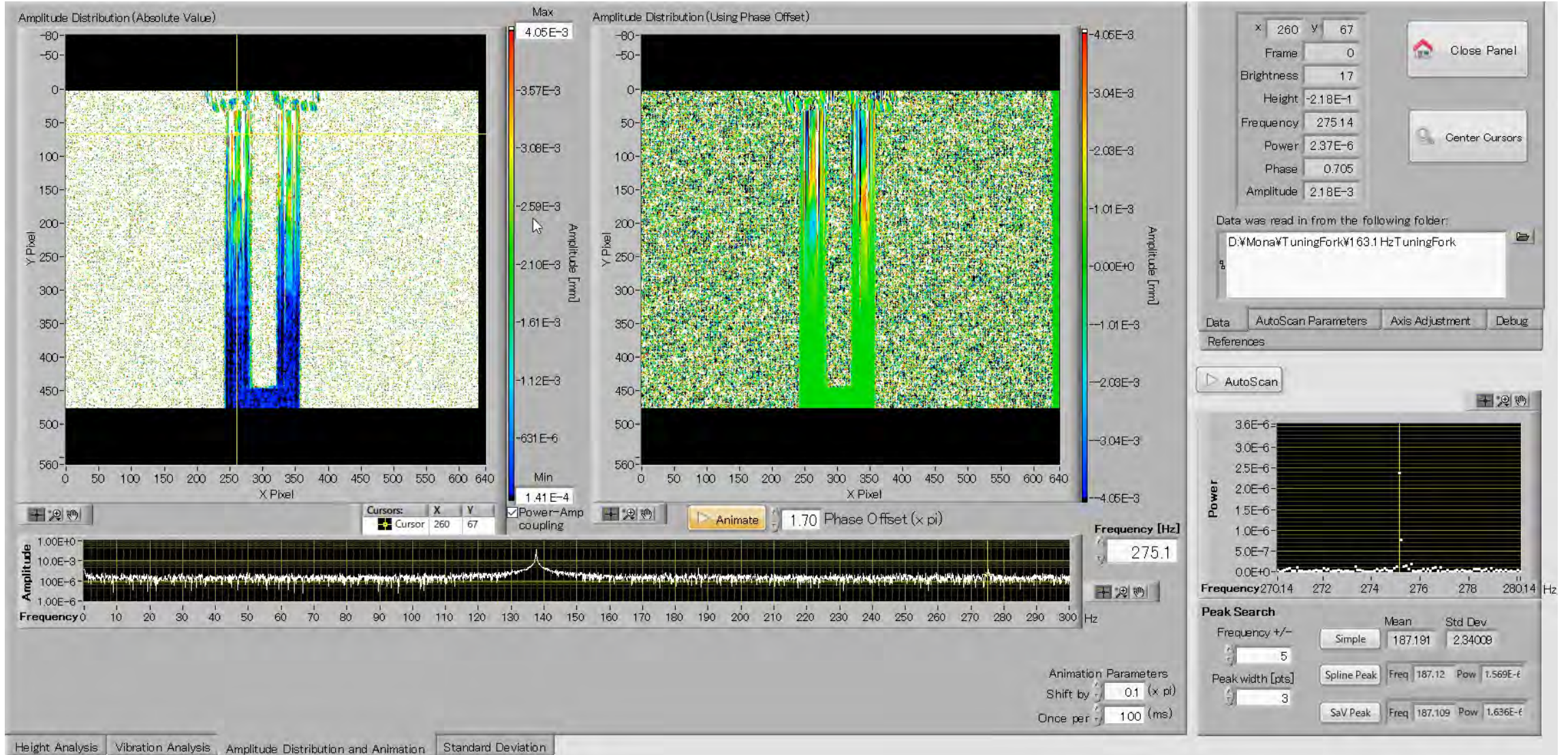
Selected Pixel Specification

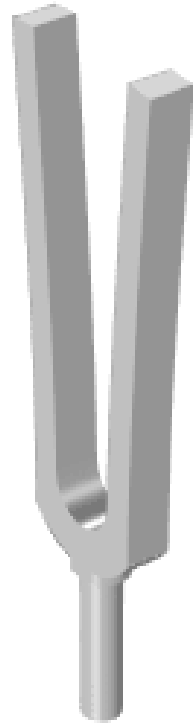
Power and Phase Distribution Graph

2次モードの1サイクルの変化アニメーション表示

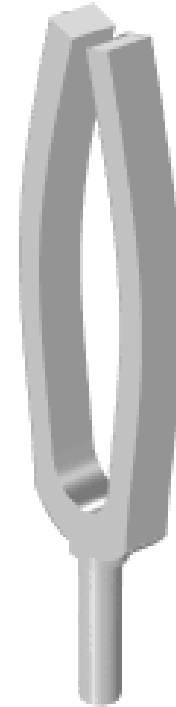
振幅分布

変位分布の1サイクル変化





1 次モード



2 次モード

- 高速全画素モーションキャプチャー ⇒ 人体の運動解析
 - ⇒ 健康診断法
 - ⇒ 介護見守り
- 振動解析による欠陥検査 ⇒ インフラの検査と延命化
 - ⇒ 解体中のビルなどの安全確認
- 振動解析
 - ⇒ 振動物体の形状計測
 - ⇒ 広領域の平面度計測
- バッチ解析 ⇒ オンライン解析（5 Gの利用）
- 機器販売 ⇒ 計測サービス

1. 森本吉春, 1 ピッチ位相解析(OPPA)法による高速高精度形状・変形・振動計測, 非破壊検査, Vol.67, No.12, (2018). pp.601-608
2. Morimoto, Y., Masaya, A., Ueki, M., High-speed 3D shape measurement by one pitch phase analysis method using brightness values in small square area of single-shot image, Opt. Lasers Eng., Vol. 113 (2019), pp. 38–46,
3. Morimoto Y., High-Speed Measurement of Shape and Vibration: Whole-Field Systems for Motion Capture and Vibration Modal Analysis by OPPA Method, Sensors, Vol.20, No.15 (2020), 4263; DOI:10.3390/s20154263
4. 森本吉春, パーシグ ライオネル, ヤディ モナ, 植木将貴, 桎谷明大, 振動分布計を用いた自動車のドアとエンジンヘッドの振動分布計測, 日本機械学会論文集, 投稿中
5. Yadi, M., Morimoto, Y., Ueki, M., Takaya, Y., In-plane vibration detection using sampling moiré method, J. Phys. Photonics 3 024005 (2021), DOI: 10.1088/2515-7647/abe4ab

全空間コンソーシアム ありがとうございました

4 Dセンサー(株)

和歌山本社

〒640-8550 和歌山市梅原579番地1

ノーリツプレシジョンビル1F

<http://www.4d-sensor.com/>

info@4d-sensor.com

電話：073-454-1004

IPROS（資料ダウンロード）

<https://premium.ipros.jp/4d-sensor/>

東京オフィス

〒130-0003 東京都墨田区横川1丁目16番
3号横川倉庫 Center of Garage

森本 吉春（和歌山大学名誉教授）

4 Dセンサー(株) 会長 CEO

morimoto@4d-sensor.com

携帯電話：090-9993-6972