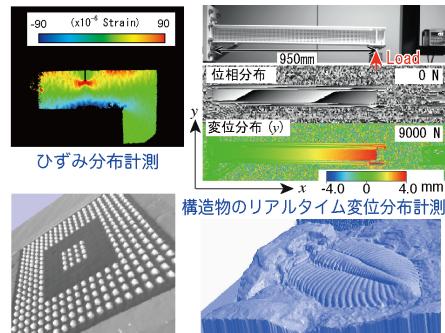


大型構造物の変位分布を画像を使って遠隔からリアルタイムに計測する技術の紹介

和歌山大学システム工学部光メカトロニクス学科
藤垣元治

主な研究テーマ



目標
★他とは違うこれまでにない手法を提案する。
★世界一の性能をめざす。(計測精度・分解能・高速性など)

高速かつ高精度な三次元形状計測
外観検査、欠陥検出、インフラ構造物の延命化、
防災への適用、医療への適用

内 容

◆格子パターンの位相解析

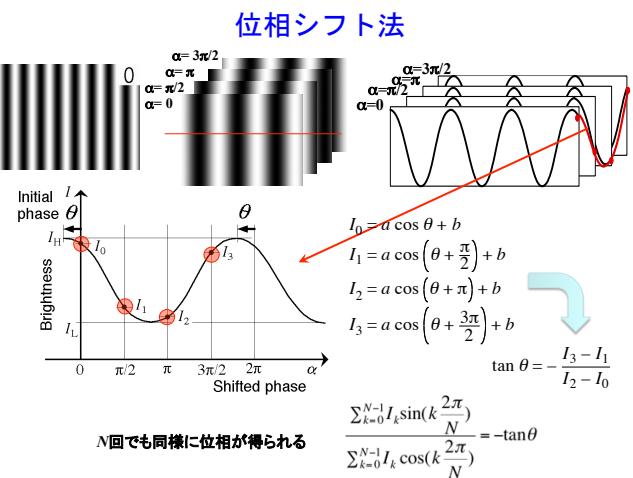
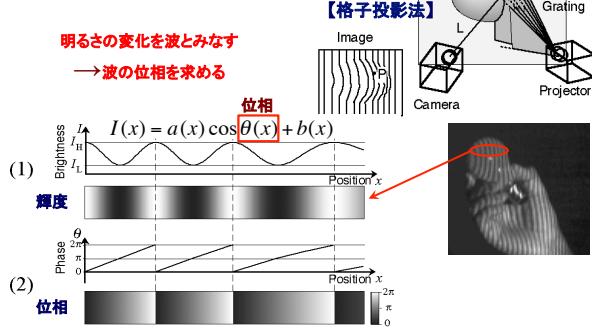
- 位相シフト法
- サンプリングモアレ法
- 全空間テーブル化手法（簡単に精度よく計測できる）

◆サンプリングモアレ法による三次元計測、変位分布計測、ひずみ分布計測の紹介

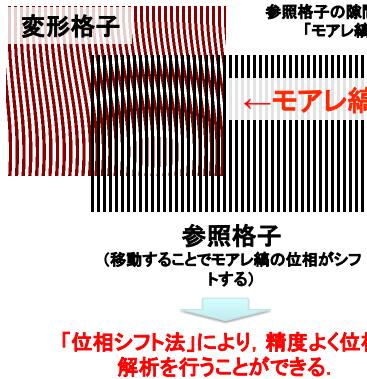
- サンプリングモアレカメラによるリアルタイム三次元計測
- 三次元計測とひずみ分布の動的同時計測
- その他の応用
 - ・構造物の変位分布計測、たわみ角分布計測など

格子パターンの位相解析 位相シフト法 サンプリングモアレ法 全空間テーブル化手法

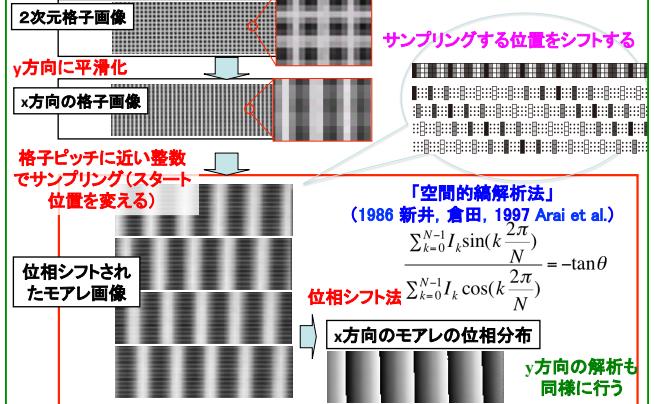
縞画像における位相解析 手法



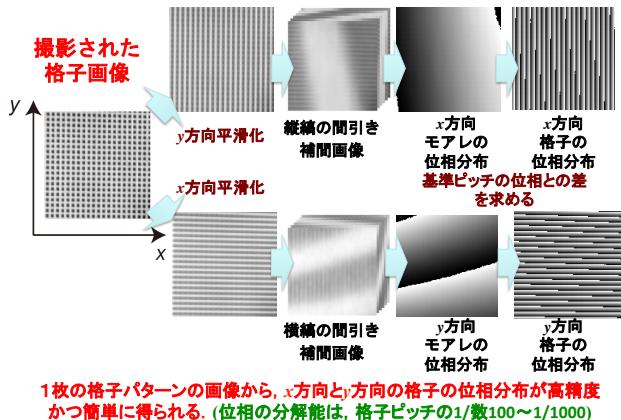
モアレ縞の発生と位相シフトの原理



サンプリングモアレ法のアルゴリズム (モアレの位相分布の算出)



サンプリングモアレ法による二次元変位計測



元格子の位相差とモアレパターンの位相差

モアレの縞次数は元格子の格子番号と基準格子の格子番号の差である。

$$N_m = N_g - N_R$$

位相 格子番号 $\phi = 2\pi \cdot N$ $\phi_m = \phi_g - \phi_R$

モアレの位相は元格子の位相と基準格子の位相の差である。

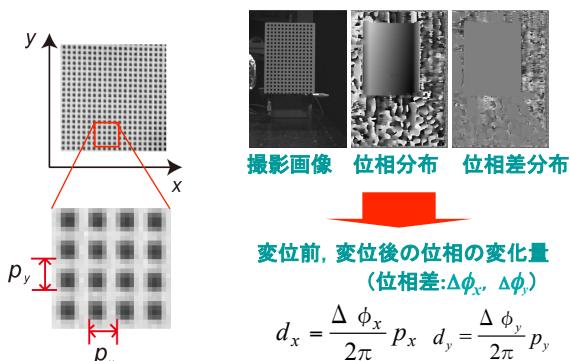
$$\begin{aligned} \text{変形前: } \phi_{m0} &= \phi_{g0} - \phi_R \\ \text{変形後: } \phi_{m1} &= \phi_{g1} - \phi_R \end{aligned} \Rightarrow \Delta \phi_m = \Delta \phi_g$$

変形前後における元格子の位相差(変位)はモアレ縞の位相差に相当する。

モアレ縞の位相差を解析することで元格子の位相差(変位)を測定することができる。

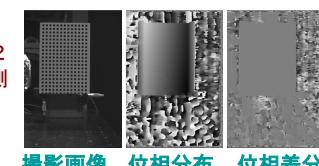
10

格子の位相差から変位への換算



サンプリングモアレ法の特徴

1. ワンショットで撮影した画像から、x方向とy方向の2次元の変位が同時に計測できる。

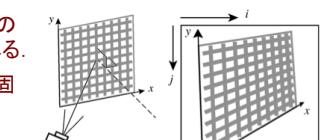


2. 変位計測分解能は、格子ピッチの1/100から1/1000程度が得られる。

3. 計測対象側は、格子パターンを固定するだけよい。

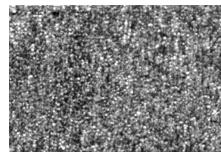
4. キャリブレーションが不要

・ひとつのカメラを用いた変位計測やたわみ角計測の場合
・対象物に固定されているピッチが既知の格子を用いるため



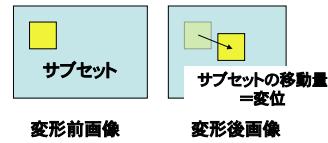
サンプリングモアレ法による 三次元計測, 变位分布計測, ひずみ分布計測の紹介

デジタル画像相関法との比較



- デジタル画像相関法(Digital Image Correlation: DIC)
 - ランダムパターンを利用
 - 空間分解能はサブセットのサイズに依存

- サンプリングモアレ法
 - 格子パターンを利用
 - 空間分解能は格子2ピッチ



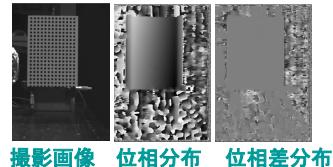
座標と变位量の両方が同時に得られる。



・キャリブレーションが不要
・变位, 回転角, ひずみが得られる

サンプリングモアレ法の特徴

- ワンショットで撮影した画像から, x 方向と y 方向の2次元の変位が同時に計測できる.

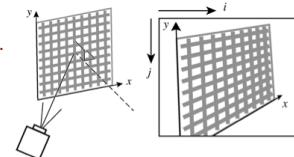


$$\text{変位} \frac{\text{ピッチ}}{2\pi} \Delta\phi_x$$

$$d_x = \frac{P_x}{2\pi} \Delta\phi_x$$

$$d_y = \frac{P_y}{2\pi} \Delta\phi_y$$

- 変位計測分解能は, 格子ピッチの1/100から1/1000程度が得られる.

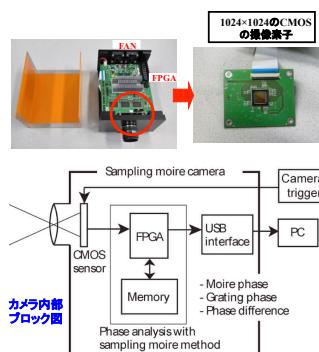


- 計測対象側は, 格子パターンを固定するだけよい.

- キャリブレーションが不要

- ひとつのカメラを用いた変位計測やたわみ角計測の場合
- 対象物に固定されているピッチが既知の格子を用いるため

サンプリングモアレカメラ



サンプリングモアレカメラとは

高速に画像を撮影し、サンプリングモアレ法を用いて格子画像をカメラ内で解析し高速に位相差分布を出力するカメラ。

性能

- 精度(分解能)
格子ピッチの千分の一程度.

例) 4mm ピッチの時 4μ 程度の誤差

- 画像の出力速度

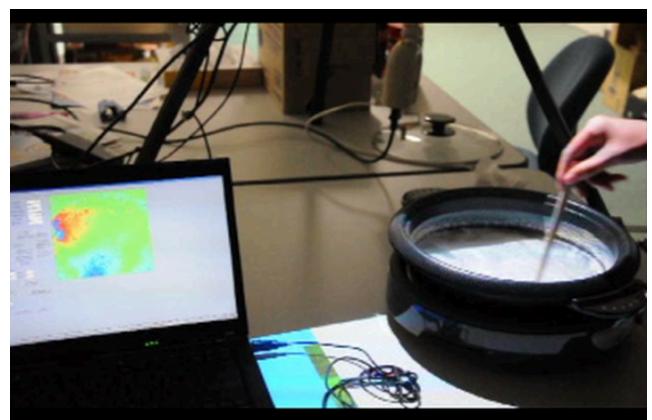
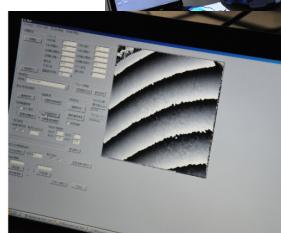
3.5fps 1024×1024 pixels
71fps 128×128 pixels
(外部トリガ時 50 fps)

液体表面の高さ分布計測

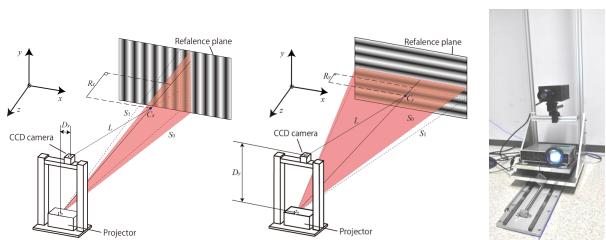
プロジェクタによって, 固定した格子を投影した.

サンプリングモアレカメラで撮影し, 位相差分布を出力した.

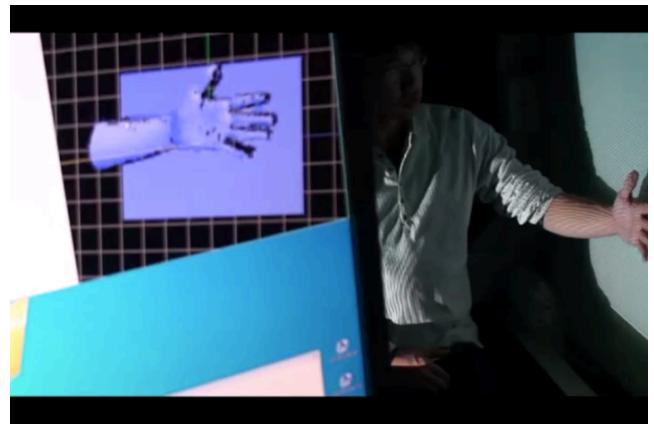
(位相差=高さに対応)



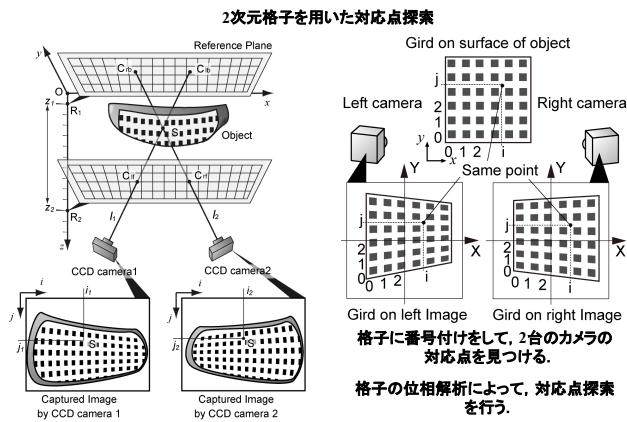
二次元格子を用いたリアルタイム三次元計測



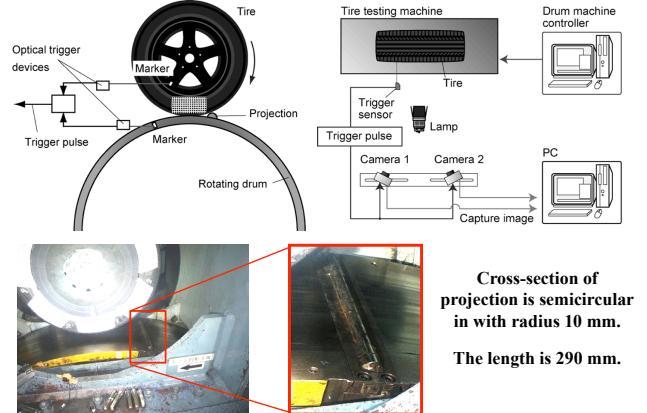
- ◆ 格子投影法で位相から形状計測を行うとき、計測可能な範囲は位相が 2π 变化するまでである。
- ◆ 2方向の格子を用いることで、その範囲を広げることができる（位相接続を行うことができる）



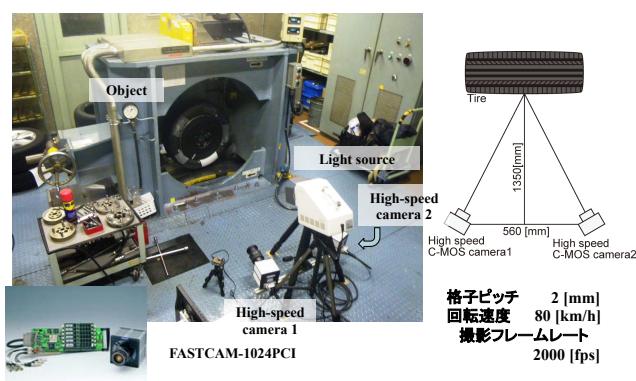
三次元形状・ひずみ分布計測の原理



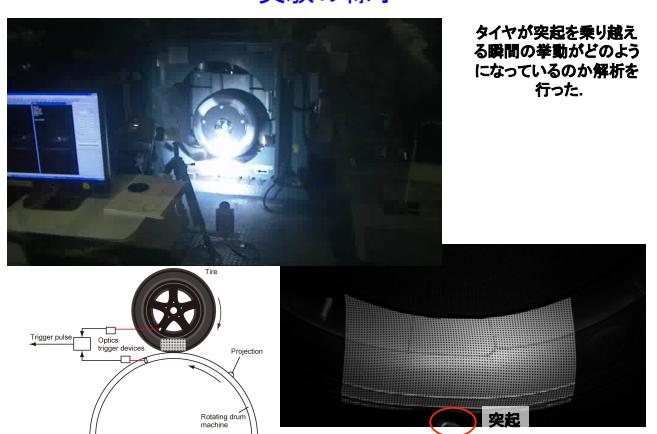
回転するタイヤの形状・ひずみ分布の動的同時計測



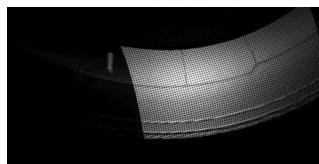
高速度カメラ利用による タイヤの形状・ひずみ分布測定実験



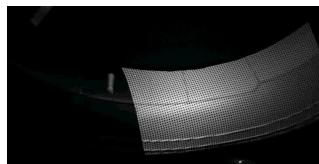
実験の様子



時系列の画像（カメラ 1）



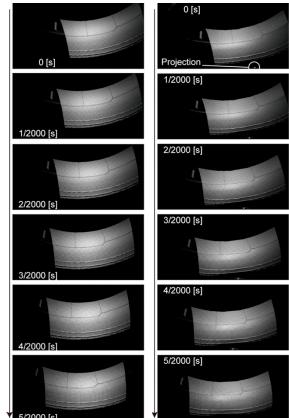
突起なし



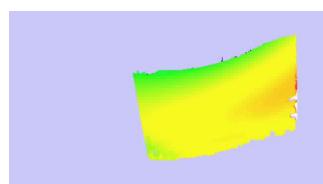
突起あり

突起なし

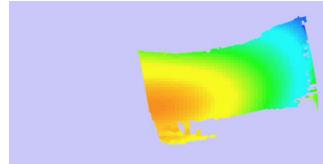
突起あり



高さ分布（カメラ方向の距離画像）



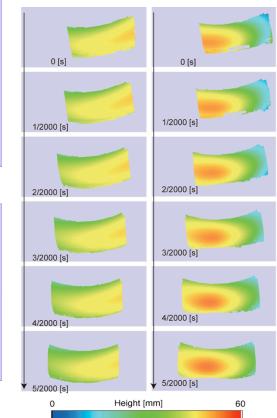
突起なし



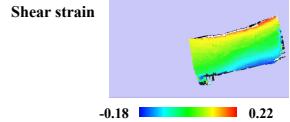
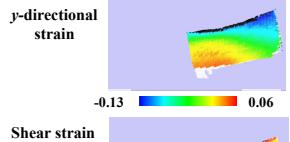
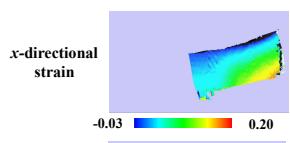
突起あり

突起なし

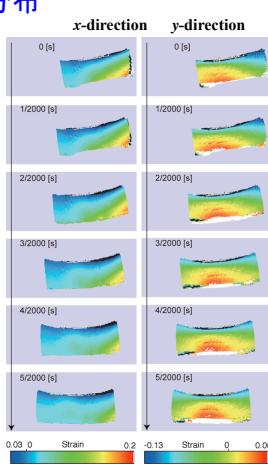
突起あり



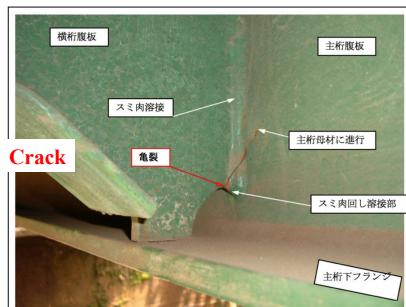
ひずみ分布



(ひずみ算出の初期値は、突起が無い場合の対応する時刻における各対応点の座標とした。)



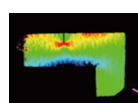
Crack on a railroad bridge



サンプリングモアレ法の その他の応用

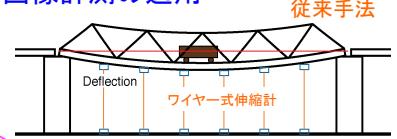
橋梁検査への画像計測の適用

従来手法



◆ひずみ分布

- ひずみ分布からクラックの有無を見つける。

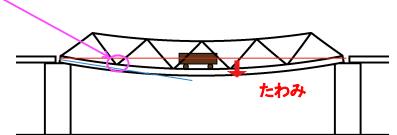


たわみ

◆たわみとたわみ角

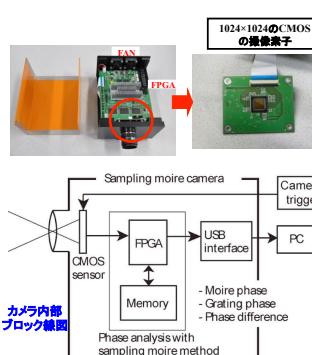
- 広い範囲で構造部材の欠陥を見つける。

遠くからカメラで撮影するだけで計測できれば、非常に効率がよい。



たわみ角
欠陥

サンプリングモアレカメラ



サンプリングモアレカメラとは
高速に画像を撮影し、サンプリングモアレ法を用いて格子画像をカメラ内で解析し高速に位相差分布を出力するカメラ。

- ◆ 精度(分解能)
格子ピッチの千分の一程度。
例) 4mm ピッチの時 4μ 程度の誤差
- ◆ 画像の出力速度
3.5fps 1024×1024 pixels
71fps 128×128 pixels
(外部トリガ時 50fps)

研究の必要性

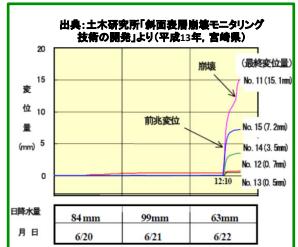
背景(必要性)

- ◆ 崩壊災害の前兆現象を捉えることができれば、多くの命を救うことができる。
- ◆ 前兆変位を遠隔から高分解能で定量的に計測できる技術が求められている。
(早期警戒、データベース構築)



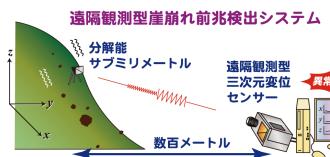
研究開発目的

- ◆ 斜面土砂の三次元変位をサブミリメートルの分解能でリアルタイムに検出できる遠隔観測型崖崩れ前兆検知システムを開発する。



数mmの前兆変位を検出して警報を出せば、避難することができる。

サンプリングモアレカメラの開発の経緯



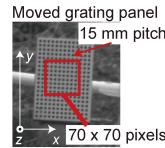
- ◆ 従来技術との違い(特長)
 - ◆ 三次元変位が高精度で定量的に計測できる。(危険度の判定ができる)
 - ◆ 斜面の変位の分布が計測できる。(崩落現象の研究への利用)
 - ◆ 設置が容易でメンテナンスがほとんど不要

国土交通省平成21年度建設技術研究開発助成制度(2009年7月から2011年3月)
「三次元サブミリメートル変位計測による遠隔観測型崖崩れ前兆検出システムの開発」
(和歌山大学、財団法人雑賀技術研究所、一般社団法人モア研究所、アイレス電子工業株式会社)
で用いるカメラとして開発。

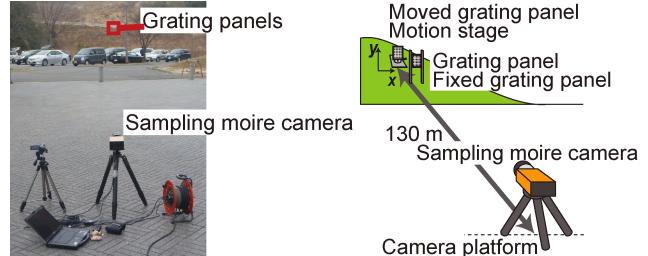
屋外での外乱を低減するために、多くの画像を撮影して、平均化する。
→ 高速に解析して結果を出す → ハードウェア化

斜面の微小変位計測以外でも、多くの用途で使えそう！

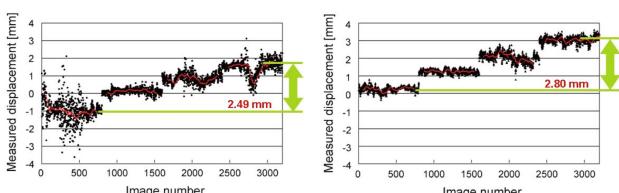
精度確認実験 (距離 : 130m)



カメラと格子パネルの距離 : 130 m
格子ピッチ : 15 mm
与える変位:
x方向とy方向に、0から3.0 mmまで1.0 mmずつ

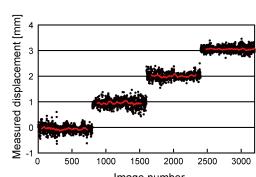


変位計測結果 (距離 : 130m)

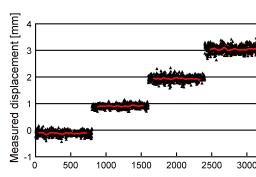


計測誤差は0.5mm

計測結果(固定杭との差を求めた場合)

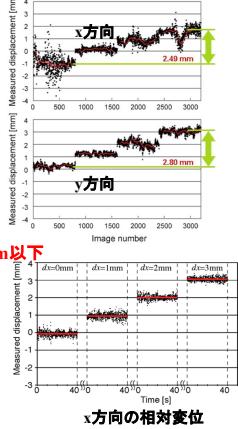
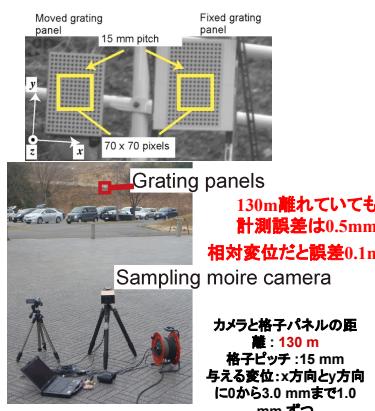


x方向(70×70画素領域)
誤差13μm、標準偏差130μm

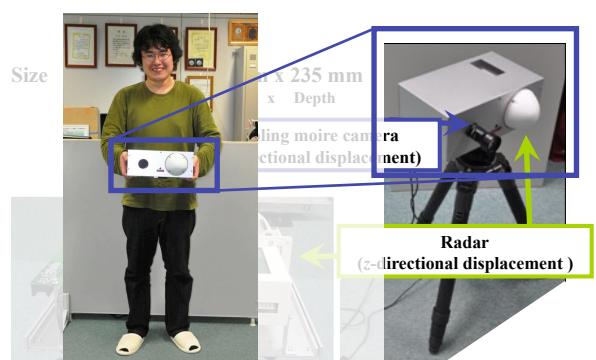


y方向(70×70画素領域)
誤差63μm、標準偏差93μm

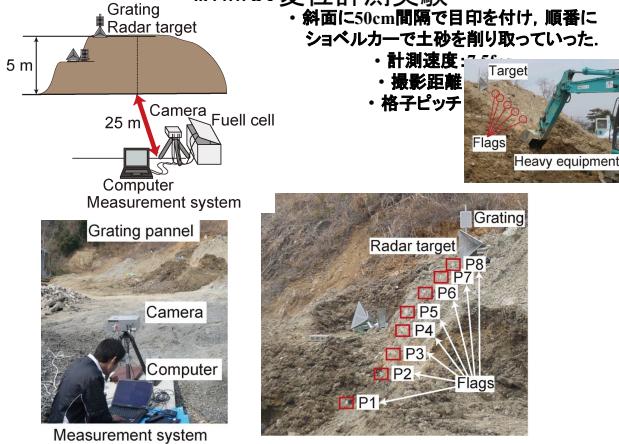
遠隔からの変位計測実験（距離：130m）



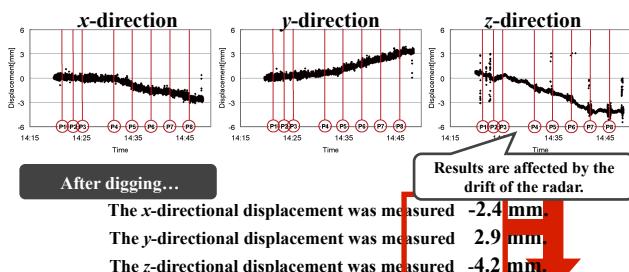
三次元微小変位計測システム



斜面の変位計測実験



斜面の変位計測実験(計測結果)

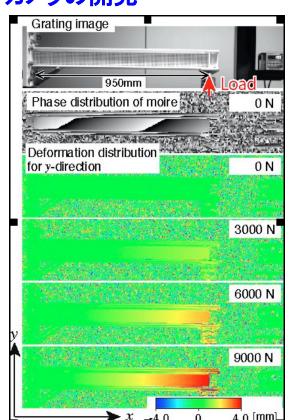


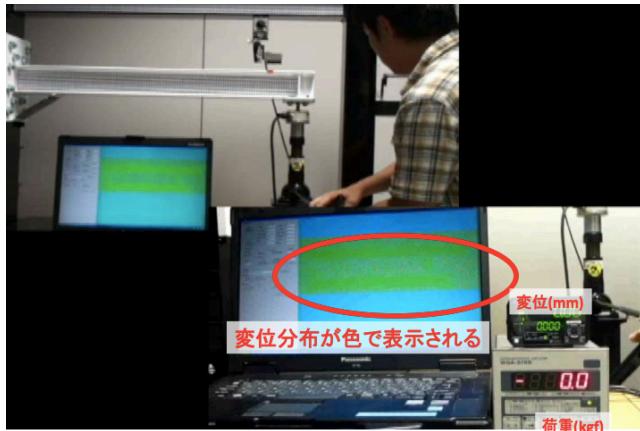
The measurement system was verified the feasibility of measuring landslide.

構造物のリアルタイム変位分布計測ができるサンプリングモアレカメラの開発

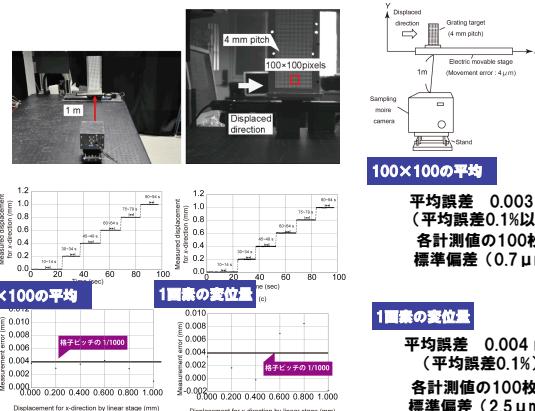
撮影するだけでx方向とy方向の変位分布が同時にリアルタイムに出力される。

鉄骨の梁にジャッキで変位を与え、サンプリングモアレカメラを用いて計測した。格子のピッチ: 8mm 加重: 0 → 9000 N





計測精度の確認



大型構造物への適用（背景と目的）

◆サンプリングモアレ法の長所

- 遠くからであっても格子パターンが撮影できればよい
- x方向とy方向の変位分布と座標分布がそれぞれ得られる。
- キャリブレーションが不要



◆大型構造物の変位計測に適している。

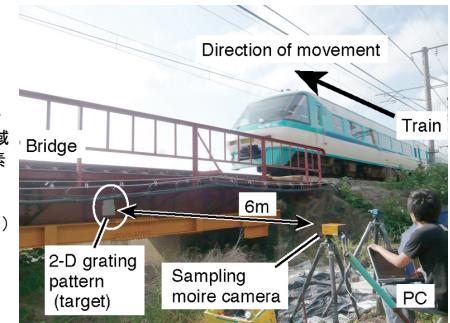
◆変位だけでなく、たわみ角も算出できる。

目的：

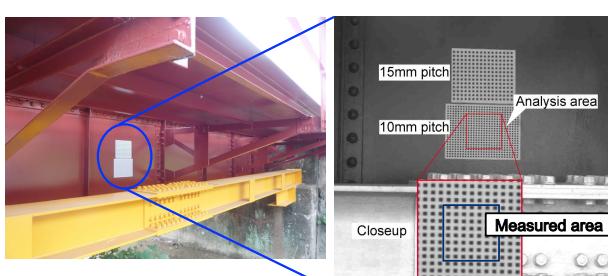
- 大型構造物（橋梁、ビルなど）に適用する。
- たわみ角分布計測に適用する。

実際の橋梁での変位計測

計測対象：約90年前（大正11年）に造られた支柱間の長さ9.6 mの鋼鉄製の橋梁



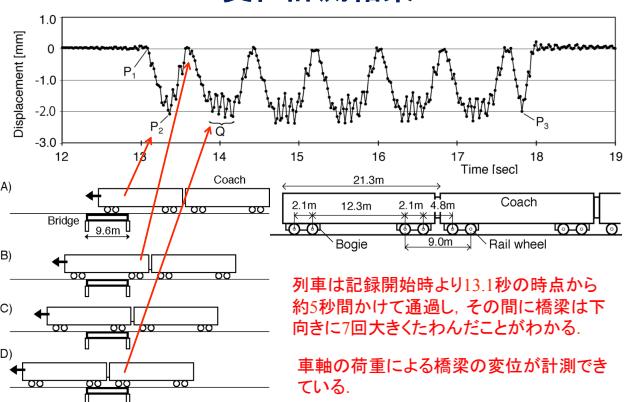
サンプリングモアレカメラの撮影画像

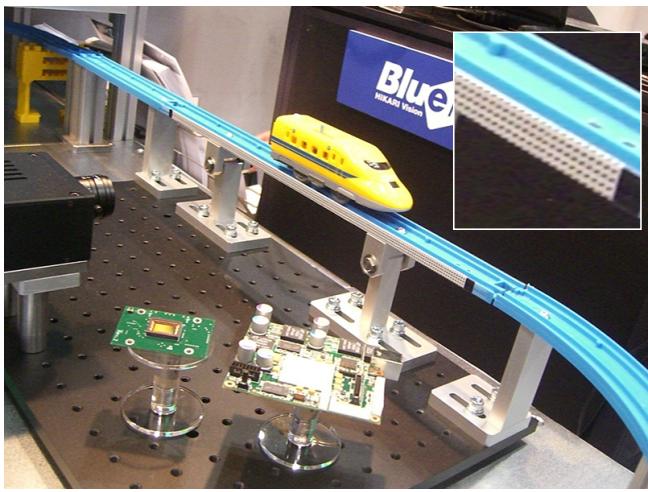


赤枠は計測時に撮影する128×128画素の領域

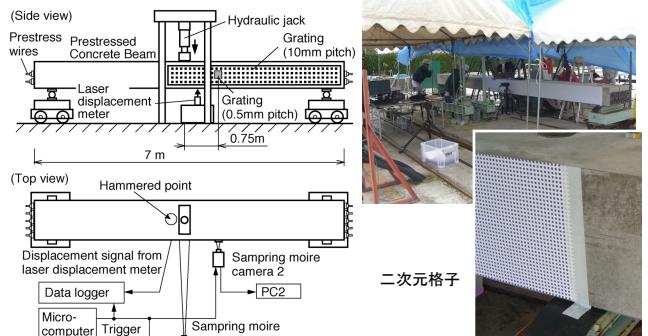
▶ 評価は領域中の70×70画素で行った

変位計測結果



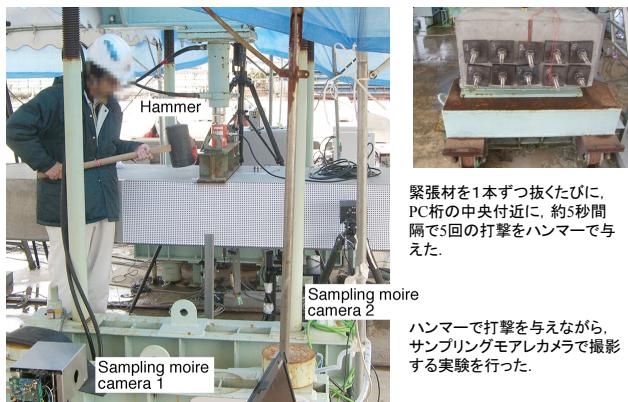


計測実験装置

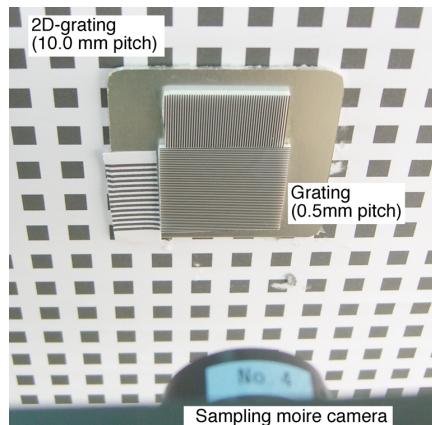


- ・サンプリングモアレカメラによって、1/50秒間隔で撮影した。
- ・同時に、レーザー変位計でも変位を計測した。

打撃を加える様子

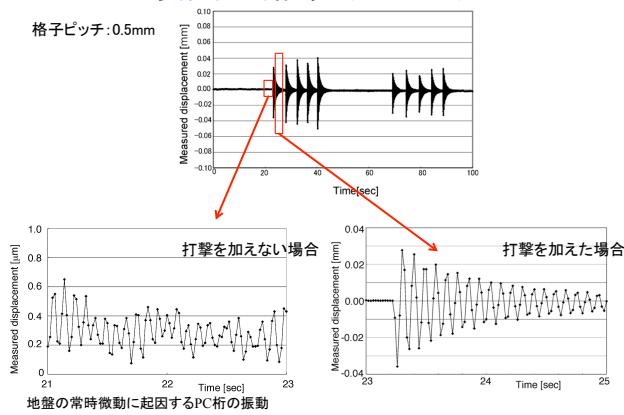


撮影する格子パネル (Camera2)

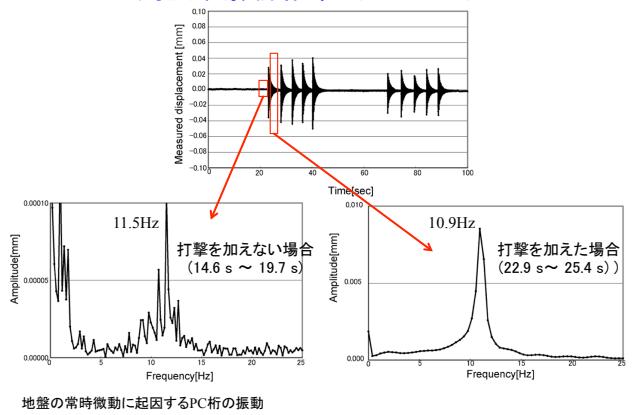


ピッチ0.5 mmの1次元格子パネルを貼付けた。
サンプリングモアレカメラで撮影
変位計測

変位計測結果 (Camera2)



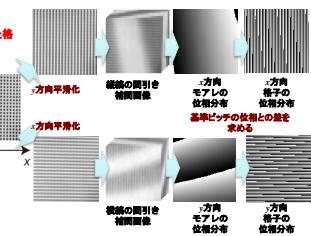
周波数解析結果 (Camera2)



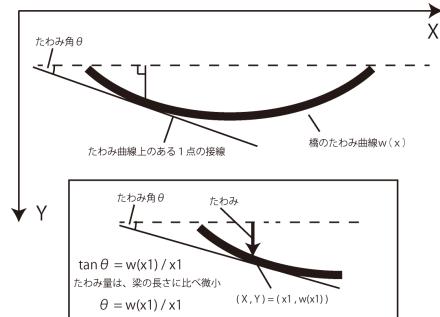
たわみ角計測への適用

サンプリングモア法は、1枚の2次元格子画像から、
 ・x方向の変位、y方向の変位 (変形前後の位相差より)
 ・x座標、y座標 (格子の位相とピッチより)
 が同時に得られる。

変位だけでなく、ひずみや、たわみ角も得られる。
 たわみ角計測を試す。



たわみ角



橋梁の健全性を評価する指標のひとつ
 (1/1000 rad程度の分解能で計測したい)

たわみ角の算出方法

$$\text{たわみ角 } \Delta\theta = \frac{Y'}{X'}$$

X' は、2点A,Bの変形後のx方向の格子の位相 $\phi_x(i,j)$ の差より、次のようになる。 p_x x 方向の格子のピッチとする。

$$X' = p_x \{ \phi_x(i_B, j_B) - \phi_x(i_A, j_A) \}$$

Y' は、2点A,Bのy方向の変位量 $d_y(i,j)$ から次のように表すことができる。

$$Y' = d_y(i_B, j_B) - d_y(i_A, j_A)$$

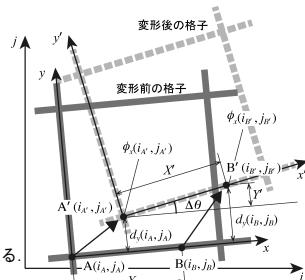
点AB間の画素数を Δi とすると次のようにになる。

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \frac{Y'}{X'} = \frac{d_y(i_B, j_B) - d_y(i_A, j_A)}{p_x \{ \phi_x(i_B, j_B) - \phi_x(i_A, j_A) \}} \\ &= \frac{d_y(i_B, j_B) - d_y(i_B, j_A)}{\Delta i} / \frac{p_x \{ \phi_x(i_B, j_B) - \phi_x(i_A, j_A) \}}{\Delta i} \end{aligned}$$

y方向の変位分布のi方向の傾き

x方向の座標分布のi方向の傾き

サンプリングモア法で、それぞれ分布として得られる。



たわみ角の算出方法

$$\Delta\theta = \frac{d_y(i_B, j_B) - d_y(i_A, j_A)}{\Delta i} / \frac{p_x \{ \phi_x(i_B, j_B) - \phi_x(i_A, j_A) \}}{\Delta i} / (2\pi)$$

y方向の変位分布のi方向の傾き x方向の座標分布のi方向の傾き

$$\Delta\theta = \frac{\partial d_y(i, j)}{\partial i} / \left\{ p_x \frac{\partial \phi_x(i, j)}{\partial i} / (2\pi) \right\}$$

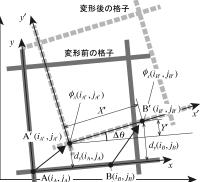
y方向の変位分布を平面近似
 $d_y(i, j) = ai + bj + c$

i方向の傾き $\frac{\partial d_y(i, j)}{\partial i} = a$ x方向の座標分布を平面近似
 $\phi_x(i, j) = di + ej + f$

i方向の傾き $\frac{\partial \phi_x(i, j)}{\partial i} = d$

格子の位相が同時に得られる
 →各画素の座標がわかる

$$\Delta\theta = 2\pi \cdot \frac{a}{p_x d}$$



最小2乗法を用いて平面近似を行う。
 $\phi_x(i, j)$
 $\frac{\partial \phi_x(i, j)}{\partial i}$

たわみ角の計測実験 (回転ステージによる精度確認)

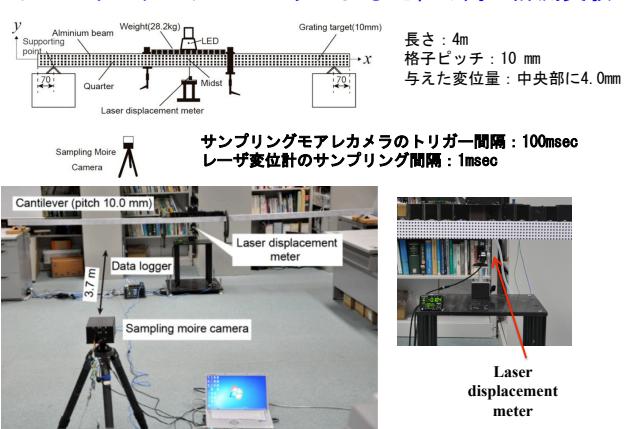


格子ピッチ : 4mm
 回転ステージの分解能 : 0.005度
 間引き数 : 9画素

Given angle	Measured angle	Error		
[deg]	[deg]	[rad]	[deg]	[rad]
0.005	0.006	0.0001	0.001	0.0000
0.010	0.011	0.0002	0.001	0.0000
0.025	0.026	0.0005	0.001	0.0000
0.050	0.056	0.0010	0.006	0.0001

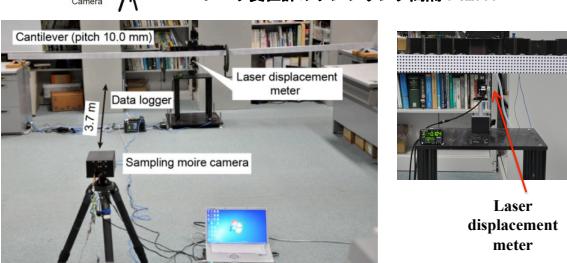
たわみ角を1/1000ラジアンの誤差で計測できた。

サンプリングモアカメラによるたわみ角の計測実験

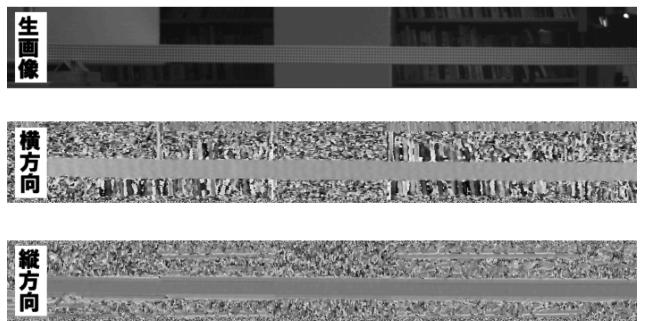


長さ : 4m
 格子ピッチ : 10 mm
 与えた変位量 : 中央部に4.0mm

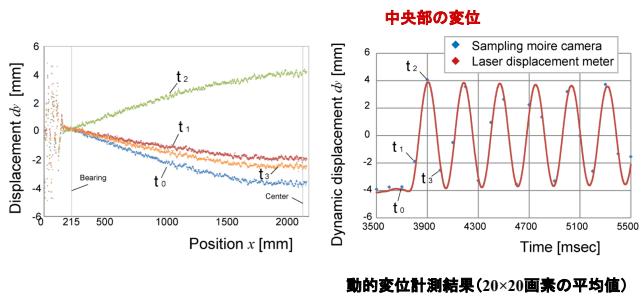
サンプリングモアカメラのトリガー間隔 : 100msec
 レーザ変位計のサンプリング間隔 : 1msec



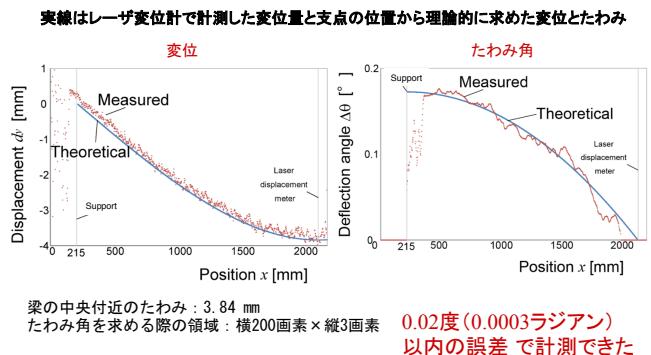
Laser displacement meter



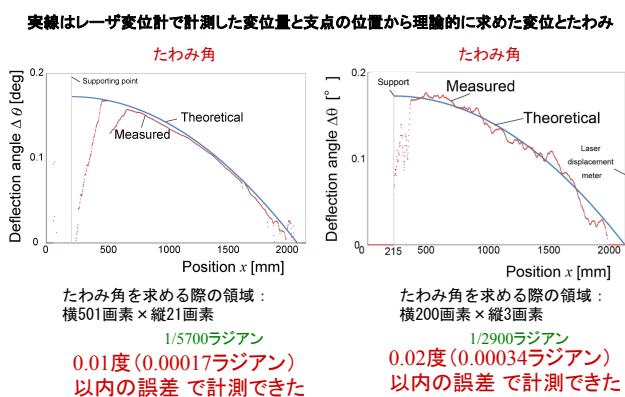
計測結果（振動時のたわみ分布）



計測結果（たわみ角分布）



計測結果（たわみ角分布）



PC桁の試験装置による変形の計測



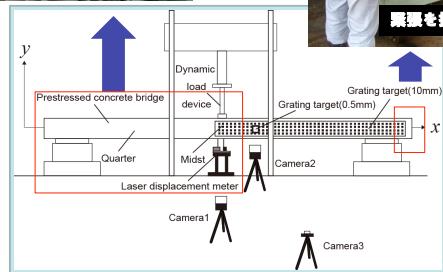
荷重計による変形の計測



振動



たわみ



Camera1による動的な変形計測の結果

Number of stress	Measured displacement by Camera 1 [mm]	Measured displacement by Laser displacement meter [mm]	Error [mm]	Measured displacement by Laser displacement meter [mm]	Error [mm]
10	-	-	-	-	-
9	-0.72	-0.69	0.03	-0.69	0.03
8	-	-0.76	-	-0.74	-
7	-0.84	-0.81	0.03	-0.79	0.05
6	-0.93	-0.99	0.06	-0.95	0.02
5	-	-1.15	-	-1.15	-
4	0.19	0.20	0.01	0.20	0.01
3	0.13	0.12	0.01	0.12	0.01
2	-0.12	-0.12	0.00	0.12	0.00
1	-	-0.23	-	-0.24	-
0	-0.57	-0.57	0.00	-0.56	0.01

レーザ変位計により求めた理論値との動的たわみの誤差は平均0.02mm(格子ピッチの1/500)。

Camera2による振動測定の結果

1/2部分	Measured vibration by Camera 2 [Hz]	Measured displacement by Laser displacement meter [Hz]	Error [Hz]
10	13.08	13.03	0.05
9	13.28	12.99	0.29
5	12.50	12.37	0.13
0	10.94	11.14	0.20



1/4部分	Measured vibration by Camera 2 [Hz]	Measured displacement by Laser displacement meter [Hz]	Error [Hz]
10	13.28	13.05	0.23
9	12.50	12.99	0.49
5	12.10	12.41	0.31
0	10.93	11.18	0.25

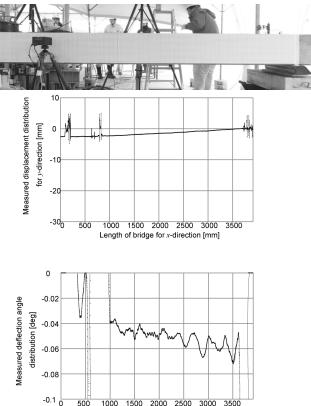
ドップラー振動計と比較して誤差が1~4%程度。

たわみ・たわみ角分布の計測結果

Load [kN]	Measured displacement by Camera 3 [mm]	Measured displacement by Laser displacement meter [mm]	Error [mm]
10.0	-2.64	-2.63	0.01
55.2	-18.9	-	-

Load [kN]	Measured angle by Camera 3 [deg]	Measured angle by Laser displacement meter [deg]	Error [deg]
10.0	0.07	0.06	0.01
55.2	-18.9	-	-

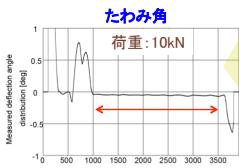
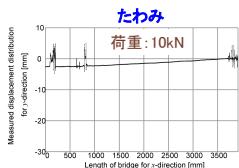
たわみ、たわみ角ともに高精度。



たわみ分布とたわみ角分布の計測結果



平滑化領域200×100画素

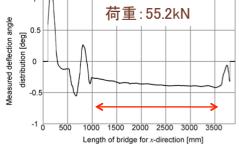
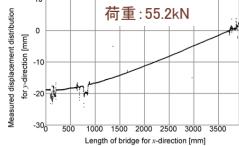


橋の中央における変位の比較

レーザー変位計
-2.63 mm
本装置 -2.64 mm
差 0.01 mm

橋の右端におけるたわみ角の比較

レーザー変位計
-0.06 度
本装置 -0.07 度
差 0.01 度
(1/5700ラジアン)

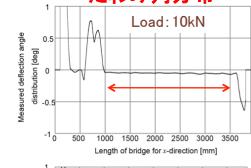
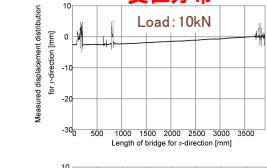


変位とたわみ角の計測結果

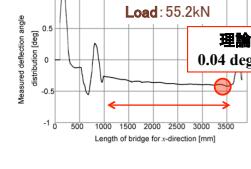
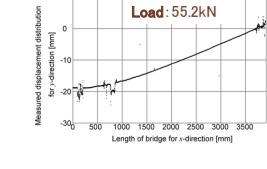


Averaging area size : 200×100 pixels

変位分布

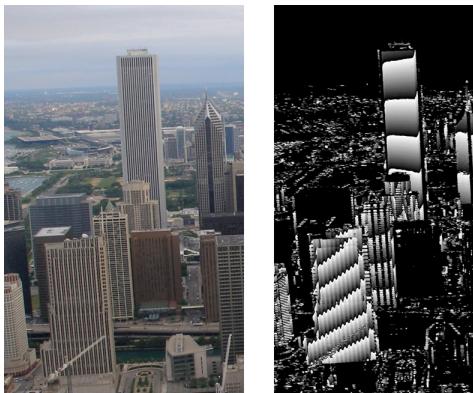


たわみ角分布

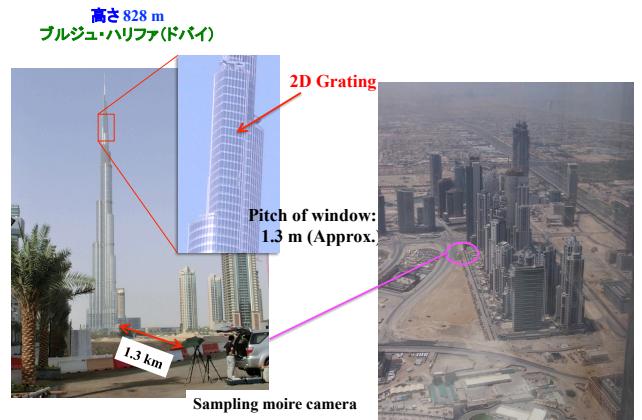


理論値との誤差:
0.04 deg (<1/1000 rad)

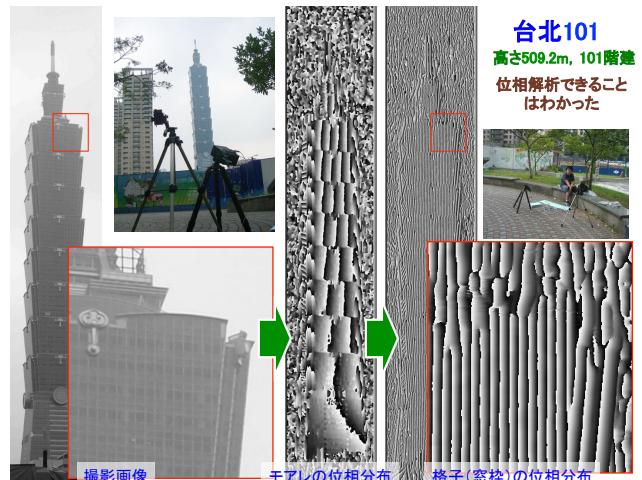
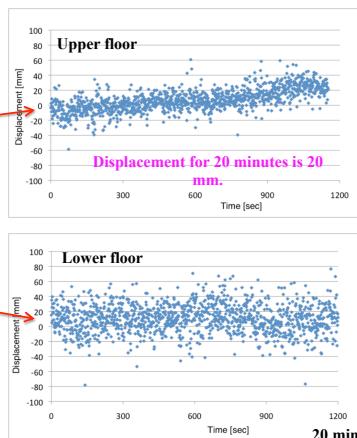
ビルの窓枠があれば変位が計測できる



世界一高い建物の変形計測



Frame rate : 10 fps



サンプリングモアレカメラの改良版 (本日のデモ)

Sampling Moiré Camera 2

- 筐体サイズ
 - SMC 130*85*180mm
 - SMC2 86*44*118mm



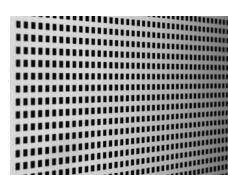
Copyright(C) 2013 Hikari Co., Ltd. All Rights Reserved

Sampling Moiré Camera 2

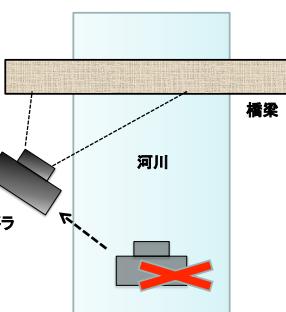
- 撮像素子ディスコン
- 7fps (1280*1024pixel*16bit)
- データ転送速度が遅い(USB2.0を使用)
 - ニーズ開拓用に改良型の開発
- 新規撮像素子(2048*1024pixel 横長に)
- データ転送高速化 (USB3.0を使用)
- 小型化 (専用設計)

斜めからの橋梁の計測でも
キャリブレーション無しで
計測可能

ただし、ピッチの差が
大きいと誤差が増える。



斜めからの撮影する場合の課題



重み付け位相解析法の提案

サンプリングモアレ法では、ピッチが大きくなると計測精度が低下する。

サンプリングモアレ法

格子ピッチ 4.0mm

実位計測の例

サンプリングモアレ法

格子ピッチ 4.0mm

与えた変位

0.6
0.4
0.2
0.1

Number of displacement [mm]

Position / [pixel]

0 200 400 600

重み付け位相解析法

格子ピッチ 4.0mm

与えた変位

0.5mm
0.3mm
0.2mm
0.1mm

Number of displacement [mm]

Position / [pixel]

0 200 400 600

重み付け位相解析法

注目点の前後を含む一定領域において、周囲の要素に重みをつける。

位相シフト法により位相値を求める。

注目点における位相値の平均値を求める。

> 格子のピッチの変化に強い(高精度)
> サンプリングモアレ法より計算量が少ない(高速)。

Grazing Brightness Captured Image

$w_r(0)$

$w_r(1)$

$w_r(2)$

$w_r(3)$

$w_r(4)$

$\sum w_r(k)$

$(j,k=0)$

格子ピッチと位相計測精度の関係(シミュレーション)

格子ピッチ10画素の場合

サンプリングモアレ法

重み付け位相解析法

格子ピッチ 0.5mm
0.4mm
0.3mm
0.2mm
0.1mm

Setting value of grating pitch [pixel]

Phase Error [rad]

0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
0.30
0.35
0.40
0.45
0.50

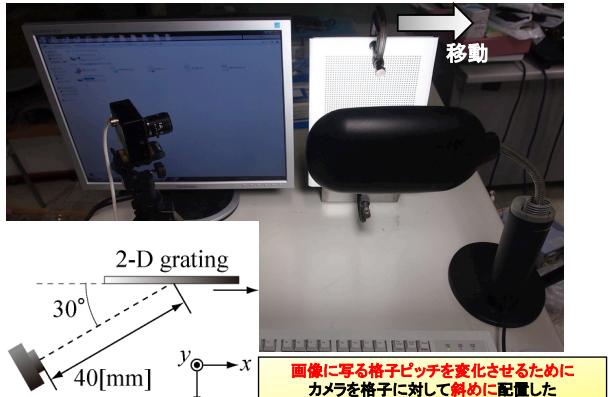
Number of displacement [mm]

Position / [pixel]

0 200 400 600

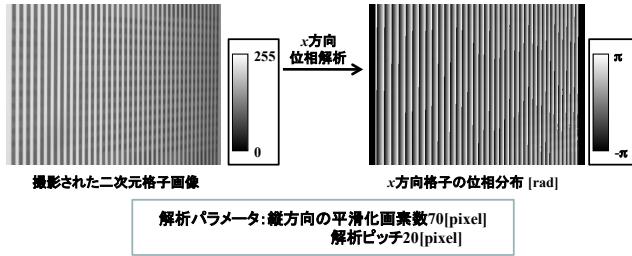
変位量計測による評価実験

格子ピッチ 4.0 mm



変位量計測による評価実験 (1/3)

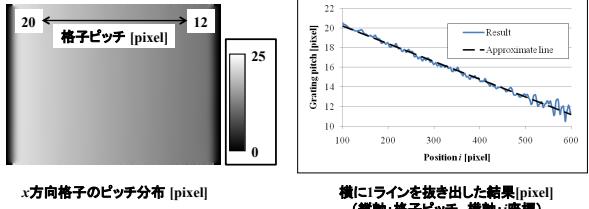
◎変位量計測実験の撮影データと位相解析結果



x方向の格子の位相分布から
①格子ピッチの分布②x方向の変位量分布を計測

変位量計測による評価実験 (2/3)

◎x方向の格子ピッチの分布計測結果



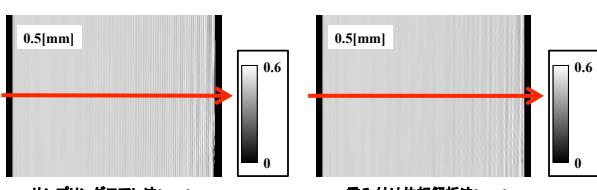
格子ピッチの計算方法

$$p_x = \frac{2\pi}{\Delta\theta}$$

12~20 [pixel] のピッチの格子が撮影できていることが確認できる

変位量計測による評価実験 (3/3)

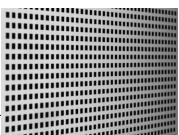
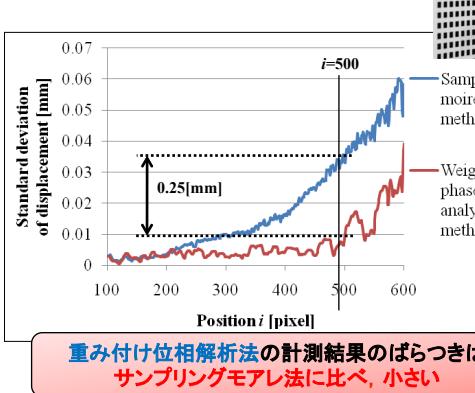
◎x方向の変位量の計測結果



計測結果の1ラインを抜き出して
計測結果の比較をおこなった

評価実験(結果)

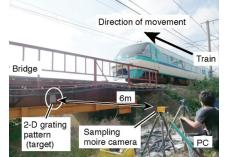
◎変位量0.5[mm]の計測結果(標準偏差)



サンプリングモアレ法の用途

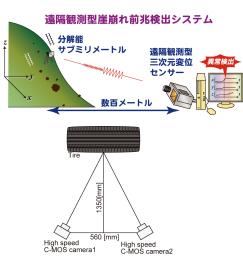
◆変位計測

- 変位の分布が計測できる
- 変位だけでなく、たわみ角、大変形時のひずみ分布なども計測できる。
- (例)橋梁やビルなどの大型構造物の変形計測、斜面の変位計測



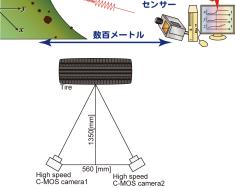
◆マーカーの位置検出

- 格子状のマーカーにして、位相値で中心位置を求める。
- (例)マーカー間の変位量検出など



◆複数カメラの対応付け

- 異なるカメラで撮影された画像内で、対応点を見つける(同一の2次元位相を持つ点を対応点とする)。
- (例)ステレオ法による三次元計測(座標分布、変位分布計測、ひずみ分布計測)



◆などなど

まとめ

◆格子パターンの位相解析手法を用いて、高速に精度よく、三次元計測、変位計測、ひずみ分布計測などができる手法を紹介した。

- サンプリングモアレ法の原理

- 変位計測、たわみ角計測など

- サンプリングモアレカメラの開発とその応用

◆現在、サンプリングモアレ法の改良版を開発中

- 「重み付け位相シフト法」

- アルゴリズムを単純化して高速化、精度向上

◆今後、実用化と適用範囲を広げることを行いたい。

Thank you

連絡先

藤垣元治 (Motoharu Fujigaki)
和歌山大学システム工学部光メカトロニクス学科
E-mail: fujigaki@sys.wakayama-u.ac.jp
Tel:073-457-8176(不在時は8517) Fax:073-457-8213