

時間相関イメージング:

複素相関撮像デバイスと各種の画像計測応用

安藤 繁

東京大学工学部計数工学科

東京大学大学院情報理工学系研究科

システム情報学専攻

内容

◆ 時間相関イメージングとは

- その役割: 変調(荷重積分)撮像, 相互相関検出, ヘテロダイン
- 時間相関と空間相関
- 物理現象の光への変換

◆ 時間相関イメージングのデバイス

- なぜ集積化が有効か
- 時間相関イメージセンサの構造と動作

◆ 時間相関イメージセンサの応用

- 実時間オプティカルフロー検出
- ヘテロダイン干渉計測・光渦を用いる遠隔6軸変位計測
- 実時間三次元計測とドップラ計測
- 固視微動型視覚システム
- 実時間2次元エリプソメトリ・複屈折計測システム
- 実時間2次元磁気光学探傷システム
- 太陽磁場の偏光観測システム

◆ まとめ

内容 その1

◆ 時間相関イメージングとは

- その役割: 変調(荷重積分)撮像, 相互相関検出, ヘテロダイン
- 時間相関と空間相関
- 物理現象の光への変換

◆ 時間相関イメージングのデバイス

- なぜ集積化が有効か
- 時間相関イメージセンサの構造と動作

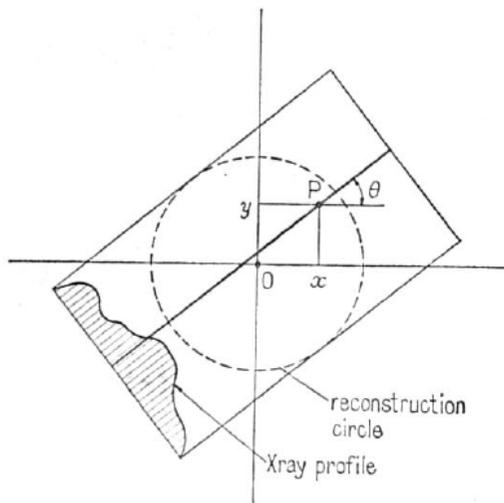
◆ 時間相関イメージセンサの応用

- 実時間オプティカルフロー検出
- ヘテロダイン干渉計測・光渦を用いる遠隔6軸変位計測
- 実時間三次元計測とドップラ計測
- 固視微動型視覚システム
- 実時間2次元エリプソメトリ・複屈折計測システム
- 実時間2次元磁気光学探傷システム
- 太陽磁場の偏光観測システム

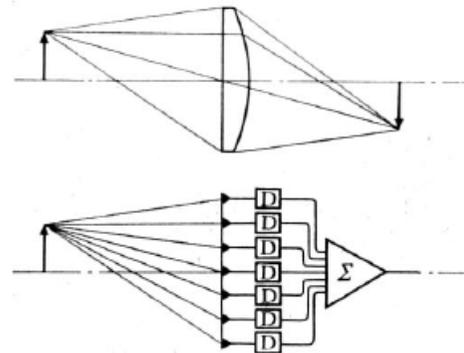
◆ まとめ

観測作用素

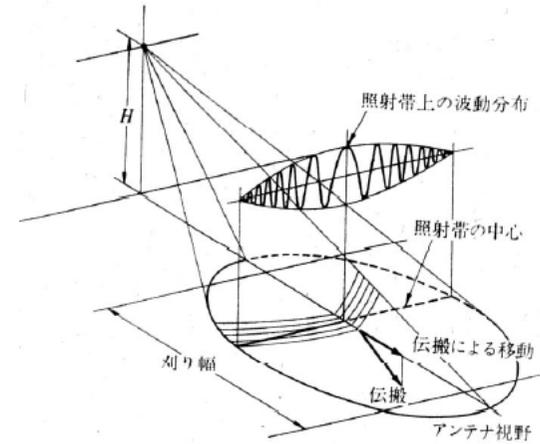
観測に適した空間への変換: 計測における古典的活用例
 「情報」を「数値」に直す前にやるべきことがある



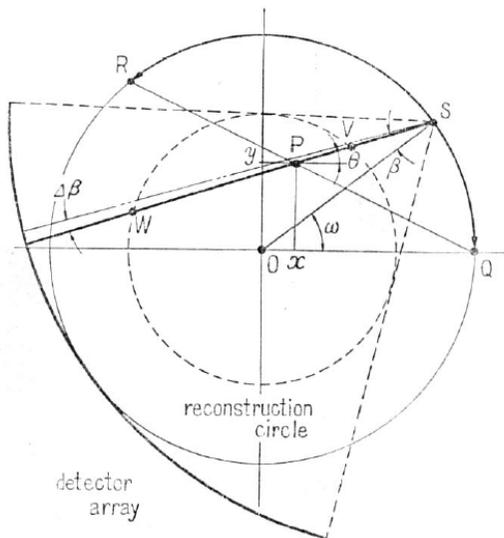
X線CT



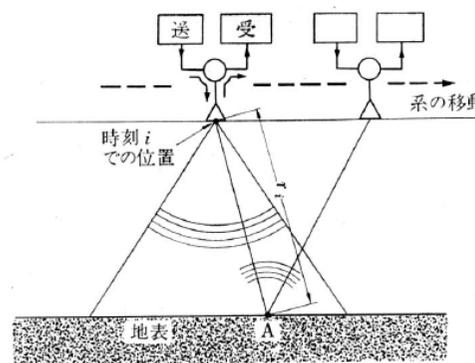
開口合成



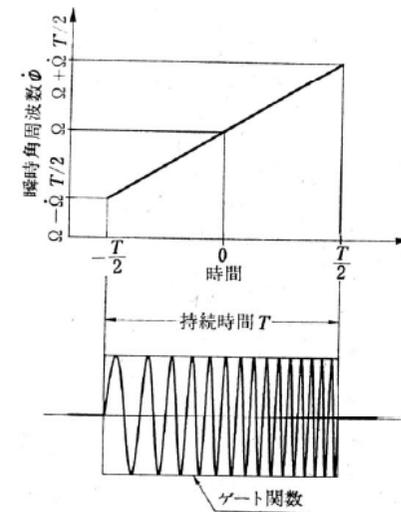
合成開口レーダ



X線CT (ファンビーム)



合成開口レーダ



チャープ波

時間相関イメージセンサ

Real-time interferometry on Applied Optics

Speckle interferometry
Applied Optics 2010

Real-time

Sample images on IEEE
Trans. MAG cover page

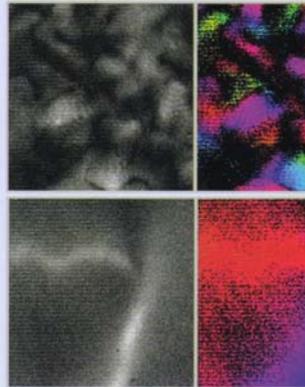
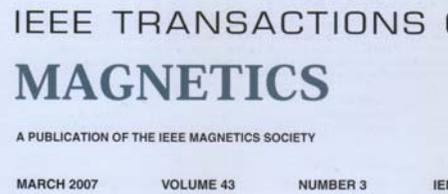
MO imaging
application on IEEE
Trans. MAG

Real-time heterodyne imaging interferometry: focal-plane
amplitude and phase demodulation using a three-phase
correlation image sensor

Spectral matching
imager on Optical
Engineering

Spectral matching
modulation-coded
emitting diode illu

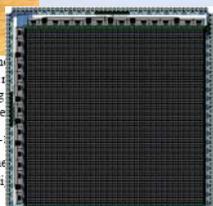
Akira Kimachi, MEMBER SPIE
Hisashi Ikuta
Yusuke Fujiwara
Mitsuharu Masumoto
Hitoshi Matsuyama
Osaka Electro-Communication Univers
Department of Engineering Informatics
18-8 Hatsu-cho, Neyagawa 572-8530
Japan
E-mail: kima@isc.osakac.ac.jp



Imaging of grain structures in
magnetic excitation using
"Real Time Orientation-S
and T. Kurihara on page 104

1 Introduction

Spectral properties of materials, wh
from distinct chemical composition or
or nano-structures, allow the mat
ity. The most exact identification
ing, i.e., correlation matching of
transmittance of the object mat
spectrum $R_0(k)$, based on the m



For the
spectral m
matching
pixelwise
consists
(CIS),¹⁸
between the
ference si
(i,j):

ing with h
at the spect
tral match
This ima
image sen
correlation
the global
at each pi

Real-Time Orientation-Sensitive Magneto optic Imager for Leakage Flux Inspection

Shigeru Ando, Takaaki Nara, Nobutaka Ono, and Toru Kurihara

The University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan

We propose a new system for magneto-optical imaging that can observe the distributions of the amplitude and phase of an ac leakage magnetic field on a steel sheet driven externally by a dipole or a quadrature (rotating dipole) magnet. The new system, which we call a three-phase correlation image sensor (3PCIS), can perform two-dimensional imaging and parallel lock-in detection of the intensity-modulated light generated by a magneto-optic film and polarimetric techniques. We apply the imaging system to the leakage flux inspection of surface or near-surface defects of steel sheets and to the grain observation of electromagnetic steels. The imaging system allows us to observe the amplitude and phase (polarity for dipole excitation and defect orientation for quadrature excitation) of vertical flux components. The

Index Terms

THE m
for de
uniform m
Then flaws
upward and
face of steel
netic field i
metric tech
through the
ization is c
erizer at the
this princip
of aging ai
vice (CCD
enhance
flux associa
face structu
a supercon
niques prov
processes w
enables the
netic field
an ac magn
although th
sequence a

Digital Obj
Color versio
at http://ieeex

Device principle on IEEE Trans. ED

IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 50, NO. 10, OCTOBER 2003

2059

Correlation Image Sensor: Two-Dimensional Matched Detection of Amplitude-Modulated Light

Shigeru Ando, Member, IEEE, and Akira Kimachi, Member, IEEE

Abstract—In this paper, we describe a novel imaging device, the correlation image sensor, whose pixel circuit consists of a photodetector and source-coupled MOS transistors with individual capacitive loads and readout switches. It accepts differential or three-phase reference signals to produce one or two correlation integrals between the incident light intensity and the reference signals. The correlation results stored as charges in the capacitors are read out via MOS scanning circuits. We describe a function circuit and a quadrature detection method of modulated light. We fabricated 64 × 64 and 100 × 100 pixel sensors and obtained a correlation signal-to-noise ratio of 3 and an accuracy of 0.85° using only two-frame integration. We describe application methods of this sensor to crossers, amplitude modulation-phase modulation imagers, and correlation matching imagers.

Index Terms—CMOS, correlation, demodulation, lock-in, matched filter.

I. INTRODUCTION

THE CORRELATION integral is the integral of two functions $f(t)$ and $g(t)$ as

$$R_{fg}(t) = \int_{t-T}^t f(t_1)g(t_1) dt_1$$

within the time interval T . It is essentially an average between the two functions to obtain a correlation

$$\cos \theta_{fg}(t) \equiv \frac{R_{fg}(t)}{\sqrt{R_{ff}(t)R_{gg}(t)}}$$

0018-9464/\$25.00

second row by an opaque mask and driven back and forth by external clock voltages. Photocharges are integrated by two adjacent regions in the transfer line. A region coming under an unmasked zone samples and synchronously integrates periodic oscillations of the local light intensity. The difference between the two signals is the correlation integral



The IEEE Industrial Electronics Society (IES) and the organizing committee of the International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Cambridge, UK, 30th June – 2nd July 2008, take pleasure in presenting the

ISIE'2008 Best Paper Award

to

Shigeru Ando and Nobutaka Ono

for the paper entitled:

Spatio-temporal phase-encoding profilometry using correlation image sensor



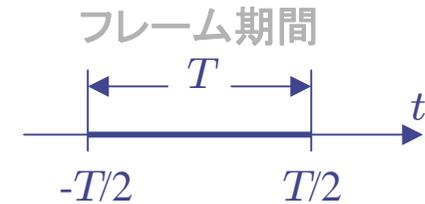
Kaouther Ghomri
IES President

Marc'Antoine Châtelet
ISIE'2008 Conference General Chairs

Best Paper Award at ISIE'08, Cambridge

変調撮像

対象の変化の様相を
時間変調(荷重積分)に
よって捉える



応用方向: 運動検出, 周波数推定

画素座標 (x, y)

時刻 t

強度画像

$g_0(x, y, t)$

相関画像

$g_\omega(x, y, t)$

後述の数学的手法
「荷重積分法」
により重大な意味が
与えられた

$)dt$

$)e^{-j\omega t} dt$

時間積分
フレーム期間 T

複素正弦関数
による変調・復調

変・復調周波数 ω
($\omega T = 2n\pi$)

相互相関検出撮像

対象信号と参照信号の
類似性を求める

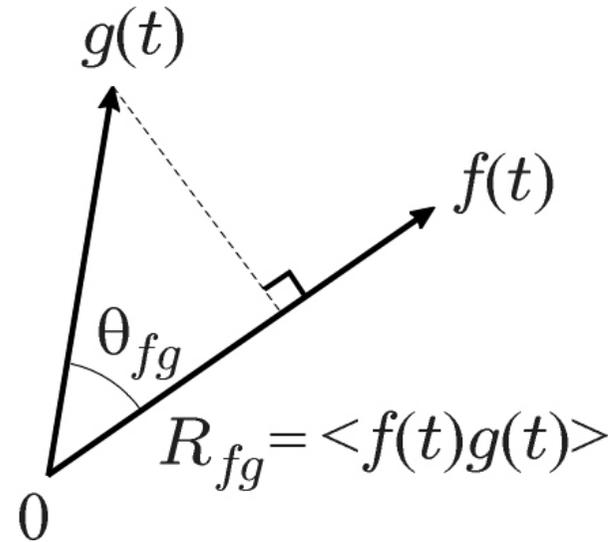
応用方向: 画像処理, パターン認識

対象信号: $f(t)$

参照信号: $g(t)$

相関積分: $R_{fg}(t) = \int_{t-T}^t f(t_1)g(t_1)dt_1$

整合度:
類似度: $\cos \theta_{fg}(t) \equiv \frac{R_{fg}(t)}{\sqrt{R_{ff}(t)R_{gg}(t)}}$



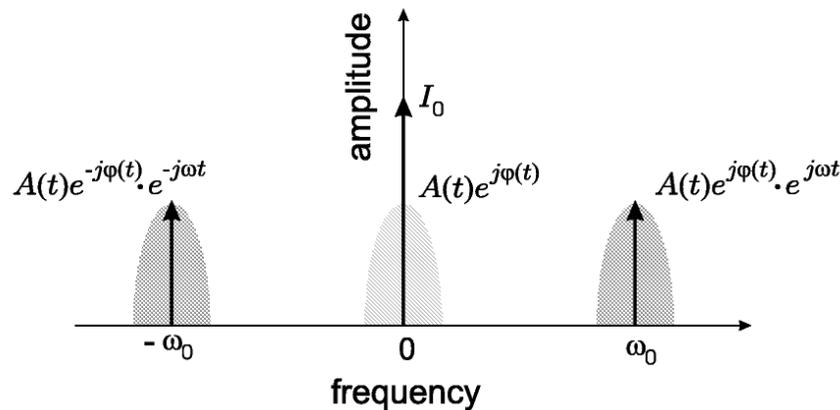
ヘテロダイン復調撮像

周波数をシフトさせたり
振幅位相を求める

応用方向: 光干渉計測, 振幅位相符合化計測, 自由空間光通信

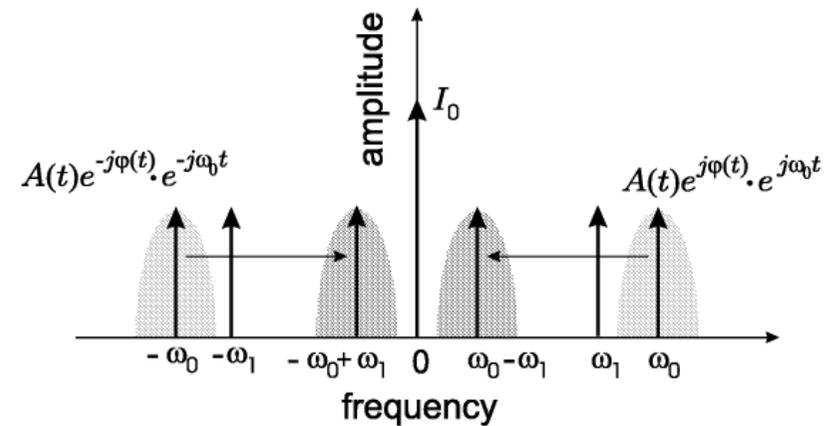
対象信号:

$$I(t) = I_0 + A(t) \cos(\omega_0 t + \phi(t))$$

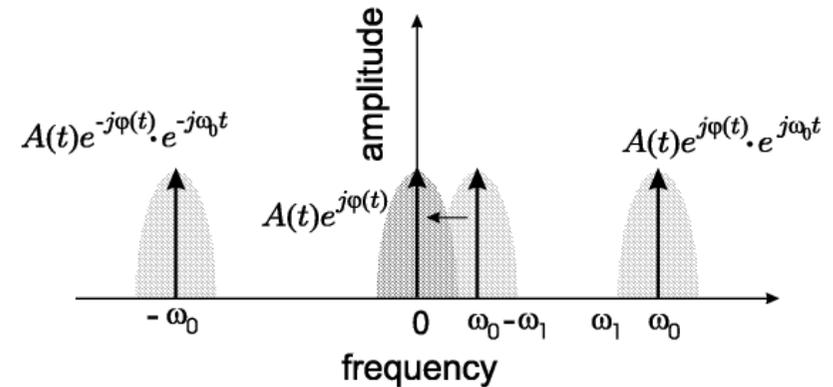


直交検波:

$$\langle I(t) \begin{bmatrix} \cos \omega_0 t \\ \sin \omega_0 t \end{bmatrix} \rangle \simeq A(t) \begin{bmatrix} \cos \phi(t) \\ -\sin \phi(t) \end{bmatrix}$$



(a) 周波数変換 (ヘテロダイン)



(b) 直交検波 (周波数変換と直交検波の連鎖)

種々の現象の光への変換 (1)

◆ 磁界-光変換

- ファラデー効果 (磁気旋光効果, Faraday effect)
- 磁気カー効果 (magnetic Kerr effect)
- ゼーマン効果 (Zeeman effect)

◆ 電界-光変換

- ポッケルス効果 (Pockels effect, 電界に比例)
- カー効果 (Kerr effect, 電界の2乗に比例)
- 液晶

◆ 振動-光変換

- 光のドップラー効果
- 干渉, パターン投影, モアレ, スペックル
- 近接場光 (near field optics)

種々の現象の光への変換 (2)

◆ 温度-光変換

- ブリュアン散乱 (Brillouin scattering)
- 蛍光 (fluorescence)

◆ 応力・歪-光変換

- 光弾性 (photo-elasticity)
- ブリュアン散乱 (Brillouin scattering)
- 干渉, パターン投影, モアレ, スペックル

◆ 音速-光変換

- 回折・ブラッグ反射 (Bragg reflection)
- ドップラー効果 (Doppler effect)

種々の現象の光への変換 (3)

◆ 流速-光変換

- ドップラ効果 (Doppler effect)
- 流動複屈折 (flow birefringence)
- 明暗流・濃度流 (optical flow)

◆ 成分-光変換

- 共鳴吸収・発光 (resonant absorption/emission)
- 蛍光 (fluorescence)
- ラマン散乱 (Raman scattering)
- 近接場光 (near field optics)

◆ 接触圧・変形-光変換

- 全反射 (total reflection), 柔軟反射膜

時間変動の生成

◆ 対象自体に基づく時間変動

- 運動・振動
- 明暗変化・明暗振動, 位相変化, 周波数変化
- ...

◆ 能動的に付与する時間変動

- 場の励振・変調
- プローブ信号・波面・照明等
- 差周波数生成・ヘテロダイン干渉・モアレ
- ドップラ効果
- 固視微動
- ...

内容 その2

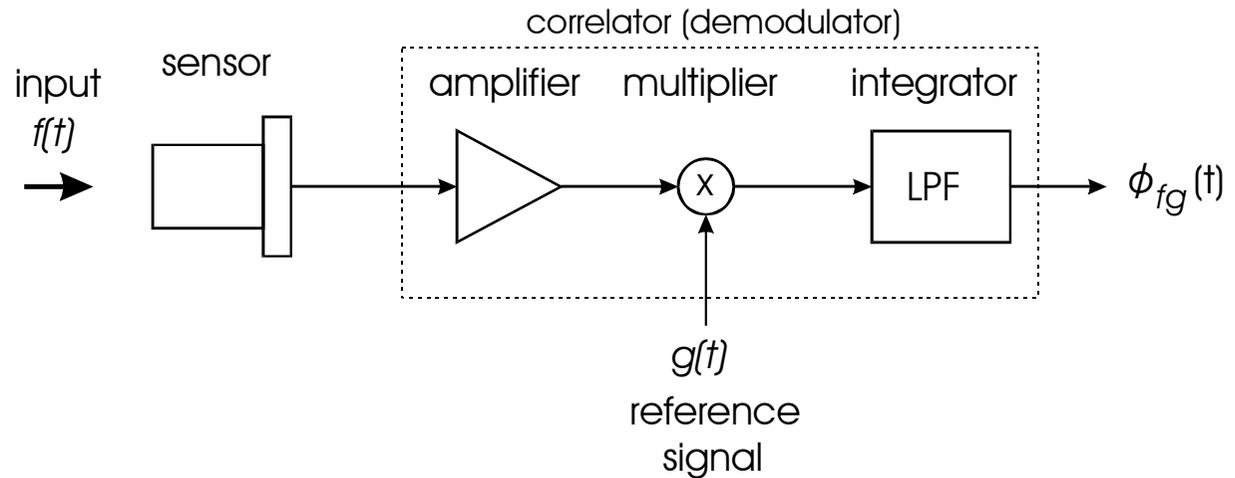
- ◆ 時間相関イメージングとは
 - その役割: 変調(荷重積分)撮像, 相互相関検出, ヘテロダイン
 - 時間相関と空間相関
 - 物理現象の光への変換
- ◆ 時間相関イメージングのデバイス
 - **なぜ集積化が有効か**
 - **時間相関イメージセンサの構造と動作**
- ◆ 時間相関イメージセンサの応用
 - 実時間オプティカルフロー検出
 - ヘテロダイン干渉計測・光渦を用いる遠隔6軸変位計測
 - 実時間三次元計測とドップラ計測
 - 固視微動型視覚システム
 - 実時間2次元エリプソメトリ・複屈折計測システム
 - 実時間2次元磁気光学探傷システム
 - 太陽磁場の偏光観測システム
- ◆ まとめ

なぜ集積化が有効か(1)

「検出」と「乗算」の一体化
小信号レベルでの高精度アナログ乗算
累積後の読み出し・読み出し雑音の低減

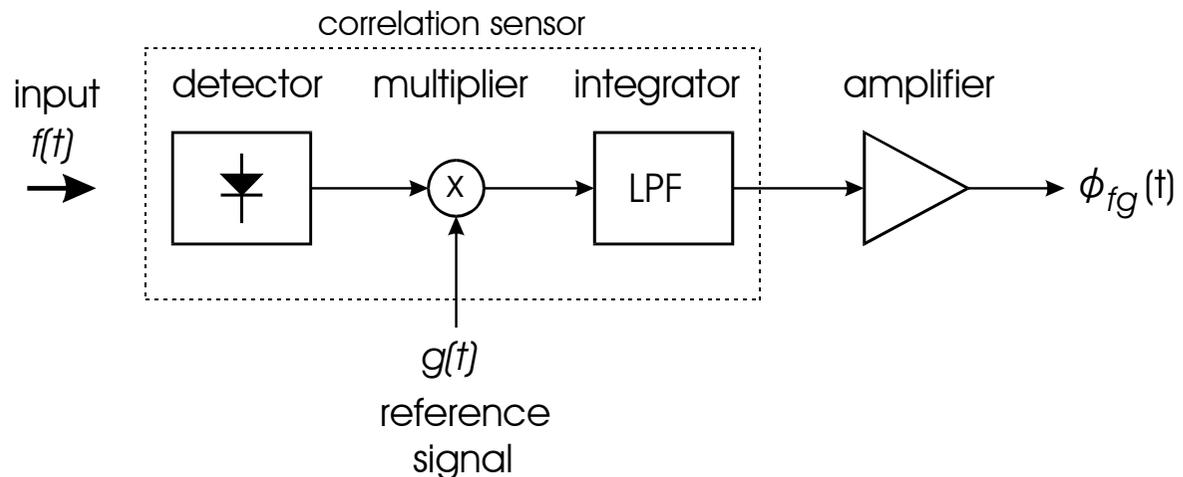
例: ロックイン検出, 同期整流, ヘテロダイン検波, 直交相関検出, 整合フィルタ, etc.

通常の方法:



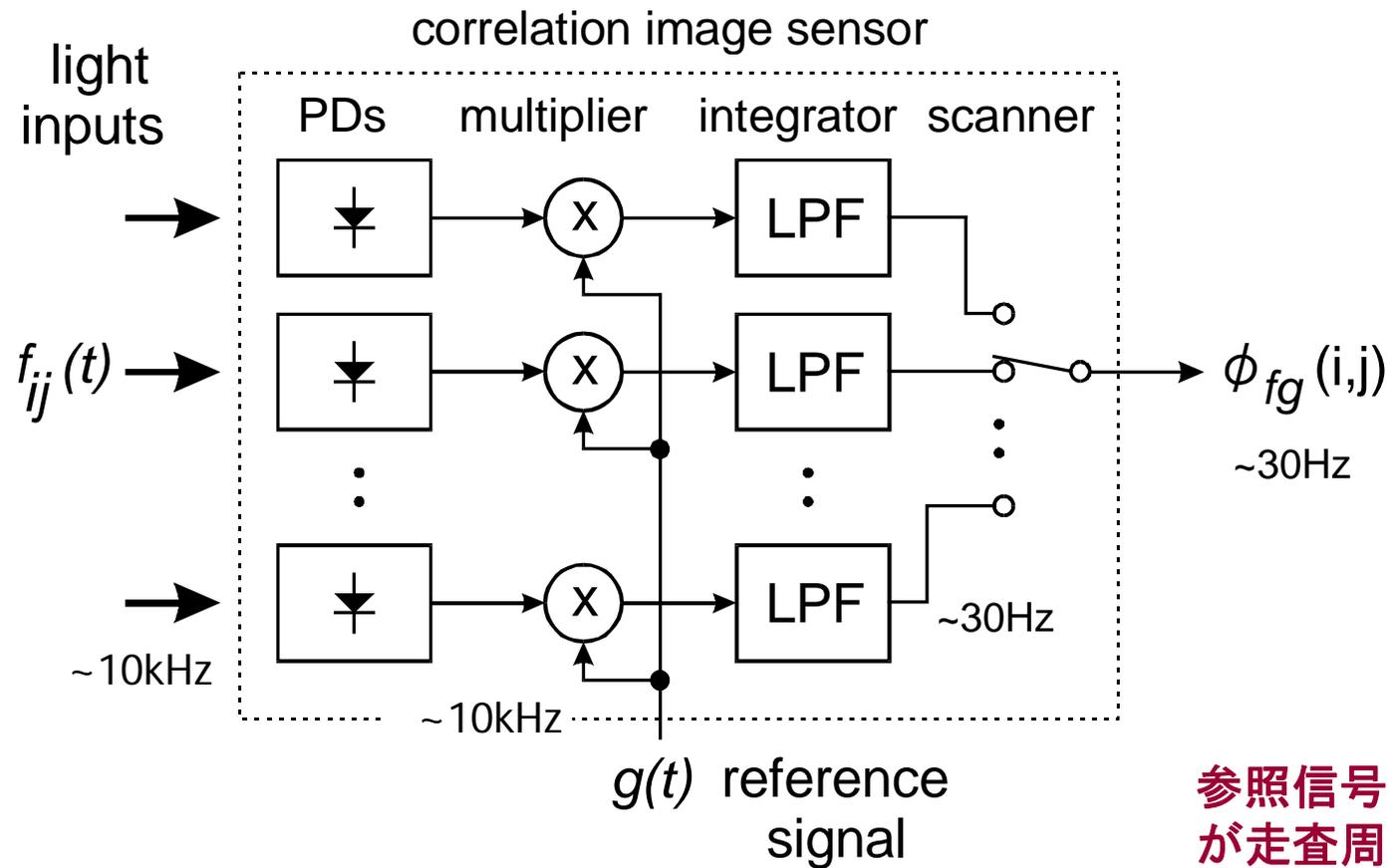
相関センサの原理:

検出部の直後に
一体化して相関
回路を置く



なぜ集積化が有効か(2)

センサにおける最適な情報選択と莫大な情報圧縮

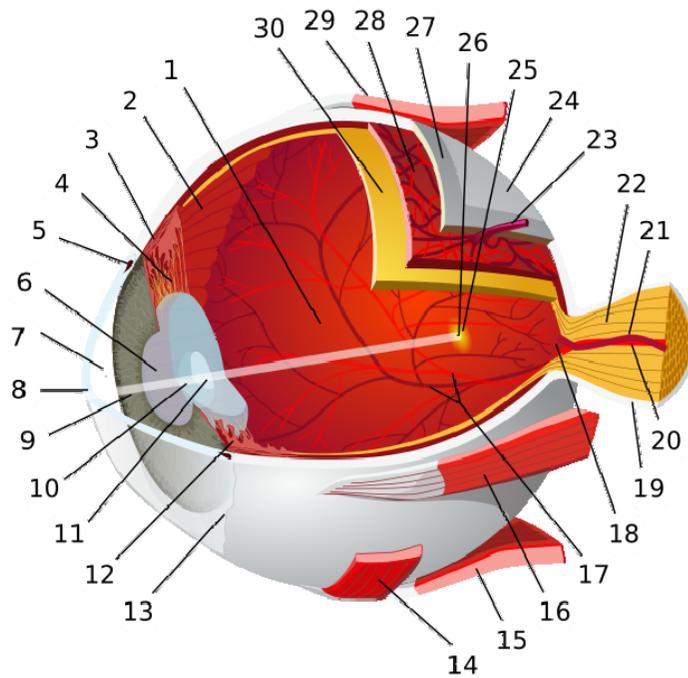


参照信号の帯域
が走査周波数に
縛られない



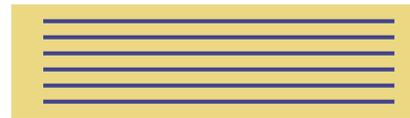
- 在来イメージセンサによる時間情報の損失・劣化の回避
- 工学的な実現容易性・低コスト・高解像度・汎用性
- 時間情報の新たな活用原理の開拓

➡ 時間相関イメージセンサ

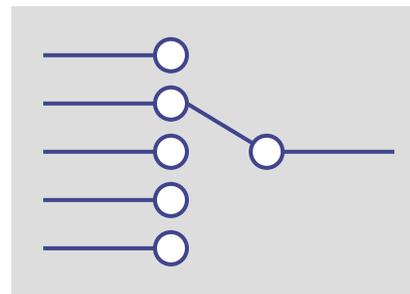


(<http://ja.wikipedia.org/wiki/Eye>)

時間連続・並列伝送



視覚認識系

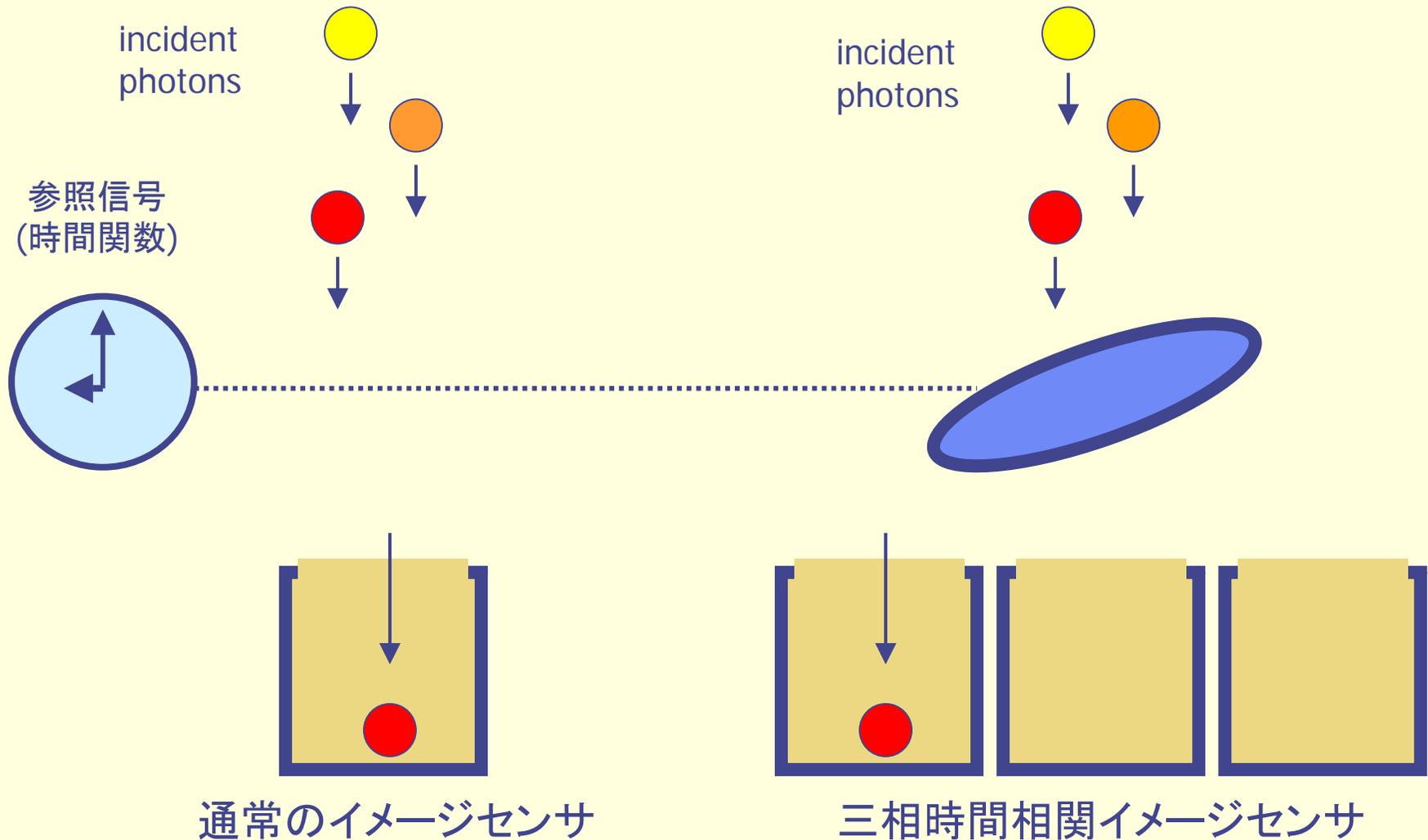


画像処理・認識系

走査・標本化・多重化伝送

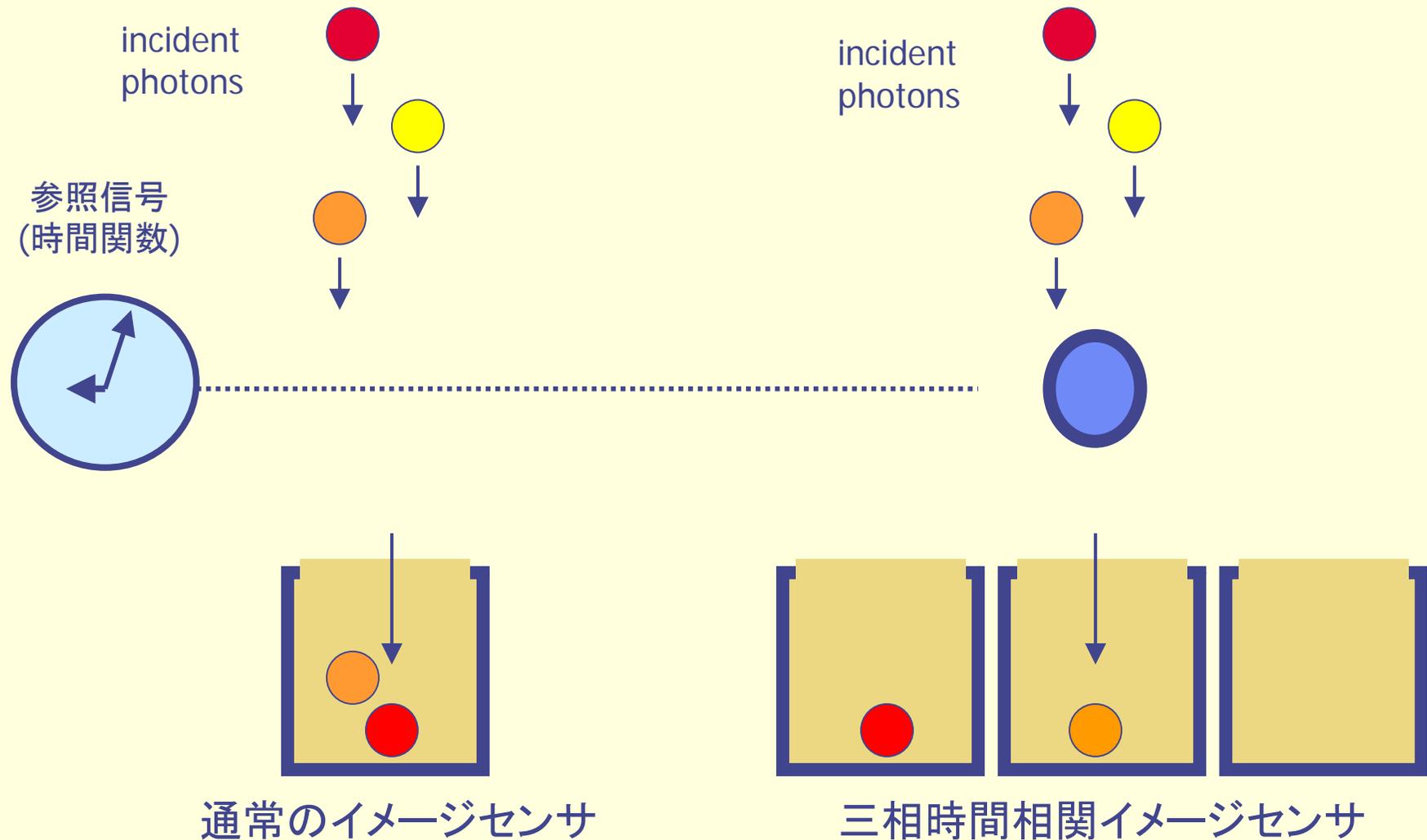
時間相関画素の動作原理

入射光量の時間変動経緯の複数スロットによる記録



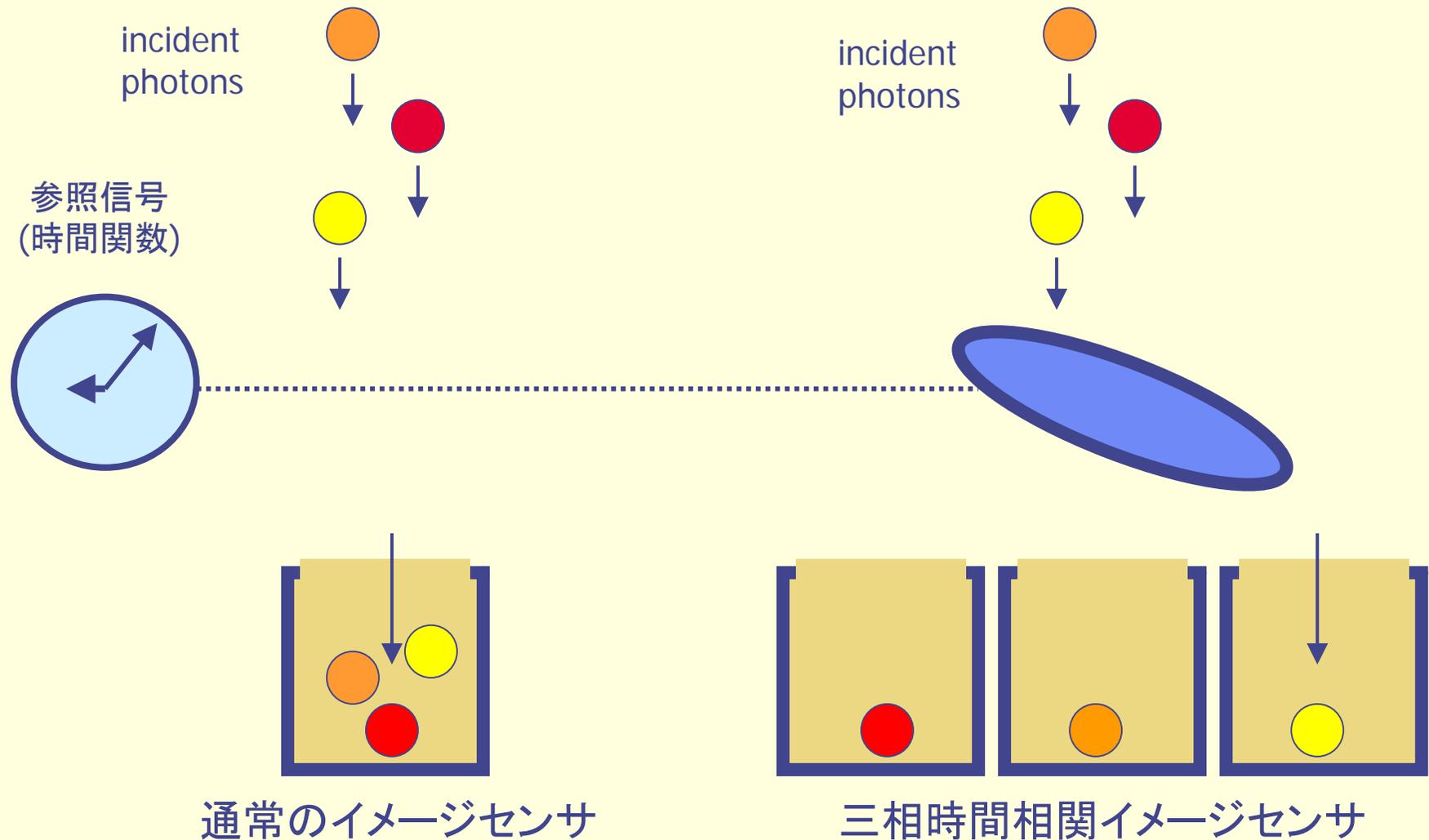
時間相関画素の動作原理

入射光量の時間変動経緯の複数スロットによる記録



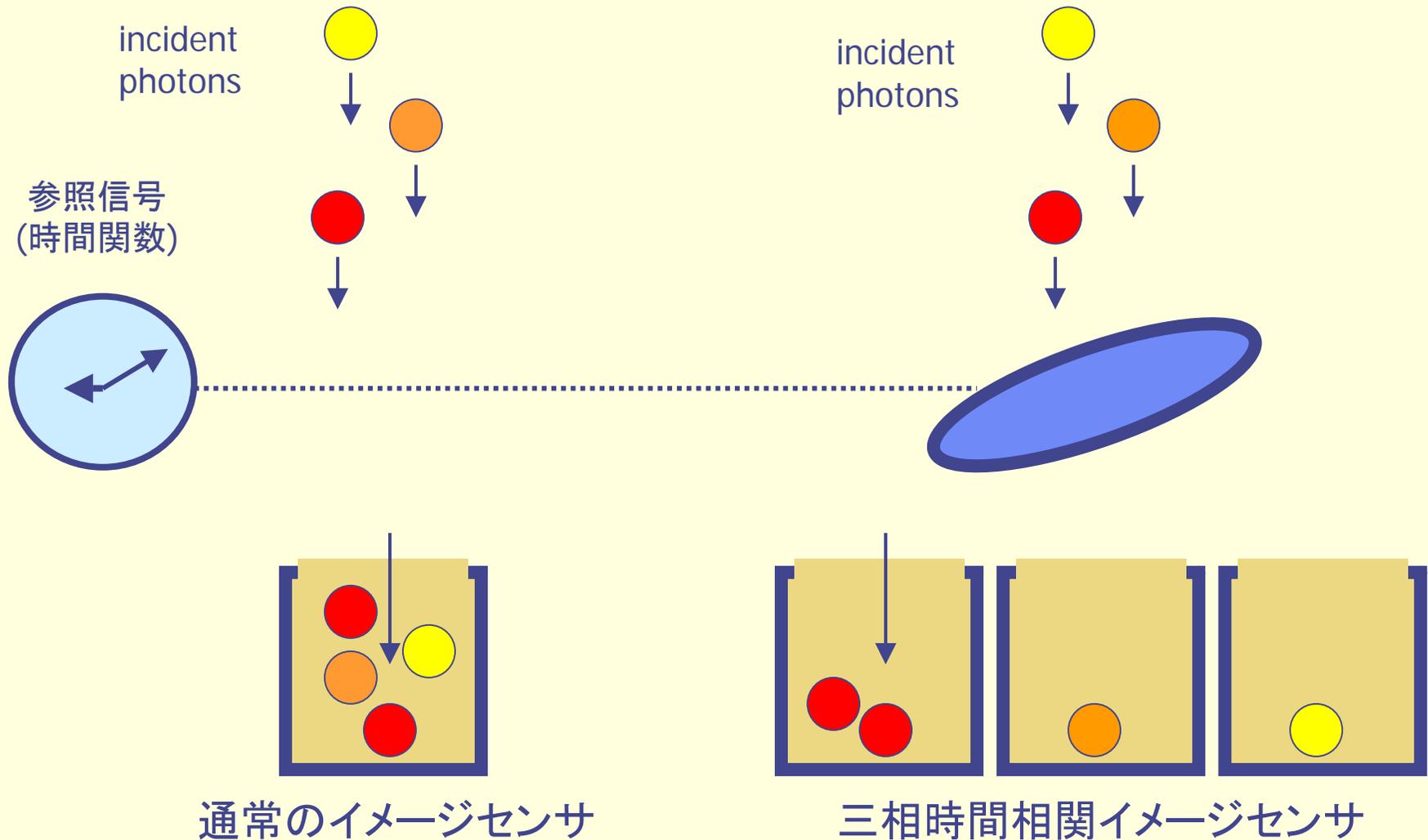
時間相関画素の動作原理

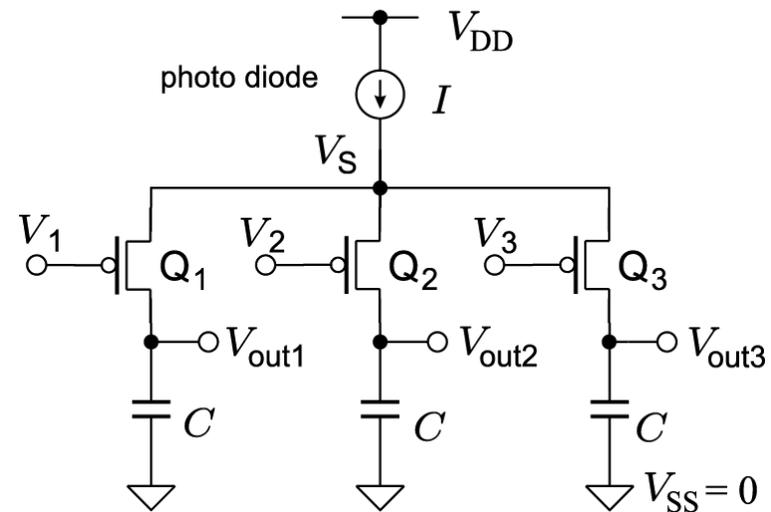
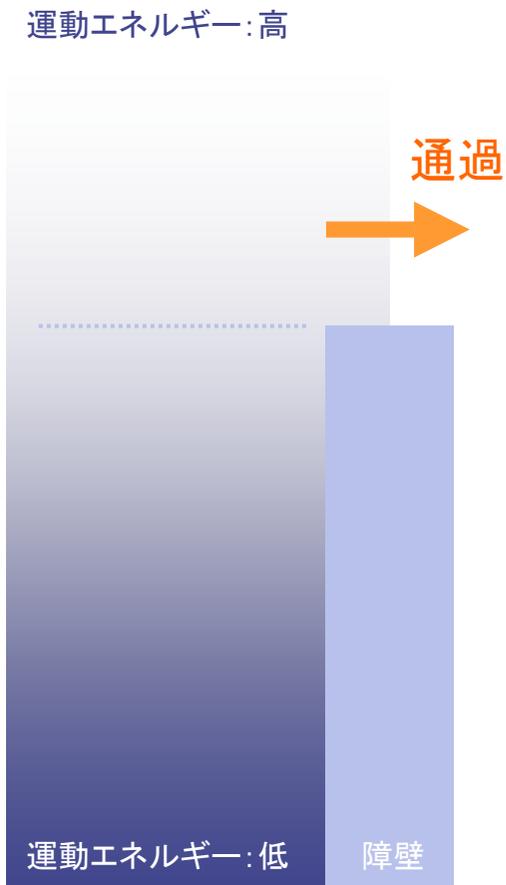
入射光量の時間変動経緯の複数スロットによる記録



時間相関画素の動作原理

入射光量の時間変動経緯の複数スロットによる記録





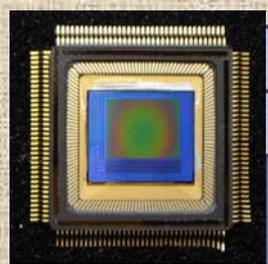
$$I_1 = I_0 e^{-\frac{q\kappa(V_1 - V_S)}{kT}}$$

$$I_2 = I_0 e^{-\frac{q\kappa(V_2 - V_S)}{kT}}$$

$$I_3 = I_0 e^{-\frac{q\kappa(V_3 - V_S)}{kT}}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 - I/3 \\ I_2 - I/3 \\ I_3 - I/3 \end{bmatrix} = -\frac{q\kappa}{3kT} \begin{bmatrix} I(V_1 - \bar{V}) \\ I(V_2 - \bar{V}) \\ I(V_3 - \bar{V}) \end{bmatrix}$$

これまでの主な試作チップ

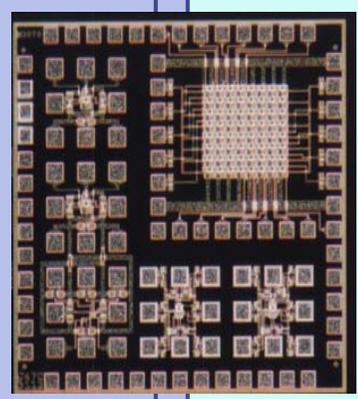


11年浜松知的クラスタ試作 704 × 512画素三相

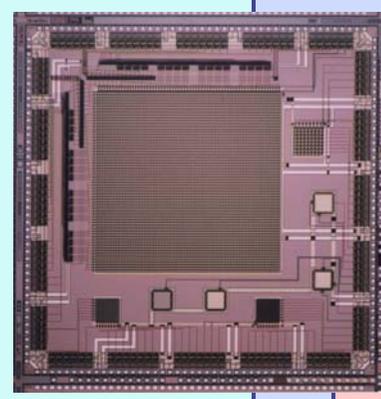
10年浜松知的クラスタ試作 640 × 512画素三相

09年浜松知的クラスタ試作 640 × 512画素三相

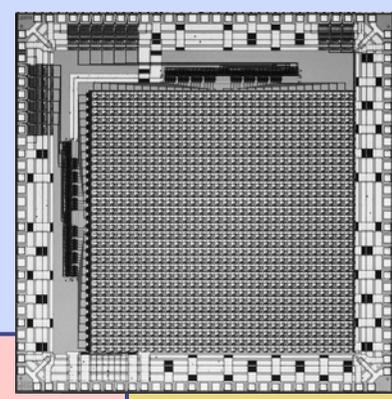
08年浜松知的クラスタ試作 390 × 366画素三相



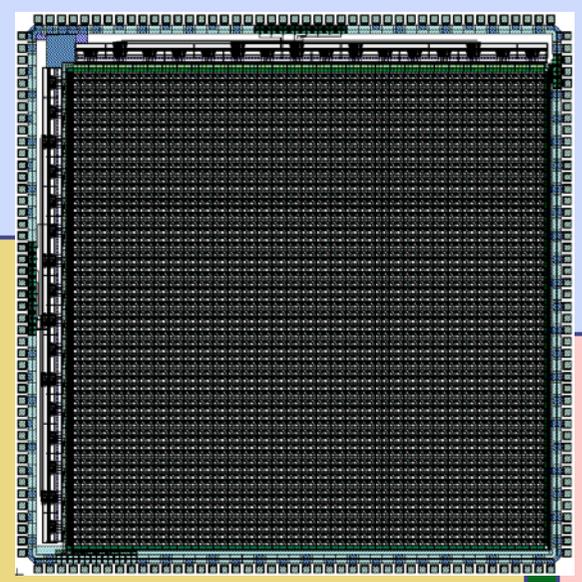
97年第2回VDEC
1.2 μm 8 × 8画素



98年第1回VDEC
64 × 64画素



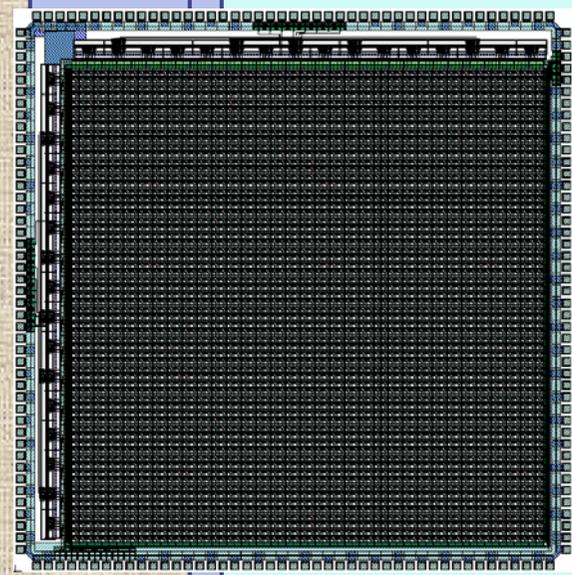
01年第1回VDEC
32 × 32画素三相



01年第2回VDEC
64 × 64画素三相

05年Sharp
共同試作
320 × 256画
素三相

03年第1回VDEC 0.35 μm
200 × 200画素三相

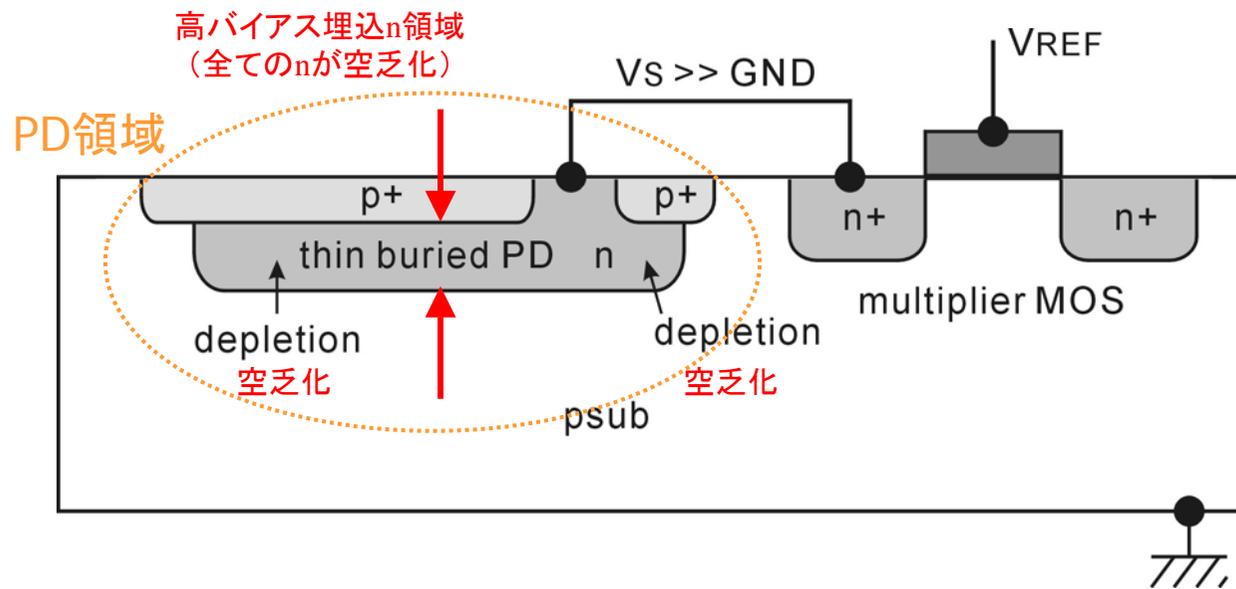


03年第1回VDEC
64 × 64画素三相
改良画素回路型

04年Sharp共同試作 200 × 200画素三相

等価零容量フォトダイオード

最大の容量を生じ、周波数倍率を低下させるフォトダイオードを高バイアス埋め込み構造により等価的に零容量化する



周波数倍率のゲートバイアス電圧依存性

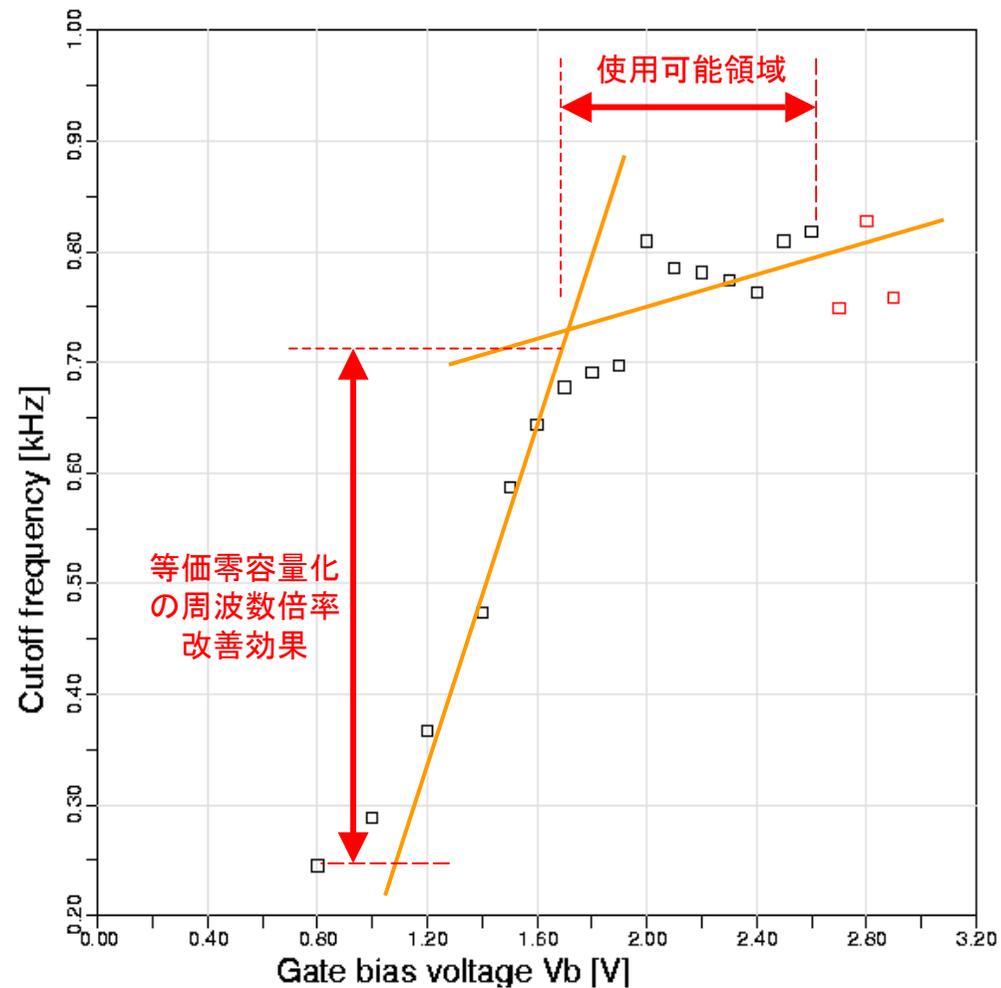
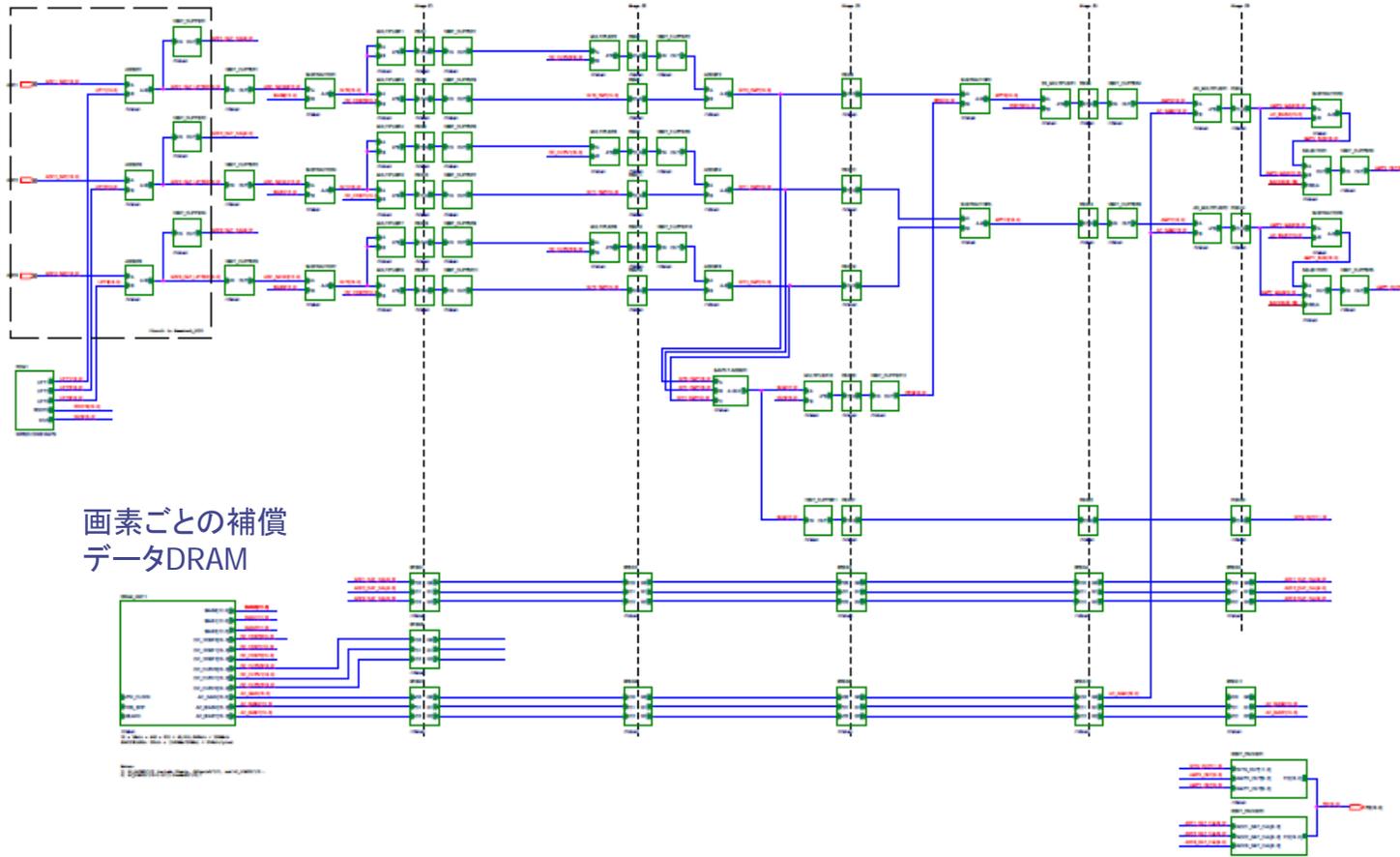
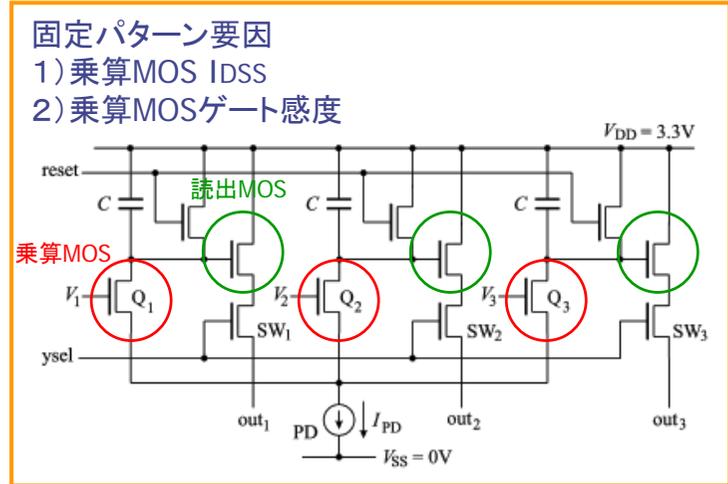


図 91. Hamatech HCI2 の等価遮断周波数のゲートバイアス電圧依存性。赤点はダイナミックレンジ減少のため出力が乱れた測定データ。フレーム周波数は 11.9667Hz。

内部補償による固定パターン除去

固定パターン雑音の内部補償のブロック図

CMOS読出非線形補償 + 乗算MOS不整合完全補償



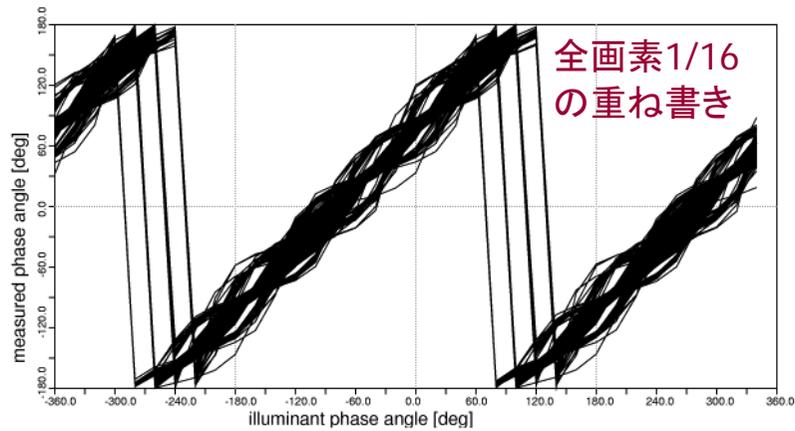
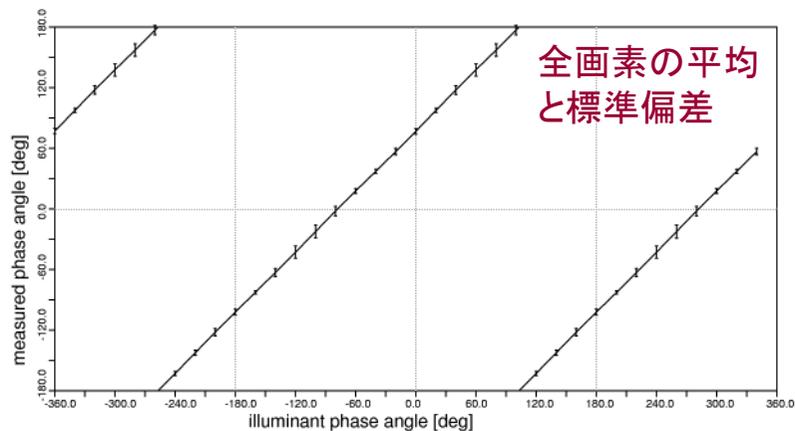
読出非線形要因

- 1) 読出MOS V_{DS}
- 2) 読出MOS V_{GS}

固定パターン除去補償の効果

簡易補償(従来法)

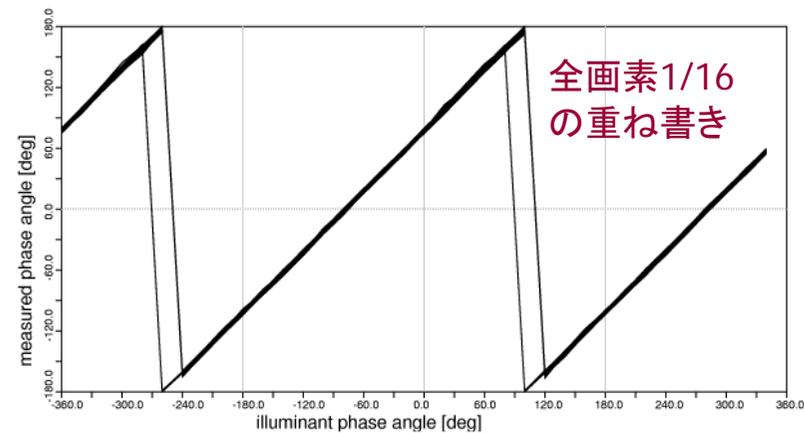
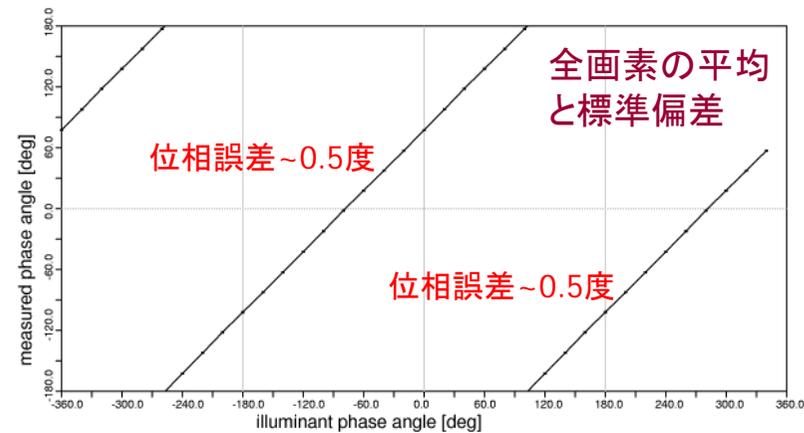
乗算MOSの過度な小型化で固定パターンが激増



検出位相

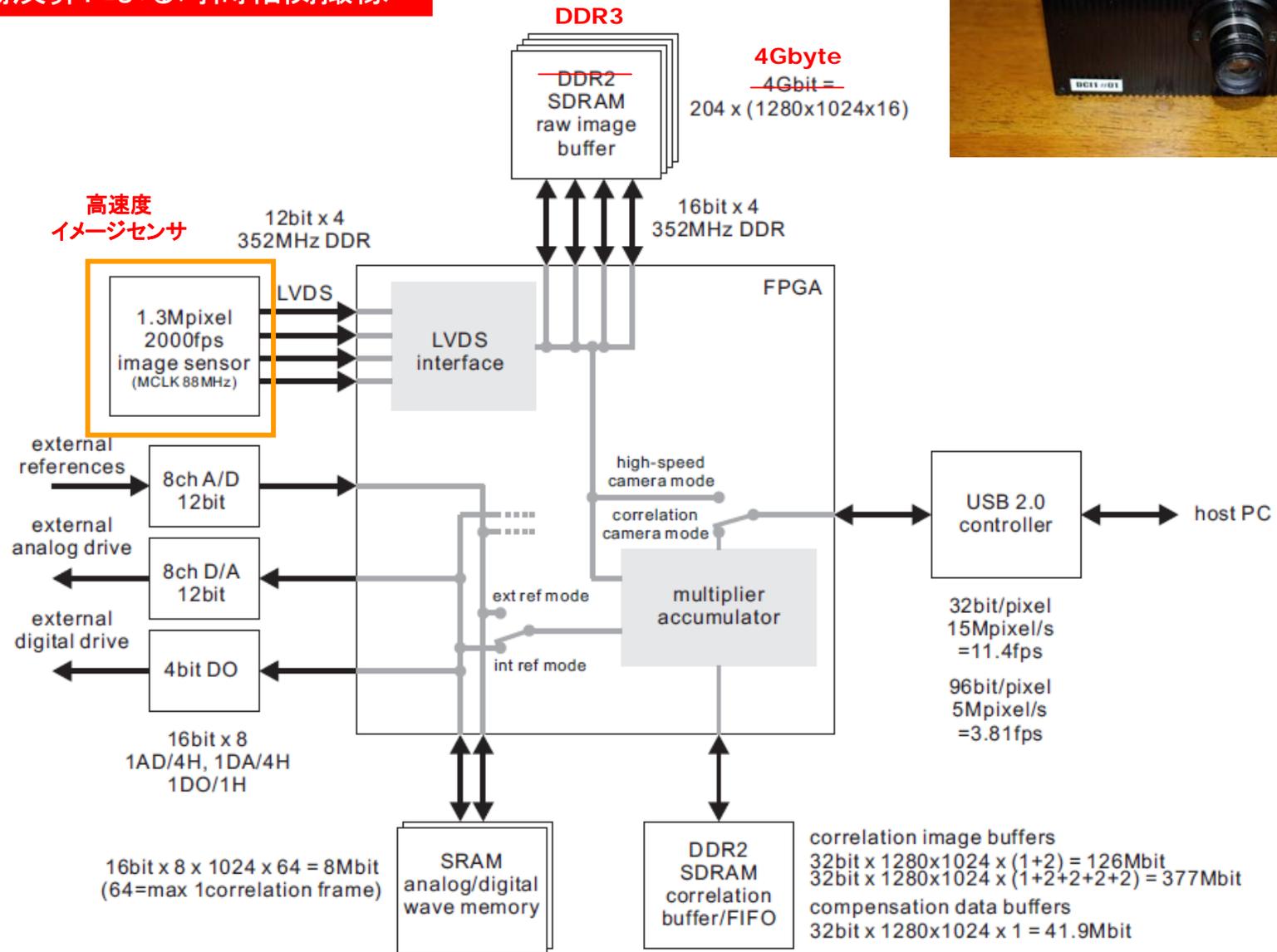
変調位相

2次補償(新規)



全体ブロック図

高速度イメージセンサと直結デジタル相関演算による時間相関撮像



内容 その3

- ◆ 時間相関イメージングとは
 - その役割: 変調(荷重積分)撮像, 相互相関検出, ヘテロダイン
 - 時間相関と空間相関
 - 物理現象の光への変換
- ◆ 時間相関イメージングのデバイス
 - なぜ集積化が有効か
 - 時間相関イメージセンサの構造と動作
- ◆ 時間相関イメージセンサの応用
 - 実時間オプティカルフロー検出
 - ヘテロダイン干渉計測・光渦を用いる遠隔6軸変位計測
 - 実時間三次元計測とドップラ計測
 - 固視微動型視覚システム
 - 実時間2次元エリプソメトリ・複屈折計測システム
 - 実時間2次元磁気光学探傷システム
 - 太陽磁場の偏光観測システム
- ◆ まとめ

時間相関イメージセンサの応用(1)

実時間オプティカルフロー検出

特色と応用方向

- 荷重積分法の最初の適用例
- 完全受動撮像
- 代数的厳密解を与える高速・高精度アルゴリズム
- 1画素・1フレームでのオプティカルフロー推定
- 対象の運動速度に制限がない
- 開口問題の条件が緩和される
- 計算機視覚, 三次元情景解析, 流体運動計測(PIV)

変調撮像法

画素座標 (x, y)

時間 t

入射光

強度画像

$$g_0(x, y) = \int_{-T/2}^{T/2} f(x, y, t) dt$$

複素相関画像

$$g(x, y) = \int_{-T/2}^{T/2} f(x, y, t) e^{-j(\omega t + \phi)} dt$$

フレーム時間 T
の時間積分

参照正弦波による
入射光の変調

周波数 ω

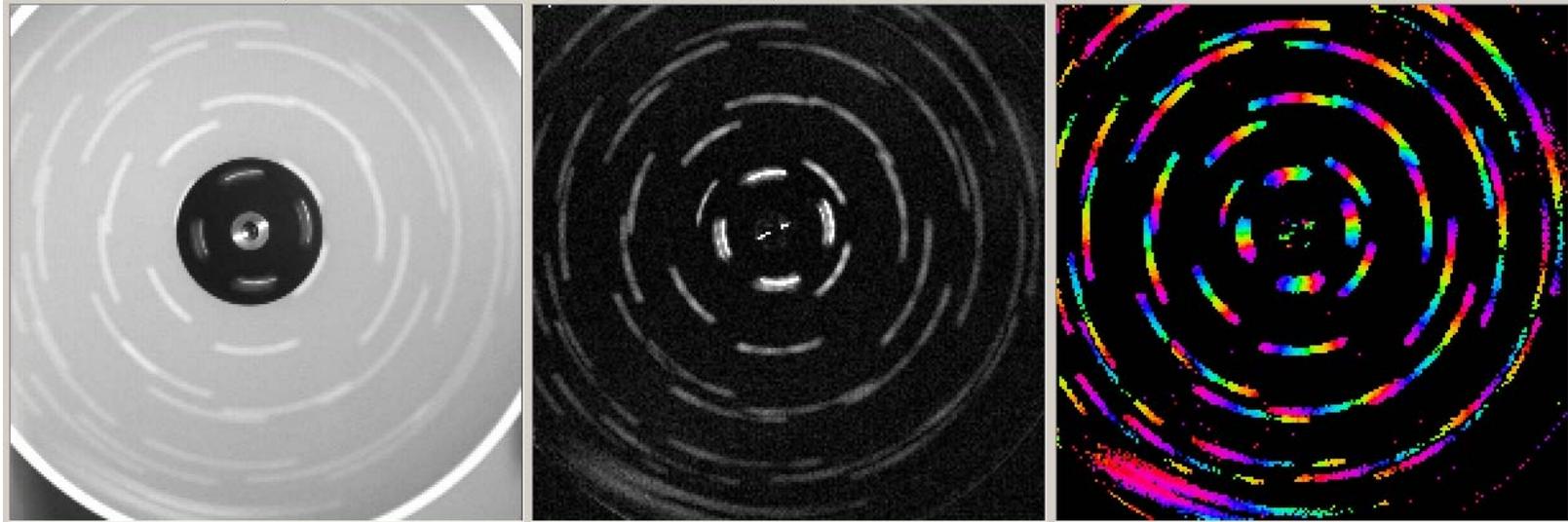
初期位相 ϕ

変調撮像例 (1)

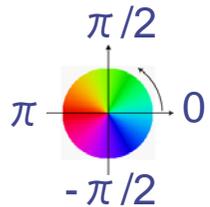
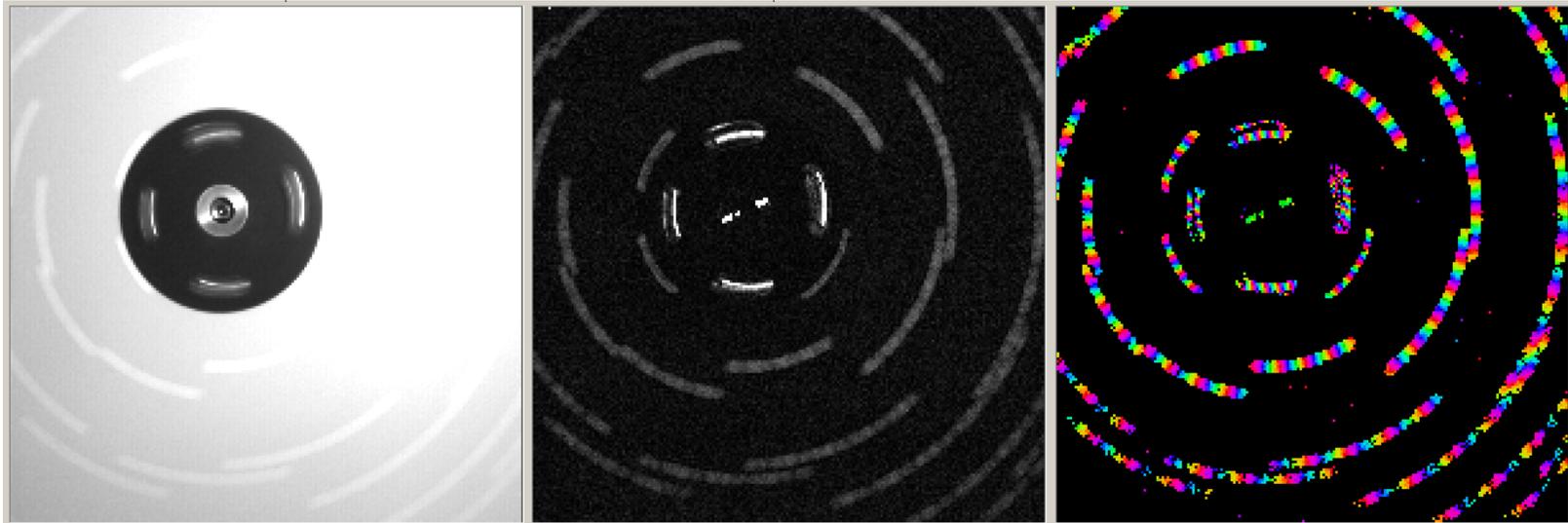
対象: 回転円板上の点群

素子: Sharp-TEG2 200x200 3PCIS

$\omega T = 2\pi$



$\omega T = 8\pi$



強度画像

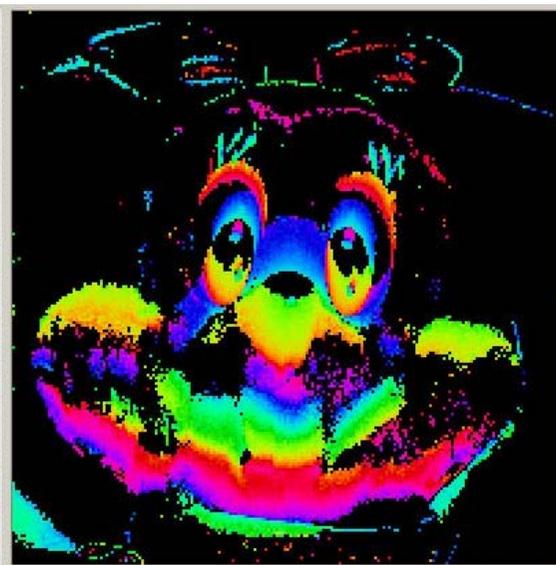
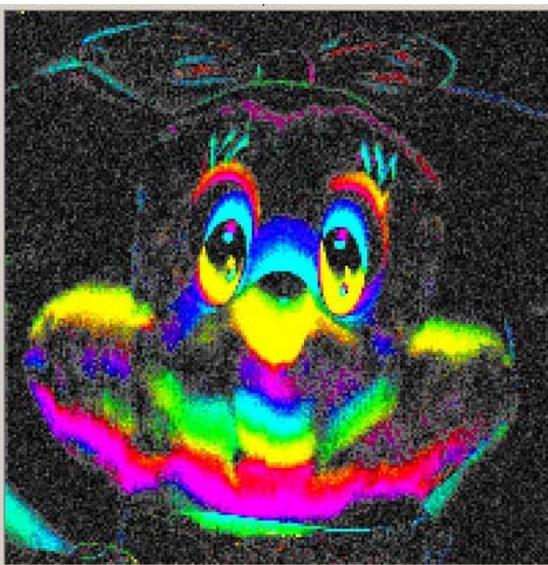
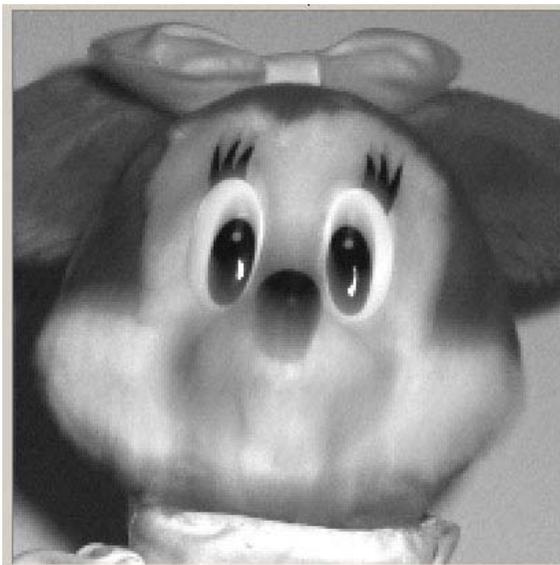
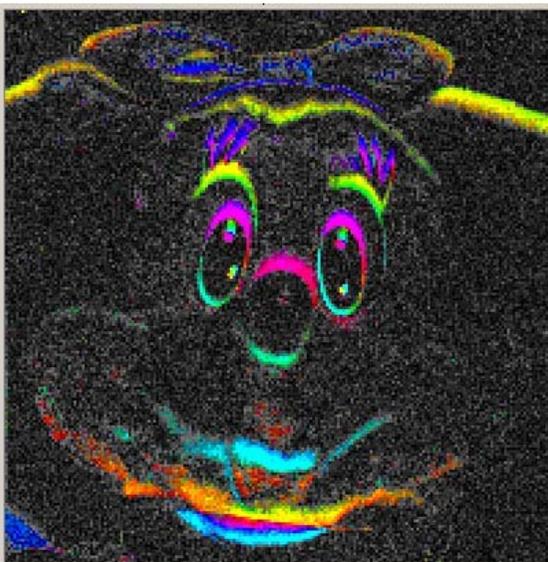
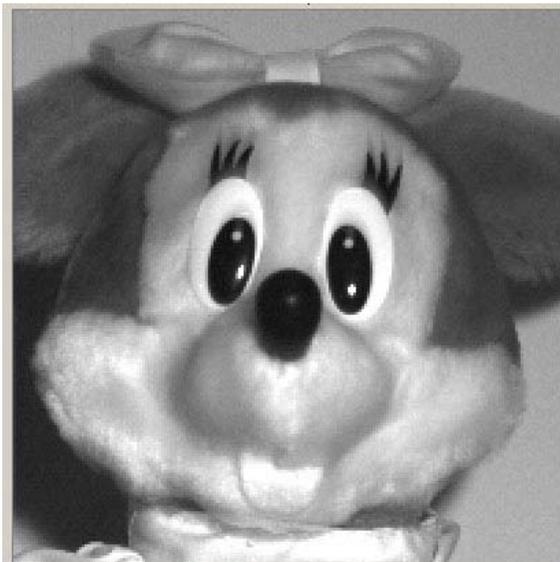
相関画像

位相の色相表示

変調撮像例 (2)

対象: 動くおもちゃ

素子: Sharp-TEG2 200x200 3PCIS ($\omega T = 2\pi$)



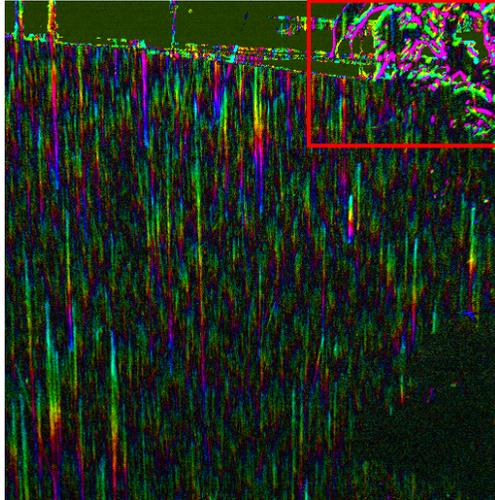
強度画像

相関画像

位相の色相表示

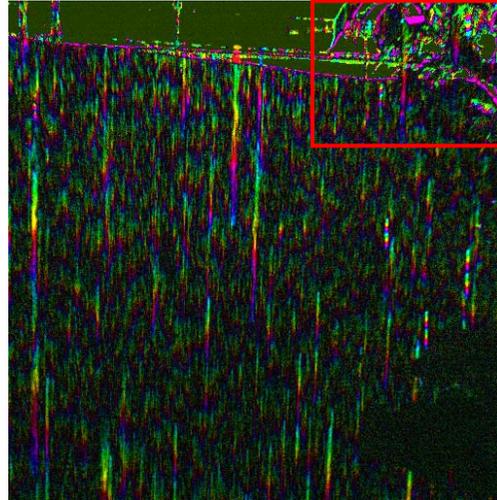
参照信号周波数による相関画像の変化

揺れる葉への応答



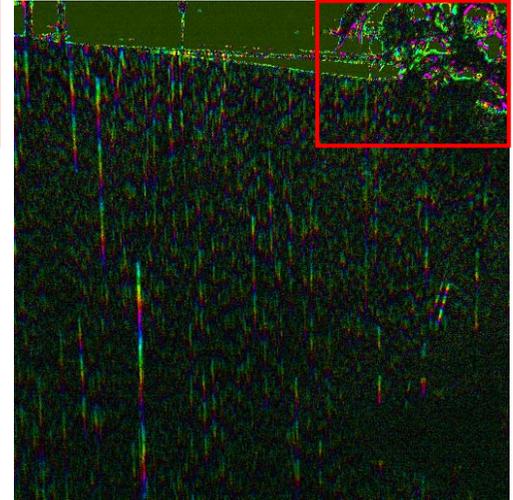
$n=1$

揺れる葉への応答

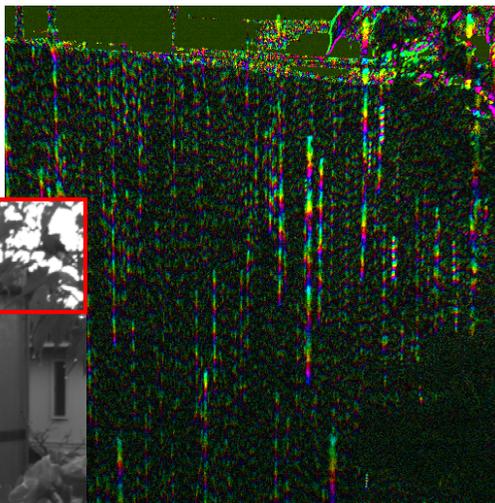


$n=2$

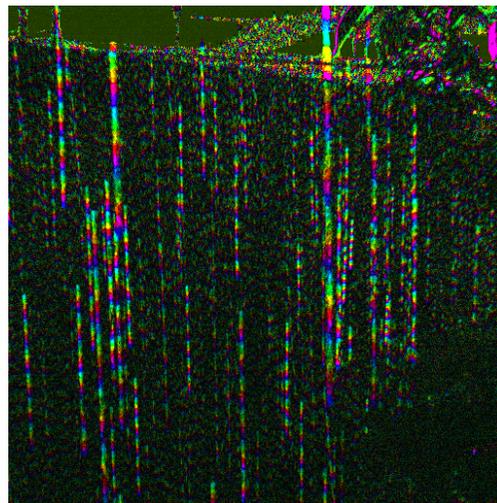
揺れる葉への応答



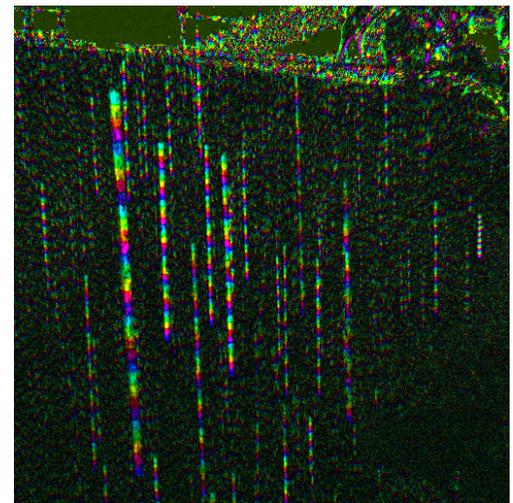
$n=3$



$n=5$



$n=6$



$n=7$



オプティカルフロー偏微分方程式

(流体力学における「移流方程式」と同一)

仮定: 運動によって対象上の明度は変化しない

対象点上の明度

$$\frac{d}{dt} f \equiv \left(\frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial t} \right) f = 0$$

対象の移動速度 $\partial x / \partial t \equiv v_x, \partial y / \partial t \equiv v_y$

optical flow constraint (OFC)

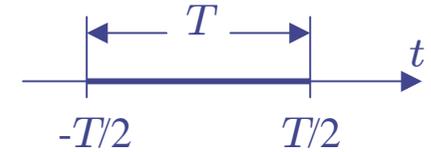
pixel (x, y) , time t

対象の像の明度

$$(v_x \partial_x + v_y \partial_y) f(x, y, t) + \partial_t f(x, y, t) = 0$$

$$(\partial_x \equiv \partial / \partial x, \partial_y \equiv \partial / \partial y, \partial_t \equiv \partial / \partial t)$$

荷重積分法の適用



オプティカルフロー偏微分方程式

$$(v_x \partial_x + v_y \partial_y + \partial_t) f(x, y, t) = 0 \quad \forall t \in \left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right]$$

$$\Leftrightarrow \int_{-T/2}^{T/2} \{v_x \partial_x + v_y \partial_y + \partial_t\} f(x, y, t) w(t) dt = 0 \quad \forall w(t)$$

任意荷重関数

- $\{w(t)\}$ を完備系に選べば同値な拘束式
- 積分により時間微分項がなくなる
- 時空間勾配法でも最小二乗法に時間積分が必要
- 荷重関数選択の自由度を活用可能

荷重関数に複素正弦関数を用いた場合

変調なし(強度画像) ($\omega=0$)

$$w(t) = e^{-j\omega t}$$

$$(\omega T = 2n\pi)$$

$$\int_{-T/2}^{T/2} (v_x \partial_x + v_y \partial_y + \partial_t) f(x, y, t) dt$$

$$= (v_x \partial_x + v_y \partial_y) \int_{-T/2}^{T/2} f(x, y, t) dt + [f(x, y, t)]_{-T/2}^{T/2}$$

強度画像

積分境界値項

複素正弦変調(相関画像)

$$\int_{-T/2}^{T/2} e^{-j\omega t} (v_x \partial_x + v_y \partial_y + \partial_t) f(x, y, t) dt$$

変調画像(相関画像)

$$= (v_x \partial_x + v_y \partial_y) \int_{-T/2}^{T/2} f(x, y, t) e^{-j\omega t} dt$$

$$+ [f(x, y, t) e^{-j\omega t}]_{-T/2}^{T/2} + j\omega \int_{-T/2}^{T/2} f(x, y, t) e^{-j\omega t} dt$$

$e^{-j\omega t}$ を含む積分境界値項

変調画像に比例

→ 符号を除いて同一!!

→ 新たな変調画像は不要!!

積分形式オプティカルフロー方程式

複素正弦波荷重積分(相関画像)

$$g_{\omega}(x, y) \equiv \int_{-T/2}^{T/2} f(x, y, t) e^{-j\omega t} dt$$

積分形式オプティカルフロー方程式

$$(v_x \partial_x + v_y \partial_y) g_{\omega}(x, y) + s_n [f(x, y, t)]_{-T/2}^{T/2} + j\omega g_{\omega}(x, y) = 0 \quad (s_n \equiv (-1)^n)$$

2周波数の連立

$$\begin{bmatrix} \partial_x g_{\omega 1} & \partial_y g_{\omega 1} & s_1 \\ \partial_x g_{\omega 2} & \partial_y g_{\omega 2} & s_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{matrix} \text{速度} \\ v_x \\ v_y \end{matrix} \\ [f(x, y, t)]_{-T/2}^{T/2} \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} \omega_1 g_{\omega 1} \\ \omega_2 g_{\omega 2} \end{bmatrix}$$

未知数3個

方程式(実数相当)4本

1画素のみで解ける

実時間センサシステム

■ Bayer配列時間相関カメラ

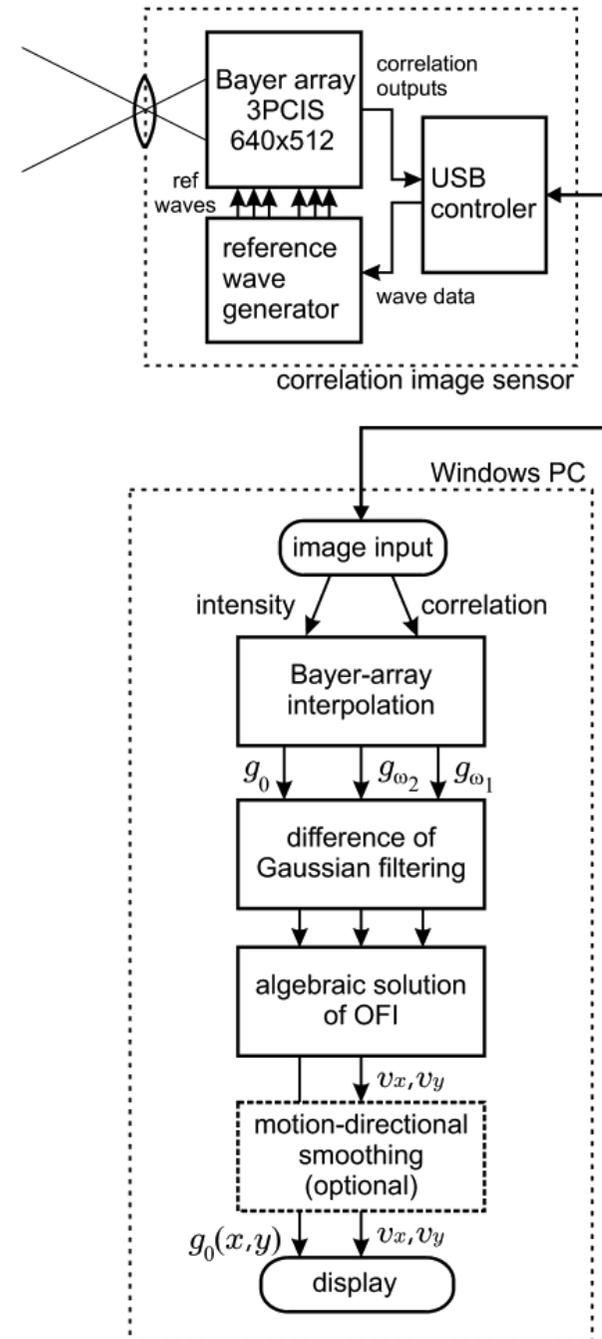
- 三相参照信号の生成
- 変調撮像
- A/D変換・USB転送

■ 汎用PC

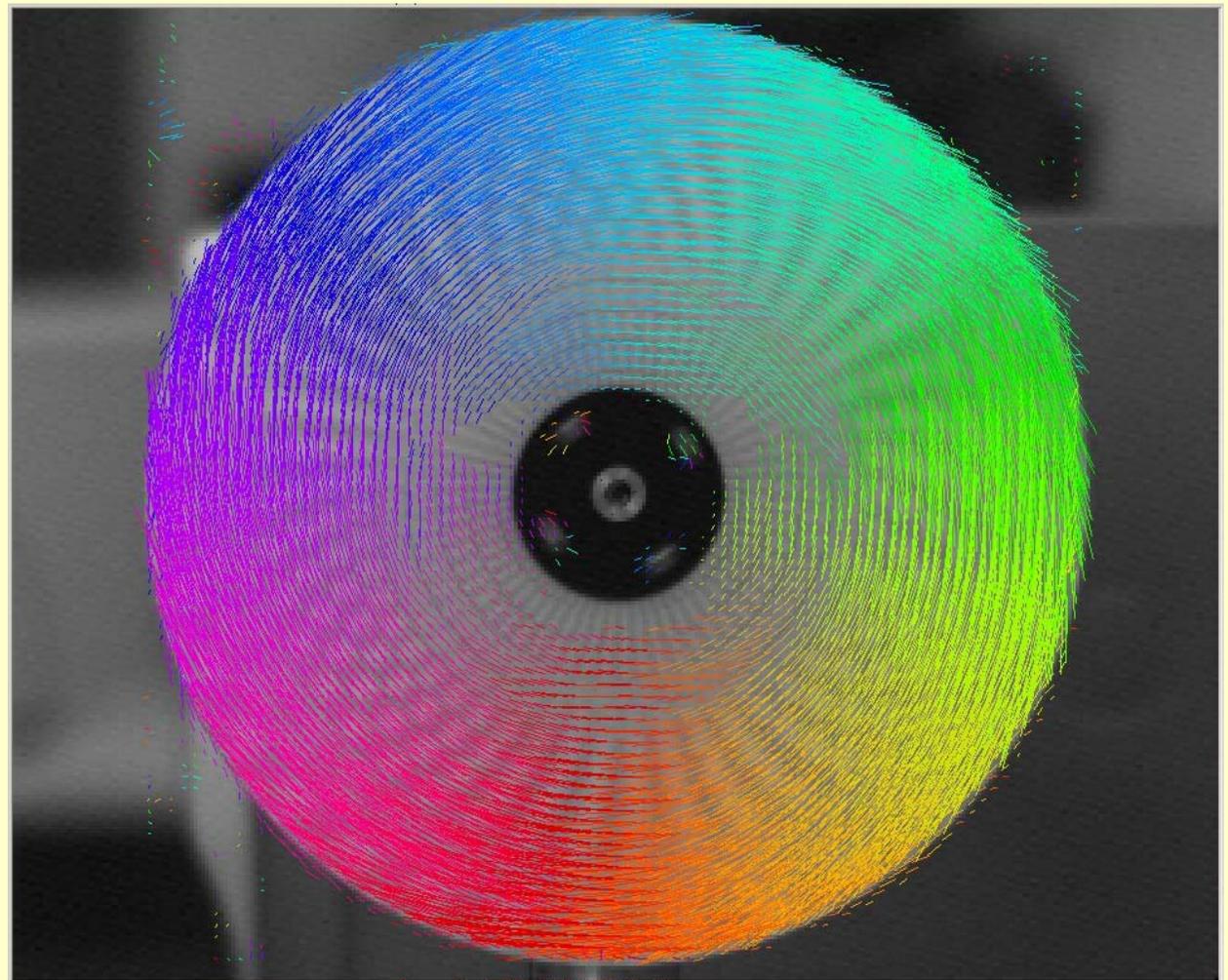
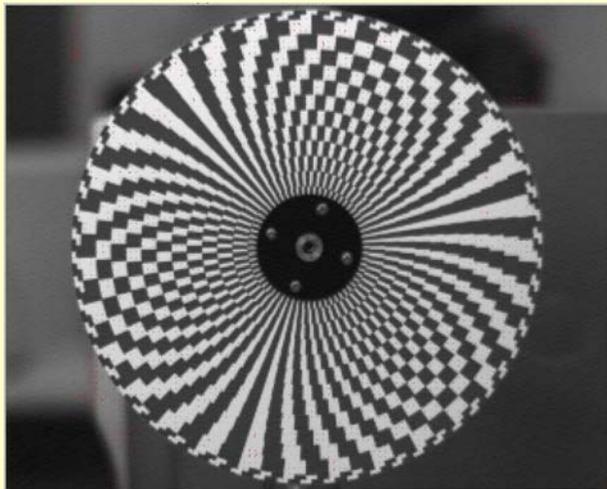
- 2次元FFT
- Bayer配列の補間
- 微分ガウシアンフィルタ
- 2次元逆FFT
- 代数解法+局所最小二乗法
- 運動方向への速度場平滑化
- 実時間カラーベクトル表示

■ 性能 (Core™ 2 Duo 3GHz)

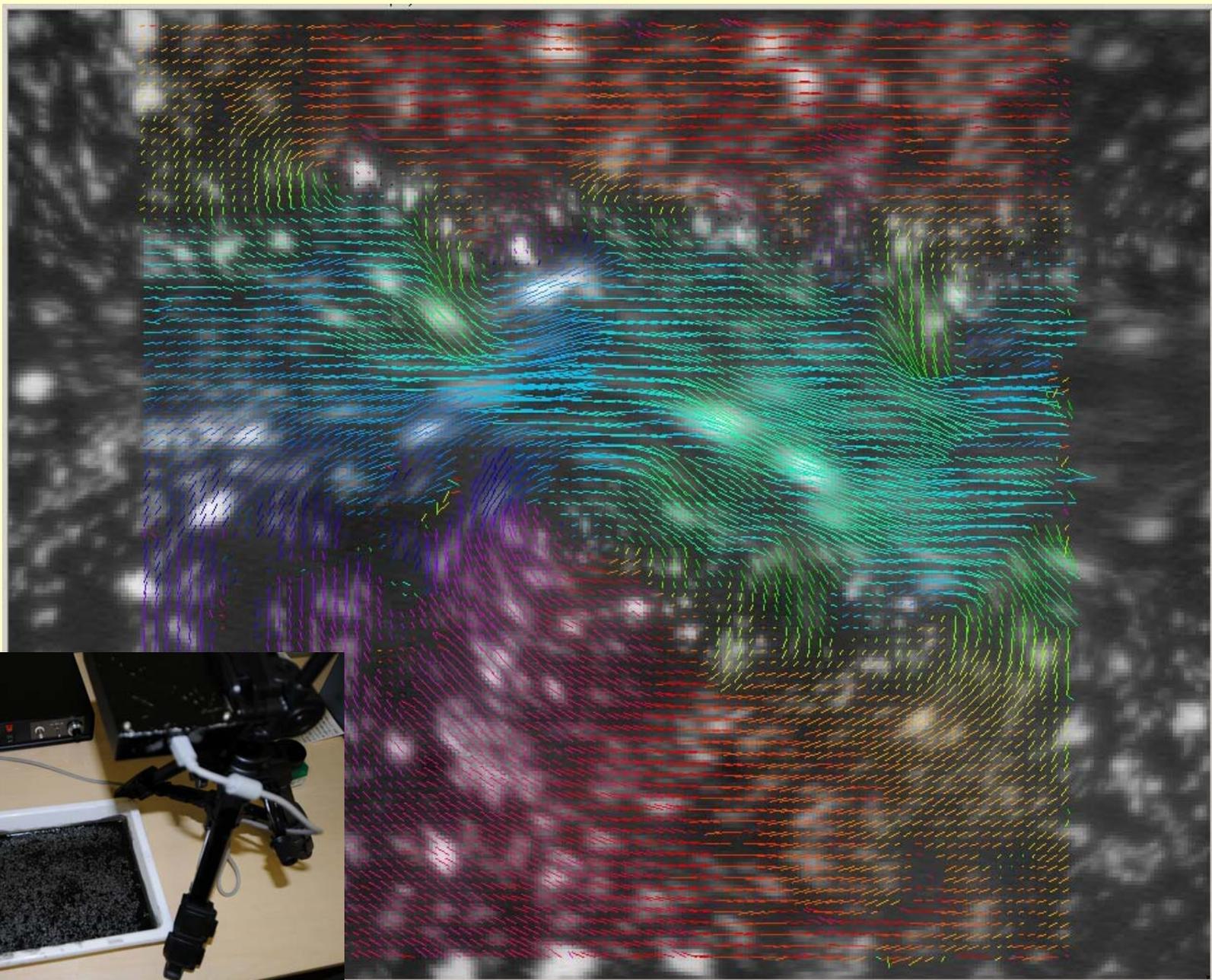
- ~7.6 frame/s (表示有)
- ~11.4 frame/s (表示無)
- 64x64~512x512 points



回転体(1)

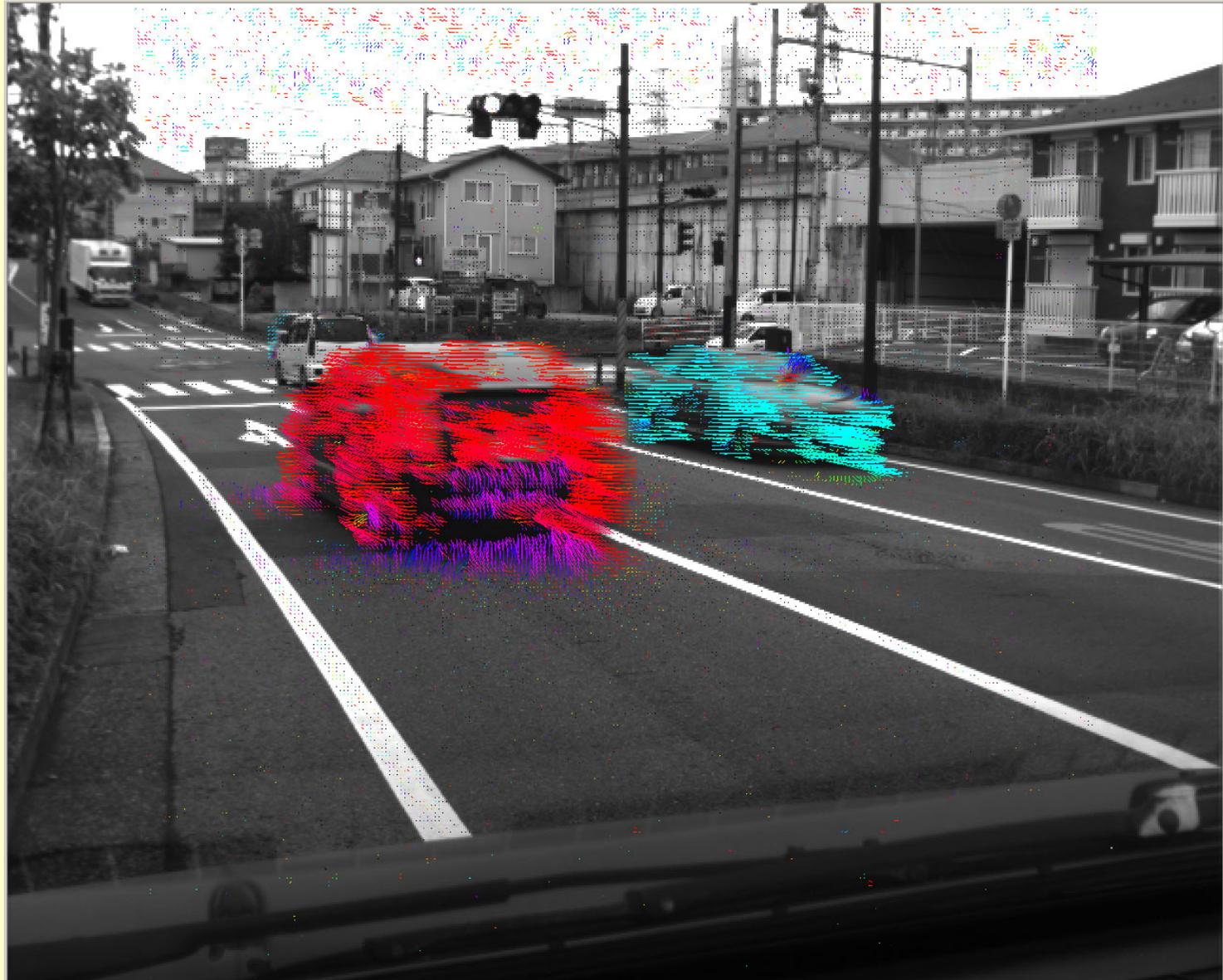


流体の速度分布(1)

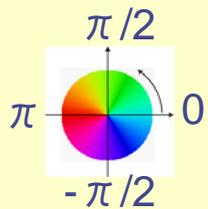


交差点の情景

速度ベクトルの大きさ: 線の長さ, 速度ベクトルの向き: 線の色

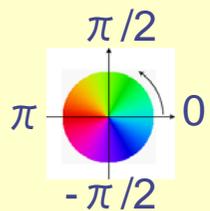
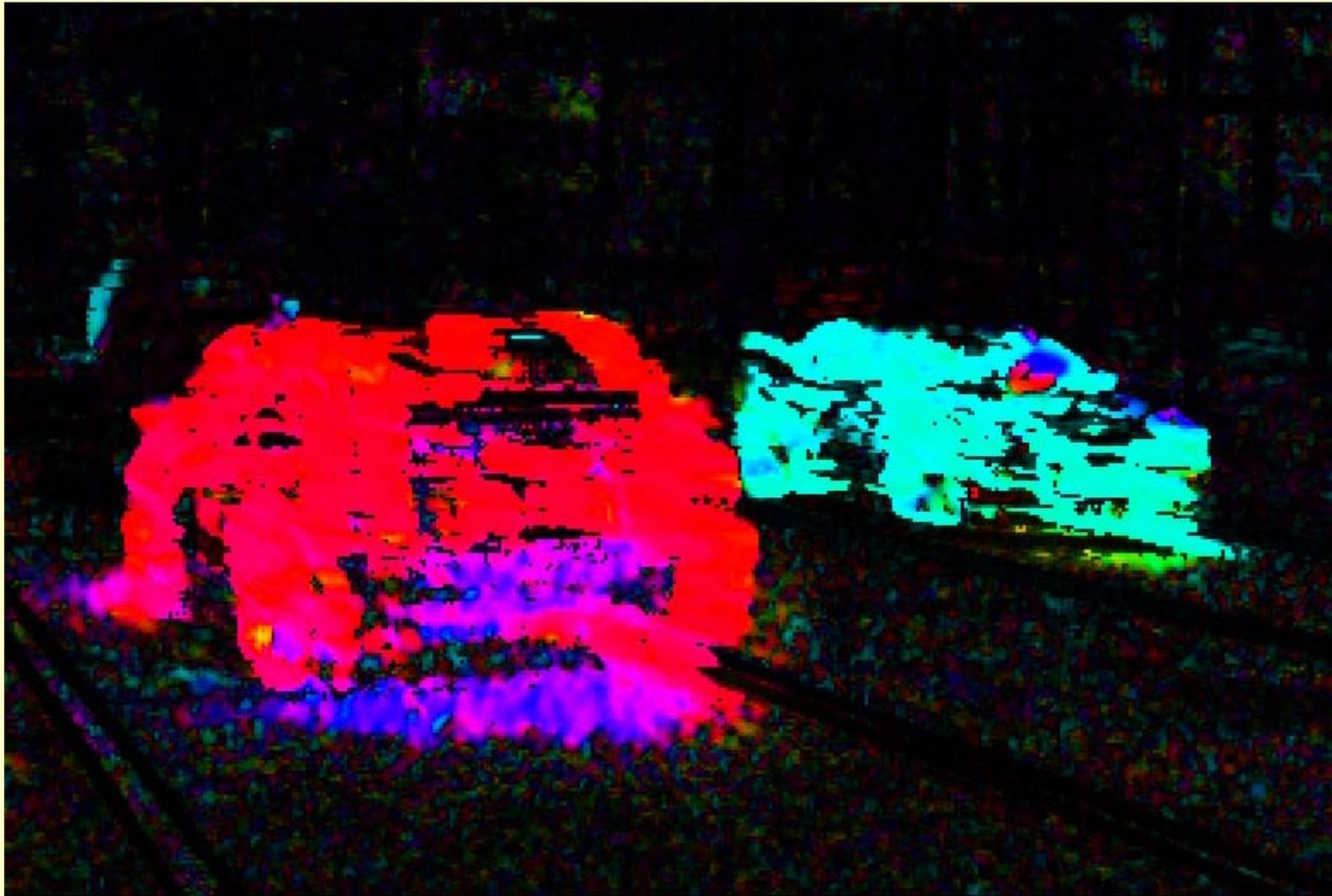


速度ベクトルの向き



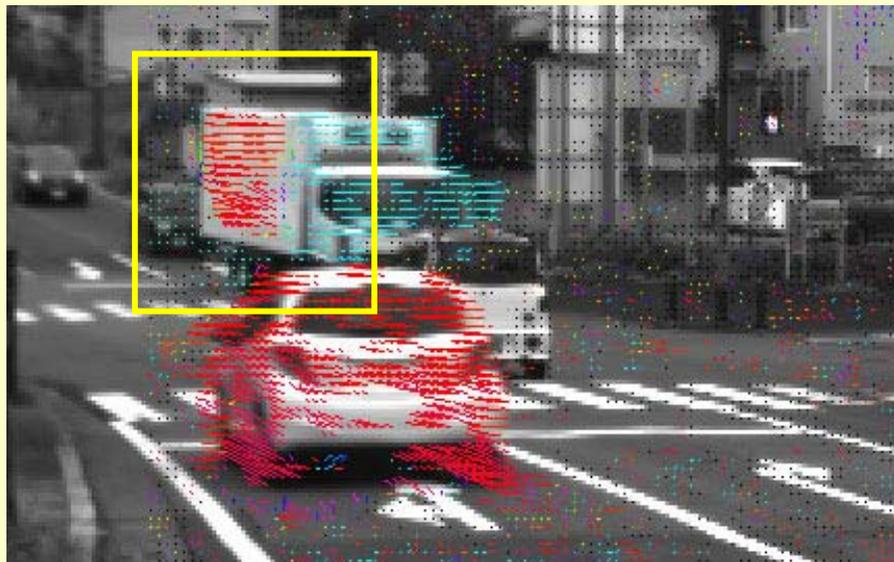
全画素での速度ベクトル検出とカラー表示

速度ベクトルの大きさ: 明度, 速度ベクトルの向き: 色相



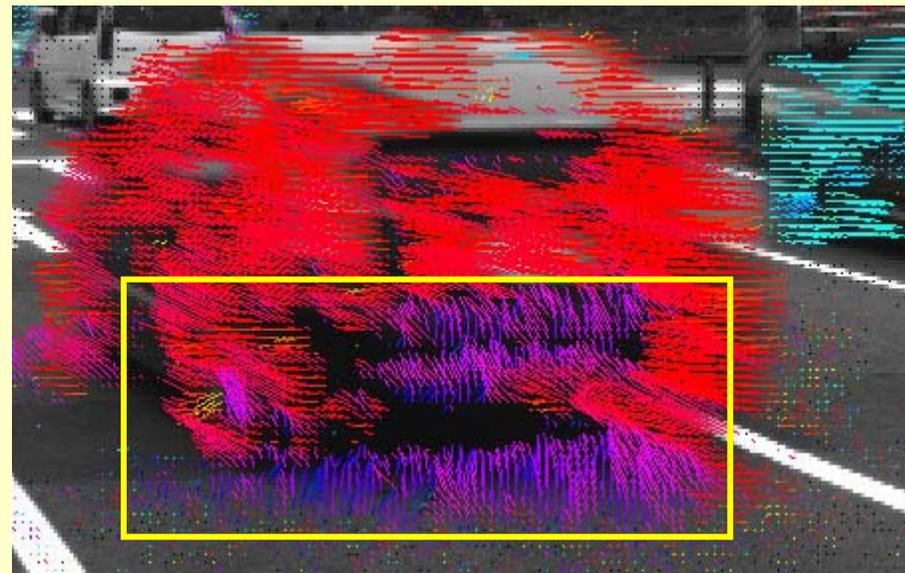
速度ベクトルの向き

異常な検出の例

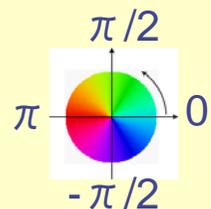
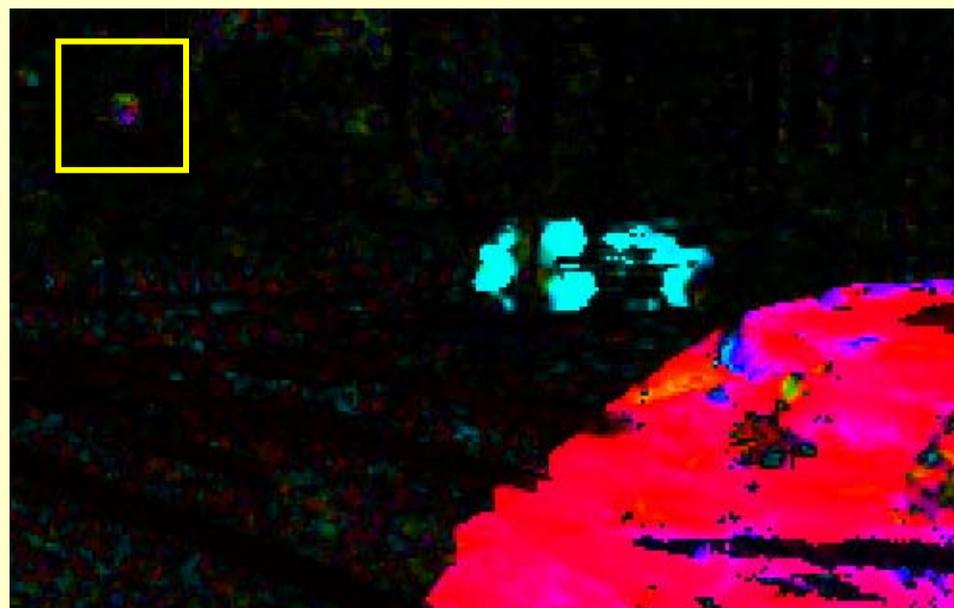


トラックの箱形荷台の逆方向速度場

車体下部と路上の影の異常速度場



点滅する信号
への応答



速度ベクトルの向き

荷重積分法

極推定問題: IOP Inverse Problems

偏微分方程式の係数推定問題 の新しい厳密直接代数解法

IOP PUBLISHING

INVERSE PROBLEMS

Inverse Problems 26 (2010) 015011 (26pp)

doi:10.1088/0266-5611/26/1/015011

Direct localization of poles of a meromorphic function from measurements on an incomplete boundary

周波数推定: IEEE Trans. Signal Processing

IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, VOL. 57, NO. 9, SEPTEMBER 2009

3317

Shigeru Ando¹ and Shigeru Ando²

¹Department of Electro-Communications, 1-5-1, Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan
²Department of Information Science, Faculty of Science, University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan

shigeru@uec.ac.jp

Manuscript received May 2009, in final form 21 October 2009

Accepted for publication December 2009

DOI: 10.1109/TSP.2009.4999999
http://dx.doi.org/10.1109/TSP.2009.4999999

An Exact Direct Method of Sinusoidal Parameter Estimation Derived From Finite Fourier Integral of Differential Equation

Shigeru Ando

周波数推定のドップラ計測応用(SICE論文賞)

Abstract—In this paper, we propose a novel method for estimating the parameters (frequency, amplitude, and phase) of sinusoids. To derive the estimator, we start from the differential equation of a sinusoid. To remove the differential equation, we obtain an algebraic relation for frequency, we use the weighted integrals of the differential equation. The weighted integrals are equivalent to the differential equation when the weight functions are applied. As weight functions, Fourier kernels have excellent properties. To

モアレドップラ効果と周波数推定
Depth velocity imaging based on moiré
東京大学大学院 情報理工学系
IS&T, The Univ. of Tokyo, OYasui
E-mail: Mochi

周波数推定の光干渉計測応用

短時間厳密周波数推定に基づく非同期ヘテロダイン干渉映像法
安藤 繁, 佐藤世智, 栗原 徹 (東京大学)

method to reconstruct the positions of multiple sources in a field from measurements on an arbitrary boundary. The exactness of the algorithm depends on

波源推定(電気学会E部門論文賞)

波動場の小領域観測による瞬時波源定位の理論と実験

学生員 小山 翔一* 正員 栗原 徹*
上級会員 安藤 繁*

A Theory and Experiment of Instantaneous Wave Source Localization from a Wave Distribution on a Small Region

Shoichi Koyama*, Student Member, Toru Kurihara*, Member, Shigeru Ando*, Senior Member

We deal with the problem of direction and distance estimate of emission sources in 3-D space. To solve this problem, we introduce a partial differential equation (PDE) what we call the location constraint PDE (LC-PDE). The LC-PDE provides a necessary and sufficient description of wavefield generated by a source at direction θ and range R . To remove differentials, we integrate the LC-PDE in a finite rectangular area with complex weight functions. By using a well-known class of window function to eliminate the integral boundary, we show an exact finite set of algebraic equations can be obtained including θ, R as the unknowns. The number of 2-D discrete Fourier transform (DFT) components of wavefield as the mea-

キーワード: 波源定位, 荷重積分法, 到来方向

Keywords: Wave Source Localization, Weighted Integral Method, Direction of Arrival, DOA

波形パラメータ推定(SICE計測部門論文賞)

[計測自動制御学会論文集]
Vol. XX, No. 0, 1/8 (2006)

荷重積分法に基づく白色光干渉信号の直接中心決定アルゴリズム

佐藤 世智*・栗原 徹*・安藤 繁*

Direct localization algorithm of white-light interferogram center based on the weighted integral method

Seichi SATO*, Toru KURIHARA* and Shigeru ANDO*

This paper proposes an exact direct method to determine all parameters including an envelope peak of the white-light interferogram. A novel mathematical technique, the weighted integral method (WIM), is applied that starts from the characteristic differential equation of the target signal, interferogram in this paper, to obtain the algebraic relation among the finite-interval weighted integrals (observations) of the signal and the waveform parameters (unknowns). We implemented this method using FFT and examined through various numerical simulations. The results show the method is able to localize the envelope peak very accurately even if it is not included in the observed interval. The performance comparisons reveal the superiority of the proposed algorithm over conventional algorithms in all terms of accuracy, efficiency, and estimation range.

時間相関イメージセンサの応用(2)

実時間ヘテロダイン干渉光計測

特色と応用方向

- 実時間2次元振幅位相復調
- ヘテロダイン技術による自由な周波数選択
- 計測の面的同時性の有効活用
- 光干渉計測技術の広範な適用・低コスト化
- ホログラム, 変形, 三次元形状, 振動, ...
- 光渦, スペックル, ドップラー, 複屈折, ...

光の実時間振幅位相復調

ヘテロダイン干渉光計測の2次元化

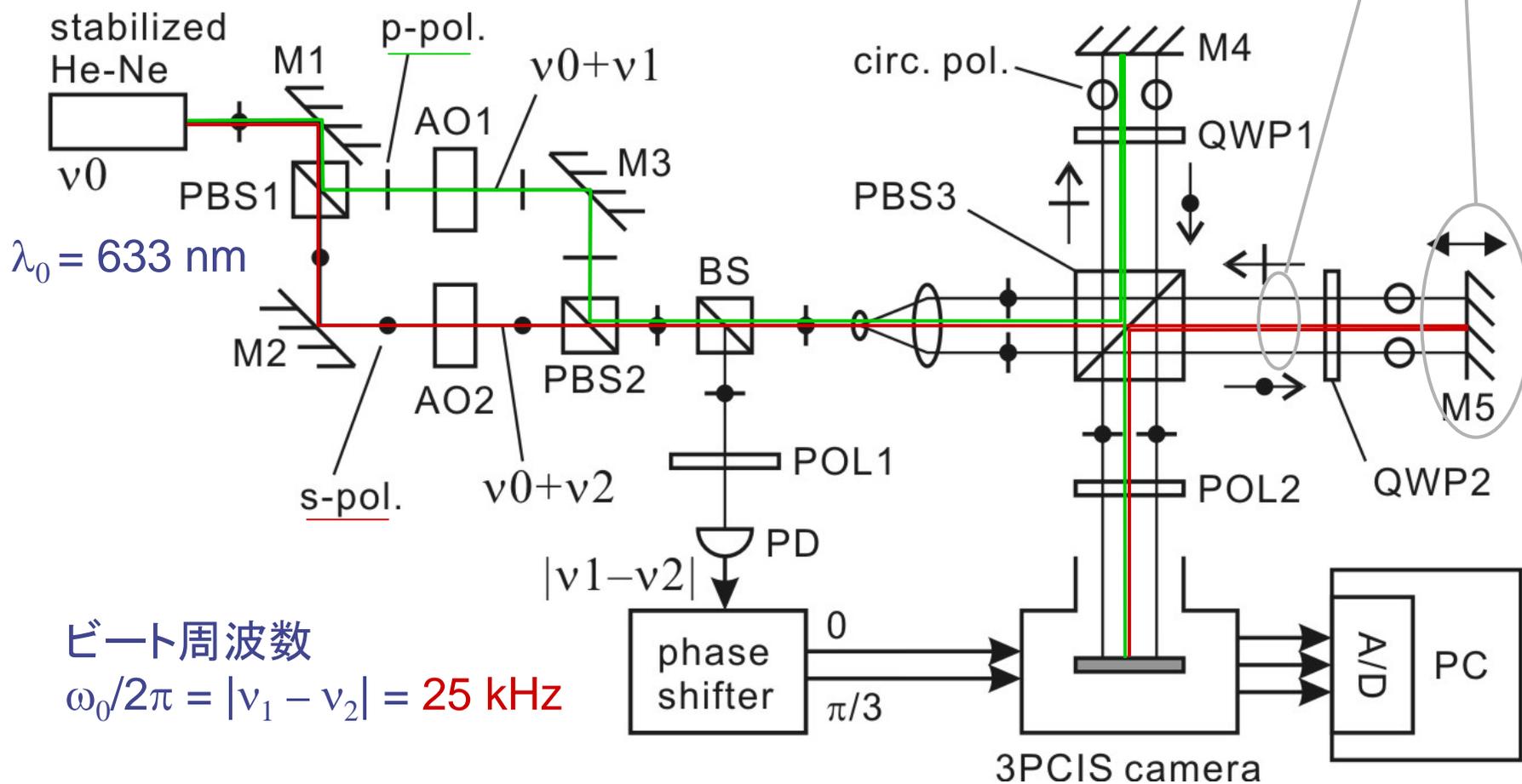
	フレーム数	時間	復調精度
点計測 (光検出器の走査)	一	長	高
位相シフト法 (汎用のイメージセンサ)	多	長	高
	少(3)	短	低
振幅・位相復調型 イメージセンサ	1	1	高(0.2度)

三相時間相関イメージセンサによる実時間化
干渉振幅・位相を1フレーム間に同時に復調

ヘテロダイン干渉パターン撮像系

周波数安定性 $\sigma_\nu < 2 \text{ MHz}$
 (波長安定性 $\sigma_\lambda < 2.7 \times 10^{-6} \text{ nm}$)

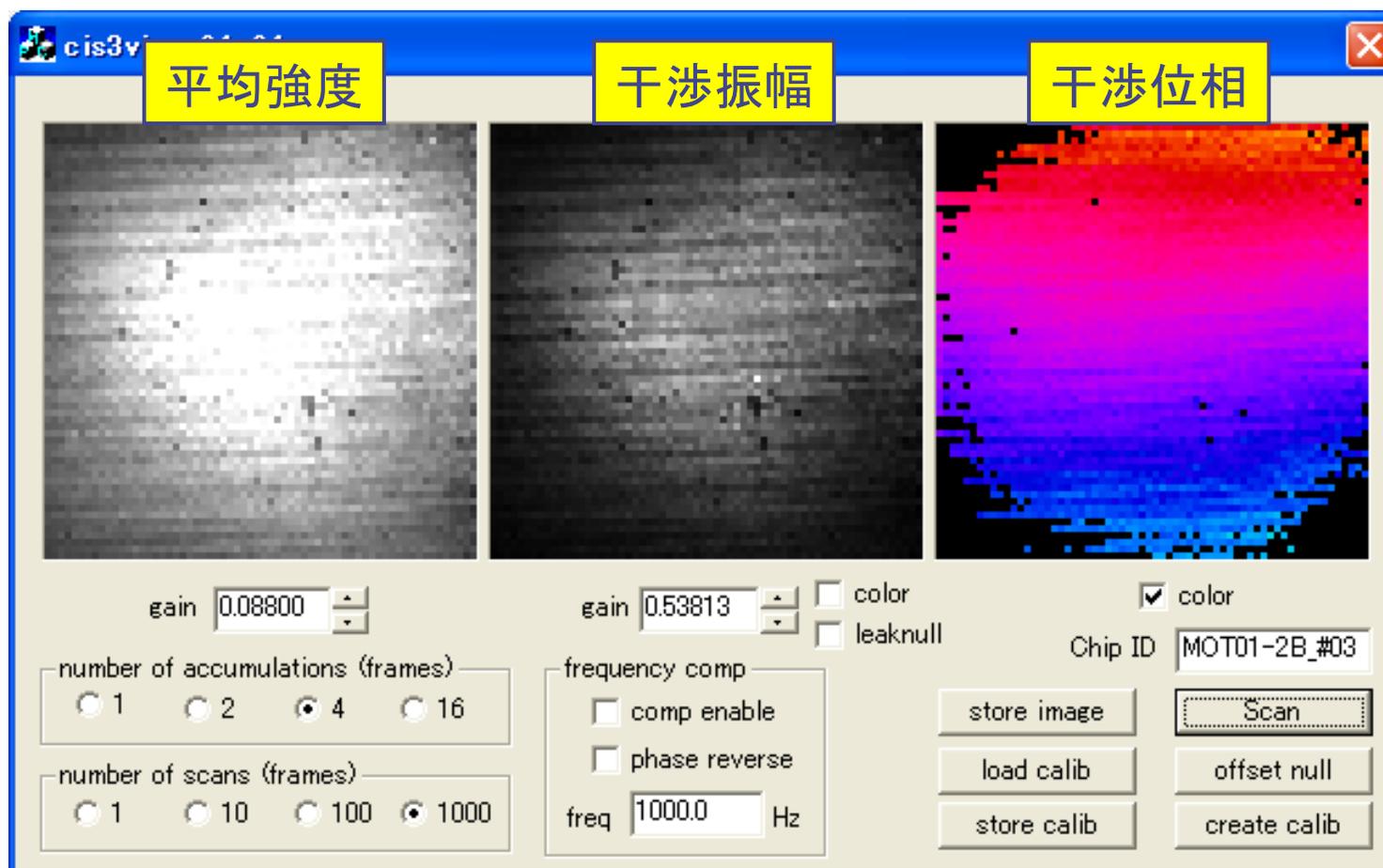
ピエゾ素子で変位
 透過物体を挿入



ビート周波数
 $\omega_0/2\pi = |\nu_1 - \nu_2| = 25 \text{ kHz}$

遮断周波数 21 kHz ← 走査周波数 122 frame/s

カメラ出力画像表示インターフェース

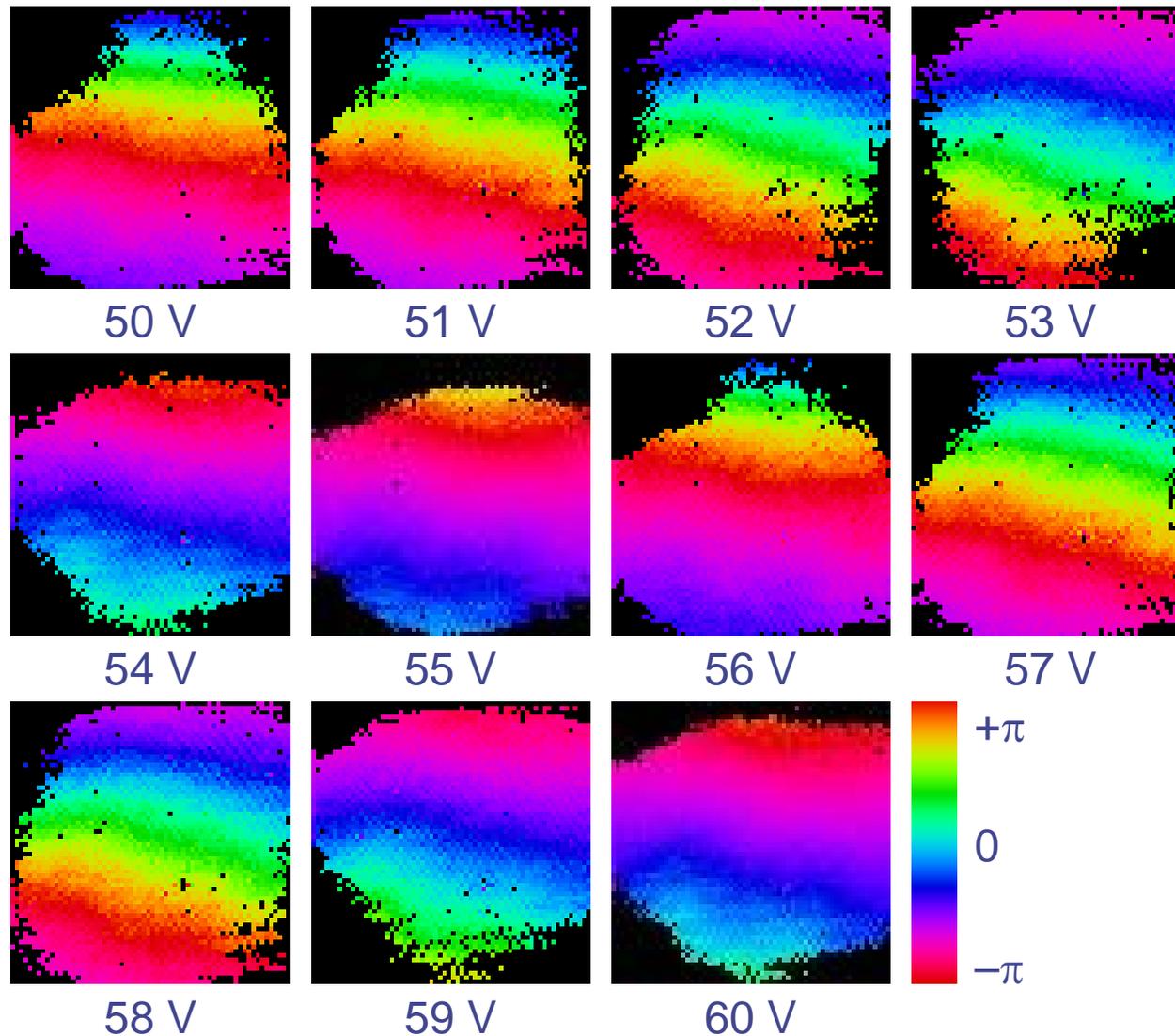


実験1: 変位パターン計測(1)

◆ ピエゾ素子
変位-電圧特性
 $61 \pm 15 \text{ nm/V}$
(カタログ値)

◆ 4フレーム平均化
→ 実質的な走査
周波数 30 fr/s

◆ 位相検出精度
 $\sim 0.85^\circ$
(SN比 $\sim 52 \text{ dB}$)



ピエゾ素子印加電圧に対する干渉位相画像

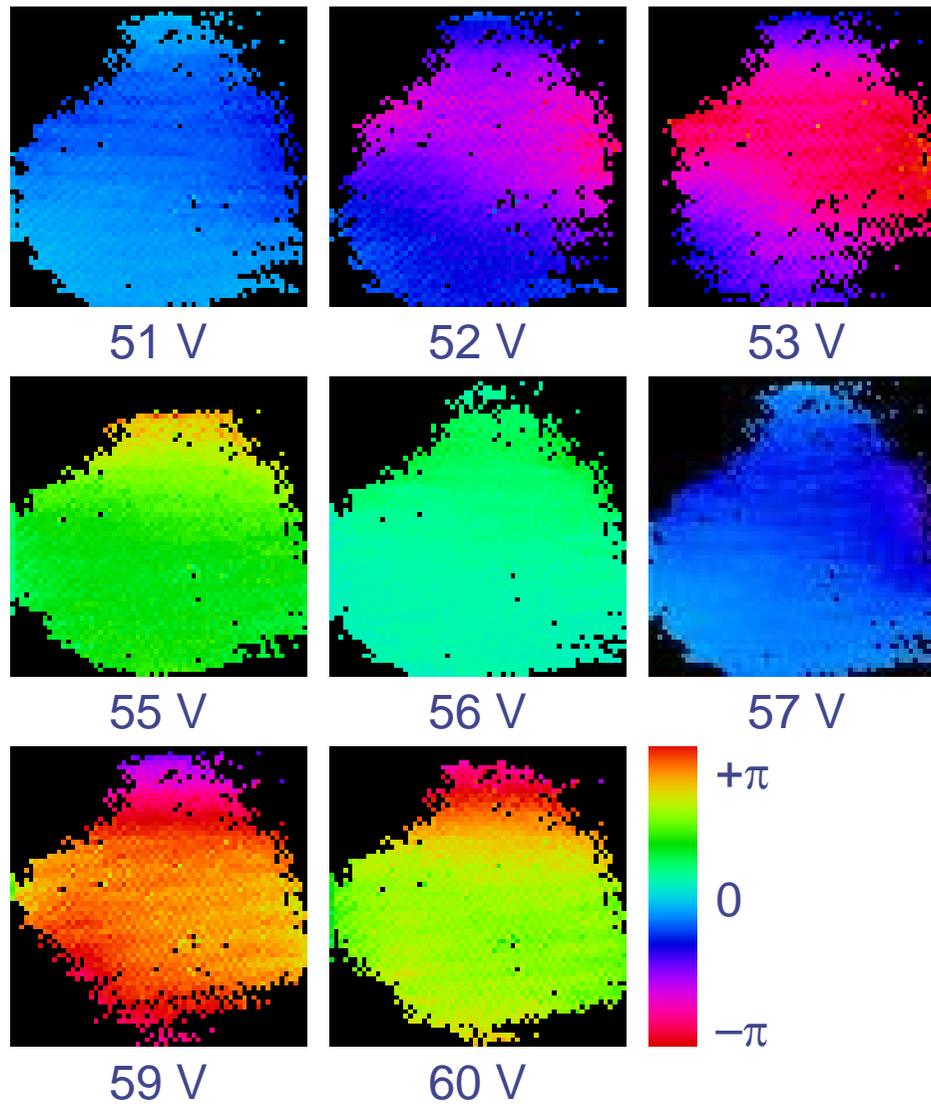
実験1: 変位パターン計測(2)

- ◆ ピエゾ素子
変位-電圧特性
61 ± 15 nm/V
(カタログ値)

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda_0} \Delta z$$

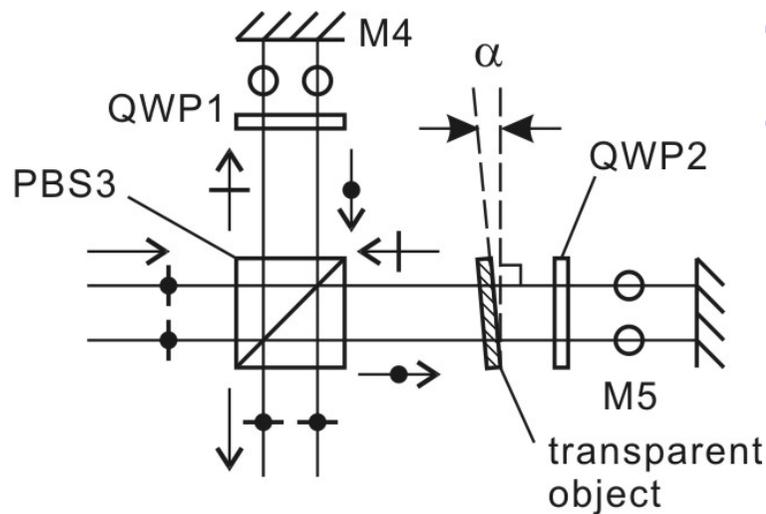
- ◆ 4フレーム平均化
→ 実質的な走査
周波数 30 fr/s

- ◆ 位相検出精度
~ 0.85°
(SN比 ~ 52 dB)



位相差画像(50 V基準)

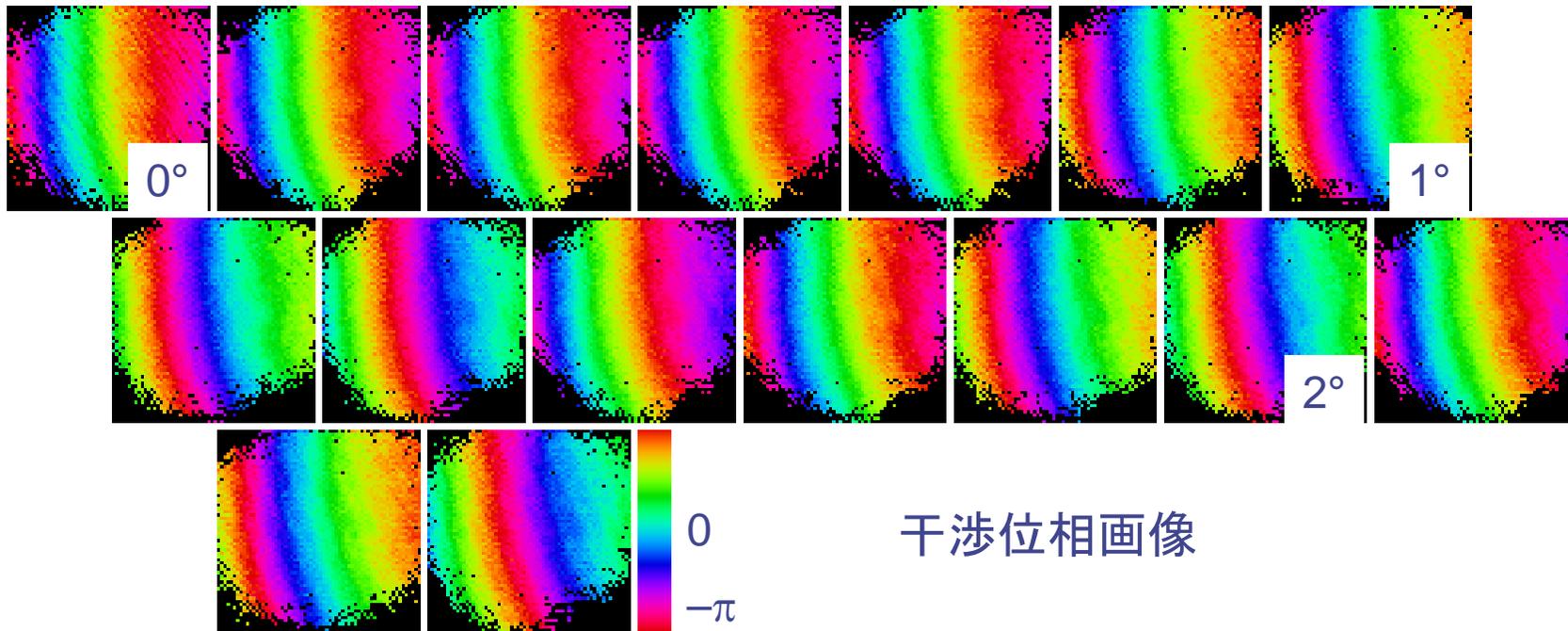
実験2: 透過物体の傾きによる変化(1)



- ◆ 2 mm厚アクリル板を挿入
- ◆ 10'ずつ回転

$$\Delta\phi \simeq \frac{4\pi}{\lambda_0} \frac{n}{n_0} (n_0 - n) d \frac{\alpha^2}{2}$$

空気の屈折率
厚み
アクリルの屈折率



干渉位相画像

時間相関イメージセンサの応用(3)

光渦による遠隔6軸変位計測

特色と応用方向

- 近年問題化した構造物の安心安全がターゲット
- 重要な社会基盤をなす道路・鉄道・橋・トンネル等を対象
- 1光ビームで並進・回転の全ての静止変形を計測
- 光渦(Optical Vortex)の初めての本格的計測応用
- 時間相関イメージセンサによる振幅位相分布検出
- 実時間計測・センサネットワーク

社会基盤の安全性への要求

CREST: 都市基盤の災害事故リスクの監視とマネジメント



兵庫県南部地震



中越地震による
新幹線脱線



強風による羽越本線
での脱線

ミネアポリスでの
高速道路橋
の崩壊



突然の落橋

構造物の変形計測ネットワーク

土木・建築構造物の歪や損傷を継続的に監視する

1. 1次元連鎖構造

- 面的広がりが不可能
- トンネル, 橋梁, 配管, ...

2. 6軸精密静止変形計測

- 並進3軸 (精度~数10 μ m)
- 回転3軸 (精度~数10 μ rad)
- 高測定頻度 (~数測定/s)

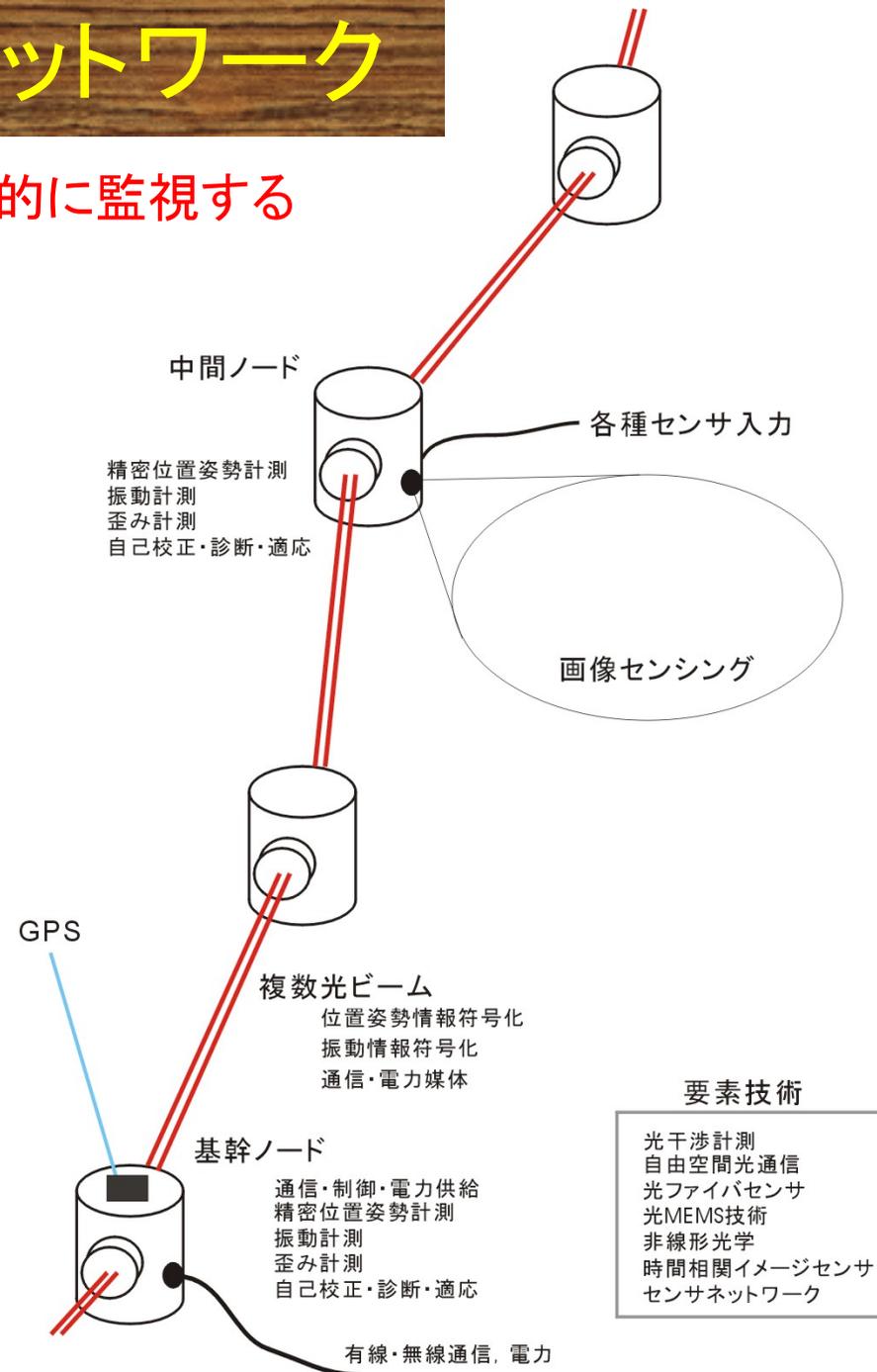
3. 3軸振動計測

4. 汎用センサノード機能

- 通信機能
- センシング機能
- 省電力・遠隔電力供給

5. 自己校正・診断・適応

- 簡易な設置
- 簡易な保守



Paraxial波動方程式

伝搬方向を z 軸とし, x, y 方向にゆるやかに変化する波面

$$u(x, y, z) = \psi(x, y, z)e^{-jkz} = \psi(\rho, \theta, z)e^{-jkz}$$

$$(k = 2\pi/\lambda)$$

ψ が近似的に満たす方程式: Paraxial波動方程式

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} - 2jk\frac{\partial}{\partial z}\right)\psi(x, y, z) = 0$$

その光軸近傍局在解

$$\psi_{nm}(x, y, z) = \psi_n(x, z)\psi_m(y, z)$$

$$\psi_n(x, z) = \left(\frac{1}{w(z)}\right)^{1/2} H_n\left(\frac{\sqrt{2}x}{w(z)}\right) e^{-jkx^2/2q(z)} e^{j(n+1/2)\phi(z)}$$

エルミート関数

$$\frac{dq(z)}{dz} = 1, \quad w^2(z) = -\frac{\lambda}{\pi} \Im\left\{\frac{1}{q(z)}\right\}$$

多重零点光ビーム

複素座標によるParaxial波動方程式の解 ($n=0$)

$$\begin{aligned} G_{m,0}(\zeta, \zeta^*, z) &= \frac{1}{2^{m/2} w_0^{m+1} w(z)} \left(\frac{\sqrt{2}r}{w(z)} \right)^m \\ &\quad \times \exp\left\{ -\frac{jk\zeta\zeta^*}{2R(z)} - jm\theta - \frac{\zeta\zeta^*}{w(z)^2} + j(m+1)\psi(z) \right\} \\ &= \frac{1}{2^{m/2} w_0^{m+1} w(z)} \exp\left\{ -\frac{jk\zeta\zeta^*}{2R(z)} + j\psi(z) \right\} \\ &\quad \times \exp\left\{ -\frac{\zeta\zeta^*}{2(w(z)/\sqrt{2})^2} \right\} \left(\frac{r}{w(z)/\sqrt{2}} \right)^m e^{-jm(\theta-\psi(z))} \end{aligned}$$

複素座標の置き換え (スケール変化と座標回転)

$$\eta \equiv \frac{r}{w(z)/\sqrt{2}} e^{-j(\theta-\psi(z))}$$

Gouy位相

等方的波面位相項 ビーム半径

$$A(r, z) \equiv \frac{1}{2^{m/2} w_0^{m+1} w(z)} \exp\left\{ -\frac{jk\zeta\zeta^*}{2R(z)} + j\psi(z) \right\}$$

要素ビーム = ガウス包絡べき関数

Gauss包絡 べき項

$$G_{m,0}(\zeta, \zeta^*, z) = A(r, z) G(|\eta|) \eta^m$$

要素ビームの従来記法との対応

$$\begin{aligned}\sqrt{\pi|n|!} \text{LG}_0^n(r, \theta, z) &= \frac{e^{j(kr^2/2R(z) - \psi(z))}}{w(z)/\sqrt{2}} e^{-\zeta\zeta^*/2} \zeta^{|n|} \\ &= A(r, z)G(|\zeta|)\zeta^{|n|}\end{aligned}$$

要素ビームの線形荷重和応

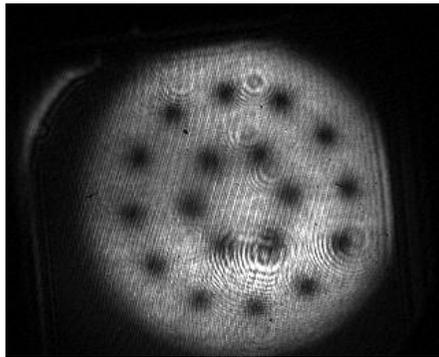
$$\begin{aligned}&\sum_{n=0}^M c_n \sqrt{\pi|n|!} \text{LG}_0^n(r, \theta, z) \\ &= \sum_{n=0}^N c_n \underbrace{A(r, z)G(|\zeta|)}_{n\text{によらない共通項}} \zeta^n \\ &= \underbrace{A(r, z)G(|\zeta|)}_{\text{共通の球面位相項}} \underbrace{\sum_{n=0}^N c_n \zeta^n}_{\text{零点多項式}} \\ &\quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\text{Gauss包絡}}\end{aligned}$$

多重零点光ビーム

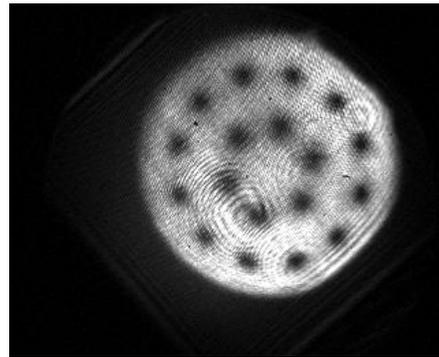
$$\text{MZ}(\zeta) \equiv G(|\zeta|) \sum_{n=0}^N c_n \zeta^n$$

干涉波面($\Phi 26\text{mm}$ 射出時)

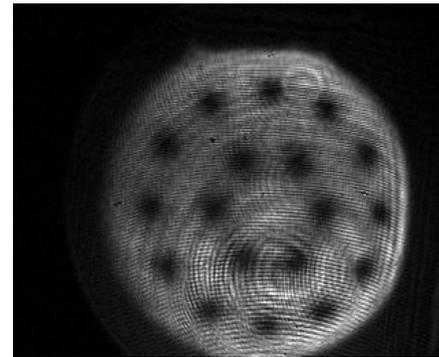
0.5m



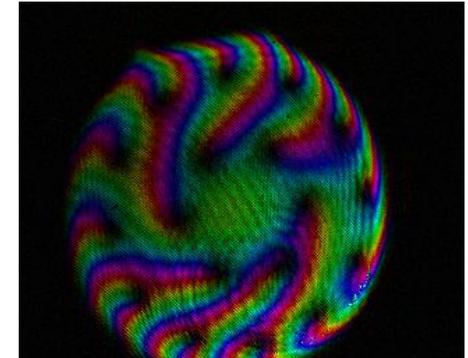
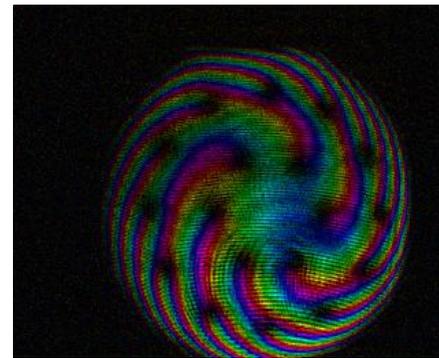
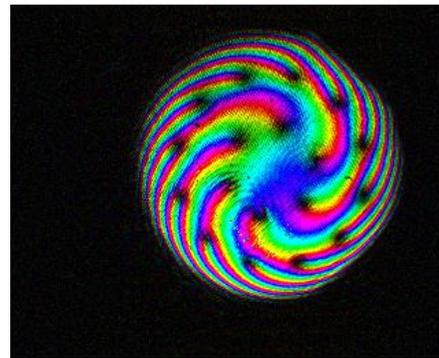
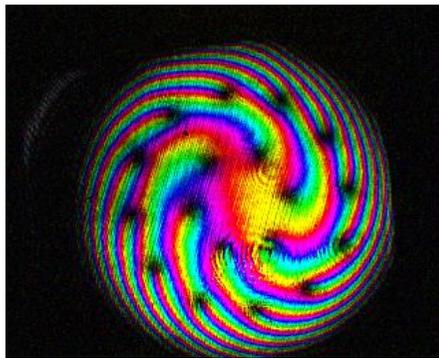
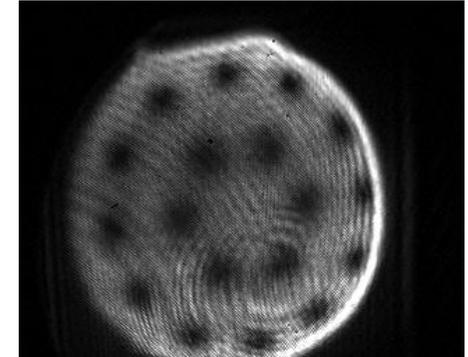
2.5m



3.5m



5.0m



多重零点光ビームの性質

■ 伝搬不変性

- 伝搬により相対的零点配置が変化しない
- ビーム径はガウスビームと同様に拡大
- Gouy位相により零点配置の角度が回転

■ 零点分布と多項式の1対1対応

- 零点は多項式項のみによって生じる

$$\begin{aligned} |A(r, z)G(|\zeta|)| &= \left| \frac{|e^{j(kr^2/2R(z) - \phi(z))}|}{w(z)/\sqrt{2}} \right| e^{-\zeta\zeta^*/2} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{w(z)} e^{-\zeta\zeta^*/2} > 0 \end{aligned}$$

球面位相項とGauss包絡は決して零とならない

■ 零点分布の自由度と一意性

- 代数学の基本定理: 根と係数の1対1対応
- 目的に合わせて零点配置を自由に設計可能

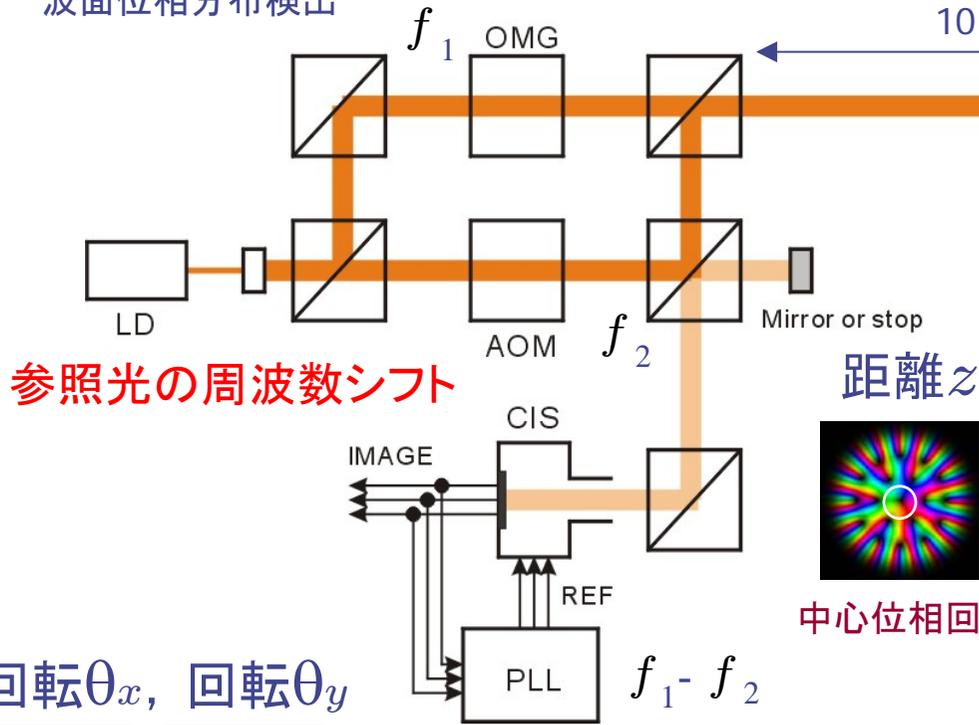
■ フーリエ変換不変性

- 高度で効率的な画像処理アルゴリズムの導入

ヘテロダイン干渉 遠隔6軸変形計測

基幹ノード

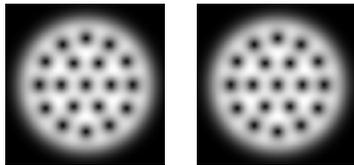
- コヒーレント光源
- 多重零点波面の送出
- 参照波面の送出
- 波面位相分布検出



参照光の周波数シフト

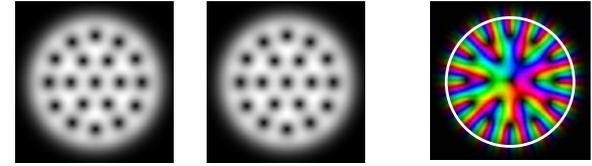
距離 z

回転 θ_x , 回転 θ_y



零点配列の
水平・垂直移動

横変位 x , 横変位 y , 回転 θ_z

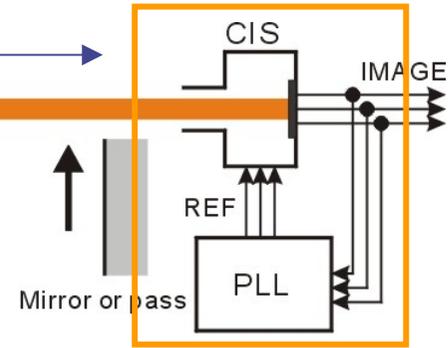


零点配列の
水平・垂直移動

周辺位相回転

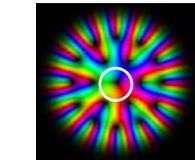
隣接ノード

- 波面位相分布検出
- 波面の折り返し送出



周波数シフトの推定と復調

AOM=Acousto-Optic Modulator
OMG=Optical Multipole Generator
CIS=Correlation Image Sensor



中心位相回転

CREST 「都市基盤の災害事故リスクの監視とマネジメント」で開発

フィールド用試験機(初号機)の試作と実証

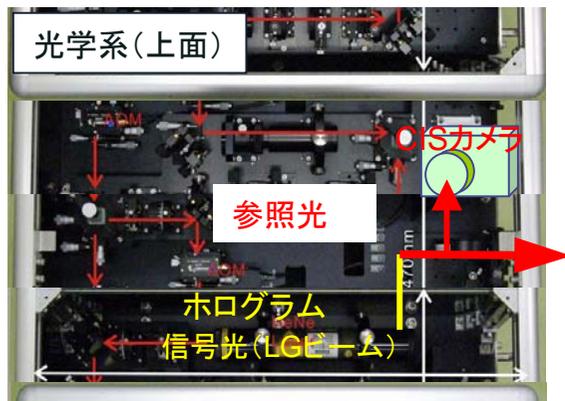
◆ フィールド用試作機: 基本性能確認

【基幹ノード】(650mm x 470mm)

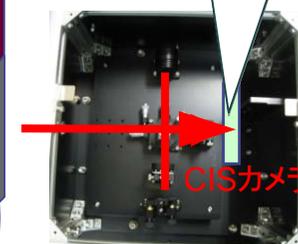
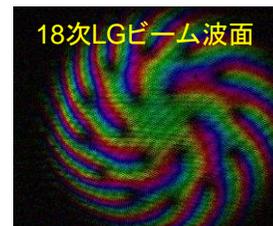
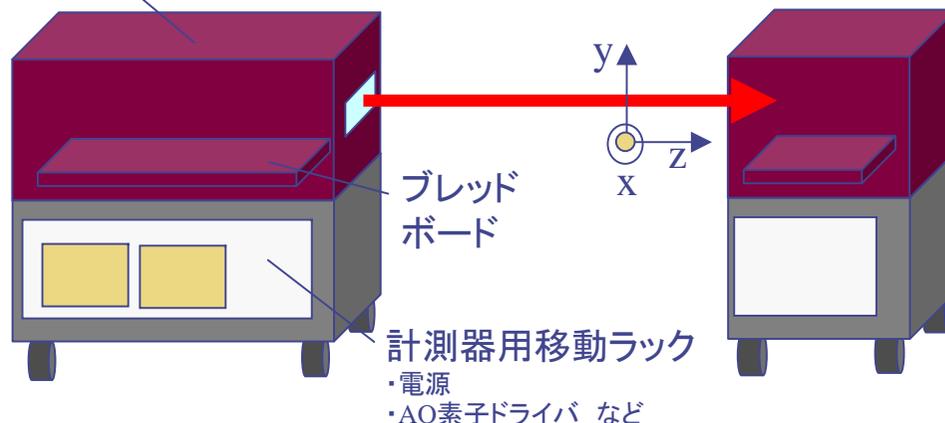
- ・LGビーム発生光学系
- ・ θ_x 、 θ_y 測定系

【中継ノード】(470mm x 470mm)

- ・測定ターゲット(変位させる)
- ・ x 、 y 、 θ_z 測定系

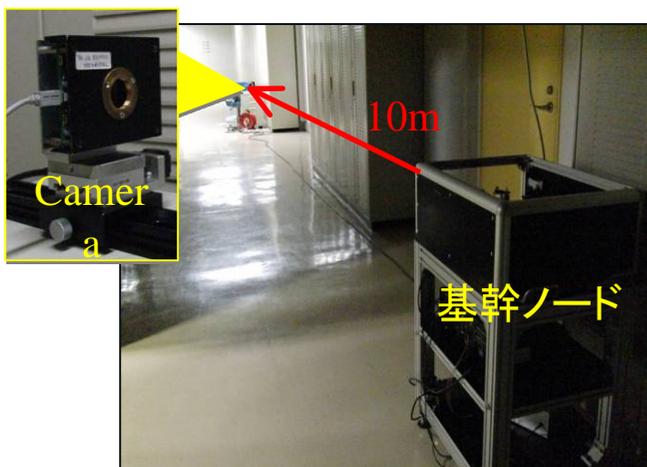


風よけ+遮光ケース

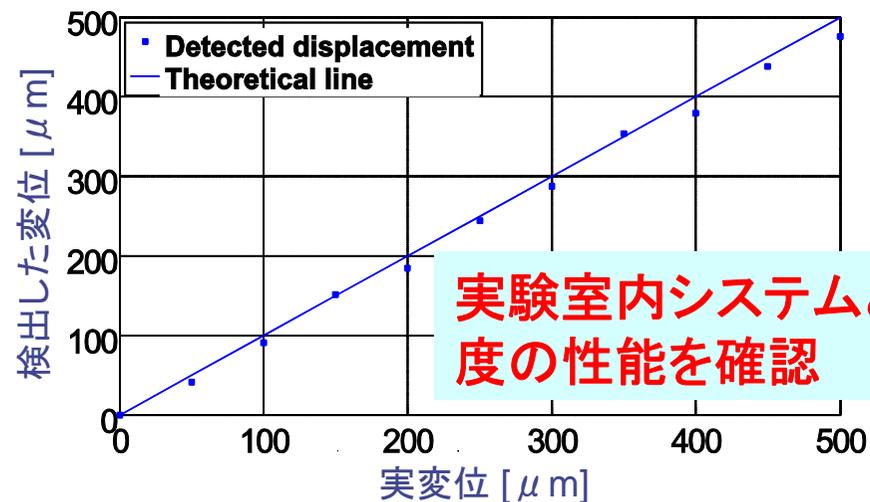


小型試作機での18次LGビームの射出・計測成功

◆ 試作機での実証実験



館内廊下での基礎実験

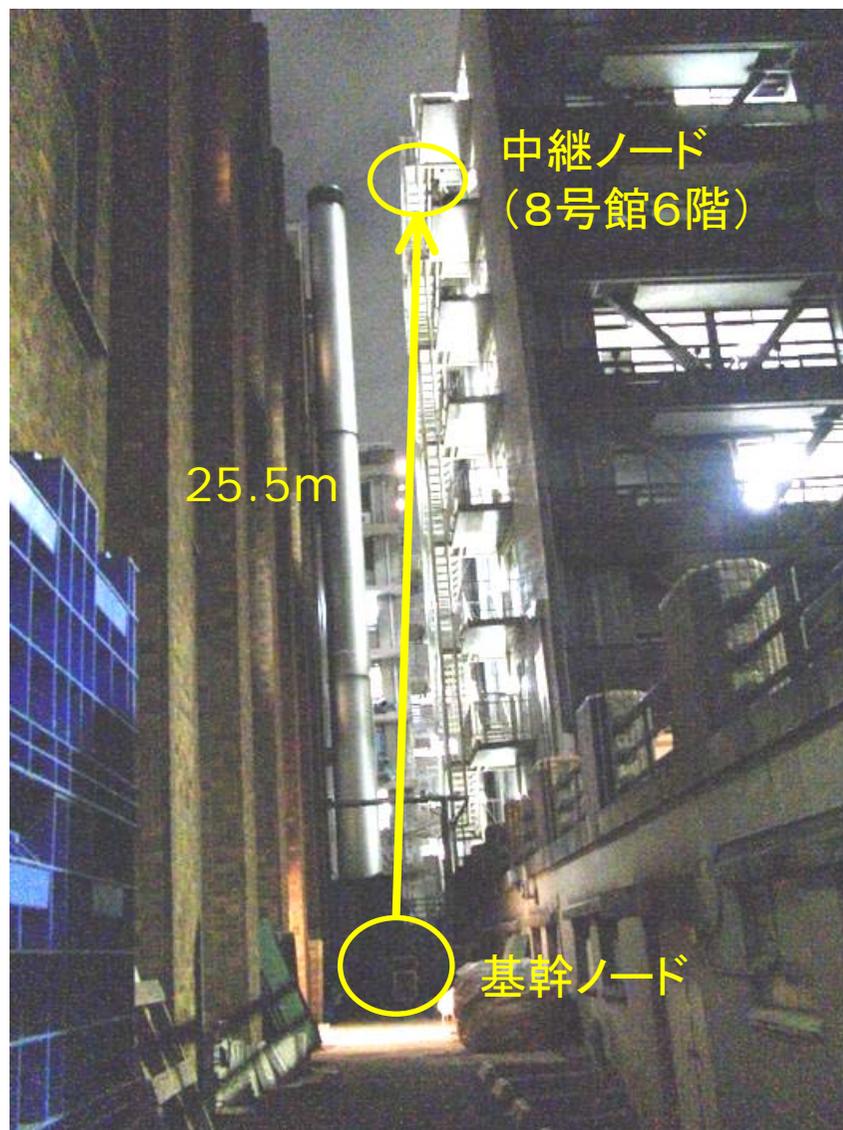


実験室内システムと同程度の性能を確認

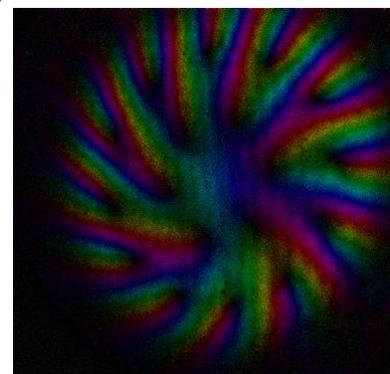
➤ フィールド上での基本性能実証実験 (初号機)

◆ 実証実験: 工学部8号館外階段の垂直計測を実施

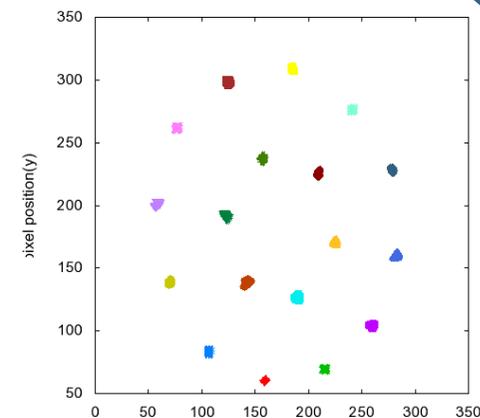
◆ フィールド用試験 (初号機) を使用



撮像データ



観測された複素波面
18次LGビーム



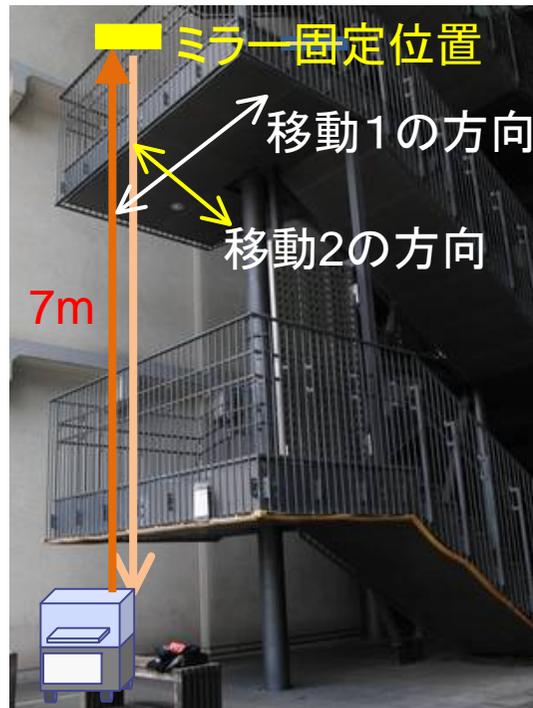
**フィールド上にて、25.5m先で静止状態
で安定した零点検出を確認**

フィールド上での変位計測実証実験 (初号機)

◆ 実証実験: 工学部2号館外階段の変形計測

◆ フィールド用試験(初号機)を使用

◆ 人の移動で階段を微小変位、階段手すりに固定したミラーによる反射光変位を計測

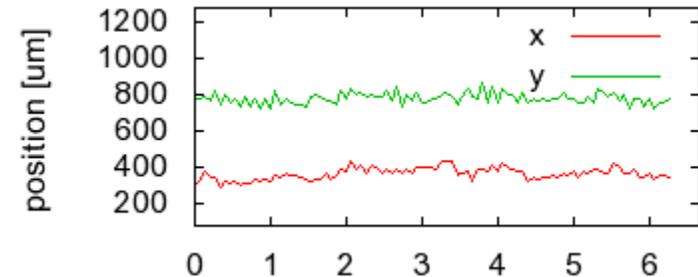


手すりに固定されたミラー

■ 静止状態

ビーム変位: 20-30 μm

回転角度:
数 μrad 相当



■ 移動1:

ゆっくりと1往復

ビーム変位: 400-600 μm

回転角度:
35 μrad 相当

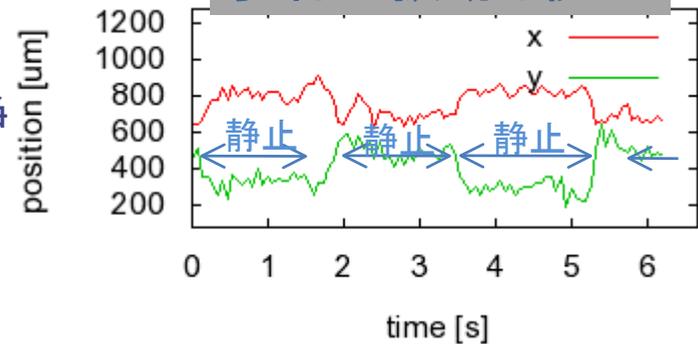
歩行の振動も検知

■ 移動2:

瞬間的な移動・静止を繰り返す

ビーム変位: 200-300 μm

回転角度:
15 μrad 相当



フィールド上にて変位の計測に成功

(人間一人の体重による階段の微小な変形)

時間相関イメージセンサの応用(4)

実時間ヘテロダインモアレ 三次元計測システム

特色と応用方向

- レーザを用いない(対人安全性)
- 大領域・実時間・画素解像度
- 位相シフト法と原理的共通性
- 機械的に実現容易
- 多系統3相イメージセンサによる絶対計測化
- ロボット視覚, 各種検査装置, 動きの立体計測

ヘテロダインモアレ三次元計測

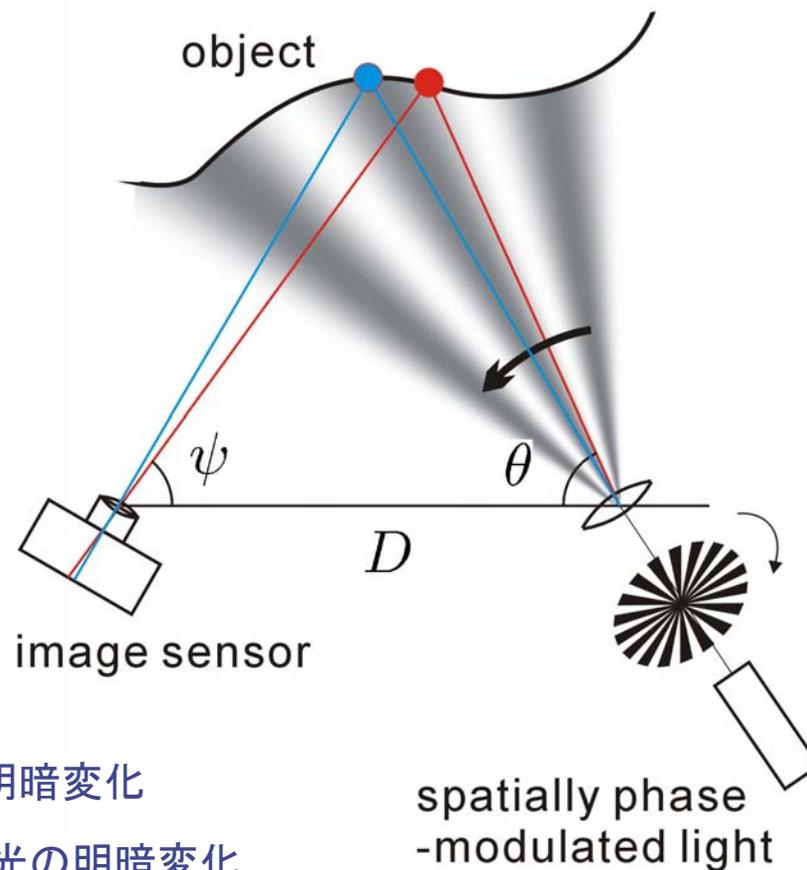
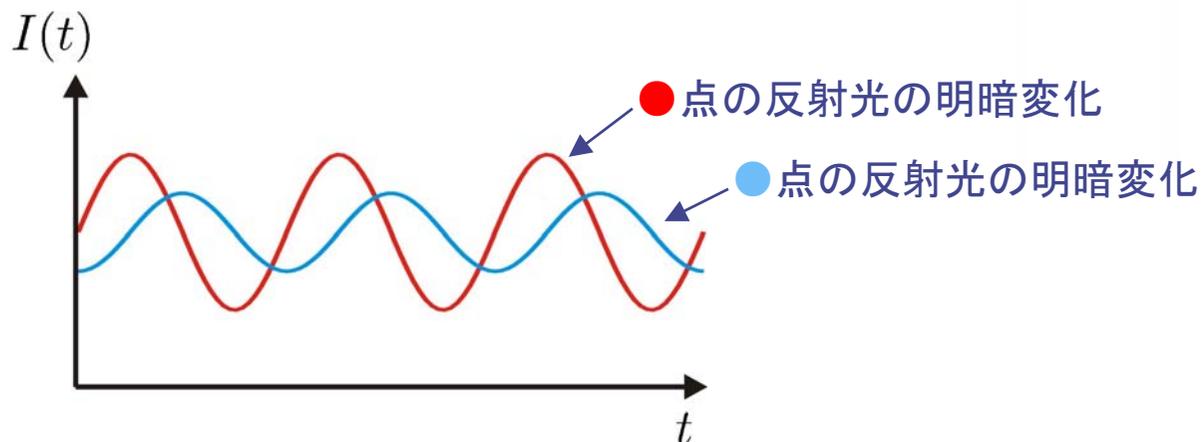
連続並進移動する平行格子を投影

照明光強度分布

$$L(\theta, t) = A \cos(k\theta + \phi_0 + \omega t) + A$$

イメージセンサの入射光強度

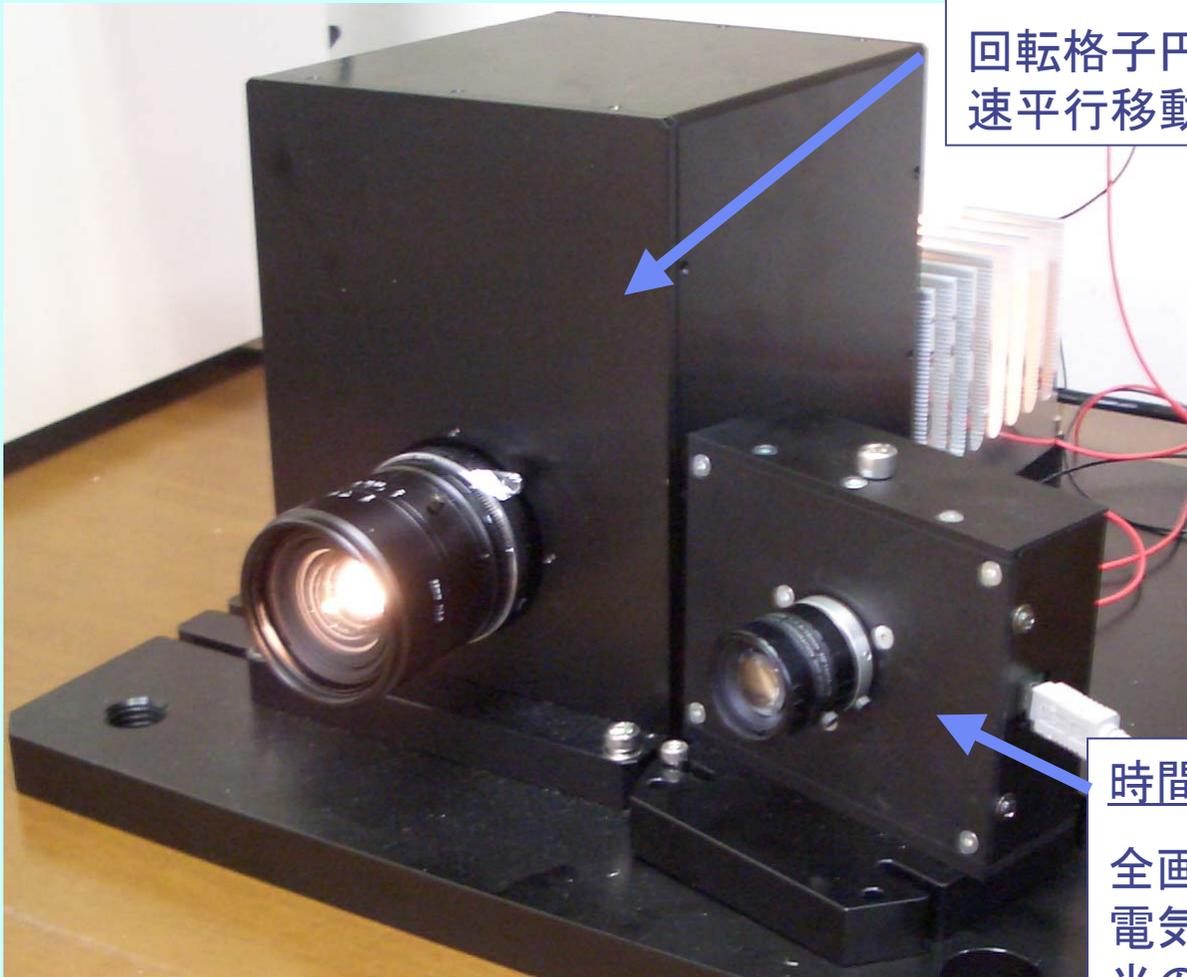
$$I_{ij}(t) = \underbrace{AR_{ij}}_{\text{反射率}} \underbrace{\cos(k\theta_{ij} + \phi_0 + \omega t)}_{\text{空間位相分布}} + \underbrace{A + B}_{\text{背景光}}$$



計測装置

時空間位相符号化格子投影装置

回転格子円盤が内部で回転していて、高速平行移動する縞模様を投影している。

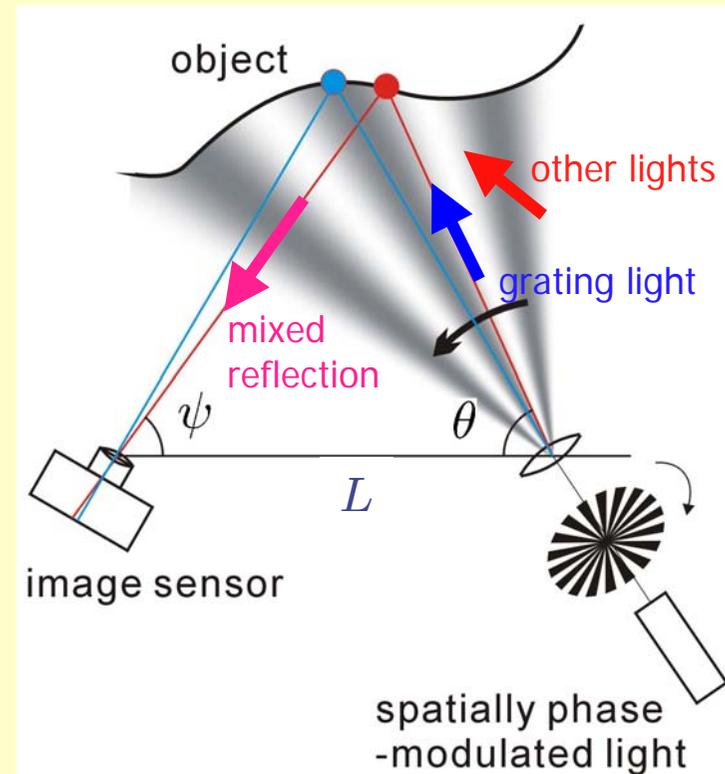


時間相関カメラ

全画素へ直結して供給される外部電気信号と相関をとることによって、光の高速な明暗変化の中から情報のみを画像として取り出せる。

外乱光の影響を受けない

System under environmental light sources



Reflection of mixed lights

$$R_{ij}(t) = r_{ij} \left\{ \frac{I}{\rho_{ij}} \cos(N\theta_{ij} + \omega t + \phi) + \xi_{ij}(t) \right\}$$

other illumination

After correlation detection

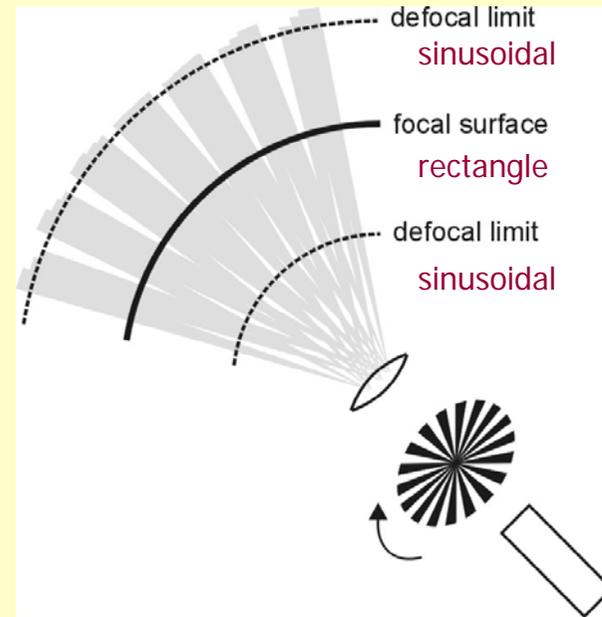
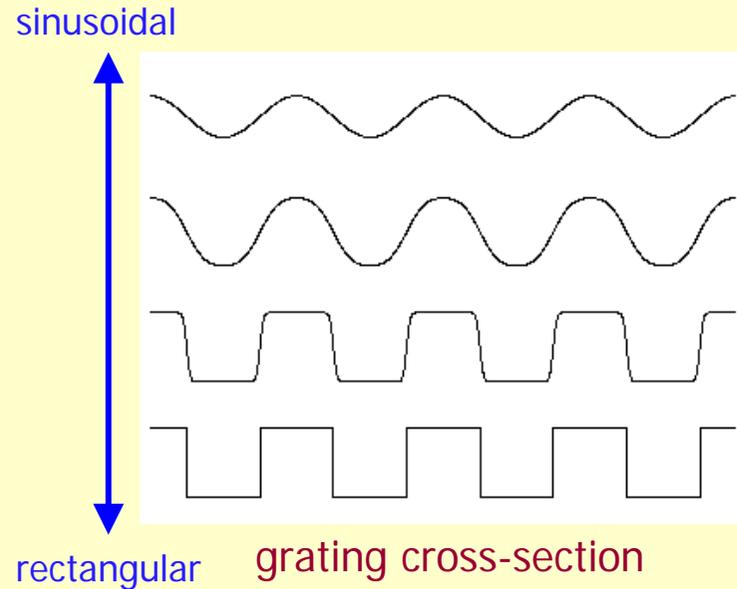
$$\langle R_{ij}(t)e^{-j\omega t} \rangle = \frac{r_{ij}IT}{2\rho_{ij}} e^{j(N\theta_{ij} + \phi)} + r_{ij} \langle \xi_{ij}(t)e^{-j\omega t} \rangle$$

Correlation with reference signal

$$\left(\langle \cdot \rangle \equiv \int_{-T/2}^{T/2} \right)$$

zero because other lights do not include frequency component ω

投影光分布の非正弦性の影響を受けない



Zone-dependence of cross-section

Fourier decomposition of grating cross-section

$$I(\rho, \theta, t) = \frac{I}{\rho} \cos(\theta t + \omega t) + \frac{1}{\rho} \sum_{n=2}^{\infty} I_n \cos(n\theta + n\omega t)$$

Fundamental
sinusoidal component

harmonic components

→ eliminated by
correlation detection

対象の奥行き方向運動の影響を受けない

低速なら位相に対象運動の影響がない

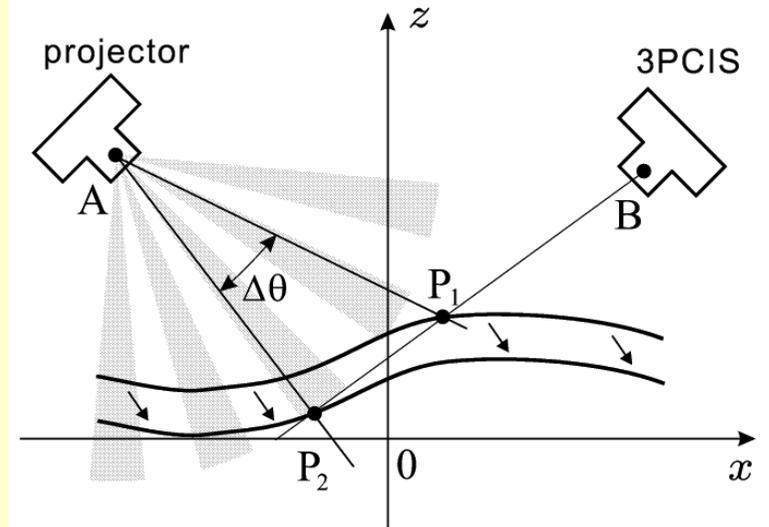
モアレドップラシフト

$$\begin{aligned} \frac{r_{ij}I}{\rho_{ij}} &< \cos(N\theta_{ij} + (\omega + \delta\omega)t + \phi)e^{-j\omega t} > \\ &= \frac{r_{ij}Ie^{j(N\theta_{ij} + \phi)}}{2\rho_{ij}} \int_{-T/2}^{T/2} e^{j\delta\omega t} dt \\ &\quad + \frac{r_{ij}Ie^{-j(N\theta_{ij} + \phi)}}{2\rho_{ij}} \int_{-T/2}^{T/2} e^{-j(2\omega + \delta\omega)t} dt \\ &\approx \frac{r_{ij}ITe^{j(N\theta_{ij} + \phi)}}{2\rho_{ij}} \cdot \frac{\sin(\delta\omega T/2)}{\delta\omega T/2}, \end{aligned}$$

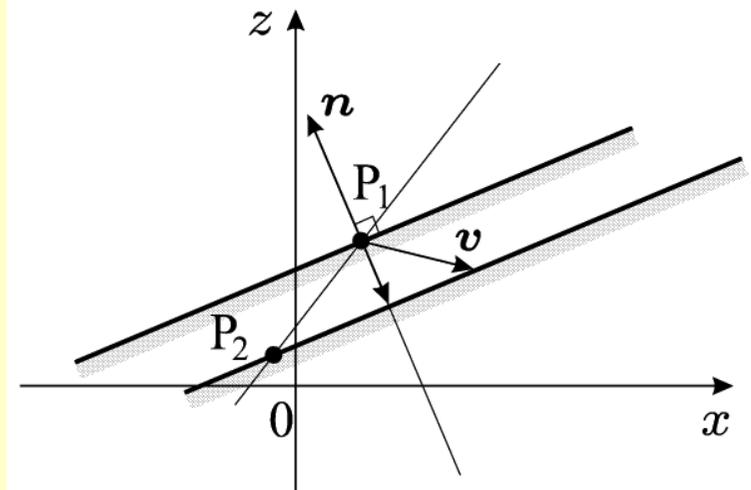
相関画像の振幅だけに影響を与える

1フレーム中の移動量の条件

$$-\pi \leq \frac{\delta\omega T}{2} \leq \pi \quad \text{hence} \quad -\frac{2\pi}{N} \leq \Delta\theta \leq \frac{2\pi}{N},$$



(a) measurement system under motion



(b) surface normal n and motion vector v

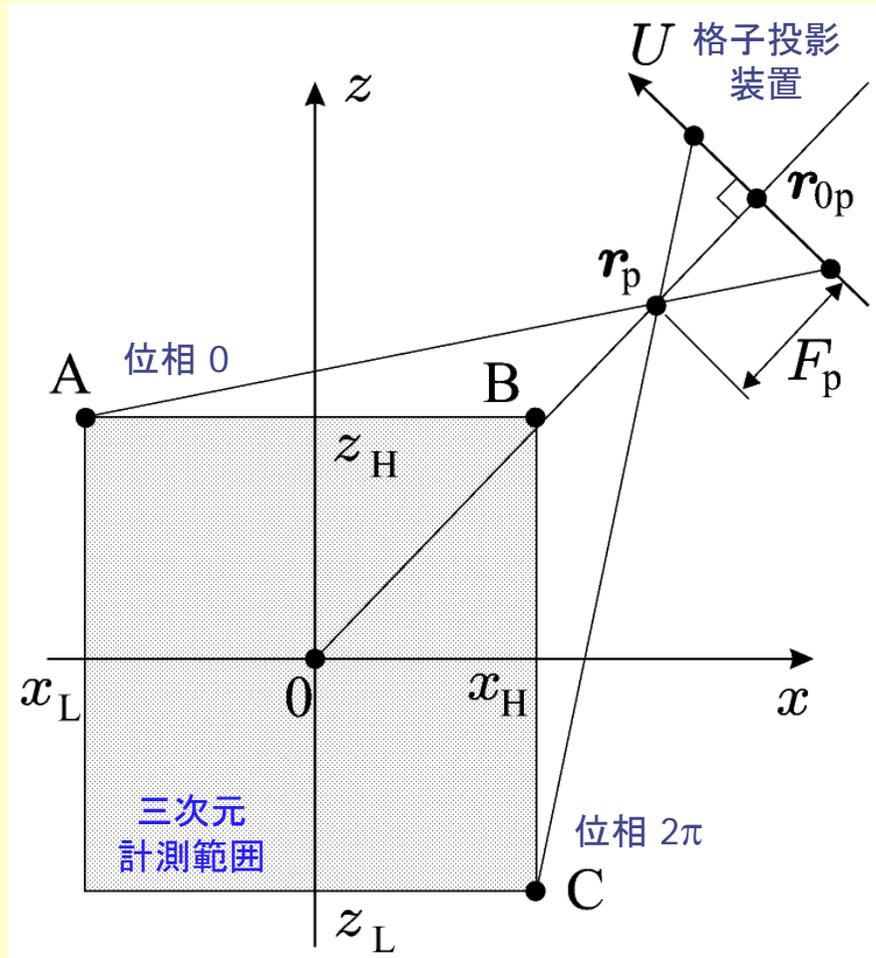
「モアレドップラ効果」の説明図

高精度と広測定範囲の両立

- 位相アンラップを不要にする
- 絶対測定を可能にする

位相不確定性と奥行き精度
はトレードオフの関係

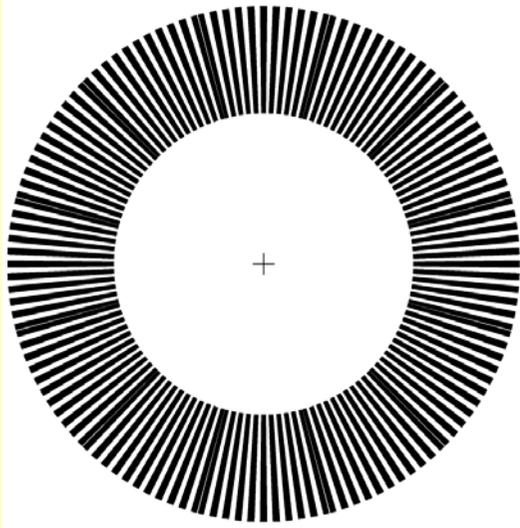
投影格子 の本数	位相 不確定性	奥行 精度
大	大	大
小	小	小



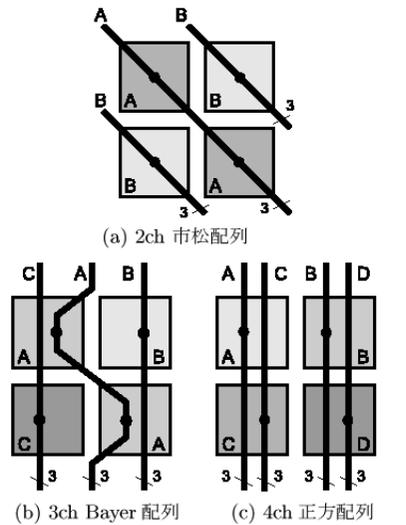
2周波数投影法

新方式:2種類の格子を同時に投影する

2周波数混合格子



3相3系統イメージセンサ



2系統の相関位相画像

$$(k - \Delta k)\theta + 2\pi n_- = \phi_-$$

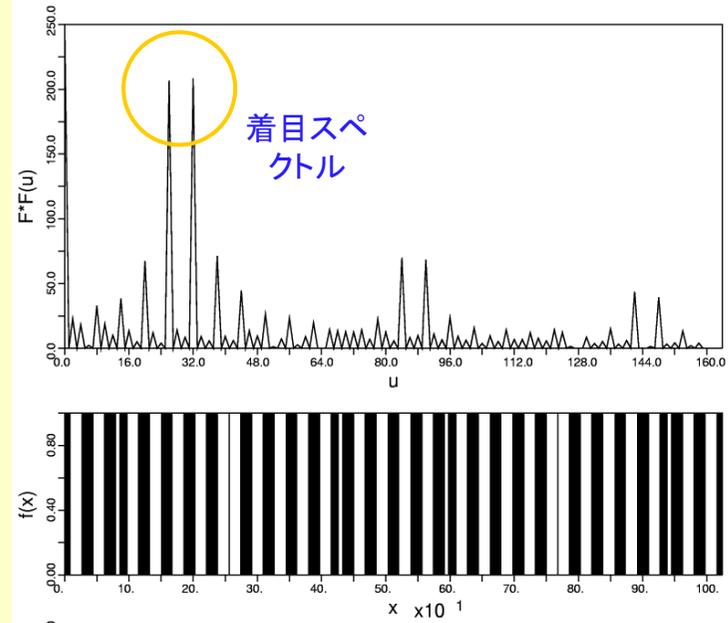
$$(k + \Delta k)\theta + 2\pi n_+ = \phi_+$$

位相の和画像と差画像

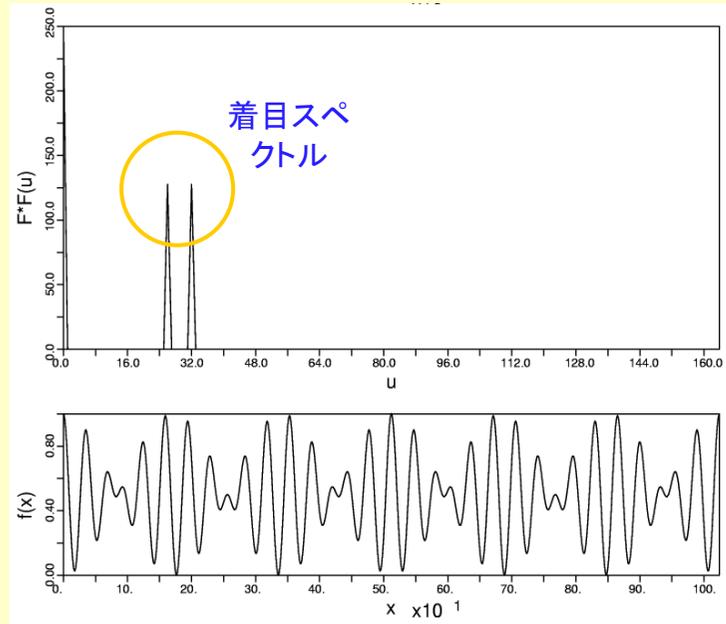
$$2\Delta k\theta + 2\pi(n_+ - n_-) = \phi_+ - \phi_- \quad \text{不定性:小}$$

$$2k\theta + 2\pi(n_+ + n_-) = \phi_+ + \phi_- \quad \text{精度:大}$$

2値型2周波数混合格子とスペクトル

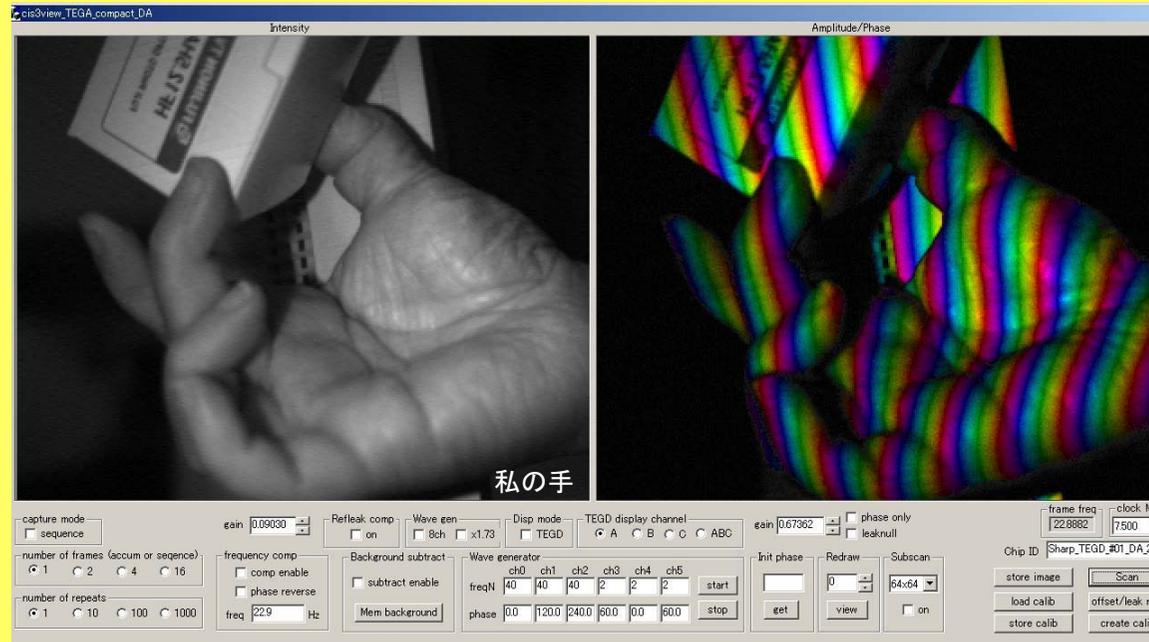


中間調型2周波数混合格子とスペクトル



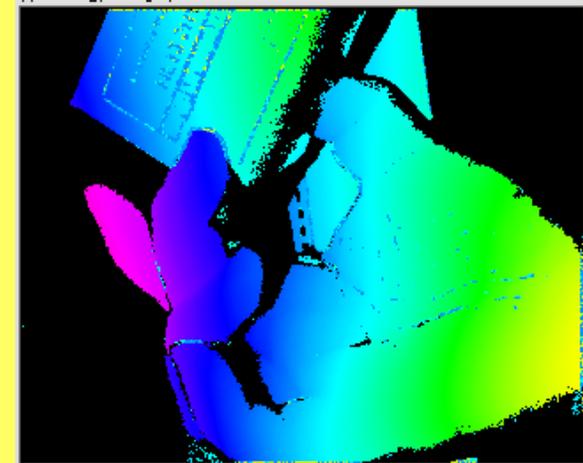
撮像例

1周波数撮像例(仮実験装置)

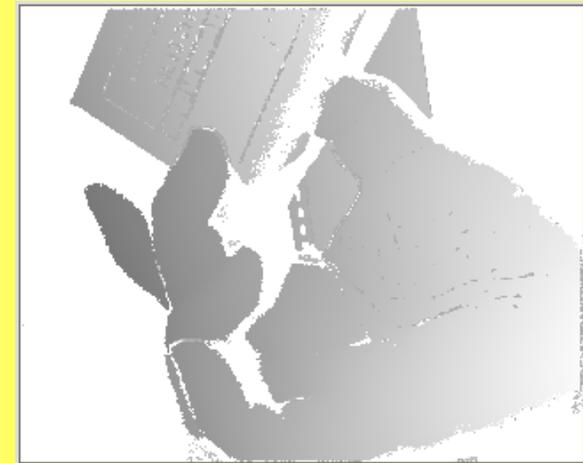
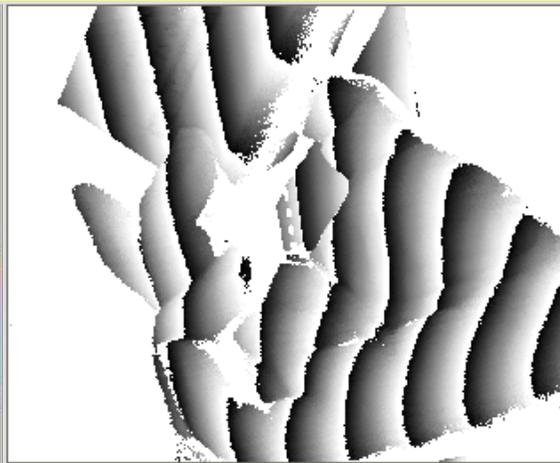
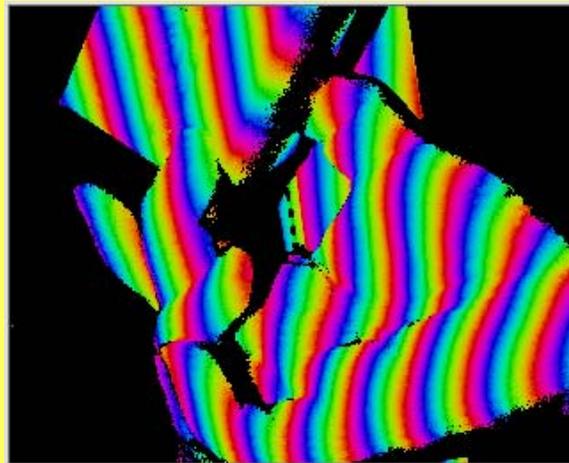


私の手

カラー表示



明暗表示

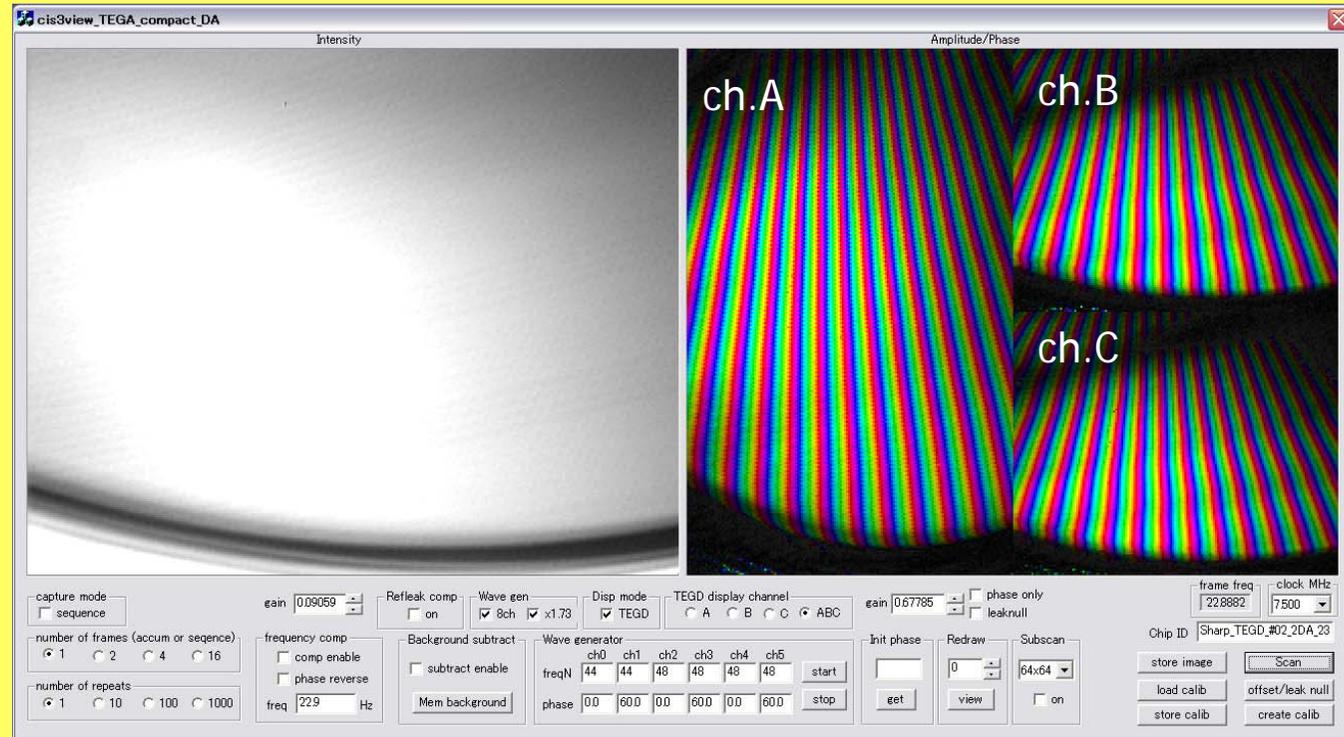


検出された位相とそのアンラップ結果

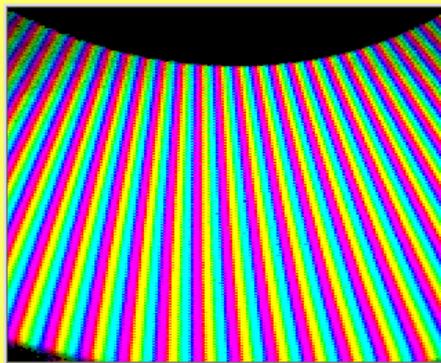
2周波数撮像と和差位相画像の例

回転格子の撮像

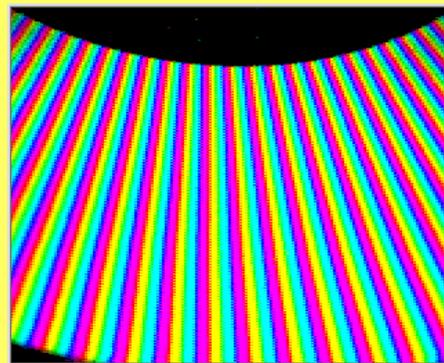
(二つの格子周波数での位相分布が同時に検出できている)



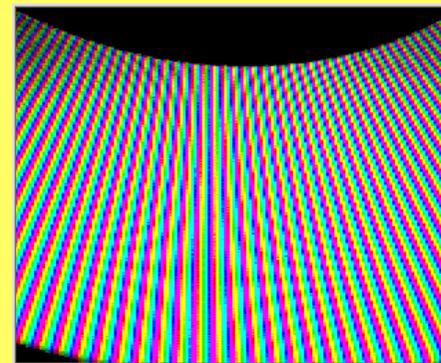
位相の和と差の抽出結果 (一周で132本と120本の格子パターンでの位相の和と差)



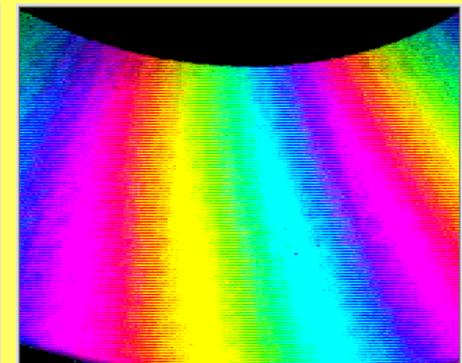
一周132本



一周120本



一周252本

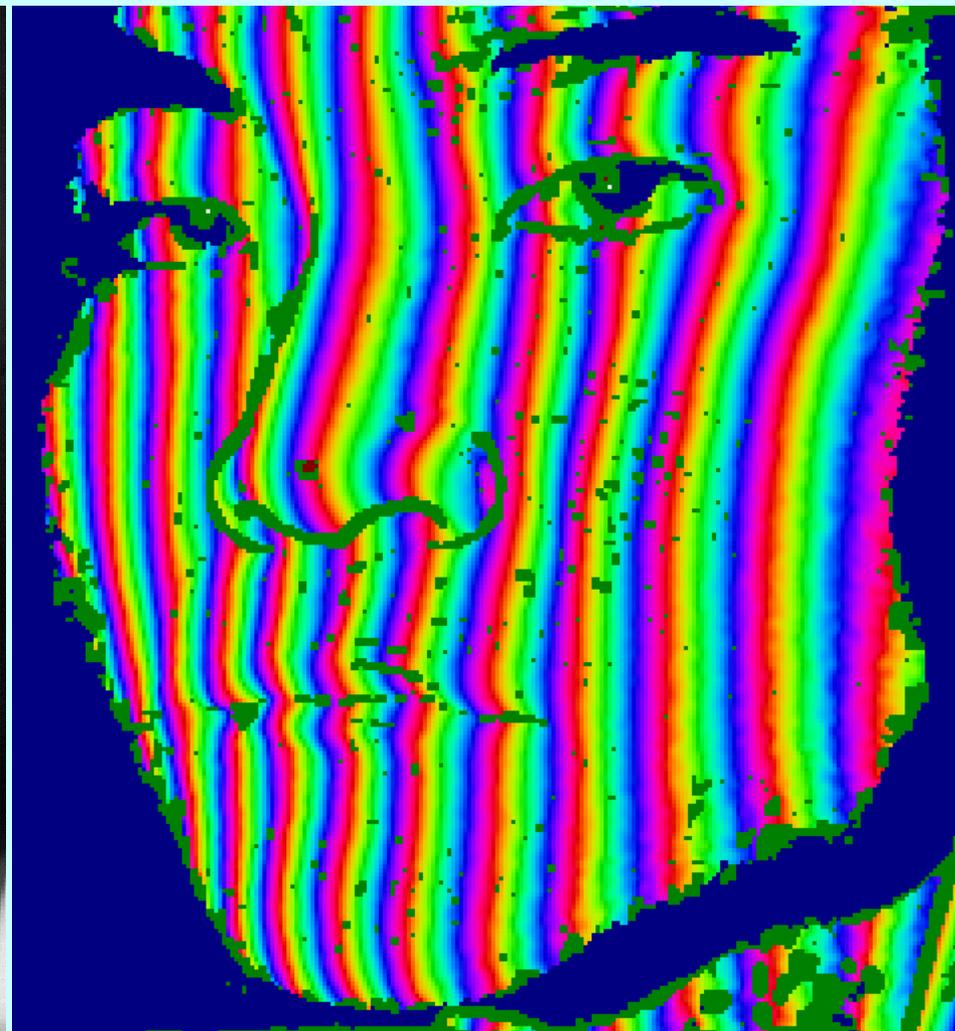


一周12本

顔の三次元計測結果(1)

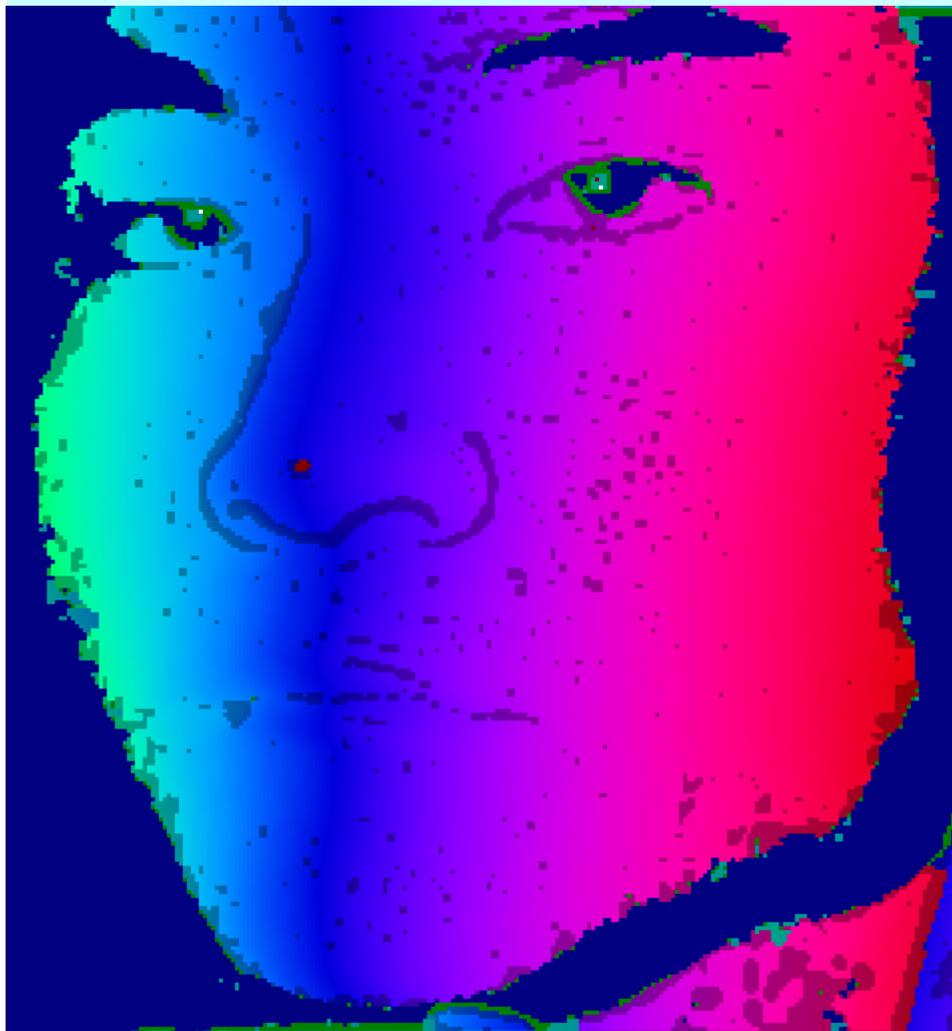


強度画像



相関位相画像

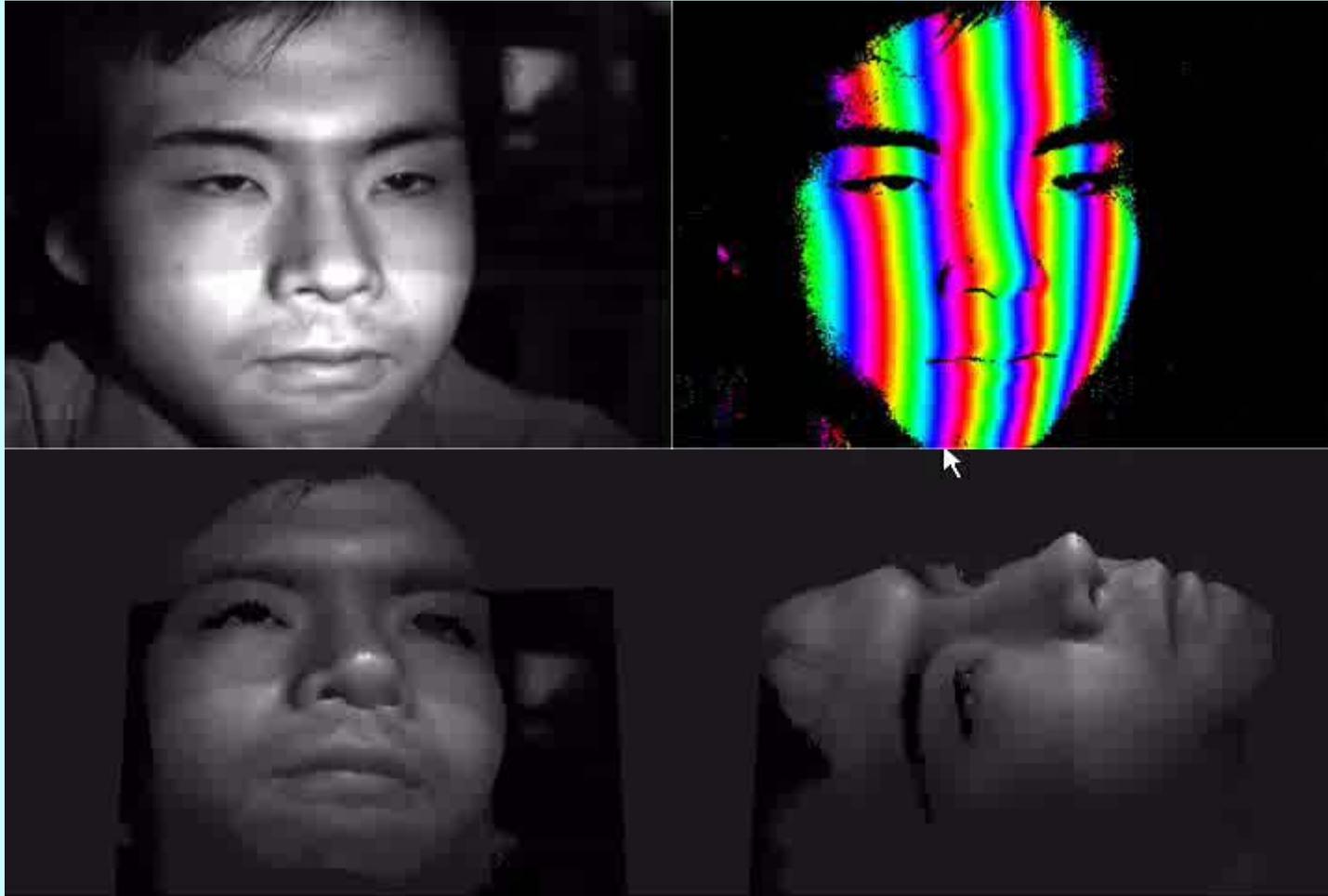
顔の三次元計測結果(2)



位相アンラップ画像



3次元再構成画像



人の表情の実時間三次元計測・再現



人の表情の実時間三次元計測・再現

撮像済み画像データによるデモ

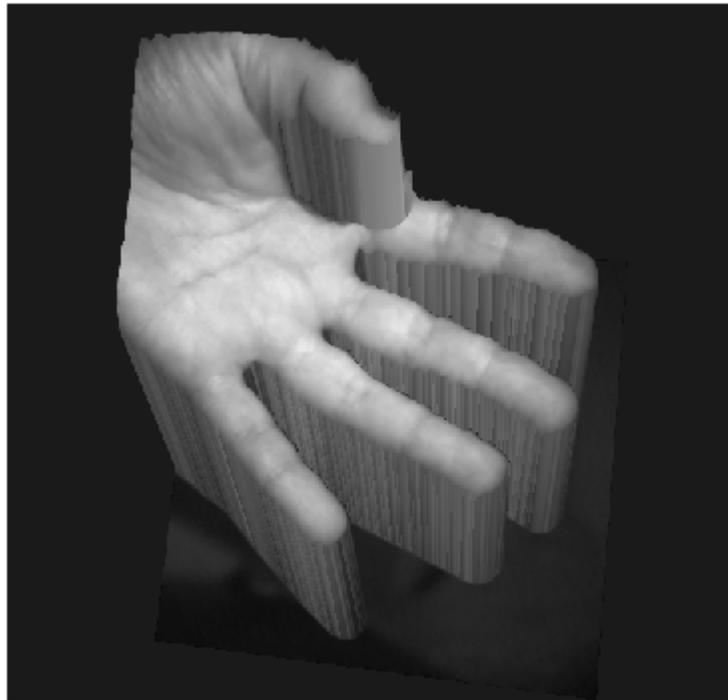


図 10. 動く手の実時間三次元形状計測結果。三次元形状計測結果に強度画像をテクスチャマップして立体表示している。完全な三次元情報が取得済みのため、自由な視点の移動が可能である。

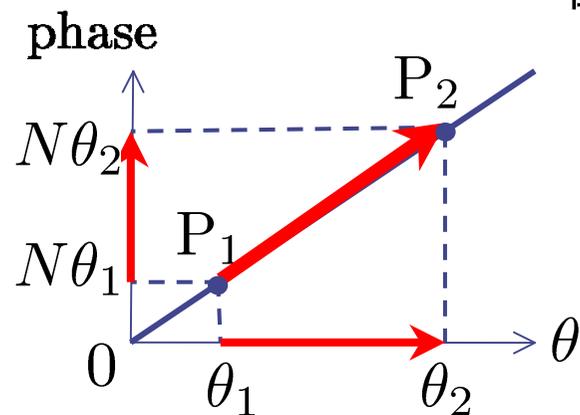
モアレドップラー効果による奥行き方向速度分布計測

回転格子パターン中を対象が移動することで、
反射光の強度変化の時間周波数が変化する現象

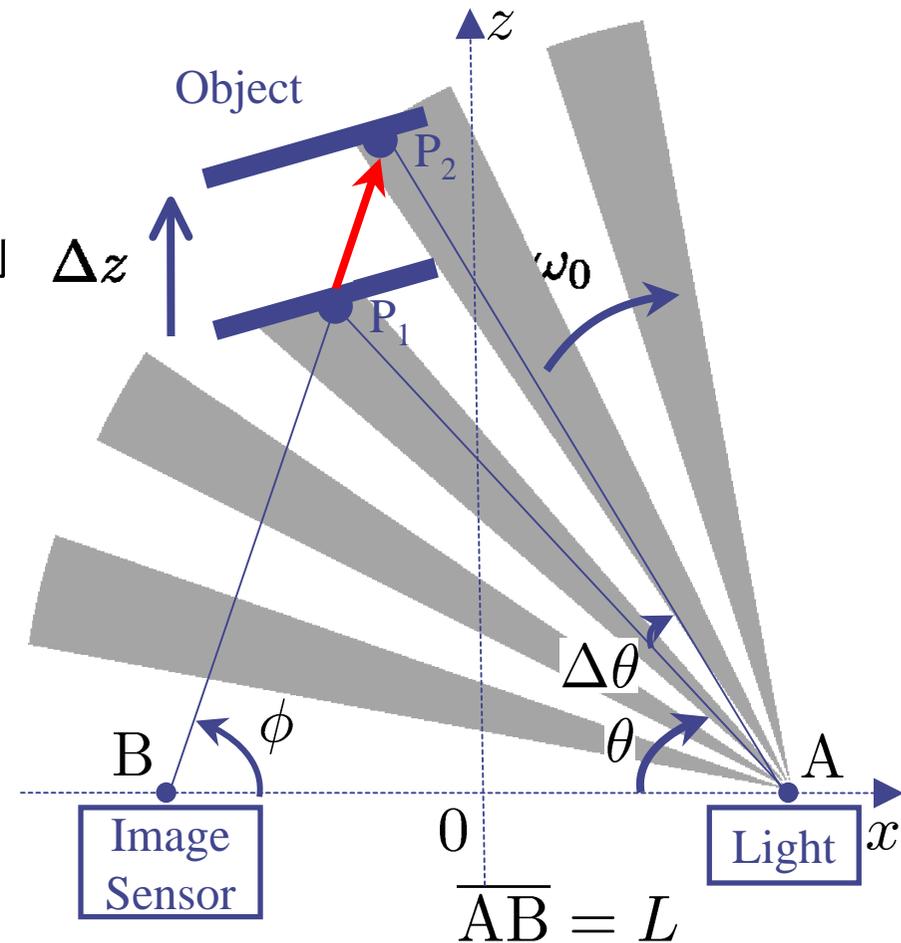
回転格子パターン $I(t)$ を投影

$$I(t) = 1 + \cos(N\omega_0 t + \underline{N\theta})$$

位相が θ に比例



フレーム周期 T の間に
画素の見る点が P_1 から P_2 へ移動
 θ が θ_1 から θ_2 まで連続的に変化



正弦波拘束微分方程式の荷重積分法

正弦波拘束微分方程式

観測区間

$$\ddot{f}(t) + a^2 f(t) = 0 \quad \forall t \in [-T/2, T/2]$$

$$\Leftrightarrow \int_{-T/2}^{T/2} (\ddot{f}(t) + a^2 f(t)) w(t) dt = 0 \quad \forall w(t)$$

任意荷重関数

- $\{w(t)\}$ を完備系に選べば同値な拘束式
- 積分により時間微分項がなくなる
- AR法やDFT法でも区間観測と時間積分が必要
- 荷重関数選択の自由度を活用可能

有限フーリエ変換型正弦波拘束式

区間 $[-T/2, T/2]$ の複素荷重積分型観測量

相関画像に一致(後述)

複素正弦波荷重

$$g_\omega \equiv \int_{-T/2}^{T/2} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

直交条件

$$w(t) \equiv e^{-j\omega t} \quad \omega T = 2n\pi \quad s_t \equiv (-1)^n$$

一様荷重観測量の満たす方程式

$$\begin{aligned} & \int_{-T/2}^{T/2} (\ddot{f}(t) + a^2 f(t)) e^{-j\omega t} dt && \text{正弦波拘束微分方程式} \\ &= [\dot{f}(t)e^{-j\omega t}]_{-T/2}^{T/2} + j\omega [f(t)e^{-j\omega t}]_{-T/2}^{T/2} \\ & \quad - \omega^2 \int_{-T/2}^{T/2} f(t)e^{-j\omega t} dt + a^2 \int_{-T/2}^{T/2} f(t)e^{-j\omega t} dt \\ &= s_t [\dot{f}(t)]_{-T/2}^{T/2} + j\omega s_t [f(t)]_{-T/2}^{T/2} - \omega^2 g_\omega + a^2 g_\omega \\ &= 0 \quad \text{積分境界値項1} \quad \text{積分境界値項2} \quad \text{観測量} \quad \text{観測量} \end{aligned}$$

3周波数法(複素解)

連立方程式

$$\begin{array}{c} \text{関連画素値} \\ \left[\begin{array}{ccc} g_{\omega 1} & s_1 & j\omega_1 s_1 \\ g_{\omega 2} & s_2 & j\omega_2 s_2 \\ g_{\omega 3} & s_3 & j\omega_3 s_3 \end{array} \right] \end{array} \begin{array}{c} \text{未知周波数の2乗} \\ \left[\begin{array}{c} a^2 \\ [\dot{f}(t)]_{-T/2}^{T/2} \\ [f(t)]_{-T/2}^{T/2} \end{array} \right] \end{array} = \begin{array}{c} \text{関連画素値} \\ \left[\begin{array}{c} \omega_1^2 g_{\omega 1} \\ \omega_2^2 g_{\omega 2} \\ \omega_3^2 g_{\omega 3} \end{array} \right] \end{array}$$

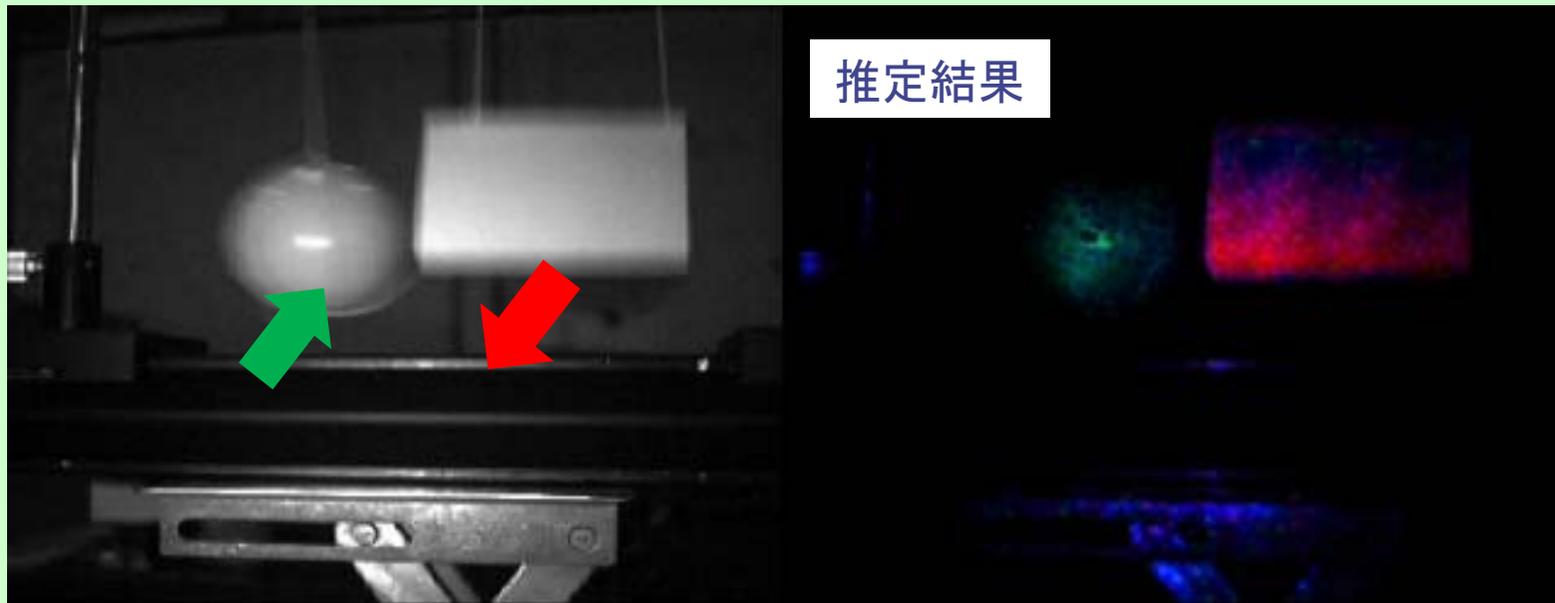
その解

$$\begin{array}{c} \text{周波数の2乗} \\ a^2 \end{array} = \frac{j}{\det A} \left\{ s_2 s_3 (\omega_3 - \omega_2) \omega_1^2 g_{\omega 1} \right. \\ \quad \left. + s_3 s_1 (\omega_1 - \omega_3) \omega_2^2 g_{\omega 2} \right. \\ \quad \left. + s_1 s_2 (\omega_2 - \omega_1) \omega_3^2 g_{\omega 3} \right\}$$

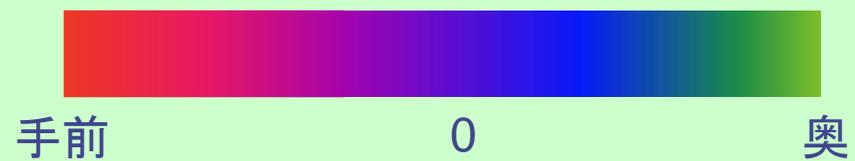
$$\begin{aligned} \det A &= j\omega_3 s_2 s_3 g_{\omega 1} + j\omega_1 s_3 s_1 g_{\omega 2} + j\omega_2 s_1 s_2 g_{\omega 3} \\ &\quad - j\omega_2 s_2 s_3 g_{\omega 1} - j\omega_3 s_3 s_1 g_{\omega 2} - j\omega_1 s_1 s_2 g_{\omega 3} \end{aligned}$$

デモムービー

■ ボールと平板の振り子



ボールは奥方向に、
平板は手前方向に運動



強度は、推定の信頼度に比例

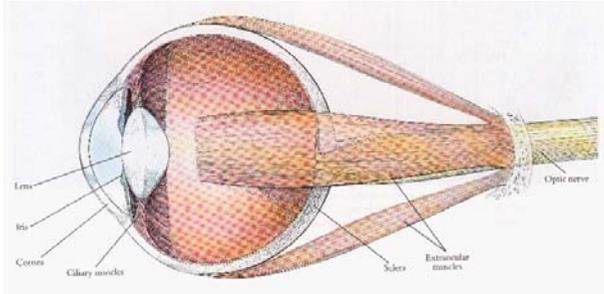
時間相関イメージセンサの応用(5)

固視微動型特徴抽出

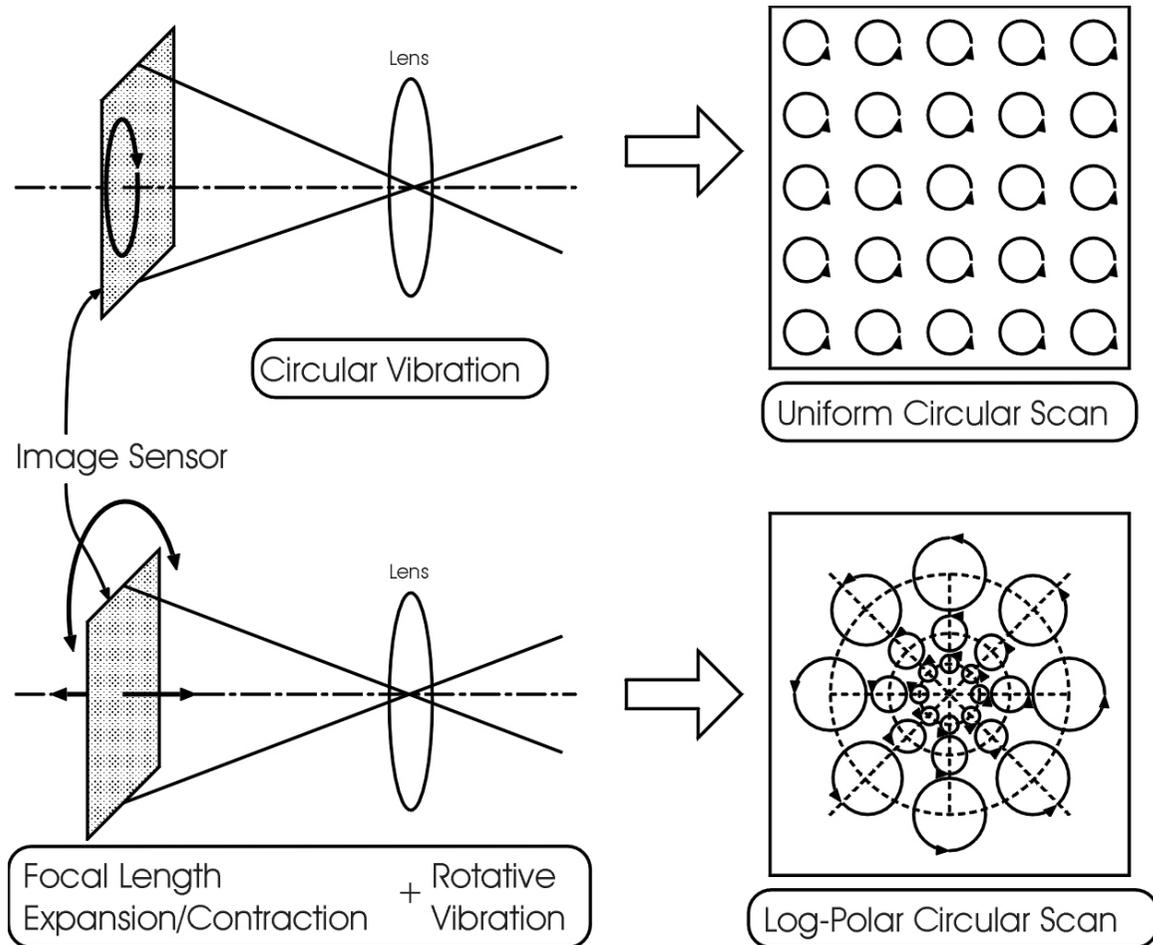
特色と応用方向

- 空間パターンの特徴を時間軸に変換して抽出
- 電気-機械融合型イメージセンシング
- 画素のばらつき(感度, オフセット等)の影響を受けない
- 豊富で動的に変更可能な特徴抽出能力
- イメージセンサ上での実時間検出
- 画像処理ハードウェア不要
- 応用: ロボット視覚, 傷検査, 表面欠陥検査, ...

固視微動型特徴抽出とは



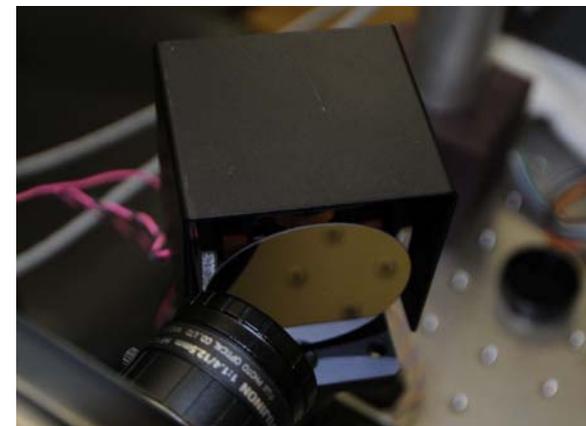
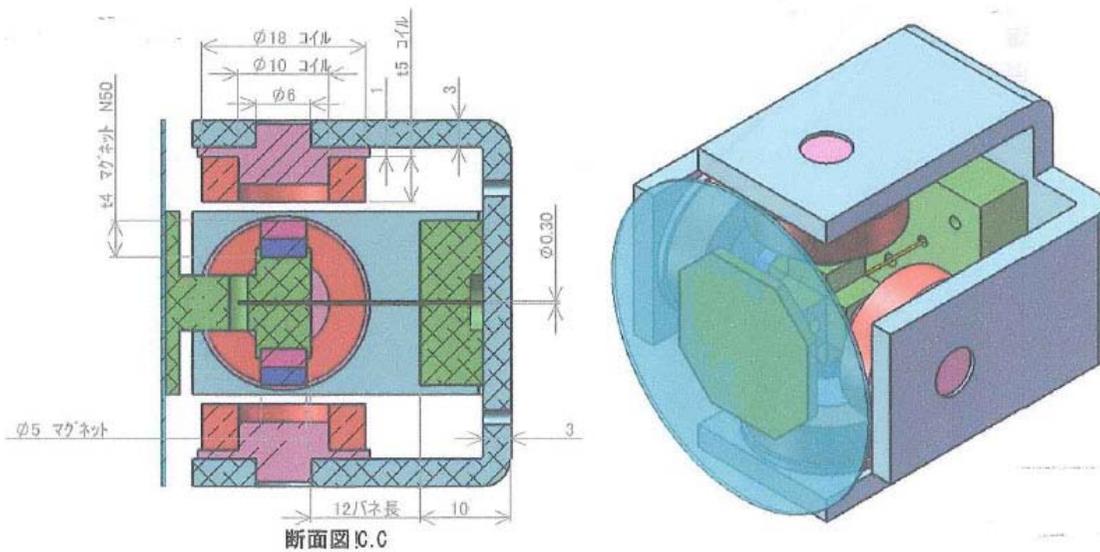
眼球と固視微動



A. Kimachi, et al., "Intelligent Image Sensor with a Vibrating Mirror Mimicking Involuntary Eye Movement," Proc. 16th Sensor Symposium, Kawasaki, 1998.

新実験システム

新システムの2軸振動鏡
(ライテック川田氏設計)

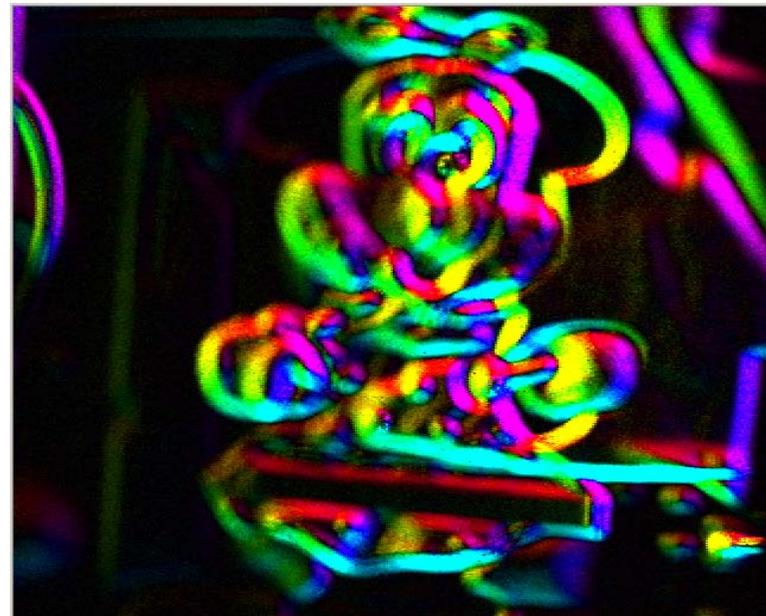


新システム

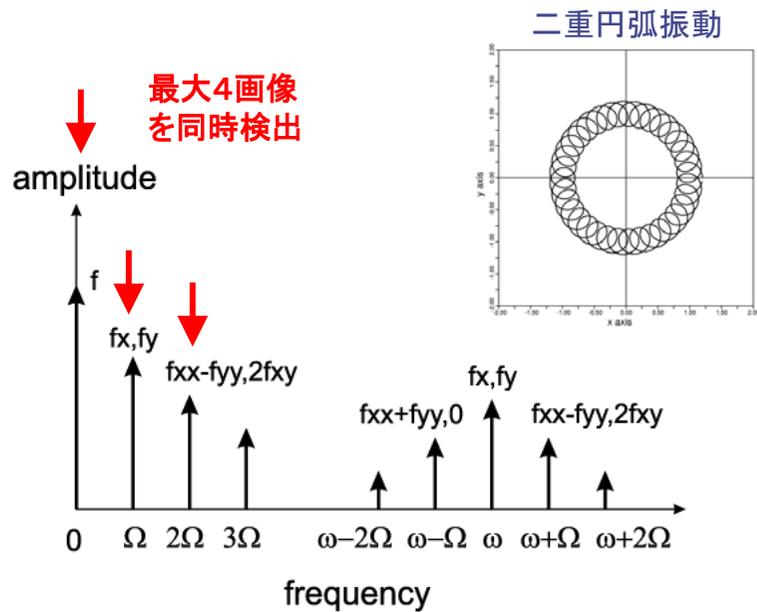
高階微分特徴の抽出(1)



強度画像

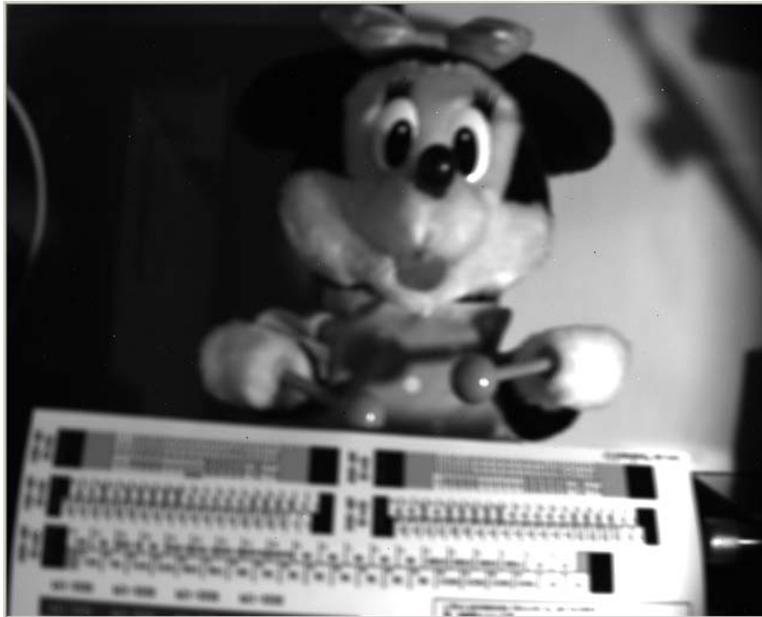


複素1階微分画像

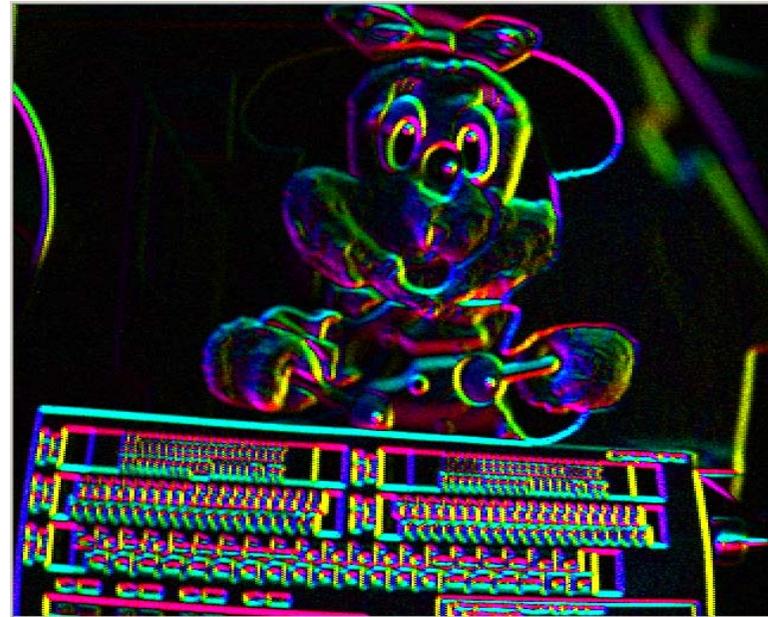


複素2階微分画像

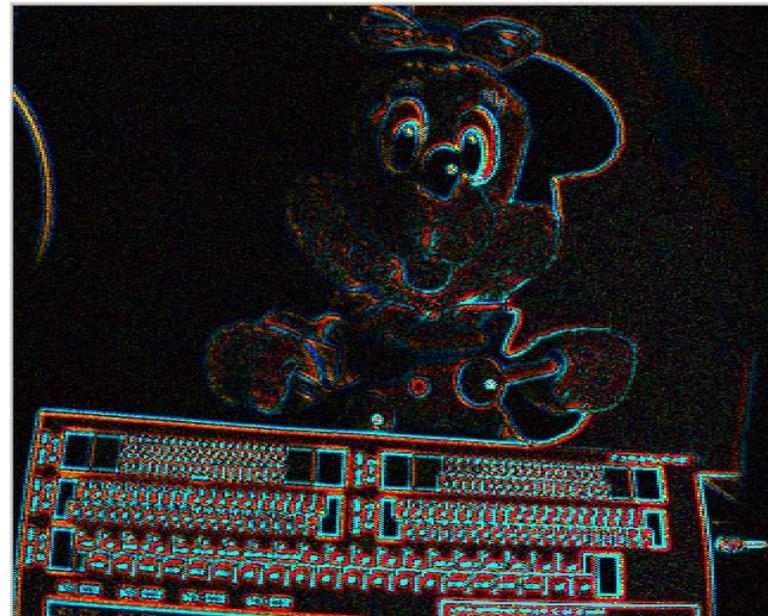
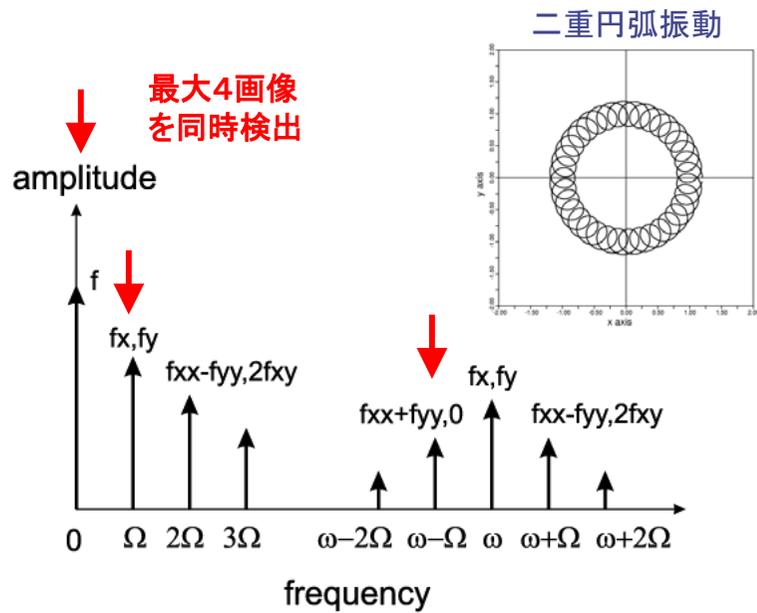
高階微分特徴の抽出(2)



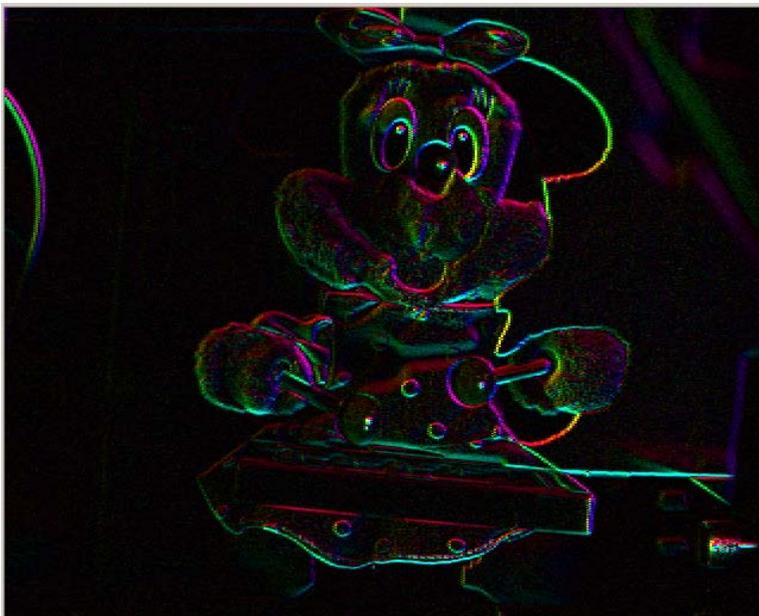
強度画像



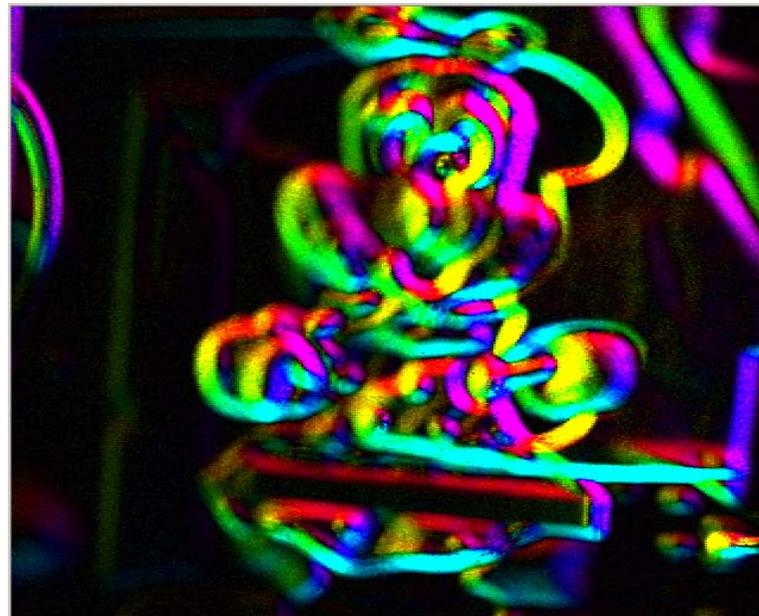
複素1階微分画像



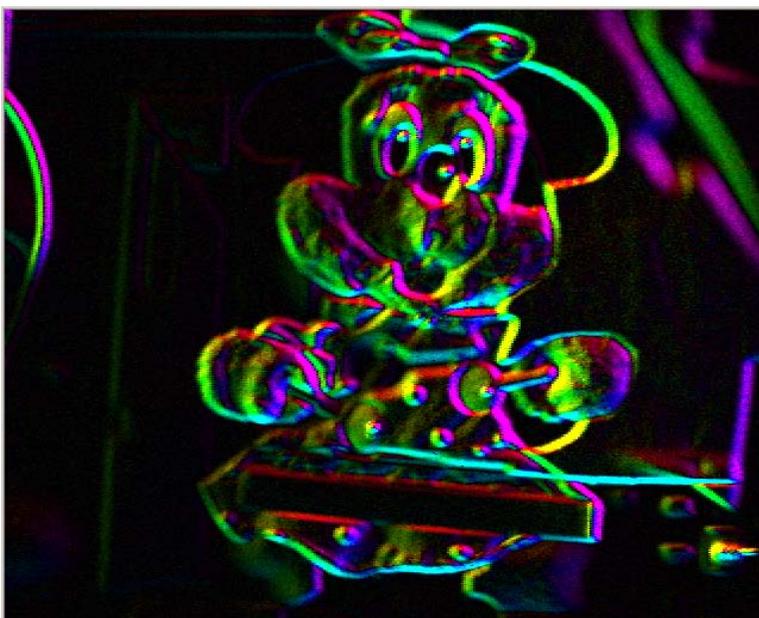
ラプラシアン画像



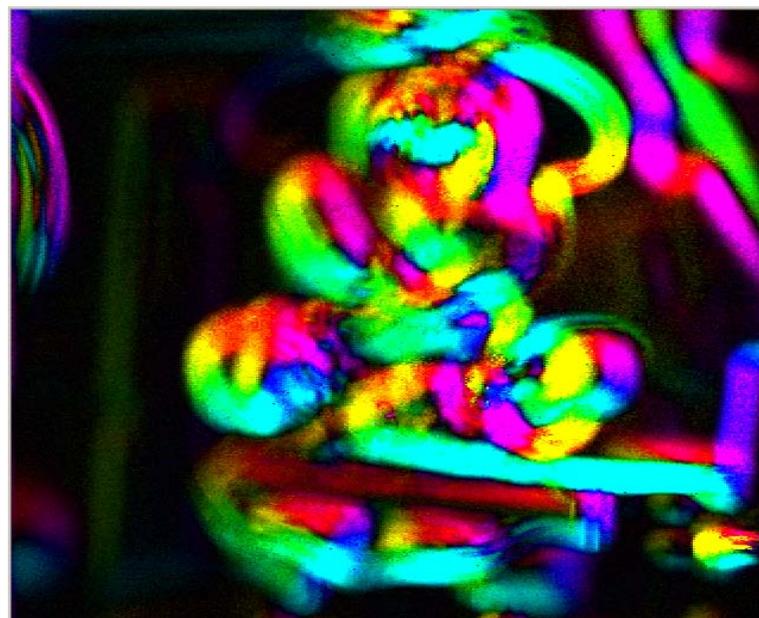
小振幅振動: 高解像度特徴



大振幅振動: 低解像度平滑化(高SN比)特徴



中振幅振動: 中解像度平滑化(高SN比)特徴



大振幅振動: 大局的構造の強調と局所特徴の併合

時間相関イメージセンサの応用(6)

実時間2次元エリプソメトリシステム

特色と応用方向

- 最強の光学的表面計測法
- 複素エリプソパラメータ映像(誘電率, 導電率, 膜厚等)
- 2次元並列その場観察
- 機械的回転部を除き従来システムと同一
- 安定で安価, 既存エリプソメータのオプション化
- 半導体プロセスモニタ, 各種検査装置, 磁性評価装置

実時間2次元エリプソメトリー

反射率は偏光成分ごとに異なる

(R_p , R_s)

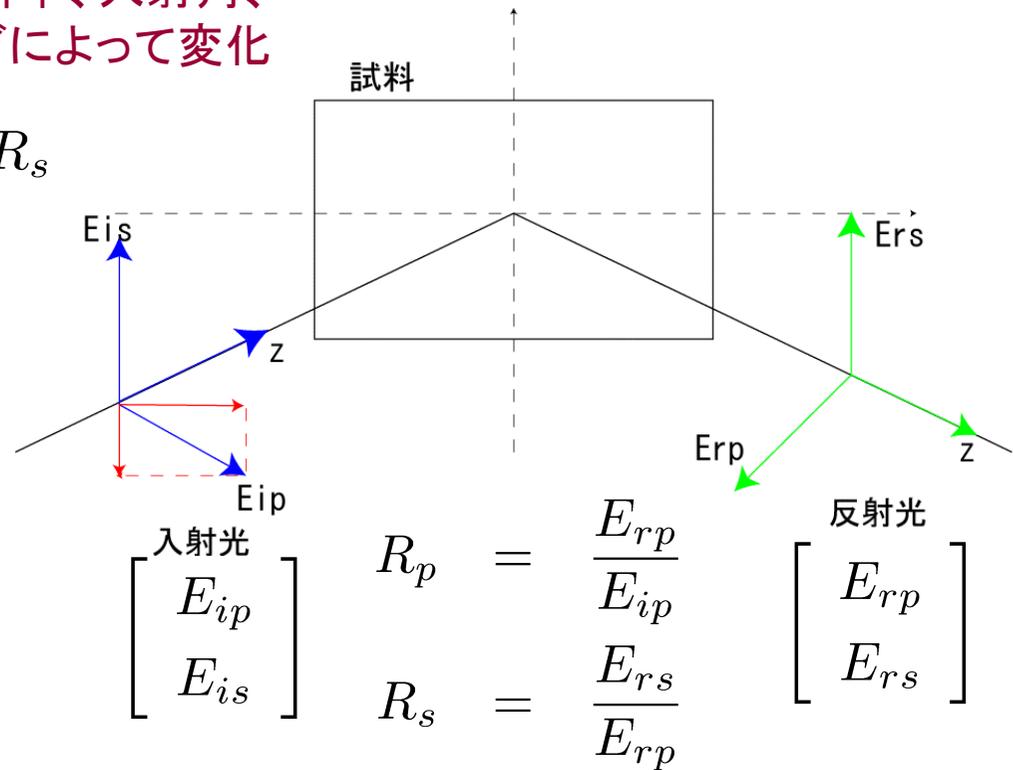
エリプソパラメータ

膜厚、屈折率、入射角、
波長、などによって変化

$$\tan \Psi = \frac{|R_p|}{|R_s|}, \quad \Delta = \angle R_p - \angle R_s$$

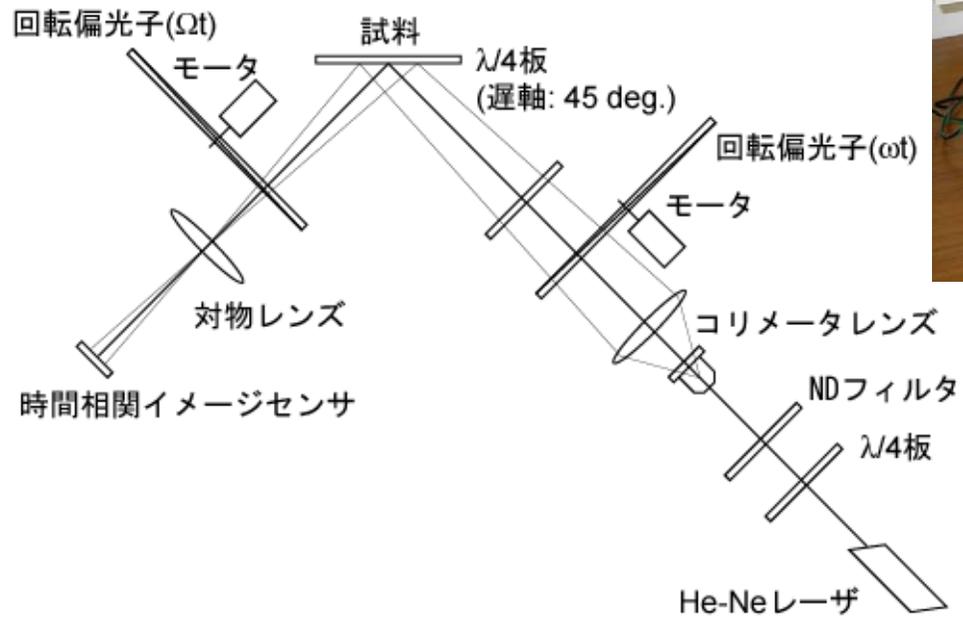


市販エリプソメータの例(溝尻光学)



添字 p, s: 入射面に水平, 垂直な成分

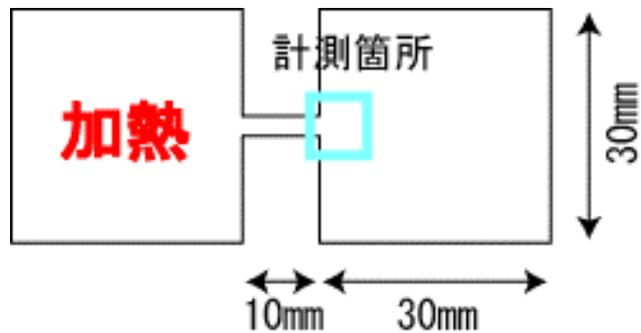
試作システム



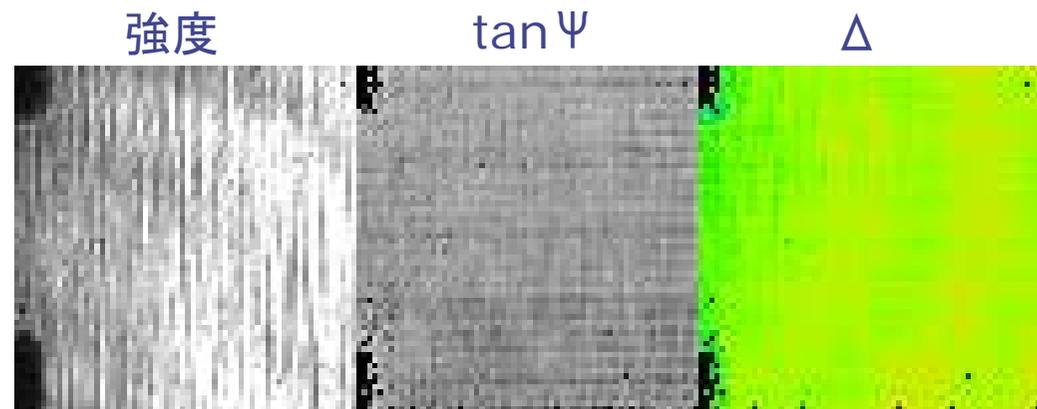
- 光源: He-Neレーザー(633nm)
- 回転偏光子: 400Hz, 100Hz
- 時間相関イメージセンサ: 64x64画素, 30フレーム/s
- 参照信号: 差周波数

実験 – リアルタイムイメージング

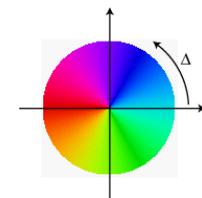
銅板加熱時の酸化膜形成の様子を撮影



加熱後の銅板



0.0 1.0

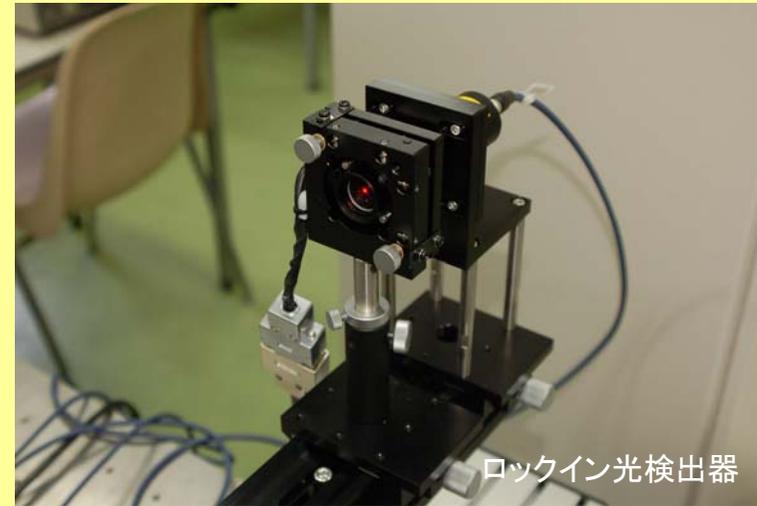
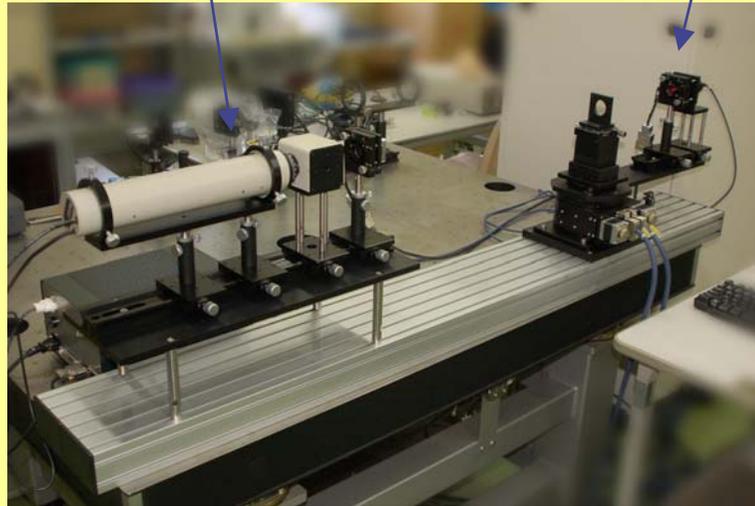


入射角: 70度

実時間2次元 複屈折計測システム

ゼーマンレーザ

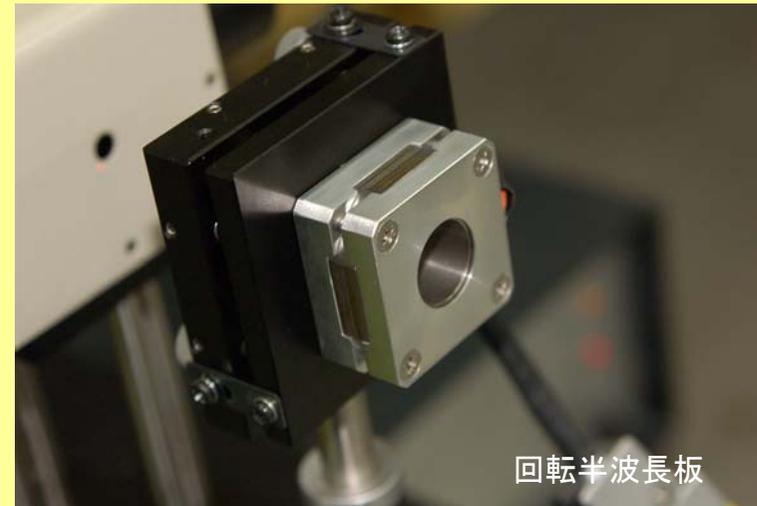
ロックイン光検出器



ロックイン光検出器

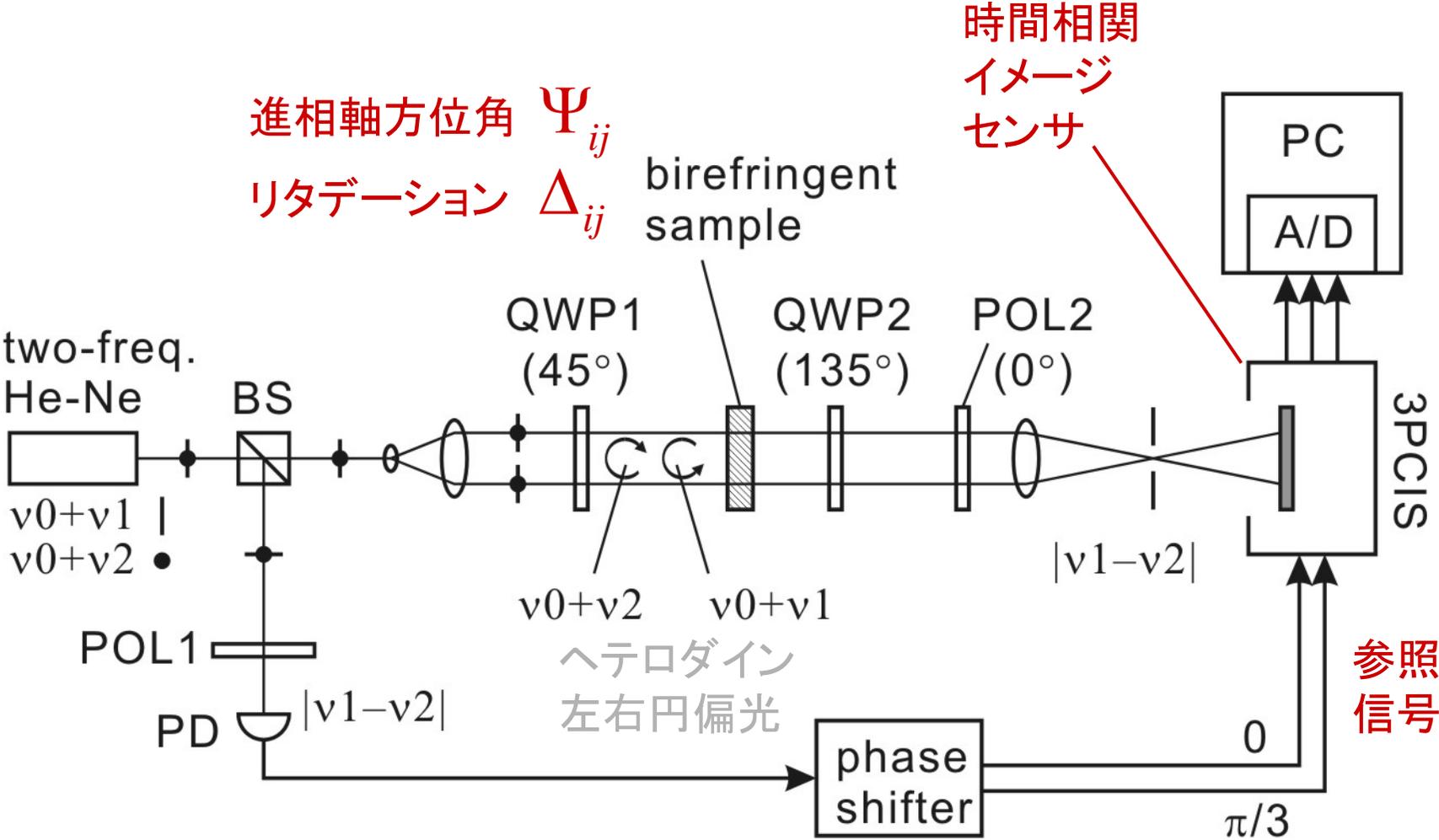


ゼーマンレーザ



回転半波長板

実時間ヘテロダイン複屈折イメージャ



原理(1): 複屈折分布の時間軸変調

試料

$$\mathbf{X}_{ij} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\Delta_{ij}}{2} + j \sin \frac{\Delta_{ij}}{2} \cos 2\Psi_{ij} & j \sin \frac{\Delta_{ij}}{2} \sin 2\Psi_{ij} \\ j \sin \frac{\Delta_{ij}}{2} \sin 2\Psi_{ij} & \cos \frac{\Delta_{ij}}{2} - j \sin \frac{\Delta_{ij}}{2} \cos 2\Psi_{ij} \end{bmatrix}$$

3PCIS上の偏光状態

$$\begin{bmatrix} E_{ij}^x(t) \\ E_{ij}^y(t) \end{bmatrix} = \mathbf{P} \mathbf{Q}_2 \mathbf{X}_{ij} \mathbf{Q}_1 \begin{bmatrix} e^{j(\omega_1 t + \phi_1)} \\ e^{j(\omega_2 t + \phi_2)} \end{bmatrix}$$

QWP(45°) $\mathbf{Q}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix}$

QWP(135°) $\mathbf{Q}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix}$

POL(0°) $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$

3PCIS画素
での光電流

$$\begin{aligned} I_{ij}(t) &= |E_{ij}^x(t)|^2 + |E_{ij}^y(t)|^2 \\ &= 1 + \underbrace{\sin \Delta_{ij}}_{\text{振幅}} \cos(\Delta\omega t + \Delta\phi - \underbrace{2\Psi_{ij}}_{\text{位相}}) \end{aligned}$$

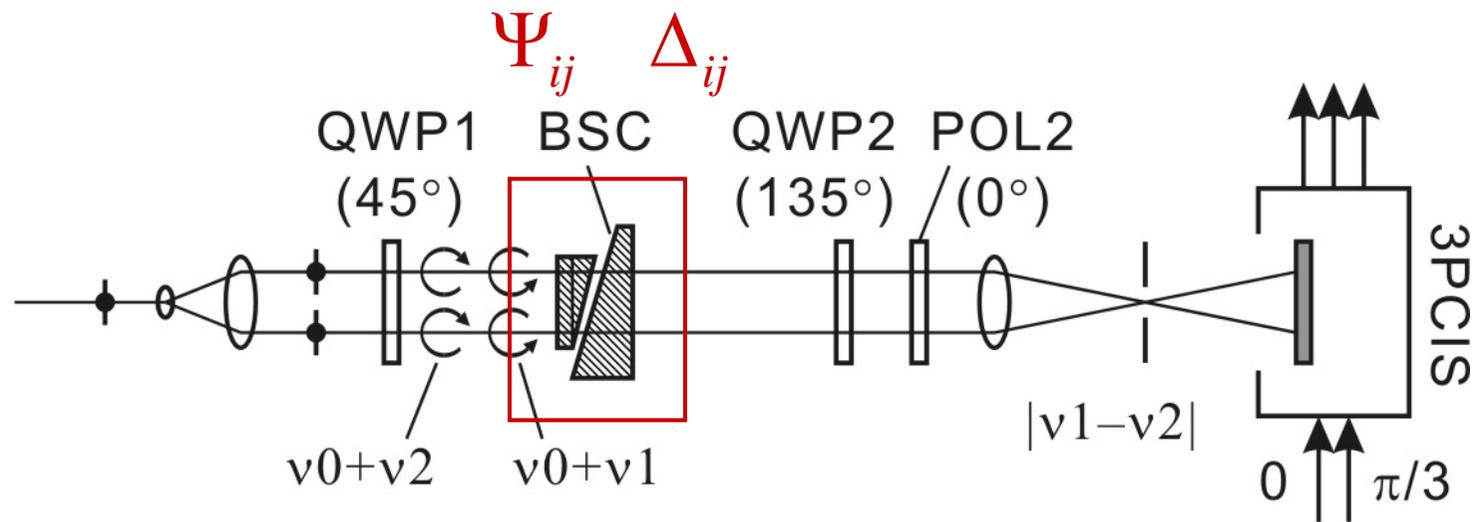
N. Umeda *et al.*,
Proc. SPIE, **2873** (1996)

ビート周波数 $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$

初期位相差 $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$

実験：実時間複屈折イメージング

1. Babinet-Soleil補償器 (BSC)
2. 1/4波長板 (+BSC)
3. OHPシート

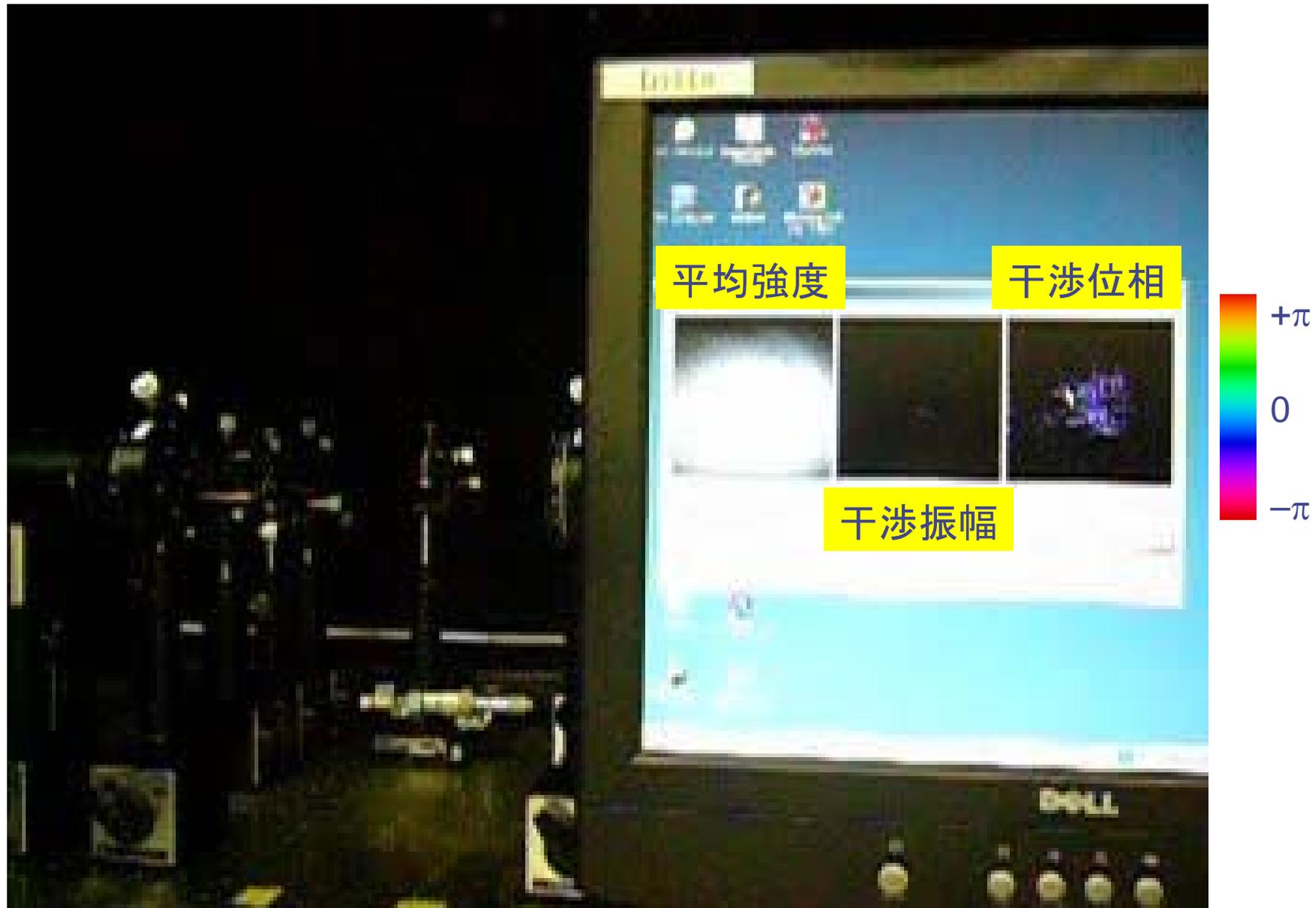


1. 進相軸方位角 Ψ_{ij} のみ変化
2. リタデーション Δ_{ij} のみ変化

ビデオ: BSCの複屈折イメージング



ビデオ: OHPシートの複屈折イメージング



時間相関イメージセンサの応用(7)

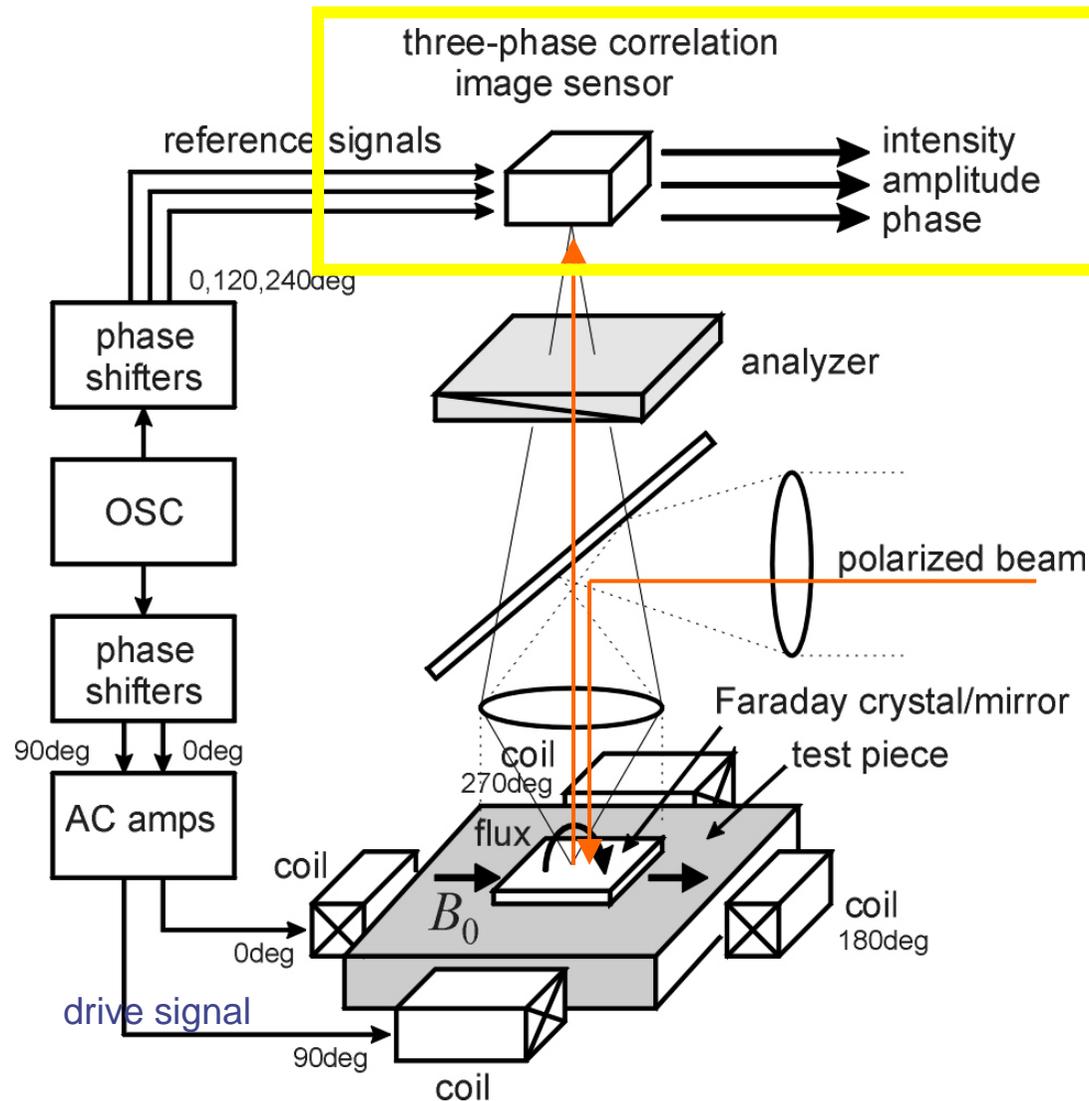
実時間2次元磁気光学探傷システム

特色と応用方向

- ユニークな磁氣的パターン計測手法
- 複素磁気特性映像(磁気異方性, 漏洩磁束, 渦電流等)
- 2次元並列その場観察
- 安定で安価で小型化可能
- 漏洩磁束探傷, 渦電流探傷, 磁性評価装置

ロックイン磁気光学映像法

for leakage flux inspection

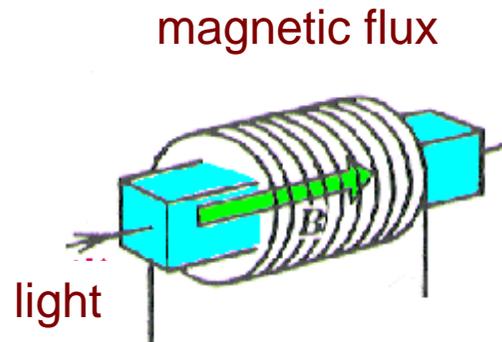


安藤他, ``三相時間相関イメージセンサと磁性ガーネット結晶を用いる交流漏洩磁束映像法,`` 材料とプロセス2, pp.298-298, 2003.

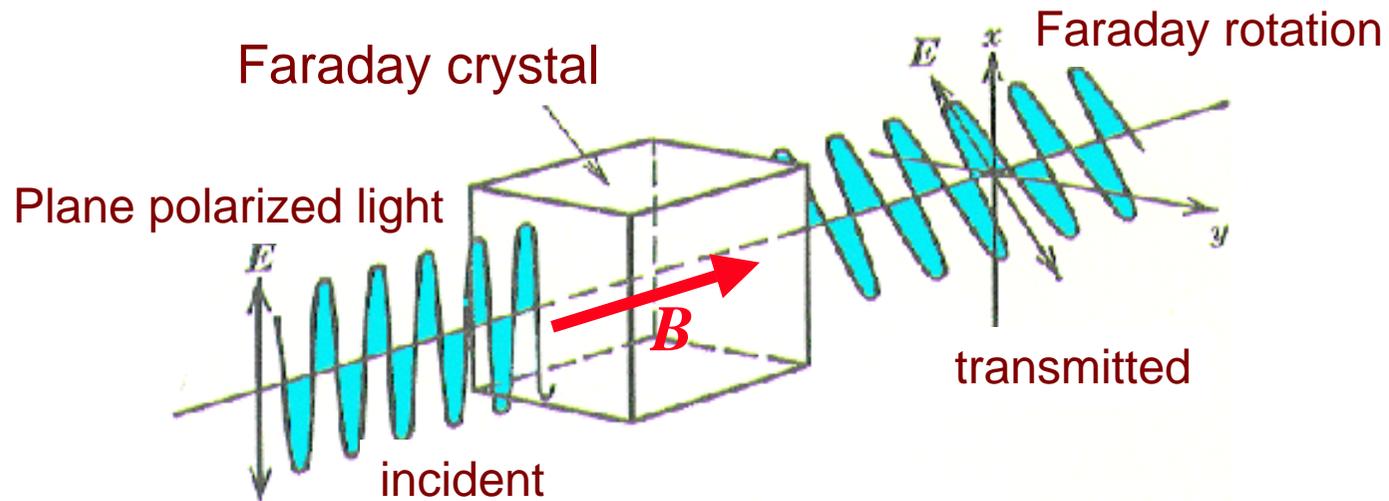
S. Ando, ``Surface magnetic flux imager using CMOS three-phase lock-in camera,`` Proc. Transducers'03, pp.308-311, Boston, 2003.

S. Ando et al., ``Lock-in Magneto-Optical Imager Using Correlation Image Sensor,`` Proc. '03 SICE Annual Conference, pp.1708-1711, Fukui, 2003.

ファラデー効果



Faraday geometry of magnetic flux and light



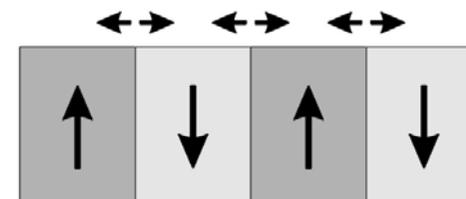
Magneto-Optic Transduction by means of Faraday Effect



Domain structure of garnet ferrite crystal. Each domain shows a plus or minus Faraday rotation.

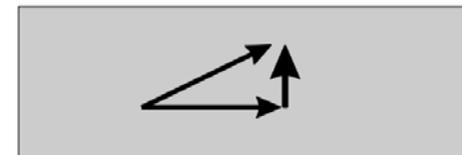
<http://www.magnet.okayama-u.ac.jp/magword/mop/>

Change of domain area ratio
movement of domain walls



↑↑↑↑
external magnetic field

Inclination of magnetic dipole
vertical magnetic component



↑↑↑↑
external magnetic field

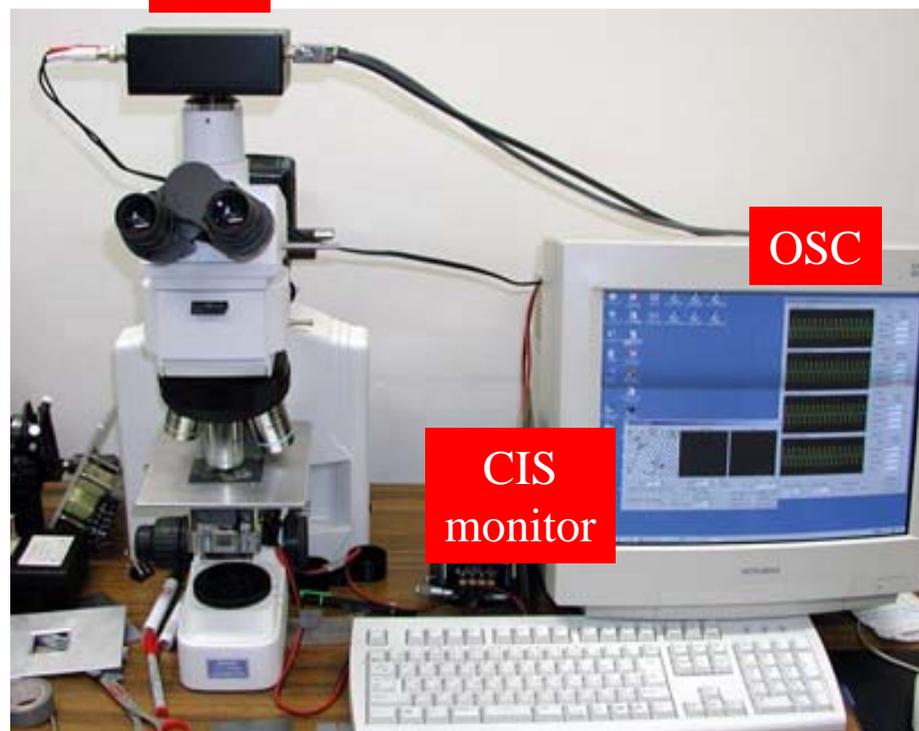
映像系と四極励磁装置

三相時間相関カメラ

CIS



四極励磁装置部



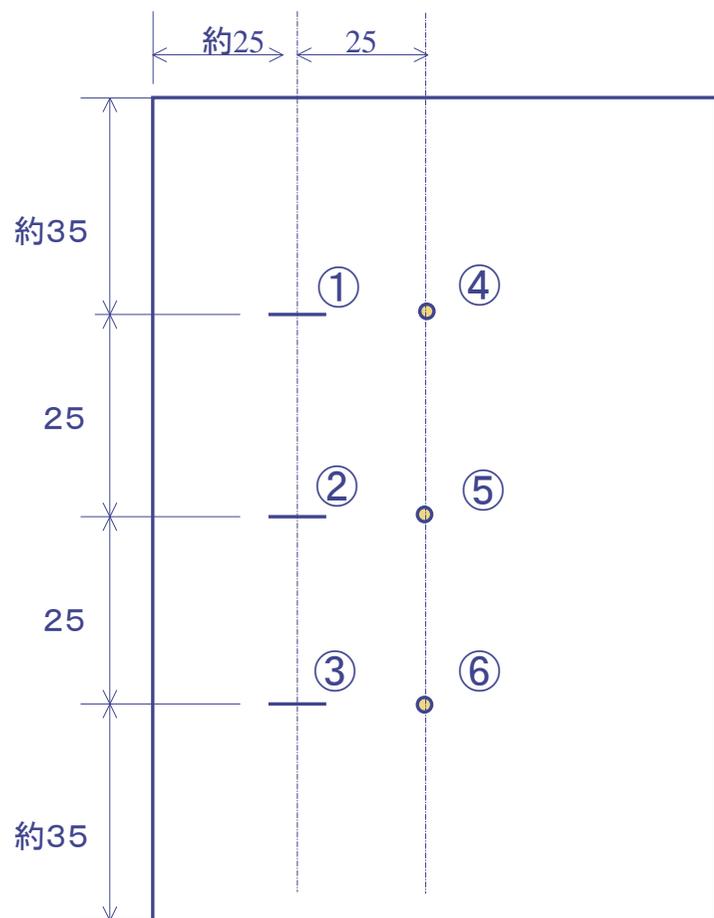
OSC

CIS
monitor

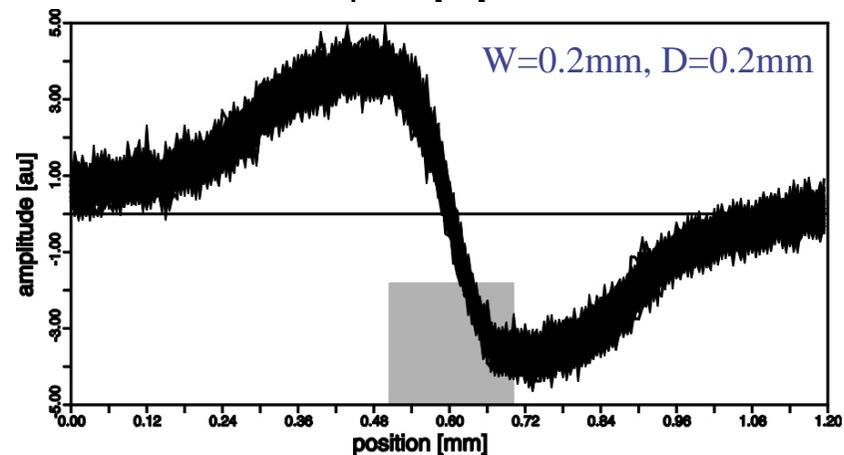
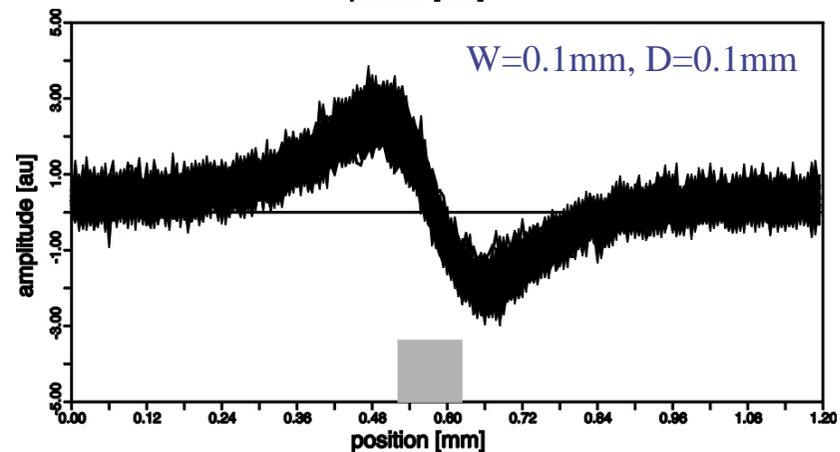
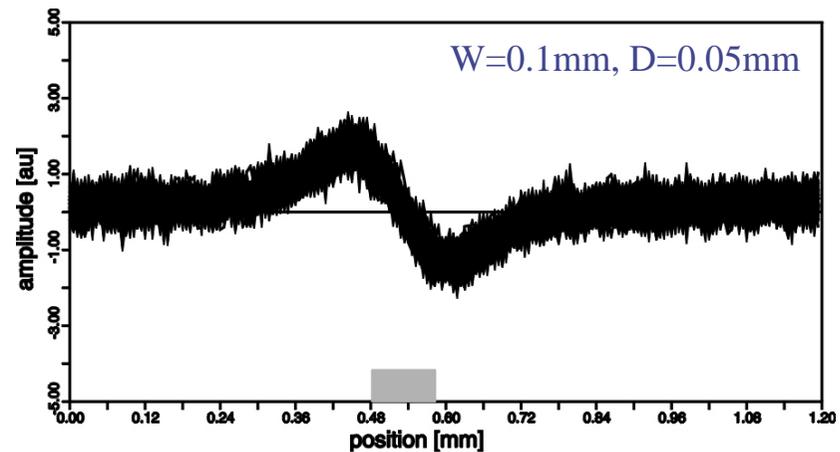
映像系全体

定量評価実験

応答断面

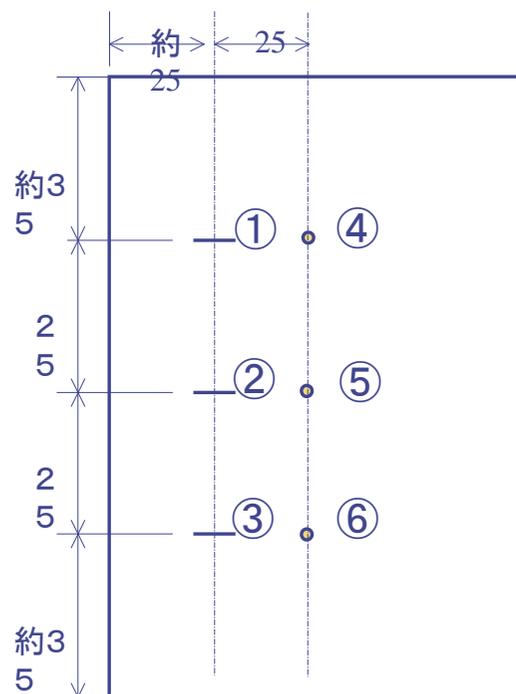


板材: $125 \times 100 \times 2t$



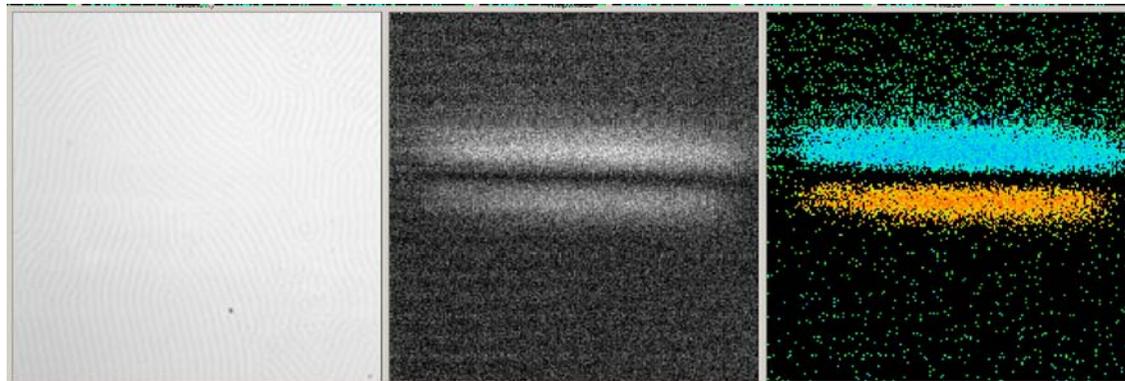
画像検出実験

標準試料

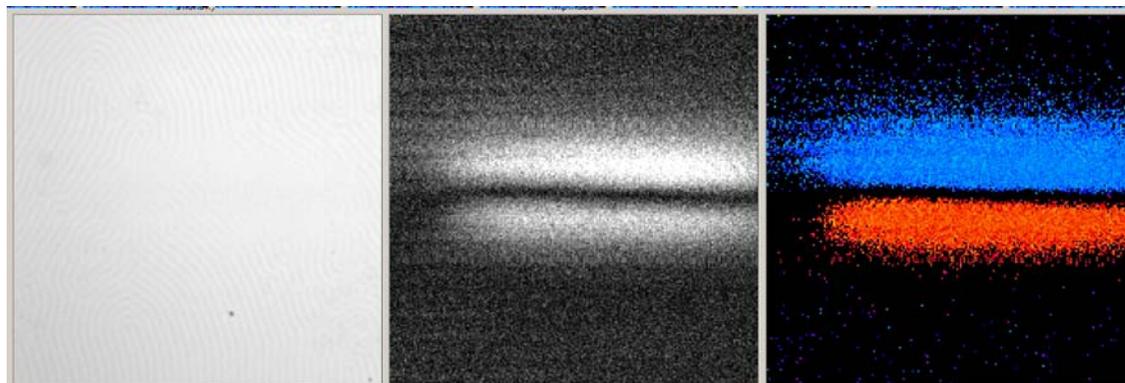


板材:
125 × 100 × 2t

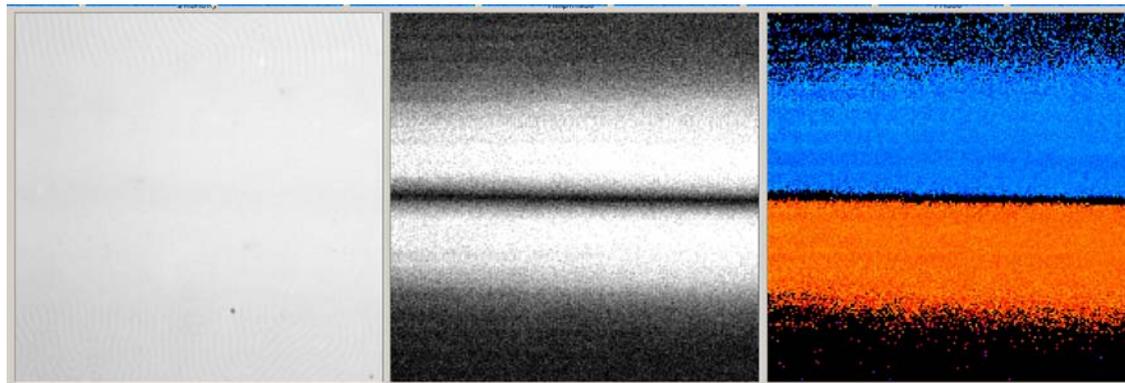
W=0.1mm, D=0.05mm



W=0.1mm, D=0.1mm

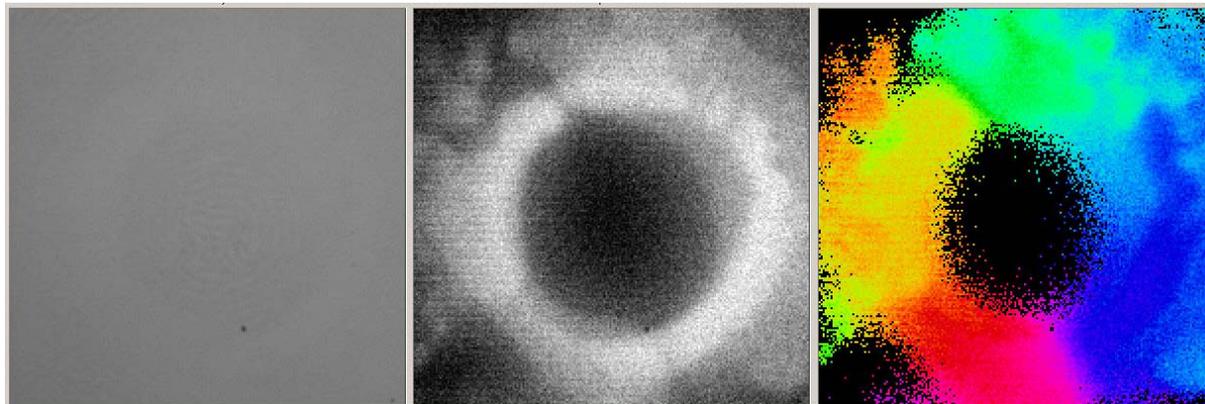


W=0.2mm, D=0.2mm

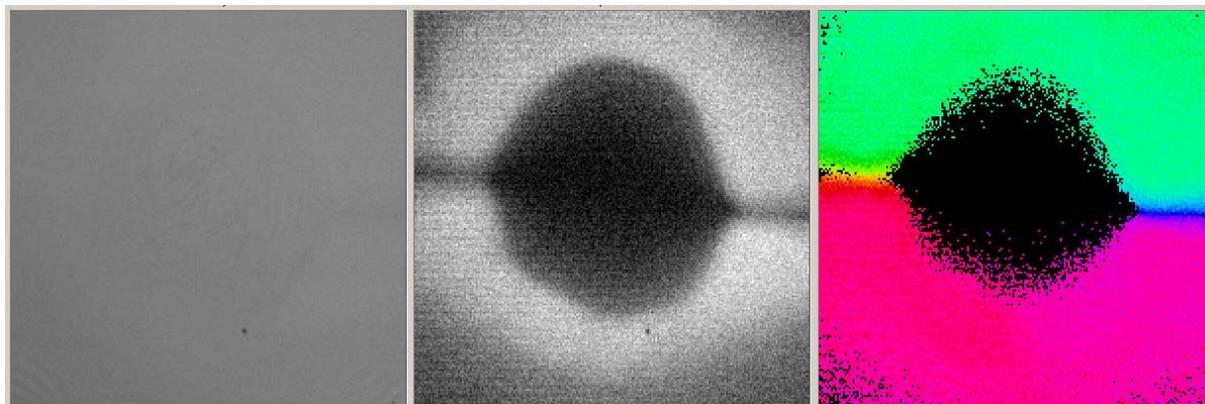


人工穴周囲 の漏洩磁束

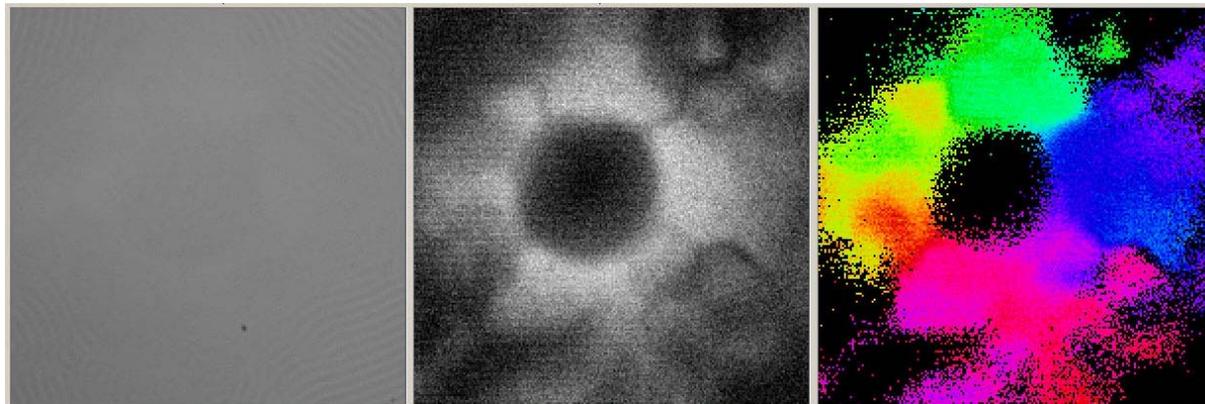
cold rolled steel



GO magnetic steel

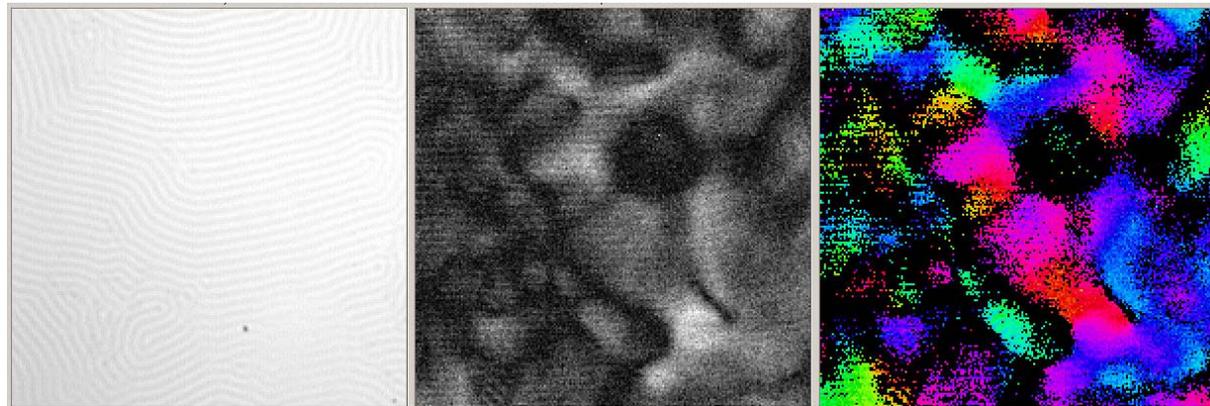


NO magnetic steel



粒状性の 画像化

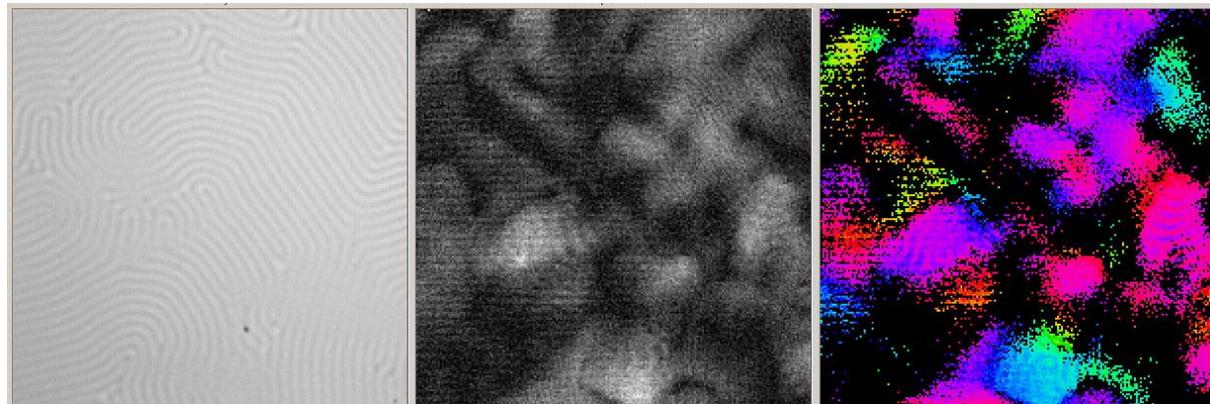
cold rolled steel



GO magnetic steel

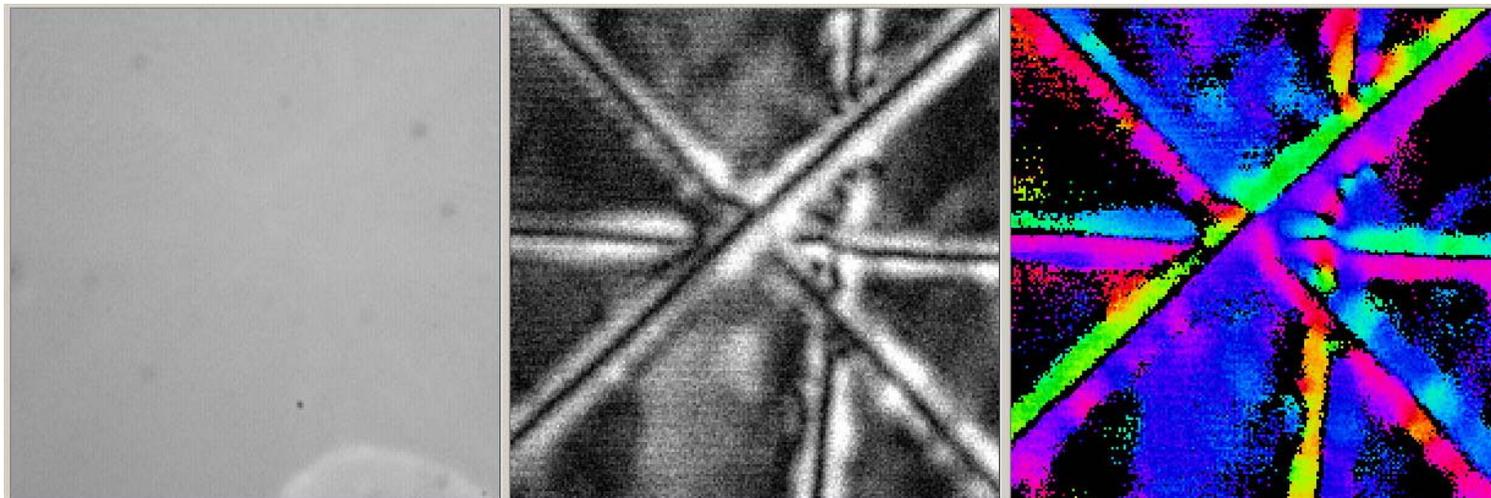


NO magnetic steel

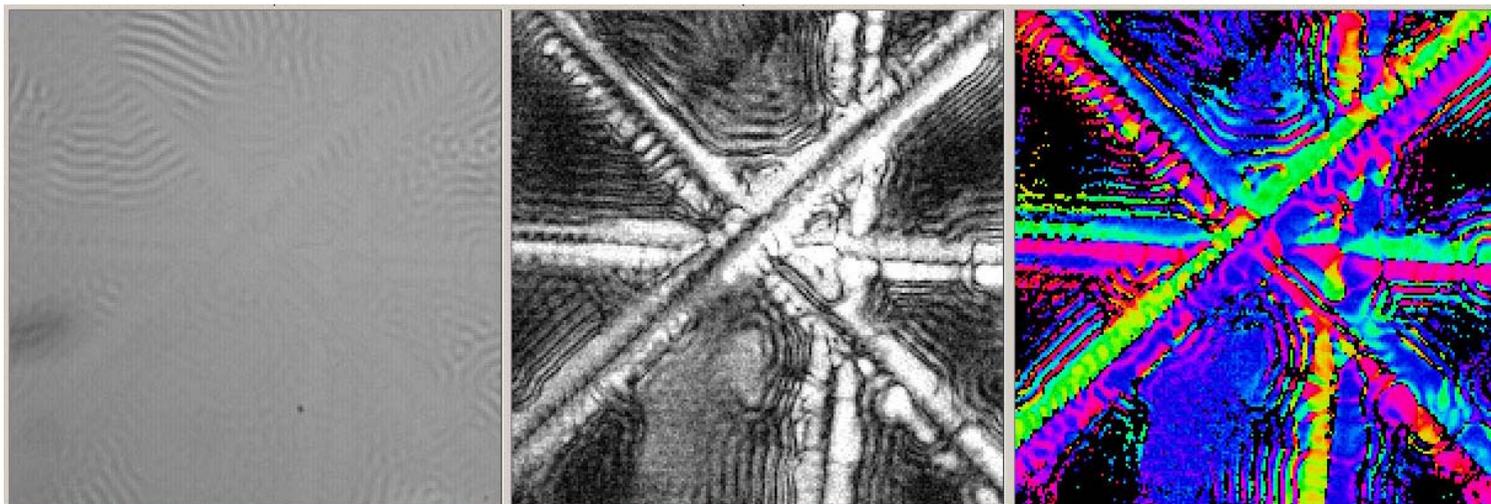


空間平滑化撮像と合焦撮像

平滑化時



合焦時



時間相関イメージセンサの応用(8)

太陽磁場の偏光観測システム

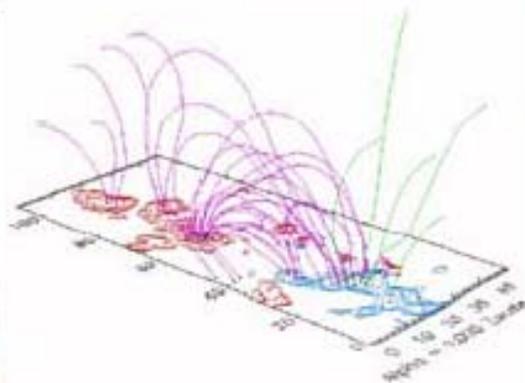
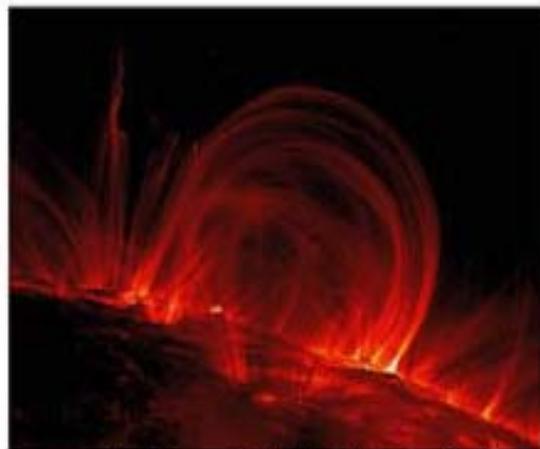
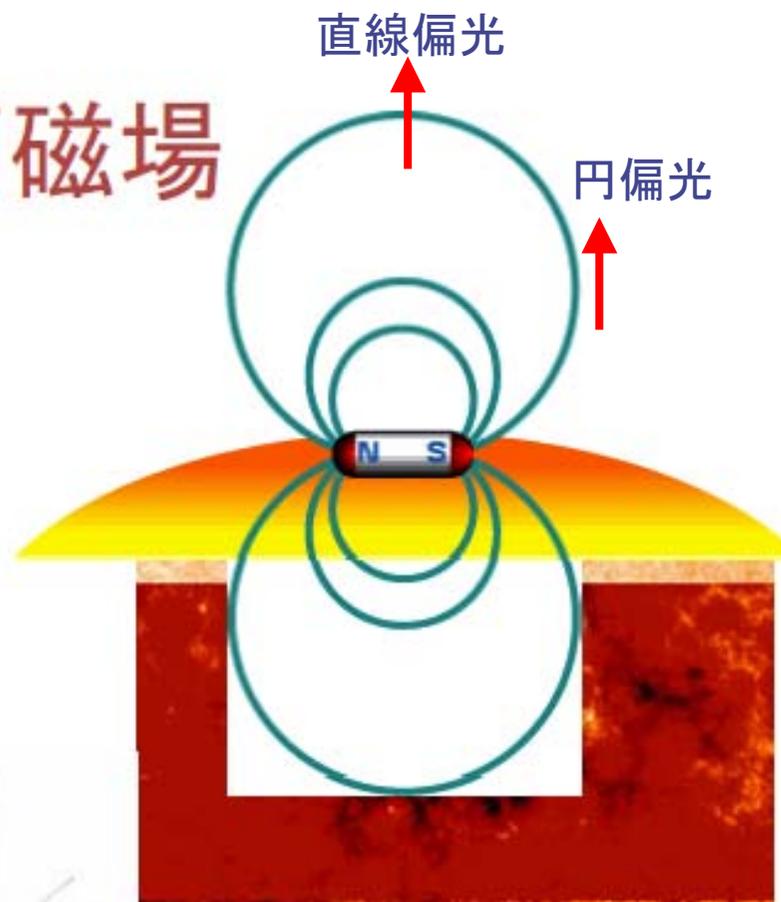
特色と応用方向

- ロックインCCDの契機となった相関画像計測応用
- 太陽磁場ゼーマン効果による吸収線分離・偏光の検出
- 円偏光と直線偏光により垂直水平磁場を映像化可能
- 高い光利用効率と高いSN比が必須
- 高変調周波数による大気ゆらぎの除去

太陽磁場の偏光イメージング

太陽表面磁場

- 「黒点は磁石」といわれるが、太陽面には広く磁場が分布していて、太陽活動の源泉となっている



MDIで得られた光球画像・磁場の例(白黒がN極、S極に対応)

太陽コロナに見えるループ構造は磁力線に対応している
(TRACE及びMeudon天文台)

太陽磁場の偏光イメージング方法

- 通常のイメージセンサによる検出
 - 4種以上の偏光変調状態での検出と逆演算
 - 検出時の時間差, 環境雑音の影響大
- Lock-in CCD(1985~)
 - 時間相関イメージセンサ発案の契機となったデバイス
 - 2値相関検出能力の2次元集積
 - 能動的な光キャリア制御
- Zurich Imaging Polarimeter (Zimpol II)
 - Lock-in CCDから発展した偏光イメージングデバイス
 - 実用化済。しかし精度と解像度に問題
- Charge-Caching CMOS detector (C³Po)
 - 欧米で計画中の時間相関イメージセンサに類似の新デバイス
- 時間相関イメージセンサ(1995~)
 - アナログ三相(強度+2直交基底)相関検出
 - 高精度相関積分(位相誤差0.2度)
 - 受動的なキャリア制御
 - Bayer配列3系統三相相関検出
 - 光計測, 計算機視覚, 生物模倣型センサ応用

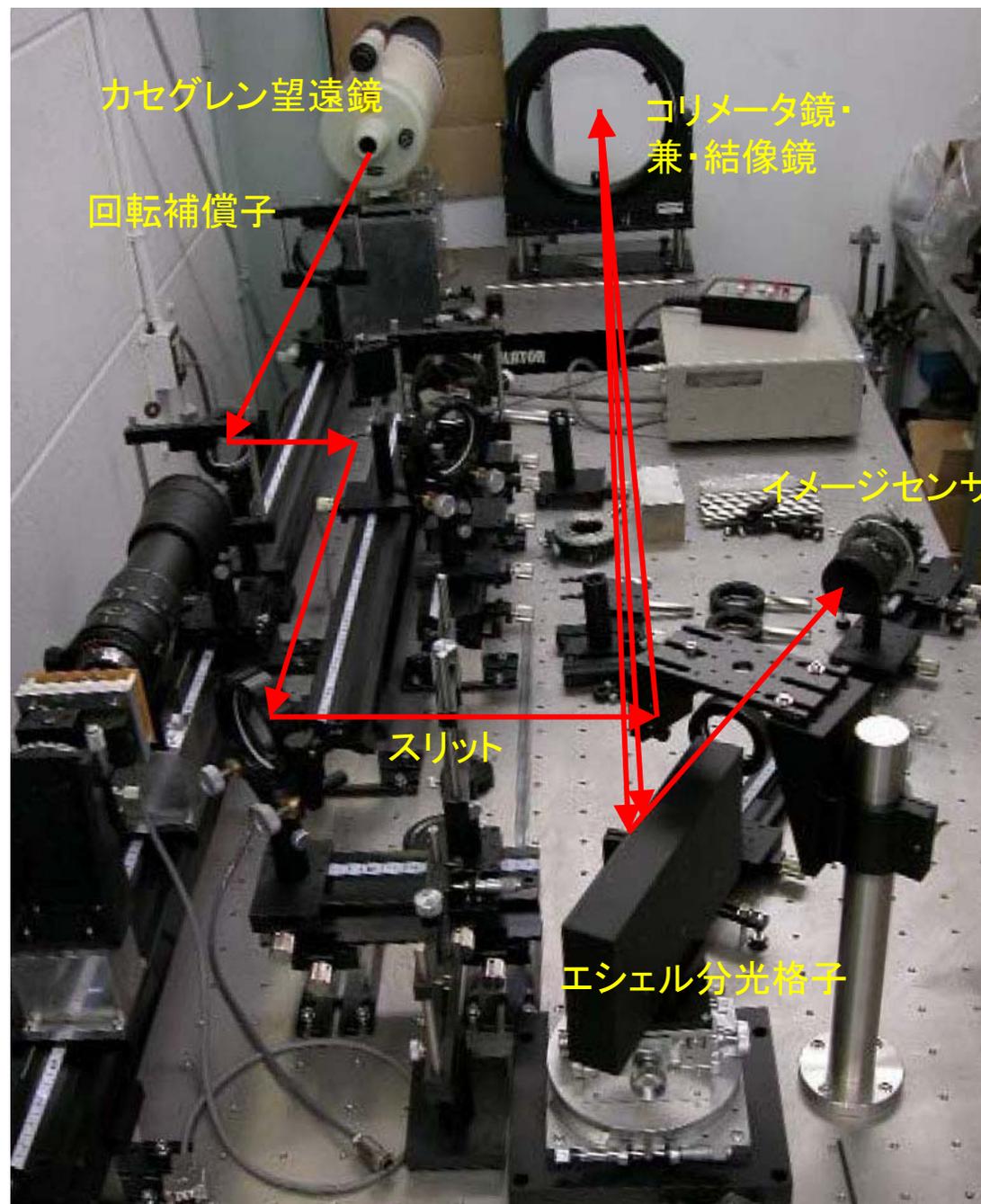
分光撮像光学系

(国立天文台太陽観測所)

国立天文台太陽観測所
(三鷹キャンパス)



シーロスタット



イメージング分光光学系

偏光状態とストークスパラメータ

電界の x, y 成分の共分散行列

$$\begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} \equiv E \left[\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x^* & E_y^* \end{bmatrix} \right]$$

ストークスパラメータ

$$\begin{aligned} S_0 &= J_{xx} + J_{yy} && \text{.....} && I \\ S_1 &= J_{xx} - J_{yy} && \text{.....} && Q \\ S_2 &= J_{xy} + J_{yx} = 2\Re\{J_{xy}\} && \text{.....} && U \\ S_3 &= -j(J_{xy} - J_{yx}) = 2\Im\{J_{xy}\} && \text{.....} && V \end{aligned}$$

【例】強度2の直線偏光

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} &= 2 \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix} \end{aligned}$$

よって

$$S_0 = 1, \quad S_1 = \cos 2\theta, \quad S_2 = \sin 2\theta, \quad S_3 = 0$$

回転補償子法による時間軸符号化

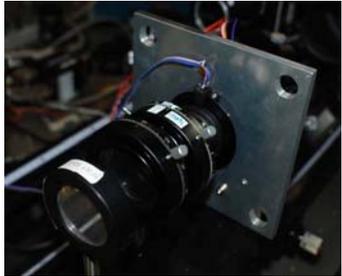
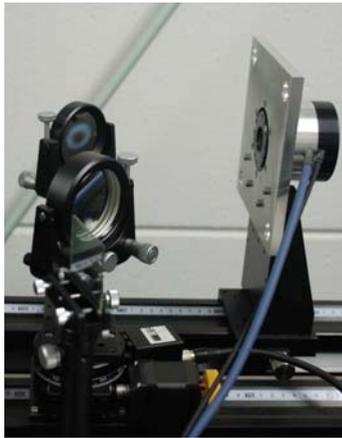
ωt で回転する補償子を通過後

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -j \end{bmatrix} \\ &\quad \times \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \\ &= \frac{1+j}{2} \begin{bmatrix} \cos 2\omega t & \sin 2\omega t \\ \sin 2\omega t & -\cos 2\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} + \frac{1-j}{2} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \end{aligned}$$

90度の検光子通過後の強度

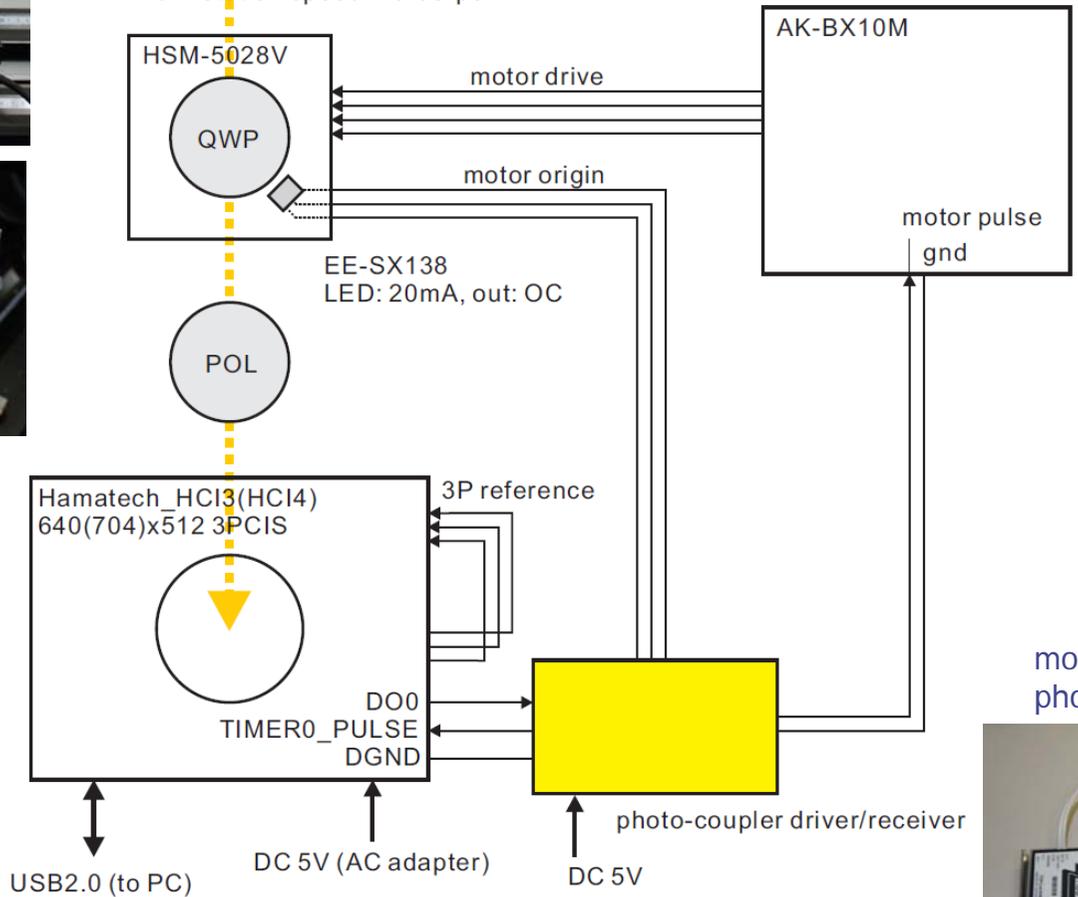
$$\begin{aligned} |E'_x|^2 &= \left| \frac{1+j}{2} (E_x \cos 2\omega t + E_y \sin 2\omega t) + \frac{1-j}{2} E_x \right|^2 \\ &= \frac{1}{4} \{ (|E_x|^2 - |E_y|^2) \cos 4\omega t + (E_x E_y^* + E_x^* E_y) \sin 4\omega t \\ &\quad - 2j(E_x E_y^* - E_x^* E_y) \sin 2\omega t + 3|E_x|^2 + |E_y|^2 \} \\ &= \frac{1}{4} (S_1 \cos 4\omega t + S_2 \sin 4\omega t \quad \text{直線偏光: } 4\omega \text{周波数成分の振幅と位相} \\ &\quad + 2S_3 \sin 2\omega t + 2S_0 + S_1) \\ &\quad \text{円偏光: } 2\omega \text{周波数成分の振幅} \end{aligned}$$

偏光イメージングシステムの構成



Technohands EW1-300
max rotation speed 160rps

HSM-5028V:
max rotation speed: 20-30rps

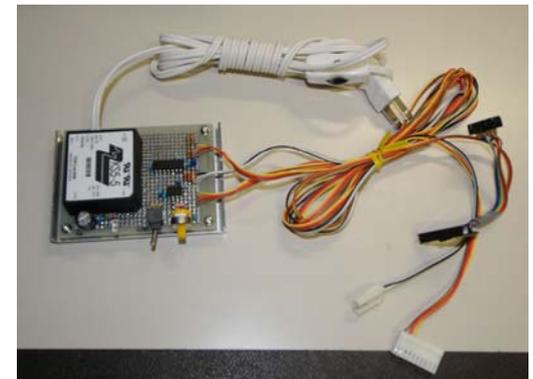


Hamatech_HCI3/HCI4
640x512 / 704x512



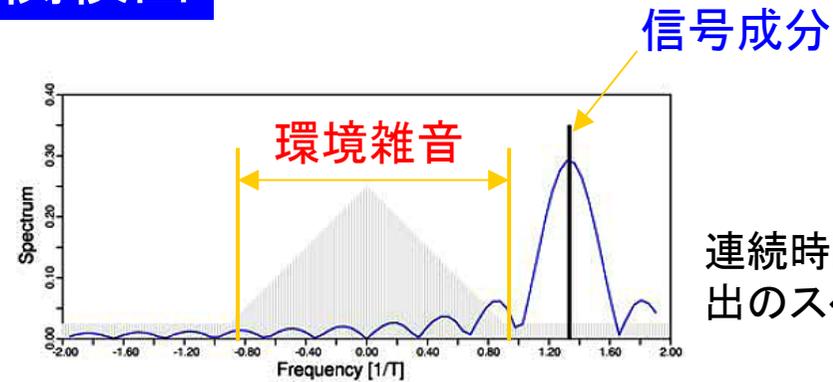
DCI1_Rev2 1280x1024

motor interface/
photo-coupler driver/receiver

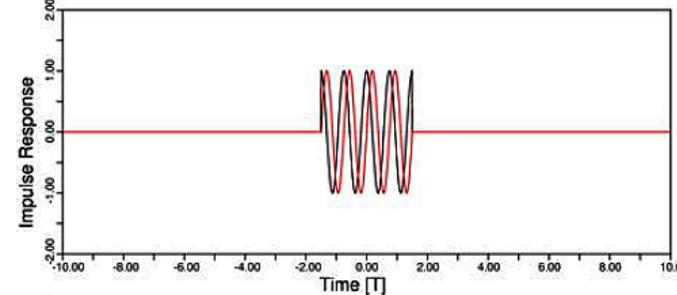


連続時間相関検出と標本化相関検出

- 信号成分の帯域を環境雑音帯域から分離可能
- 短時間相関により帯域外感度発生するが、読み出し後の累積により際限なく減少可能

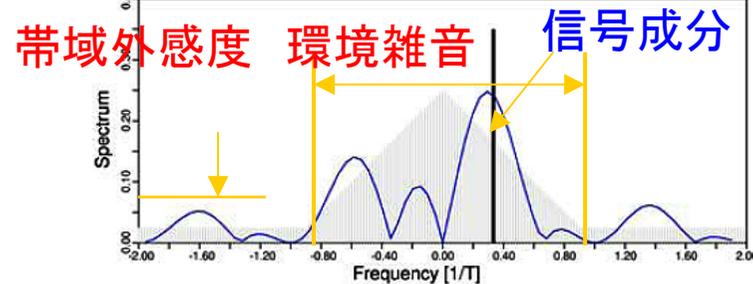


連続時間相関検出のスペクトル

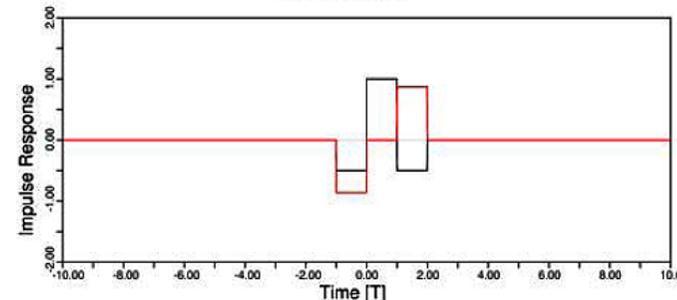


連続時間相関検出のインパルス応答

- 信号成分の帯域が環境雑音帯域に重なる: **低SN比**
- 標本化と短時間相関により多量の帯域外感度発生。しかし前者は読み出し後の累積により減少しない

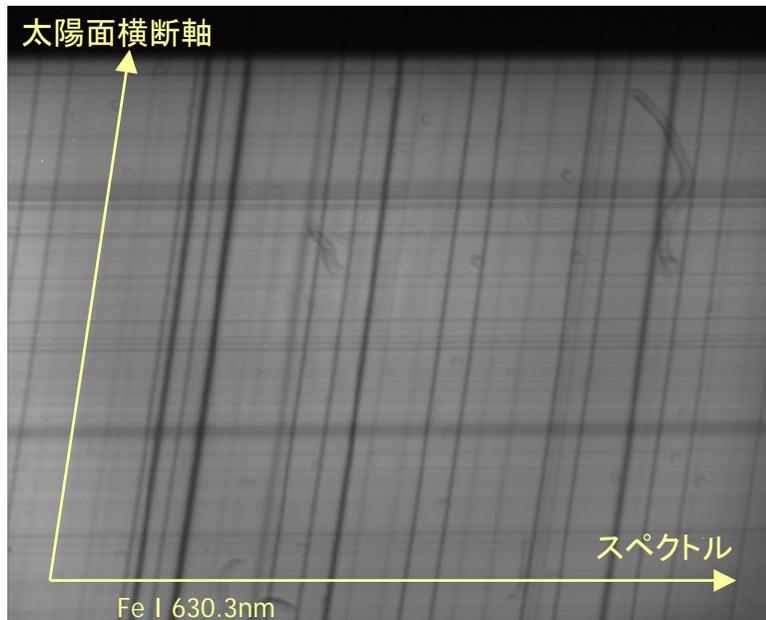


標本化相関検出のスペクトル

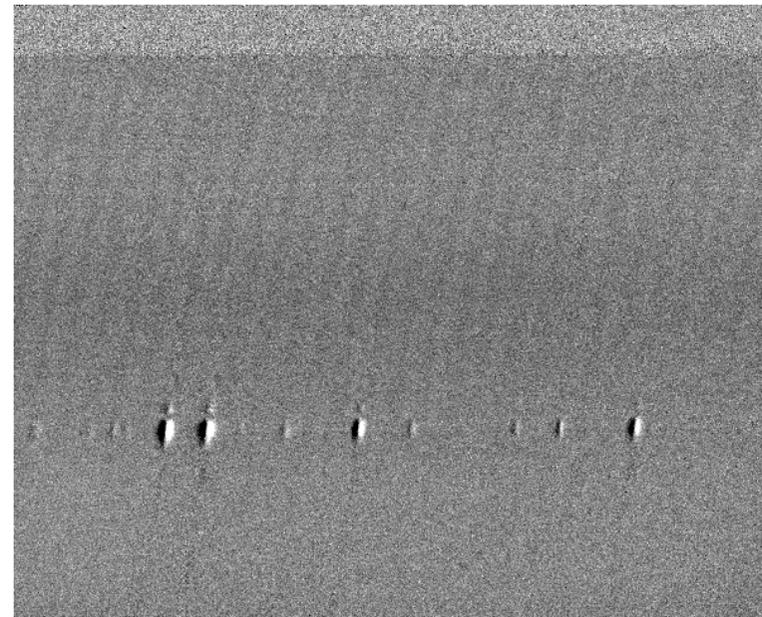


標本化相関検出のインパルス応答

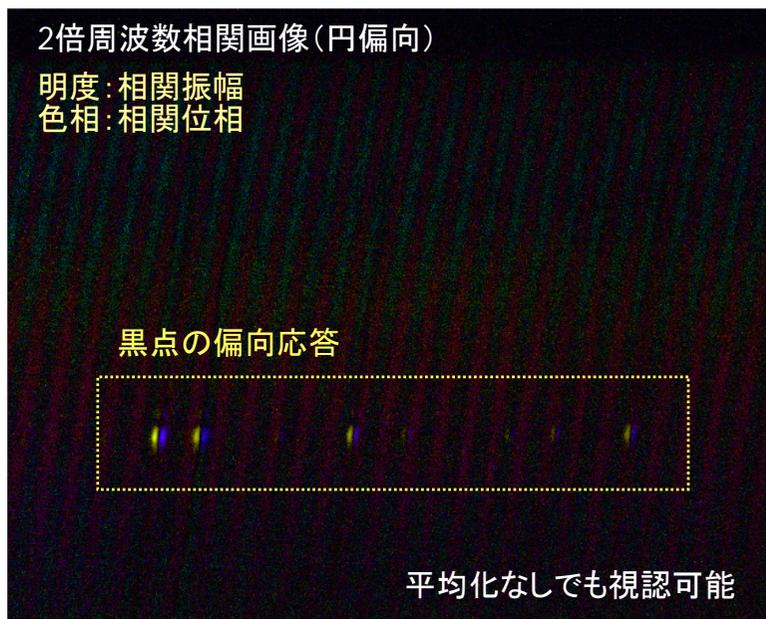
検出例(1) Hamatech HCI3 640x512画素 平均化100枚



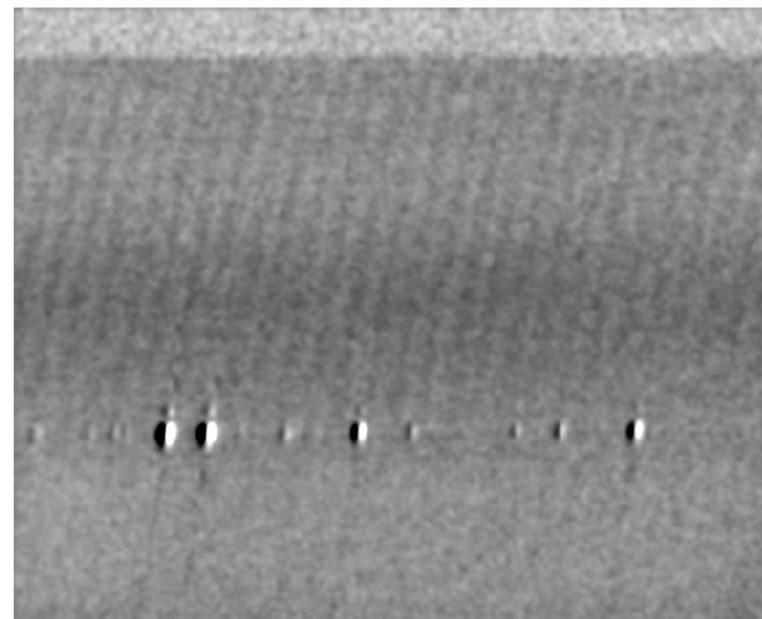
(a) 強度画像



(a) 偏光成分画像

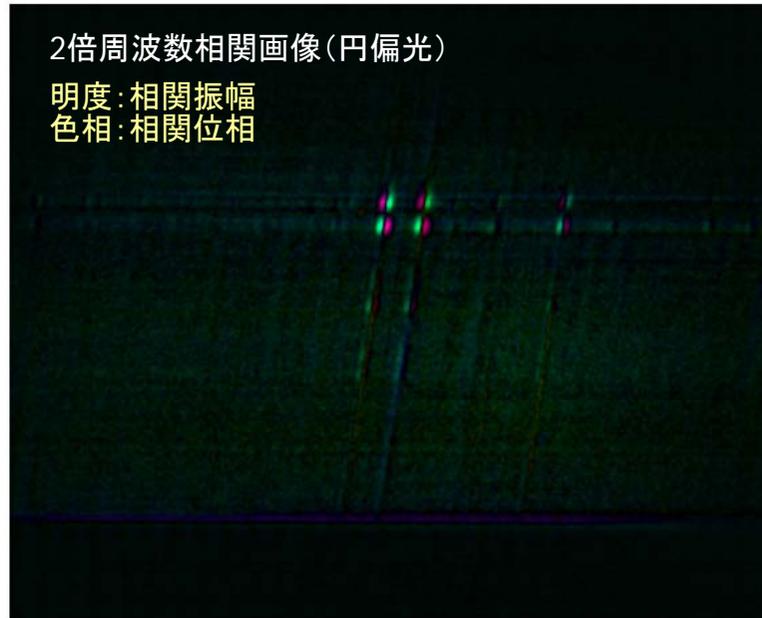


(b) 相関画像

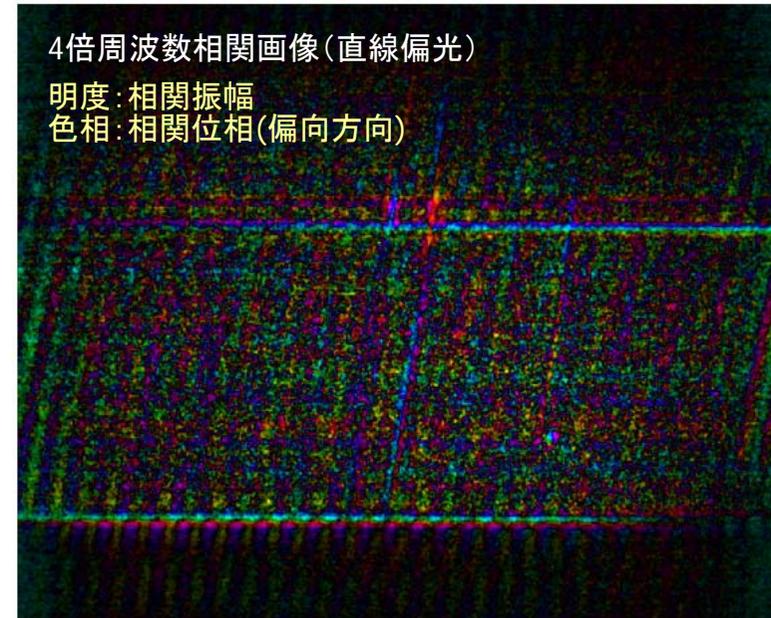


(b) 平滑化偏光成分画像 (明暗スケール4倍)

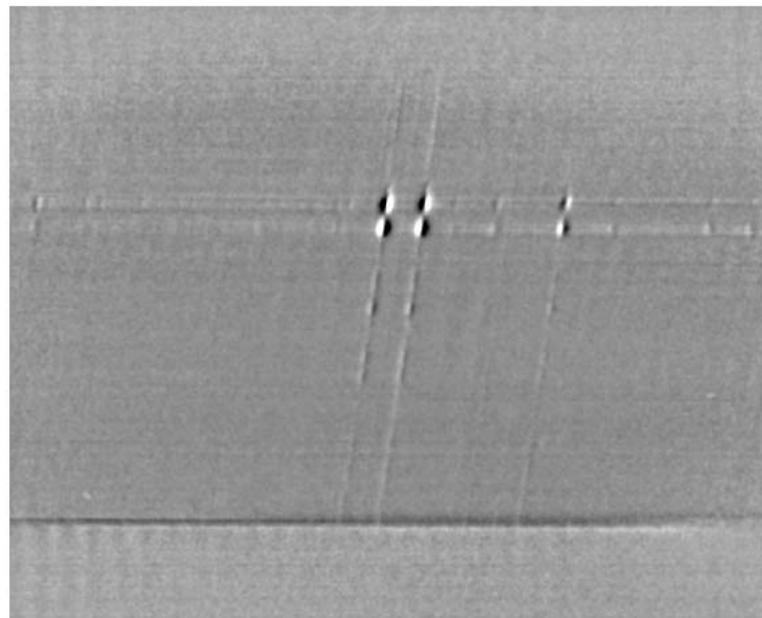
検出例(2) digital DCI1 1280x1024画素 2周波数同時撮像 平均化4枚



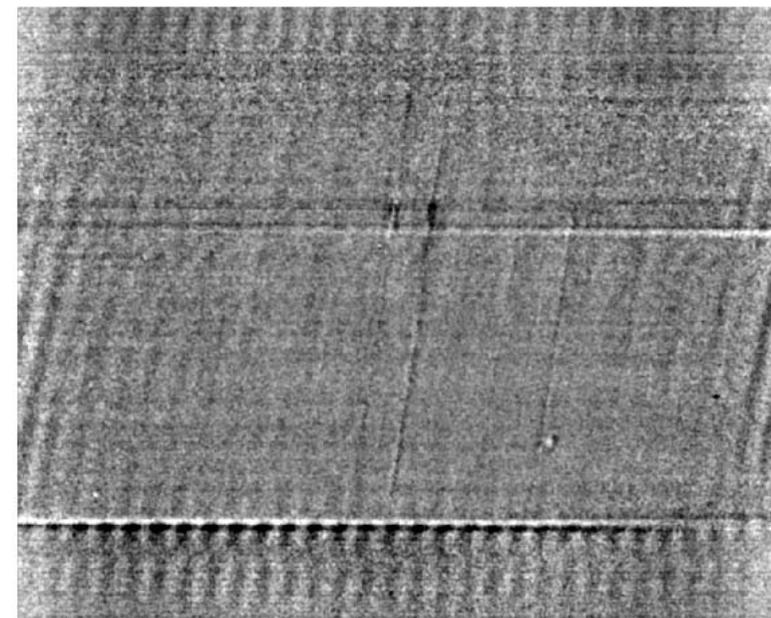
(a) 2倍周波数相関画像



(a) 4倍周波数相関画像



(b) 偏光成分画像

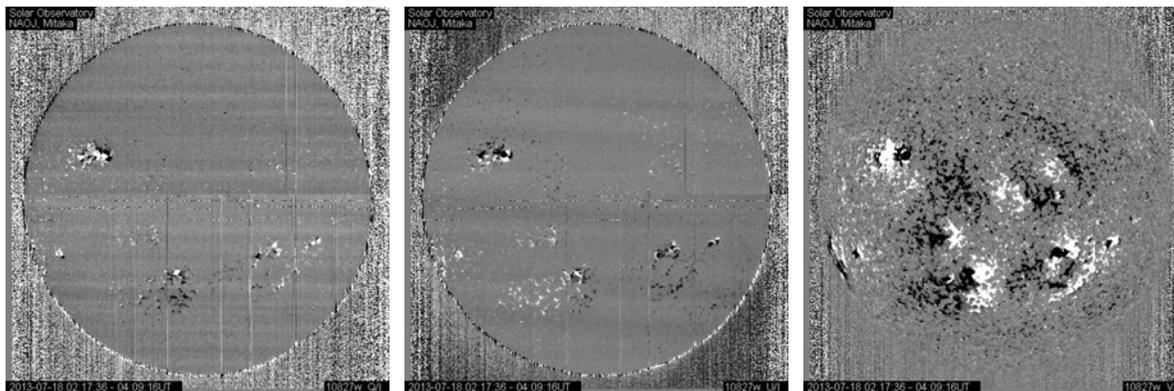
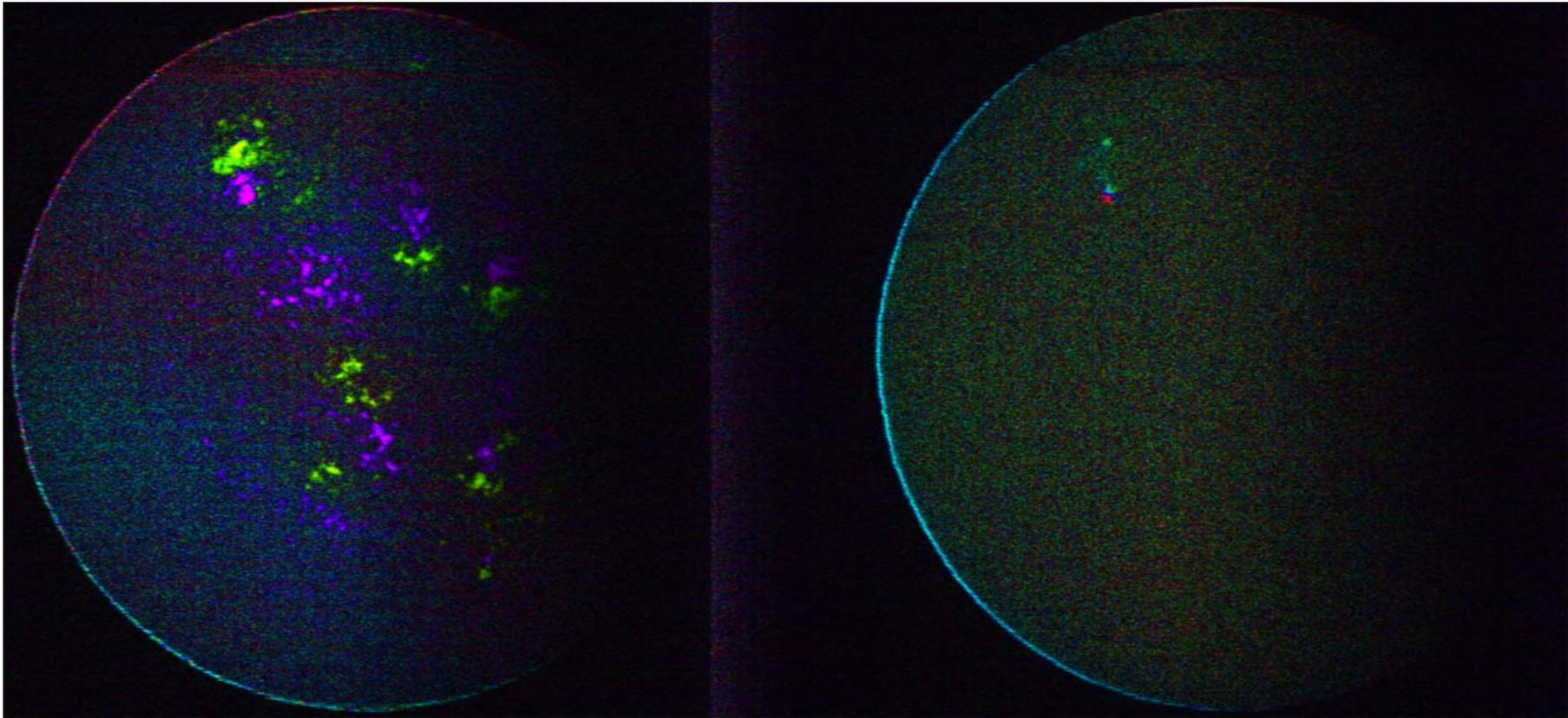


(b) 偏光成分画像

2013.07.18実験結果(1)

円偏光成分

直線偏光成分

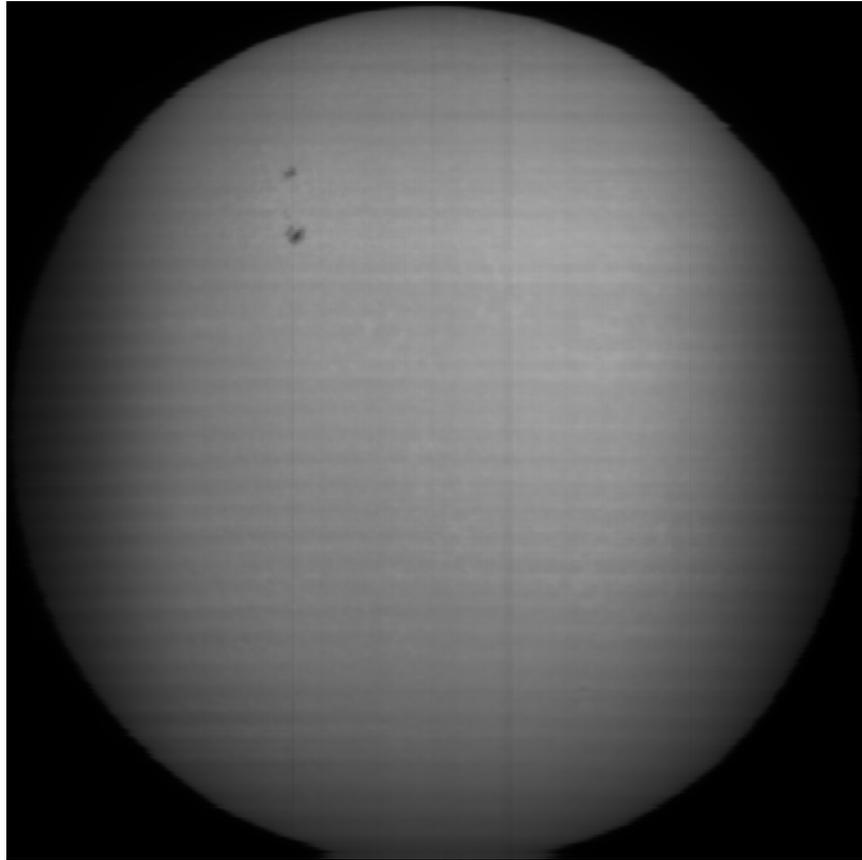


- 干渉縞状のパターンはかなり減少している
- 最も強い黒点付近で直線偏光成分が捉えられている
- 上側にある若干赤い部分は雲の影響

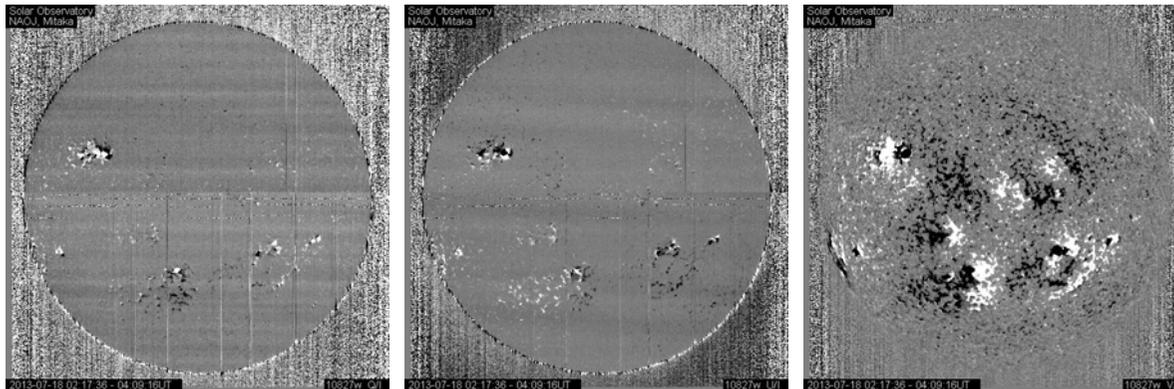
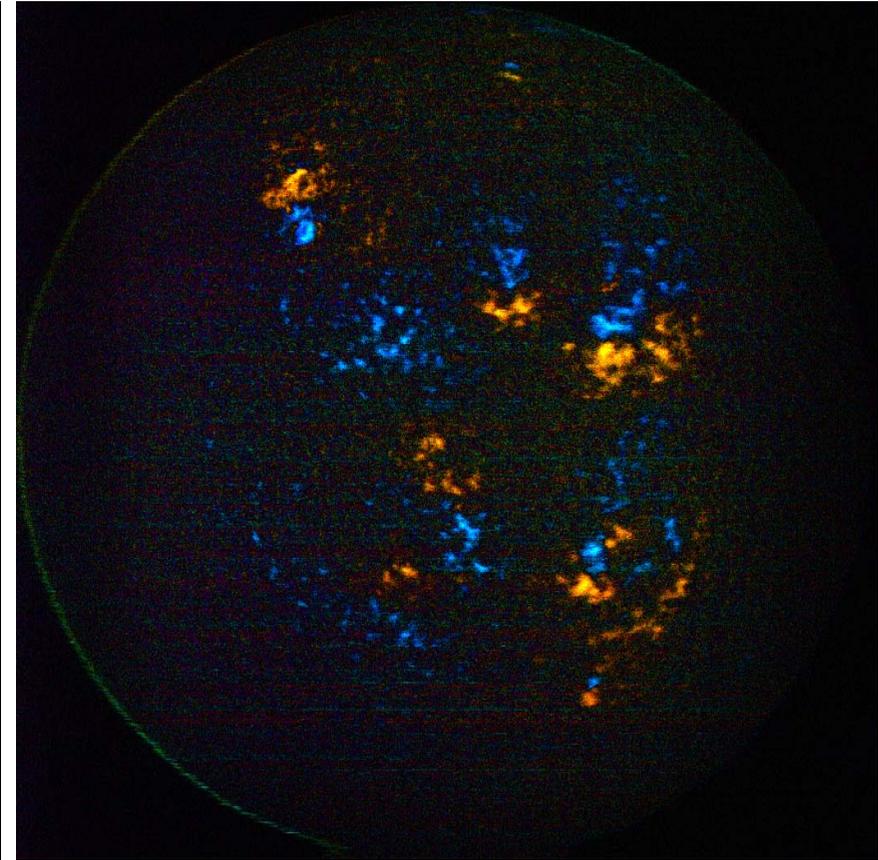
ほぼ同時刻の三鷹フレア望遠鏡観測結果

2013.07.18実験結果(2)

明暗強度



円偏光成分



- 干渉縞状のパターンはかなり減衰している
- 円偏光画像のコントラストも大きく向上している

ほぼ同時刻の三鷹フ
レア望遠鏡観測結果

まとめ

◆ 時間相関イメージングとは

- その役割: 変調(荷重積分)撮像, 相互相関検出, ヘテロダイン
- 時間相関と空間相関
- 物理現象の光への変換

◆ 時間相関イメージングのデバイス

- なぜ集積化が有効か
- 時間相関イメージセンサの構造と動作

◆ 時間相関イメージセンサの応用

- 実時間オプティカルフロー検出
- ヘテロダイン干渉計測・光渦を用いる遠隔6軸変位計測
- 実時間三次元計測とドップラ計測
- 固視微動型視覚システム
- 実時間2次元エリプソメトリ・複屈折計測システム
- 実時間2次元磁気光学探傷システム
- 太陽磁場の偏光観測システム

◆ まとめ

ご清聴ありがとうございました