

## 時間相関イメージセンサとその応用 固視微動特徴抽出から三次元計測まで

安藤 繁, 小野順貴, 栗原 徹

東京大学大学院情報理工学系研究科

113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

TEL: 03-5841-(6925,6927,6927)

E-Mail: (ando,onono,bond)@alab.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし: 著者らが独自に開発を進めている半導体集積化撮像デバイスである時間相関イメージセンサについて、その目的、原理、構造、現時点で得られている性能、これまでに開発してきた応用のいくつかを紹介する。このデバイスは人間の視覚系の固視微動による特徴抽出機構の数理モデル構築の過程で考案された。単相あるいは三相の参照信号を与えることにより、任意のフレーム数の時間幅で各画素上での光入力との間の時間相関を電荷として蓄積し出力する。固視微動のモデルとしての応用にとどまらず、最新の半導体技術により十分な解像力と性能が実現されれば、従来のイメージセンサの自然な拡張としての使いやすさと汎用性、独自のセンシング能力を生かした画像認識、民生用・産業用の画像計測、基礎科学のため映像化技術等に幅広い応用が考えられる。

キーワード: 時間相関イメージセンサ, ロックイン, 同期検出, 整合フィルタ, 固視微動, 複素微分, 高階微分ガウシアン, 三次元計測, 測光ステレオ, ヘテロダイン

## Correlation Image Sensor and Its Applications: from Biomimicry Feature Extraction to 3-D profilometry

Shigeru ANDO, Nobutaka ONO, and Toru KURIHARA

Graduate School of Information Science and Technology, University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan

TEL: +81-3-5841-(6925,6927,6927)

E-Mail: (ando,onono,bond)@alab.t.u-tokyo.ac.jp

**Abstract:** This article describes a novel solid-state integrated image sensor “correlation image sensor” we are developing in several years. This device was first invented in the mathematical considerations on the feature extraction mechanisms of the human vision using the micro-vibratory movements of the eyeballs. By virtue of the advanced micro-electronic technologies, it will be able to obtain sufficient resolution and performance, superior usability as a natural extension of conventional image sensors, and numerous applications to such as computer vision systems, personal and industrial image measurements, and various real-time scientific imagers.

Keywords: correlation, CMOS, lock-in, synchronous detection, matched filter, involuntary eye movement, complex differential, differential Gaussian, 3-D measurement, photometric stereo, heterodyne

# 1. 固視微動と相関検出

固視微動とは、人間の視覚系に見られる大変興味深い振る舞いの一つであり、人間の感覚の上では対象の1点を凝視し視線移動が全くない場合にも眼球自体は微小に振動し、物理的な意味での視線を対象点の近傍で高速かつ微細に移動させている仕組みのことである。固視微動を等価的に止めると視覚機能が大幅に失われることから、人間の視覚情報の形成に強く関わっていることが確かめられている。一方、計測技術においては、固視微動と同様に対象やセンサに微小な振動（摂動）を与えてその応答を捉え、対象の情報を抽出することが計測の基本的な方法論として頻繁に行われる。相関検出、ロックイン検出、同期検出などと呼ばれる方法論である。ここでの最重要要素は、与えた摂動と対象からの応答の積を時間的に積分するいわゆる相関器である。通信においては乗算変調器・復調器あるいは混合器と呼ばれ、これらが行う処理は数学的には全く同一のものである。

著者らは、網膜上の受容器と神経回路が何らかの形で相関器をなし、これが眼球の振動信号を受けて対象の情報を抽出しているのではないかと仮説に立ち、理論的な定式化を進めるとともに、実証システムの実現を目指した。実証システム実現の鍵となるのは光検出と相関器を一体化したデバイス、すなわち時間相関イメージセンサである。また理論的な定式化の鍵となるのは、振動から相関検出可能な高階微分量を一般的に表現可能な複素微分および複素高階微分概念である。

## 2. 相関と計測

### 2.1 相関検出の基本的役割

相関積分とは、二つの関数  $f(t)$  と  $g(t)$  の時間区間  $T$  において

$$R_{fg}(t) = \int_{t-T}^t f(t_1)g(t_1)dt_1 \quad (1)$$

のように定義され、二つの関数の内積を与える。相関係数は、この内積を用いて

$$\cos \theta_{fg}(t) \equiv \frac{R_{fg}(t)}{\sqrt{R_{ff}(t)R_{gg}(t)}} \quad (2)$$

のように計算される量であり、二つの関数のベクトル空間での類似度（整合度）を角度  $\theta_{fg}(t)$  で表現する。 $\cos \theta_{fg} = 1, (\theta = 0)$  は完全相関、同一、あるいは完全整合を、 $\cos \theta_{fg} = 0, (\theta_{fg} = \pi/2)$  は無相関、直交、あるいは非整合を意味する。

相関積分のこのような性質から、相関検出には以下の二つの役割がある。

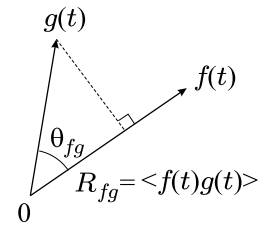


図 1: 相関検出（整合検出）の幾何学的意味づけ。相関積分は二つの時間関数の内積を与える演算であり、二つの類似度（整合度）を二つの関数のなす角度で表現する。

1. 参照信号と同一波形の成分を選択し、参照信号と直交する他の全ての成分を排除する。
2. 参照信号と同一波形の成分の大きさを、参照信号との振幅比として求める。

1) は一般のフィルタやの整合フィルタの役割と同じである。しかし、フィルタ自体は 2) の振幅を求める機能をもたない。一方、2) は波形の標本化の役割と同じである。しかし、標本化自体は 1) の特定成分の選択と排除の機能をもたない。

### 2.2 ヘテロダインと振幅位相検出

相関検出が狭帯域信号と結びつくと大変実用性の高い技術体系が生み出される。干渉やホログラムを用いるコヒーレント光学技術、通信やレーダの技術等である。

平均明度  $I_0$  に重畳して周波数  $\omega$  の振動的明暗変化を含み、その振幅  $A(t)$  と位相  $\phi(t)$  が未知であるような光の明暗変化

$$I(t) = I_0 + A(t) \cos(\omega_0 t + \phi(t)) \quad (3)$$

を考える。この式は、

$$\begin{aligned} I(t) &= I_0 + A(t) \frac{e^{j(\omega_0 t + \phi(t))} + e^{-j(\omega_0 t + \phi(t))}}{2} \\ &= I_0 + A(t)e^{j\phi(t)}e^{j\omega_0 t} + A(t)e^{-j\phi(t)}e^{-j\omega_0 t} \end{aligned}$$

と変形してみれば分かるように、第 1 項の定数項と、第 2 項の周波数  $\omega_0$  の複素正弦波  $e^{j\omega_0 t}$  を複素信号  $A(t)e^{j\phi(t)}$  で乗算した信号と、第 3 項の周波数  $-\omega_0$  の複素正弦波  $e^{-j\omega_0 t}$  を複素信号  $A(t)e^{-j\phi(t)}$  で乗算した信号との和である。

#### a) 周波数変換

このような明暗変化に、振幅 1、位相 0 で周波数  $\omega_1$  の正弦波  $\cos \omega_1 t$  を乗じたとすると、その時間変化は

$$\begin{aligned} I(t) \cos \omega_1 t \\ = I_0 \cos \omega_1 t + A(t) \cos \omega_1 t \cos(\omega_0 t + \phi(t)) \end{aligned}$$

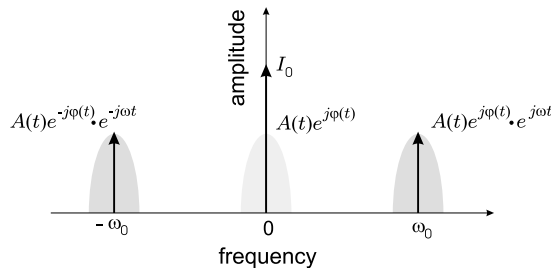


図 2: 対象情報の振幅位相符号化。複素数の対象情報  $A(t)e^{j\phi(t)}$  を周波数  $\pm\omega_0$  の正負の搬送波で乗算変調したものの和を観測することと等価である。

$$= I_0 \cos \omega_1 t + \frac{A(t)}{2} \cos\{(\omega_0 + \omega_1)t + \phi(t)\} + \frac{A(t)}{2} \cos\{(\omega_0 - \omega_1)t + \phi(t)\}$$

のように、第 1 項の周波数  $\omega_1$  の成分、第 2 項の和周波数  $\omega_0 + \omega_1$  近傍に分布する成分、第 3 項の差周波数  $\omega_0 - \omega_1$  近傍に分布する成分を生じる。それらが周波数軸上で十分に離れていれば、適当な低域通過フィルタによって、その最も小さい周波数成分である  $\omega_0 - \omega_1$  成分のみを残し、

$$\langle I(t) \cos \omega_1 t \rangle \simeq A(t) \cos\{(\omega_0 - \omega_1)t + \phi(t)\} \quad (4)$$

を得ることができる。この操作のことを一般に周波数変換あるいはヘテロダイン検波と呼ぶ。

このような周波数変換は、物理現象に含まれる非線形効果を利用すると、非常に高い周波数（例えば光の周波数）に関しても容易に行うことができる。

### b) 直交乗算検波（直交相関検出）

上式で  $\omega_1 = \omega_0$  とすると

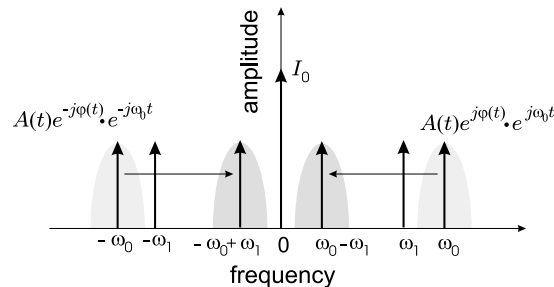
$$\langle I(t) \cos \omega_0 t \rangle \simeq A(t) \cos \phi(t)$$

のように搬送波周波数  $\omega_0$  に依存して変化する成分を取り除くことができる。この操作を乗算検波あるいは相関検出と呼ぶ。しかし、この値からだけでは振幅  $A(t)$  と位相  $\phi(t)$  を分離することができない。そこで  $\sin \omega_0 t$  との乗算検波を同時に行うと、

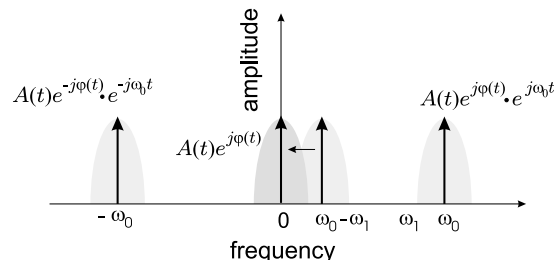
$$\begin{aligned} I(t) \sin \omega_1 t &= I_0 \sin \omega_1 t + A(t) \sin \omega_1 t \cos(\omega_0 t + \phi(t)) \\ &= I_0 \cos \omega_1 t + \frac{A(t)}{2} \sin\{(\omega_0 + \omega_1)t + \phi(t)\} \\ &\quad - \frac{A(t)}{2} \sin\{(\omega_0 - \omega_1)t + \phi(t)\} \end{aligned}$$

ゆえ、

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



(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）

図 3: 周波数変換（ヘテロダイン）と直交検波。複素数の対象情報  $A(t)e^{j\phi(t)}$  を失わずに、搬送波の周波数  $\omega_0$  をそれより低くする操作が周波数変換（ヘテロダイン）である。一方、直交検波は正負に分かれた二つの周波数成分の一方を選択し、それを搬送波の周波数だけシフトさせて複素数の信号成分を復調する操作である。

のように両者を分離するために十分な情報を得る。この操作を一般に直交乗算検波あるいは直交相関検出と呼ぶ。

## 3. 時間相関イメージセンサ

### 3.1 基本構成

相関検出を 2 次元並列的に行う半導体集積デバイスである。相関の一方の信号は光入力、他方の信号は全画素共通に電氣的に与える参照信号である。直交相関検出への適用を想定し、参照信号は 2 系統を同時に与えてそれぞれの相関出力が同時に得られるようにする。相関出力の読み出しは、通常のフレームレートでの画素走査による。相関の積分時間はフレーム時間に一致するが、連続したフレームの読み出し結果を外部で加算すれば、その連続フレーム全体が積分時間となるように構成する。

#### a) MOS 単相相関回路

サブスレッショルド領域における MOS トランジスタの理論特性は

$$I = I_0 e^{-\frac{qV_G}{kT}} \left( e^{\frac{qV_S}{kT}} - e^{\frac{qV_D}{kT}} \right) \quad (5)$$

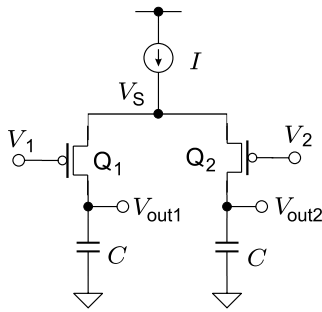


図 4: MOS トランジスタを用いた相関回路。コンデンサは初期時刻でリセットし、その後のドレイン電流をコンデンサに蓄積する。ドレイン-ソース間電圧が  $Q_1, Q_2$  が飽和動作を保っている間に読み出し動作を行い、蓄積した電荷を読み出す（破壊読出）と同時に、次の蓄積に備えて電荷をリセットする。

と書かれる。 $I_0$  は、 $V_{GS} = 0$  で  $V_{DS}$  が十分に大きい場合（飽和領域動作）のチャンネル電流を示す。 $|V_{DS}| \gg |kT/q| \sim 26\text{mV}$  で飽和領域に入り、

$$I = I_0 e^{-\frac{q\kappa V_{GS}}{kT}} \quad (6)$$

のような指数特性で十分よく近似できるようになる。いま、図 4 のように、共通ソースを有する差動増幅回路の入力を  $V_1, V_2$ 、その平均電圧を  $\bar{V}$  とし、ソースを電流  $I$  の被制御電流源とした回路構成を考えると、

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 &= -\frac{q\kappa}{2kT} I (v_1 - v_2) + \frac{1}{2} \left(\frac{q\kappa}{kT}\right)^2 I (v_1^2 - v_2^2) \\ &= -\frac{q\kappa}{2kT} I (v_1 - v_2) \end{aligned} \quad (7)$$

$$I_1 + I_2 = I \quad (8)$$

であり、行列形式に書き換えると

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = -\frac{q\kappa}{2kT} \begin{bmatrix} I(V_1 - \bar{V}) \\ I(V_2 - \bar{V}) \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I \\ I \end{bmatrix} \quad (9)$$

のような  $I$  と  $V_1 - \bar{V}, V_2 - \bar{V}$  の積の関係式を得る。 $I_1, I_2$  が容量  $C$  に電荷として蓄えられ相関値となる。

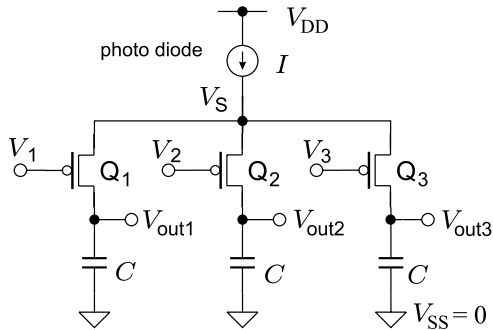


図 5: MOS トランジスタを用いた三相相関回路。

## b) MOS 三相相関回路

一度に 2 個の独立信号との相関値を得る三相型では、図 5 のように三対称に構成する。乗算特性は

$$\begin{bmatrix} I_1 - I/3 \\ I_2 - I/3 \\ I_3 - I/3 \end{bmatrix} = -\frac{q\kappa}{3kT} \begin{bmatrix} I(V_1 - \bar{V}) \\ I(V_2 - \bar{V}) \\ I(V_3 - \bar{V}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

のように与えられる。

## 3.2 最小二乗振幅位相検出

検出すべき信号を

$$f(t) = A \cos(\omega t + \phi) \quad (11)$$

とする。位相が互いに  $2\pi/3$  異なる三相正弦波参照信号  $(\cos \omega t, \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}), \cos(\omega t + \frac{4\pi}{3}))$  との相関により、誤差  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  を含む測定値

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} &= \left\langle f(t) \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \right\rangle + \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} \\ &= \frac{A}{2} \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\phi - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

が得られたとする。誤差の二乗ノルムを評価関数

$$\begin{aligned} J &= \left\{ \frac{A}{2} \cos \phi - g_1 \right\}^2 + \left\{ \frac{A}{2} \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) - g_2 \right\}^2 \\ &\quad + \left\{ \frac{A}{2} \cos(\phi - \frac{4\pi}{3}) - g_3 \right\}^2 \rightarrow \text{minimum} \end{aligned} \quad (13)$$

とし、これを最小化するような振幅  $A$  と位相  $\phi$  を定めると、

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{3}(g_2 - g_3)}{2g_1 - g_2 - g_3} \right) \quad (14)$$

$$A = \frac{4}{3} \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 - g_1 g_2 - g_2 g_3 - g_3 g_1} \quad (15)$$

$$= \frac{2}{3} \sqrt{(2g_1 - g_2 - g_3)^2 + 3(g_2 - g_3)^2} \quad (16)$$

が得られる。

## 4. 時間相関イメージセンサの応用

### 4.1 固視微動型特徴抽出

Fig.6(a) に構成図を示す。対象あるいはイメージセンサに 2,3 画素長程度の微小半径の円運動を与え、それを三相時間相関イメージセンサを用いて振幅と位相に復調する。実験系の写真を Fig.6 に、実験例を Fig.7 に示す。(a) では文字パターンのエッジの強度と方向が検出され、(b) では同心円パターンの尾根線と谷線の強度と方向が検出されている。

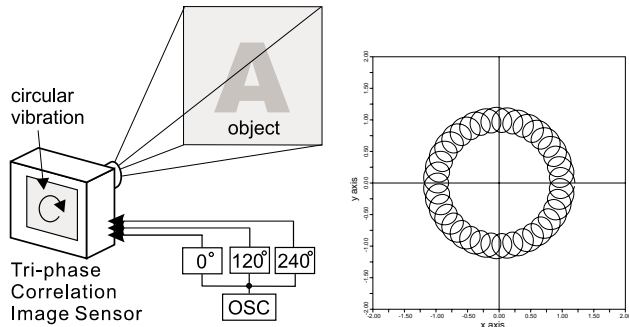
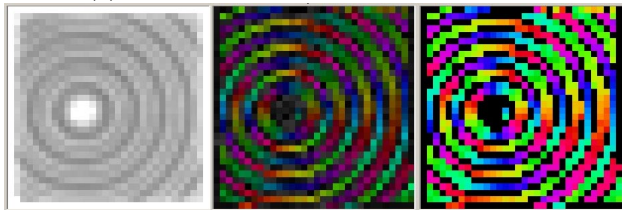


図 6: 固定型微小型ビジョンシステム。センサやレンズ系の振動によって被写体の画像特徴を実時間で抽出する。



(a) 文字パターンの勾配の強さと方向の抽出

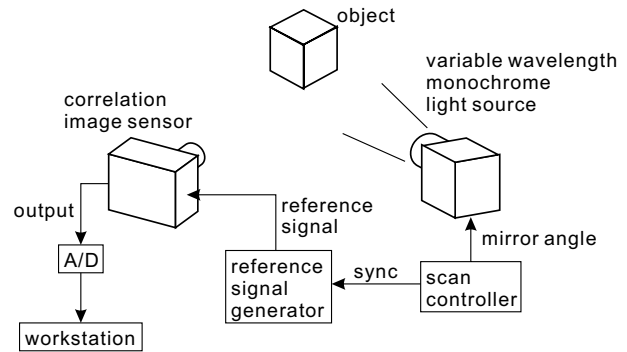


(b) 同心円パターンの稜線の強さと方向の抽出

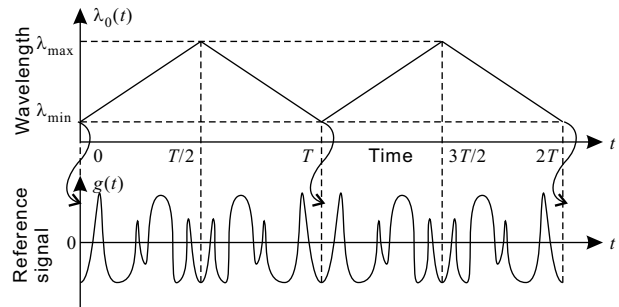
図 7: 勾配ベクトルによるエッジの抽出と倍周波数検波による線素の抽出例。画像の強度と色相は、それぞれエッジや線素の強度と方向を表す。

## 4.2 スペクトルマッチングイメージャ

スペクトルマッチングイメージャの目的は、任意の分光反射率の関数形を指定して、その分光反射率を有する対象のみを明るく写すことにある。特定の対象や物質の探索、真贋判定、表面の傷や汚染の検出等の応用が考えられる。図 8 にその原理を模式的に示す [24, 27, 32, 37]。対象に波長を高速に時間スweepした単色光を照射すると、対象で反射してイメージセンサに捉えられる光の強度は、対象の分光反射率に応じて高速に時間変化する。時間相関イメージセンサの参照信号としてこれと同一の波形を与えると、画素上で両者の積が取られて積分されることにより、対象の分光反射率関数と参照信号として与えた関数との相互相関が読み出されることになる。詳細は別途資料 [37] で示す。



(a) ブロック図



(b) 標的スペクトル分布と参照信号波形

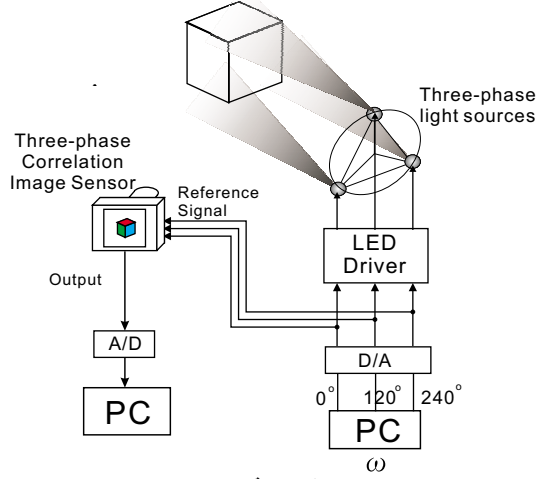
図 8: スペクトルマッチングイメージャのブロック図と参照信号波形。対象に線スペクトル光をスweepした光を照射し、それに同期して標的スペクトル分布の波形を時間相関イメージセンサに供給することにより、実時間で画素上に対象物体のスペクトルと標的スペクトルとの相互相関値を生成する。

## 4.3 実時間法線ベクトルイメージャ

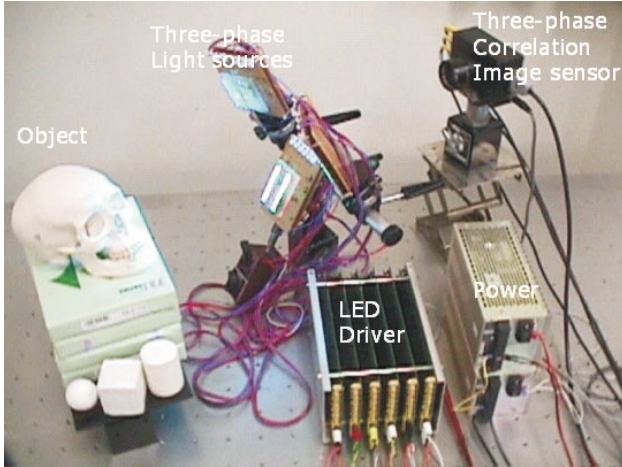
実時間法線ベクトルイメージャの目的は、対象物体の表面の三次元的な向きの分布を動画として捉えることにある。法線ベクトルは三次元形状（奥行き分布）の空間微分に相当するため、表面の詳細な凹凸情報をより高い精度で表現する。また、法線ベクトル分布を空間で積分することによって容易に立体情報を得ることもできる。図 9 にその原理を模式的に示す [35, 38, 41, 51, 54]。対象表面の前方の正三角形の頂点から強度が高速に時間変化する光を照射する。それぞれの時間変化の位相は 120 度づつずれている。対象表面での拡散反射成分は、面の法線が光源方位となす角のコサインに比例した強さをもつため、面の法線方向の天頂角が明暗振動の振幅に、方位が明暗振動の位相に符号化され、これが時間相関イメージセンサで実時間復調される。詳細は別途資料 [38] で示す。

## 4.4 ヘテロダインモアレ三次元計測法

ヘテロダインモアレ三次元計測法の目的は、対象表面の奥行き分布を実時間で精密に動画として測定するこ



(a) ブロック図



(b) 映像系の全体写真

図 9: 三相三極照明を用いる実時間表面法線ベクトルイメージャ。

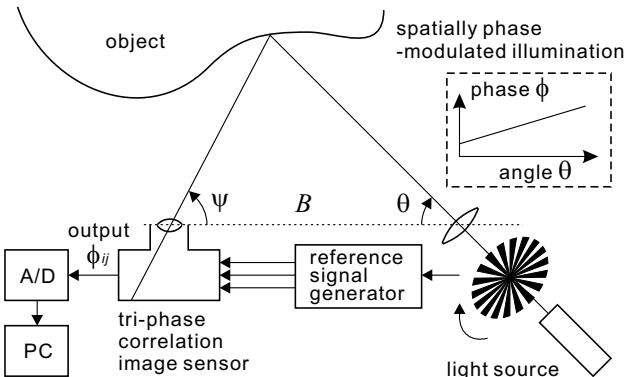


図 10: 並進移動格子投影を用いる実時間ヘテロダインモアレ三次元イメージャ。

とにある。レーザなどの目に傷害を与える光源を用いない特徴ももつ。図 10 にその原理のブロック図を、図 11 に画像化の例を示す。対象表面に高速に平行移動する縞

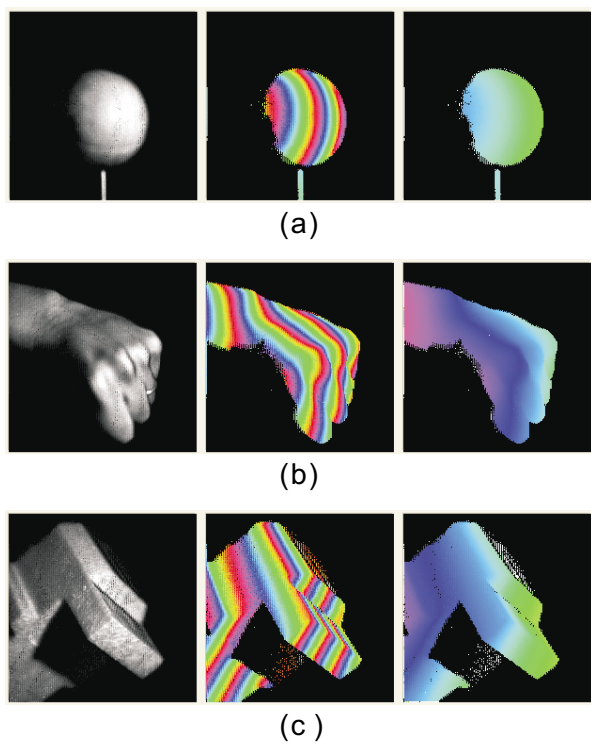


図 11: 実時間三次元計測結果の例。センサの直接の出力である強度画像（左）と位相画像（中央）から、実時間の時空間位相巻き戻しアルゴリズムにより立体を再構成する（右）。

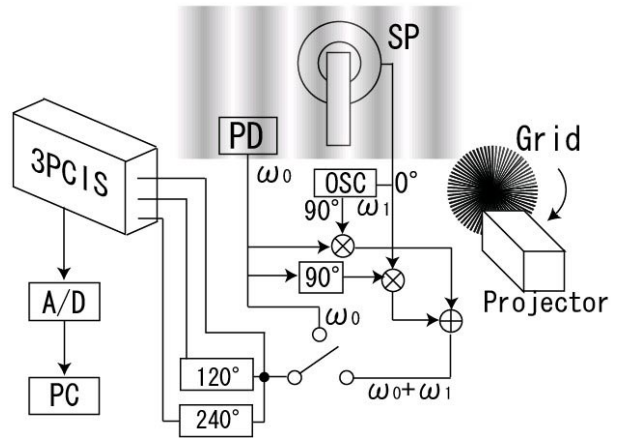


図 12: 並進移動格子投影を用いる実時間振動振幅位相分布イメージャ。

模様を投影する。これにより光の投影角が変化する明暗の位相に符号化されたことになる。対象の各点から反射した光を時間相関イメージセンサで検出し、対象表面の角度とその点での光の明暗変化の位相から入射角を求め、三次元測定の原理に従って奥行きを形成する [26, 53, 55]。実時間での位相アンラッピング処理にも特色をもつ。



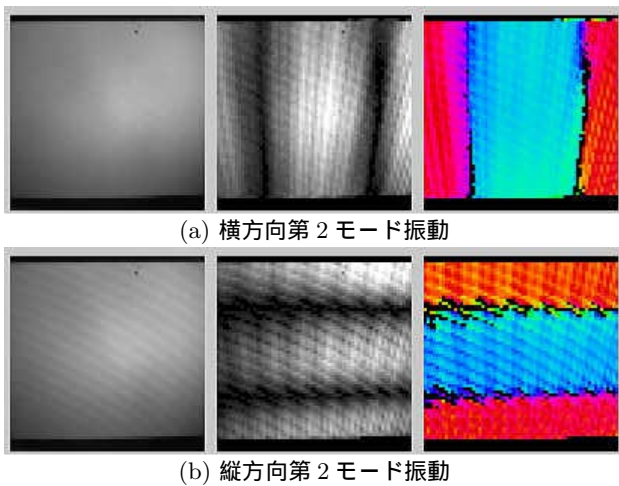


図 13: 実時間振動振幅位相分布イメージによる観察結果の例。平板の第 2 横モード振動の振幅位相分布と第 2 縦モード振動の振幅位相分布がとらえられている。左は強度画像, 中央は振幅分布, 右は位相分布を色相で表したもの。

#### 4.5 振動振幅位相分布映像法

振動振幅位相分布映像法の目的は, 既知の周波数の正弦波で機械的に励振された物体の表面振動の振幅と位相の分布を実時間で動画として観察することにある。機械的構造体や建造物などの振動解析やモード解析に幅広い応用をもつ。図 12 にその原理をブロック図で, 図 13 に実験結果の一例を示す [49, 50, 52]。対象表面に前述のヘテロダインモアレ三次元計測における同様の高速平行移動縞模様を投影する。対象の各点から反射してた光の明暗変化には, 機械的振動の周波数と平行移動縞模様の周波数との干渉成分が含まれる。これを上記の差の周波数を参照信号とする時間相関イメージセンサで検出し, 振動分布の振幅と位相の分布を形成する詳細は別途資料 [52] で示す。

#### 参考文献

[1] 安藤, 中村, 坂口, “超高速時間相関検出型イメージセンサ” 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会資料, SSA-96-13, pp.429-434, 1996.

[2] S. Ando, “Intelligent Sensor Systems: Integrating Advanced Automatism and Optimality into Sensors,” Proc. Transducers’97, Chicago, pp.??-??, 1997.

[3] S. Ando, K. Nakamura, and T. Sakaguchi, “Ultrafast Correlation Image Sensor,” Proc. IEEE Workshop on CCD and AIS, Bruges (Belgium), pp.??-??, 1997.

[4] S. Ando, K. Nakamura, and T. Sakaguchi, “Ultrafast Correlation Image Sensor,” Proc. Transducers’97, Chicago, pp.307-310, 1997.

[5] T. Sakaguchi, T. Nakamura, and S. Ando, “Ultrafast correlation image sensor: fabrication and experiments

with  $8 \times 8$  pixels model,” Tech. Digest of 15th Sensor Symposium, pp.111-114, Kawasaki, Japan, 1997.

[6] 来海 暁, 安藤 繁, “固視微動を利用したセンサレベルの画像特徴抽出,” 電気学会 E 部門総合研究会資料, SSA-43, pp.??-48, 1997.

[7] 安藤 繁, “時間相関型イメージセンサの開発とその応用,” 電子情報通信学会技術研究報告, EID97-50, pp.19-24, 1997.

[8] A. Kimachi, R. Imaizumi, and S. Ando, “Intelligent Image Sensor with a Vibrating Mirror Mimicking Involuntary Eye Movement,” Proc. 16th Sensor Symposium, pp.171-176, Kawasaki, 1998.

[9] Shigeru Ando, “Correlation sensors: Study on tight coupling architecture of detectors and demodulators,” Proc. Transducers ’99, Sendai, Japan, 1999.

[10] A. Kimachi and S. Ando, “Time-domain correlation image sensor: first CMOS realization and evaluation,” Proc. Transducers ’99, pp.958-961, Sendai, Japan, 1999.

[11] S. Ando and A. Kimachi, “Time-Domain Correlation Image Sensor: First CMOS Realization of Demodulator Pixels Array,” Proc. ’99 IEEE CCD/AIS Workshop, pp.33-36, Karuizawa, 1999.

[12] A. Kimachi and S. Ando, “Time-domain correlation image sensor: principle and fabrication of optoelectronic demodulator array,” Proc. Int. Conf. Solid-State Devices and Materials, pp.108-109, Tokyo, Japan, 1999.

[13] 安藤 繁, “画像の新しい特徴抽出システムとアルゴリズム,” 電子情報通信学会技術研究報告, MI99-19, pp.31-37, 1999.

[14] 柴田 潤, 来海 暁, 本谷秀堅, 安藤 繁, “固視微動型イメージセンサを用いた画像の局所的 Log-Polar 解析,” 電気学会 E 部門センサシステム応用研究会資料, SSA-00-3, pp.13-18, 2000.

[15] 栗原 徹, 高本将男, 来海 暁, 安藤 繁, “時間相関型イメージセンサを用いた立体計測システム,” 電気学会 E 部門センサシステム応用研究会資料, SSA-00-4, pp.19-24, 2000.

[16] 山本, 石川, 来海, 安藤, “時間相関イメージセンサを用いる振動パターン計測 (第 1 報),” 第 38 回 SICE 学術講演会予稿集, pp.15-16, 盛岡, 1999.

[17] A. Kimachi and S. Ando, “Time-domain correlation image sensor: CMOS design and integration of demodulator pixels,” Optoelectronic Integrated Circuits IV, Proc. SPIE, vol.3950, pp.220-227, San Jose, CA, 2000.

[18] A. Kimachi, T. Kurihara, M. Takamoto and S. Ando, “A novel range finding system using correlation image sensor,” Tech. Digest 17th Sensor Symp, pp.125-130, Kawasaki, Japan, 2000.

[19] 来海, 栗原, 高本, 安藤, “時間相関型イメージセンサを用いた実時間三次元計測システム,” 第 6 回画像センシングシンポジウム, pp.309-314, 横浜, 2000.

[20] 栗原, 高本, 来海, 安藤, “時間相関型イメージセンサを用いた立体計測システム,” 第 39 回 SICE 学術講演会予稿集, 飯塚, 2000.

[21] 本谷秀堅, 柴田 潤, 来海 暁, 安藤 繁, “画像の局所 Log-Polar 対称性に基づく固視微動型センサによる特徴抽出,” 第 17 回センシングフォーラム資料, pp.61-66, 2000.

- [22] 来海 暁, 安藤 繁, “時間相関型イメージセンサの開発と応用” 画像ラボ, vol.11, no.8, pp.11-17, 2000.
- [23] A. Kimachi, T. Kurihara, M. Takamoto, and S. Ando, “A novel range finding system using correlation image sensor,” Trans. IEEJ, vol.121-E, no.7, pp.367-375, 2001.
- [24] A. Kimachi, T. Imaizumi, A. Kato, and S. Ando, “Spectral Matching Imager Using Correlation Image Sensor,” Tech. Digest 18th Sensor Symp, pp.117-122, Kawasaki, Japan, 2001.
- [25] 本谷秀堅, 高橋洋之介, 新重太一, 中川宗栄, 古閑敏夫, 安藤 繁, “画像タグセンシングシステムとその応用,” 第 18 回センシングフォーラム資料, pp.25-30, 2001.
- [26] 五嶋 健治, 山本 仁, 鈴木 守, 小野順貴, 安藤 繁, “空間位相変調光源を用いた実時間レンジファインダ,” 電気学会 E 部門総合研究会資料, MSS-01-18, pp.5-10, 2001.
- [27] A. Kimachi, T. Imaizumi, A. Kato, and S. Ando, “Spectral Matching Imager Using Correlation Image Sensor,” Optoelectronic Integrated Circuits IV, Proc. SPIE, vol.vol.4669, pp.72-81, San Jose, 2002.
- [28] 安藤 繁, 来海 暁, “三相時間相関イメージセンサとその振幅位相復調方式,” 電気学会全国大会講演論文集, pp.215-215, 2002.
- [29] 安藤 繁, 小野順貴, 来海 暁, “三相ロックインカメラと振幅位相復調イメージング法,” 2002 年春期応用物理学関係連合講演会予稿集, 27p-E-12, pp.959-959, 2002.
- [30] S. Ando, N. Ono, and A. Kimachi, “Involuntary Eye-Movement Vision Using Three-Phase Correlation Image Sensor,” Proc. 19th Sensor Symp, pp.83-86, Kyoto, 2002.
- [31] K. Goto, N. Ono, and S. Ando, “Real-time single frame range finder using spatially phase-modulated light,” Proc. 19th Sensor Symp, pp.87-90, Kyoto, 2002.
- [32] A. Kimachi, Y. Ishikawa, K. Umehara, Y. Kitajima, N. Sugita and A. Fukui, “Spectral matching imager using AM-coded multispectral illumination,” Proc. 19th Sensor Symp, pp.91-96, Kyoto, 2002.
- [33] S. Ando, N. Ono, and A. Kimachi, “Development of Three-Phase Lock-in Camera for AM-PM Demodulation Imaging,” Proc. '02 SICE Annual Conference, pp.1393-1396, Osaka, 2002.
- [34] K. Goto, N. Ono, and S. Ando, “Real-Time Single Frame Range Finder using Spatially Phase-Modulated Light,” Proc. '02 SICE Annual Conference, pp.165-168, Osaka, 2002.
- [35] 栗原 徹, 大平真弓, 清水崇聡, 小野順貴, 安藤 繁, “実時間法線ベクトルイメージャとその個人認証への適用,” 第 19 回センシングフォーラム資料, 2002. (計測部門奨励賞受賞)
- [36] 本谷秀堅, 柴田 潤, 来海 暁, 安藤 繁, “局所 Log-Polar 対称性に基づく固視微動画像特徴抽出,” 情報処理学会論文誌, vol.43, no.7, pp.2309-2318, Jul. 2002.
- [37] A. Kimachi, T. Imaizumi, A. Kato, and S. Ando, “Spectral Matching Imager Using Correlation Image Sensor,” Trans. IEEJ, vol.122-E, no.4, pp.200-206, 2002.
- [38] T. Kurihara, N. Ono, and S. Ando, “Surface orientation imager using three-phase amplitude-modulated illumination and correlation image sensor,” Proc. SPIE, vol.5013, pp.95-102, San Jose, CA, 2003.
- [39] 安藤 繁, 小野順貴, 来海 暁, “三相時間相関カメラの開発および振幅位相復調イメージングへの応用,” 2003 年春期応用物理学関係連合講演会予稿集, 27p-YS-8, pp.1067-1067, 2003.
- [40] 栗原 徹, 清水 崇聡, 小野 順貴, 安藤 繁, “三相相関イメージセンサを用いた実時間法線ベクトルイメージャ,” 電気学会全国大会講演論文集, vol.3, pp.191-192, 2003.
- [41] 栗原 徹, 大平 真弓, 清水 崇聡, 小野 順貴, 安藤 繁, “時間相関型イメージセンサを用いた実時間法線ベクトルイメージャ,” 第 45 回自動制御連合講演会, pp. 525-528, 2002.
- [42] 栗原, 清水, 小野, 安藤, “三相相関イメージセンサを用いた実時間法線ベクトルイメージャ,” 2003 年春期応用物理学関係連合講演会予稿集, 27p-YS-9, 2003.(奨励賞受賞)
- [43] S. Ando, “Surface magnetic flux imager using CMOS three-phase lock-in camera,” Proc. 12th Int. Conf. Solid State Sensors and Actuators (Transducers'03), pp.308-311, Boston, 2003.
- [44] S. Ando and A. Kimachi, “Correlation image sensor: Two-dimensional matched detection of amplitude modulated light,” IEEE Trans. Electron Devices, vol.50, no.10, pp.2059-2066, 2003.
- [45] T. Kurihara, T. Shimizu, H. Itai, S. Zhan, N. Ono, and S. Ando, “A facial authentication system using real-time surface orientation imager,” Proc. SICE Annual Conference, pp.2755-2758, Fukui, 2003.
- [46] T. Shimizu, T. Kurihara, N. Ono, and S. Ando, “Ellipsometric imager using correlation image sensor and rotating polarizers,” Proc. SICE Annual Conference, pp.2659-2662, Fukui, 2003.
- [47] 小野, 安藤, “円境界に対する Green の定理の拡張: 円走査による高階空間微分計測の定理,” 日本応用数学会年会, pp.58-59, 京都, 2003.
- [48] 栗原, 清水, 板井, Zhan, 小野, 安藤, “法線ベクトルを用いる顔貌認証に関する基礎的検討,” 計測自動制御学会パターン計測部会研究会, 2003.
- [49] 栗原, 永井, 清水, 小野, 安藤, “時間相関イメージセンサを用いたヘテロダイン振動分布計測,” 電気学会 E 部門総合研究会, 八王子, pp.9-12, 2003.
- [50] T. Kurihara, and S. Ando, “Real-time 2-D phase-sensitive vibrometer using heterodyne moire and correlation image sensor,” Proc. 2004 ICO International Conference (ICO'04), pp.617-618, 2004.
- [51] T. Kurihara, and S. Ando, “A facial Authentication system using complex-valued eigenfaces,” Proc. SICE Annual Conference, pp.2584-2587, Sapporo, 2004.
- [52] Nagai, T. Kurihara, T. Shimizu, N. Ono, and S. Ando, “Real-time vibrometric imager using correlation image sensor,” Proc. SICE Annual Conference, pp.2070-2073, Sapporo, 2004.
- [53] N. Ono, T. Shimizu, T. Kurihara, and S. Ando, “Real-time 3-D imager based on spatio-temporal phase unwrapping,” Proc. SICE Annual Conference, pp.2544-2547, Sapporo, 2004.
- [54] S. Zhan, T. Kurihara, N. Ono, and S. Ando, “Pose Free Facial Authentication Based on Simultaneous Intensity/Depth Imaging,” Proc. 7th IASTED International Conference CGIM 2004, pp.339-343, Hawaii, 2004.
- [55] N. Ono, T. Shimizu, T. Kurihara, and S. Ando, “Real-time 3D Imager Based Using Spatio-Temporal Phase Unwrapping,” Technical Digest of the 21st Sensor Symposium, pp.437-440, Kyoto, 2004.