

論文の内容の要旨

論文題目 時間相関型イメージセンサを用いた
実時間パターン計測

氏 名 栗 原 徹

1 本論文の目的

本論文の目的は、イメージングデバイスにおいてこれまであまり活用されてこなかった時間軸に注目し開発された時間相関型イメージセンサを用いた新しい実時間パターン計測法を提案することである。時間相関型イメージセンサの特長は、情報の時間軸方向への展開であり、能動計測によりさまざまな情報を光強度の時間軸に展開し、リアルタイムに2次元パターンとして計測することができる点である。ここで、光計測の際の能動性として、光強度の時空間パターン、光源の配置、センサの位置・姿勢、光源強度、照明の偏光状態、照明のスペクトルなどがあげられる。本論文では、上にあげた能動性をうまく利用することにより、取得したい情報を時間軸方向に展開し、時間相関型イメージセンサで復調することで、計測したい情報の2次元分布をリアルタイムに取得する手法について述べる。

2 本論文の構成

本論文は序論、結論と下記5章の7章構成となっている。

第I部—時間相関型イメージセンサを用いた立体計測と顔勾配情報を用いた認証アルゴリズムの開発

- 1) 実時間法線ベクトルイメージャ
- 2) 実時間法線ベクトルイメージャの非ランバート面への拡張
- 3) 顔勾配情報を用いた個人認証のためのアルゴリズムの開発

第II部—時間相関型イメージセンサを用いたヘテロダインプターン計測法

- 4) ヘロテダイク検出による実時間エリプソメトリックイメージャ
- 5) 実時間振動分布計測法

3 本論文の結果

3.1 時間相関型イメージセンサを用いた立体計測と顔勾配情報を用いた認証アルゴリズムの開発

本論文第I部の目的は、立体計測とその応用として顔認証である。

1) 実時間法線ベクトルイメージャ

本章では、三次元計測の一手法として、対象の形状の微分である勾配を計測する方法について、時間相関型イメージセンサに適した形で勾配を計測する方法を提案する。

具体的には、3つの照明を正三角形をなすように配置し、それぞれを位相が120度ずつ異なるある周波数 ω で強度変調する。この時、対象の表面をランバート面であると仮定すると、

$$I_{i,j}(t) = 3AR_{i,j} \cos \Theta_{i,j} \cos \psi + \frac{3mAR_{i,j}}{2} \sin \Theta_{i,j} \sin \psi \cos(\omega t + \Phi_{i,j}) \quad (1)$$

というように、反射する光強度の振幅/位相に面の方向が符号化される。ここで、 Θ は法線の天頂角、 Φ は法線の方位角、 R は反射率、 A は光源強度であり、 ψ は光源配置のパラメタ、 m は変調率である。

これを時間相関型イメージセンサで復調することにより、実時間で対象の面の向きを復元することが可能となる。

時間相関を用いることから、外乱光による影響を受けにくいという特徴を持つため、実環境での使用が十分可能である。

本章ではさらに、計測された勾配分布から、対象の形状 $h(x,y)$ を復元するために、

$$J = \int \int \left[\left| \frac{\partial h}{\partial x} - h_x(x,y) \right|^2 + \left| \frac{\partial h}{\partial y} - h_y(x,y) \right|^2 \right] dx dy \rightarrow \text{minimum}. \quad (2)$$

という評価関数を最小化することにより関数 $h(x,y)$ を求めた。ここで $h_x(x,y)$ 、 $h_y(x,y)$ は計測された勾配である。

2) 実時間法線ベクトルイメージャの非ランバート面への拡張

前章の法線ベクトルイメージャは、ランバートな面に限っていたため、ランバート面だけでなく、広く一般の対象へも本手法を適用できるように鏡面反射および影を取り扱えるように拡張を行った。

具体的には、4重極照明と呼ぶ光源の変調方式により対象を照明することで非ランバート成分を検出する。4重極照明とは、円周上の各光源の位相が、1周で 4π 回る光源のことであり、前章の1周で 2π 位相が回転する変調光源を2重極照明と呼ぶ。

6つの光源を用いたときの4重極照明による反射光強度は、

$$I_{i,j}(t) = 6r_L^{(i,j)} \cos \psi \cos \Theta_{i,j} + S(\mathbf{l}_{k_0}, \mathbf{n}_{i,j}, \mathbf{z}_{i,j}) \left\{ 1 + \cos \left(\omega t + \frac{2\pi k_0}{3} \right) \right\} \quad (3)$$

となる。関数 $S(\mathbf{l}_{k_0}, \mathbf{n}_{i,j}, \mathbf{z}_{i,j})$ は、対象の鏡面反射成分をあらわす関数であり、鏡面成分がなければゼロとなり、反射光強度は時変成分を持たない。時間相関型イメージセンサにより4重極照明で観測された鏡面成分を用いて、2重極照明で撮像された相関画像を補正することで、非ランバート成分を補償できることを示した。

3) 顔勾配情報を用いた認証アルゴリズムの研究

顔を用いた認証は、顔が普段から露出しているため心理的抵抗が低い手法であることが言われているが、顔の向きや照明の方向により、認証精度にばらつきがあることが報告されている。

本章では、以上のような問題意識から、前述した法線ベクトルイメージャにより取得された顔勾配情報を用いて、立体的な情報を用いた顔認証のためのアルゴリズムを提案した。

具体的には、従来強度画像に対して行われてきた固有顔法に対し、各画素において法線ベクトルを xy 平面に射影し複素量として表すことで、複素固有顔法を提案し顔立体情報を用いて認識を行った。さらに、固有顔法より識別力が高いフィッシャー顔に対しても、複素量で顔勾配を表すことで複素フィッシャー顔として拡張を行った。

3.2 時間相関型イメージセンサを用いたヘテロダインプターン計測法

本論文第 II 部の目的は、ヘテロダインにより計測したい情報を 2 つの正弦波のビート周波数に変調する手法の提案である。ヘテロダイン検出により、時間相関型イメージセンサの帯域制限を越えた変調成分に関しても、時間相関型イメージセンサの帯域に落とし込むことが出来るため、時間相関型イメージセンサの応用範囲を格段に広げることができる。また、位相の演算が行われるため、直接、取得したい情報を光強度信号の振幅位相に変調することができる。第 II 部では、このように大きな利点を持つヘテロダイン検出を用いたパターン計測法として、次の 2 つの手法を提案する。

4) ヘテロダイン検出による実時間エリプソメトリックイメージャ

本章では、主に半導体製造や MEMS の分野で利用されているエリプソメトリーを 2 次元かつ実時間化する手法を提案している。エリプソメトリーでは、媒質の入射する面に平行な偏光 (p 偏光) と垂直な偏光 (s 偏光) に対する複素反射率比 ($\frac{r_p}{r_s}$) を計測し厚さを計測する。

われわれはこれに対し、二つの偏光子を異なる周波数で回転させることで、そのビート周波数にエリプソパラメタを符号化する。提案システムは、

- 無偏光また円偏光の単色光源
- 回転偏光子
- 傾き $\pi/4$ の $\lambda/4$ 波長板
- 対象
- 回転偏光子

から構成されている。二つの偏光子の角周波数を ω, Ω とすると、出射光強度 I は、

$$I = \frac{1}{4}K^2(|r_p|^2 + |r_s|^2) + \frac{1}{4}K^2(|r_p|^2 - |r_s|^2) \cos 2\omega t + \frac{1}{4}K^2|r_p||r_s| \cos\{2(\Omega - \omega)t + \angle r_p - \angle r_s\} - \frac{1}{4}K^2|r_p||r_s| \cos\{2(\Omega + \omega)t + \angle r_p - \angle r_s\} \quad (4)$$

となることを示した。これにより、時間相関型イメージセンサにビート周波数を入力し撮像することにより、エリプソパラメタを取得する。

5) 実時間振動分布計測法

本章では、振動の振幅/位相の 2 次元分布を計測する手法を提案した。従来、振動計測は、ドップラー効果やホログラフィーを用いるものがある。ドップラー計測は、点計測であり 2 次元振動計測をする場合には走査が必要である。ホログラフィー法では、時間平均法が一般的に使われる。時間平均法では、干渉縞の CCD

等の電荷蓄積時間の平均強度を取得することで振幅を計測している。一方で、振動の位相の取得を目指したものとして、位相変調法がある。この手法では、干渉光学系の参照面を振動に同期して移動することで、振動の位相差を干渉縞の強度分布に置き換えている。しかし、いずれの手法も撮像素子が本質的に1自由度しか取得できないため、振幅・位相の同時2次元計測にはいたっていない。

それに対し、時間相関型イメージセンサを用いることで振幅/位相の同時計測が可能となる。本研究では、このデバイスの特長を生かし、1) 並進する縞を投影することによる光強度の変調周波数と対象の振動周波数の和周波数、差周波数への対象の振動情報の振幅・位相変調 2) 三相時間相関イメージセンサによる振動の復調、により、対象の振動の振幅、位相分布を実時間で2次的に計測するシステムを提案する。

並進する縞模様を斜めに投影したとき、対象からの反射光強度は、次のように書かれる。

$$\begin{aligned}
 I(x, t) &= I_0 + I_0 \cos \left\{ \omega_0 t + 2\pi \frac{\cos \theta}{D} \left(x - \tan \theta (z_0 + \delta z \cos(\omega_1 t + \phi_1)) \right) \right\} \\
 &\simeq I_0 + I_0 \cos(\omega_0 t + \psi_0(x)) \\
 &\quad + I_0 \frac{2\pi \delta_z(x) \sin \theta}{D} \left[\sin \left\{ (\omega_0 + \omega_1)t + \psi_0(x) + \phi_1(x) \right\} + \sin \left\{ (\omega_0 - \omega_1)t + \psi_0(x) - \phi_1(x) \right\} \right]
 \end{aligned} \tag{5}$$

これにより、対象の振動振幅・位相 $\delta_z(x), \phi_1(x)$ は、和周波数と差周波数の振幅・位相に現れていることが分かる。ここで、 D は投影する縞間隔、 θ は縞の投射角、 $\phi_0(x)$ は縞間隔および投影角と対象の形状によって定まる空間に固定の位相を表している。

これにより、振動周波数と縞による光強度変調のビート周波数を参照信号として振動する対象を撮像することで、振動振幅/位相を同時に計測することができる。