

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24300070

研究課題名(和文) 運動知覚と立体知覚と特徴知覚を統合する生物着想型視覚システム

研究課題名(英文) Bio-inspired vision system with unified detecting schemes of motion, 3-D, and image features

研究代表者

安藤 繁 (Ando, Shigeru)

東京大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：70134468

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、生物着想型のセンシング原理とデバイス・アルゴリズムに基づき、統合的知覚機能を有する視覚システムの実現を目指したものであり、以下の成果が得られた。1) 固視微動に関して、ベクトル解析、複素微分、偏微分方程式による定式化を与えた。2) 1次と2次の複素微分に基づく画像特徴抽出アルゴリズムを確立し、実時間システムに実装した。3) 位相スタンプ撮像に基づく厳密オプティカルフロー推定法を確立し、実時間システムを実現した。4) 固視微動撮像に基づく超解像法の原理を確立し、実時間システムを実現した。5) ステレオ撮像系を構築し、左右眼で同期した時間変化を両眼対応させるアルゴリズムを開発した。

研究成果の概要(英文)：Aims of this study are the realization of novel vision systems and algorithms with outstanding performance based on the bio-inspired sensing principle and the correlation image sensor. The results obtained are: 1) Mathematical formulations of binocular detecting scheme obtained using the Gauss and Stokes theorem, the complex differentials, and the optical flow PDE. 2) Image feature extraction algorithms using the 1st and 2nd complex differentials were obtained and a realtime image analysis system using them was implemented. 3) Optical flow detection algorithm based on the phase-stamp imaging was established and a realtime image analysis system was developed. 4) Super resolution principle using the vibroocular imaging was established and a realtime imaging system was developed. 5) Binocular stereo vision system was constructed and the correspondence detection algorithm between synchronized change of binocular images was established.

研究分野：計測，センサ，画像処理，信号処理

キーワード：時間相関イメージセンサ 荷重積分法 オプティカルフロー 固視微動 特徴抽出 超解像 ステレオ

1. 研究開始当初の背景

画像中の特徴とは、撮像面上の光強度分布にみられる局所的な構造のことであり、離散的な受光素子により時間標本化された画像データ配列を出力するという従来のイメージセンサに基づく方法は、解析上の制約と精度や解像度の劣化を伴うことになる。これに対して固視微動とは人が視覚により対象を凝視するとき眼球にみられる無意識の微小運動のことであり、申請者はこれに着想を得て、特徴抽出の精度と高速性の両面での解消を目指し固視微動型撮像法を提案してきた。また、振動により空間的な明暗変化を時間波形に置き換え、これを時間軸の相関検出により抽出するためのデバイスとして時間相関イメージセンサを開発してきた。

2. 研究の目的

本研究は、生物着想型のセンシング原理とデバイス・アルゴリズムに基づき、現在のイメージセンサと画像処理アルゴリズムからは発想することも到達することも困難な、高い情報抽出能力と統合的知覚機能を有する視覚システムの実現を目的とするものである。本研究では、時間相関イメージセンサを両眼の対応点決定、オプティカルフロー検出、特徴点検出や注視点検出に利用することで、視覚認識の種々の問題を一挙に解消し、生物の視覚系に真の意味で対応可能となる格段の性能を達成させる。

3. 研究の方法

上記研究目的を達成するため、本研究では、以下の項目に関して並行した研究開発を進める。1) 両眼立体・動眼立体・固視微動・運動知覚を統合する視覚システムハードウェア開発 (24 年度) : 2 台の時間相関イメージセンサとそれらの固視微動駆動系および同期並列動作系を構築し、実際に動的な三次元の固視微動型撮像が可能ないように構成する。2) 両眼立体・動眼立体・固視微動・運動知覚それぞれの間の統合理論の構築 (24, 25 年度) : 相関画像は複素量であり、複素特徴の抽出法および複素量の両眼対応法を構築し、実装する。3) 静止背景と運動対象の時空間統合アルゴリズムの構築 (25, 26 年度) : 動的最適推定 (非線形カルマンフィルタ) の枠組みに従い、統合のアルゴリズムを構築し実装する。

4. 研究成果

3 年間の研究期間において、以下の具体的な成果が得られた。

- 1) 固視微動に関して、Gauss の定理と Stokes の定理、複素微分、一般化オプティカルフロー偏微分方程式による定式化を与えた。
- 2) 1 次と 2 次の複素微分に基づく画像特徴抽出アルゴリズムを確立し、実時間システムに実装した。すなわち、複素正弦波変調撮像による相関画像は、対象あるいは撮像系の運動軌跡に関係した時刻情報と、対象の空間パターンとで決定される複素画像である。ただし、対象が並進移動する場合と、特定の軌跡パタ

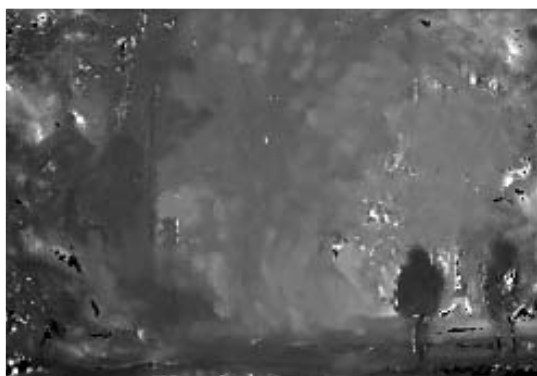
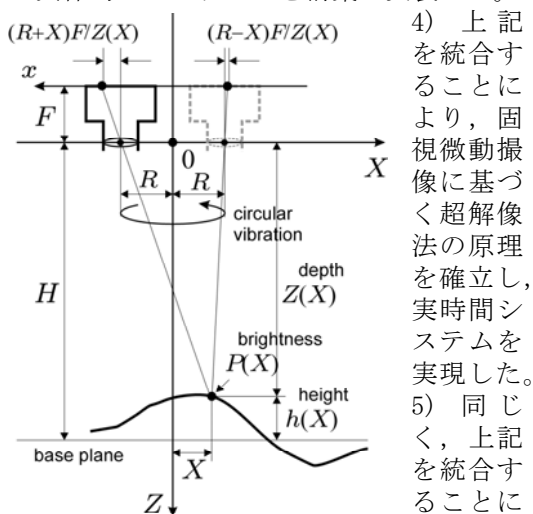
ーンを有する固視微動を与えた場合とでは、その数学的意味は異なる。このための基礎理論と解析アルゴリズムの基本部分を研究開発した。具体的には、単一並進対象から生成される 2 次元速度場のオプティカルフロー偏微分方程式に荷重積分法を適用して荷重積分量 (時間相関イメージセンサ出力) の厳密代数式を構成し、これを静止背景と混合する隠蔽領域の厳密代数式に拡張し、さらに単一円振動走査によって生成される周波数成分を複素微分演算子によって定式化した。この結果、二重円振動走査によって生成される周波数成分を一般化複素高階微分によって拡張され、上記を時間相関イメージセンサ出力の解析アルゴリズムに実装することが可能になった。これらを用い、粗両眼対応の特徴点検出および複素量の位相差を用いる精密両眼対応アルゴリズムが構築された。



図1 移動する車載カメラからのオプティカルフロー検出結果 (左: 強度画像, 右: 速度分布を方向を色相, 大きさを明度でカラー表示したもの)。周囲の固定物からは撮像系の自己運動による三次元情報が、これらと異なる速度場として、接近する自転車のような運動対象が容易に分離される。

- 3) 位相スタンプ撮像に基づく厳密オプティカルフロー推定法を確立し、実時間システムを実現した。すなわち、両眼対応を具体的に実装するためには、高速で信頼度の高い両眼対応アルゴリズムの構築、カメラパラメータの推定アルゴリズムの実装、が必要である。さらに同一時刻での両眼対応が確立した後では、さらにその複素画像を対応点の運動検

出に用いることによって、動眼立体視による時間軸方向の立体情報の生成が可能となる。このため、隠蔽による acretion 領域と deletion 領域の複素相関画像からの速度算出法の導出し、境界線の曲線の複素相関分布からの開口問題を生じないオプティカルフロー算出法の導出し、固視微動下の対象の運動による複素相関画像からの特徴抽出とオプティカルフロー算出の理論とアルゴリズムの構築した。次ぎにオプティカルフローのみの算出に適した固視微動の振動パターンの導出を行い、超解像特徴抽出法とその後段認識系での活用法の導出と基礎的実装などによって、両眼立体、動眼立体、固視微動型特徴抽出、運動知覚、ならびに実際の複雑な情景に適し十分な機能を発揮し得るそれらの具体的アルゴリズムを構築し実装した。



より、時間相関イメージセンサをステレオ撮像系を構築し、左右眼で同期した時間変化を特徴量として対応させるアルゴリズムを開

発した。

6) 以上の研究の中で、円振動眼ステレオ法の厳密アルゴリズムが発明された（左図参照）。円振動眼ステレオ法は、この原理を回転ロンボイドプリズムによる光軸シフトの円振動と時間相関イメージセンサの相関撮像により実現したものである。構造化照明などを必要としない受動ステレオ法であること、対応探索を必要とせず単一フレーム画像の明度分布から直接代数的に距離画像が生成されること、全方向の視差情報が利用され全面で高密度な距離画像が求まること、カメラのキャリブレーションの問題からほぼ無縁となることなど、今後非常に優れた三次元計測方法として発展することが予想される。



図3 円振動眼ステレオによる立体再構成。建物の外壁や窓枠や背景の樹木が1フレームで再構成されている

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 9 件）

- 1) S. Ando, T. Nara, and T. Kurihara, "Spatial filtering velocimetry revisited: Exact short-time detecting schemes from arbitrarily small-size reticles," Measurement Science and Technology, vol.25, no.8, 085001, 2014.
- 2) M. Mizumachi, A. Kaminuma, N. Ono, and S. Ando, "Robust sensing of approaching vehicles relying on acoustic cue," Sensors, vol.14, no.6, pp.9546-9561, 2014
- 3) 安藤 繁ほか, "「鉄と鋼」第100巻記念座談会：計測・制御・システム研究が支える製鉄技術の高度化," ふえらむ（日本鉄鋼協会誌）, vol.19, no.10, 2014.
- 4) S. Ando, T. Nara, and T. Levy, "Partial differential equation-based localization of a monopole source from a circular array," J. Acoust. Soc. Am., vol.134, no.4, pp.2799-2813, 2013.
- 5) 安藤 繁, 栗原 徹, "多重零点光ビームおよび遠隔6軸変位計測への応用", 光学, vol.42, no.12, pp.10-17, 2013.
- 6) 栗原 徹, 小野 順貴, 安藤 繁, "3点三相振幅変調照明と時間相関カメラによるシ

ングルフレーム法線ベクトルイメージャ,”
計測自動制御学会論文集, vol. 48, no. 8,
pp. 505-513, 2012.
7) 持田康弘, 安藤 繁, “モアレドップラー
効果: 単一フレーム奥行き方向速度分布計測
への適用,” 計測自動制御学会論文集, vol. 48,
no. 5, pp. 265-272, 2012.
8) 安藤 繁, “荷重積分法: オプティカルフ
ロー検出から周波数推定へ,” 計測と制御,
vol. 51, no. 9, pp. 10-17, 2012
9) 安藤 繁, “オプティカルフローの厳密高
解像度検出が可能に,” 0 plus E, vol. 34,
no. 1, 2012. (以上 9 件すべて査読付き)

[学会発表] (計 60 件)

1) **S. Ando**, "Generalized optical flow
equation and weighted integral method
with application to
magneto-optical leakage flux inspection,"
Proc. SICE Annual Conference, Sapporo,
pp.369-370, 2014.
2) Y. Higuchi, T. Nara, and **S. Ando**, "Direct
localization of a magnetic dipole based on a
gradient-form partial differential
equation," Proc. SICE Annual Conference,
Sapporo, pp.379-382, 2014.
3) J. Wada, T. Kurihara, and **S. Ando**, "3-D
profilometry of a specular object with
patterned illumination and correlation
imaging: Introduction of new calibration
method," Proc. SICE Annual Conference,
Sapporo, pp.1928-1931, 2014.
4) T. Tanaka, T. Nara, and **S. Ando**,
"Localization of multiple wave sources
using the ``middle-field approximation",
Proc. SICE Annual Conference, Sapporo,
pp.803-806, 2014.
5) T. Kurihara and **S. Ando**, "Stabilized
video using correlation image sensor," Proc.
2013 SICE Annual Conf., pp.1812-1815,
Nagoya, 2013.
6) T. Levy and **S. Ando**, "Applying direct
algebraic sound source local-ization
method for time-domain reflectometry of
conference room," 164th Meeting of ASA,
Kansas City, USA, 2012.
7) T. Levy and **S. Ando**, "Instantaneous
tracking of a monopole sound source using
algebraic localization method and circular
array," Acoustics Hong Kong 2012, Hong
Kong, China, 2012.
8) S. Ando, "Weighted integral method
using finite Laplace transform: Direct
estimation of damped sinusoidal
parameters from transient waveform,"
Proc. SICE Annual Conference, Akita,
2012.
9) N. Fujimori and **S. Ando**,
"Super-resolution reconstruction algorithm
using vibro-imaging and correlation image

sensor," Proc. SICE Annual Conference,
pp.2028-2033, 2012.
10) **S. Ando** and T. Kurihara, "Vibro-visual
image feature extraction with correlation
image sensor: Circular and doubly circular
vibration for arbitrary complex
differentials," Proc. Int. Conf. Computer
Vision Theory and Applications (VISAPP
2011), Rome, 2011.
11) T. Kurihara, T. Maeda, and **S. Ando**,
"Normal vector vibration imaging using a
correlation image sensor." Proc. SICE
Annual Conference, pp.2189-2192, Akita,
2012.
12) Y. Yada, T. Kurihara, and **S. Ando**,
"Lateral and rotational displacement
measurement using dual mode reflector
and multizeros optical beam" Proc. SICE
Annual Conference, pp.1934-1938, Akita,
2012.
13) T. Kurihara, Y. Yada, **S. Ando**, Q. Yulan,
E. Sano, and H. Nakajima, "Use of
retroreflector and multi-zeros optical beam
for remote monitoring of lateral
deformation" Proc. 9th Int. Conf.
Networked Sensing Systems (INSS2012),
Antwerp, Belgium, 2012.
14) 安藤, ``時間相関イメージング: デバイス
開発および各種の応用展開の現状," 日本色
彩学会視覚情報基礎第 18 回研究会, 中央大
学, pp.3-8, 2013.
15) 安藤, ``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," 画像
逆問題の数理解析研究会, 核融合科学研究所,
2013.
16) 安藤, ``時間相関イメージング: デバイ
ス・解析アルゴリズム・各種応用," 国立天文
台談話会, 三鷹, 2012.
17) 安藤, "円振動眼ステレオ法: 一般化オブ
ティカルフローに基づく距離画像計測," 信
学技法, CVIM 研究会, 早稲田大学, 2014.
18) 安藤, "円振動眼ステレオ法: 対応探索に
よらない距離画像計測の原理," OPJ2014, 東
京, 2014.
19) 安藤, 稲垣, "円振動眼ステレオ: 距離画像
計測のための直接代数法とその実装" 第 31
回センシングフォーラム, pp.57-62, 佐賀,
2014.
19) 樋口, 奈良, 安藤, "円周磁気センサアレ
イを用いた磁気双極子の直接定位" 第 31 回
センシングフォーラム, pp.122-125, 佐賀,
2014.
20) 田中, 安藤, "到来波の振幅減衰と波面湾
曲に基づく複数波源定位の直接代数法," 第
31 回センシングフォーラム, pp.330-333, 佐
賀, 2014.
21) 奈良, 安藤, "鏡像センシング: 磁性体
を用いた双極子推定," 第 31 回センシングフ
ォーラム, pp.289-293, 佐賀, 2014.
22) 竹田, 成田, 奈良, 安藤, "磁性体存在下

- での磁場零点に着目したビーコン探索," 第 31 回センシングフォーラム, pp.283-288, 佐賀, 2014.
- 23) 早川, 安藤, "円周アレイ音源定位を活用した複数の調波構造音の分離統合と定位," 第 31 回センシングフォーラム, pp.334-339, 佐賀, 2014.
- 24) 栗原, 安藤, 吉村, "空間位相変調照明と時間相関カメラを用いた対象表面の位相特徴量に基づく微細欠陥検出," 第 31 回センシングフォーラム, pp.35-40, 佐賀, 2014.
- 25) 伊藤, 樋口, 奈良, 安藤, "直線状磁気センサアレイを用いたスマートフォンの直接定位," 第 31 回センシングフォーラム, pp.126-129, 佐賀, 2014.
- 26) 安藤, 奈良, "次元場の観測可能量「固視微動微分」と複素微分の漸化関係式," 応用数理学会年会, 東京, 2014.
- 27) 樋口, 奈良, 安藤, "磁場源位置拘束偏微分方程式の新たな導出と定位への利用," 応用数理学会年会, 東京, 2014.
- 28) 奈良, 衣笠, 安藤, "荷重積分による磁場多重極フィルタ," 応用数理学会年会, 東京, 2014.
- 29) 安藤, 稲垣, "一般化オプティカルフロー偏微分方程式とその短時間厳密パラメータ推定," 信学技法, 信号処理研究会, SIP2014-79, 大阪, 2014.
- 30) 安藤, "一般化オプティカルフロー偏微分方程式と時変速度場推定," 計測自動制御学会パターン計測部会研究会, 東京, 2014.
- 31) 稲垣, 安藤, "円周アレイカメラからの三次元形状再構成," 計測自動制御学会パターン計測部会研究会, 東京, 2014.
- 32) 早川, 安藤, "複数音源定位における適応的な時間周波数分解に関する研究," 応用音響研究会, 三重大学, 2014.
- 33) 陸 愷, 安藤 繁, "車載時間相関カメラを用いた自己運動と三次元環境の推定 ~自己姿勢基準としての道路領域抽出," 第 18 回パターン計測シンポジウム, 上諏訪, 2013.
- 34) 田中, レビ, 安藤, "直線型マイクロホンアレイによる中距離複数音源定位の直接代数法と実験," 日本音響学会秋季発表会, 名古屋, 2013.
- 35) 和田, 栗原, 安藤, "パターン照明を用いた相関画像による物体表面の欠陥検査(鏡面反射物体の 3 次元形状計測)," 第 30 回センシングフォーラム, pp.61-66, 2013.
- 36) 田中, レビ, 安藤, "1 次元アレイによる複数波源定位の直接代数法とその実験," 第 30 回センシングフォーラム, pp.114-118, 2013.
- 37) 樋口, 奈良, 安藤, "荷重積分法による複数磁気双極子の直接位置推定," 第 30 回センシングフォーラム, pp.216-221, 2013.
- 38) 栗原, 安藤, "TV 正則化を用いた複素正弦波変調撮像に基づくオプティカルフロー推定," 第 30 回センシングフォーラム, pp.161-165, 2013.
- 39) 安藤, 栗原, "垂直サンプリングと荷重積分法に基づく視覚の運動検出モデル," 第 30 回センシングフォーラム, pp.156-160, 2013.
- 40) 奈良, 安藤, "パチニ小体のモード変換モデル," 第 30 回センシングフォーラム, pp.292-295, 2013.
- 41) 藤森, 安藤, "固視微動撮像系と反復投影を用いた超解像," 電気学会全国大会, 2013.
- 42) 安藤, 花岡, 桜井, "時間相関イメージセンサによる太陽磁場の偏光観測の原理と実験," 日本天文学会秋期年会, 2012.
- 43) 安藤, 花岡, 桜井, "太陽磁場の偏光計測への時間相関イメージセンサの適用," 電気学会計測研究会, 2013.
- 44) T. Levy and S. Ando, "Time-domain reflectometry of conference room by a direct algebraic sound source localization method using a circular array," 日本音響学会秋期研究発表会, 長野, 2012.
- 45) T. Levy and S. Ando, "Short time sound source localization theory in spatio-temporal cross-correlation domain," 第 29 回センシングフォーラム, 茨城, 2012.
- 46) 藤森, 安藤, "固視微動撮像系と時間相関イメージセンサを用いた超解像理論と実験," 第 29 回センシングフォーラム, pp.99-104, 2012.
- 47) ヤンスンハ, 安藤繁, "時間相関イメージセンサによる高分解オプティカルフローに基づく表情推定: HMM によるモデル化," 第 29 回センシングフォーラム, pp.307-311, 2012.
- 48) 安藤, 栗原, 計測自動制御学会第 87 回パターン計測部会研究会資料, pp.21-27, 2012.
- 49) 藤森, 安藤, 計測自動制御学会第 87 回パターン計測部会研究会資料, pp.29-35, 2012.
- 50) T. Levy and S. Ando, "Time-domain reflectometry of conference room by a direct algebraic sound source localization method using a circular array" 日本音響学会春期研究発表会, 横浜, 2012.
- 51) ヤンスンハ, 安藤繁, "高分解オプティカルフローに基づく表情推定: 顔表面の並進移動と収縮テンソルのモデル化と同時検出," 電子情報通信学会全国大会, pp.297-300, 2012.
- 52) ヤンスンハ, 安藤繁, 情報処理学会全国大会, pp.679-680, 2012.
- 53) 前田拓哉, 栗原徹, 安藤繁, "法線ベクトルイメージャを用いた振動分布計測," 応用物理学関係春期連合講演会, 16p-B10-5, 2012.
- 54) 安藤, 川人, "640x512 画素および 704x512 画素汎用時間相関イメージセンサの開発," 応用物理学関係春期連合講演会, 2012.
- 55) 矢田祐一郎, 栗原徹, 安藤繁, 佐野恵美子, 仲嶋一, "リトロリフレクターと多重零点光ビームによる横変位の分離と遠隔計測," 応用物理学関係春期連合講演会, 17p-B9-3,

2012.

56) 栗原 徹, 工藤祐太, 林 信吾, 安藤 繁, "表面欠陥検査のための反射型リング照明の開発," 第 28 回センシングフォーラム, 2011.

57) 小宮憲司, 栗原 徹, 安藤 繁, "時間相関イメージセンサを用いた 3 次元流跡画像計測," 第 28 回センシングフォーラム, 2011.

58) 藤森, 安藤, "エイリアシングパターンのオプティカルフロー解析の理論と実験," 第 28 回センシングフォーラム, pp. 291-296, 2011.)

59) ヤンスンハ, 安藤繁, "高分解オプティカルフロー検出に基づく顔の動的筋肉モデルの構築とその表情推定への適用," 第 28 回センシングフォーラム, pp.79-84, 2011.

60) 栗原 徹, 安藤繁, "回転リング照明光源の光量分布補正," 応用物理学会春季講演会, 2012.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 件)

時間相関撮像の自動視覚検査への応用に関して数件の特許を申請済みであるが, 共同研究先企業との関係で守秘義務があり, 具体的内容の記載は省略する。

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 1 件)

名称: 時間相関演算システムおよび時間相関カメラ

発明者: 安藤 繁

権利者: 東京大学

種類: 特許

番号: 5669071

出願年月日: 2012 年 5 月 16 日

取得年月日: 2014 年 12 月 26 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤 繁 (東京大学大学院情報理工学系研究科教授)

研究者番号: 70134468

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: