

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：53203

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500247

研究課題名(和文) 視覚系の動き検出処理に学ぶ各画素が連続的な時間軸をもつ実像処理

研究課題名(英文) Real image processing by continuous response pixel referring to motion detection in visual system

研究代表者

塚田 章 (Tsukada, Akira)

富山高等専門学校・電子情報工学科・教授

研究者番号：40236849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：通常の動画処理では離散的な画像列に対して処理が行われているのに対し、ヒト視覚系では受光細胞ごとに信号を時間連続的に扱うという点が大きく異なっている。本研究では、実在する像を時間連続的に処理する「実像処理」と呼ぶ、新たな手法を構築することを目的とした。シミュレーションにより時空間的錯視(仮現運動)を再現することができ、実像処理の有効性を確認した。また、実像処理を実現するハードウェア神経回路モデルと移動物体の速度推定アルゴリズムの設計法について検討した。

研究成果の概要(英文)：In the present image processing, discrete image sequence is usually employed for the motion detect. In the human visual system, each photoreceptor processes the incident light information with continuous time. We proposed a novel method (called "real scene processing") that processes a real-world scene with continuous time. The simulation results could explain a spatio-temporal illusion (apparent motion) and suggest the validity of this method. Furthermore, we examined to realize the real scene processing by hardware neuronal circuit model and to design an algorithm to estimate the velocity of a moving object.

研究分野：生体工学

キーワード：実像処理 錯視 神経回路 受光素子 サッケード

### 1. 研究開始当初の背景

従来の動画像処理は、時間間隔において順次撮像された画像列に対して、物体の動き検出などなんらかの情報を取り出す技術である。処理対象の動画像は、対象物のある時刻におけるシーン（静止画）、すなわち画素ごとの光強度の配列として時間的に離散化したもの（フレーム）の時系列であり、動いている対象物を2次元画像の時間列として扱っていることになる。一方、視覚系においてシーンは網膜に投影され、1次ニューロンである視細胞で光情報から電気信号に変換される。視細胞はすべてが時間的に同期して一斉に光情報をサンプリングするわけではなく、それぞれ独立に連続的な電位変化（緩電位応答）として信号を出力する。視細胞の時間特性として、ステップ状の光に対して立ち上がり30ms程度でオーバーシュートを生じることが知られている。このように、イメージセンサを用いる動画像処理系と視覚系とは、根本的に異なる原理に基づいているといえる。

また、視覚系では実際には動いていないものを動いていると知覚する仮現運動と呼ばれる錯視現象が生じる。仮現運動は対象物の位置の不連続な移動に伴って知覚される滑らかな運動である。踏切の警報機は、2つの光源が交互に点灯することで光が移動しているように知覚される。このことは、視覚系ではシーンを各視細胞で連続的に処理することに加え、空間的にも特殊な処理がなされていることを意味する。従来の動画像処理では、どんなにフレームレートをあげても移動を検出することはできない。このように、視覚情報処理と従来の動画像処理では動き検出のメカニズムが根本的に異なる。

代表者は視細胞の順応モデルと明るさ知覚に関する錯視を説明する視覚情報処理モデルを提案している。順応モデルで視細胞特有のステップ応答、視覚情報処理モデルで空間的錯視現象が再現可能であることと、上述の知見を踏まえ、視覚情報処理に学ぶという観点から、動き検出には従来の動画像処理という概念ではなく、実在する像を（ここでは特に時間を含む情報として、「画像」ではなく「実像」と呼ぶことにする）連続的に処理する実像処理が必要であるとの着想に至った。

### 2. 研究の目的

- (1) 視覚情報処理モデルで実像処理を行い、動き検出の格段の性能向上を図る
- (2) 神経回路の側面からヒトの時空間的な情報処理のメカニズムを解明する
- (3) 実像処理をリアルタイムで行うためのハードウェア実現方法を開発する

### 3. 研究の方法

各画素が連続的な時間軸をもつ「実像処理」は、従来の技術をそのまま用いても実現

できない。そこで、以下の方法により研究を行なう。

(1) コンピュータを用いたソフトウェアエミュレーションによる実像処理の有効性の検証を行う。コンピュータ上で視細胞の順応モデルと錯視モデルを統合した視覚情報処理モデルを構築し、実像処理を行う。専用のハードウェアは存在しないので、時間の連続性を疑似的に考慮する。すなわち、撮像装置からフレーム単位で画像をコンピュータに取得し、一旦時間的に連続となるような前処理を施す。その後順応モデルでの時空間的な処理を行い、以降の錯視モデルで視覚系特有の空間的な処理を行う。

(2) 神経回路の観点からも実像処理のハードウェアによる実現の可能性を探る。活動電位を再現する興奮性膜やバースト発振を再現する神経膜の電子回路モデルと、興奮性シナプス、抑制性シナプスの後電位を再現する電子回路モデルを構成し、ネットワークを構築する。次に、構築した空間情報に加えて時間情報を処理するネットワークの特性を刺激-応答システムの観点から分析し、時空間的な処理のメカニズムを探る。

(3) 本研究で目指す実像処理には、画素ごとに独立した連続時間系をもつ画像システムが整合性が高い。そこで実像処理のなかで動き検出処理をとりあげ、そのような画像システムでの実装アルゴリズムの設計と検証を行う。

### 4. 研究成果

(1) エミュレータの構築において、網膜における順応の空間特性及び充填処理部分をGPUにより高速化した。順応の空間特性については、画像と低周波フィルタをFFT処理し、掛け合わせた後逆変換することで、充填処理については、CG法を用いて高速化を図った。正弦波、余弦波状の2種の刺激間に30ms程度のグレー画像を挿入するだけで、知覚する運動方向が逆転する仮現運動錯視（図1）を構築したエミュレータを用いて実像処理した結果、シーンの特徴が視覚野に送られる時点で実際の逆方向運動と同様の出力になっているという結論を得た。

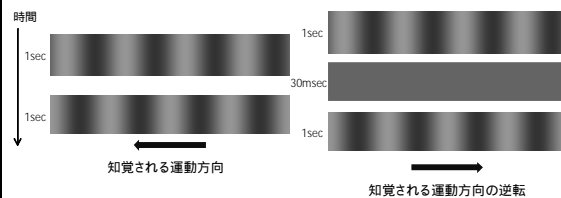


図1 仮現運動錯視

これに関連して、ヒト視覚系では30ms程度の時間で眼球が跳躍運動（サッケード）することが知られている。サッケード中は入力されたシーンがぶれているにもかかわらず、このことが知覚されない。サッケードは一行

の文章を読む場合にも頻繁に発生しており、ヒトの視知覚に非常に重要な役割を果たしている。上述の仮現運動錯視における逆転現象の生じる刺激間隔、サッケード時間、視細胞の応答特性の共通性を考慮すると、実像処理にヒトのサッケード特性を取り込む必要性を感じた。

そこで、サッケードについての調査を目的として、視線検出、頭部位置姿勢計測に関する研究にも着手した。視線検出に関しては、高速度撮影カメラとFPGAを用いリアルタイムでサッケードを計測できるシステムを検討した。頭部位置姿勢計測に関しては、我々がポインティング装置として提案しているレーザポインタを用いる方法、Kinectを用いる方法、マーカを用いる方法等を検討した。

(2) 生物の視覚系情報処理に注目し、ニューロンの電気的興奮現象を再現する回路モデルを提案した。そして、これらを12個配置したネットワークモデルを構成した。各ニューロン回路モデルは左右の隣接するそれらから抑制性シナプス回路モデルを経由した強い抑制性の入力を受け、左右ひとつ飛ばした先のニューロン回路モデルから抑制性シナプス回路モデルを経由した弱い抑制性の入力を受ける。すなわち、計左右4つのニューロン回路モデルから抑制性の入力を受ける。同時に同じ4つのニューロン回路モデルに同様の抑制性の出力信号を出すので、各ニューロン回路モデルは相互抑制系になっている。

定常状態でのシュブルール錯視について、No.1からNo.6までのニューロン回路モデルには小さな入力電圧(小さい輝度に対応)を、No.7からNo.12までには大きな入力電圧(大きい輝度に対応)を印加したときに、輝度値の境界であるNo.6とNo.7に統計的に有意なオーバーシュートが観察され、シュブルール錯視が生じることを明らかにした。

2種類の入力電圧の境界部が動くときにも、ハードウェア側抑制ネットワークがシュブルール錯視(動的シュブルール錯視)を再現することを調べた。ニューロン回路モデル15個を一次元に配置し、抑制性シナプス回路モデル54個(境界のためNo.1とNo.15はそれぞれ2個、No.2とNo.14はそれぞれ3個、それ以外は4個で計54個)を用いて図2に示すように結合する。入力電圧は輝度の大きさを表し、低電圧入力部( $E_{inp} = 3$  [V])と高電圧入力部( $E_{inp} = 11$  [V])を設けることでステップ状な輝度値の境界を再現する。No.2からNo.14まで  $x = 0.2$  [s]ごとに各ニューロン回路モデルにおける入力を高電圧から低電圧に切り替えていくことで、輝度の境界の移動を再現する。出力はニューロン回路モデルが生成する活動電位の瞬時振動数(活動電位のピーク間隔の逆数)とする。側抑制ネットワークの中心に位置するニューロン回路モデルNo.8の系列  $i$ (横軸)に対する瞬時振動数(縦

軸)の時系列を図3に示す。No.8では横軸  $i = 192$  で入力電圧が  $E_{inp} = 11$  [V]から  $E_{inp} = 3$  [V]に切り替わっている。その前後で瞬時振動数のオーバーシュート(「上がり」と「下がり」)が確認された。同様のことはNo.3~No.7, No.9~No.13の10個のニューロン回路モデルにおいても計測された。

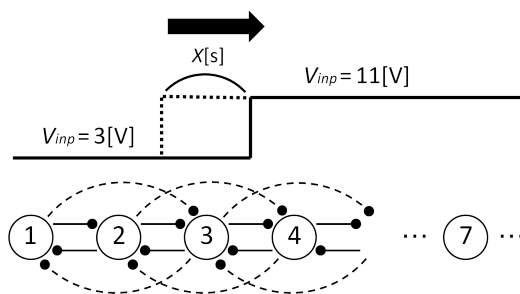


図2 ニューロンネットワークモデルの結合

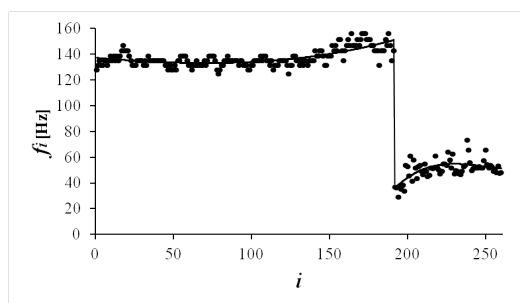


図3 動的シュブルール錯視のシミュレーション

(3) 実装アルゴリズムに関して、実像処理に整合性の高い、画素ごとに独立した連続時間系を設定し、それら複数の画素の輝度の時間変化の相関から、対象物体の動きの速度を推定するアルゴリズム(図4)の設計を行った。またそれを、カメラを用いて撮影した静止画列からなる動画像を用いて、速度推定精度の検証を行った。またその実装の実例として、そのアルゴリズムを用いたスマートフォン動き検出アプリを試作した。それに加えて、撮像素子(カメラ)上で、このアルゴリズムを実装するために必要な要素回路の設計・検討を行った。

実像処理に整合性の高い、画素ごとに独立した連続時間系上での動き検出アルゴリズムとして、(a)輝度ピーク検出を用いる方法と、(b)輝度変化の自己相関関数を用いる方法の両者を比較検討対象として設定した。カメラで撮影した動画像に対して、撮影時に付加されるノイズを模擬した誤差を加えて両アルゴリズムを適用して速度推定精度を比較したところ、(a)よりも(b)の方が付加ノイズに対して耐性が高いことが確認された(図5, 図6)。またこの(b)をスマートフォンアプリとして実装し、その動作を確認した。

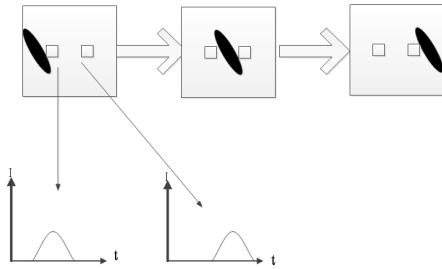


図4 物体の動きの速度を推定するアルゴリズム

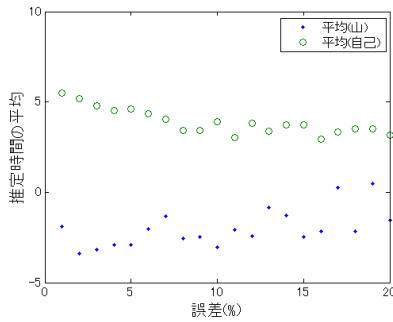


図5 速度推定時間

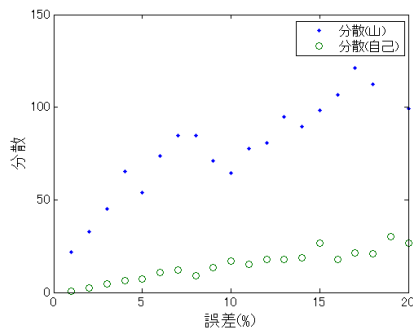


図6 速度推定精度

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計11件)

塚田 章, 西尾 海, 田中秀幸, マイクロレンズアレイマーカーを用いたポインティングシステム, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 115, No. 49, MBE2015-2, pp. 7-10, 2015. 査読無

小泉祐馬, 塚田 章, 視線検出とうなずき検出を用いたハンズフリーマウスの基礎的検討, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 115, No. 49, MBE2015-3, pp. 11-14, 2015. 査読無

A. Maruyama, T. Ichimura and Y. Maeda : Hard-wired central pattern generator hardware network for quadrupedal locomotion based on neuron and synapse models, Adv. Biomed. Eng., vol. 4, pp. 48-54, 2015. 査読有

DOI : 10.14326/abe.4.48

塚田 章, 田中秀幸, 姫野吏絵子, マイクロレンズアレイマーカーを用いたハンズフリーポインティングシステム, 生体医工学, Vol. 53, No. 1, pp. 44-49, Feb. 2015.

## 査読有 .

Y.Sasada, J.Akita, High Speed and Low Latency Eye Direction Measurement Camera System and Saccade Prediction Algorithm, Proceedings of 2nd Asian Image Sensors and Imaging Systems Symposium, pp.31-32, 2014.12. 査読有 .

H.Kawakami, S.Igarashi, Y.Sasada, J.Akita, Column-Parallel Architecture for Line-of-Sight Detection Image Sensor Based on Centroid Calculation, ITE Trans. on Media Technology and Applications, Vol.2, No.2, pp.161-166, 2014. 査読有 .

DOI : 10.3169/mta.2.161

塚田 章, Cooper Todd, 距離画像カメラを用いた2D3D顔認証システム, 自動認識, Vol. 27, No. 5, pp. 30-35, 2014 ( 寄稿依頼 )  
小島 颯, 市村智康, 塚田 章, 野村泰伸, 前田義信, CPGネットワークを用いた四肢歩行シミュレーション研究, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 133, No. 222, MBE2013-39, pp. 17-22, 2013. 査読無

坂口達彦, 秋田純一, 画素ごとの独立時間軸系での動き検出アルゴリズム, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 37, PP. 13-16, 2013. 査読無

久保田真仁, 前田義信, 塚田 章, 求心性刺激を含む二段型中枢パターン発生器の電子回路モデル設計, 生体医工学, Vol. 50, No. 6, pp. 1-9, 2012. 査読有

DOI : 10.11239/jsmbe.50.620

土門立志, 前田義信, 塚田 章, 伊藤 尚, 谷 賢太郎, 林 豊彦, シュブルール錯視を再現する側抑制アナログ電子回路神経ネットワーク, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J95-A, No. 4, pp. 383-386, 2012.

## 査読有 .

〔学会発表〕(計10件)

斎藤元喜, 前田義信, 秋田純一, 塚田 章, 動的シュブルール錯視を再現するアナログ回路型神経ネットワークの設計, 生体医工学シンポジウム2014, 1A-25, 2014年9月27日.東京農工大(東京都・小金井市)

塚田 章, 田中秀幸, 姫野吏絵子, マイクロレンズアレイマーカーを用いた肢体不自由者用ポインティングシステム, 生体医工学シンポジウム2014, 2014年9月27日.東京農工大(東京都・小金井市)

今枝 駿, Cooper Todd, 塚田 章, Xtionより得られる正面顔を用いた2D顔認証, 平成26年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集, F51, 2014年9月12日.富山高専(富山県・射水市)

姫野吏絵子, 今枝 駿, 塚田 章, Kinectを用いたポインティングシステムの検討, 平成26年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集, B2, 2014年9月11日.富山

高専（富山県・射水市）  
若松絵里，坂田結衣，由井四海，塚田 章，  
KinectにおけるRGB画像と距離画像の位置補正，平成26年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集，F73，2014年9月11日。富山高専（富山県・射水市）  
今枝 駿，Cooper Todd，塚田 章，Xtionを用いた2D3D顔認証システムについて，第20回画像センシングシンポジウム講演論文集，IS2-14，2014年6月12日。パシフィコ横浜（神奈川県・横浜市）  
斎藤元喜，前田義信，秋田純一，塚田 章，マッハバンドを説明するアナログ回路神経ネットワークの設計，平成25年度電子情報通信学会信越支部大会講演論文集，p. 123，2013年10月5日。長岡技術科学大学（新潟県，長岡市）  
H. Kojima, Y. Maeda, J. Akita, A. Tsukada, Construction of Four-Leg Robot Controlled by Hardware Central Pattern Generator Model. 52nd Annual Conference of Japanese Society for Medical and Biological Engineering, 2013, 大阪国際会議場（大阪府・大阪市）  
土門立志，久保田真仁，前田義信，市村智康，塚田 章，4肢歩行を制御するアナログ電子回路神経ネットワーク，電子情報通信学会ソサイエティ大会，AS-1-8，S-15，2012年9月13日。富山大学（富山県・富山市）  
久保田真仁，前田義信，塚田 章，求心性刺激を含むCPGの電子回路設計，生体医工学シンポジウム2012，2012年9月7日。大阪大学（大阪府・豊中市）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

塚田 章（TSUKADA AKIRA）  
富山高等専門学校・電子情報工学科・教授  
研究者番号：4 0 2 3 6 8 4 9

### (2) 研究分担者

秋田 純一（AKITA JYUN-ICHI）  
金沢大学・電子情報学系・教授  
研究者番号：1 0 3 0 3 2 6 5

### (3) 研究分担者

前田 義信（MAEDA YOSHINOBU）  
新潟大学・自然科学系・准教授  
研究者番号：9 0 3 0 3 1 1 4