

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K19895

研究課題名（和文）微小眼球運動を活用した生体眼-視覚系模倣型ロボットビジョンの開発

研究課題名（英文）Robotic vision system inspired by biological fixational eye movements

研究代表者

安川 真輔（YASUKAWA, Shinsuke）

九州工業大学・大学院生命体工学研究科・准教授

研究者番号：90837973

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ある時刻における外界の空間的な情報を標本化した情報だけでなく、生体の眼-視覚系に学び、積極的に眼球運動を利用することで取得された時空間情報を用いることでイメージセンサ単体のハードウェア限界を超えるイメージング性能を実現できる可能性がある。その検証用プラットフォームとして、生体の微小眼球運動を模擬できる光学式視線制御装置を主な構成要素とする眼-視覚系規範型ロボットビジョンを開発した。また、眼-視覚神経協働系による視覚符号化法についての基礎検討として、新たに網膜神経回路の計算モデルを提案し、基本的な動作についてソフトウェア・シミュレーションで確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生体の視覚系は、視覚情報を実時間で効率よく処理することに長けており、これまで網膜神経回路網に学んだ複数の生体規範型イメージセンサが開発されてきた。どのようなイメージセンサであれ、デジタル画像を取得する際に標本化定理に基づいた空間周波数の制限によってエイリアシングと呼ばれる現象が生じる恐れがある。申請者はこのような標本化の制限を打破するアプローチとして固視微動と視覚神経系の協働処理に着目して研究を実施した。本研究成果を更に発展させ、眼球運動や身体運動を考慮した生体視覚系の情報符号化法の理解を深めることで、上記の課題を解決する新たなスパイク出力型カメラの設計指針を得ようと考えている。

研究成果の概要（英文）：By using not only sampled spatial information of the external world at a certain time, but also spatiotemporal information obtained by actively using eye movements, it may be possible to achieve imaging performance that exceeds the hardware limit of the image sensor alone. As a platform for verification, we developed a robot vision system whose main component is an optical eye control device that can simulate fixational eye movements of a biological vision. As a platform for verification, we developed a robot vision system whose main component is an optical eye control device that can simulate fixational eye movements of a biological vision. In addition, we proposed a new computational model of retinal neural circuits as a basic study of visual encoding by the eye-visual neural cooperative system, and confirmed its basic operation by software simulation.

研究分野：神経模倣工学，ロボティクス

キーワード：固視微動 ロボットビジョン 視覚情報処理 視覚制御 眼球運動 高速ビジョン イベント駆動型カメラ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

ロボットやネットワークカメラを活用した様々な新規サービスの社会実装の試みが行われる中、多機能・高性能な組み込み型ビジョン装置の需要が高まっており、そのフロントエンドとなるイメージング技術は目覚ましい発展を遂げている。撮像能力だけでなく、受光と同時に様々な演算機能を有するイメージセンサ技術が研究されてきた。そのアプローチの一つとして生体の視覚神経系のアナログ情報処理や並列・階層処理構造に学んだ視覚センサの研究が行われてきた。しかしながら、それらのセンサにおいても他の集積回路技術と同様に、センサの画素サイズに起因する感度と空間解像度等のトレードオフによる制約がある。

生体は視覚情報で空間認知を行う際、その情報処理は視覚神経系だけでなく積極的に眼球運動を活用していると示唆されている。既にロボットや監視カメラなどの工学応用では大きく眼球を動かすことにより、視野内で対象物をとらえる性質の眼球運動が利用されてきた。一方で対象物を注視している際も固視微動と呼ばれる微小な振動性の眼球運動が行われていることが知られている。固視微動は視覚機能との関係性が議論されており、例えば細かい形状の物体の認識課題や色知覚、視覚的注意へ寄与していると示唆されている。ある時刻における外界の空間的な情報を標準化した情報だけでなく、生体の眼-視覚系に学び、積極的に眼球運動により取得された時空間情報を用いることでイメージセンサ単体のハードウェア限界を超えるイメージング性能を実現できる可能性がある。

本研究では眼球運動を模擬した光学式視線制御装置を開発し、それとフレームレスカメラ(イベント駆動型カメラ)によって時間方向に空間的な視覚情報を符号化する装置を開発し、それを応用することで、体-眼球運動下における視覚機能の分析とその工学応用を目指す。また本研究では、他の眼球運動-視覚情報処理の閉ループ系による計測制御系の活用法を検討する研究への発展性も探る。

2. 研究の目的

本研究の目的はセンサ単体による撮像性能を超えるために、眼球運動とそれを活用した情報処理を検討できる基盤システムを構築することである。また、それをを用いることで 眼球運動の影響も考慮した視覚符号化法を検討することと、 物体追跡タスクを例に、眼球運動-視覚情報処理の閉ループ系による計測制御系を活用し、その有用性を検討することである。

3. 研究の方法

まず光学式視線制御技術及びフレームレスカメラによる眼-視覚系規範型ロボットビジョンを開発する。この眼-視覚系規範型ロボットビジョンを用いて、眼-視覚神経協働系による入力光の時空間的な符号化法を検討する。また、フレームレスカメラのイベント出力に相応しい後段の信号処理アルゴリズムについて、スパイクニューラルネットワークを用いた方法とイベント駆動型パーティクルフィルタについて検討する中で、本アプローチの有用性を示す。

4. 研究成果

(1) 眼-視覚系規範型ロボットビジョンの開発

眼球運動の中でも固視微動に着目し、その運動特性を実現する眼-視覚系規範型ロボットビジョンを設計した。微動光学系、フレームレスカメラ、演算装置で構成した。微動光学系はガルバノミラーとレンズ系、その制御回路で構成した。これらは固視微動の応答特性を検討し、それを満たすように設計した。ガルバノミラーの制御信号の生成と、エンコーダからのセンサ信号受信はFPGA(Field Programmable Gate Array)を用いた。ガルバノミラーとFPGA間のA/D変換、D/A変換を実行するインターフェースボードを設計した。またガルバノミラーに与える固視微動の一種であるドリフトを再現するような制御信号を生成するデジタル回路をFPGA上に設計・実装した。画像センサへの視覚入力の時空間周波数特性を評価したところ、生体眼球系と同様に空間周波数領域の低域成分は均一化され、高域成分が減衰する傾向があり、その一方で時間周波数領域の高域成分が増加することが確認できた。また眼球運動のパラメータを変更しながら、視覚入力の変調特性を検討した所、振幅と速度で時空間特性の変調の程度を制御できることを確認した(図1)。この結果から、視野とイメージセンサの解像度、フレームレートを考慮して固視微動のパラメータを調整することによって、センサ単体より視覚入力の情報を取りこぼさず受け取れる可能性が示唆された。

(2) 眼-視覚神経協働系による視覚符号化法の検討

上記の成果を受けて、眼球運動によって変調された信号を更に後段の演算器でどのように符号化するべきか、脊椎動物の網膜神経系に学ぶことで方針を得ることにした。そこで生体網膜の出力段である神経節細胞の受容野の時空間的特性が固視微動によって、どのように変化するかを検討するための網膜神経回路モデルを提案し、その基本要素の動作確認をソフトウェア・シミュレーションで実施した。ホワイトノイズ動画刺激を提案したモデルに入力し、その神経節細胞

ユニットからのスパイク出力を記録する。そのスパイク列を時系列的に解析することで、予備的な成果として、神経節細胞ユニットの時空間受容野を定量化することができた(図2)。ただし、本計算モデルのソフトウェア・シミュレーションは計算コストが非常に高く、成果としてモデルの一部のみの検証にとどまった。そのため、今後はFPGAによって計算モデルをハードウェア実装し、シミュレーションを高速化して、眼-視覚神経協働系による視覚符号化法の解明を目指す。

(3) フレームレスカメラ(イベント駆動型カメラ)による視覚情報処理技術の開発

フレームレスカメラのイベント出力に相応しい後段の信号処理アルゴリズムについて、スパイクングニューラルネットワークを用いた方法とイベント駆動型パーティクルフィルタについて検討した。視対象の物体認識タスクと運動推定タスクを例にフレームレスカメラの後段にスパイクングニューラルネットワークを配することで、イベントベースの学習法を検討し、各タスクで評価した。また物体を注視する状態を持続するために、イベント駆動型カメラ出力に適した物体追跡手法について検討した。イベント生成に合わせて状態遷移と尤度の計算を実行する時系列フィルタ・アルゴリズムを提案し、その評価実験を実施した(図3)。

その他の成果として、フレームレスカメラを用いた両眼プラットフォームを構築した。両眼システムはステッピングモータによって、基線長と注視点を変更することができ、両眼視における固視微動の役割を理解するための視覚入力を生成することができる。ここではイベント駆動型カメラの出力に時間フィルタを適用することで、イベントが生成したタイミング情報を含んだタイムサーフェス画像を生成し、両眼マッチングを実行する手法について検討した。

本研究は計画当初、イベント駆動型カメラと呼ばれる現行のスパイク出力型カメラの新たな利用法の一提案という側面もあった。しかしながら、計画を進める中で、スパイク出力型カメラ自身が運動した際に単位時間当たりの取得データが膨大となり、計算機への通信量を増大させる課題に気づいた。このことから、カメラの性能を最大限に引き出すためには後段の計算機とインターフェースに専用の特殊な構造や仕様を要求することから、波及性に限界があるという考えに至った。そこで本研究成果を更に発展させ、眼球運動や身体運動を考慮した生体の視覚符号化法を理解し、その知見を活かした新たなスパイク出力型カメラの開発に取り組む予定である。

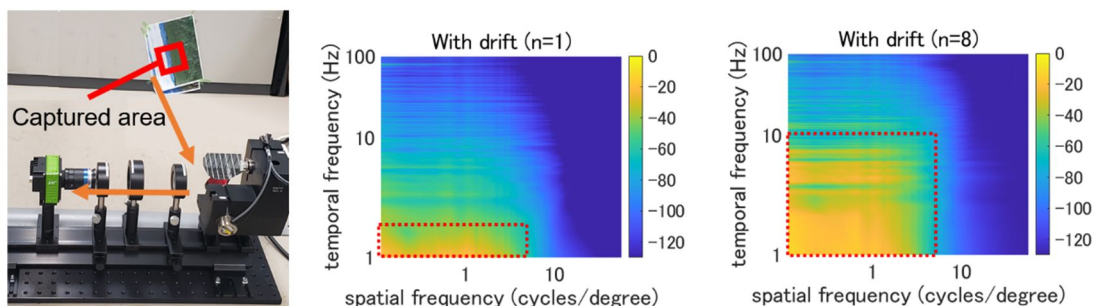


図1: 眼-視覚系規範型ロボットビジョンの構成と視覚入力の時空間変調機能の評価

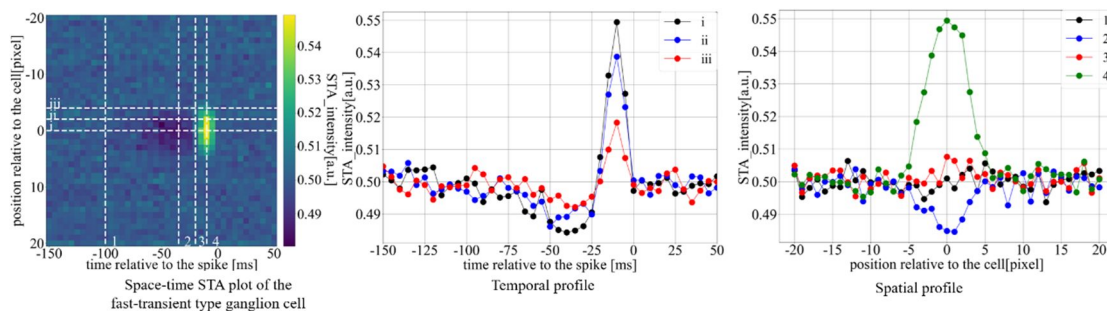


図2: シミュレーションによる網膜神経節細胞ユニットの受容野構造の可視化

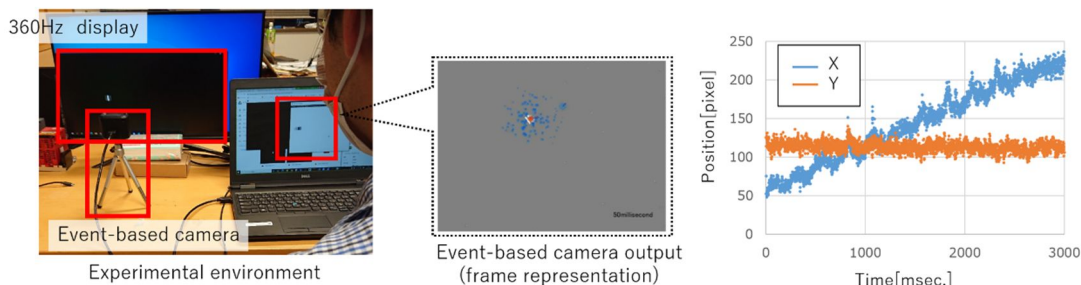


図3: イベント駆動型パーティクルフィルタによる物体追跡

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Y Kawasaki, M Ohtani, S Yasukawa
2. 発表標題 Event-Driven Particle Filter for Tracking Irregularly Moving Objects
3. 学会等名 International Conference on Artificial Life and Robotics 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H Yokota, Y Hayashida, S Yasukawa
2. 発表標題 A simulation model for analyzing the spatiotemporal receptive field of retinal ganglion cells in the presence of fixational eye movements
3. 学会等名 International Conference on Artificial Life and Robotics 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川崎 裕貴, 安川 真輔
2. 発表標題 イベント駆動型パーティクルフィルタによる物体追跡技術の提案
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T Yotsumoto, Y Hayashida, S Yasukawa
2. 発表標題 A robotic vision system emulating fixational eye movements and retinal sampling
3. 学会等名 International Conference on Artificial Life and Robotics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安川真輔, 吉松秀峻, 石井和男
2. 発表標題 イベントビジョンシステムによる視対象の運動推定法の検討
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉松秀峻、安川真輔、石井和男
2. 発表標題 イベントベースカメラを用いた運動中の剛体の姿勢推定
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	林田 祐樹 (HAYASHIDA Yuki) (10381005)	三重大学・工学研究科・教授 (14101)	
研究協力者	大谷 真弘 (OTANI Masahiro) (10353301)	奈良工業高等専門学校・電気工学科・准教授 (54601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------