

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18044

研究課題名(和文) 運動立体視による空間認識を行う視覚情報処理システムの集積化に関する研究

研究課題名(英文) Integration of visual information processing system for spatial perception by motion stereo vision

研究代表者

秋間 学尚 (Akima, Hisanao)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：40707840

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：自動運転や自律歩行ロボットを実現する上で、物の動きや位置関係を把握する空間認識は必要不可欠である。本研究では、電力性能比に優れた空間認識システムの構築を目的として、視覚刺激の移動に基づいて空間認識を行う運動立体視の神経回路網モデルの機能をLSI化した。膨大な神経配線を限られたチップ面積内に実装するために、モデルの処理ステージ毎に最適な仮想配線方式を採用した。また、試作したLSIの実環境性能を検証するためのリアルタイム空間認識システムを構築した。その結果、接近する物体に対応したオプティカルフローを毎秒30フレームで検出することに成功し、一般的なCPUに比べて100倍以上の電量性能比を達成した。

研究成果の概要(英文)：Spatial perception is indispensable to achieve such as self-driving cars and autonomous mobile robots. The purpose of this research is to construct a spatial perception system with high power performance ratio by developing an LSI for the neural network model of motion stereo vision in which spatial perception is performed based on visual motion. The optimal virtual connection schemes were adopted for each stage of the model to implement a huge number of neural connections into a limited chip area. A real-time spatial perception system was also developed for actual environment testing. As a result, the optical flow corresponding to an approaching object was successfully detected in 30 frames per second, and the power performance ratio of more than 100 times higher than a conventional CPU was achieved.

研究分野：工学

キーワード：運動立体視 空間認識 LSI 神経回路網モデル Hough変換 視覚情報処理

1. 研究開始当初の背景

環境の空間認識を行う上で、視覚情報は重要な手がかりとなる。2012年のHintonのグループによる成功を皮切りに、画像中に何が映っているのかをコンピュータに認識させる手段としてディープラーニング(深層学習)の利用が活発になっている。深層学習は、従来人間が教える必要があった認識や分類の手がかりを学習により獲得することができ、画像や音声の認識での応用が進んでいる。特に画像認識においては、畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network: CNN)が有力である。CNNは階層的な特徴抽出層を持ち、その前段はニューロン間の接続数や重み付けの自由度を抑えた疎なネットワークで、画像中の濃淡の局所的な空間周波数成分を取り出すガボールフィルタと類似したフィルタを学習によって獲得することができる。これは、脳の第一次視覚野(V1野)の単純細胞が持つ方位選択性を表現したものであり、視覚情報に基づいた空間認識の前処理として重要である。

視覚野の階層構造をモデル化したCNNからV1野の方位選択性が再現できたことは、モデルの妥当性を検証する上では有用ではあるものの、工学的見地からは、神経生物学的な手法から得られている既知の構造を膨大な訓練データを用いて学習により再獲得する必要性は薄い。また、学習後には不用となる配線も出てくることから、CPUやGPU(Graphics Processing Unit)による実装ではハードウェアの利用効率が低く、高い電力性能比を達成することは困難である。

2. 研究の目的

本研究では、視覚野における空間認識の数理モデルである川上・岡本モデルに着目した[引用文献①, ②]。本モデルでは、異なる方位選択性と空間位相特性を持つV1野の方位選択性単純細胞群が、局所Hough変換座標(ρ, θ)を構成していると考えられる。このHough変換は、視野の局所領域をカバーする外側膝状体(Lateral Geniculate Nucleus: LGN)細胞群が構成する直交座標(x, y)からHough変換座標(ρ, θ)への神経配線によって実現される(図1)。この神経配線の仕方は計算により求めることができ、学習が不用で固定的なものである。川上・岡本モデルではV1野より先の視覚野の機能も固定的な神経配線で記述しており、これらを効率的に処理する専用LSIを開発することで、電力性能比に優れた空間認識システムを構築することが本研究の目的である。

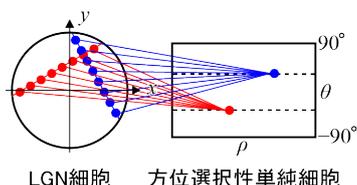


図1 神経配線によるHough変換

3. 研究の方法

神経回路網モデルのLSI実装においては、限られたチップ面積に膨大な神経配線をいかに実装するかが大きな課題となる。川上・岡本モデルの特徴である固定的な神経配線を実装する最も単純な仮想配線方式は、あらかじめ計算しておいた神経配線様式をルックアップテーブル(LUT)に格納しておき、LUTを逐次参照する方式である。この方式の欠点は、LUTが大きすぎてオンチップメモリに収めるのが困難なこと、メモリへの入出力(I/O)がボトルネックとなりスループットが上がらないことである。川上・岡本モデルでは、接近してくる平面や直線の向き、及び衝突するまでの時間を2段階に分けて検出するが、各段階の処理に合わせた仮想配線方式を適用することで神経細胞の集積度とスループットを最大化した。そして、試作したLSIの実環境性能を検証するためのリアルタイム空間認識システムを構築した。

4. 研究成果

川上・岡本モデルの第1段階では、視野の局所領域(受容野)に映る刺激パターンの運動方向ベクトル(局所運動)を抽出する。ここで最も計算不可の高い処理が前述のHough変換であり、一受容野あたり数万~数十万本に及ぶ神経配線をLUTとしてオンチップメモリに収めるには大きな回路面積を必要とする。実際、試作に用いた製造プロセスとチップ面積では、一受容野分のLUTも実装できないことが分かった。そこで、神経配線様式を必要に応じて算出する並列Hough変換回路を開発した。回路の使用効率を最大化するために回路要素レベルでの細粒度パイプラインを構築し、また複数受容野へのデータ入力遅延を隠蔽するために処理ユニットレベル(Processing Element: PE)での粗粒度パイプラインを構築することで、スループットを最大化することに成功した。図2に試作した局所運動検出LSIのチップ写真とスペックを示す。PEの大部分は神経細胞の応答強度を保持するためのSRAM(Static Random Access Memory)で占められており、全部で8つのPEを集積している。これは、LUT方式と比較して約12倍の集積度である。このPE一つが、一つの受容野中の局所運動を検出する。最大動作周波数は100MHzで、配線の影響も考慮したポストレイアウトシミュレーションで見積もった消費電力は50~100mWである。スループットはシステム構成に依存するが、毎秒30フレームのリアルタイム処理に十分な性能を有する。

Technology	TSMC 65nm GP 1P9M
Core Area	1.32mm x 1.32mm
Gate Count	~600k gates
Total SRAM Size	56KB
Number of PEs	8
Supply Voltage	1V
Core Frequency	100MHz
Power Consumption	50~100mW

図2 局所運動検出LSIチップ写真とスペック

川上・岡本モデルの第2段階では、第1段階で検出した局所運動を統合することでオプティカルフローを構成する。この統合は、運動検出細胞群から平面検出細胞群への神経配線によって実現され、その配線様式は複比変換により計算される[引用文献②]。複比変換は複雑な計算を必要とするため、Hough変換のように専用回路化することは回路面積と処理速度の両面で適していないことが分かった。一方、平面検出細胞一つあたりの神経配線数は100本程度であるため、平面検出細胞毎にLUTを持たせる分散LUT方式が最適であると判断した。局所運動統合LSIは、複比変換の結果を格納したLUTと、平面検出細胞の応答強度を集積するためのSRAMで構成されるPEを複数持つ。このPE群に対して局所運動情報をカプセル化したパッケージをブロードキャストして全てのPEで並列処理することで、I/Oボトルネックを解消した。図3に試作した局所運動統合LSIのチップ写真を示す。特定の平面方位と到達時間に対して選択的に応答する平面検出細胞一つに対応するPEを64個集積している。最大動作周波数は100MHzで、ポストレイアウトシミュレーションで見積もった消費電力は約40mWである。スループットは3.4GHzで動作するCPU上で実行したシングルスレッドのプログラムとほぼ同等で、100W以上の電力を消費するCPUと比較して百倍以上の電力性能比である。

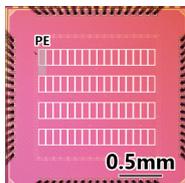
	Technology	TSMC 65nm GP 1P9M
	Core Area	1.32mm x 1.32mm
	Gate Count	~800k gates
	Total SRAM Size	32KB
	Number of PEs	64
	Supply Voltage	1V
	Core Frequency	100MHz
	Power Consumption	~40mW

図3 局所運動統合LSIチップ写真とスペック

最後に、試作したLSIの実環境性能を検証するために、FPGA(Field Programmable Gate Array)とCameraLinkカメラを用いたリアルタイム空間認識システムを構築した。図4にその構成を示す。CameraLinkカメラで取得したビデオストリームをFPGAに入力し、FPGAでLSIへの入力形式に合わせたビットストリームに変換した上で独自設計したLSIインターフェイスボードを介してLSIに入力する。LSIの処理結果をFPGAでUDPパッケージ化してPCに転送し、C#で実装したソフトウェアにより細胞の応答強度分布を可視化する。以上の処理を、毎秒30フレームで処理する。



図4 リアルタイム空間認識システム

このシステムを用いてオプティカルフローを検出した結果を図5に示す。カメラを電車模型に搭載し、同図左に示したランダムドットパターンが描かれた約30度傾いた平面に対して等速度で接近させ、6つの受容野に対して局所運動を検出した。同図右に各受容野の運動検出細胞群の応答強度分布を示す。最も濃い赤で描かれた細胞と受容野原点を結んだベクトルが局所運動に相当し、これらを統合したオプティカルフローは平面の傾きと接近を正しく反映したものとなっていることが確認できた。

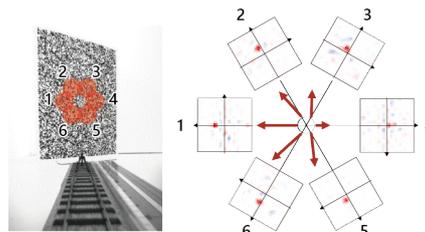


図5 オプティカルフロー検出結果

<引用文献>

① S. Kawakami and H. Okamoto, "A cell model for the detection of local image motion on the Magnocellular pathway of the visual cortex," *Vision Res.*, 36(1), pp.117--147, 1996.

② S. Kawakami, M. Matsuoka, H. Okamoto, and S. Hosogi, "A neural network model for detecting a planar surface spatially from the optical flow in area MST of the visual cortex," *Syst. Comput. Jpn.*, 34, pp.46--59, 2003.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

① Y. Osakabe, H. Akima, M. Sakuraba, M. Kinjo, S. Sato, "Quantum Associative Memory with Quantum Neural Network via Adiabatic Hamiltonian Evolution," *IEICE Transactions on Information and Systems*, 査読有 E100-D, 2017, 2683-2689, 10.1587/transinf.2017EDP7138.

② M. Sakuraba, K. Sugawara, T. Nosaka, H. Akima, S. Sato, "Carrier properties of B atomic-layer-doped Si films grown by ECR Ar plasma-enhanced CVD without substrate heating," *Science and Technology of Advanced Materials*, 査読有, 18(1), 294-306, 2017, 10.1080/14686996.2017.1312520.

③ K. Motegi, N. Ueno, M. Sakuraba, Y. Osakabe, H. Akima, S. Sato, "Electrical Properties and B Depth Profiles of In-Situ B Doped Si Film Grown by ECR Ar Plasma CVD without Substrate Heating," *Materials Science in Semiconductor Processes*

sing, 査読有, 70, 50-54, 2017, 10.1016/j.mssp.2016.10.030.

④ N. Ueno, M. Sakuraba, H. Akima, S. Sato, "Electronic Properties of Si/Si-Ge Alloy/Si(100) Heterostructures Formed by ECR Ar Plasma CVD without Substrate Heating, Materials Science in Semiconductor Processing," Materials Science in Semiconductor Processing, 査読有, 70, 55-62, 2017, 10.1016/j.mssp.2016.09.035.

⑤ S. Sasaki, M. Sakuraba, H. Akima, S. Sato, "Silicon-Carbon Alloy Film Formation on Si(100) Using SiH₄ and CH₄ Reaction under Low-Energy ECR Ar Plasma Irradiation," Materials Science in Semiconductor Processing, 査読有, 70, 188-192, 2017, 10.1016/j.mssp.2016.10.046.

⑥ W. A. Borders, H. Akima, S. Fukami, S. Moriya, S. Kurihara, Y. Horio, S. Sato, H. Ohno, "Analogue spin-orbit torque device for artificial-neural-network-based associative memory operation", Appl. Phys. Express, 査読有, 10, 2017, 013007, 10.7567/APEX.10.013007.

⑦ H. Yamamoto, S. Kubota, Y. Chida, M. Morita, S. Moriya, H. Akima, S. Sato, A. Hirano-Iwata, T. Tanii, M. Niwano, "Size-dependent regulation of synchronized activity in living neuronal networks," Physical Review E, 94(1), 査読有, 012407, 2016, 10.1103/PhysRevE.94.012407.

⑧ H. Akima, Y. Katayama, M. Sakuraba, K. Nakajima, J. Madrenas, S. Sato, "CMOS Majority Circuit with Large Fan-In", IEICE Trans. Electron, 査読有, E99c(9), 2016, 1056-1064, 10.1587/transele.E99.C.1056.

⑨ 秋間学尚, 佐藤茂雄, 「運動視により局所運動を検出する神経回路網モデルの LSI 化」, 日本神経回路学会誌, 査読無, 22, 2015, 152-161, 10.3902/jnns.22.152.

[学会発表] (計 6 件)

① H. Akima, S. Kurihara, S. Moriya, S. Kawakami, J. Madrenas, M. Yano, K. Nakajima, M. Sakuraba, S. Sato, "Vision LSI for Spatial Perception Based on Motion Stereo Vision," The 5th Int. Symp. on Brainware LSI, 2018年02月23日~24日, 東北大学 (宮城県仙台市) .

② H. Akima, S. Kawakami, J. Madrenas, S. Moriya, M. Yano, K. Nakajima, M. Sakuraba, S. Sato, "Complexity Reduction of Neural Network Model for Local Motion Detection in Motion Stereo Vision," Int. Conf. on Neural Information Processing (ICONIP 2017), 2017年11月14日~18日, 広州 (中国) .

③ H. Akima, S. Kurihara, S. Moriya, S. Kawakami, J. Madrenas, M. Yano, K. Nakajima, M. Sakuraba, S. Sato, "Vision

processor based on motion-stereo vision implementing huge neural connections by successive Hough transform", The 4th Int. Symp. on Brainware LSI, 2017年02月24日~25日, 東北大学 (宮城県仙台市) .

④ H. Akima, S. Moriya, S. Kawakami, M. Yano, K. Nakajima, M. Sakuraba, S. Sato, "VLSI design of a neural network model for detecting planar surface from local image motion", The 25th Int. Conf. on Artificial Neural Networks (ICANN 2016), 2016年09月06日~09日, バルセルナ (スペイン) .

⑤ H. Akima, S. Moriya, S. Kawakami, M. Yano, K. Nakajima, M. Sakuraba, and S. Sato, "VLSI implementation of a neural network model for detecting planar surface from local image motion", The 3rd Int. Symp. on Brainware LSI, 2016年02月26日~27日, 東北大学 (宮城県仙台市) .

⑥ 秋間学尚, 守谷哲, 川上進, 矢野雅文, 中島康治, 櫻庭政夫, 佐藤茂雄, 「大脳皮質視覚野において局所運動を検出する神経回路網モデルの LSI 化」, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 2015年06月23日~25日, 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄県恩納村) .

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

秋間 学尚 (AKIMA, Hisanao)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号: 40707840

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

川上 進 (KAWAKAMI, Susumu)