

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360194

研究課題名（和文） 能動センシング・認識のための情報論的方法論の確立

研究課題名（英文） Establishing the Information Theoretical Approach to Active Sensing and Recognition

研究代表者

出口 光一郎 (DEGUCHI KOICHIRO)

東北大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：30107544

研究成果の概要（和文）：本課題の研究では、「能動センシングのための情報学」の萌芽を結実化することが主目的で、その理論基盤が確立できた。それとともに、人間の視覚を用いたセンシング動作制御系の仕組みを明らかにし、有効情報を獲得するセンサの構造を考察して、その新しい役割を確立していく道筋を立てた。そこでの主要な導入概念は、2点間での情報の流通量を評価する相互情報量である。すなわち、運動のための視覚センサの役割を解明、動視覚センシングとも呼ぶべき新しいセンシング機構を情報の流れに注目して構築し、体系的な研究につなげていく基盤ができた。

研究成果の概要（英文）：We achieved the main object of this research project to establish a methodology of information theoretical approach for active sensing systems. With this achievement, we have also established an analysis of mechanisms of control in human visual sensing activities. We considered how our human sensors work out their strategy to obtain most effective information. The main key was the “mutual information”, which estimates the amount of information flow between an information source point and its destination. Based on this notion, we accomplished a new framework of description for active sensing systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 21 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
平成 22 年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
平成 23 年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
年度			
年度			
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測理論、能動センシング、情報エントロピー、センシング情報学、グローバルセンシング、運動視覚、画像理解

1. 研究開始当初の背景

センシング（計測）では、物理世界/外界から得られる計測結果としてのデータを、物理法則、すなわち、なにが測定できているかの物理モデルにあてはめることで、測定対象の

状態を定量的に理解する。そこで、異なる対象分野にもモデルの共通性を見出すことで、統一的な視点を持つセンシング技術を構成できる可能性を持つ。例えば、電気分野での抵抗、インピーダンスなどの概念を機械や温

度の分野の物理量へと一般化するなどとする。統一的、統合的なセンシング理論を構築する試みが数多く行われてきた。このような統一的な方法論の構築の試みは、センサの設計の場面で一定の成功を納めてきている。しかし、この試みでは、測定対象に共通性を見出そうという努力に限定されていて、統一的な能動センシングの考え方の確立、特に、センシングをする側の能動的なそれぞれのセンシング行為に対して、その行為選択の良さを定量的に評価する方法の統一性を見出す視点は未だない。すなわち、どのようなセンサを選び、何を計測するか、ある計測データを次の計測のどう生かすか、次にどこを計測するかといった、能動的なセンシング行為のその良さを統一的に評価する見方は、まだ確立されていない。

特に、環境科学や生体計測、社会学の分野での大規模センシングが広く行われるようになり、そこで獲得したビッグデータの取り扱いが重要な研究テーマとなりつつある現状では、「情報を効率よく獲得する」という立場から、情報理論に基づいて、センシング行為の良さを評価するという着想は、有効であると考えられる。あるセンシング行為をとると、対象の状態のあいまいさ、不確かさがどれだけ減少するかを評価する方法論とその具体的な適用を構築することで、能動的なセンシング行為のその良さを統一的に評価する基準を確立し、それをもとに、「効率良く情報を獲得する行為としてのセンシング」という統一的なセンシング理論を構築することが必要である。

2. 研究の目的

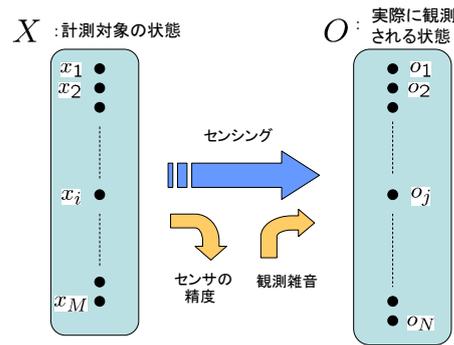
本研究は、(1)センシングを「対象に関する情報を獲得する行為」ととらえ、(2)対象の状態に関する情報の不確かさとあいまいさを、能動的に減少させるためのセンシングの戦略を情報理論の立場から見直し、(3)一般化した「能動センシングの方法論」の構築を試みる。具体的には、情報理論に基づいて、センシング行為の良さを対象の状態に関する情報エントロピーの減少量で評価する。そして、その減少量を最大化するようなセンシングを選択する手法を確立する。

そして、その大規模センシングとビッグデータへの適用の具体化として「能動画像認識システム」を実現し、方法論の有効性を検証する。

3. 研究の方法

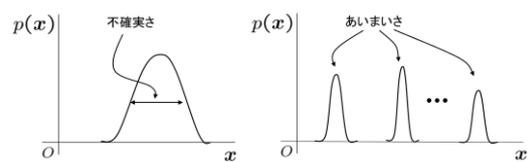
本研究期間では、研究代表者らがこれまで取り組んできている、能動視覚認識システムを実応用例の中心に据えて、「能動センシングの情報理論に基づく方法論」の構築を行う。

次図に示すように、計測対象は x_1, \dots, x_M

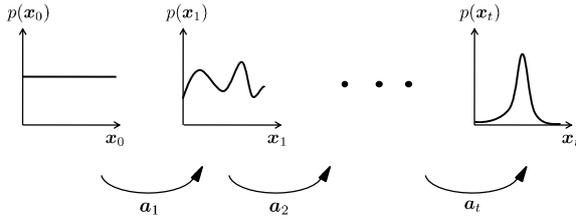


のどれかの状態をとるものとする。例えば本研究で実現する画像認識システムでは、対象の状態は対象が何かを表し、観測される状態とは、対象が何であると観測したかを表す。物理対象では X はこのような離散値ではなく連続値の場合もある。今、実際に観測される O の値をもとに X を推定することが、ここでのセンシングであると考えられる。ただし、必ずセンサの精度と観測雑音その他による本質的な不確かさやあいまいさが存在し、したがって、センシングでは、観測を得るごとに、 x についての確定的な値ではなくどのような値であるかの確からしさとしての生起確率分布 $p(x)$ (または、 X に関する情報の信頼度) を得る、というのがここでの基本である。

すなわち、観測ごとに、例えば下図に示すように、このような意味での状態に対する「不確かさ」や「あいまいさ」がセンシングには付きまとう。いずれの場合も確率密度の分散が大きいほどその観測は不確実であり、一方、分散が小さい、すなわち、確率密度が単峰でピークが鋭いほどその推定は確実であるということを示している。



したがって、良いセンシング行動(または、センシングの繰り返しの系列)とは、そのセンシングによって状態 x に対して推定される確率密度分布 $p(x)$ になるべく早く単峰の、しかも、なるべく鋭い(すなわち、小さな分散を持つ)分布とするものである。ある時刻 t での「センシングのための行動」を a_t で表す。これは、センサのパラメータ調整や対象を計測する点を選ぶ、センサデータを取捨選択するなどの「行動」を表す。「望ましいセンシング行動」の系列 a_t, a_{t+1}, \dots とは、図に示したように、その計測行動を順次繰り返す。



返すことで、 $p(x)$ が単峰となるように選ばれた系列であると言える。

確率密度分布の単峰性とその鋭さは、情報エントロピーによって評価できることが知られている。状態があいまいなほど、エントロピーは大きい。したがって、良い計測とは、なるべく大きくエントロピーを減少させる行為ということになる。この情報エントロピーの減少量を最大化するセンシング行為を選択する指針を、本研究によって与える。ここで、このエントロピーの減少量は、「相互エントロピー」と呼ばれる量にあたる。したがって、各センシング行為における計測値 0 から状態 X の推定において、この相互エントロピーをセンシング対象のモデルからどのように定式化でき、それを最小化する計測行動 a をどのように導くかが、本研究での課題であった。

このため、平成 21 年度は、(研究項目 1) 画像計測における視覚センサと、視覚情報処の役割に関する調査とデータ収集を行い、問題点の確認、整理、体系立てを行い、(研究項目 2) 能動的な視覚によるロボットの行動の特性を考察し、運動の自由度、環境条件を拡張した実験システムによって、画像計測に当てはめた提案手法の有効性を検証した。

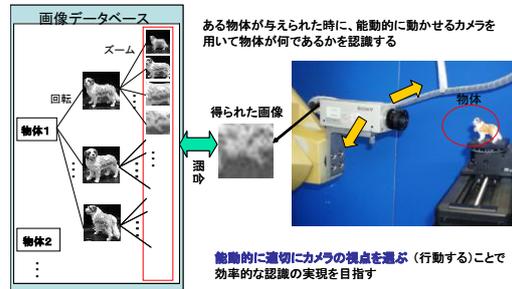
22 年度は上記を引き続き行うとともに、後半からは、(研究項目 3) 3D カメラを中心とする視覚システムを用いて、実環境の認識と計測のための能動的な行動の制御の検証を行った。それに基づいて、(研究項目 4) 研究を総括し、実用的な実環境下における画像認識を含む、さまざまなセンシングシステムの構築の基となり得る、能動計測の普遍的アプローチ構築の理論の確立に向けた準備を行った。

そして、23 年度には、21, 22 年度に得られた成果をもとに、実センシング環境のモデリングのもとに手法を一般化し、実環境の認識と計測のための行動の制御の基本原則として、能動的なセンシングの有効性を検証した。それに基づいて、画像計測・画像認識から一体となったセンシングの行動制御システムを構築し、センシング情報学の実用化の例を示した。

4. 研究成果

(1) 能動画像センシングシステムの構築

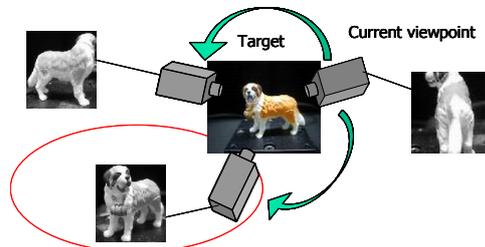
研究の最終目的である「能動センシングの情報学の構築」に向けて、21, 22 年度は画像計測・認識の分野での以下の実例システムを構築して、理論体系の有効性を検証した。



本システムでは、上図に示すように、ロボットハンドの先に取り付けた可動カメラ（能動カメラ）にて対象物体を観察し、予め構築してある画像データベースを参照して、物体が何であるかを特定する。このとき、対象のカメラに対する位置、姿勢などは、未知である。

一般に、任意の視点から適当に撮影した画像により、対象物を完全に特定することは困難である。ある視点からは同じように見える対象が多くありうる。これがセンシングにおける「あいまいさ」にあたる。また、照明や観測雑音の影響、データベースへの登録の不完全さなどによる、対象の特定の「不確かさ」が生じる。

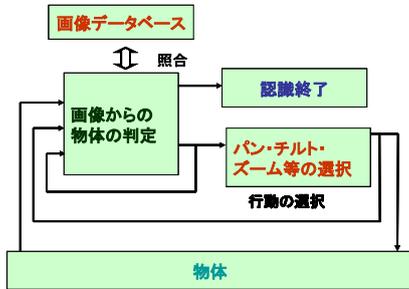
しかし、画像データベースの参照により、「その時点で」対象が何であり得るかの確率（信念）を評価することができる。そこで、続いて、この確率密度分布より前記の相互エントロピーを計算し、その減少量を最大化する次のカメラの視点を選ぶ（能動的に最適なセンシング行動を選択する）ことで効率的な認識を実現する（下図）。



これまでに撮った画像を元に、次にカメラをどこに動かして新しい画像を得ることが、確実に迅速な対象物体認識にとって最適であるかを決定することがここでの問題である。これは、如何に早くセンシングのあいまいさ、不確かさを減少させるには、次にどの

ようなセンシング行動をとるべきか、という問題にあたる。その行動の決定に、下図に示すセンシングのループを組み、「相互情報量の減少」を適用することで、物体認識の実験を行う。

行動選択を伴う物体認識の流れ



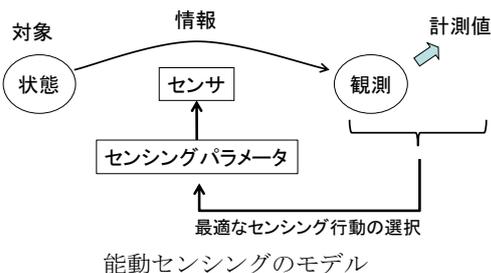
- 物体の判定を行う際には、その時に得た画像だけでなく、今までに選択した行動と得た画像からの物体判定の結果を考慮する
- 物体判定結果より、ある特定の物体である可能性が十分が高くなったら認識を終了するそれ以外の場合は、物体判定結果を受けて、次に選択する行動を決定する

(2) センシング情報学への展開

21, 22 年度に得られた上記システムの構築と実用化検証の成果をもとに、実センシングとしての能動的なセンシングの有効性を検証した。それに基づいて、画像計測・画像認識から一体となったセンシングの行動制御システムを構築し、センシング情報学の実用化の例を示すとともに、研究を総括し、実用的な実環境下における画像認識を含む、さまざまなセンシングシステムの構築の基礎となり得る、能動計測の普遍的アプローチ構築の理論を確立した。

以上の本課題の期間での研究は、「能動センシングのための情報学」の萌芽を結実化する基盤の確立が主目的である。それとともに、副目的として、人間の視覚を用いたセンシング動作制御の仕組みを明らかにし、有効情報を獲得するセンサの構造を考察して、その新しい役割を検討した。この結果は、運動のための視覚センサの役割を解明、動視覚センシングとも呼ぶべき新しいセンシング機構を構築し、能動センシングの立場からの体系的な研究につなげていく。

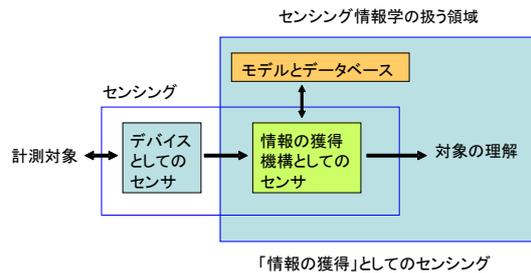
ここでは、下図に示すような、観測結果に応じて、望ましいセンシングのための行動を、



能動センシングのモデル

時々刻々、想起し、その行動によって効率的なセンシングを行う能動センシングを考えた。これは、センシングを「状態」から「観測」への情報の伝達と考える情報獲得として考える基本モデルである。

したがって、下図に示すように、本研究で確立するセンシング情報学の扱った領域は、デバイスとしてのセンサの開発とは切り離れた領域である。この二つは、互いに密接につながるものではあるが、センシングの統合理論の構築の立場からは、切り離して考えるべきであり、また、このような立場での理論構築が十分になされていなかったということが、本研究での主張であり、本研究の大きな成果である。



本研究でのセンシングにおける情報獲得の意味

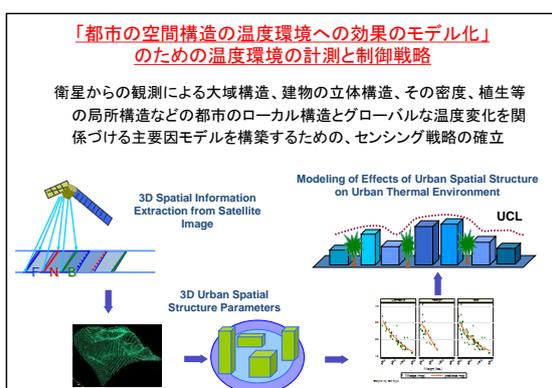
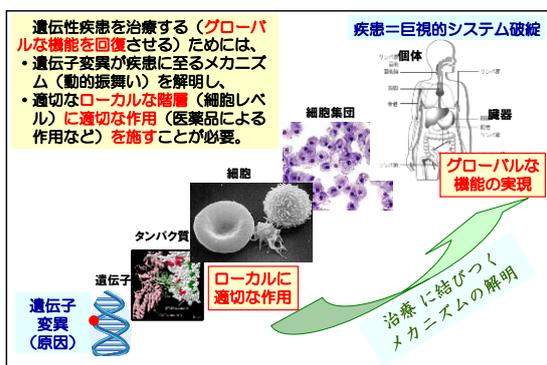
(3) グローカルセンシングへの発展

本研究で構築した枠組みは、特に、大規模なシステムに対して、ローカルなセンシングによってシステムの大域的でグローバルな状態情報を獲得する方法論として有効であることが示されつつある。

すなわち、一般にシステムにおける「結合」の数学的表現はネットワークグラフであり、その構造に関する多くの知見がある。そこで、情報の流れを表すグラフに基づくシステム表現に対して、本研究での「情報を効率よく獲得する」という立場から、ネットワーク上でのセンシング行為の良さを、対象の状態に関する情報エントロピーの減少量で評価する。すなわち、あるローカルなセンシング行為をとると、他のローカルな場所に関する対象の状態のあいまいさ、不確かさがどれだけ減少するかを評価する。この基準をもとに、「効率良く大域情報を獲得する行為としてのセンシング」という統一的なセンシング理論を構築するための知見を得ている。

ここでは、図に示すような環境や生命現象、大規模センシング系や、スマートグリッドなどの実対象に対して、内部の情報の流れをネットワークとして表現し、ネットワーク内の情報の流れを相互情報エントロピーで数量化する手法の開発に着手した。この情報の流れの数量化によって、どのローカルな計測・予測がグローバルな計測・予測へどのように

反映されるかを可視化することができ、グローバル情報を獲得するローカルセンシングを設計することができる。



(4) 研究成果の継承

本研究で開拓、提唱し、確立してきた「センシング情報学」に基づいて、大規模なシステムに対して、ローカルなセンシングによってシステムの大局的でグローバルな状態情報を獲得する方法論を確立するため、24年度からの科学研究費・基盤研究C「センシング情報学の展開—グローバル情報を獲得するローカルセンシング手法」に研究を引き継ぐ。センサネットワークの設計問題、大量画像データからの有効な情報抽出の問題への応用を示す。

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5件)

1. Koichiro Deguchi. Introduction to Pattern Recognition and Computer Vision (Lecture Note), Interdisciplinary Information Sciences, Vol. 17, No. 2, pp. 49-129, 2011. (査読有)
2. T. Okazaki, T. Okatani, K. Deguchi, A

Projector-Camera System for High-Quality Synthesis of Virtual Reflectance on Real Object Surface, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol. 2, 71-83, 2010. (査読有)

3. T. Okatani, M. Wada, K. Deguchi: Study of image quality of superimposed projection using multiple projectors, IEEE Trans. on Image Processing, 18[2], 424-429 (2009) (査読有)

4. T. Okatani, K. Deguchi: Easy calibration of a multi-projector display system, International Journal of Computer Vision, 85, 1-18 (2009) (査読有)

5. 岡谷貴之, 石澤昂, 出口光一郎: 被写界深度ぼけの提示により奥行感を強化する注視反応型ディスプレイ, 電子情報通信学会論文誌, J92-D[8], 1298-1307 (2009) (査読有)

[学会発表] (計34件)

1. Takayuki Okatani, Takahiro Yoshida, Koichiro Deguchi, Efficient Algorithm for Low-rank Matrix Factorization with Missing Components and Performance Comparison of Latest Algorithms, Proceedings of International Conference on Computer Vision (ICCV), Barcelona, Spain, November 12, 2011, (査読有)

2. Koichiro Deguchi, Expanding the Possibility of Image Media by Computer Vision (Invited Talk), China-Japan Symposium on Visual Computing, September 17-19, Changsha, China, 2011(査読なし)

3. 出口光一郎, 特別講演: 安心・安全のための画像認識技術, 日本学術振興会産業計測第36委員会400回研究会記念シンポジウム, 横浜, 3月8日, 2011. (査読なし)

4. Koichiro Deguchi, Keynote address: Mathematical Aspects of Image Processing and Computer Vision (Invited Talk), Symposium on Mathematical Aspects of Image Processing and Computer Vision 2010 (MAIPCV2010), Sapporo, November 29, 2010. (査読なし)

5. Daisuke Abe, Takayuki Okatani, and Koichiro Deguchi, Flexible Online Calibration for a Mobile Projector-Camera System, The 10th Asian Conference on Computer Vision (ACCV2010), pp. 2659-2672, New Zealand, November 21, 2010. (査読有)

6. Koichiro Deguchi, Strategy and Methodology of Science Integration in Transdisciplinarity, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, Fukuoka, August 21, 2009(査読有)

〔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〕

ホームページ:

<http://www.fractal.is.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

出口 光一郎 (DEGUCHI KOICHIRO)

東北大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号: 30107544

(2) 連携研究者

岡谷 貴之 (OKATANI TAKAYUKI)

東北大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号: 00312637

嵯峨 聡 (SAGA SATOSHI)

東北大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号: 10451535