

CUE

京都大学電気関係教室技術情報誌

NO.27

MARCH 2012

[第27号]

.....
卷頭言

大竹 伸一

.....
大学の研究・動向

確率的画像処理と生命・知性のモデル

情報学研究科 システム科学専攻

システム情報論講座 論理生命学分野

.....
産業界の技術動向

NEC 中央研究所 支配人

高島 洋典

研究室紹介

博士論文概要

高校生のページ

学生の声

教室通信

賛助会員の声

編集後記

cue：きっかけ、合図、手掛かり、という意味
の他、研究の「究」（きわめる）を意味す
る。さらに KUEE（Kyoto University
Electrical Engineering）に通じる。

cue は京都大学電気教室百周年記念事業の一環として京都大学電気教室百周年記念事業基金と賛助会員やその他の企業の協力により発行されています。

cue 27号 目次

巻頭言

知と精神の時代

.....西日本電信電話株式会社 代表取締役社長 大竹 伸一..... 1

大学の研究・動向

確率的画像処理と生命・知性のモデル

.....情報学研究科 システム科学専攻 システム情報論講座 論理生命学分野..... 3

産業界の技術動向

ビッグデータ

..... NEC 中央研究所 支配人 高島 洋典..... 8

研究室紹介..... 13

博士論文概要..... 33

高校生のページ

人工衛星の軌道や姿勢を電磁気力で動かす

.....生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 宇宙圏航行システム工学分野 山川 宏..... 57

学生の声

「研究の時間」

..... 工学研究科 電子工学専攻 野田研究室 博士後期課程3年 Menaka De Zoysa..... 63

「研究室生活を振り返って思うこと」

.....工学研究科 電気工学専攻 大村研究室 博士後期課程3年 小路 真史..... 63

教室通信

.....木本 恒暢..... 64

賛助会員の声

マルスシステムの概要とその高信頼性技術について

.....鉄道情報システム(株) 藤井 和彰..... 65

編集後記..... 67

巻頭言

知と精神の時代

昭和 46 年卒 西日本電信電話株式会社 代表取締役社長 大竹 伸一



時代と産業の変遷

第二次世界大戦後の日本は、政府も企業も国民も一丸となって、日本国の復興にしゃにむに邁進した。

戦後の 1950 年代には、物資不足解消のために、量的充足を目指し、「鉄は国家なり」といわれた鉄鋼・造船といった重厚長大産業が日本の産業を牽引した。「トンの時代」である。日本人の勤勉性と統率力と向上心が発揮され、豊かさを求めてひたむきに邁進した時代でもあった。

その後 1960～1970 年代に入り、人々は質的満足を求め、自動車や TV・冷蔵庫・洗濯機といった家電製品が日本の産業を引っ張り、日本は豊かな国へと突き進んだ。日本列島改造論や一億総中流社会といった言葉がマスコミに登場し、日本人は豊かさを実感できる時代になった。自動車や家電製品は概ねキログラムで計量できるので、1960～1970 年代は「キロの時代」でもある。

技術革新はさらにスピードを上げ、人々の欲望を満たすために「産業の米」といわれる半導体産業や金融産業が 1980～1990 年代の日本を牽引した。産業は日本国内を主戦場とみなしているだけでは立ち行かなくなり、米国との競争のみならず、グローバル競争を強く意識せざるを得ない時代となった。グラムを単位とする半導体や貨幣に象徴されるようにこの時代は「グラムの時代」である。

「グラムの時代」のあと、1990 年代から 2000 年代前半は、知的充足を求めた「無重力の時代」となる。即ち、情報（コンテンツ）産業やサービス産業が百花繚乱の時代である。アナログからデジタルへ、更には IP（インターネット・プロトコル）へ技術は進化し、コンテンツ産業という新分野が出現した。コンテンツやサービスは重さがなく、こういった産業がもてはやされる時代は「無重力の時代」である。

「量」から「質」、更には「知」へ

こうしてみると、産業に求められる要素は、時代とともに「量」から「質」へ、更には「知」へと変化している。2000 年代後半からは、情報通信技術のイノベーションもあり、ライフスタイルが変わりつつある。Facebook や YouTube、Twitter などのソーシャルメディアといわれるサービス産業が次々に現れている。また環境に優しいグリーンイノベーションも注目を集めている。明らかに価値観を含めたライフスタイルは変化しつつある。新しい文化創造やライフスタイル変化の時代は、言い換えれば「知の時代」である。

だからといってこれまでの産業が衰退したという訳でもない。例えば自動車産業についていえば、半導体を活用した自動制御技術により自動車の運転をより簡単に安全にしているし、更に GPS と連動したカーナビだけでなく、車に乗ったままでオフィスと同じ環境で作業ができるなど、グラムの時代・知の時代をうまく乗り切っている。

今後も、知（知識）を活用した新たな産業が創造されていくだろう。スマートグリッド・スマートシティもそのはしりである。「知」の先は「精神」である。

先人の教え

「知」は時代とともに大いに進化するが、一方「精神」はどうであろうか。

福沢諭吉は「学問のすゝめ」の中で、“愚民の上に苛（から）き政府あれば、良民の上には良き政府あるの理なり。故に今、我日本国においてもこの人民ありてこの政治あるなり。”

寺田寅彦は「天災と国防」の中で、“悪い年回りはむしろいつかは回ってくるのが自然の鉄則であると覚悟を定めて、よい年回りの間に充分の用意をしておかなければならないということは、実に明白すぎるほど明白なことであるが、またこれほど万人がきれいに忘れがちなこともまれである。少なくとも一国の為政の枢機に参与する人々だけは、この健忘症に対する診療を常々怠らないようにしてもらいたい。”と書いている。

今回の東日本大震災や福島第一原子力発電所事故の処理のまずさと遅さは、日本の指導者の精神の稚拙さが露呈したとしか言いようのない事態である。

リーダーは五つの顔を持つとも言われる。自分自身の考えを持ち、筋を論理的に組み立て話す哲学者の顔。物事を達成するための戦略家の顔。部下や相手の心の動きをつかみ、動かす心理学者の顔。部下や後継者を育てる教育者の顔。求心力を働かせて、部下をまとめる演出家の顔。

ここ数年の日本国の指導者を思い起こすにつけ、しっかりとした指導者を選ぶことが国民の義務であると痛感する。

知と精神の時代

日本は、今、国難の時代にある。国の借金は膨大なものとなり、少子・高齢化社会との認識は共有しているものの、年金や医療等の社会保障制度改革も遅々として進まない。EPA や TPP の本格的な議論にも入れない。日本企業の海外移転は進み、国内産業の空洞化が一層進んでいる。このような時代であるからこそ、日本が得意とする技術革新（イノベーション）を推し進め、「知」を活用した産業を創造し、グローバルな競争に打ち勝っていかなければならない。

科学技術は、価値観を含めたライフスタイルを変化させる力を持っており、資源の乏しい日本国にとって国富を生む源泉である。このためには、学生の子の精神の鍛錬を始め大学が果たすべき役割は重い。

と同時に日本人が古来より持っている大和精神を矜持し、この危機を乗り越えなくてはならない。まさに、一身独立して一国独立する事に他ならない。

大学の研究・動向

確率的画像処理と生命・知性のモデル

情報学研究科 システム科学専攻 システム情報論講座 論理生命学分野

教授 石 井 信

講師 大 羽 成 征

助教 前 田 新 一

1. はじめに

われわれ人間の脳の情報処理機械としての機能を考えるとき、「学習するシステム」の観点が不可欠です。情報処理機械としての脳の機能とは、周りの状況を入力し、これに対する適切な理解に基づいて、適切な行動判断を出力することです。適切な判断のために、脳は入力毎にリアルタイム性の高い計算を瞬時にに行い続けています。これは多数の神経細胞が同時並列に働いていることによる演算性能の賜物とも言えますが、脳の機能を理解するために演算性能の高さに着目するのみでは足りません。入力される情報の意味・意義の理解は、生まれてから何年何十年をかけて積み重ねてきた経験に基づく意味世界と照らし合わせて初めて生まれるものだからです。経験の蓄積から意味世界を創りだしてゆく「学習するシステム」があるからこそ、目の前の入力を瞬時に位置づけ、瞬時に理解し、瞬時に適切な判断につなげることができるのです。

我々の具体的な研究対象は、脳、脳を構成する神経網、神経網を構成する個々神経細胞、脳によって構成される視聴覚、運動制御、高次行動決定などのシステム、さらには癌細胞その他の挙動を調べるシステム生物学から、これらを扱ううえで必要な理論基盤の研究、そしてその工学応用に及びます。広範な対象のさまざまな階層のどこを考える際にも、「学習するシステム」の観点が欠かせません。

「生命」と「知性」はまわりの環境に応じて自らを作り変える「学習するシステム」です。論理生命学分野では「生命」・「知性」・「学習するシステム」に関わる広範にわたる研究を、ボトムアップの実験科学のアプローチと、トップダウンの理論的アプローチの2つの方向から行なっています（図1）。

本稿では、我々が行なっている研究のなかでも視覚システムと画像情報処理に関わるものについていくつかスポットを当てて紹介いたします。

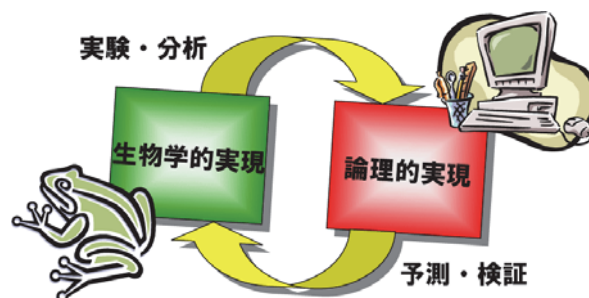


図1：論理生命学の枠組み

2. 生成モデルと因子化

視覚的情報の蓄積によって意味世界を構成するための理論は、画像統計学の名前で知られています。画像統計学では、意味世界の構築をデータ生成モデルという考え方をを用いて説明します。

一連の画像データを蓄積した結果に基づいて、一枚一枚の画像の意味を知りたいとします。生成モデルの考え方では、隠された意味特徴（たとえば一人の具体的な顔）を想定し、確率的なノイズを加えるプロセスを経て、実際の観測画像が「生成」されるプロセスを仮定します。このプロセスを生成モデルと呼びます。次に、一連の画像データの蓄積から、このプロセスの詳細を決める変数を決定します。すると、この生成モデル逆に使うことによって、一枚の画像からその裏にある隠された意味特徴を瞬時に計算して決めることができるようになります。生成モデルの応用のなかでも、理論的に重要であり応用上の展開が広いものとして、因子化と再構成とがあります。

因子化とは、観測の一つ一つを少数の因子の重ね合わせとして理解するモデルのことを言います。この場合、重ねあわせの重み係数が「生成モデルにおいて隠された意味特徴」となります。この際、何を因子とするかを経験に基づいてあらかじめ適切に決定する必要があります。例えば千差万別の人間の個性に対して、良い因子化を行えば優れた人間理解に繋がるかもしれませんが、悪い因子化を行えば無根拠な差別に繋がるかもしれません。画像処理においても、良い因子化は優れた画像理解・画像処理につながります。

因子化は、人間の脳においても重要な計算原理のひとつであると考えられており、その証拠として、ヒトや類人猿の脳の視覚野において画像パッチの因子として反応する神経細胞が見つかっています。これらは、視野に入力される一定の形状に対して特異的に反応するフィルターとして活動します。計算機上で一般の自然画像を大量に用意して画像パッチの因子を求めると、哺乳類の神経細胞が示す「因子」機能と酷似した因子が得られます。

図2は画像パッチの因子化の一例です。画像から、小さな（例えば15×15ピクセル程度の）領域を切り出します。これを画像パッチと呼びます。元の画像が白～灰色～黒のグレースケール画像であった場合、各ピクセルの輝度を適当な範囲内の実数値で表すことができますので、ひとつのパッチは数値ベクトル（この例では225次元実数値ベクトル）で表すことができます。画像パッチの因子化では、ひとつひとつのパッチ画像を、少数の基底パッチ \mathbf{u}_k の線形和 $\sum_k v_k \mathbf{u}_k$ で表します。基底パッチを適切に求めることができれば、ひとつひとつの観測パッチを少ない個数の比例係数 $v_1 \cdots v_K$ で表すことができます。

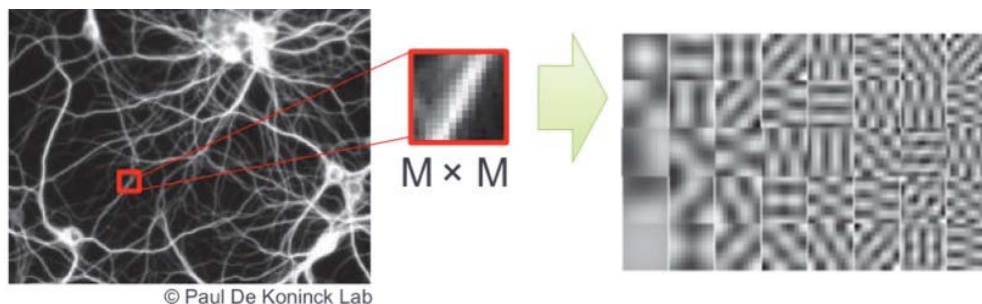


図2：画像パッチの因子化。画像の一部を取り出したパッチを、少数因子パッチの和で表す。

画像パッチ因子化の典型的な応用は、画像復元です。あらかじめ適切に定めた因子パッチがあれば、これをノイズの大きな画像や、傷のある画像のパッチに適用することで比例係数 $v_1 \cdots v_K$ を推定し、そして推定した比例係数に基づいて因子パッチの線形和を求めることで、傷の無いパッチを復元することができます。画像中の全ての場所でパッチを復元すれば、画像全体でノイズや傷の除去ができます。

最近の研究では、不完全なデータばかり、しかも少量しか得られないような状況から、よい因子化を行う方法を工夫しています。こういう状況は実際に珍しくありません。例えば顕微鏡画像データから稀少な構造を検出したいとき、探索テンプレートとして使える典型例は少数しか得られません。そこで、少数のパッチを学習する「視点」を様々に増やすことで実質的な学習の効率を高める工夫が功を奏する場合があります。神経細胞の繊維構造を検出する特殊用途のための因子化モデルは、一般用途の因子化モデルよりも高いノイズ除去性能を示しました。[1]

3. 再構成と超解像と X 線 CT

生成モデルの応用において再構成も重要な考え方です。直接観測できない隠れた真の対象と、ノイズ付加プロセスとを想定し、これらに基づいて限られた観測が「生成」されると仮定します。ノイズを含む有限の観測に基づいて、直接観測できない隠された真の対象の構造を「再構成」するのです。

超解像は、解像度の低い観測画像を多数集めることによって、直接観測できない高解像度画像を再構成する、という画像情報処理技術です。初めて見る人には魔法のようですが、基本的な仕組みは難しいものではありません。

超解像は、解像度の低い観測画像を多数集めることによって、直接観測できない高解像度画像を再構成する、という画像情報処理技術です。初めて見る人には魔法のようですが、基本的な仕組みは難しいものではありません。

同じ対象を複数回撮影するとき、これを細かく見ると撮影位置はほんの少しずつだけお互いにズレています。図4の (a) は小さな○は、数字の8を3x3の低解像度で2度撮影したときの、各ピクセルの中心点を示しています。撮影結果は図 (b) と図 (c) のようになりました。どちらを見ても一枚の画像から撮影対象の形は全く読み取れませんが、大量の撮影がお互いにほんの少しずつでもズレてくれさえすれば対象の形を知るための情報が増えてゆくことが分かります。超解像処理では、このように少しずつ異なる観測の結果を集めて再構成することで、解像度の高い画像を得ます。

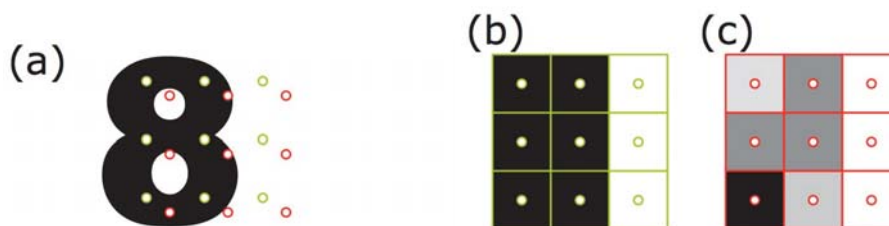


図4：複数画像に基づく超解像の仕組み。

私たちは生成モデルによる再構成を改善するために、「背景知識利用」の方法を工夫しています。図5は、雲に遮蔽された衛星画像9枚に基づく超解像の結果です。(a) を典型例とする衛星画像9枚から地上の様子を知ることが目的です。雲に遮られているせいで、地上の一部しか見えていません。また、一枚一枚の解像度は100ピクセル×100ピクセルと粗いものです。これらを「超解像処理」することで、(e) のようなクッキリした地上画像を得ることができます。単なる平均 (b) や中央値 (c) などの統計処理ではぼんやりした映像しか得られません。超解像 (d) によって400ピクセル×400ピクセルの詳細

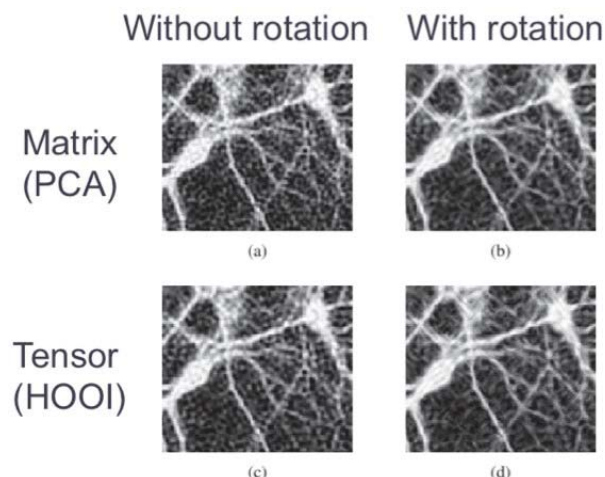


図3：画像因子化による画像ノイズ低減法の比較。パッチ回転とテンソル因子化法の組み合わせ（右下）によってノイズ低減の精度が増した。

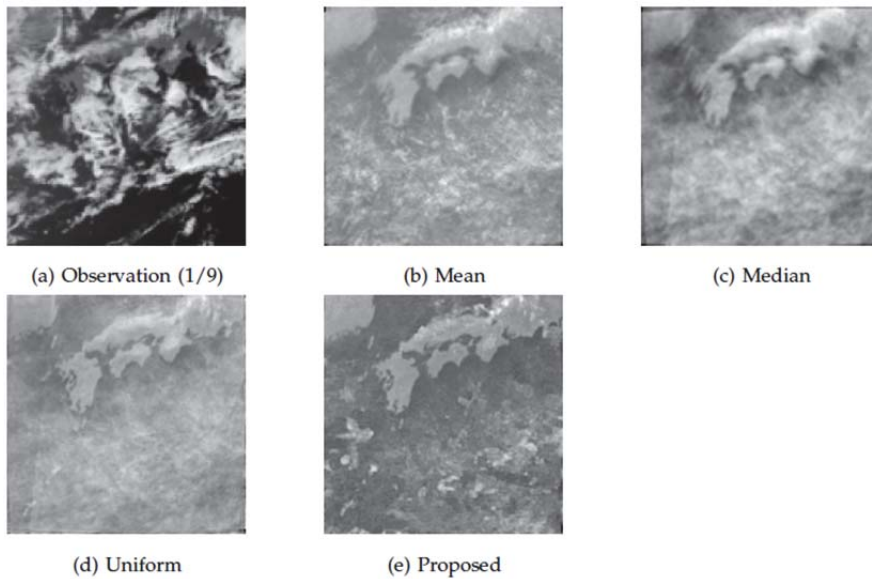


図5：雲に遮蔽された衛星画像9枚に基づく4×4超解像の結果。(a)使用した9枚の画像のうち一枚。(b)9枚の平均をとったもの(c)9枚の中央値をとったもの(d)雲による遮蔽を考慮せずに超解像を試みた結果(e)提案法。遮蔽を推定しつつ超解像を行った結果。

細画像が得られますが、雲による遮蔽の影響があり得ることを背景知識として利用する特別な解析を行うと(e)のように全体的にハッキリします[2]。

X線CTは、様々な角度から対象物にX線を照射して得られる投影像をもとに、その対象物の内部をX線吸収係数の違いによって可視化します。非侵襲で人体内部の組織構成を推定することができるため、医用画像診断の重要なツールとなっています。この手法も原理は超解像と同様であり、複数の方向から照射されたX線の吸収量データを集めて、内部構造を「再構成」しています。

X線CTによる再構成の解像度を高めるために最も簡単な方法は、より多くの角度から投影像を得ることや、X線照射量を増やして投影像の信号雑音比を向上させることです。しかしこれらによって、X線被曝量を増大させてしまうのは人体を対象とするときの大きなデメリットとなります。より少ない被曝量でより良い再構成結果を得るために、「背景知識利用」の工夫が効きます。図6は、撮像対象である人体の各組織のX線吸収係数のおおよその分布を背景知識として利用することで、性能を向上させた例です。とても高いX線吸収係数をもつ義歯が含まれるとき、従来法(FBP法,最尤推定法[MLCT])では強いゴーストが発生しますが、「高いX線吸収係数を持つ箇所があり得る」こと「同様の吸収係数を持つ箇所は一塊をなす傾向にあること」を背景知識として盛り込んだベイズ法[3]を適用することで推定を改善させました。

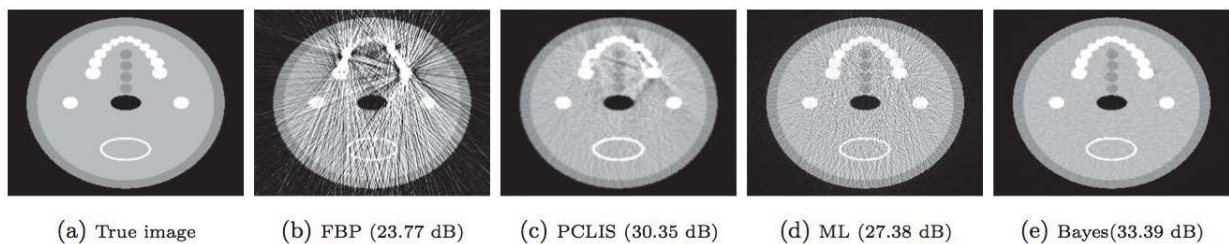


図6：3つの義歯の入った頭部を模したファントムデータに対するX線CT画像再構成の結果。数字はピーク信号雑音比を表し、真の画像との誤差が小さいほど大きな値をとる。

4. 今後のチャレンジ

今後我々がチャレンジしてゆきたい話題の一つに、顕微鏡下動画像データの解析があります。いま、システム神経生物学の最先端では、神経細胞の線維構造と小突起状器官が形成する局所回路の構造と機能が大変にホットな話題となっており、これを調べるべく顕微鏡による撮影手法の工夫も急ピッチで進んでいます。なかでも神経細胞やその小器官を染色する分子蛍光を用いた撮影が盛んに研究されていますが、X線CTと同様に撮影時の光量を増すことで対象を痛める問題があり、信号雑音比を一定以上に増すことができない中で、画像処理によって高い解像度を求めたいニーズがあります。また、こうした撮影を時間に沿って行うことで、神経細胞やその各種細部構造体の動的挙動を知りたいニーズがあります。

ここで「背景知識」を用いた「再構成」を用いた超解像技術や、動画像の「因子化」技術の発展が求められています。本稿2章と3章では因子化と再構成とを別個のものとして説明いたしましたが、生成モデルの立場から考えれば2つを密接に関連付けるモデルは自然な拡張です。動画像は形を持ったオブジェクトと、各オブジェクトの時間的変動から成りますが、動画像中から複数オブジェクトを検出する問題は、画像統計の立場から言えば動画像の因子化に他なりません。限られた光量による撮影画像から、神経細胞の動的挙動を高い時空間解像度で求めるのは、再構成の問題です。すべてを盛り込んだら何が見えるのでしょうか？

ここまで我々の画像処理技術の原理について簡単にご紹介しましたが、技術的詳細をさらにお知りになりたい方は [4] をご覧ください。この先のチャレンジに対しても、同様の原理のとおりデザインした手法が思うように働けば簡単ですがなかなか一筋縄ではいかないのが常です。モデルの妥当性、計算技術の問題、撮影時に混入する思いも寄らないアーティファクトの問題、などなどひとつひとつクリアしてゆくのはなかなか大変です。しかし、開発した技術がピタリとはまることで、誰も見たことのない映像を世界で最初に目の当たりにする瞬間が我々のものになるかもしれないのです。それを夢みながら研究を進めてゆけるのは、学習するシステムによる高度な画像処理研究の世界の大きな魅力と言えるのではないのでしょうか。

- [1] Kouno, M., Nakae, K., Oba, S., and Ishii, S. (2011) Microscopic image restoration based on tensor factorization of rotated patches. The Seventeenth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2012, 902-905.
- [2] Kanemura, A., Maeda, S., Fukuda, W., and Ishii, S. (2010) Bayesian image superresolution and hidden variable modeling. Journal of Systems Science and Complexity, 23 (1), 116-136.
- [3] Fukuda, W., Maeda, S., Kanemura, A., and Ishii, S. (2010) Bayesian x-ray computed tomography using material class knowledge, in ICASSP, pp. 2126-2129.
- [4] 前田新一, 兼村厚範, 石井信. (2011) 確率システムの立場からの画像情報処理技術. システム制御情報学会誌, 55 (12), pp.532-538.

産業界の技術動向

ビッグデータ

NEC 中央研究所 支配人

高島 洋典

1. はじめに

大量の情報、すなわちビッグデータを利用することによって新たな価値を見出そうという動きが活発になっている。従来から、コンビニエンスストアの販売時点データ（POS データ）を分析することによって、売れ筋商品の見極めや陳列の配置を最適化するような試みが行われていた。最近になって、GPS を装備した携帯電話やカーナビの普及、また、IC カード乗車券や電子マネー、RFID など使われており、あらゆる人や物のセンシングが可能になってきた。また、クラウドコンピューティングの一般化や、ソーシャルネットワークサービスの急拡大により、これまでは分散していた情報が一元的な管理のもとに利用可能になってきた。

これまでは貯めるだけで精一杯であったが、大規模データ処理技術の発達により、これらのビッグデータを利用することによって、新しい価値を創造する試みが始まっている。本稿ではこのようなトレンドを紹介するとともに、今後の方向性や、対応する技術などについて述べる。

2. ビッグデータを取り巻く状況

マッキンゼーグローバルインスティテュートの報告によると、ビッグデータの創り出す価値は、

- ▶ 米国のヘルスケア産業に 3000 億ドルの価値を提供
(薬、患者、臨床などのデータ活用)
- ▶ ロケーションデータの活用により世界で 6000 億ドルの価値を消費者に提供
(行動データの利用)
- ▶ 米国の小売業の営業利益率を 60% 向上可能
(顧客、販売、運営データの利用)
- ▶ 欧州の政府機関に 2500 億ユーロの価値を提供
(公共データの公開による効率化、新サービスの提供)

などと言われている [1]。

また、表 1 のような領域においてもビッグデータの活用が検討されている。

表 1 ビッグデータの活用が検討されている領域の例

適用領域例	内容
パブリックセーフティ (ボードコントロール)	・数億人規模のリアルタイムな顔認証の実現により、待ち時間削減、処理件数増大
運輸	・配送車の位置、IC タグによる物品出入管理、交通情報等の分析処理による、予定時刻通りの物品配送、配送時間の短縮
交通	・プローブカーから得られる交通情報 / センサ情報の分析処理による、到着時刻予測、渋滞解消、安全確保、エネルギー効率最大化
金融	・銀行における入出金情報から口座不正利用を発見、犯罪利用を予防 ・世の中の様々な要因を考慮した金融商品のアルゴリズムトレード
通信	・携帯電話の通話・通信ログ解析による、通信ネットワークの混雑解消、輻輳回避
データセンタ	・サーバのセキュリティログ、アクセスログ、エラーログなどの収集・分析による、サーバ機器等の障害早期復旧、運用管理の省力化

このほかにも、例えば、温泉街における宿泊客の行動データを収集・分析することにより温泉街としての付加価値を高める試みや、天気予報、渋滞予測などすでに多くの情報活用が始まっている [2]。

画像認識や自然言語処理の領域では、従来は精緻なモデルとエレガントなアルゴリズムによって、例えば文字認識の精度を上げたり、機械翻訳の正確性を向上させてきた。しかし、最近では圧倒的な量の例文を学習することにより、人間がルールを書き下すことなくこれまでのものより正確な処理が可能になってきた。多少野蛮とも思えるやり方であるが、大量のデータが有する迫力を感じる。

3. サイバーフィジカルシステムとビッグデータ

物理システムとネットワーク化されたコンピューティングによって、新たなシステムが生まれつつある。これをサイバーフィジカルシステムと呼んでいる。サイバーフィジカルシステムでは、物理システムに埋め込まれた通信とコンピューティング機能により、物理システムが新たな能力を持つようになる。たとえば最近の自動車には多くのコンピュータが搭載され、各種の制御を行っている。従来の機械式の制御機構では得られないような高度な制御がソフトウェアによって可能になっている。自動車のほかにも、小さいものでは心臓のペースメーカーからロボット、大きなものでは化学プラントや電力ネットワークなどもサイバーであると同時にフィジカルなシステムである。これらは輸送や防衛、医療、農業、など様々な領域でますます重要になってくると思われる [3]。

特に、これからの社会基盤は高度にネットワーク化され、通信とコンピュータを有機的に結びつけ、安心・安全かつ効率的な生活を実現することが期待される。本来、サイバーフィジカルシステムとビッグデータは異なる概念であるが、両者が結びつくことによって、安全・安心な社会を実現したり、地球環境と人類の共存・共生を実現したり、あるいは産業競争力を実現するための社会のインフラとなることができる (図 1)。



図 1. 社会インフラとしてのサイバーフィジカルシステム

多種多様な情報の取得・収集を経て、それらの蓄積・管理を行い、さらに分析を加えることにより、実世界に対してより効果的な働きかけが可能になる。このそれぞれの段階において、ビッグデータとしての大規模性、リアルタイム性、データの多様性・複雑性への対処が必要になる。

以下では、一例として NEC の中央研究所で取り組んでいる、ビッグデータに対応するための技術開発について述べる。

4. 大規模データ処理技術の概要

ビッグデータの分析には、2つのタイプがある。一つは一定期間蓄積した大量データを一括処理して知見や法則性を見出す蓄積データ処理である。一方、データを蓄積せずに通信の途中で処理し、データを収集し終わった段階で処理が完了するような方式もある。これをデータストリーム処理と呼ぶ(図2)。これらは単独で行われることもあるが、図2の右側に示したように、蓄積データ処理で得られた結果をルールという形でストリーム処理に利用するということもある。以下、それぞれの技術について紹介する [4]。

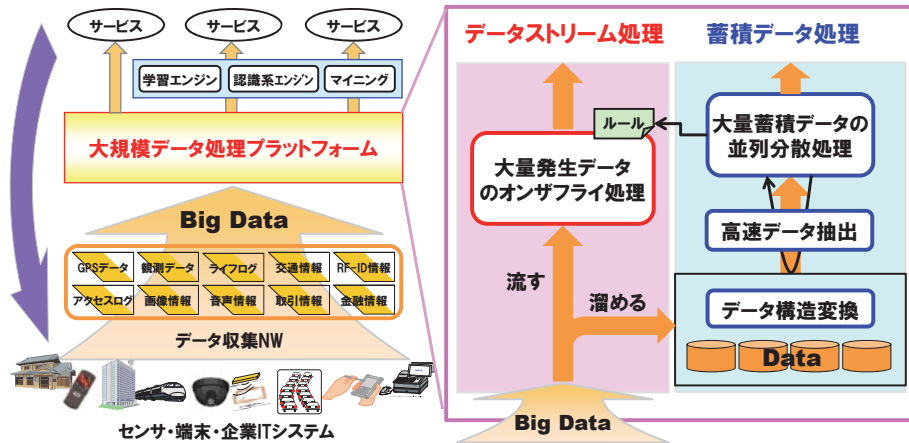


図2 大規模データ処理技術の構成

4.1 蓄積データ処理技術

蓄積データ処理には3つの要素がある。

(1) データ構造変換

データ分析アプリケーションには、それぞれに適したデータ構造があるため、必要に応じて分析前にデータ構造を変換しなければならない。たとえば、時間順に並んでいる利用者ごとの位置データを地区別に並べ替えたりすることがある。このデータ構造変換をデータの蓄積と並行して実行できるようにし、従来は前日の蓄積データを分析していたのに対して、約5分前の直前のデータの分析を可能とした(図3)。こうすることによって、きめ細かな対応が行えるようになる。

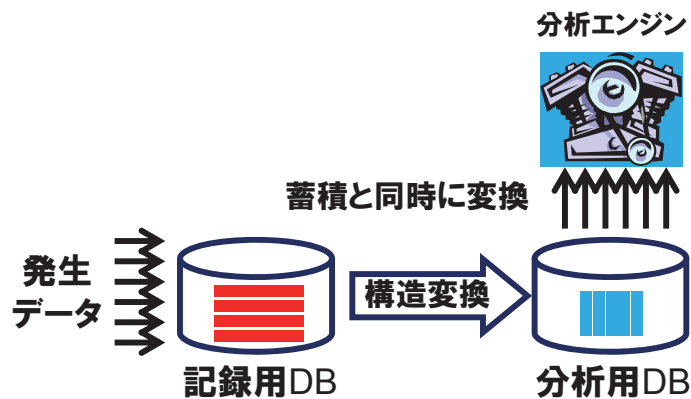


図3 データ構造変換

(2) 高速データ抽出

データが複数ノードに分散格納されている場合、位置情報等の多次元で表現されるデータの検索を高速化するためには、検索空間を絞り込み、アクセスするノード数を最小化することが鍵となる。多次元データの分散配置の最適化およびインデックスの最適化により、従来技術と比較して10～100倍の高速化を実現した。

(3) 大規模データの並列分散処理

大規模データを高速に処理するためには、処理を分割して並列に実行する並列分散処理が有効であるが、並列化の効果を最大限に引き出すためには、通信オーバーヘッドを削減する通信最適化が重要になる。特に、大規模分散システムにおいては、ネットワークスイッチがボトルネックになることが問題となっている。この問題を解決するため、ネットワークスイッチを考慮してデータとサーバ間の関係をモデル化し、このモデルから通信コストが最小となるデータ配置の最適解を求める手法を開発した。これにより、データとサーバ間の通信コストを最小化する処理配置を求めることが可能になった（図4）。

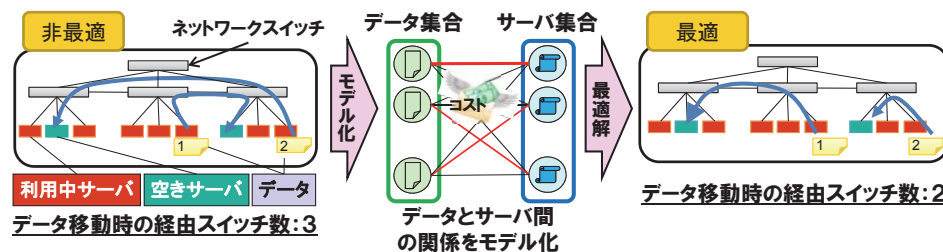


図4 大規模データ並列分散処理における通信経路の最適化

4.2 データストリーム処理技術

クラウドサービスに集められる情報を活用して、ユーザの位置ベースのレコメンデーションや、道路の渋滞情報、電力の使用状況の提供など、「いま」の状況に即したサービスの要求が高まっている。

(1) リアルタイムなマッチング処理

センサ等のデータソースから収集されたデータ（イベント）と、アプリケーションが予め設定したデータの配信条件（ルール）とを高速にマッチングし、データを蓄積せずにアプリケーションにとって必要な情報のみを提供する技術を開発している。これによりユーザは、刻一刻と変化する情報をリアルタイムに把握できるようになる。

(2) スケーラブルなシステムアーキテクチャ

スケールアウト型データストリーム処理アーキテクチャ（図5）により、データのマッチング処理は、サーバの追加に比例して性能を高めることができる。

このアーキテクチャは、大量に発生するデータを高速に振り分けるディスパッチャと、ディスパッチャで振り分けられたデータを複合イベント処理（CEP：Complex Event Processing）するイベントプロセッサの2段階で構成されている。ディスパッチャ間、イベントプロセッサ間で相互に情報を参照せずに、独立に処理を実行できるようにルールを配置することで、スケールアウト可能なアーキテクチャを実現した。従来は各サーバが独立に処理できず、スケールアウトできなかったという課題を、ディスパッチャレイヤでの構造化P2P技術を応用したルール分散配置方式と、システム全体でのルール配置の最適化アルゴリズムを開発することにより解決している。

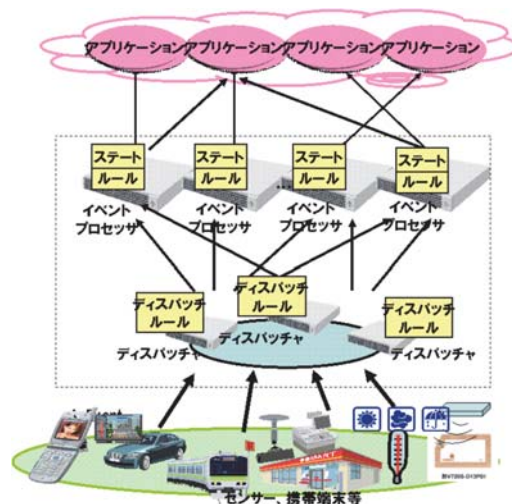


図5 スケールアウト型データストリーム処理

5. おわりに

ビッグデータを取り巻く状況と、それを支える技術について述べた。ここで重要なことは、技術が新たな価値を生み出すのではなく、ビッグデータをいかに活用して新たなサービス、価値を創り出すかということである。情報通信技術は交通や物流、医療や農業、あらゆるサービス産業の新しい価値を創造することができる。さらにこれまで個別に存在していたサービスを統合し、まったく新しいサービスを提供できる可能性も持っている。個別の産業の高度化とともに、融合による新たな産業創出の可能性を提供しているのである。

これらの動きは当然ながらグローバルなレベルで進展しており、わが国の競争力の維持、向上のためにも新産業の創出とそれを支える技術開発に取り組んでいかなければならない。今後とも、産業界としては大学とも連携し、研究開発に取り組む所存である。

参考文献

- [1] http://www.mckinsey.com/Insights/MGI/Research/Technology_and_Innovation/Big_data_The_next_frontier_for_innovation
- [2] 「ビッグデータ大作戦」 日経コンピュータ 2012. 2. 2
- [3] “Cyber Physical Systems”, <http://varma.ece.cmu.edu/summit/CPS-Executive-Summary.pdf>
- [4] 「ダントツで骨太な成果創出に取り組む NEC 中央研究所」 ビジネスコミュニケーション 2012. 1

研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は、下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(☆は「大学の研究・動向」、#は「高校生のページ」に掲載)

電気関係研究室一覧

工学研究科(大学院)

電気工学専攻

複合システム論講座(土居研)

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野(松尾研)

電磁工学講座超伝導工学分野(雨宮研)

電気エネルギー工学講座生体機能工学分野(小林研)

電気エネルギー工学講座電力変換制御工学分野(引原研)

電気システム論講座電気回路網学分野(和田研)

電気システム論講座自動制御工学分野(萩原研)

電気システム論講座電力システム分野

電子工学専攻

集積機能工学講座(鈴木研)

電子物理工学講座極微真空電子工学分野

電子物理工学講座プラズマ物性工学分野

電子物性工学講座半導体物性工学分野(木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野(松重研)

量子機能工学講座光材料物性工学分野(川上研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野(野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野(北野研)

光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野(高岡研)

デバイス創生部門先進電子材料分野(藤田研)

情報学研究科(大学院)

知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野(黒橋研)

知能メディア講座画像メディア分野(松山研)

通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野(吉田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野(守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野(高橋研)

集積システム工学講座情報回路方式分野(佐藤高研)

集積システム工学講座大規模集積回路分野(小野寺研)

集積システム工学講座超高速信号処理分野(佐藤亨研)

システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野(石井研)☆

システム情報論講座医用工学分野(松田研)

エネルギー科学研究科(大学院)

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野(中村祐研)

エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野(野澤研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野(白井研)

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野(長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野(水内研)

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野(佐野研)

生存圏研究所

中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野(山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野(津田研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏電波科学分野(山川研) #

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野(大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野(篠原研)

ベンチャービジネスラボラトリー

高等教育研究開発推進センター

情報メディア教育開発部門(小山田研)

学術情報メディアセンター

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野(中村裕研)

複合システム論講座（土居研究室）

http://turbine.kuee.kyoto-u.ac.jp/

日帰り手術における麻酔鎮静度・鎮痛度制御の研究

日帰り手術においては、覚醒後の患者の早い回復が求められるため、適切な麻酔状態に維持しながら、薬剤の投与量をできるだけ低減することが望まれます。最近では、体内での代謝が早い麻酔薬 propofol と鎮痛薬 remifentanil が併用されるようになってきていますが、これらは相互作用を持ち、また remifentanil には呼吸抑制効果があるため、適切な鎮静・鎮痛状態を維持しながら投与量を低減するにはきめ細かい調整が必要で、麻酔医の負担軽減のためにも自動制御システムの開発が望まれています。われわれは、そのようなシステムの開発を目的として、まだ確立されていない鎮痛度指標について検討するとともに、両薬剤の相互作用を考慮に入れた鎮静度・鎮痛度制御の研究を行っています。

図1に手術中の刺激等による脈拍と脳波に基づく指標である Entropy Difference (ED)[1] の変化の一例を示します。この図からわかるように、強い痛みを感じるときには脈拍や ED のいずれか、または両方の値が大きくなります。そこで、脈拍と ED を組み合わせた鎮痛度指標 S を次式のように構成しました。

$$S = \sqrt{0.0596(P - P_{\min})^2 + ED^2}$$

ここに、 P は脈拍、 P_{\min} は脈拍の最小値です。

次に、図2に示すような薬剤の相互作用とむだ時間（遅れ）を考慮した鎮静度・鎮痛度変化のモデルを考えました。ただし、鎮静度指標としては Bispectral Index (BIS)[2] を、薬物動態モデルとしては両薬剤を併用している文献[3]のモデルを用いることとして、薬剤の相互作用は薬力学モデルで考慮しました。

さらに、このモデルに基づいて予測制御による鎮静度・鎮痛度制御システムを構成しました。このシステムでは、目標値を $BIS = 50$, $S = 4.5$ 、サンプリング周期を 12 秒とし、最小変更可能量を考慮に入れて薬剤の投与速度を決定します。また、最初 10 分間は通常の麻酔時の投与方法に従い、10 分間のデータに基づいて患者毎に薬の効果を求める同定を行った上で自動制御を行います。シミュレーション結果の一例を図3に示します。モデルに誤差がある場合も含めておおむね適切な制御が行えますが、同定精度が不十分であるため、現在改良を進めています。

参考文献

[1] E. M. Mathews, et al.: Br. J. Anaesth., 98, 785/791 (2007)
 [2] J. C. Sigl and N. G. Chamoun: J. Clin. Monit., 10, 392/404 (1994)
 [3] T. Bouillon, et al.: Anesthesiology, 97, 1350/1362 (2002)
 [4] E. Furutani, et al.: SICE Annual Conference 2010, 223/226 (2010)

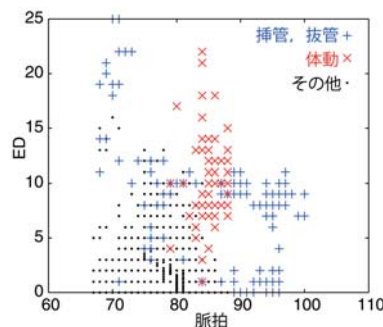


図1: 脈拍と ED の痛みによる変化

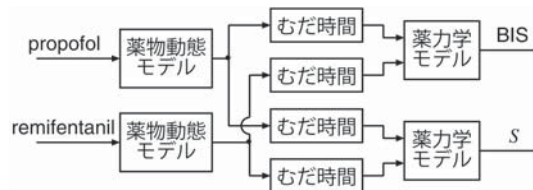


図2: 鎮静度・鎮痛度変化モデル

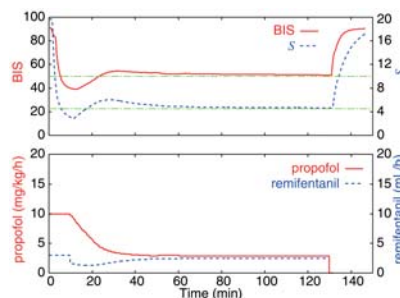


図3: シミュレーション結果

電気エネルギー工学講座 生体機能工学分野 (小林研究室)

<http://bfe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「超高感度光ポンピング原子磁気センサを用いた生体磁気計測」

脳磁図 (MEG) や心磁図 (MCG) 等の生体磁気信号計測は、測定信号が生体組織の導電率の違いに影響されないことから、生体機能の解明や疾患等の診断への応用へ向けた研究が活発に行われている。従来、微弱な生体磁気信号の計測には主に超伝導量子干渉素子 (SQUID) が用いられているが、液体ヘリウムにより極低温状態にする必要があるため、高額な維持コストがかかることが問題となっている。そこで当研究室では、理論的には SQUID を凌ぐ感度を持つとされる超高感度な光ポンピング原子磁気センサ [1] を構築し、それを用いた生体磁気計測に関する研究を行っている。

ここでは光ポンピング原子磁気センサを用いた生体磁気計測の一例として、ヒトの MCG 分布を測定した結果を例示する。MCG は、心臓で生じている電気生理学的活動に伴い発生する磁場を検出することで、心臓の電気生理学的情報を非侵襲的に診断することができる。被験者は図 1 に示す光ポンピング原子磁気センサを組み込んだベッドの上に俯せに寝て、測定位置がセンサセルの真上に来るようにベッド上を移動し計測を行った。参照磁気信号を用いてセンサ感度を計測したところ、生体磁気信号の周波数帯 (DC - 40 Hz) においてはおよそ $100 \text{ fT}_{\text{rms}}/\text{Hz}^{1/2}$ のノイズレベルであり、高温 SQUID に匹敵する感度が得られた。図 2 に、本装置を用いて測定した MCG 分布を示す。原子磁気センサには周波数特性があるため、本装置の周波数応答を予め測定し、それにより計測信号を補正した後、0.5 - 50 Hz のバンドパスフィルタにより呼吸等に起因する緩やかな変動と電源ノイズの影響を取り除いた。測定した各点において応答信号が得られ、ある位置において波形が反転している様子が観測される。それぞれの信号は、一般的な MCG 波形の特徴である Q, R, T 波の各ピークを含み、SQUID により観測される波形とほとんど遜色のないものが得られた。また、その空間分布は磁場の湧き出しと吸い込みを明瞭に示し、心室中隔を流れる電流の方向をほぼ同定することができた。以上のように、本研究では超高感度光ポンピング原子磁気センサを構築し、実際にヒトの MCG 分布を観測することでその信頼性を確認した。

今後は MEG への応用や他のイメージングモダリティとの融合による生体機能の統合解析を目指し、ハイブリッドセルによるさらなる高感度化 [2] や MR 信号の遠隔検出 [3] 等に関する研究を進めていく。

参考文献

- [1] 小林 哲生: “高感度光ポンピング原子磁気センサ (解説)”, 応用物理 **80** (3), 211 (2011).
- [2] Y. Ito, H. Ohnishi, K. Kamada and T. Kobayashi: IEEE Trans. Magn. **47** (10), 3550 (2011).
- [3] T. Oida, Y. Kawamura and T. Kobayashi: IEEE Trans. Magn. **47** (10), 3074 (2011).

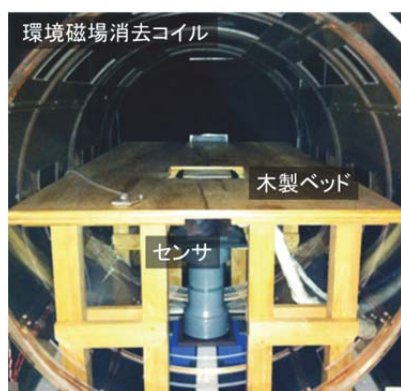


図 1. 実験装置の外観

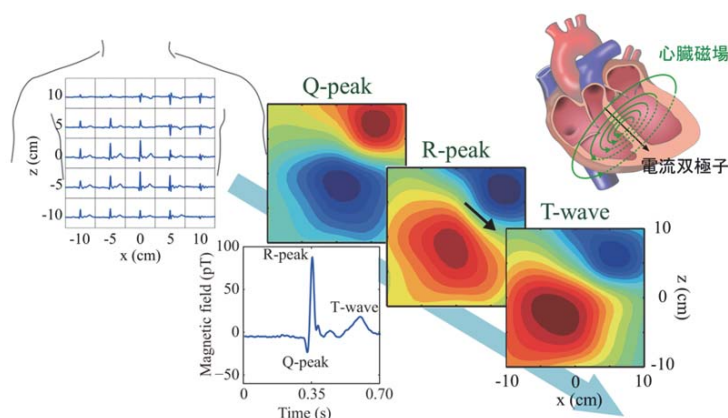


図 2. ヒトの MCG 分布計測の結果

電気システム論講座 電気回路網学分野 (和田研究室)

<http://bell.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「デジタル機器からの電磁雑音予測のための寄生結合を考慮した等価回路モデル」

携帯電話やパソコンを始めとするデジタル機器は高速かつ多機能化の一途をたどっている。これらのデジタル機器には多くの大規模集積回路 (LSI) が使用されており、LSI の高速スイッチングに応じて大きな電磁雑音が発生する。LSI から発生する電磁雑音は周辺機器へ悪影響を与えたり、LSI 自身の誤動作を引き起こす。このため、LSI やそれを実装する回路基板の低電磁雑音設計や耐電磁雑音設計、すなわち EMC 設計が必要となる。デジタル機器の設計段階で電磁雑音の発生量を予測し EMC 設計を行うにあたり、複雑な構造である回路基板の特性を簡略な等価回路モデルで表現し、回路計算により EMC 設計を行いたい。しかし、機器が高速化・高密度化するにつれて、従来ならば無視できた小さな寄生結合を考慮せざるを得ず、膨大な計算時間を要する電磁界シミュレータに頼っているのが現状である。

本研究では、寄生結合や周辺電磁界による影響を考慮に入れた等価回路モデル化手法を提案し、そのモデルを用いて電磁雑音の予測法を検討している [1]。例えば、図 1 に示すようなインターポーザがプリント回路基板 (PCB) 上に実装される場合を考える。インターポーザや PCB の多くは個別に設計され、その等価回路モデルはある標準の実装状態で求められている。しかし、それらを組み合わせた際には互いの導体が接近するため等価回路モデルの各パラメータは変化し、また個別には生じない相互の寄生結合が発生する。図 2 に示すように、寄生結合を考慮した等価回路モデルでは、回路に従来なかった共振や反共振が発生する。これらの共振によって回路内部に多大な電流が流れ外部へ放射される電磁波が増加したり、図 3 に示すように共振の影響によりクロックジッタが増加するなど LSI 自身の回路動作が不安定になることを示した [2]。現在、寄生結合による共振を表現するためのより精度の高い等価回路モデルや、共振の抑制手法について検討している。

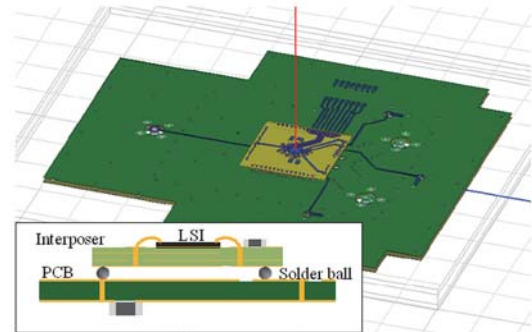


図 1 LSI インターポーザ・PCB の高周波特性計算モデル

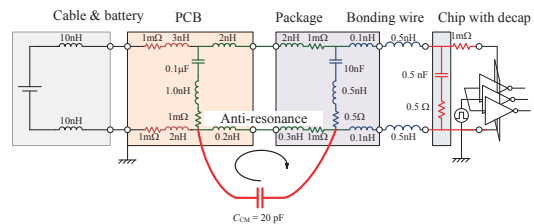


図 2 LSI・インターポーザ・PCB の等価回路モデル

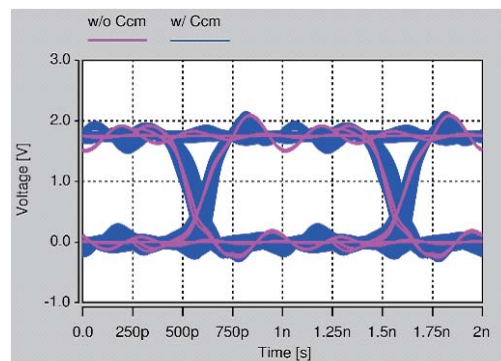


図 3 寄生結合の有無による出力波形の比較

参考文献

- [1] A. Matsuda, et. al., “A Method of Package-Equivalent-Circuit Modeling for PCB-Package Co-Design,” Proceedings of ICEP 2010, pp.360-365, Sapporo, Japan, April, 2010.
- [2] T. Matsushima, et. al., “SI/PI Degradation Due to Package-Common-Mode Resonance Caused by Parasitic Capacitance between Package and PCB,” 8th EMC Compo, S5-3, Dubrovnik, Croatia, Nov. 2011.

電気システム論講座 自動制御工学分野（萩原研究室）

<http://www-lab22.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「非負システムの解析と設計—凸最適化の視点から」

当研究室では、制御工学に関する総合的研究の一環として、線形時不変システムを対象とした性能解析や制御器設計に関する研究を精力的に行っている。本稿では、経済学や環境学、生物学や人口動態学といった広範な分野で研究対象とされる非負システムに関して、その解析と設計に関する当研究室の取り組みの一端を限られた紙面で紹介することを試みる。

図1は、動特性が $\dot{x}_1(t) = x_1(t) - 5x_2(t) + u(t)$, $\dot{x}_2(t) = 2x_1(t) - 2x_2(t)$ で表される線形時不変システム G に対して、制御入力 u を $u(t) \equiv 0 (t \geq 0)$ としたときの開ループシステムの応答（すなわち、 $t \geq 0$ における状態 $[x_1(t) \ x_2(t)]^T$ の (x_1, x_2) 平面上での軌跡）を表している。ただし初期状態 $[x_1(0) \ x_2(0)]^T$ を $[1 \ 1]^T$, $[0.1 \ 1]^T$, $[1 \ 0.1]^T$ とした場合の3つの応答を示している。このシステムは安定であるから、時間の経過とともに状態は原点に収束する。しかし状態の過渡応答は必ずしも好ましいものではなく、とくに初期状態が非負である（すなわち初期状態が第1象限に存在する）にもかかわらず、時間の経過とともにまず x_1 が負となり、続いて x_2 も負となって、その後は符号の変化を繰り返しながら原点に収束していることが分かる。一方、このような状態の符号の変化は、制御入力 u をうまく構成することで簡単に回避することができる。図2は、システム G に対して $u(t) = -3x_1(t) + 6x_2(t)$ というフィードバック制御を施した場合の応答を示している。このフィードバック制御を施した場合、閉ループシステムは安定となり、かつ初期状態が非負であれば状態も常に非負となることを理論的に保証することができる。

この例では、フィードバック制御を施して閉ループシステムを非負とすることで、状態の符号変化を回避している。一般に、与えられた線形時不変システムが“任意の非負の初期状態および任意の非負の入力に対して、状態および出力が常に非負となる”という性質を持つとき、このシステムは（内部）非負システムであるとよばれる。非負システムの性能を解析する問題、あるいは（必ずしも非負とは限らない）システムに対して閉ループシステムを非負としつつ所望の制御性能を達成する制御器を設計する問題の多くを凸最適化問題（線形計画問題）に帰着できることが知られており、当研究室でも凸最適化理論に基づいた新たな解析・設計手法の開発を積極的に進めている。当研究室の取り組みにより、非負システムの L_1 ゲイン（入出力信号に関する L_1 誘導ノルム）の計算を線形計画問題に帰着できること、またこの L_1 ゲインが、複数の非負システムが結合された大規模非負システムの安定性を解析する上で重要な役割を果たすことなどが明らかとなっている。

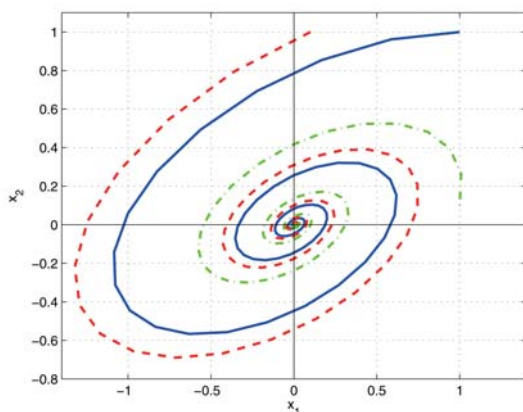


図1：開ループシステムの応答

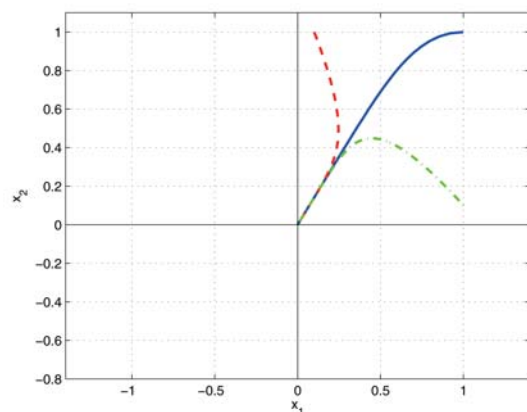


図2：閉ループシステムの応答

電気システム論講座 電力システム分野

<http://www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/laboratory/gse/ee/powersystem>

「ゲインスケジューリング H2 最適制御を用いた SVC による同期発電機の電力動揺抑制設計に関する研究」

当研究室では電力システムの潮流計算や安定度解析手法の開発を行っています。近年取り組んでいる課題として、静止型無効電力補償装置 (SVC: Static VAR Compensator; サイリスタを用いてキャパシタンスおよびインダクタンスを調節することで無効電力を吸収または放出し、無効電力を補償する装置) による同期発電機の各種安定性を考慮した電力動揺抑制に関する研究があります。図 1 に同期発電機を含む電力システムの基本構成を示します。この系が何らかの外乱を受けると発電機と負荷との間で電力動揺という不安定現象が生じ、最悪の場合発電機が脱調まで至ります。この問題を回避するため、発電機の外部端子に SVC を取り付けます。その等価回路は図 2 のようになり、SVC が無効電力を調整して電力動揺が抑制され、一般に系統全体はより安定になります。

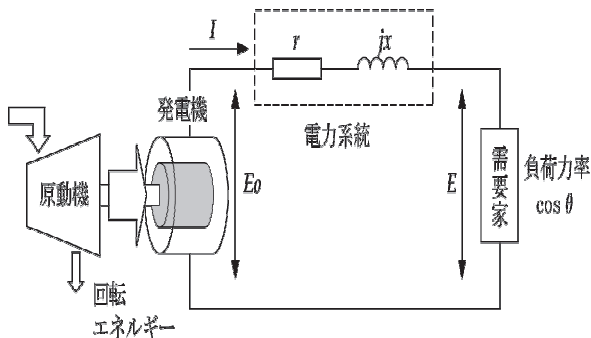


図 1. 同期発電機概念図

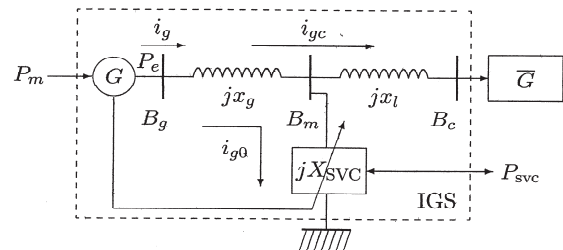


図 2. SVC を持つ同期発電機の等価回路

SVC による動揺抑制を達成するため、これまでに非線形要素の周波数応答特性近似に基づいた SVC 制御律による電力動揺抑制設計などの研究を行ってきました。今年度は H2 最適制御を適用して SVC による H2 ロバスト性能を最小化する動揺抑制設計に取り組んでいます。各種のロバスト性能を考慮した SVC 制御律の開発は電力工学の分野でも最新のテーマになっています。特に H2 最適動揺抑制を実現すれば、発電機の安定化だけでなく外乱による電力品質への影響を最小限に低減することも期待されます。

H2 ロバスト性能あるいは H2 ノルムとは、制御対象において関心のある入出力間の周波数応答特性の 2 乗積分によって定義され、対象系統の外乱に対する動揺抑制能力を反映する指標の一つです。この指標が小さければ小さいほど、外乱に対する抑制能力が強いといえます。H2 ノルムを最小化するコントローラは H2 最適制御器と呼ばれます。このようなコントローラを無効電力補償装置 SVC に組み込んで対象系統の同期発電機に実装すれば動揺抑制が可能になります。研究の核心は SVC の動作値を操作する H2 最適制御律を決めることです。しかし、同期発電機の入出力関係を記述する動揺方程式は非線形項を含むため、同期発電機を対象とした H2 最適制御律を確立することは容易ではありません。解決法として動揺方程式を区分的に線形化 [1] して近似し、各近似モデルについて H2 最適制御を適用する設計手法、すなわちゲインスケジューリング (Gain Scheduling) 法を取り入れた H2 最適制御器を提案しています。

参考文献

- [1] J. Zhou, Stabilization of individual generators with SVC designed via phase plane partitioning, IET Control Theory and Applications, vol.4, no. 4, pp. 601-612 (2010)

電子物理工学講座 プラズマ物性工学分野

<http://plasma1.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「プラズマを用いた動的メタマテリアル研究」

当研究室の主な研究対象であるプラズマの産業応用としては、主に化学気相成長やスパッタリング過程、そしてドライエッチングといった気相中反応や気相・固相界面反応の利用が盛んに行われてきました。また、古くからの蛍光灯、あるいは最近のプラズマテレビでみられるような発光性の利用も重要な応用分野です。当研究室では、このようなプラズマ応用に加えて、新たにプラズマの電気的な特性に着目した研究を進めています。ここでは、荷電粒子を含むことで生じる導電性、より広い意味では物質のもつ誘電性に着目すると、プラズマは他の物質状態とは異なる性質を示します。例えば、プラズマはマイクロ波帯で正から負の値にわたって幅広い比誘電率値を示しますし、時間的な可変性も備えています。また、プラズマ生成電力や放電気体圧力を変えることで、誘電率値を複素平面上で制御することができます。このような性質は、近年注目されている“メタマテリアル”という微小な周期構造による特異なバルク性質の実現、例えば透磁率が負の値にわたって設定可能である、という点と組み合わせることで、高機能性を発現する素地があります。我々は、このように従来のメタマテリアル構造にプラズマを組み合わせることで生じる特質について、“プラズマ・メタマテリアル”として提案してきました [1]。

プラズマ・メタマテリアルの様々な可能性・応用性を示すために、当研究室ではこれまでに、負の屈折率状態の実現の確認や擬似表面プラズモン現象への動的性質の付与、プラズマ・メタマテリアルが示す強い非線形性の理論予測等の研究を行ってきています。ここでは、図1を用いて、擬似表面プラズモンに関する研究内容についてご説明します。擬似表面プラズモンとは、金属板へ周期的な穴を開けることで、ある特定の周波数では板面内の開口率に関わらずほぼ100%の電磁波が透過するという現象を理解するために提唱された考え方です。すなわち、周期的な穴開き構造を持つ板は、周期長より十分長い波長の電磁波に対しては一種の負の誘電率を示す材質と言え、特異な巨視的性質を示すという意味でメタマテリアルの範疇にあるとみなせます。当研究室では、この穴の中に微小なプラズマを生成することで、この巨視的誘電率を可変に制御することができることを実験・理論の両面で示しました [2]。

ところで、図1の構造は、別の見方としては、表面プラズモンと同様の現象の発現を通して、メタマテリアルの概念の下に、巨視的には“プラズマ”とみなせる構造を元々示している、とも言えます。このように、メタマテリアルの概念に後押しされる形で新たな“プラズマ”形態を実現することも、当研究室で我々が目指している研究の流れに沿ったものです。そして、実際のプラズマ生成とともに、効果が入り組んだ形で機能性を発揮することができている好例と考えています。

また、プラズマ・メタマテリアル研究全般の中では、メタマテリアルへの動的性質（可変性）を付加することで生じる機能性が明らかとなってきています。構造(空間)自体に潜む創造性という軸に対して、時間軸への制御性をどのように実現してどのように応用するか、という観点を採用して、研究領域を広げていこうとしております。

以上のように、本研究内容は、1つのストーリーに沿って筋立てられる内容というよりは、多分に多面的な要素を含んでいます。プラズマ・メタマテリアル研究は、先に述べたように、当研究室が世界に先んじて提案した概念と言えますが、最近では、欧米およびアジアにおいて、理論および実験研究が多く報告されるようになってきています。当研究室ではその先頭を切って新たな研究展開を図るべく、学術の進展と産業応用への提案の両面で研究を進めていきます。

【参考文献】

- [1] 酒井道, 橋邦英, 「マイクロプラズマによる電磁波メタマテリアル」, 応用物理, 78 巻, pp. 437-441 (2009).
 [2] D.-S. Lee, O. Sakai and K. Tachibana, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 48 (2009), 062004.

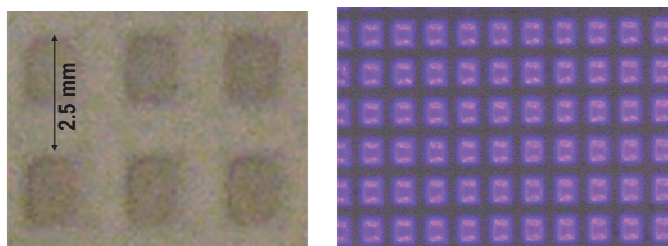


図1. プラズマによる動的なメタマテリアル構造の一例。擬似表面プラズモン構造（拡大図，左）と，穴内部へ微小プラズマを生成したときの様子（右）。

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野（松重研究室）

<http://piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「2 探針原子間力顕微鏡による有機半導体薄膜上での電荷注入 / 表面電位計測の実現」

原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscopy: AFM）は、先鋭な探針をプローブとして試料を観察する顕微鏡法のひとつです。AFMでは、探針－試料間にはたらく種々の相互作用力を、測定領域の局所物理情報として測定していますが、近年、非接触での高分解能測定が可能になったことから、さまざまな試料の構造・物性評価に既に広く用いられています。また、AFMをベースとするいろいろな測定法も発展しており、電子工学分野では、静電気力検出により表面電位を計測するケルビンプローブ原子間力顕微鏡（Kelvin-Probe Force Microscopy: KFM）が、ナノスケール領域の電位計測法として実用化されています。

現在、さまざまな領域でナノ材料やナノデバイスの開発が進み、AFM関連計測による評価はますます重要になっていますが、こうした背景の下、われわれは2本のプローブを有する2探針AFM（Dual-Probe AFM: DP-AFM）を開発しています。このDP-AFMでは、2本のAFMプローブを独立に制御・駆動することができ、これまでの1本のプローブだけしか持たないAFMでは実現できなかった計測が可能となります。ここでは、その計測例の一つとして、一方の探針で有機半導体薄膜に「電荷注入」しつつ、もう一方の非接触探針で、注入領域周辺の「表面電位計測」をした結果について紹介します。

測定対象とした試料は、ペンタコサジン酸（PCDA）というジアセチレン化合物です。PCDAは紫外線や熱による刺激で固相重合してポリジアセチレンとなることが知られており、導電性分子ナノワイヤー材料として期待されています（ただし今回の試料はドーピングしていないため導電性は低い）。今回、絶縁性基板（SiO₂）上にスピコート成膜したPCDA薄膜グレインについて、重合前後で電子物性がどのように変化するかを評価しました。先ず、図1に示すような測定構成で、探針表面を金コートした「電荷注入」プローブと「電位計測」プローブとを同一のグレイン上に位置決めします。「電荷注入」プローブは、バイアス電圧を加えた状態で試料に接触していますが、接触圧は非破壊測定となるようフィードバック制御されており、一方、「電位計測」プローブが表面上の電位をマッピングします。

図2に、測定された表面形状および表面電位像・ラインプロファイルを示します。モノマー状態の試料の測定では、探針により+1Vのバイアスが加わっていても、PCDA薄膜と基板との間で電位の変化はありません（b, c）。一方、ポリマー状態の薄膜では、PCDA薄膜上で約+1Vの電位変化が検出されました（e, f）。これは、モノマー状態ではPCDAの導電性は極めて乏しいのに対し、ポリマー状態ではジアセチレン共役重合により導電性が向上してホール注入が可能になったことを意味しています。これらの結果は、有機分子系における微視的物性の直接評価が可能になったことを示すだけでなく、DP-AFMによる新規計測手法が実現できたところに大きな意義があり、今後のナノ材料・ナノデバイス計測評価を進めていく上で重要な礎になると考えています。

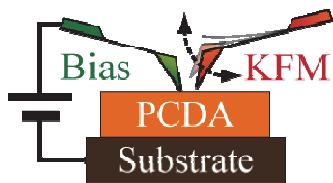


図1. DP-AFMの2探針を用いた測定構成。一方の探針を「電荷注入」に用い、他方の探針でKFMによる「表面電位計測」をおこなった。両探針は表面を金でコートしたものを利用した

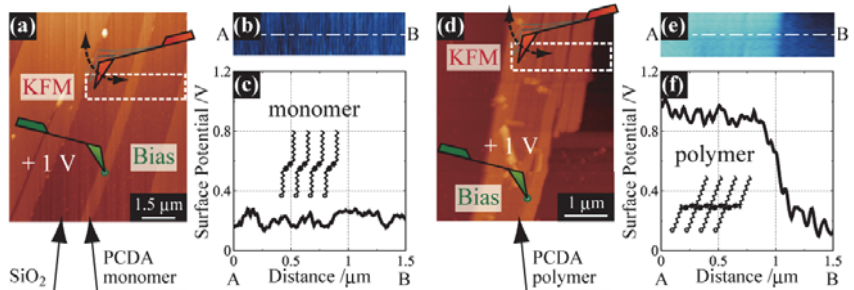


図2. 測定対象としたPCDAモノマー / ポリマーの表面形状（a / d）および四角破線領域の表面電位像（b / e）とそのラインプロファイル（c / f）。ポリマー状態のPCDAで印加バイアスに対する表面電位変化を測定することができた

量子機能工学講座 光量子電子工学分野 (野田研究室)

<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「離れた光ナノ共振器間の強結合の実現とその動的制御」

フォトニック結晶は、光の波長と同程度の周期的屈折率分布をもつ新しい光学材料であり、固体結晶中の周期的なクーロンポテンシャル分布によって電子の分散曲線にバンド構造が生じるのと同様に、光子の分散曲線にバンド構造が生じることを特徴とする。本研究室ではこのフォトニック結晶の特異なバンド構造を用いて、新規な光の制御を実現することを目標に様々な研究を行っている。その中から以下では最近実現された、光波長の数十倍離れた光ナノ共振器同士を強く結合させ、かつその結合を共振器の光子寿命より短い時間で変化させて結合状態を動的に制御する技術について紹介する。

光を波長の3乗程度の極微小領域、すなわち光ナノ共振器に強く閉じ込めることは、光を用いた量子演算や、光を光のまま蓄えることが可能な光メモリーなど、将来の通信・情報処理のための高機能光回路の実現にとって鍵となる技術である。これまでに単体の光ナノ共振器への光閉じ込めは実現されていたものの、複数の光ナノ共振器間で光を自在に交換する技術は存在しなかった。今回、我々は図1に示す2つの共振器 A, B の中間に導波路を配置した構造を考え、導波路から外部環境へ光が逃げるのを抑えるために導波路の両端を反射鏡 C, D で閉じると、この導波路が結合振子において振動を媒介する棒と同様に、ナノ共振器間での光の交換を媒介し得ることを提唱した。そして、導波路の伝搬時間や位相を適切に設計することで、導波路部への光の散逸を抑えつつ、ナノ共振器部に光を集中させた状態のままで、ナノ共振器間の光のやり取りを実現できることを理論的に明らかにした。また実験的にも、図2に示すように83 μm も離れた光通信帯域の共振器間で光が超高速(周期54ps)に何度も交換される様子を確認した。さらに、その交換を外部制御光パルスを用いて任意のタイミングで切断することにも成功した。これらの成果は次世代高機能光回路実現に向けた大きな一歩を踏み出すことに成功したものとして2011年12月12日(日本時間)に英国科学雑誌「Nature Photonics (ネイチャー・フォトニクス)」の電子版において公開された。

光を波長の3乗程度の極微小領域、すなわち光ナノ共振器に強く閉じ込めることは、光を用いた量子演算や、光を光のまま蓄えることが可能な光メモリーなど、将来の通信・情報処理のための高機能光回路の実現にとって鍵となる技術である。これまでに単体の光ナノ共振器への光閉じ込めは実現されていたものの、複数の光ナノ共振器間で光を自在に交換する技術は存在しなかった。今回、我々は図1に示す2つの共振器 A, B の中間に導波路を配置した構造を考え、導波路から外部環境へ光が逃げるのを抑えるために導波路の両端を反射鏡 C, D で閉じると、この導波路が結合振子において振動を媒介する棒と同様に、ナノ共振器間での光の交換を媒介し得ることを提唱した。そして、導波路の伝搬時間や位相を適切に設計することで、導波路部への光の散逸を抑えつつ、ナノ共振器部に光を集中させた状態のままで、ナノ共振器間の光のやり取りを実現できることを理論的に明らかにした。また実験的にも、図2に示すように83 μm も離れた光通信帯域の共振器間で光が超高速(周期54ps)に何度も交換される様子を確認した。さらに、その交換を外部制御光パルスを用いて任意のタイミングで切断することにも成功した。これらの成果は次世代高機能光回路実現に向けた大きな一歩を踏み出すことに成功したものとして2011年12月12日(日本時間)に英国科学雑誌「Nature Photonics (ネイチャー・フォトニクス)」の電子版において公開された。

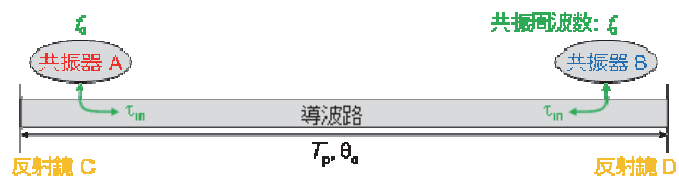


図1. 導波路を介した結合共振器モデル

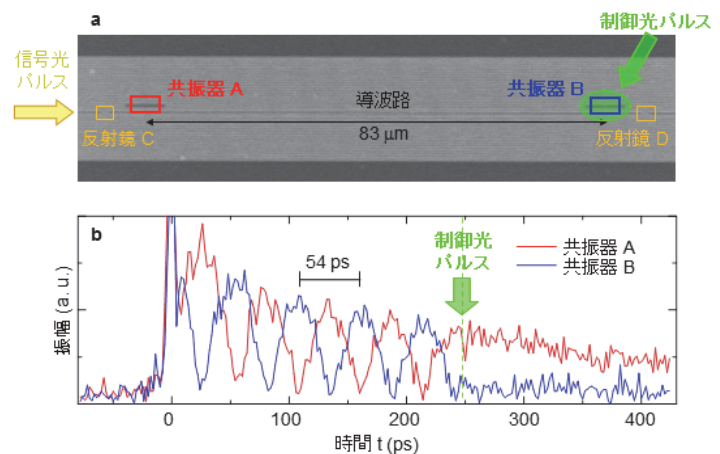


図2. 離れた共振器間の強結合とその切断の実証

参考文献

- [1] Y. Sato, Y. Tanaka, J. Upham, Y. Takahashi, T. Asano, and S. Noda: "Strong coupling between distant photonic nanocavities and its dynamic control", Nature Photonics, vol. 6, no. 1, pp. 56-61 (2012).

量子機能工学講座 量子電磁工学分野 (北野研究室)

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~lab15>

「結合共振メタマテリアルを用いた第二次高調波の増強」

メタマテリアルとは電磁波や光の波長に対して十分小さい人工構造の集合体をさす。このような人工構造体は連続媒質として見なすことができ、構造及び材質を工夫することで誘電率、透磁率、旋光性などの媒質パラメータを自由に変化させることができる。Pendry らはメタマテリアルによる人工磁性媒質を提案する際に、そのメタマテリアルの共振周波数付近の電磁波を入射すると、人工媒質中の小さな領域にエネルギーが集中することを示した [1]。この領域に非線形要素を配置すると媒質の非線形性を効率的に発現させることができる。現在メタマテリアルを用いた第二次高調波の発生に関して、マイクロ波、赤外領域など幅広い周波数帯域で研究がなされているが、どの研究も Pendry らが提案した基本波に対する共振現象を利用したものである。本研究では、基本波で共振する構造と二倍周波数付近で共振する構造を結合させた二重共振回路を基本とするメタマテリアルを提案した [2]。

実験に用いたメタマテリアルのユニットセルの構成を図 1 (a) に、それぞれの共振器の構造については図 1 (b) (c) に示す。一次側共振器は I 型のパターンを用いた。非線形容量をもつ素子としてはショットキーダイオード (Rohm RB886G) を用いた。メタマテリアルの測定の測定系には yz 平面に平行な 2 枚の銅板からなる平行平板導波路を用いた。この導波路では電界は x 方向を向く。送信、受信アンテナは基本波、第二次高調波に対して平坦な特性を得るためにダイヤモンド型ダイポールアンテナを用いた。測定対象物を平行平板導波路中に配置し、単一周波数の電磁波をメタマテリアルに照射し、透過波の第二次高調波成分の強度を測定した。また、共振器間の結合の強さは両者の距離 d を変えることで制御することができる。図 1 (d) は 6.8GHz における第二次高調波の強度を d ごとにプロットしたものである。図中に二次側共振器がない場合の第二次高調波強度レベルも示している。共振器間距離 d を減らすほど大きな第二次高調波がえられることが分かる。実験では $d = 1\text{mm}$ のとき、二次側共振器がない場合に比べて、7dB 高い第二次強調波の発生効率を実現した。

参考文献

[1] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart: IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 47, 2075 (1999).

[2] T. Kanazawa, Y. Tamayama, T. Nakanishi, and M. Kitano: Appl. Phys. Lett. 99, 024101, (2011).

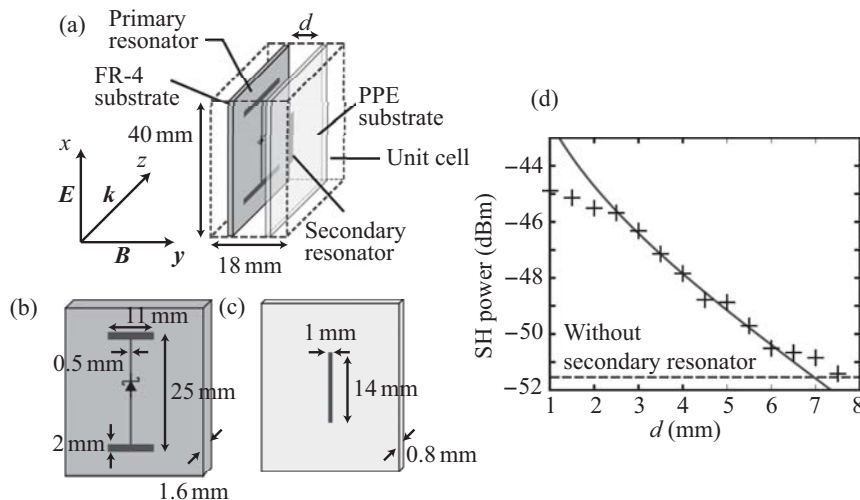


図 1 : (a) ユニットセルの構成 . (b) 一次側共振器の構造 . (c) 二次側共振器の構造 . (d) 放射される第二次高調波強度 .

知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室）

<http://vision.kuee.kyoto-u.ac.jp/japanese/index.html>

「オンデマンド型電力ネットワーク」

本研究室では、数年前から「エネルギーの情報化」（本誌 No.23, pp.3-8, 2010）という新たな電力エネルギーマネジメントの考え方、すなわち、電力の供給者視点に立ったスマートグリッドではなく、家庭／オフィス／工場／地域コミュニティといった需要家サイドにおけるスマートな電力エネルギーマネジメント方式を提唱し、それを実現するための研究開発を進めています。

「エネルギーの情報化」を実現するためキーアイデアとして、「オンデマンド型電力ネットワーク（Energy On Demand: EoD）」があります。EoDは、消費者の電力需要に合わせて供給者（電力会社）が発電量を制御するという従来の電力制御方式を抜本的に変えようとするもので、予め定められた積算電力量やピーク電力の上限値（随時変更可能）に合わせて電気機器が使用する電力を調整するというもので、「節電率保証付き」の電力マネジメントシステムが実現できます。基本的な仕組みは、図1に示すように、1) 使用者が家電のスイッチを入れると、まず「電力要求メッセージ」が電力マネージャに送られ、2) 電力マネージャが、家電からの要求電力やその優先度、現在の使用電力、積算電力量およびピーク電力の上限値、に基づいて電力供給の可否や供給する電力を調停し、3) 供給可能な場合は、供給可能電力を家電へ知らせ電力供給を行います。

2011年度前半には、先に開発した京都市内にある1LDKのスマートマンションルーム（本誌 No.25, pp.24, 2011）において計測された実生活データに基づき、EoDシステムを用いて一日生活した場合のシミュレーション実験（図2）や、6台の家電を用いた小規模な実験システムによるテスト運用を行い、EoDシステムの基本的な機能の検証を行いました。2012年1月からはスマートマンションルームにEoDシステムを実装し、実生活実験を行ってシステムの有効性を検証する予定です。また、2012年度には生活パターンの学習・データマイニングに基づく家電の優先度の決定や、蓄電池や太陽光発電などの複数電源のマネジメントについても検討し、京田辺市の1戸建て住宅（3LDK）の京エコハウスにおいて実生活実験を行うと共に、複数の企業と連携して商用化を目指して研究開発を行う予定です。

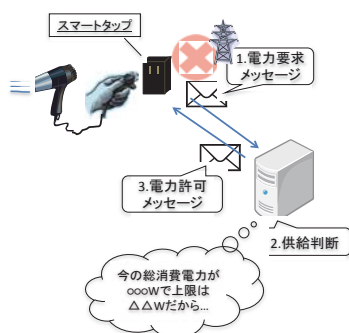
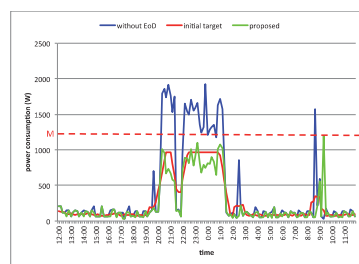
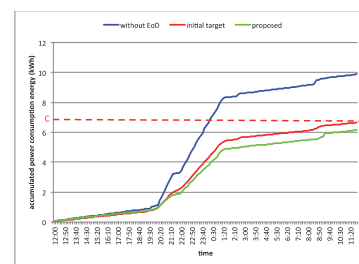


図1 EoD システム



瞬時的消費電力の変化
M：瞬時電力の制限値（1200W）



積算消費電力の変化
C：瞬時電力の制限値（30%減）

図2 EoD システムによる消費電力制御シミュレーション結果

青線：実生活で使用された電力

赤線：生活スタイルを守りつつ、積算電力量30%減（右図C）、最大瞬時電力1200W（左図M）の制限を満たすように調整された電力使用計画

緑線：生活シミュレーション結果

通信システム工学講座 知的通信網分野（高橋研究室）

<http://cube.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「移動経路上の無線通信リソース共有メカニズムの研究」

スマートフォンに代表されるような高度なアプリケーションを利用可能なモバイル端末が普及したことで、モバイルネットワークのトラヒックはますます増加しています。携帯電話ネットワークは広い通信範囲を提供しますが通信容量は大きくないため、モバイル端末が発生させるトラヒックを携帯電話ネットワークのみで収容することは困難です。そこで、無線LANなど、分散的に配置された無線リソースを有効に活用して、トラヒックを分散的に収容する必要があります。無線LANは携帯電話ネットワークとは異なり、通信範囲はスポット的であるものの通信容量は大きいという特徴があります。

こういった分散的な無線リソースは、多数のユーザによって共有されます。本研究では、この問題を数学的に定式化しました。具体的には、個々のユーザは移動開始点（Start）から移動終了点（Goal）までに通信量を最大化したいと考えますが、あるユーザが無線資源を利用することで他のユーザが利用可能な無線資源は減少し、通信量も減少します。つまり、複数のユーザに全体として効率的に無線資源を利用させることができる何らかのメカニズムが必要になります。また、ユーザ間の公平性についても考える必要があります。

本研究は、複数ユーザによる移動経路上の無線通信リソース共有のための協力メカニズムを提案しています。このメカニズムでは、後から移動するユーザが自分より先に移動していた他のユーザの移動経路を考慮して、自分の移動経路を決定します。この時、全ユーザが移動開始点から終了点に得られる通信量の相乗平均が最大化されるように経路を決定します。相乗平均の最大化を目的にした理由は、全体的な効率とユーザ間の公平性を両立させるためです。通信ネットワークの研究分野では、従来から複数のパケットやフローを対象とした経路制御の問題に取り組まれています。また、自動車や歩行者のナビゲーションは実用化もされており、長きにわたって検討されています。本研究は、ユーザを無線のスポットに一定時間停止させる、といった制御も行う点でこれらの研究とは異なります。

図1に示すような単純な格子点マップを用いて協力的手法の有効性を定量的に検証しました。自身の通信量の最大化のみを行う非協力的手法を用いた場合およびすべてのユーザが最短経路のみを選択する場合との比較を行います。各ユーザは制限時間内に移動開始点から終了まで移動し、AP-1かAP-2に滞在している時間のみ通信が可能です。AP-2の経路を選択すると、図の w 分追加の移動時間必要となり、APでの滞在時間が短くなり通信量が減少します。図2に追加移動時間に対するユーザの通信量を示しています。通信量は最大が1.0となるよう正規化されています。図から、協力的手法を用いた場合の通信量が最も多いことが分かります。また、追加移動時間が長い場合においても、非協力的手法に比べ高い有効性を示しています。非協力的手法、協力的手法の両方において、AP-1が混雑するとユーザはAP-2の経路を通るようになりますが、協力的手法を用いた場合の方が、全体の効率性と公平性を考えてユーザはAP-2の経路をより積極的に選択します。

以上のように、提案メカニズムは有効ですが、今後はユーザが示された経路に従わない場合など、より現実的なモデルでの評価が必要です。

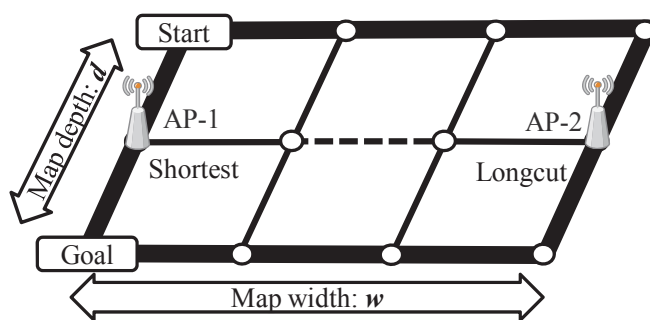


図1：格子点マップ

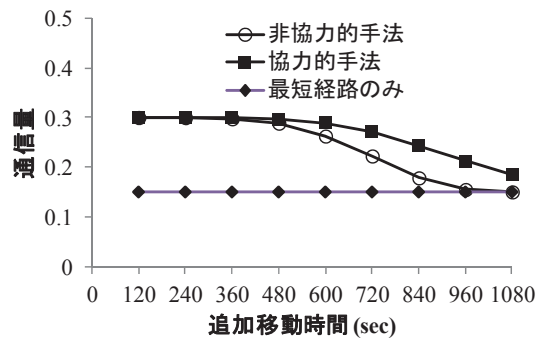


図2：追加移動時間に対する通信量

集積システム工学講座情報回路方式分野（佐藤高研究室）

http://www-lab09.kuee.kyoto-u.ac.jp/

「重点的サンプリングを用いたランダムウォークによる線形回路の高速解析」

電子機器の消費電力低減のため、集積回路（LSI）の低電源電圧化が進んでいる。一方で、微細化による配線抵抗の増加や電流密度の増大により電源電圧降下の影響が大きくなっている。電源網はLSIの性能や信頼性にかかわる重要な要素であり、設計の各ステップで電圧降下解析を何度も実施することで設計の最適化や検証が行われる。電圧降下解析は、抵抗、容量、電圧源、および電流源等で近似される線形回路解析であり、連立一次方程式 $Gv=i$ を解くことに帰着されるが、そのサイズが極めて大きくなることから、高速化と省メモリ化が強く求められている。ここで、 v は連立方程式の解である節点電圧ベクトル、 G はアドミタンス行列、 i は電流ベクトルである。

我々は、ランダムウォーク（RW）法に着目して、実用上十分な近似解を高速に求める取組みを行っている。RW法は、上記連立方程式を行列 G の分解により直接解くのではなく、図1の手続きに従い回路ネットワーク上をランダムに移動するサンプルを用いて、確率的に解く手法である（図2）。RW法には、高い並列性、省メモリ、インクリメンタルな解析が可能、という特徴がある。一方、精度がサンプル数の2乗に依存する収束性の遅さが課題となっており、高精度な解を求めるには計算量の削減が必要となる。

そこで、重点的サンプリングを用いる高速化手法を提案する[1]。重点的サンプリングでは、推定値の分散を小さくするよう移動確率を変更する。例えば図3において、図中の式の様に確率を変更すれば分散はゼロとなり、理想的には1つのサンプルを用いるだけで電圧の推定が可能である。任意回路に対する理想的な確率変更は、全節点電圧値を事前に知る必要があり現実には実現できない。ここで、少数のサンプルによるRW法で粗い解を高速に求められることを利用し、少数サンプルでの推定電位の計算と推定電位を用いた確率変更を交互に繰り返すことで逐次的に確率を更新することで、推定精度を効率よく向上できる。

商用プロセッサの電源網回路を提案手法と従来のRW法とで解析した計算時間を、解析節点数を横軸として図4に示す。回路特性から従来手法でも高速に解析できる#4以外の回路について、数桁の高速化が実現できている。図4 #1の回路について、解析精度（許容誤差）と処理時間の関係を図5に示す。提案手法では、精度を1桁改善するために必要なサンプル数 M を M^2 から確率変更の回数を r として $(M/r)^{2/r}$ のオーダーに改善しており、従来よりも大幅に少ないサンプル数で高精度かつ高速な解析が可能となる。

1. サンプル番号を k とし、 k の初期値を1とする。
2. 節点 i に新しいサンプルを置き、以下の(a)-(c)に従って移動させる。一連の処理でサンプル k が得た得点 $x_{i,k}$ を記録する。 $x_{i,k}$ の初期値は0である。
 - (a) サンプルの現在位置 t に電圧源 v_t が接続されていれば得点 $x_{i,k}$ に v_t を加算し、サンプルの移動を終了する。
 - (b) そうでなければ $x_{i,k}$ に I_t/G_t を加算する。
 - (c) 節点 t の隣接節点 j に確率 $P_{t,j}$ で移動する。移動確率 $P_{t,j}$ は $g_{t,j}/G_t$ で与えられる。
3. k 個のサンプルが得た得点 $x_{i,1}, \dots, x_{i,k}$ の平均値が収束していればこれを節点 i の電圧値として処理を終了。収束していなければ $k=k+1$ とし、2へ。

図1：ランダムウォーク（RW）法の手続き

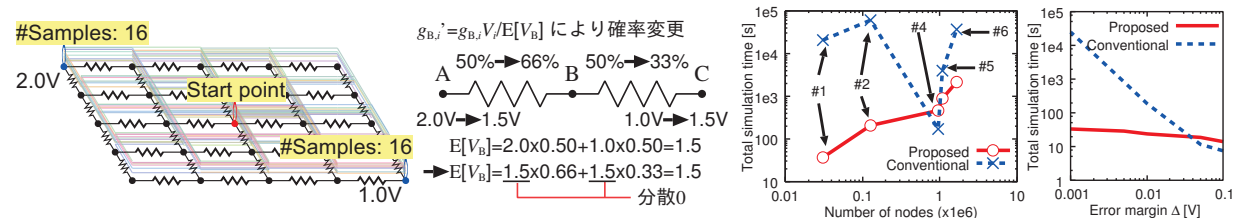


図2：サンプルのランダムな移動の軌跡の一例

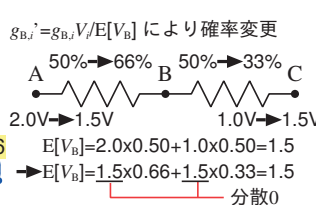


図3：重点的サンプリングにおける確率変更

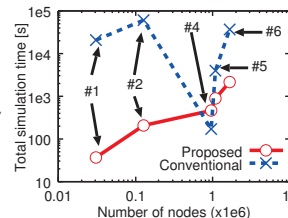


図4：解析時間の比較

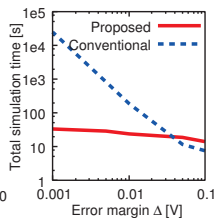


図5：解析精度と処理時間の関係

参考文献

[1] T. Miyakawa, K. Yamanaga, H. Tsutsui, H. Ochi, and T. Sato, “Acceleration of random-walk-based linear circuit analysis using importance sampling,” in *Proc. GLSVLSI 2011*, May 2011, pp. 211-216.

集積システム工学講座 超高速信号処理分野（佐藤亨研究室）

<http://www-lab26.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

「乳癌スクリーニングのための相関を用いた医用超音波微小石灰化検出法」

我々の研究室では、超音波を用いて安全・安価な乳癌スクリーニングを実現するための技術開発を行っている。現在乳癌スクリーニングにはマンモグラフィが用いられており、マンモグラフィは乳癌に併発する微小石灰化をX線で検出する。しかし、マンモグラフィには放射線被曝による発がんの危険性があること、若年女性では乳腺組織により微小石灰化の検出が困難であることから、一般的には若年女性には乳癌スクリーニングの対象外となっている。超音波診断装置を用いて微小石灰化を検出することにより放射線被曝の危険が無く安全に乳がん検診を行うことができ、若年女性を含めた安全な乳癌スクリーニングの実現が期待できる。

当研究室で開発している超音波微小石灰化検出技術は、超音波が乳房内の微小石灰化を通過する際に生じる超音波波形の変化を測定する。現在音響陰影の有無に基づいて医用超音波を用いた結石診断が行われているが、検出できるのは大きさ数 mm の大きな結石のみである。音響陰影は他の超音波診断で用いる指標と異なり、結石表面での反射で生じる後方散乱波の信号強度ではなく、結石後方へ伝搬する超音波信号強度を調べている。小結石や微小石灰化は遮蔽の効果が小さく音響陰影は発生しないが、これは回折など前方散乱の効果により結石後方にも超音波が到達するためである。前方散乱波と送信波は位相が一致しないため、小結石後方へ伝搬する信号の強度変化が顕著となる前に位相の変化が大きくなる。よって、信号の強度変化よりも位相変化を検出する方が高い感度を得られる。当研究室では結石後方へ伝搬する信号の位相変化を検出可能するため受信信号の横方向の相関をとり、相関の低下により微小石灰化を検出する手法を提案し、有限差分時間領域法に基づくシミュレーション実験により微小石灰化を検出可能であることを示した [1]。また、商用の超音波診断装置を用いて微細銅線や微細銅円筒を埋め込んだ微小石灰化ファントムの断層像を作成し、提案法の有効性を確認した [2, 3]。図は微細ワイヤーを埋め込んだ石灰化ファントムの超音波断層像と、提案法で描出された微細ワイヤーである。音響陰影が無くワイヤー表面からの反射強度も大きくは無いが、相関を用いた提案法はワイヤーの検出に成功している。今後はより高度な信号処理によりさらに検出能を改善することを目標としている。

（日本生体医工学会 科学新聞賞受賞）

【参考文献】

- [1] Hirofumi Taki, *et al.* : J. Med. Ultrasonics. **37** (3) : 129-135, 2010.
 [2] Hirofumi Taki, *et al.* : J. Med. Ultrasonics. **38** (2) ; 73-80, 2011.
 [3] Hirofumi Taki, *et al.* : Proc of 17th International Meeting of ESGO, Milan, 2011.

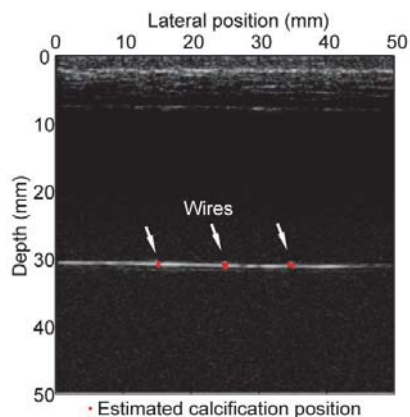
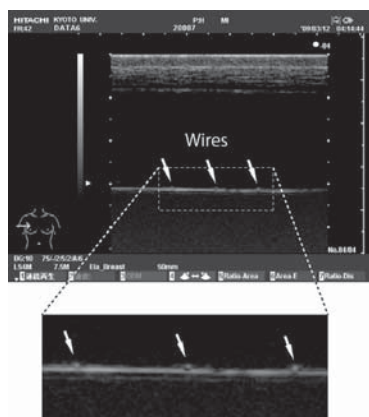


図 微細ワイヤーを埋め込んだファントムの超音波断層像(左)と提案法で描出された微細ワイヤー(右)

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー分野 (中村祐司研究室)

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/kondok/index-j.html>

「非軸対称トーラス型プラズマの磁場閉じ込めに関する理論・シミュレーション解析」

太陽のエネルギー源である核融合エネルギーを地上で利用する人工太陽炉を実現するには、燃料を制御熱核融合反応に必要な一億度以上に加熱する必要がある、このような状況では物質はプラズマ状態になっています。したがって、人工太陽炉実現には、このような超高温プラズマを閉じ込める必要があります。プラズマは荷電粒子の集合体なので、これを閉じ込める手段として磁場を用いた方法が検討されています。そのための方法として、主に外部コイルに流す電流だけで、ドーナツ状のプラズマ（トーラスプラズマ）の閉じ込めに適した磁場配位（MHD 平衡）をつくる「ヘリカル系方式」と、外部コイル系だけでなくトーラスプラズマ中に大きな電流を流すことで、磁場配位をつくる「トカマク方式」とが、有望な磁場閉じ込め方式として挙げられます。我々の研究室では、これらの磁場閉じ込め超高温プラズマにおいて、プラズマ形状や磁場強度の非軸対称性が閉じ込め性能に及ぼす影響を実験解析と理論・シミュレーションの立場から解析しています。

プラズマ中に大きな電流を流すトカマク方式では、理想的には回転対称性のある軸対称な磁場配位でプラズマを閉じ込めることができますが、実際の装置では主たるコイルが回転方向（トロイダル方向）に離散的に設置されているため、わずかではありますがトロイダル方向に磁場強度の非一様性が存在し、この非軸対称性が核融合反応生成物であるアルファ粒子や高エネルギー粒子の損失をもたらす恐れが指摘されています。また、プラズマの様々な制御のため、非軸対称な制御用コイルを設置したり、低放射化構造物として強磁性体を設置することでも非軸対称性がもたらされます。通常、これらの影響は摂動として軸対称磁気流体力学（MHD）平衡に重畳され様々な解析が行われていますが、これらは MHD 平衡そのものに影響を与える恐れがあり、三次元 MHD 平衡解析が必要とされます。

一方、基本的には外部コイル系に流す電流のみで閉じ込めに必要な磁場構造を作り出すヘリカル系プラズマでは、閉じ込めに適した軸対称磁場構造は外部コイルだけではできないため、最初から非軸対称な構造を持っています。このため、ヘリカル系プラズマ研究の当初から三次元 MHD 平衡をどのように解析するかが議論されており、近年は数値計算手法の進展とコンピュータの発展により精度の高い三次元 MHD 平衡計算プログラムが開発されています。また、得られた MHD 平衡をもとに MHD 安定性、新古典輸送解析など様々な解析が行われています。

私たちの研究室ではこのようなヘリカル系プラズマに対する解析で培われたノウハウを活かして、トカマクプラズマの非軸対称性に起因する影響を調べるとともに、より高性能なヘリカル系磁場配位の探求を行っています。

エネルギー材料学講座 応用基礎学分野（野澤研究室）

<http://www.energy.kyoto-u.ac.jp/>

「ビット直列・ワード並列方式機能メモリにおける検索型ソーティング」

ランダムアクセス可能な不揮発性半導体メモリとして実用化が期待されている強誘電体メモリ (FeRAM) の新規応用分野開拓の一例として、情報処理における基本動作である検索・ソートの高効率化について回路シミュレーションを含む理論的研究を行っている。

強誘電体メモリには各種セル構造が知られている。本研究ではチェーン FeRAM のメモリセル構造を主に想定した調査研究を行っているが、これは本研究で考えている機能メモリでは局所データ線が行方向にまた局所ワード線が列方向に配列するがチェーン FeRAM も同じ配列となっている。従って、メモリセルおよびマトリクス構造はそのままデコーダなどの周辺回路を追加すればよいので機能メモリを研究する上で都合のよいセル構造になっているという観点からである。

今までの研究成果によりビット直列・ワード並列方式機能メモリを用いることにより検索・ソートの演算回数が大幅に減少することが分かった。処理時間が演算回数で表されるということは計算機の構成面からいえば機能メモリやメインメモリをキャッシュメモリと同等の位置に置くことになるが、これらを CPU や MPU などのプロセッサまたはシステム LSI 上に集積することは規模や性能面でかなりの制限がある。メインメモリはともかく機能メモリをキャッシュメモリと同等の性能を期待するにはスケールリング則に従ったダウンサイジングが必要であるがそのためには強誘電体キャパシタの分極が面積に依存するが膜厚に依存しないので 2 次元構造に代わり 3D 構造にする方法が有力である。

しかし一方で現実のシステムを考えると機能メモリやメインメモリをプロセッサとバスラインで接続するのが実用化への近道である。バスライン接続にもいくつかの方式があるが機能メモリではヒットしたデータのアドレスを CPU に返す機能が必要になるのでアドレス/データバス多重化方式 (PCI 機能搭載) プロセッサを想定して考え、機能メモリやメインメモリとプロセッサ間との伝送に関して電力遅延積 (PDP) は同等と考える。

一回当たりの演算および伝送にかかる PDP を比較するとそれは負荷容量の大きさの違いに等価であり、伝送を考慮する必要のある場合演算回数よりも伝送回数を少なくする方式が望ましいことになる。伝送回数を少なくするソーティングアルゴリズムについて機能メモリを用いた検索とソート組み合わせ方式を考え、従来の演算回数を少なくするアルゴリズムでは伝送回数が少なくとも $O(n \log n)$ 回必要であるのに対し、 $O(n)$ 回に減少することが出来ることを見出し、それを定量的に評価するため伝送線の駆動にトライステート出力バッファを用いた系および検索・ソートを同時に行うロジックを ADL で設計した内部演算回路の両者について SPICE シミュレーションしている。

究極的にはプロセッサ上あるいはシステム LSI 上などに機能メモリを、できればメインメモリも、集積することが望ましく、今後も 3D 構造、機能メモリの分割処理アルゴリズムやメモリ容量最適化などより一層の研究が要求される。

エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（長崎研究室）

http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html

「核融合反応を利用した高エネルギー粒子の発生と利用」

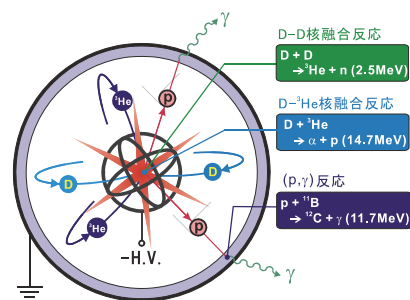
本研究室では、荷電粒子と電磁界との相互作用を高度・高精度に制御することにより 21 世紀の人類に計り知れない恩恵をもたらす先進科学技術の開発を目指して、電磁波によって生成・加熱された核融合プラズマの閉じ込め性能の改善と理解、加熱・電流駆動システムの開発、自由電子レーザを代表とする先進量子放射源を実現するための高輝度電子ビームの発生や、ここで紹介する小型の核融合装置を用いた高エネルギー粒子の発生と利用の研究を行っています。

核融合反応の結果として生成される陽子や中性子などの粒子は極めて高い運動エネルギーを持ちます。例えば、ヘリウム-3 と重水素との核融合反応を利用すると、従来は陽子加速器によってしか得られなかった 14.7 MeV もの高いエネルギーを持つ陽子を生成することができます。このような核融合反応は僅か百 keV 程度の運動エネルギーをヘリウム-3 や重水素のイオンに与えることで生起できます。つまり、核融合エネルギーを利用することで、外部から与えるエネルギーを遙かに超える高いエネルギーの粒子を右上図のような小型装置で生成することができます。

この装置は、プラズマの慣性静電閉じ込め (Inertial Electrostatic Confinement: IEC) と呼ばれる方式で、重水素や三重水素、ヘリウム-3 などのイオンを中心に加速・集束して核融合反応を起こさせるものです。球形の真空容器 (陽極) とメッシュ状球殻陰極との間のグロー放電で生じたイオンは陰極に向かって加速され、メッシュ状陰極の中心に集束して核融合反応を起こします。この IEC 方式の大きな特徴は、プラズマを加熱するのではなく、静電界で直接的にイオンを加速していることにあります。そのため、核融合反応の生起に必要なエネルギーを比較的容易にイオンに与えることができます。残念ながらイオンや電子の閉じ込め性能は原理的に低いために効率 (核融合出力/投入電力) は低く制限されますが、小型で簡便な装置で核融合反応を起こすことができるため、発電以外の様々な利用が可能です。例えば、重水素同士、重水素とヘリウム-3、ヘリウム-3 同士などの核融合反応の基礎研究が、この IEC 方式の装置で行われています。これらの核融合反応は、最も簡単に起こる重水素と三重水素との核融合反応と比べて、安全性などの面で優位であるものの技術的難易度が高く、先進燃料核融合と呼ばれています。

我々の研究室では、約 15 年前に我が国では初めて IEC 方式の実験研究に着手し、動作メカニズムの解明や高性能化の研究、先進燃料核融合の実験やその計測技術の開発などを進めてきました。現在では、毎秒 1 億回を超える重水素同士の核融合反応を定常的に起こすことが可能になり、発生した高エネルギー粒子の利用、その中でも特に中性子のセキュリティー分野などへの応用の研究も進めています。

核融合を中性子発生源として利用することの利点は、放射性物質を使わず安全に、定常から数マイクロ秒の単パルスまで自由度の高い時間構造で、しかもエネルギーの揃った中性子束を発生できることにあります。IEC 方式を用いれば、このような中性子発生がポータブル装置で可能です。我々は、このような特長を有する IEC 中性子源を用いた爆薬探知技術の開発を進めてきました。この技術は、従来の金属探知機や X 線検査機器では検知が困難なプラスチック爆弾や禁止薬物などの検知への応用が期待されています。また昨年度からは、テロリストによる核弾頭の国内への持ち込みを阻止するための特定核物質探知装置の開発にも取り組んでいます。



慣性静電閉込 (IEC) 核融合装置

基礎プラズマ科学講座 核融合エネルギー制御分野 (水内研究室)

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/plasmak/>

「磁場閉じ込め核融合プラズマの高性能化のための Nd:YAG トムソン散乱計測の開発」

当研究室では磁場閉じ込め核融合装置によって核融合炉を実現するために磁場閉じ込めプラズマを制御する研究を行っています。プラズマ内部の温度、密度を制御することはプラズマの閉じ込め性能の向上に重要な課題です。そのためにはプラズマ内部の温度分布、密度分布を知ることが必要です。プラズマ閉じ込め性能の改善は放電中に非常に早いタイムスケールで突然起こるものがあります。そういった現象をとらえるには高速にプラズマ中の分布計測が行える計測器が必要です。

そこで高繰り返し発振が可能な Nd:YAG レーザーを用いたトムソン散乱計測装置の開発を行ってきました。トムソン散乱計測はプラズマ中にレーザーを入射し、プラズマ中の電子からのトムソン散乱光を計測することによってドップラーシフトから温度を散乱光量から密度を知る方法です。当研究室の研究対象である核融合プラズマは非常に高温 (1keV 約一千万度) ですのでプラズマ中に計測器を挿入して測定することが難しく、またプラズマから発生する光も少ないのでプラズマ中にレーザーを入射する能動計測が求められています。

今回、開発しているトムソン散乱計測装置はプラズマの斜め下方からレーザーを入射しプラズマからの後方トムソン散乱光を水平方向から検出する配置を採用しています。検出効率をあげるため大型の凹面鏡 (直径 80cm) によって散乱光の集光を行います。25 台のポリクロメータ (分光器) でレーザー光のドップラー広がりを実測することによって空間 25 点、約 1cm の空間分解能でプラズマ分布を計測することができます。放電時間、約 200ms の Heliotron J 装置で生成されるプラズマを計測するため 550mJ、50Hz の Nd:YAG レーザーを二台使用しレーザービームを合成することによって 100Hz (10ms) の時間間隔でプラズマ分布の時間発展を計測します。

トムソン散乱計測法の歴史は古くレーザーが開発されて間もなく高温プラズマに適応する研究が始まりましたので、今では古典的な計測法です。しかし電子のトムソン散乱断面積は小さく高パワーのレーザー装置を用いたとしても微小光の検出技術が不可欠です。10ns 程度のパルス幅の短いレーザーを用いるため高速信号処理技術も必要になってきます。したがってプラズマの高性能化に必要な計測が行えるように計測器の性能を向上させるためには新しい研究開発が必要です。今回散乱光を分光計測するために開発したポリクロメータは干渉フィルターを用いた方式で検出器としてアバランシェフォトダイオード (APD) を使用しています。通常の APD は波長 1 μ m 以上の遠赤外領域では量子化効率が低下するために Nd:YAG レーザーのトムソン散乱計測には用いることができません。今回使用した APD は、この帯域の量子化効率を増強してあります。ポリクロメータの構造を図 1 に示しました。散乱光はカスケード方式によりリレーレンズによって 5 つのチャンネルに分配されます。最後のチャンネルはポリクロメータの校正に用います。最新の高速オペアンプによる前置アンプが APD の近くに組み込まれており信号を高速に処理することができます。

干渉フィルターの透過帯域の設計は実際の計測をシミュレーションするプログラムを作成して行いました。その結果を図 2 に示しています。目標とする 10eV から 10keV のプラズマ温度領域に対して十分な量の検出光子数が検出可能で、またプラズマの温度、密度に対して 3% 以下の測定精度で計測可能という結果が得られています。

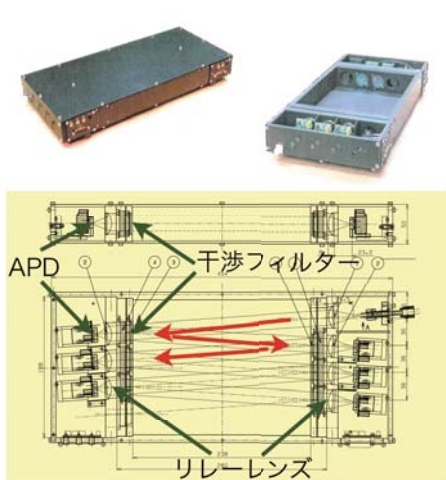


図 1 トムソン散乱計測のためのポリクロメータの構造

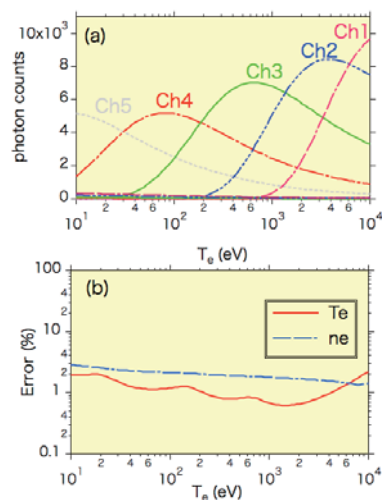


図 2 ポリクロメータの性能シミュレーション

生存圏研究所 生存圏診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野（山本研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/yamamoto-lab>

「航空安全運航のためのウィンドプロファイラーによる乱気流検出・予測技術の開発」

航空機の安全運航に重大な支障をもたらす要因として、種々の気象現象が挙げられるが、中でも大気中の乱気流が原因となっている事故件数は全体の半数以上であり、特に重傷者を伴う事故原因の6割を乱気流が占めている。乱気流は、航空機自体に防止装置が装備可能な着氷現象などとは異なり、機体の改良・改善で対処し得るものではないため、乱気流の発生を一早く検出・予測し、航空機が回避行動を取る、あるいは乗員・乗客がその揺れに備える必要がある。現状では空港周辺を除いて乱気流の観測データはパイロットからの機上気象報告 (Pilot Weather Report; PIREP) のみであるが、PIREP ではパイロットの主観も入るため、精密に乱気流の有無を常時把握できる新たな観測機器の開発が待たれている。東京国際空港の再拡張事業や成田国際空港の滑走路延長事業等による航空交通量の大幅な増大・過密化も見込まれ、航空機の安全運航を維持していくことが益々重要課題となっている。

乱気流の有効な観測手段として、地上から上空に向けて電波を発射し、大気の乱れに散乱されて戻ってくる電波を受信することで、上空の風向風速等を高時間分解能で測定するウィンドプロファイラー（晴天大気観測用測風レーダー）があり、当研究室では、その技術開発や気象観測への応用研究を行っている。現在、図1に示すように、(a) 地上付近から航空機の巡航高度（約10km）までを一挙に観測可能な次世代の標準となる1.3GHz帯ウィンドプロファイラーを開発する、(b) (a)で開発されたウィンドプロファイラーの観測データから、乱気流を定量的に検出する手法を確立する、(c) (b)のウィンドプロファイラーによる乱気流観測データとメソスケール気象予測モデルの結果を比較し、乱気流の発生予測精度を向上させることを目指して、情報通信研究機構、気象庁、日本航空との共同研究が進行中である。

気象庁が2001年に気象予報業務のために現業運用を開始したウィンドプロファイラー31台から成るネットワーク（Wind Profiler Network and Data Acquisition System; WINDAS）では、当研究室で開発された高度5km程度までを観測可能なウィンドプロファイラー（下部対流圏レーダー）が使用されている。本研究で開発されるより高性能化したウィンドプロファイラーが、数年後に更新の時期を迎える次期WINDASのプロトタイプになると期待される。また、本研究により、乱気流の予測精度が向上することで、航空機の安全な運航に寄与するものと期待される。

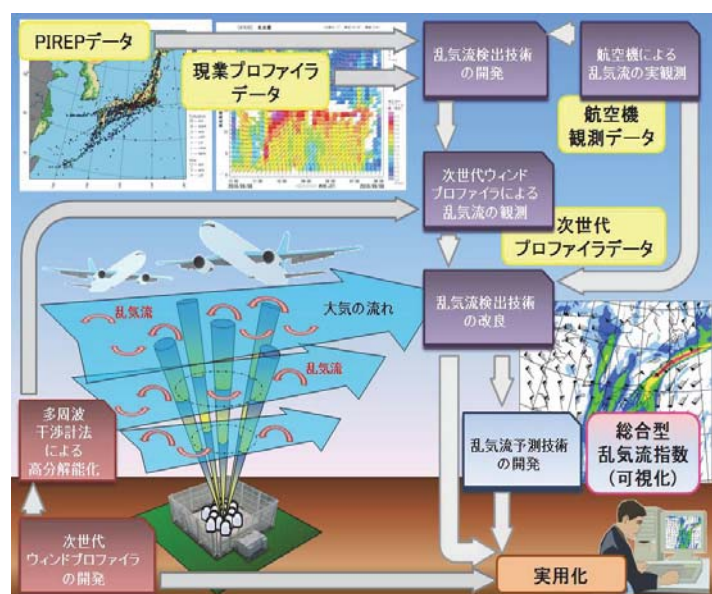


図1. ウィンドプロファイラーによる乱気流検出・予測技術の開発

生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野（篠原研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/index-j>

「木質バイオマス前処理用マイクロ波照射装置の研究開発」

当研究室では、マイクロ波をエネルギー伝送媒体として利用した宇宙太陽発電所の研究開発や地上でのマイクロ波無線電力伝送応用の研究開発を行っている。更に2004年度の生存圏研究所発足以降は、マイクロ波を利用した新たな融合研究領域として、マイクロ波照射加熱による材料創生に関する研究開発を行なっている。本稿では、木質バイオマスからのバイオエタノール生成を目指した前処理用マイクロ波照射装置の研究開発について述べる。本研究開発は、本学農学研究科に属する生存圏研究所バイオマス変換分野および鳥取大学と民間との共同で実施しており、2008年度より現在までNEDO／バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発に採択されている。

木質バイオマスは主にセルロース、ヘミセルロース、リグニンと呼ばれる組織で構成されており、バイオエタノール原料としては主にセルロースが利用される。しかし、木質バイオマスはリグニンがセルロースへの酵素糖化を阻害するような構造をもつため、何らかの手法によりセルロースを露出して酵素糖化率を高める必要がある。この処理プロセスのことを「前処理」と呼び、前処理の高効率化・低コスト化が木質由来バイオエタノールの商業化にとって重要な課題となる。この課題に対し、本研究開発ではマイクロ波を用いた誘電加熱に着目した。誘電加熱は電磁波が物質内に伝搬・浸透しながら被加熱物を加熱するため物質内部を直接加熱できるという利点があり、マイクロ波照射加熱による前処理の短時間化が期待できる。本研究開発の目的は、木質バイオマス前処理用マイクロ波照射装置の開発による前処理の高効率化・高速化・量産化・低コスト化である。研究開発方法としては、被加熱物（木質バイオマス、水もしくは有機溶媒、酸の混合物）の誘電率測定、誘電率測定データを取り込んだ3次元電磁界シミュレーションによる装置設計、プロトタイプによる実証試験を実施している。

図1に開発した連続式マイクロ波照射装置プロトタイプの写真を示す。連続式マイクロ波照射装置は、被加熱物が金属パイプ（図中央の金属直方体内部）を通過する間にマイクロ波を連続的に照射することが可能である。また、複数のマイクロ波照射口を設置することで、被加熱物の処理量、流量、処理時間等に応じたマイクロ波照射部の増減が可能である。本プロトタイプのマイクロ波源としては、マイクロ波出力5kWの2.45GHz帯マグネトロンを3台用い、反応温度に応じた電力調整を行っている。現状の装置能力としては、生成されるエタノールのエネルギー量に対して投入される電力消費量の方が1.6倍程度となっており、電力消費量の低減が喫緊の問題である。この問題に対する解決策として、被加熱物中の木質バイオマス重量比の改善、および装置全体の断熱構造の見直しや熱回収システムの検討が挙げられる。

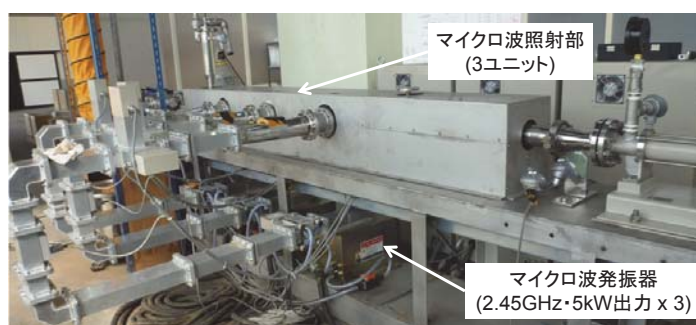


図1 連続式マイクロ波照射装置プロトタイプの写真

【参考文献】

T. Mitani, M. Oyadomari, H. Suzuki, K. Yano, N. Shinohara, T. Tsumiya, H. Segoe and T. Watanaebe, "A Feasibility Study on a Continuous-Flow-Type Microwave Pretreatment System for Bioethanol Production from Woody Biomass", 日本エネルギー学会誌, vol.90, no.9, pp.881-885, Sep. 2011.

博士論文概要

【課程博士一覧】

河村 拓馬	「粒子ベースボリュームレンダリングによる大規模不規則格子ボリュームデータ向け可視化手法に関する研究」	平成 23 年 3 月 23 日
横井 裕一	「Energy Conversion and its Control by Synchronization of Pendulum」 (振子の同期現象によるエネルギー変換とその制御)	平成 23 年 3 月 23 日
Netra Gyawali	「Development of Control and Operational Strategies for Wind Power Based Microgrid with Integrated Energy Storage」 (風力発電とエネルギー貯蔵システムを用いたマイクログリッドの運用制御方式の開発)	平成 23 年 3 月 23 日
馬淵 雄一	A Study on Electromagnetic Interferences Related to Power Supplies for Micro-controllers in Electronic Control Units」 (電子機器に実装されたマイコンの電源系における電磁干渉に関する研究)	平成 23 年 3 月 23 日
鎌田 雄大	「酸化亜鉛薄膜トランジスタの電気特性と透明エレクトロニクス応用に関する研究」	平成 23 年 3 月 23 日
北村 恭子	「フォトリソグラフィック結晶レーザーによる径偏光ビームの生成とその集光特性」	平成 23 年 3 月 23 日
玉山 泰宏	「No-Reflection Phenomena for Isotropic and Chiral Metamaterials」 (等方性および旋光性メタマテリアルに対する無反射現象)	平成 23 年 3 月 23 日
常見 英加	デュアルプローブ原子間力顕微鏡の開発及びナノスケール電気特性評価への応用	平成 23 年 3 月 23 日
Upham Jeremy	「Dynamic photon control by photonic crystals」 (フォトリソグラフィック結晶による光子の動的制御)	平成 23 年 3 月 23 日
中尾 正悟	「Study of Uplink Control Channel for LTE and LTE-Advanced」 (LTE と LTE-Advanced における上り制御チャンネルに関する研究)	平成 23 年 3 月 23 日
久保 広行	「モバイルマルチキャストのための心理要因と物理要因の補償技術」	平成 23 年 3 月 23 日
金岡 泰弘	「光ファイバを用いた電力通信網の高度化の研究」	平成 23 年 3 月 23 日
Fabien Cromieres	「Using Scalable Run-Time Methods and Syntactic Structure in Corpus-Based Machine Translation」 (スケーラブルな実行時手法と構文木に基づくコーパスベース機械翻訳)	平成 23 年 3 月 23 日

村 脇 有 吾	「Automatic Acquisition of Japanese Unknown Morphemes」 (日本語未知語の自動獲得)	平成 23 年 3 月 23 日
植 野 剛	「General Approach to Policy Evaluation via Statistical Learning」 (統計学習による方策評価法の考察)	平成 23 年 3 月 23 日
小 林 弘 和	「Geometric phases in optical interferometry」 (光学的干渉における幾何学的位相)	平成 23 年 5 月 23 日
田 畑 悦 和	「Observational study on diurnal precipitation cycle over Indonesia using 1.3-GHz wind profiling radar network」 (1.3 GHz ウィンドプロファイラネットワークを用いたインドネシアにおける降水日変化の観測的研究)	平成 23 年 5 月 23 日
細 川 義 浩	「周波数変調原子間力顕微鏡 (FM-AFM) の高感度化と赤外応答像測定への応用」	平成 23 年 9 月 26 日
Suketu Naik	「Investigation of Synchronization in a Ring of Coupled MEMS Resonators」 (リング結合した MEMS 共振器の同期に関する研究)	平成 23 年 9 月 26 日
青 山 秀 紀	「作業支援システムのためのユーザ状態の認識と支援選択に関する研究」	平成 23 年 9 月 26 日
橋 本 力	「Knowledge Acquisition from the Web for Text Understanding」 (テキスト理解のための Web からの知識獲得)	平成 23 年 9 月 26 日
I Wayan Mustika	「Distributed Radio Resource Management for Self-Organizing Wireless Networks」 (自己組織化無線ネットワークのための分散無線資源管理)	平成 23 年 9 月 26 日

【論文博士一覧】

伊 藤 義 道	「Frequency Domain Studies on Sampled-Data Systems Using FR-Operators」 (FR オペレータによるサンプル値系の周波数領域における研究)	平成 23 年 3 月 23 日
平 松 孝 浩	「酸化亜鉛薄膜の物性制御とその薄膜トランジスタ応用に関する研究」	平成 23 年 3 月 23 日
上 田 哲 三	「Light-Emitting Devices Using GaN Separated from Sapphire Substrates by Laser Lift-off Technique」 (レーザーリフトオフによりサファイア基板から分離した GaN を用いた発光デバイスに関する研究)	平成 23 年 3 月 23 日

河村 拓馬 (小山田教授)

「粒子ベースボリュームレンダリングによる大規模不規則格子ボリュームデータ向け可視化手法に関する研究」

平成 23 年 3 月 23 日授与

可視化は、人に気付きを与え、思考を深め、対話を促進するという効能について多くの事例が紹介されています。特に、ボリュームレンダリングによる可視化は医療や工学の分野で有効性が示されています。工学でよく利用される有限要素法から出力される計算結果は、有限差分法と違って格子の配列に構造的な性質がなく、非構造格子データと呼ばれています。ボリュームレンダリングでは、視点からの距離の順番で格子を処理する手法が採用されており、見る場所を変えるたびに格子の並べ替え処理（ソート処理）が必要になります。すなわち、このソート処理は、回転・移動・拡大縮小時に必要になります。

スパコンで計算されるような大規模な非構造格子データでは、格子の数が膨大となり、そのボリュームレンダリング手法においては、格子のソート処理がボトルネックとなります。このため、大規模な非構造格子データ向けボリュームレンダリングは、可視化研究者にとって、挑戦的な問題と認識されています。粒子ベースボリュームレンダリング (Particle-based volume rendering, PBVR) は、データと不透明度との関係を表現する伝達関数から粒子の密度関数を推定し、この密度関数に従って、不透明粒子を生成します。密度関数は、粒子の半径の関数になっており、半径を大きくすると粒子数が少なくなりますが、粒子形状が可視化画像に表出するために画質が劣化します。画質を損なわない程度に粒子数をうまく設定できれば、大規模な非構造格子データに対して効率の良いボリュームレンダリング処理が可能となります。

本博士研究では、このような粒子ボリュームレンダリングに対して、画質・計算速度の観点で新しい提案を行いその有効性を評価しました。まず、粒子ボリュームレンダリング処理において、粒子を複数回に分けて生成し、その画面への投影結果を重ね合わせ、平均画像を最終画像とする、いわゆるアンサンブル平均の考え方を取り入れました。この結果、生成回数を変化させることにより、画質の詳細度制御を実現することができました。次に、事前粒子生成処理の導入です。伝達関数が単調でなく、いくつかピークをもつような場合、格子内での粒子生成では、うまく生成が行われず、結果として、ところどころ穴のあいたような可視化画像が得られることがあります。この問題を解決するために、伝達関数におけるスカラデータにおいて、あらかじめ決めた区間ごとに粒子を事前生成して格子での粒子生成ではこの事前粒子を参照する手法を提案し、その有効性を検証しました。

図 1 は、7000 万もの六面体格子から構成される非構造格子データを提案手法を用いて可視化したものです。このデータは、口腔領域を数値流体力学計算ソフトで計算された圧力場で、この可視化により、ヒトの無声摩擦音の生成メカニズムの解明に役立っています。図 2 は、2 億のもの四面体格子から構成される非構造データを提案手法を用いて可視化したものです。このデータは、高温流体の通過するポンプ形状を数値流体力学計算ソフトで計算された応力場で、この可視化により、破断の起きる可能性の高い領域を特定することに役立っています。

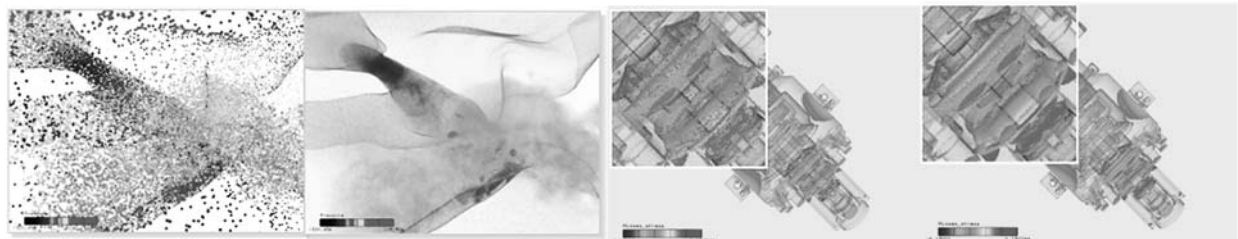


図 1：口腔領域の可視化 (左アンサンブル平均回数 1 回, 右同 144 回)

図 2：自重ポンプの可視化 (左：従来法, 右：提案手法)

横井 裕一 (引原教授)

「Energy Conversion and its Control by Synchronization of Pendulum」

(振子の同期現象によるエネルギー変換とその制御)

平成 23 年 3 月 23 日授与

現代の人間社会を支える電力送電技術と情報通信技術の根底には、同期と呼ばれる現象が大きく関わっている。一般的に同期とは、固有のリズムを有した複数の振動体が弱い相互作用によって同じリズムで振動する現象と理解される。これは同期現象の信号としての側面を言い表したものであり、これまでの情報通信技術の発展に貢献している。一方、電力送電技術は同期現象のもう一つの側面であるエネルギー変換に由来する。成熟した電力送電技術を背景に、同期現象のエネルギー変換の側面は研究対象から忘れ去られてきた。近年のエネルギー問題に起因して電力送電技術が改めて注目される中、情報通信技術が電力送電技術を内包しようとする流れがある。これは同期現象の信号としての側面のみを考慮した議論である。そこで本論文では同期現象のエネルギー変換の側面に再度着目し、その重要性を再確認する。振動体としてよく扱われる振子の同期現象に対し、基礎理論に基づくエネルギー的側面の検討や同期引込みのメカニズムの制御への適用、並びにその工学的応用としてパラメトリック振子を用いたエネルギースキューピングの提案など、同期現象のエネルギー変換作用の工学的有用性を明らかにしている。主要な内容は以下の通りである。

1. 振子に現れる 2 種類の典型的な運動である振動と回転に関して、同期に分類される最も基礎的な現象の一つである周波数引込み現象を理論的に示した。運動に関係なく周波数引込み現象は同一のメカニズムで発生するものの、現象に伴うエネルギー変換作用は異なることを明らかにした。
2. 特に回転に対して、周波数引込み現象を記述する方程式を導出した。これにより、回転の同期に関して、現象とエネルギー変換の関係を記述することが可能になった。具体的には、エネルギーの偏差量と、同期現象の進展を表す位相と呼ばれる状態量の時間変化が比例することを見出した。この結果は、エネルギー変換により位相調整が可能であることを示唆するものである。
3. 工学的応用の観点から振動および回転が共存するパラメトリック振子に着目し、応用上有用な周期回転を初期状態に依存することなく発現させる制御手法を提案した。この制御は、理論的検討で得られたエネルギー授受による位相調整を具体化するものである。実際に機械振子装置を設計・製作し、提案手法の妥当性を検証した。同時に提案手法の応用上の有効性も実験的、数値的に確認し、制御を適用したパラメトリック振子を波動発電機構に適用できる可能性を示した。
4. エネルギー的に異なる特性を有する共存する複数の運動に対して、提案した制御手法を適用し、各運動を選択的に発現可能であることを数値的および実験的に検証した。この結果から、提案手法を同様の位相構造を有する系に適用可能であることを示した。

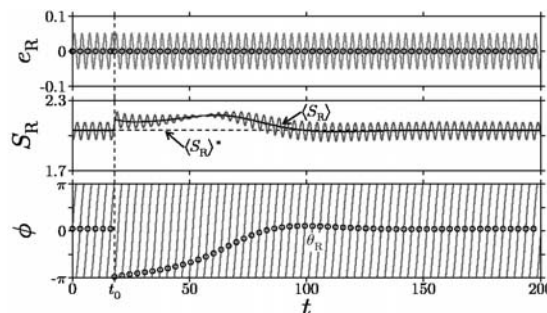


図 1. エネルギー (中) と位相 (下) の関係

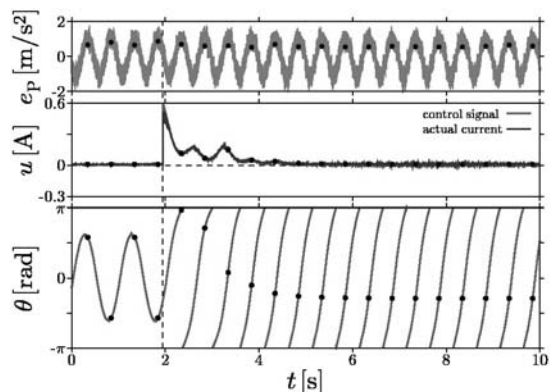


図 2. 周期回転を発現させる制御 (実験)

Netra Gyawali (引原教授)

「Development of Control and Operational Strategies for Wind Power Based Microgrid with Integrated Energy Storage」

(風力発電とエネルギー貯蔵システムを用いたマイクログリッドの運用制御方式の開発)

平成 23 年 3 月 23 日授与

I. Introduction

While the grid integration of wind-power continues to grow worldwide, the industries and the utilities will confront the associative challenges of its intermittency, such as frequency regulation, voltage/reactive power regulation, sporadic tripping to the upstream power network etc. Wind power is further insufficient in islanded operation, where the frequency and voltage regulation are the main issues beside the load-following. Scrutiny of these challenges reveals that their root cause is the intermittent power output, owing to its dependability on varying wind speed; and the best solution, despite its high cost, is to deploy electrical energy storage technologies. In either case, incorporation of an energy storage system can provide an effective mean to address the issues. Our research, in this context, is related to the integration of long-term/short-term energy storage mix, consisting of fuel-cell (FC)/electrolyzer (ELZ) and Ultracapacitor (UC), into a variable speed wind-power system. Considering H_2 as energy exchange medium, the FC/ELZ unit of storage system is utilized for the long-term/steady power balance, while UC unit is applied for the transient power compensation. Fig. 1 comprises the schematic layout of the proposed scheme. To validate the applicability of proposed scheme, the study is related to the development of the mathematical models, control system design and the observation of the dynamic response, considering several operational and loading situations.

II. Simulation and Results

Fig. 2 shows the simulation responses of few variables involved in the system dynamics. When the disturbances are introduced in the system at $t=5, 15$ and 20 s, the UC is operated to compensate the transient part and the SOFC/ELZ is operated to supply the steady state part of power-imbalance, regulating the frequency and the voltage of the ac network. By doing so, the compensating steady state power can effectively be tracked by SOFC/ELZ system, while forcing the steady-state charge flow from UC to zero. Thus, assuming wind-power as negative load, FC/UC/ELZ system acts as the dedicated power supplying source such that the surplus power is consumed by ELZ to produce H_2 , whereas the deficit power is supplied by the FC by re-utilizing H_2 produced by ELZ.

III. Applications

The results of the research can be utilized in renewable generators based microgrid, in which the transient mitigation and the steady-state power balance can be provided by the integrated storage system. By using the proposed control and operational schemes, the transient power from the FC is strategically avoided; thereby protecting the FC from the possible fuel-starvation. Consequently, the overall microgrid evolves into a self-sustainable and dispatchable entity, paving the way to integrate renewable sources in a greater penetration level.

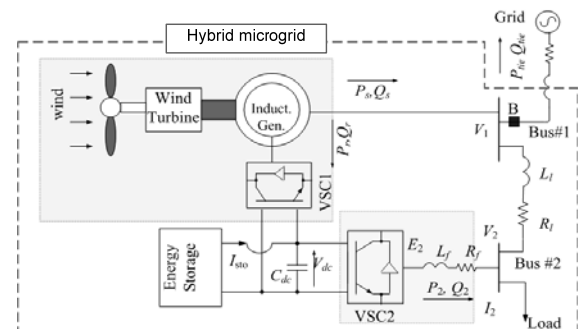


Fig. 1 Schematic diagram of proposed system. The symbols I, V, P, Q, L and R represent the current, voltage, active power, reactive power, inductance and resistance, respectively. VSC1 and VSC2 are the rotor-side and grid-side converter, respectively

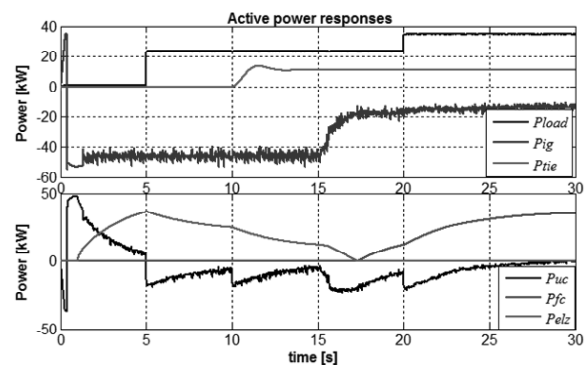


Fig. 2 Power flow responses from different sources; P_{uc} , P_{fc} , P_{elz} , P_{load} , P_{tie} and P_{grid} represent power from UC, FC, ELZ, tie-line and wind turbine, respectively.

馬 淵 雄 一 (和田教授)

「A Study on Electromagnetic Interferences Related to Power Supplies for Micro-controllers in Electronic Control Units」

(電子機器に実装されたマイコンの電源系における電磁干渉に関する研究)

平成 23 年 3 月 23 日授与

今日、パソコンやデジタル家電機器だけではなく、自動車などにもエンジン制御や各種制御・通信などにマイクロコントローラ (Micro-controller : マイコン) などの多くの半導体集積回路 (LSI) が使用されている。本論文は、電子機器に搭載される LSI の動作が原因で生じる電源系高周波雑音による電磁干渉 (Electromagnetic Interference : EMI) の発生機構を明らかにするとともに、その解析および測定による効率的な評価・低減手法を提案した結果をまとめたものである。

まず、機能の異なる複数の半導体チップを内蔵するマルチチップモジュール (Multi-chip Module : MCM) の同時切り替えノイズ (Simultaneous Switching Noise: SSN) の解析評価技術として、パッケージおよびプリント回路基板 (Printed Circuit Board : PCB) の新しい等価回路モデル化手法を提案した。

次に、マイコン搭載 PCB の電源系高周波電流ノイズの解析評価のために、複数の電源端子を有するマイコンのチップ単体マクロモデルを抽出し、これと前項で提案した手法による PCB およびパッケージの等価回路モデルと組み合わせ、図 1 に示すように、製品レベルの電子機器設計の際にバイパスコンデンサの実装位置・個数や PCB の配線形状に依存する高周波電流の伝導量を十分な精度で予測可能なモデル化手法を提案した。

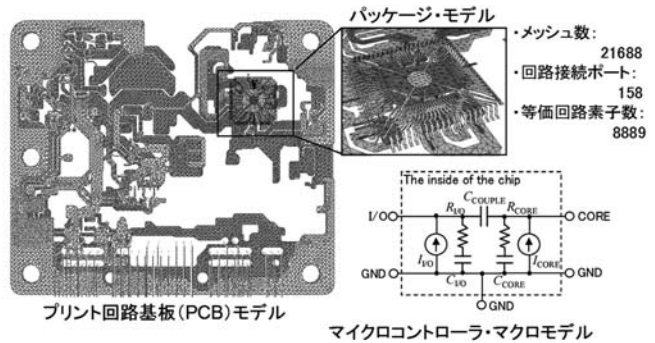


図 1 LSI パッケージ・PCB の高周波電流解析モデル

電子機器からの不要電磁放射の主要因の 1 つは機器のケーブル (ワイヤハーネス) を流れるコモンモードノイズであるが、これに対して、Workbench Faraday Cage と Hybrid Balun を組み合わせた評価手法を提案し、従来手法である CISPR25 で問題であったワイヤハーネスの共振・反共振による影響を受けないことを示した。

車載電子機器で特に重要となる FM ラジオ周波数帯域において、2 層基板を用いた低コスト電子機器に対しても、回路のインピーダンス・バランスを効果的に利用するコモンモードノイズ低減手法を提案した。これは、図 2 に示すように、PCB 電源系配線が参照グラウンドに対する寄生容量とインダクタンスからなるブリッジ回路に近似できることを見出し、理論的かつ実験的に示した成果である。さらにこのバランス制御をマイクロコントローラのパッケージ上で実現する方法を提案し、パッケージ内でコモンモードノイズを最小化できることを実験的に示した。

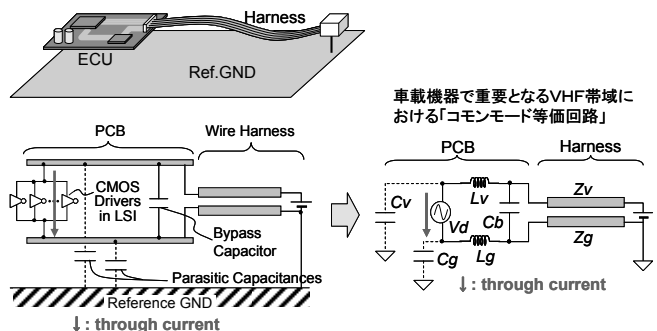


図 2 バランス制御によるコモンモードノイズ低減法

鎌田 雄大 (藤田教授)

「酸化亜鉛薄膜トランジスタの電気特性と透明エレクトロニクス応用に関する研究」

平成 23 年 3 月 23 日授与

酸化亜鉛 (ZnO) を活性層に用いた薄膜トランジスタ (TFT) は、可視域に透明なデバイスとして、有機撮像素子やディスプレイなどへの応用が進んでいる。しかし、これまでの研究は成膜条件の最適化によるトランジスタ特性の改善に力が注がれており、化学量論比や欠陥といった ZnO 薄膜の微視的な構造とトランジスタ特性の関係は明確でなかった。また、裾準位やギャップ内準位の影響で、TFT が可視域の光に応答するという問題があった。本研究は、高知工科大学および龍谷大学との共同研究を主体に、トランジスタ特性に与える要因を ZnO の微視的な構造をもとに実験・シミュレーションの双方から検討し、また光誘起電流の発生機構を調べることで、それを低減しうる新しいデバイス構造を提案し、透明エレクトロニクスの進展に寄与することを目指したものである。

研究では、まず TFT への応用に適した ZnO 薄膜の成膜条件を求め、ZnO の化学量論比の違いが欠陥構造に大きく影響することから、化学量論比の正確な制御が必要であることを示した。この結果をもとに、有機膜の機能と複合させた縦型撮像素子を作製し、撮像の原理実証を行った。

また、ZnOTFT への可視光照射下での光誘起電流を実験・シミュレーションの双方から解析し、その発生機構を考察した。図 1 のように TFT の上部に Cr マスクを設けて活性層内の特定の領域を照射し、同時にシミュレーションの結果を踏まえ、TFT のソース・ドレイン電極がショットキー接合をなすモデルで記述可能であることを示した。また、TFT が禁制帯幅より長波長の光照射に対しても感度を持つ理由は、裾準位を介して生成したキャリアの影響でソース領域のポテンシャルが変化することが主因であることを明確にした。これらの結果をもとに、図 2 のようなデュアルゲート構造を用いソース領域のポテンシャルを制御することで光感度の低減が可能で、透明デバイスとして応用範囲の広いデバイスが得られることを実証した。

さらに、主に暗状態での ZnOTFT について、伝達特性の測定温度依存性・チャネル長依存性・活性層膜厚依存性を評価することで電気伝導を制限している電流機構を明らかにし、また InZnO と ZnO を積層させた構造のチャネルを用いて、移動度を 3 倍超に向上することにも成功した。

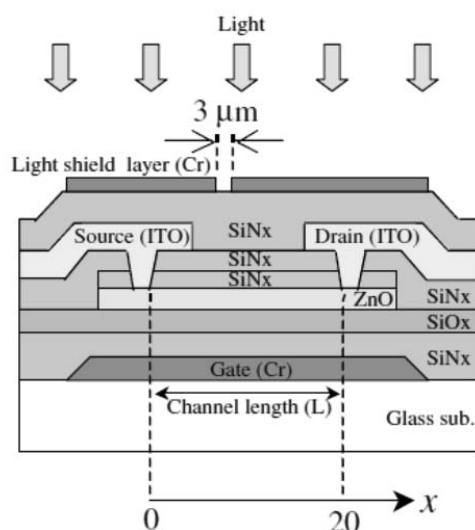


図 1 活性層の一部を光照射する TFT 構造

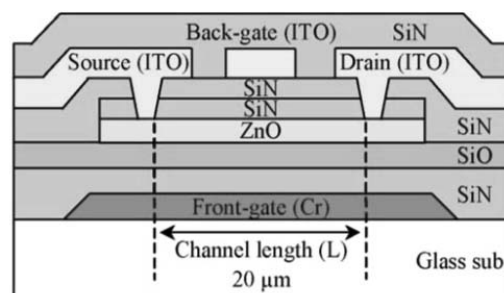


図 2 デュアルゲート TFT 構造

北 村 恭 子 (野田教授)

「フォトニック結晶レーザによる径偏光ビームの生成とその集光特性」

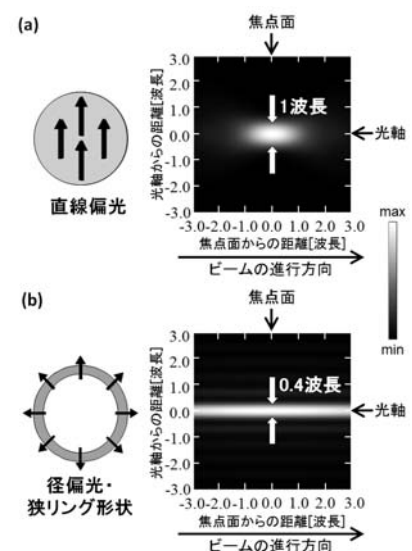
平成 23 年 3 月 23 日授与

本論文は、ビーム断面内で放射状に電界の偏光が制御された径偏光ビームを用いて、微小かつ焦点深度の深い集光点を実現し、その集光点を得るのに最適なビームの生成、その集光点での光と物質の相互作用について検討した結果をまとめたものである。

CD や DVD などの光記録媒体、レーザ顕微鏡、半導体微細加工技術など多くの光技術において、高密度化・高分解能化・高精度化を導くためには、微小な集光点を得ることが、大変重要である。しかし、通常、光は波長以下に集光できず、またその焦点深度も 1 波長程度と浅い。そのため、例えば光ディスクは、CD からブルーレイディスクのように、光の短波長化によってその容量を増加させ、焦点深度に対しては、ディスク揺らぎに対して、光源の位置を制御するような光学系を導入するといった工夫がなされてきた。

本論文では、レーザビームのビーム形状と偏光を制御するという新しいアプローチで、上記の課題を解決する方法を見出した。径偏光ビームと呼ばれる、ビーム断面内で偏光分布を有するビームを用い、偏光の特長を生かすよう、ビーム形状をドーナツ状から幅の狭いリング形状にして、集光することで、従来よりも小さな集光点を形成できることを理論・実験の双方から実証した。またこの小さな集光点において、従来のビームでは成し得なかった焦点深度を深くすることも実現した (図)。次に、このような集光点を得るのに最適な径偏光・狭リング形状ビームを、リングの円周上に作製したフォトニック結晶構造と電流狭窄構造を用いた、新たなフォトニック結晶レーザ構造によって、直接生成することに成功した。また、この新たなデバイスから発せられたビームを用いて、焦点深度の伸長を実験により示した。加えて、このような集光点における光と物質の相互作用を理論的に検討し、その集光点が、金属と強く相互作用しながらも、遠隔場的なエネルギーの観点からは、あたかも透明のように振舞う、といった、新奇な特性を示すことも見出した。

以上の成果は、光ディスクの高密度化や、高精度な素子加工、高分解能での顕微鏡観察を可能にするだけでなく、その新奇な集光特性を用いた新たなデバイスの創生も大いに期待される。



図：通常の直線偏光ビーム (a) と径偏光・狭リング形状ビーム (b) の焦点近傍の光高度分布

玉山泰宏 (北野教授)

「No-Reflection Phenomena for Isotropic and Chiral Metamaterials」

(等方性および旋光性メタマテリアルに対する無反射現象)

平成 23 年 3 月 23 日授与

電磁波の波長に比べて十分小さい構造の集合体であるメタマテリアルによる電磁波伝搬の制御が盛んに研究されている。メタマテリアルを用いると比誘電率や比透磁率といった媒質パラメータを自由に設計できるため、電磁波伝搬の性質を決める量である波数と波動インピーダンスを独立に制御することが可能になる。本研究では、メタマテリアルにおけるブリュースタの無反射現象に着目し、これまでに実証実験が行われていない TE 波に対する無反射現象の実験的な観測と旋光性媒質に対する無反射条件の理論の確立を目的として研究を行った。

まず、メタマテリアルにおける波数と波動インピーダンスについて詳しく解析した。これらの量は媒質パラメータの積や商の平方根で記述される。複素平方根関数は 2 価の関数であるため、適切な分枝を選ぶ必要がある。しかし、従来用いられてきた分枝選択法では、メタマテリアルに対して適用できない場合がある。この問題を解決するために、マクスウェル方程式を対角化し電磁波伝搬の解析を行った。その結果、電磁波のエネルギー伝搬方向と波数の向きとの関係に着目することにより適切な分枝を選ぶことを見出した。

次に、磁気的メタマテリアルを用いて TE 波に対する無反射現象を観測した。磁気的メタマテリアルとしては図 1 (b) のような分割リング共振器 (Split-ring resonator, SRR) アレイを用いた。FDTD 法を用いて SRR アレイの比誘電率と比透磁率を解析したところ、SRR の共振周波数付近において、TE 波に対する無反射条件を満たす媒質パラメータが存在することがわかった。SRR アレイを作製し、図 1 (a) に示した実験系で TE 波に対する反射率の入射角依存性を測定したところ、図 1 (c) のようにある特定の入射角に対して反射率が非常に小さくなる現象が観測された。すなわち、TE 波に対する無反射現象の実証に成功した。

最後に、電磁波が真空から旋光性媒質に入射する場合の無反射現象について解析した。無反射条件は反射ジョーンズ行列の零固有値条件から導出した。導出の結果、旋光性媒質における一方の円偏光に対する波数と波動インピーダンスが真空での値に等しい場合には、図 2 のように対応する円偏光に対して任意の入射角において反射も屈折もせずに透過するという特異な無反射現象が生じることを発見した。さらに、円偏光に対する無反射現象を実現しうる旋光性メタマテリアルの構造についても考察した。

以上のとおり、本研究では等方性および旋光性メタマテリアルに対するブリュースタの無反射現象の観測および理論の構築を行った。これらの結果は、従来は実現できなかった偏光制御デバイスの実現につながると考える。

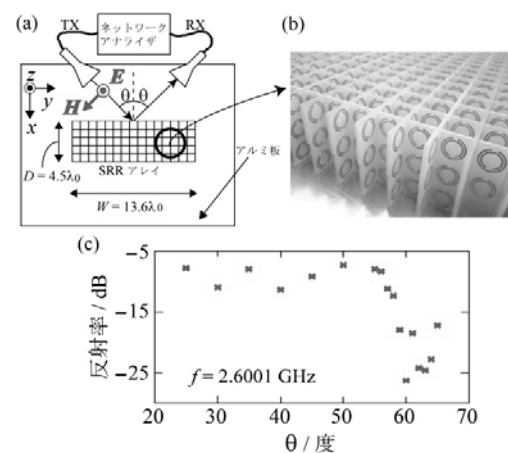


図 1 : (a) TE 波に対するブリュースタ現象観測の実験系, (b) SRR アレイ, および (c) 反射率 - 入射角特性の測定結果.

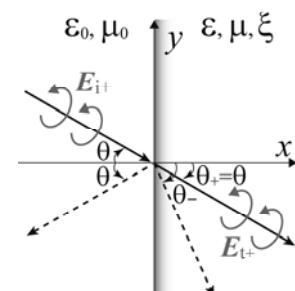


図 2 : 円偏光に対する無反射現象.

常見 英 加 (松重教授)

「デュアルプローブ原子間力顕微鏡の開発及びナノスケール電気特性評価への応用」 平成 23 年 3 月 23 日授与

近年、電子デバイスの微細化が限界を迎えつつあるなか、単一／少数の原子分子からなる新たな素子開発を目指した研究が盛んである。そのような新たな素子開発のためにはまず、原子分子レベルで材料の物性を知る必要があり、ナノスケールの計測技術の確立が求められている。現在のナノサイエンス分野での主要な計測手法のひとつに原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscopy: AFM) 技術がある。AFM は先鋭な探針 (プローブ) で観察対象の表面を走査し対象との相互作用を検出する顕微装置であり、高分解能な形状観察に留まらず、表面電位や磁気力、圧電性や導電性の計測、更には微細加工など多様な機能を有している。しかし、対象にアプローチできるプローブが1つのみであるため、その適用範囲が限られている。

プローブを複数本にし、それらが独立に動作出来れば、多端子電気計測、局所刺激と同時の応答計測、微細加工とその場評価など、AFM の応用分野が更に広がる。このような背景のもと、ナノ計測の新たなツールとしてのデュアルプローブ原子間力顕微鏡 (DP-AFM) の開発、およびナノ材料の電気計測への応用を目的として研究を行った。

AFM の開発にあたっては、探針—試料間相互作用力 (探針変位量) の検出手法が装置構成や感度、応用範囲に関わる特に重要な要素である。本開発装置では、検出法として最も一般的な光てこ法を採用した。光てこ法は比較的複雑な装置構成を必要とするが、検出感度が高く、多様な応用実績があるなどの利点があり、上記のような多様なアプリケーションを実現するためには導入が不可欠である。開発した DP-AFM の写真を図 1 に示す。大気中の酸素・水の影響を受けやすい試料や、液体中の生きた生体試料も測定対象とするため、真空下、大気下、液中での動作が可能なものとした。

装置の基本性能およびナノ電気計測への適応可能性評価の例として、導電コートを施した2つの探針をナノテスターとして用い、図 2 のような長さ約 $1\mu\text{m}$ 、直径約 20nm の金ナノロッドの抵抗計測を行った。絶縁性基板の上に分散させた金ナノロッドを各探針で観察したうえでナノロッド上へ探針を配置し、接触させた。2つの探針間の電流—電圧特性を取得し、図 3 に示すように探針間隔 970nm において 442Ω の抵抗値を得た。また、2つの探針間隔を 300nm 程度まで任意に接近させて測定を行うことができた。

本研究ではこのほかに、DP-AFM を用いて異方的導電性を有する高分子単結晶に対する電荷注入と電荷拡散マッピング、有機半導体薄膜の電界効果トランジスタ特性計測に成功した。



図 1 : 開発した多環境動作 DP-AFM 装置の写真

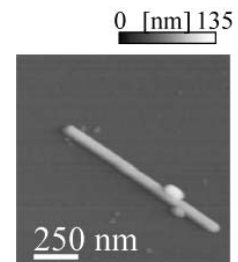


図 2 : DP-AFM で観察した金ナノロッドの形状像

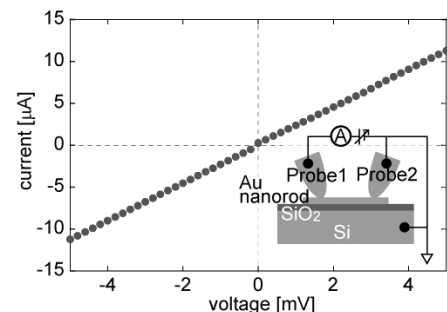


図 3 : DP-AFM で測定した金ナノロッドの電流 - 電圧特性

Upham Jeremy (野田教授)
 「Dynamic photon control by photonic crystals」
 (フォトニック結晶による光子の動的制御)
 平成 23 年 3 月 23 日授与

Photonic crystals (PC) are artificially fabricated structures with periodic refractive indices of optical wavelength-order. Analogous to electrons in a semiconductor, this periodicity provides the spatial symmetry necessary to dictate the allowed states of photons in the PC as dispersion relationships between their frequency and wavevector. Particular PC geometries develop photonic band gaps: ranges of frequency where photons are completely forbidden from existing in the medium. Designing breaks to this symmetry can create defect states where designated frequencies can couple to resonant or propagating optical modes with wavelength-order precision, providing the ultimate spatial control over photons. This work demonstrates that by combining the robust spatial control offered by silicon PCs with equivalent temporal control, the behaviour and characteristics of photons can be manipulated. This drives us to conceive, demonstrate and critically evaluate techniques for temporal control over light as it interacts with PC devices.

1-On-the-fly wavelength conversion is based on an equivalency between the spatial and temporal dimensions of the wave equation. It is well understood that if light travels through a medium with spatial variation of the dielectric constant, then there will be a corresponding change to the field's wavenumber. However, by that same reasoning a temporal change of the dielectric constant results in a variation of the light's frequency. This is demonstrated by the spectrum of an optical pulse propagating through a PC line defect waveguide experiencing a sudden, localized change of the refractive index. The spectrum shifts proportionally to the magnitude of refractive index change witnessed by the pulse (Fig. 1) and is highly time sensitive. Frequency shifts of up to 2.8 nm have been observed and can be integrated with other PC devices to provide dynamic functionality.

2- Another form of dynamic photon control is dynamic Q factor control of resonant nanocavities for the catch and release of optical pulses. By dynamically manipulating the phase relationship of interference between optical paths coupling between the nanocavity and a nearby waveguide (Fig. 2 (a)), photons can be dynamically encouraged or forbidden to couple between these structures, catching and releasing photons from the resonant mode on-demand. Time-resolved observation of the nanocavity field shows clear manipulation of the photon lifetime during capture and release (Fig. 2 (b)). Independently controllable input and output ports have also been devised, showing successful release of a 4 ps pulse up to 327 ps after capture.

In addition to controlling the carrier frequency and lifetime of photons in these silicon PCs, further investigation could lead to improved performance by harnessing the characteristic properties of different semiconductor media and the development of dynamic control over strong coupling.

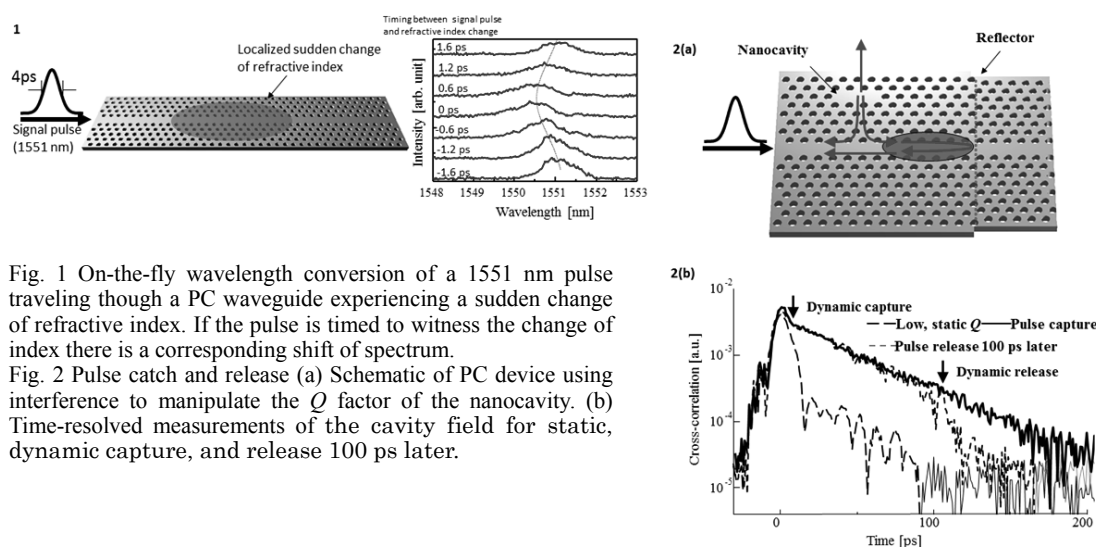


Fig. 1 On-the-fly wavelength conversion of a 1551 nm pulse traveling through a PC waveguide experiencing a sudden change of refractive index. If the pulse is timed to witness the change of index there is a corresponding shift of spectrum.
 Fig. 2 Pulse catch and release (a) Schematic of PC device using interference to manipulate the Q factor of the nanocavity. (b) Time-resolved measurements of the cavity field for static, dynamic capture, and release 100 ps later.

中 尾 正 悟 (吉田教授)

「Study of Uplink Control Channel for LTE and LTE-Advanced」

(LTE と LTE-Advanced における上り制御チャンネルに関する研究)

平成 23 年 3 月 23 日授与

平成 22 年末、第 3.9 世代の無線通信システムである Long Term Evolution (LTE) の商用サービスが開始された。また、第 4 世代の無線通信システムである LTE-Advanced の標準化もほぼ完了しており、近い将来に商用サービスが開始される見込みである。本論文は、著者の LTE 及び LTE-Advanced システムにおける上り制御チャンネルに関する研究をまとめたものである。

LTE 及び LTE-Advanced における上り制御チャンネルは、下りデータに対する Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) を制御する上り応答信号 (ACK 信号 / NACK 信号) を伝送するためのチャンネルであり、異なる端末からの応答信号同士は符号分割多元接続 (Code Division Multiple Access : CDMA) によって多重化されている。

この上り制御チャンネルの安定性向上やキャパシティ改善は、LTE 及び LTE-Advanced を利用するユーザの体感速度を向上する上で重要であり、著者は、この上り制御チャンネルに着目して研究を行ってきた。また、この研究成果の一部は標準化団体である 3rd Generation Partnership Project (3GPP) に提案され、一部が実際の規格として採用されている。

本論文で纏められている研究成果は以下の通りである。

- 1) 端末の高速移動時にも安定した通信を実現するための上り制御チャンネルの構成に関する研究及びその評価結果
- 2) 端末の送信タイミング制御誤差に起因する符号間干渉が、上り制御チャンネル伝送特性に与える影響の検証、及びその影響を軽減できる手法の研究
- 3) 上り制御チャンネルにおける符号間干渉が、基地局側での上り応答信号有無の検出に与える影響の検証、及びその影響を軽減できる手法の研究
- 4) 上り制御チャンネルのマルチアンテナ化に関する研究、及びマルチアンテナ化に伴うリソースオーバーヘッド増加を抑える技術の研究

1) の研究では、従来の上り制御チャンネルの問題であった、端末の高速移動時における応答信号の伝送特性劣化を、新たな符号設計手法を導入することによって解決し、計算機シミュレーションによってその効果を確認している。

2) の研究は、実運用環境において発生し得る、送信タイミング制御誤差に起因する符号間干渉による影響を低減するために取り組んだものである。ここでは、ACK 信号と NACK 信号の発生頻度の違いに着眼し、実質上、符号間干渉がシステム全体に与える影響を最小化する手法を提案し、シミュレーションを通してその効果を確認した。

3) の研究は 2) に関連して行ったものであり、下り HARQ 制御手法の一つである「Incremental Redundancy」を適用するために必要な、上り応答信号有無の検出に関するものである。ここでは、従来の応答信号有無検出アルゴリズムに対して、解析的な考察を通して問題点を明らかにし、2) の手法と組み合わせることによってその精度を大幅に向上できることを示している。

4) は上り制御チャンネルに送信ダイバーシチ (Spatial Orthogonal Resource Transmit Diversity) を適用する場合のオーバーヘッド削減に関する検討である。ここでは、オーバーヘッドの増加を最小限に抑えつつ、なるべくダイバーシチ利得を得るための手法の提案及び評価を行っている。

久保 広行 (高橋教授)

「モバイルマルチキャストのための心理要因と物理要因の補償技術」

平成 23 年 3 月 23 日授与

本論文は、ユビキタス時代におけるインターネットサービスの主役となるモバイル環境において、情報コンテンツを複数の端末に配信するマルチキャスト技術を実現させるためのアーキテクチャについて、電波や電力などの物理的要因と利用者の心理要因の両面から検討したものである。

一般に、モバイル環境では電波や電力などの物理的制約のために高品質でサービスを楽しむことが困難である。そこで、複数の端末がリソースを共有することでサービス品質を向上させるアプローチが注目を集めている。本論文では、リソースを共有してマルチキャストサービスを実現するための課題をとりあげ、それを解消する技術を提案した。本論文で提案する技術群を用いることで、モバイル環境でデータストリーミングなどの高品質コンテンツを楽しむことが可能になる (図 1 参照)。

1. モバイル端末が論理ネットワーク上でコンテンツを中継転送することでコンテンツを配信するオーバーレイマルチキャストにおいて、物理要因を限定し、心理要因に着目してそれを補償する技術を提案した。コンテンツの中継相手が自身の友人であるときに心理コストを低減させることができることに着目し、ユーザの人間関係を表したソーシャルネットワーク上でコンテンツ配信トポロジを作成することで心理要因を補償しサービス品質を向上させた (図 2 参照)。

2. オーレイマルチキャストにおいて、考慮される物理的要因を整理し、それを考慮して最適なトポロジをどのように構築するかを検討した。コンテンツ中継に影響を及ぼす複数の物理的要因を、統計処理により集約して単一の指標にし、それを元にトポロジを構築することでトポロジ全体の品質を高めることができた。

3. 単一の基地局から電波を受信可能な複数の端末にコンテンツを同報配信する Point-to-Point マルチキャストに着目し、複数の無線基地局が存在する環境を想定し、基地局から離れている端末の受信ロスが大きくなるが、提案手法では所望コンテンツを受信した端末からの再送信によってその受信ロスを補償する。更に、異なる無線基地局の配下にある端末同士での再送信による補償を実現することで、その効率を更に高めることができた。

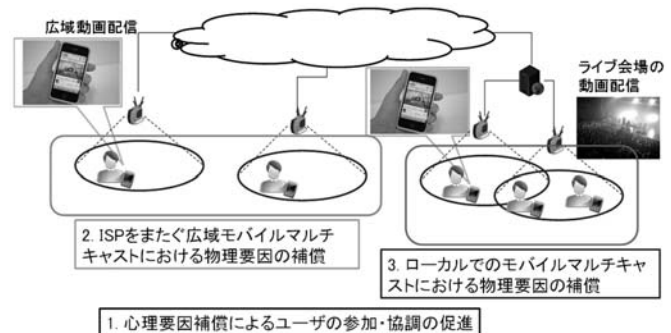


図 1 提案アーキテクチャ概要

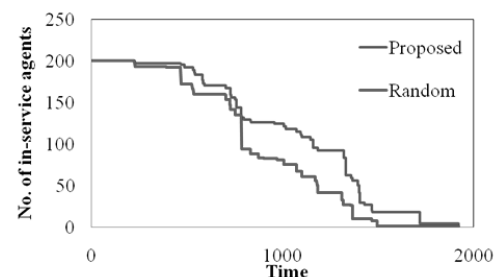


図 2 サービス時間に対する参加ユーザー数の推移

金岡 泰弘 (吉田教授)

「光ファイバを用いた電力通信網の高度化の研究」

平成 23 年 3 月 23 日授与

スマートグリッドに代表される将来の電力供給システムにおいては、太陽光発電や風力発電等、いわゆる多数の小規模な再生可能エネルギーが組み込まれることになると予想されます。安定して電力の供給を維持するためには、これらの発電制御や運転状況の把握等を行う必要があります、そのためには、既存の電力通信網に加えて、広範囲に分布する機器と電力供給システムの制御拠点間での通信が必要となります。さらにこの新たな通信需要の発生は、現在の電力供給システム用の拠点間の通信網を伝送する情報量の増大をもたらします。そこで、変電所や発電所等の電力供給拠点間の既存通信網を伝送する情報量の増大に対応するための波長分割多重伝送を用いた光ファイバ伝送の大容量化と、新たに発生する多数の小規模発電機器等との通信を収容可能な、無線伝送と光ファイバ伝送を組み合わせた光電波融合技術に基づく無線システムに関する成果を取りまとめました。

電力会社における大規模な発電所や変電所等、電力供給のための重要拠点間は電力会社に固有の光ファイバ設置形態である OPGW (Optical Ground Wire: 送電線最上部のアース線に光ファイバを内蔵したもの) で結ばれています。しかし OPGW は送電線と同じルートに敷設されるため、通信拠点として利用できる変電所等の数が少ない上に、比較的距離をおいて存在しています。また、中継を行うために送電線ルートの途上に局舎を設置することは難しく、OPGW を張替えて芯線数を増加させることも容易ではありません。このような電力会社の通信網の特徴を考慮した伝送モデルにおいて、波長分割多重伝送による大容量化のため、波長間隔や光ファイバ入力強度を伝送実験により明らかにしました。また、実際に敷設されている OPGW を用いた伝送実験により、不規則波長配置による伝送特性を明らかにしました。

次に、将来新たに発生する可能性のある小規模発電装置等の数多くの通信対象を前提として、足回り部分を無線で伝送し、光ファイバで拠点へ情報を集約する光電波融合技術を用いた無線システムについて、実際に 2.4GHz 帯と 5GHz 帯の無線装置を試作して基本特性を確認するとともに、低コスト化の検討を行いました。従来は光-電気変換部に高価な DFB-LD (Distributed Feed Back Laser Diode) を用いることが一般的であったのに対して、安価な FP-LD (Fabry Perot Laser Diode) を用い、さらにこれと光検出器を一体化した双方向モジュールの開発を行いました。その結果、伝送特性は従来方式に比べてわずかな劣化にとどまり、FP-LD を組込んだ双方向モジュールを使うことが実用的であることを明らかにしました。

また、光電波融合技術を利用して無線システムを効率的に構築できるマルチセルシステムの検討を行いました。1 台の無線機に複数の子局を接続して、無線機当たりのサービスエリアを拡大する場合のセルの重なり部分での干渉問題を解決するため MIMO (Multi-Input Multi-Output) 技術を適用する手法を提案しました。次に、市販の MIMO 対応無線 LAN を用いて、光電波融合技術を用いた伝送装置により隣接セルを無線機の異なるアンテナポートと結んだマルチセル環境を構成し、1 つのアンテナポートを分岐した場合と比較評価を行いました。実際に野外伝送実験を行い、複数子局からの電波で干渉が生じるエリアにおいて MIMO を適用することにより特性が改善されることを明らかにしました。

以上のように、実験による検討結果が大きな割合を占める論文となりました。実際に敷設されている光ファイバを用いた実験や、屋外での無線の伝送実験等、限られた時間や場所のもとで苦労しながらデータを取得したことが、今では良い思い出となっております。

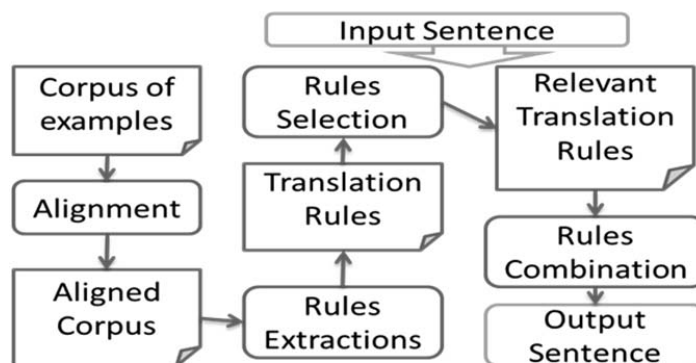
Fabien Cromieres (黒橋教授)

「Using Scalable Run-Time Methods and Syntactic Structure in Corpus-Based Machine Translation」

(スケーラブルな実行時手法と構文木に基づくコーパスベース機械翻訳)

平成 23 年 3 月 23 日授与

With the development of Internet and Globalization, Machine Translation of natural languages has become a more strategic topic than ever. In the past decade, increase in processing power and available resources have led many researchers to shift focus from heavily linguistic and expert knowledge-based systems to corpus-based approaches. The principle of the corpus-based approach is to use



existing corpora of translations to automatically learn how to create new translations. This approach started to develop in the 1980s, and it actually originated in Kyoto University with Professor Makoto Nagao, who proposed some of the initial ideas as early as 1984. The general framework for Corpus-Based machine translation is as follows. First, a large corpus of translation examples (consisting of sentences in source and target languages) is collected. These examples are then aligned: links are established between subparts of the source and target side that are translations of each others. The aligned corpus can then be used to extract translation rules that will be used for translating an input sentence. In this general framework, many differences exist between systems, depending on which type of translation rules are used and which amount of syntactic information is used.

This thesis explores several issues concerning use of syntactic structure in large-scale Corpus-Based Machine Translation. In particular, we emphasize the need to move towards methods that are scalable (applicable to systems using millions of examples) and if possible relying on run-time computations (avoiding the need to pre-compute and store too many informations). We also emphasize the need to take into account the syntactic structures of the examples and their differences across language.

More specifically, the contributions of this theses cover several aspects of corpus-based machine translation. As for the alignment aspect, we propose a new framework for alignment making use of graphical models. This framework allows specifying new alignment algorithms in a flexible way. We also propose an approach to alignment where the alignment can be done on a per-sentence basis, allowing to do the alignment step at run-time, on an on-demand basis. As for the rules extraction and selection aspect, we develop a method for efficiently retrieving translation examples in the corpus that are pertinent to the translation of a query sentence. This method is based on retrieving examples whose part of the syntactic structure match that of the sentence. Several challenges, such as keeping the processing time and memory used manageable, require the use of innovative algorithms, such as an adaptation of the concept of Suffix Arrays to trees. Finally, motivated by the facts that some of the simpler type of translations rules cannot capture some translation phenomenon happening during translation, we also propose some new type of rules that can handle more complex transformation phenomenon while still being time-efficient to use.

村 脇 有 吾 (黒橋教授)

「Automatic Acquisition of Japanese Unknown Morphemes」

(日本語未知語の自動獲得)

平成 23 年 3 月 23 日授与

日本語のテキストを対象に情報検索や機械翻訳といった応用処理を実現しようとしたとき、まず問題となるのは、世界の多くの言語と異なり、日本語では語を空白によって区切らないことである。そのため、テキストを語に自動分割するという処理（形態素解析）が前処理として広く用いられている。形態素解析には長い研究の歴史があり、現在主流となっている手法は辞書を用いるものである。辞書には、(1) 動詞「書く」が「書か-ない」、「書き-ます」、「書く」と活用するといった文法知識、および (2) 「書く」、「話す」などの個々の語が人手により記述される。この方式は新聞記事を対象とした従来の評価実験では高い精度を達成している。

辞書に基づく形態素解析は、テキスト中に出現する語があらかじめ辞書登録されていることを前提としており、辞書にない語（未知語）の解析を誤りやすいという欠点がある。新聞記事向けに人手で整備した辞書を用いると、例えば、「とう痛」、「卵黄囊」といった専門用語が頻出する論文や、「ググる」、「ようつべ」といった俗語がでてくるウェブテキストに対して、満足な解析結果が得られない。この問題への対処法として、新たな分野のテキストを解析する際、あらかじめ人手で辞書に語彙登録するということが現在でも広く行われている。本論文は、このようなコストのかかる語彙登録を計算機により自動化する手法を提案している。具体的には、人手により文法規則と基本的な語彙は整備済みという設定のもと、解析対象のテキスト中出现する未知語を獲得し、人手の介在なしに直接解析にフィードバックする。

本論文では、テキストからの未知語の自動獲得という課題を、未知語検出、未知語同定、自動獲得した名詞の意味分類という3つのサブタスクに整理し、それぞれに対して解法を提示した。未知語検出タスクは、テキスト中出现する未知語を検出するタスクである。基本的な語彙は人手により登録済みのため、テキスト中の未知語は一般に低頻度だが、効率的に、しかも高い再現率で発見する手法を提案した。次に、検出された未知語に対して、(1) 形態レベルでの同定と (2) 意味分類という2段階の問題への切り分けを行った。形態レベルの同定では、日本語が持つ形態論（文法）的が利用できることに着目し、従来手法が統計的に信頼できないとして無視していたほどの少数の用例から高精度に同定できることを示した。一方、明確な文法的区別に基づかない意味分類では、構文情報を含めたより広い手がかりを利用する分類手法を提案した。

本論文が自動獲得の対象としたのは、語（形態素）という言語の最小単位である。しかし、言語処理を用いた応用処理を実現するうえで、語だけでなく、より長い意味的まとまりである複合語の認識も重要である。今後は、複合語についても計算機が自動認識できるように研究を進展させたい。

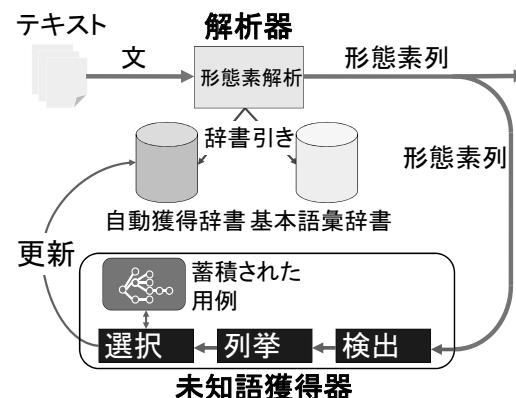


図1 未知語獲得システム

植 野 剛 (石井教授)

「General Approach to Reinforcement Learning via Statistical Learning」

(統計学習による方策評価法の考察)

平成 23 年 3 月 23 日授与

強化学習は未知の環境に置かれた学習エージェントが自律的に行動方策を学習する方法論である。近年、強化学習は自律エージェント学習問題におけるスタンダードな手法とされるまで発展を遂げ、様々な実問題に応用され、大きな成果を挙げている。それら成功で中心的な役割を担っているのは TD 学習に代表されるモデルフリー方策評価法を組み込んだ強化学習法である。この手法は方策の“価値”（期待累積報酬和）の推定を行う、(モデルフリー) 方策評価と、推定した価値に基づく方策の改善、方策改善を交互に行うことで方策の学習を行う枠組みである。この学習法の最大の特長は方策評価時にタスク環境の推定せずに現在の方策の“価値”を推定する点である。つまりタスク環境のダイナミクスを知ることなく、方策の学習を行うことができる。この望ましい性質により、多くの研究者が魅了され、新しいモデルフリー方策評価法とそれを組み込んだ強化学習法が次々と誕生した。しかし一方で、これまでモデルフリー方策評価アルゴリズムの理論解析、特に価値推定の推定精度に関してはほとんど検証されておらず、アルゴリズム間の推定精度による比較など理論的な考察は十分に行われていない。

本学位論文では、モデルフリー方策評価問題における価値関数推定の性質を統計学習の観点から解明する。本研究の独創的な点は、セミパラメトリック統計推論をもとにした価値関数推定の新しい枠組みを提案している点である。この枠組みは、セミパラメトリックモデルによりモデルフリー方策評価をより一般的な統計問題に変換し、統計学習分野で確立されている様々な解析手法をモデルフリー方策評価の統計解析に応用することが可能となる。この枠組みより、これまで明らかにされてこなかったモデルフリー方策評価の重要な統計的な事実を多数発見した。

さらに本研究では理論研究では、モデルフリー方策評価法の実応用として 2 足歩行ロボットの歩容の学習に挑戦した。不安定な歩容の 2 足歩行ロボットに強化学習を適用し、安定した歩容を獲得することを狙いとしているが、学習中 2 足歩行ロボットはすぐに転倒するため、サンプルが潤沢に得ることができない。この困難に対処するため、本論文では、過去に獲得したサンプルを再利用することが可能な強化学習アルゴリズムを用いた。これにより、計算機実験、並びに実機実験においても 2 足歩行ロボットの安定した歩容を高速に学習することに成功した。

小林 弘 和 (北野教授)
 「Geometric phases in optical interferometry」
 (光学的干渉における幾何学的位相)
 平成 23 年 5 月 23 日授与

図1のように球面上の接線の平行移動を考える。移動中は回転が起きていないにもかかわらず、平行移動後に元の場所に戻ってくると、接線の通った閉経路の面積に比例した角度だけ接線の向きがずれてしまう。これは球面が歪曲していることに起因する現象である。1984年にBerryは同様の現象を起源とする位相量を発見した。彼は量子状態を断熱的に時間発展させて元の状態に戻ってきたときに生じる位相の中に、状態空間の歪曲を反映した位相量が含まれていることを示した。この位相量は時間発展の経路で囲まれる面積という幾何的な量に比例するため、「幾何学的位相」と名付けられた。幾何学的位相は多岐に渡る物理系で観測される普遍的な位相量である。本研究では特に光の偏光状態に着目し、光学的干渉に内在する幾何学的位相を明らかにした。さらに、幾何学的位相の非線形な変化を利用した高感度測定への応用を考えた。以下に本研究で得られた成果を示す。

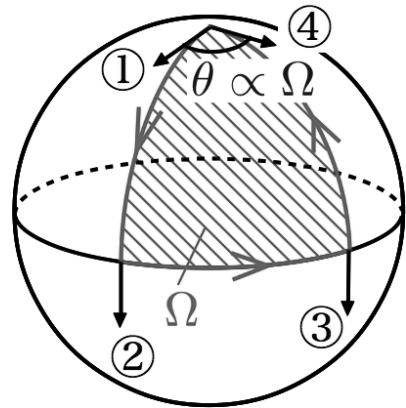


図1：球面上の接線の平行移動。

1. 3 光束干渉を用いた幾何学的位相の直接観測

3つの偏光状態で決まる幾何学的位相を、簡易に観測する新たな手法を考案した。この手法に従えば、3つの偏光状態を準備して干渉させるだけで、それらの干渉模様から幾何学的位相の情報を抽出することができる(図2参照)。

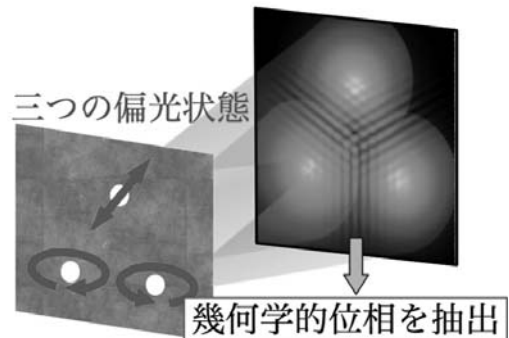


図2：3 光束干渉計。

2. 量子消去系における幾何学的位相

ヤングの二重スリット干渉計において、偏光状態を利用することで、干渉縞の消去と復活を観測できる(図3参照)。このような実験系を量子消去系と呼ぶ。本研究では量子消去系の原理と幾何学的位相が密接に関係していることを明らかにし、さらに量子消去系において幾何学的位相が急激に変化する様子を観測した。

3. 2 光子に対する幾何学的位相と高感度測定

1光子ではなく2光子分の位相を取得し、幾何学的位相の変化量が2倍に増大されることを実験的に示した。また、この位相変化を利用した高感度測定を提案し、その評価を行なった。

以上の成果はいずれも非常にシンプルな構成の実験系を用いているが、量子消去や幾何学的位相、またその非線形性といった量子論の基礎に関する効果や概念を直接確認できるという意味で非常に重要な役割を果たすものである。

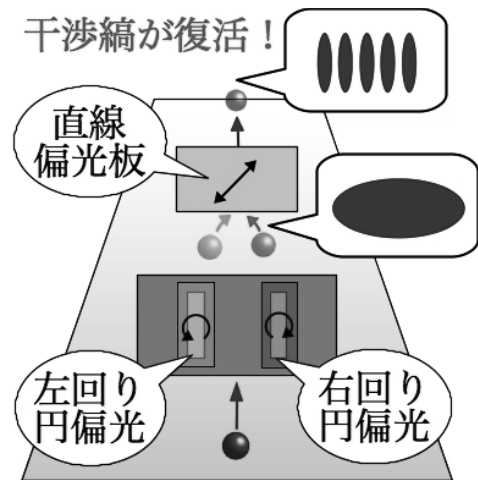


図3：偏光を利用した量子消去。直線偏光板で経路の情報を消去すると干渉縞が復活する。

田 畑 悦 和 (橋口浩之准教授)

「Observational study on diurnal precipitation cycle over Indonesia using 1.3-GHz wind profiling radar network」

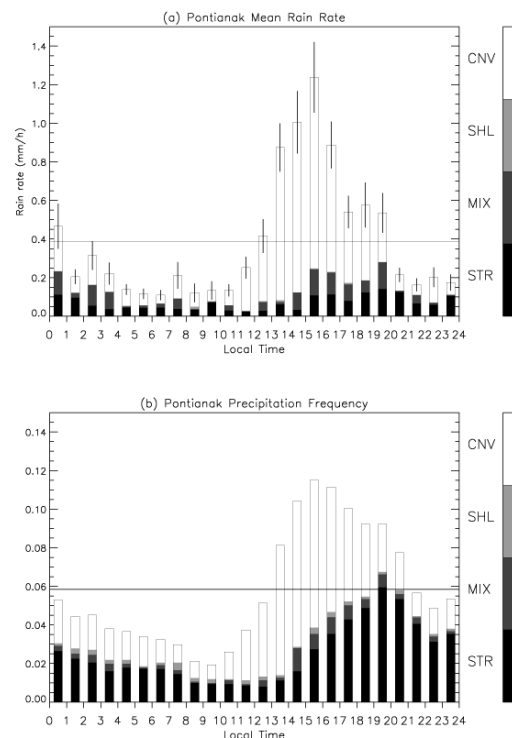
(1.3 GHz ウィンドプロファイラネットワークを用いたインドネシアにおける降水日変化の観測的研究)

平成 23 年 5 月 23 日授与

インドネシアは世界有数の多雨地域で降水に伴う潜熱加熱は大気大循環に重要な役割を果たしている。そのインドネシアにおける降水変化で最も卓越するのが日変化である。「海大陸レーダーネットワーク構築」プロジェクトによって、晴天乱流エコーから風速三成分の高度プロファイルを高時間・高度分解能で測定可能な1.3GHzウィンドプロファイラがインドネシアの3地点、西カリマンタン州ポンティアナ、北スラウェシ州マナド、及びパプア州ビアクに設置された。本論文では、降雨エコーに対しても高い感度を持つ1.3GHzウィンドプロファイラの特長を生かして降水雲タイプの分類を行い、雨量計データも利用して各地点の異なる地形的特徴に伴う降水日変化の特徴を明らかにした。さらに、ラジオゾンデ観測、衛星観測データなどの利用により、降水日変化に対する季節内変動や陸塊スケールの影響について考察した。本論文により得られた主要な成果は次の通りである。

1. ポンティアナ、マナド、ビアクの3地点とも午後の早い時間帯に降水ピークを持つが、ポンティアナとマナド、ビアクの間にはその降水の特徴に差異が見られる。すなわちポンティアナでは対流性降水雲が組織化して層状性降水雲に移行するのに対して、マナド、ビアクではそれが見られない。これは、陸塊の大きさが、日中に生成される対流性雲群の水平スケールを決めており、日中から夕方にかけての降水の特徴に大きく影響することを表している。(ポンティアナにおける観測結果を図に示す。)
2. 3地点とも季節内変動に依らず午後の降水が卓越する。ポンティアナにおける対流性降水雲から層状性降水雲への移行も季節内変動に依らない。一方、層状性降水の頻度は季節内変動活発期に増加し、特にビアクにおける夜中から夕方にかけての層状性降水は季節内変動活発期に卓越する。
3. 上昇流の頻度分布から、日中の強い太陽放射に伴って発生した活発なブルームが地表付近の水蒸気を上方に輸送するのに重要な役割を果たしており、これが日中の対流性降水をもたらす。また、3地点とも海陸風が下層で卓越し、特にビアクにおける午前中の降水は、ニューギニア島からの陸風が重要な役割を果たしている。

以上、各種観測データに基づき、インドネシアの各地点における、それぞれの地形特有の降水日変化やそれに関連する諸現象を初めて明らかにした。



1.3GHz ウィンドプロファイラと地上雨量計で観測された(a)降水強度と(b)降水頻度の平均日変化特性。降水雲タイプを深い対流性(CNV)、浅い対流性(SHL)、対流・層状混合性(MIX)、層状性(STR)に分類している。横線は平均値を示す。

細川 義浩 (松重教授)

「周波数変調原子間力顕微鏡 (FM-AFM) の高感度化と赤外応答像測定への応用」

平成 23 年 9 月 26 日授与

周波数変調原子間顕微鏡 (FM-AFM) は高い精度や分解能を持ち、また試料への影響が非常に小さく、幅広い環境での観察が可能のため、分子エレクトロニクスなど次世代デバイス開発に向け大変有用な技術である。しかし、分子の官能基の識別や生体反応計測などを行うためにはさらなる高感度化・高分解能化が必要である。本論文は、次世代エレクトロニクスの有力な候補とされる単一分子エレクトロニクスの実現に向け、FM-AFM の測定において、分子薄膜表面を従来よりも高感度に検出するための最適な実験パラメーターを導出し、また、この FM-AFM を用いた高い空間分解能をもつ赤外分光技術の確立を目指した基礎的研究の結果について記述したものである。

はじめに、従来の研究で用いられてきた FM-AFM の安定動作条件のうち、「探針振動エネルギー散逸に関する関係式」が必ずしも適切で無かったことを示し、より正確な関係式を導出した。また、この新しい関係式の妥当性を数値演算や実験から確認した。さらに、分子 / 原子分解能を持つ FM-AFM の等価信号雑音比 (ESNR: effective signal-to-noise ratio) について定義するとともに、計算により得られた最適な実験パラメーターを用いた実験を行うことにより、図 1 に示すように分子内構造が確認出来る程度の高空間分解能の鉛フタロシアニン (PbPc) 像観察が可能であることを実証した。

また、この結果を踏まえ FM-AFM を用いた赤外応答像測定への応用として、探針直下に外部から赤外光を照射し、試料の赤外応答を AFM で直接検出する、新規高位置分解能赤外分光技術の実現に向けた基礎実験を行った。実験の概念図を図 2 に示す。ドレスデン工科大学の Lukas Eng 教授らと行った共同研究では、自然酸化膜付きのシリコン (Si) 基板上的 polydimethylsiloxane (PDMS) 試料上において、FM-AFM を用いて赤外吸収信号の検出に成功した。また、ブロックポリマーを用いた実験では試料の赤外吸収を反映した FM-AFM 像を取得できる事を実証し、10nm 程度の空間分解能で試料の赤外吸収差異の観察に成功した。

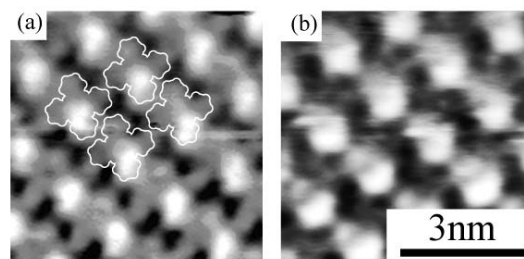


図 1. MoS₂(0001) 基板上 PbPc 多層膜の二次共振モードによる微小振動振幅 FM-AFM 像. (a) 表面形状像. (b) エネルギー散逸像.

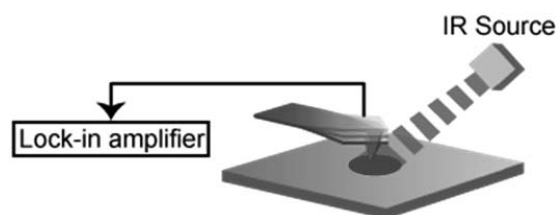


図 2. 新規高位置分解能赤外分光技術の概念図. 照射する赤外光を強度変調し、ロックインアンプを用いて信号検出を行った.

Suketu Naik (引原教授)

「Investigation of Synchronization in a Ring of Coupled MEMS Resonators」

(リング結合した MEMS 共振器の同期に関する研究)

平成 23 年 9 月 26 日授与

MEMS devices are normally targeted to achieve a specific range within its linear mode of operation. At higher vibration amplitude, the devices exhibit nonlinear response. MEMS resonators, shown in Fig. 1 (a) that exhibit the hard-spring behavior as shown in Fig. 1 (b) were the focus of this study.

Devices such as the one shown in Fig. 1 (a) were fabricated in SOIMUMPs process. The device utilizes laterally driven comb-drive. The electrostatic force that is generated through this mechanism does not depend on the displacement in x-direction. Large force creates large deformation in the suspension springs

and this creates hard-spring response when the excitation frequency is swept. The devices were designed to be asymmetric such that the lengths of the inner beams and the outer beams of the suspension springs have a ratio. This creates asymmetric expansion and contraction of the beams during peak displacement. This mechanism further enhanced the hard-spring effect and exhibited an extension of the hysteresis during upswEEP and downswEEP of the excitation frequency as shown in Fig. 1 (b).

These individual resonators were then utilized in a coupled system to demonstrate the application of nonlinearity for sensing applications. The resonators were coupled together electronically via current to voltage converters, amplifiers and other necessary signal processing electronic components. Changing the gain of the amplifiers changes the overall coupling strength between two individual resonators. As confirmed in the simulation

study, the resonators exhibit oscillations without an ac excitation signal when the coupling strengths are changed to the critical values. The resonators were biased at dc voltage. The experiments further revealed that the extension of hysteresis may play a crucial role in the range of the vibrations of the coupled system. Additionally by changing the coupling topology, the system exhibited in-phase and out-of-phase vibrations such as the ones shown in Fig. 2 (a). In nonautonomous mode with ac excitation signal, the coupled system exhibited a clear transition from stable periodic vibrations to unstable quasiperiodic vibrations. Regions of synchronization were characterized for various

autonomous states as shown in Fig. 2 (b). The coupled system showed sensitivity in regards the coupling strength, pressure, excitation amplitude, and excitation frequency. The coupled system is a good candidate as a sensor to be utilized in various application areas including energy harvesting, inertial sensing, and MEMS frequency synthesis.

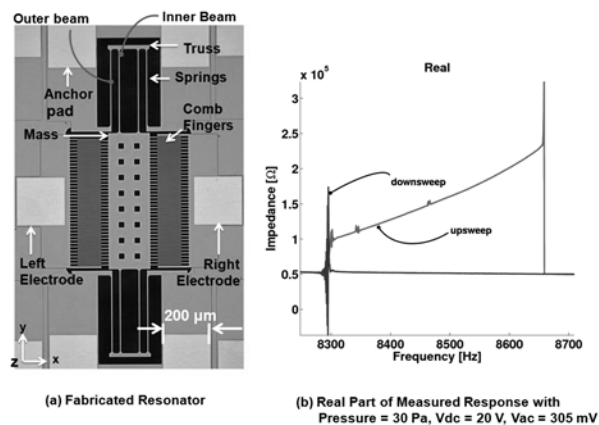


Fig. 1 (a) MEMS device with asymmetric suspension beam lengths and (b) measured response of the device which shows hard-spring behavior and extension of hysteresis

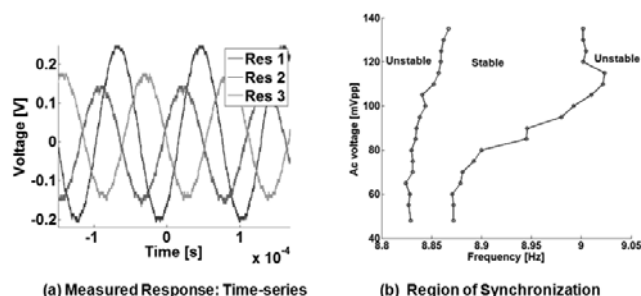


Fig. 2 Coupled resonators: (a) autonomous system with out-of-phase vibrations and (b) region of synchronization with ac excitation amplitude and ac excitation

青山 秀 紀 (中村裕一教授)

「作業支援システムのためのユーザ状態の認識と支援選択に関する研究」

平成 23 年 9 月 26 日授与

近年、様々な場面で人間をサポートする情報機器の研究が行われており、その一つに、調理や工作等の様々な作業を行う際に、作業段階に合わせてその方法やコツ等を教示したり、機器の自動操作を行ったりすることで、作業の補助を行う作業支援システムがあります。本研究は、図1のように、知識量や興味や環境の状態といったユーザの状態や環境の状態に応じて適切な支援を行うシステムの実現を目的としており、そのために以下の4つの手法を提案しました。

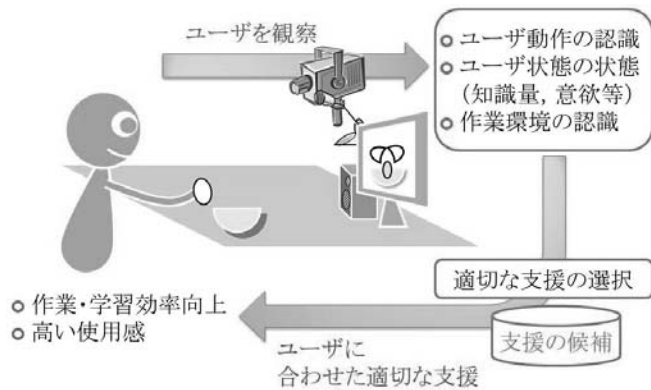


図1：適切な支援を行う作業支援システム

1. ユーザ状態に適応した支援を行うためのインタラクションモデル

従来のようにユーザだけの行動をパターン化するのではなく、ユーザとシステムの行動を合わせたインタラクションのパターンを利用してシステムの行動を決定する手法を提案しました。熟練した人間がシステムを操作して支援を行った際のインタラクションのパターンを予め学習しておき、自動操作中には、その中から現在のインタラクションパターンに最も近いパターンを再現するようにシステムを動作させることで、現在の状況に適した支援行動を実現します。

2. 協調フィルタリングを利用した支援の選択手法

上記の手法より時間的に長いスパンで見ても適切な支援を選択するための手法として、e-コマース等で利用されている推薦アルゴリズムを利用した手法を提案しました。この枠組では、各支援を行った際にその支援がユーザにとって良かったかどうかをシステムが判断する必要がありますが、この判断には比較的多くの誤差が含まれるため、このような誤差に頑健な推薦アルゴリズムを提案しました。また、これに組み合わせて使用できるアルゴリズムとして、一つ一つの支援を最適に選択するのではなく、作業全体を通して考えた場合に最適となる支援を選択するためのアルゴリズムを提案しました。

3. 筋電位計測と画像計測を利用した手動作と操作物体の認識手法

筋電による動作認識には、細かい動作や速い動作の認識に強い、陰に隠れることが無い、早い時点での認識が可能、込められた力の大きさの認識であるといった利点があり、作業において重要な手動作の認識に適しています。しかし、認識対象とする動作が増えるに従って認識精度は低下します。そこで、手の周辺に存在する物体を、頭部等に装着したカメラからの画像によって認識し、その物体に対して行う動作を考慮に入れることで、多数の動作を認識対象としつつ、認識精度を維持・向上させる手法を提案しました。

4. 筋電位計測と画像計測を利用した把持行動の予測手法

物体を把持する際の手の開き方の性質を利用し、実際に物体に触れる前に、いつ、どこにある、どの物体を、どのような掴み方で把持するのかを予測する手法を提案しました。これにより、支援の事前準備や危険予測が可能になります。また、このとき、筋電位計測を用いることで指の小さな動きを早い時点で認識し、筋電位からは認識の難しい手の位置を画像計測を用いて認識するという手法を提案しました。

橋本 力 (黒橋教授)

「Knowledge Acquisition from the Web for Text Understanding」

(テキスト理解のための Web からの知識獲得)

平成 23 年 9 月 26 日授与

人間と言葉で通じ合うことのできる機械を作
ることは人類の夢の一つであると言える。計算
機科学の黎明期から取り組まれてきた、計算機
によるテキスト理解の研究は、まさにその夢の
実現を目指している。我々は当面のゴールとし
て、あるテキストの対が与えられた時、一方の
テキストがもう一方のテキストを意味的に含意するかどうかを判定するシステムの実現を目指してい
る。例えば図 1 では、1 行目の文が 2 行目と 4 行目の文を含意するが、3 行目の文は含意しない。

計算機によるテキスト理解を実現する上での難問の一つに知識獲得ボトルネックと呼ばれる問題があ
る。これは、人間がテキストを理解する上で無意識のうちに使いこなしている膨大な量の知識を、現実
的なコストで、計算機に教え込むにはどうすればよいか、という問題である。テキスト理解研究の初期
の段階では、テキスト理解に必要な知識を人間の手で一つ一つ計算機に入力していたが、これではコス
トがかかりすぎることが分かり、近年では、大量の文書集合から (半) 自動で知識を獲得する研究が盛
んになった。

本研究では、テキスト理解にとって重要でありながら獲得技術が発展途上にある 3 種類の知識を対象
に知識獲得技術を開発した。1 つは我々がドメイン知識と呼ぶ、単語とそれが属するドメインに関する
知識である。例えば「テキスト理解研究」と「Association for Computational Linguistics」、「自然言語
処理」は<科学・技術>ドメインだが、「AFC Champions League」は<スポーツ>ドメインである。2
つ目は動詞含意知識で、例えば「学会発表した、ということは、研究した、ということを含意する」と
いうような知識を獲得した。3 つ目は言い換え知識で、「ACL で発表する」と「Association for
Computational Linguistics で発表する」のような言い換え関係にあるフレーズ対を獲得した。本研究の
知識獲得手法はいずれも、Web という世界最大の文書集合を獲得源とし、Web の特性を活かしたもの
となっている。ドメイン知識獲得では Web 検索エンジンを徹底活用した。動詞含意知識獲得では、低
頻度かもしれないが多くのドメインの動詞をカバーしていると考えられる Web の「ロングテール」の
部分からも高精度に知識を獲得する工夫をした。言い換え知識獲得では Web の冗長性を利用した。具
体的には、Web 上ではある 1 つの概念について、複数の人々が異なる表現で定義を与えているが、そ
れらの定義文から言い換えを獲得した。本手法で獲得した知識は、人手によるチェックを経て、世の中
に広く配布されている(言い換え知識は今年度末配布予定)。つまり本研究は社会的貢献も果たしている。

文書集合から知識を獲得するパラダイムは過去 20 年にわたって研究コミュニティを支配し、一定の
成果を上げてきた。しかし、必要な知識の全てが文書に書かれているとは限らない。常識的な知識ほど
テキスト理解に重要だが、常識的であればあるほど文書に書かれることは少ない。今後の課題は、文書
に明示的に書かれていない、あるいは全く書かれていない知識を如何にして獲得するか、である。

学生が ACL でテキスト含意認識について発表した。

✓ 学生が Association for Computational Linguistics で発表した。

✗ 学生が Asia Champions League で発表した。

✓ 学生が自然言語処理技術の研究をした。



図 1 テキスト理解の例

I Wayan Mustika (吉田教授)

「Distributed Radio Resource Management for Self-Organizing Wireless Networks」
(自己組織化無線ネットワークのための分散無線資源管理)

平成 23 年 9 月 26 日授与

The rapid growth of wireless technologies has led to high demand of radio spectrum. However, the static spectrum allocation policy can be very inefficient due to under-utilized spectrum in spatial and temporal way. In addition, the tremendous growth of the number of applications in wireless devices or smart phones has led to a significant increase in mobile data usage, which can be a major challenge by network operators for supporting this growth in the near future. In this paper, decentralized radio resource management schemes are proposed in order to enhance the spectrum utilization and improve the system throughput in ad hoc networks and next-generation cellular systems.

First, the spectrum utilization in ad hoc networks can be enhanced by allowing lower-priority users (LUs), which are equipped with cognitive radio capability, to spatially reuse the spectrum of higher-priority users (HUs). Joint channel selection and power allocation for spectrum sharing is proposed and analyzed using a game-theoretic approach. In the proposed scheme, each LU attempts to select the most appropriate channel and transmit power in a decentralized manner. In particular, an adaptive coefficient adjustment is proposed in the defined utility function for the purpose of adaptively controlling the interference based on the quality of service (QoS) specified by the HUs. The simulation results show that the proposed scheme improves the network throughput of the LUs, while minimizing the outage probability of the HUs.

Then, a self-organized interference management in closed access femtocells is proposed to improve the throughput of femtocell networks, while minimizing the interference to macrocell networks. In the proposed scheme, each femto base station allocates the subset of resource blocks (RBs) in a decentralized manner. The proposed scheme can be formulated as a potential game, which is guaranteed to converge to a Nash equilibrium. The simulation results show that the proposed scheme improves the throughput of femtocell networks. In addition, a self-organization scheme for joint base station and RB selection in open access picocell networks is proposed to improve the system throughput. In the learning phase of the proposed scheme, a game-theoretic approach is used to model the interactions among users in selecting the most appropriate base station and subset of RBs. The simulation results reveal the effectiveness of the proposed scheme in offloading the macrocell traffic and improving the system capacity in open access heterogeneous networks.

WiFi access points (APs) are also considered as an alternative solution to offload the macrocell data traffic. To improve the throughput of WiFi users, a self-configuration of WiFi networks is proposed where each WiFi user attempts to select the most appropriate WiFi AP that offers a minimum potential delay and that the delay experienced by the other WiFi users can be minimized. The simulation results show the stability of the proposed scheme and reveal the trade-off between the average macrocell offload and throughput performance of WiFi users.

高校生のページ

人工衛星の軌道や姿勢を電磁気力で動かす

生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 宇宙圏航行システム工学分野
山 川 宏

人工衛星の帯電

少し意外に思う人もいるかもしれませんが、人工衛星は、プラスあるいはマイナスに帯電することがあります。一般に、人工衛星の帯電は、地球周辺のプラズマ中のイオンや電子との衝突により起きます。日照時には、光が衛星表面に当たることで表面の電子が光電子として真空中に放出されやすいために、衛星電位は一般に正の値（+数V～数十V）になり、逆に日陰の場合は負の値になります。

我々の研究室では、この衛星の帯電量を自然現象に任せるのではなく、積極的に制御することにより、地球磁場と帯電衛星との相互作用によって、磁場方向と人工衛星の速度方向の双方に対して垂直方向に働くローレンツ力、あるいは、複数の帯電衛星間に働く引力あるいは斥力であるクーロン力（図1）を用いて、地球を周回する複数の人工衛星の相対位置や軌道・姿勢の制御を行う手法を研究しています。

一般に、衛星における帯電現象は、放電の危険性、観測への支障が予見され、欧州のCLUSTER（クラスタ）衛星などで、周辺のプラズマで満たされている空間の電位と等しくなるように衛星を中和していることからわかるように、通常は回避すべき現象と捉えられています。しかし、本研究の特色は、衛星帯電量の制御という既存の技術を積極的に用いて、新たに人工衛星の軌道制御や姿勢制御に応用する点にあるのです。

人工衛星の帯電量の制御は、能動的な電子放出、あるいは、イオン放出により行うことを想定しており、既に欧州のCLUSTER（クラスタ）衛星等で搭載されているイオンエミッタ（放出装置）や電子エミッタと同じ原理の軽量の装置を用いることにより実現できます[1]。人工衛星の帯電量のコントロールのためのイオンあるいは電子の放出量は僅かであり、これにより、軌道を修正することができれば、ほぼ燃料（プロペラント）が不要となる「プロペラントレス」な推進機関と捉えることができます。また、電子やイオン放出の量が、一般のエンジンでのガス放出量と比較すると非常に小さいために、衛星の質量変化は、ほぼなくて質量一定と考えることができ、放出による人工衛星の速度（ひいては運動量）、および、人工衛星周辺のプラズマ環境に与える影響は無視可能となります。さらに、帯電量の制御に必要な電力は1W程度と小さく、また、帯電量制御に要する時間は数ミリ秒であるために、ほぼ瞬間的に帯電量を制御可能と考えられます。従って、衛星の軌道の変化の仕方（ダイナミクス）という観点からは、事前に設計された、時間の関数である帯電量の目標値に正確に追従すると考えてよいことになります。

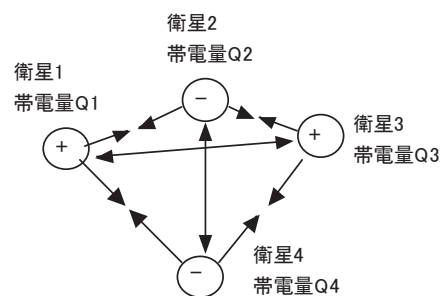


図1 帯電した衛星間のクーロン力による人工衛星編隊飛行の形状維持のコンセプト。正負の符号により引力あるいは斥力になりうる。

帯電衛星に働くクーロン力とローレンツ力

King 等 [2] は、帯電した2つの人工衛星間に働くクーロン力による衛星の相対位置制御の概念を提案しました。10m 程度の相対距離で、従来の化学推進や電気推進を使用する場合は、噴出するガスであるプルームによる周辺衛星のセンサ等への汚染（コンタミネーション）を考慮する必要がありますが、クーロン力の場合、燃料噴射を伴わないためにコンタミネーションフリーの推進系と考えられます。クーロン力による位置制御の特徴は、クーロン力による、物理的にはつながっていない（構造が不要な）複数の衛星間の相対距離の制御である点にあります。細いケーブルによって物理的に人工衛星をつなぐテザー衛星が張力（引力）を与えるのと比較して、クーロン力制御は空間電位に対する電荷のプラス、マイナスを制御することにより引力と反力の双方を与えることが可能です。また、一般にテザーの場合、ケーブルは柔軟構造物でありその剛性は変えられませんが、クーロン力制御の場合、帯電量の制御により衛星間剛性（引力・反力の大きさ）を制御可能となります。

宇宙空間に2つの帯電する衛星を置いたときには、それぞれに同符号の電荷がある場合は、反力が働くために両者は離れていき、一方がプラスで他方がマイナスの電荷を持つ場合には引力が働き両者は近づいていきます。つまり、どちらの場合も、相対的に静止している平衡状態は存在しないことになります。しかし、地球周回軌道上の衛星とともに動く回転座標系で考えると、近接する2つの帯電した衛星を想定した場合には、衛星から見た場合にはクーロン力以外に重力、遠心力が働くために、相対的な位置が変化しない平衡点が存在することが King 等 [2]、Natarajan 等 [3] によって明らかにされています。具体的には地球中心と衛星と共に動く座標中心を結ぶ軸（半径方向）上に2つの衛星を配置すると、適当な衛星帯電量を与えることで（帯電量の積が負値）、回転座標系において静止します。Natarajan と Schaub[3] は、さらに、その平衡位置からずれている位置にある2つの人工衛星を、帯電量を時間とともに変化させることによって、平衡位置にまで誘導する軌道制御則を提案しました。

Streetman と Peck[4] は、地球周回軌道上を飛翔する1機の帯電した人工衛星と、地球磁場との間のローレンツ力により、その地球周回軌道の大きさや形状の修正が可能であることを示しました。重力のみを想定した場合と比較して、軌道修正の自由度が大きくなります。例えば、重力のみと比較して、より低高度での太陽同期軌道が実現可能であることを示しました。太陽同期軌道とは、ほぼ地球の極域を通過する軌道で、地球の形状が、完全な球と比較して僅かに扁平であることによって、地球から見た太陽の方向と同期して、人工衛星の地球まわりの極軌道の面が回転していく軌道のことを指します。これにより、いつも人工衛星の軌道面に対して、太陽が相対的に同じ方向に見える等、効率的に、太陽観測、天文観測、地球観測を行うことができます。ローレンツ力により、より低い高度で太陽同期を実現できれば、より高い精度での地球の表面観測が可能となることが考えられるのです。

これら、ローレンツ力やクーロン力の電磁気力制御下の人工衛星の軌道運動においては、重力以外に、電磁気力のカップリングを考慮する必要があります。複数の人工衛星を考えたときには、1つの衛星の帯電量を変化させることが、他のすべての人工衛星との間のクーロン力に影響を及ぼします（図2は、クーロン力の調整により軌道を制御した例）。また、帯電衛星と地球磁場間のローレンツ力は、

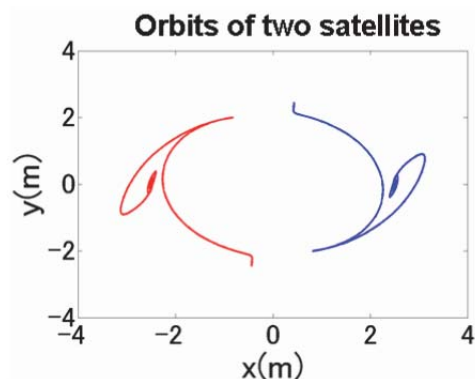


図2 2つ（赤および青）の人工衛星の帯電量、すなわち、クーロン力を、時間に応じて調整することで、2つの帯電した人工衛星の相対的な位置を制御している。x軸は地球中心から半径方向、y軸はx軸と垂直で、かつ、人工衛星の軌道面内にある。x軸上に2つの衛星を誘導することに成功している（文献5,6）。

人工衛星の地球磁場との相対速度、そして、地球磁場における位置（北極、赤道等の場所の違い）の双方の関数となります。このように非常に複雑な特性を有する軌道特性（ダイナミクス）で記述する必要がある点に、本研究のチャレンジすべき点があります。

宇宙機の軌道ダイナミクスは、従来、重力、太陽光圧、大気抵抗等を考慮していましたが、従来では考慮されていなかった高い非線形性を有する帯電衛星間のクーロン力・帯電衛星と地球磁場間のローレンツ力を導入するために、新しい力学に基づく軌道ダイナミクス・制御理論を展開でき、軌道工学と非線形力学・非線形制御を融合した新しい分野を開拓できる可能性があります。また、本研究は、従来と異なり、推進系を搭載しない多数の超小型衛星によるフォーメーションフライトを可能とするものであり、既存の宇宙推進システム概念にはなかった全く新しい発想に基づくミッションの提案が可能となると考えられます。例えば、燃料が不要なために、超小型衛星による宇宙観測・地球観測等の衛星編隊飛行ミッションの実現性が、飛躍的に増すこともあり得ます。

以下、具体的に、いくつかの研究内容について概説します。

本研究室におけるローレンツ力による軌道制御に関する研究

我々の研究室は、これまで、円軌道上の帯電していない1機の目標（ターゲット）衛星に対する、別の1機の帯電している衛星の相対的な運動に注目しています。このとき、目標の衛星は帯電していないので、従来と同様に重力の影響を主に受ける地球周回の軌道運動を行い、帯電した衛星は、地球磁場との相互作用でローレンツ力が働きます。

実際の地球磁場は複雑なのですが、ダイポール磁場という近似的なモデルで地球磁場を表すようにしています。地球の極付近と赤道付近では磁場が異なることからわかるように、地球磁場における位置によって、磁場の大きさと方向、ひいては、ローレンツ力が変化することが予想されます。そこで、地球磁場における位置、および、磁場に対する相対速度の関数であるローレンツ力を、人工衛星の地球周回円軌道の軌道要素（軌道の大きさ、傾き、位置等を表す指標）で表現することができます。次に、目標衛星に相対的な位置関係に注目しているので、目標となる帯電していない人工衛星を中心として、その人工衛星とともに中心が動く回転座標系における運動方程式を解析的に導いています。

現在は、帯電衛星の帯電量の制御、ひいては、ローレンツ力の制御によって、目標衛星を中心とした任意の相対的な位置に移動させる可能性について検討しています。簡単な場合については、数式を用いて、答えを導き、また、複雑な場合については、コンピュータによる大規模計算を用いる数値解法によって、最小の帯電量による最適な移行軌道を求めています [7,8]。これは、放電等を回避するために、帯電量はできるだけ小さくするための工夫です（図3）。

このように、帯電量を変化させることにより、与えられた初期相対位置からターゲットの相対位置まで移行させる手法については、既に一部の結果 [7,8] は得られていますが、衛星帯電量を時間のうえで階段状（ステップ状）に変化させる方法、あるいは、時間に対して滑らかに連続的に変化させる方法により、任意の2つの位置・速度の境界条件を満たす制御手法を確立することを目標としています。

また、本研究で提案する手法で必要になる帯電量を満たす電位は、太陽活動指数が最大の時期に自然環境で発生す

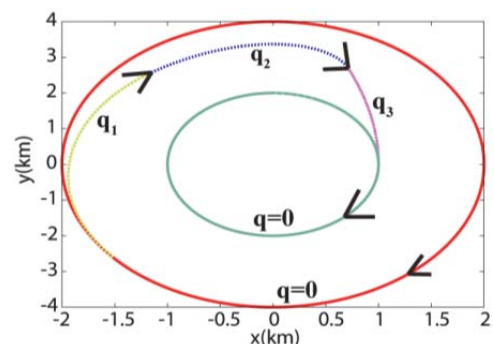


図3 衛星相対運動を記述する回転座標系におけるローレンツ力の調整による軌道移行例。帯電していない人工衛星を中心(原点)として、帯電している人工衛星の相対的な軌道図を表わしており、帯電量を変化させることで、大きな周回軌道から小さな周回軌道に移行している(文献7, 8)。

る電位レベルと同程度ではありますが、放電を回避するためには、それぞれの人工衛星の帯電量を小さくする必要があるだけでなく、複数の人工衛星の間の相対的な電位差も小さくすることが望ましいのです。この制約条件のもとで、多数の超小型衛星の編隊飛行（フォーメーションフライト）の可能性、一定の形状を保持する平衡位置の可能性について検討していきます。また、その平衡状態がどれだけ安定か、つまり、少し、軌道位置がずれたり、帯電量が変化してしまったときに、どれだけ平衡な位置関係を保てるか（安定性）の議論し、フォーメーション保持のための帯電制御則を導出することも目指しています。

本研究室におけるローレンツ力による姿勢制御に関する研究

自然力を用いた人工衛星の姿勢制御方法として、重力傾斜トルクを利用した手法は今までに用いられてきました。これは、同じ人工衛星でも、地球中心に近い部分の方が、より地球中心より遠い部分より強い重力が働くために、地球中心方向に姿勢が保たれるトルクが働くという現象を利用しています。この重力傾斜トルクのみでは制御できる姿勢範囲が制限されているのですが、新たに、宇宙機重心から離れた位置における帯電部分が、地球磁場中を移動する際に発生するローレンツ力によるトルクという概念を提案し、重力傾斜トルクにローレンツ力によるトルクが加わることで、どのような姿勢運動が可能になるかを、検討しています。

具体的には、図4にあるように、2つの正負に帯電する部分を持つ人工衛星を想定すると、それぞれの帯電部分には、逆向きのローレンツ力が働くことを利用します。まずは、人工衛星が地球の赤道面の上空を飛翔しているとし、なおかつ、人工衛星の姿勢がその軌道面内だと仮定します。人工衛星の中心軸の地球中心方向に対する角度（図4中の角度 θ ）および角速度に注目し、角度を横軸、角速度を縦軸とする位相空間を用いて考察しています [9-12]。

一つ得られている成果としては、初期の角度と角速度の条件に依存して、ずっと角度 θ が増加し続ける、つまり、人工衛星が回転運動をしつづける場合があります。また、異なる条件では、ある角度を中心として、 θ が増減を繰り返す、つまり振動運動を続けるという結果が得られています。また、帯電量の大きさ、つまり、ローレンツトルクと重力傾斜トルクの比に応じて、この回転運動と振動運動が実現する条件、つまり、初期角度と初期角速度の領域が大幅に変化することが示されました。

また、現在、姿勢運動特性（ダイナミクス）検討の結果に基づき、地球周回軌道を赤道面に限定せず（極軌道等を含むという意味）、軌道の傾斜角に応じて、ローレンツトルクによって、姿勢を3次元的に制御することの可能性、および、具体的な制御手法について検討を行っています。今後、宇宙望遠鏡や、地球観測衛星等への応用を考えて、慣性座標系において一定の姿勢（例えば太陽や恒星に対して同じ姿勢）を保持する可能性、回転座標系において一定姿勢（例えば地球表面に対して同じ姿勢）に制御する可能性、スピニアップやスピンドアウンを行う可能性について検討する予定です。

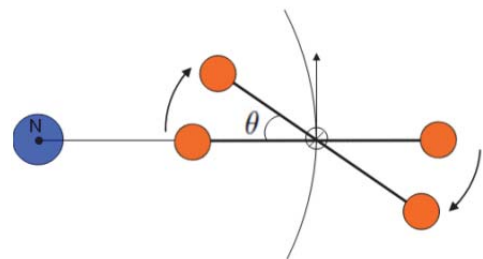


図4 地球(青)を中心とする軌道上にある振り子型の人工衛星のコンセプト。帯電部分(オレンジ)に働くローレンツ力によって、人工衛星の姿勢を回転させるトルクが励起され、振り子型宇宙機の姿勢が変動する(文献9~12)。

本研究室におけるクーロン力による軌道制御に関する研究

既に複数の帯電衛星間のクーロン力を利用した人工衛星の軌道制御については先行研究の結果を示しましたが、本研究室では、従来考慮されていなかった、通常は距離の2乗で減衰していくクーロン力が、周辺のプラズマ環境によって、急激に(exponentialに)その影響力が減衰して

いく効果（デバイ長の効果）を考慮した軌道制御手法を検討しています [5,6].

本来は、相対距離の2乗に反比例するクーロン力制御のコンセプトは、相対距離が10m程度の複数の超小型衛星の近距離編隊飛行における精密位置制御に適しています。この相対距離の上限は地球周辺のプラズマ環境のデバイ長によって決まっています。この距離以上では巨視的には衛星の電荷が周辺のプラズマ中のイオンあるいは電子によって中和されるように見えて、クーロン力は、デバイ長の関数としてさらに減衰していくために力が伝わりにくいのです。その効果も考慮して、同様に、クーロン力、つまり、地球周回軌道上の2つの帯電衛星の帯電量を時間変化させることで、2つの帯電衛星の相対的な位置を制御できることを示しました。3つ以上の複数の宇宙機に関するダイナミクス検討は、ほとんどなされていないために、今後は、多数の帯電衛星の編隊飛行の軌道制御手法について検討を行う予定です。

また、別の観点の研究としては、本研究室では、クーロン力を考慮した3体問題について考察をしています。通常は、3体問題とは、2つの主天体を考慮し、3つ目の微小な天体（あるいは人工衛星）の2つの主天体に対する相対運動を2つの天体の重力のみを考慮して表現している問題です。このように、従来は、重力だけで構成される3体問題に、帯電衛星間に働くクーロン力を導入できるように理論的に拡張を行っています [13] (図5)。重力に加えてクーロン力を考慮した場合に、3体問題において力が釣りあう平衡点であるラグランジュ点の位置が、重力とクーロン力の比に応じて変化することを示しました。

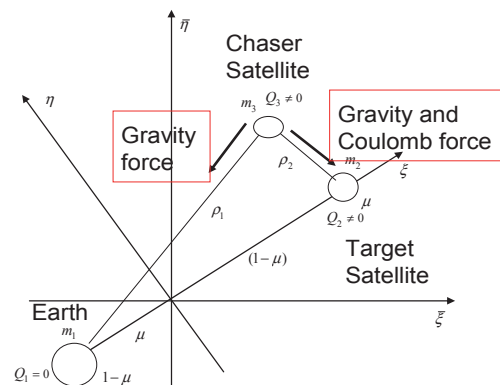


図5 重力とクーロン力を複合した、地球と目標衛星(ターゲット衛星)と帯電衛星(チェーサー衛星)で構成される3体問題(文献13)。

今後の研究の方向性

従来では考慮されていなかった帯電衛星の間のクーロン力や、帯電衛星と地球磁場間のローレンツ力を導入することで、新しい力学に基づく軌道工学と非線形力学・非線形制御を融合した新しい分野を開拓していきたいと考えています。また、本研究は、従来と異なりいわゆる推進系を搭載しないために、既存の宇宙推進システム概念にはなかった全く新しい発想に基づく宇宙観測や地球観測ミッションの提案を行えればと考えており、積極的に参加してくれる学生を待っています。

参考文献

1. Torkar, K., et al., "Active Spacecraft Potential Control for Cluster - Implementation and First Results," *Annales Geophysicae*, Vol. 19, pp. 1289-1302 (2001).
2. King, L. B., Parker, G. G., Deshmukh, S., and Chong, J. H., "Study of Interspacecraft Coulomb Forces and Implications for Formation Flying," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 3, pp. 497-505 (2003).
3. A. Natarajan, A., Schaub, H., "Linear Dynamics and Stability Analysis of a Two-Craft Coulomb Tether Formation," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol.29 no.4, pp. 831-839 (2006).
4. Streetman, B. and Peck, M. A., "New Synchronous Orbits Using the Geomagnetic Lorentz Force," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 30, No. 6, pp. 1677-1690 (2007).
5. Yamamoto, U., Yamakawa, H., "Two-craft Coulomb-force Formation Dynamics and Stability Analysis with Debye Length Characteristics," Paper AIAA-2008-7361, AIAA/AAS Astrodynamics

Specialist Conference (2008).

6. 山川宏, 向井祐利, 矢野克之, 山本詩子, "電磁気力を用いた衛星編隊飛行", 第52回宇宙科学技術連合講演会 (2008).
7. 辻井秀, 山川宏, 矢野克之, 坂東麻衣, "ローレンツ力による衛星編隊飛行に関する一考察", JSASS-2009-4480, 第53回宇宙科学技術連合講演会, 京都 (2009).
8. 辻井秀, 矢野克之, 坂東麻衣, 山川宏, "ローレンツ力を用いた衛星編隊飛行のダイナミクスと制御に関する研究", JSASS Paper 1I05, 第54回宇宙科学技術連合講演会, 静岡 (2010).
9. 山川宏, 八山慎史, 第59回理論応用力学講演会, "帯電した宇宙機の振動運動と回転運動", 日本学術会議 (2010).
10. 八山慎史, 坂東麻衣, 山川宏, "ローレンツ力と重力による振り子型衛星の姿勢運動に関する研究", JSASS Paper 2I06, 第54回宇宙科学技術連合講演会, 静岡 (2010).
11. 八山慎史, 坂東麻衣, 山川宏, "ローレンツ力と重力による帯電衛星の姿勢運動に関する研究", Paper 1D11, 第55回宇宙科学技術連合講演会, 愛媛 (2011).
12. Yamakawa, H., Hachiyama, S., and Bando, M., "Attitude Dynamics of a Pendulum-shaped Charged Satellite," *Acta Astronautica*, Vol. 70, pp. 77-84, 2012.
13. Yamakawa, H. and Bando, M., "Gravity-Coulomb Force Combined Three-Body Problem," The 18th Symposium of International Federation of Automatic Control in Automatic Control in Aerospace, Nara, Japan (2010).

学生の声

「研究の時間」

工学研究科 電子工学専攻 野田研究室 博士後期課程3年 Menaka De Zoysa

博士課程の三年間、自己紹介のたびに、光子・電子制御についての「研究」をしている、と周囲に説明してきた。だが、「研究」とはどういうことか。

まず、「研究」には目的が必要である。私の目的は、光子・電子制御に基づく熱輻射を制御することだった。そのために、どのような戦略が有効なのか。理論的検討を積み重ねて、いわば研究の「入り口」となる小目的を立てる。不毛につながる「入り口」、あるいはあまりに難しい道のりの続く「入り口」は避けたい。その「入り口」に基づいて、どのような道のりでゴールまでたどり着くのか、仮説を立てる。

次に、理論的に検討した仮説を実証するためのサンプルを作製する。具体的には光を制御するための、円孔を周期的に並べた微細化構造の作製である。まず、微細加工技術によって条件にあった円孔を作製するために、トライ&エラーを繰り返す。円孔が「円」でなかったり、側面が粗過ぎたり、深さが十分でなかったり……。こうした課題を、頭と手を使った試行錯誤によって乗り越えていくことに、私は大きな喜びを見出している。

その次に待ち受けているのは、サンプルを測定するための実験である。サンプルがどのような特性を示すのか、胸をドキドキさせながらの実験だ。たいてい思い通りの結果は得られない。したがって、その原因を考察して、理論的検討・試料作製・特性評価を繰り返すことになる。この繰り返しこそが、研究の「本番」であり、目的に到達する道のりである。

最短距離で答えを出すことこそがよいことだと思ってきた身としては、こうしたトライ&エラーの繰り返しは、最初、大きな遠回りに思えた。だが、実験結果を伴った着実な「遠回り」こそが、意外にも目的にたどり着くまでの必要な（あるいは最短の）プロセスであると気付くようになった。同時に、そのプロセスにこそ、物事を理解する楽しさと、その結果に基づいて次のステップを生み出して進んでいく楽しみが隠されていることに気付いたのだった。いったんそれに気付けば、博士課程の三年間は、まさに物事を深く、ゆっくりと考えられる豊穡な時間であった。

「研究室生活を振り返って思うこと」

工学研究科 電気工学専攻 大村研究室 博士後期課程3年 小路真史

私の研究室での生活も、学部四回生から早六年が経過し、あっという間に博士課程の修了が見えてまいりました。その多くの時間は、シミュレーション研究であったこともあり、一人で机に向かっていたように思います。そのような生活だったからか、六年間の研究室生活で実感したのは、いかに人とのつながりが重要であるかということでした。私にも、印象に残る出会いは沢山ありました。国内では特に、顔を出した研究集会で若手の研究者の方々と知りあえたことは大きく、研究や生活面での様々なアドバイスを得ることが出来ました。博士課程に進学したことで、同期が就職して研究室にいなくなった後のことでしたので、非常に心強かったことを覚えています。特に、同じフィールドでの他大学博士の学生と情報を色々と交換できたことで、視野も広がったように思います。また、国外の方では修士二回生の時に、客員で来られていたフランスの先生には大変お世話になりました。半年の間でしたが、研究の議論や、卓球などを通して、自分の英語力が少しずつ身に付いて行きました。その結果、国際会議においても様々な研究者の方々と話し合えるようになり、論文を書くためのヒントも多く得られるようになりました。その後も、この先生とはメールや国際学会で連絡を取り合っており、論文の共著者としても大変お世話になりました。近いうち、研究室を訪れて再び共に研究することも計画しています。研究者として生きる上で最も重要な能力の一つは、語学力を含めたコミュニケーション能力であると思っています。きっとこれからも、机に一人で向かっていく研究ではあっても、一人で研究が完結することはないと思います。多くの方々と知り合ったことで、視野が広がり、かつ、このような能力を少なからず身につけられたのは、これからの研究生活で非常に大きな力になるように思います。さらに、学会内にもとどまることなく、様々なフィールドの方と積極的に議論してみる事で自分の世界を広げていくことも心がけるようにしようと思います。

教室通信**「博士課程前後期連携教育プログラムについて」**

木本恒暢

エネルギー資源に乏しい我が国が、高い国際的プレゼンスを維持するためには、継続的なイノベーションの実現とその担い手となる優秀な若手研究者、技術者の育成が極めて重要です。このミッションを果たすべく、工学研究科電気系専攻（電気工学専攻、電子工学専攻）では、広い視野と深い専門性を持って自らの力で研究開発を企画、実行でき、国際舞台で活躍できる自立型研究者の育成を目指す独自の修士・博士一貫教育プログラム（「連携教育プログラム」）を推進しております。本稿では、この教育プログラムの概要について簡単にご紹介申し上げます。

この「連携教育プログラム」は、平成20年度に工学研究科で制定されたものですが、電気系専攻では、文部科学省から支援を受けているグローバルCOEプログラム「光・電子理工学の教育研究拠点形成」の人材育成活動と一体化させ、大変充実した教育プログラムを構築しています。その取り組みの例を以下に記します。

1) 修士・博士一貫教育プログラムの導入

学部の学業成績が極めて優秀で、かつ挑戦的な研究に高い意欲を有する学生を選抜し、指導教員の面談を経て出願に至ります。大学院入試における筆記試験を免除し、志望する研究室に優先的に配属させて、早期に本格的な研究に着手させています。専攻が主催する進捗発表会を実施して指導するなど、教室を挙げて組織的に学生の教育を行う環境を整えています。なお、上記の特別選抜者以外にも、学部4回生の卒業研究を通じて研究の魅力を強く感じ、博士後期課程への進学を志望する修士課程学生を積極的に本教育プログラムに編入する制度も設けています。

2) 複数教員指導制の導入

従来、大学院学生の指導は、研究室の指導教員がほぼ全て行ってまいりましたが、本プログラムでは各学生に対して、主指導教員に加えて2～3名の副指導教員（異なる分野、研究室）をアサインし、定期的に異分野の教員（副指導教員）と議論し、助言を受ける制度を導入しています。これにより、視野の拡大や境界領域の開拓が効果的に行われます。

3) カリキュラムの改訂

他専攻（化学系、材料工学、理学研究科など）が提供する科目の履修や共同研究インターンシップ（国際インターンを含む）などが修了要件として認定されるようにカリキュラムを改訂し、柔軟性や国際性の涵養を促進しています。

4) 多様な人材育成活動

博士後期課程学生による合宿型集中セミナー（セミナー道場）、競争的資金制度の導入とその成果報告を英語で実施する英語コンテスト、短期～中期の海外派遣、若手研究者を中心とした国際シンポジウムの開催、異分野の学生が集まってディベートを行う研究萌芽クリエーションルームの設置、英語研修など、教室を挙げて当該プログラムの学生教育に力を注いでいます。

以上のように、教室全体で取り組む「エリート教育」により、幸いにも博士後期課程への進学者が大幅に増加し（現在の博士後期課程充足率はほぼ100%）、学生による学会での受賞も急激に増えて、教室全体の活性化に繋がっています。このように、本教育プログラムを修了した博士は、専門分野に特化する傾向のあった従来の博士とは異なり、多様な分野を俯瞰、統合する能力や、グローバルな視野と柔軟性をも身に付けた「21世紀型博士（工学）」であり、10～20年後の日本の産業界や学界を牽引するリーダーに育つ資質を備えていると考えております。

平成25年3月に、本教育プログラムの第一期生の博士が社会に旅立ちます。産官学の先輩諸氏の皆様方におかれましては、この第一期生にご期待いただくと共に、より一層のご支援と御鞭撻を賜うことができれば幸いです。

賛助会員の声

マルスシステムの概要とその高信頼性技術について

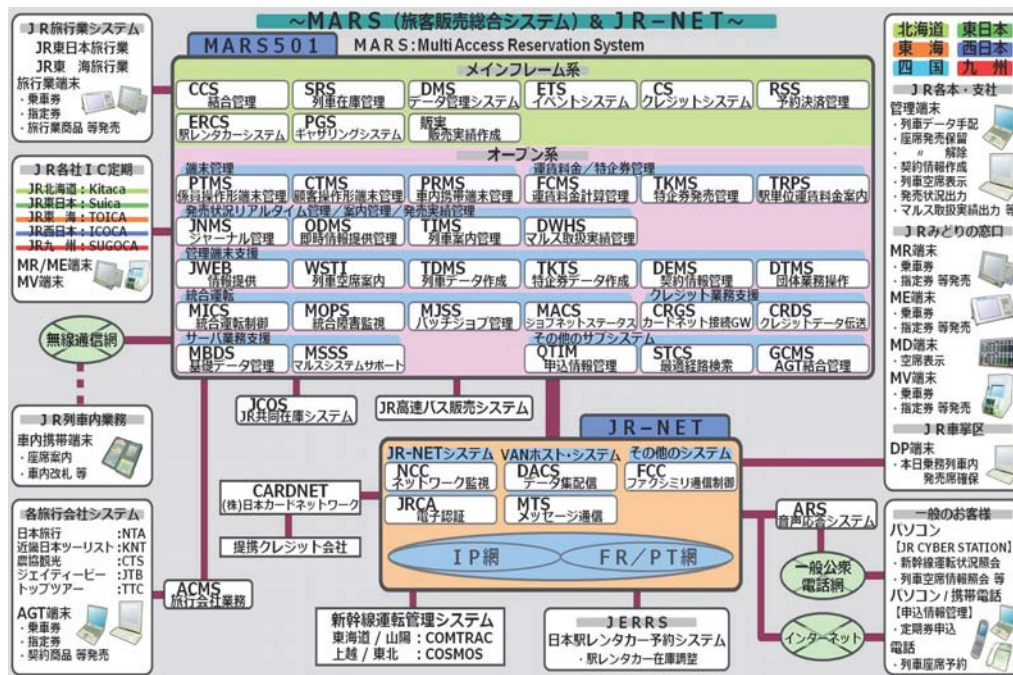
鉄道情報システム(株) (昭和 49 年卒)
藤井 和 彰

JR 駅の「みどりの窓口」などにおいて、特急券等の予約、発券を行うマルスシステムは、オンラインリアルタイムシステムの草分けとして 1960 年に初期システムが稼働し、約 50 年を経て現在は毎日朝 4 時から翌朝 2 時まで、全国の JR 駅に設置されている端末約 6,000 台と旅行会社の端末約 3,000 台及び各種のネット予約サービス等を通じて、一日平均約 600 万コール、お盆や正月の最大ピーク時には 800 万コールの要求を処理し、一日平均約 170 万枚、ピーク時には約 230 万枚の乗車券類を発券しています。

ひとたびマルスシステムに障害が発生すると、全国で乗車券や特急券などの発売が出来なくなり、その社会的な影響が大きいことから、高い信頼性を確保するため、ハードウェア、ソフトウェア、ネットワーク、電源空調設備、運用方式などに、50 年余の間に経験した様々な障害事象を踏まえた対策や新たな高信頼性技術を導入しており、ここ 10 年ほどはオンライン稼働率 99.999% を維持しています。この場をお借りして、そのシステム構成や処理方式など一部をご紹介します。

1. マルスシステムの概要

マルスシステムは多数のサーバ群とメインフレームに実装された機能別サブシステムにより構成され、統一されたアーキテクチャによりオンライン処理を行っています。JR 各駅に設置されている端末とは専用ネットワークである JR-NET を経由して接続されており、系全体で高信頼性、高セキュリティを確保しています。マルスシステムの全体概要を図に示します。



2. ハードウェア構成による信頼性確保

マルスシステムを構成するサーバ、メインフレーム、ディスクシステム等全てのハードウェアは冗長化されており、障害が発生した場合には自動的に異常系を切り離し正常系のみで運転を継続します。各サブシステムにおいては、実装業務の特性にあわせた信頼度構成を採用しています。

(1) ホットスタンバイ構成

座席更新系サブシステムにおいては、最繁忙期の1ヶ月前予約開始時等における特定列車に集中する予約要求を遅滞無く高速に処理することが求められていることから、シンプルな構成の専用高速処理方式により座席更新処理を行っています。座席更新系サブシステムはオンライン系と待機系のホットスタンバイで構成されており、通常はオンライン系のみで処理を行っています。オンライン系に障害が発生した場合には、待機系へ自動的に切り替わることで、処理続行可能な構成としています。

(2) ロードシェア構成

座席更新処理を行わないサブシステムは、オンライン処理を複数のサーバで同時並行的に処理するロードシェア構成としています。端末管理サブシステムを例にとると、6,000台あまりの端末がFEPを介して4台のサーバに分散されて接続されています。1台のサーバがダウンした場合、このサーバに接続されていた端末はFEPの機能により、自動的に正常なサーバへ再分散され業務を続行する事が可能です。

3. ファイル構成による信頼性確保

マルスシステムで使用する座席ファイルなどの主要な業務ファイルは、物理的且つ論理的に2重系ファイルにより構成されており、片系のファイルに障害が発生した場合でも、正常系のみを使用して自動的に運転が継続されます。

また、マルスシステムでは、列車データを代表とする営業用データのメンテナンスがほぼ毎日発生していますが、これらメンテナンス作業を日中時間帯でも安全に実施するための構成として、メンテナンスなどに使用する系と、オンライン運転に使用する系に分離してファイル管理を行っています。

4. 障害発生時のメッセージ回復処理

オンライン処理中に障害が発生した場合、座席損失や二重発売を防ぐため、処理中であったメッセージを回復する必要があります。また、座席管理サブシステムにおいては、座席管理ファイルがハード的(又はソフト的)に破壊されることを想定して、ジャーナルから座席を回復する機能も必要です。

(1) オンラインメッセージ回復

端末管理サブシステムから座席管理サブシステムに対して座席更新処理を行う場合、端末管理サブシステム内に仮想端末(PST)を設定して、障害時には控除処理を再要求して座席更新を元に戻すことを基本としています。座席更新済みか否かは、PST毎に管理される「最新有効番号」により決定されます。障害が発生しPSTが座席管理サブシステムからの回答を受信できなかった場合は、PSTから座席管理サブシステム側に最新有効番号を問い合わせ、座席管理側の最新有効番号が大きければ、座席管理サブシステムに対して座席を元に戻すように要求します。

(2) ジャーナルを利用した座席回復処理

座席更新処理は専用の高速処理方式により実行していることから、更新処理時に回復用情報をジャーナルに書き込み、ファイル破壊等が発生した場合にはこのジャーナル情報を使用して座席回復を可能としています。

編集後記

今年度から編集のお手伝いをさせていただいております。担当は修士論文テーマ紹介と博士論文テーマ紹介です。今回、電気関係教室の研究テーマを全体を通して見せていただく立場となり、今更ながらに関連の研究領域の広さに圧倒されました。日々のことに追われ、ともすれば他の研究分野と交わる余裕もなくなりがちですが、この CUE が電気関係教室の求心力の一つとして読者の皆様のお役にたてればと願う次第です。

[T.A. 記]

協力支援企業

新日本製鐵株式会社
ダイキン工業株式会社
鉄道情報システム株式会社
日立電線株式会社
株式会社 村田製作所
ローム株式会社
(アイウエオ順)

発行日：平成24年3月

編集：電気系教室 cue 編集委員会
佐野 史道、佐藤 亨、雨宮 尚之
船戸 充、中村 武恒、浅野 卓、
越智 裕之、木村 磐根（洛友会）
京都大学工学部電気系教室内
E-mail: cue@kuee.kyoto-u.ac.jp
www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/cue

発行：京都大学電気関係教室
援助：京都大学電気系関係教室同窓会洛友会
電気教室百周年記念事業基金

印刷・製本：株式会社 田中プリント

