

---

---

複雑系の制御・設計論グループ

---

---



# 航空宇宙工学専攻 航空宇宙力学講座

教授 土屋 和雄, 助手 杉本 靖博, 青井 伸也

## 1. はじめに

動物は、冗長で複雑な筋骨格系を巧みにかつ協調的に動かすことで様々な運動を実現する。これらの運動は、脳・脊髄の神経回路網によって支配されている。この脳・脊髄の神経回路網による運動の生成と制御のメカニズムを明らかにするために、脳・脊髄系の神経回路モデルと筋骨格系の力学モデルを統合した神経-筋骨格モデルに基づいたシステム論的な研究が始められている。このシステムバイオメカニクスと呼ばれる研究分野では、神経-筋骨格モデルに基づいて数値シミュレーションを行い、そこから得られる結果を、姿勢運動、床反力、EMG データなどの運動学・生理学的な実測データと比較検討することで、脳・脊髄神経回路網の構成、作動原理を明らかにするとともに、脳・脊髄系の神経回路網における情報処理過程の運動制御的な役割を明らかにすることを目的としている。

我々の研究室では、ヒトを含めた動物の詳細な筋骨格モデルと歩行中の身体キネマティクス、そして神経生理学的な知見に基づく神経回路モデルに基づいて、その歩行運動を対象に研究を進めている。また、動物の実現する歩行生成メカニズムの解明だけでなく、そこから得られた知見を歩行ロボットに適用することで、動物のように適応的な運動を実現する歩行制御系の設計を行っている。ここでは特に、理学研究科動物学教室・自然人類学研究室との共同研究として行っているニホンザルの神経筋骨格モデルに基づく歩行生成シミュレーションに関する研究 [3] と、神経生理学的な知見を用いた歩行ロボットの歩行制御系設計に関する研究 [1, 2] について紹介したい。

## 2. ニホンザルの神経筋骨格モデルに基づく歩行生成

本研究では、解剖学的に分析したニホンザルの骨格構造から詳細な数理モデルを構築し、歩行中の運動をその数理モデルに基づいて運動学的に再現している。そして神経生理学的知見に基づいた神経回路モデルを用いて動力学的に歩行運動を生成することで、身体と神経系、そして環境との力学的な相互作用からいかにして適応的な歩行運動が形成されるかについて考察を行っている。ニホンザルは歩行神経生理学の実験動物として用いられているため、生理学的実験とシミュレーション実験との対比が可能となり、またヒトと系統的に近い霊長類に属しているため、この解析から得られる知見は、ヒトにも直接応用可能であると期待される。以下に本研究の詳細を示す。

ニホンザルの骨格構造が規定する運動学的・生体力学的拘束を正確に再現するために、X線CTスキャナを用いてニホンザル新鮮屍体(オトナオス)の全身3次元体表面形状と骨形状を抽出し、このCTスキャンから取得した各骨の3次元形態情報に基づいて、ニホンザルの骨格系の数理モデルを構成した(図1)。具体的には、体幹部4節、前肢左右各5節、後肢左右各3節の計20節から成る直鎖型剛体リンク系としてモデル化し、関節はすべて回転関節としてモデル化した。このモデルで特徴的な点は、モデル化の困難さから従来ほとんど考慮されて来なかったが、歩行の推進力の生成にとって重要な要素である肩甲骨の運動もモデル化していることである。骨格系の構造制約をその形状情報に基づいて正確に記述した結果、隣り合う関節の回転軸が必ずしも直交していないことが分かる。

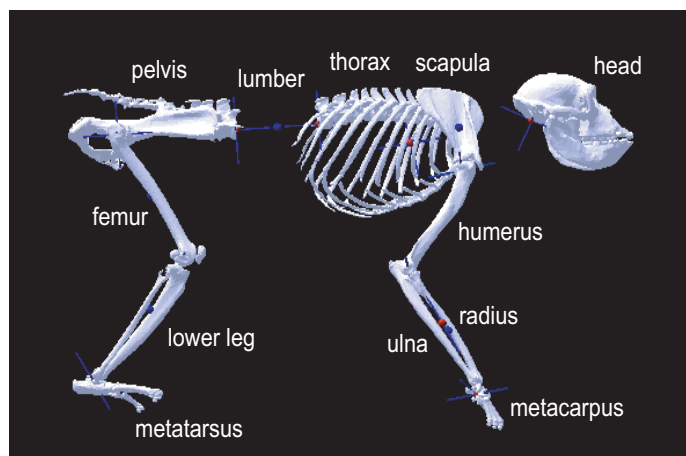


図 1: Kinematic description of the whole body skeleton of a Japanese monkey as a chain of links.

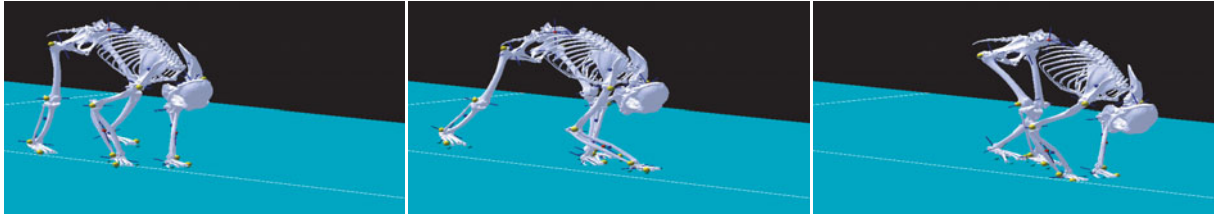


図 2: Simulation result of locomotion in the Japanese monkey.

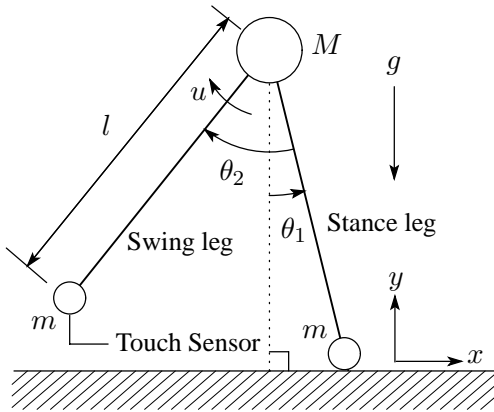


図 3: Simple walking model



図 4: Biped robot



図 5: Stable walk on flat and slope

骨格の形態は、その移動様式と密接な対応関係にあり、その実現する運動は骨格形態の運動学的・生体力学的拘束が強く反映されたものとなっている。そこでトレッドミル上を歩行するニホンザルの身体運動を、計 4 台のデジタルビデオカメラを用いて同期撮影し、モデル化した骨格系に当てはめて解析することで、骨格系の運動の推定した。また神経生理学的研究から、動物の歩行は脊髄に存在する CPG によって生成されることが明らかとなっている。そこで、振動子系を用いてこの神経回路モデルを構成した。そして、上述した詳細な骨格モデルと身体キネマティクス、そして神経回路モデルに基づいて数値シミュレーションを行い歩行を生成することで、身体と環境、そして神経系との力学的な相互作用から歩行が実現されることを確認した(図 2)。

### 3. 非線形振動子に駆動される 2 脚歩行ロボット

上述のように、神経生理学的研究から動物の歩行は脊髄に存在する CPG によって生成されることが明らかとなっている。この CPG は周期的なシグナルを生成し、動物の四肢はこのシグナルによって駆動される。CPG は外部センサ情報に敏感で、このセンサ情報に従って生成するシグナルを調整する。その結果、動物は複雑な環境に対して適応的な運動を実現する。本研究では、この CPG の特徴を用いた非線形振動子により、2 脚歩行ロボットの運動を生成し、適応的な歩行運動を実現するメカニズムについて調べている。特に、2 脚歩行運動のシンプルなモデルを用いて、周期的な信号に駆動される歩行運動が自己安定性を持つことを明らかとし(図 3)、各脚先の床面に対する接地信号を非線形振動子にフィードバックすることによって、より安定度が高くなり、適応的な歩行が実現されることを明らかとした。更に、実際の 2 脚歩行ロボット(図 4)に対して、この特性を生かした制御系を設計し、環境の変化等に対して適応的な歩行運動を実現した(図 5)。

#### 参考文献

- [1] S. Aoi and K. Tsuchiya, *Locomotion control of a biped robot using nonlinear oscillators*, Autonomous Robots, 19(3): 219–232, 2005.
- [2] S. Aoi and K. Tsuchiya, *Self-stability of a simple walking model driven by a rhythmic signal*, Nonlinear Dynamics, 48(1-2): 1–16, 2007.
- [3] N. Ogihara, M. Nakatsukasa, Y. Sugimoto, S. Aoi, and K. Tsuchiya, *Adaptive locomotion mechanisms inherent in the musculoskeletal structure*, Proc. SICE-ICASE Int. Conf., 2006.

# 航空宇宙システム工学講座 制御工学分野

教授 市川 朗、助教授 幸田 武久、助手 中西 弘明

## 1. はじめに

制御工学分野では、航空宇宙工学における対象システムの高機能化、複雑化並びに大規模化に対応すべく、制御工学・システム工学の基礎研究および応用研究を行っている。特に、非線形系、時変系のシステム制御理論、インパルス制御系の設計論、大規模システムの信頼性及び安全性を向上させるための解析、評価及び設計に関する方法論の研究、自律型エアロボットの開発とその安全・防災活動への応用に重点を置いている。以下では、システム制御理論と航空宇宙工学への応用および安全性・信頼性に関する研究の中から本プロジェクトに関連する成果を紹介する。

## 2. 研究成果

### 2.1 システム制御理論と宇宙機の相対軌道制御

国際宇宙ステーションに代表されるように、軌道上の人工衛星や宇宙ステーションに対する燃料・物資の供給、宇宙構造物の組み立て、検査及び修理などの軌道上サービスが近年重要になっている。それに伴い、軌道上の宇宙機に対するサービス機の相対運動の制御、特にエネルギー消費の少ない制御法の構築が望まれている。円軌道上の宇宙機に関する相対運動の方程式は非線形系であるが、線形化された宇宙機の近傍での運動は Clohessy-Whitshire 方程式または Hill 方程式として知られる時不変系で記述される。この系は軌跡が楕円となる周期解をもち、ランデブに都合のよい相対軌道となる。一方楕円軌道上の宇宙機に関する相対運動は、Tschauner-Hempel (TH) 方程式とよばれる周期係数をもつ方程式で表され、この系もまたランデブに都合のよい周期解をもつ。

線形時不変系の状態を原点に制御する場合、制御時間を十分長く取ることにより、制御入力 $u$ の2乗積分を任意に小さくできるとき、その系を零収束エネルギー原点可制御(null controllable with vanishing energy, 以下 NCVE と記す)という[1]。本研究では、始めに3軸スラスタにより制御される宇宙機に関する Hill 方程式は NCVE であることを示した。さらに、最適レギュレータ理論の状態に関する重みを零に近づけることにより設計できる状態フィードバックにより、エネルギー消費の少ない相対軌道の移行が達成できることを示した[2]。また、設計された線形フィードバックは、相対運動を表す非線形系に関しても同等に有効であることをシミュレーションにより確認した。

周期係数をもつ時変系である TH 方程式に対して、同様の相対軌道制御法を確立するため、NCVE の概念を離散時間系に拡張し、必要十分条件を求めた[3]。次に NCVE を周期系に拡張し、その必要十分条件を離散時間系の結果を用いて導出した[3],[4]。TH 方程式の状態遷移行列の性質を用いてこの条件を確認し、3軸スラスタにより制御される宇宙機に関する TH 方程式が NCVE であることを証明した[2]。周期系の最適レギュレータ理論は、周期係数をもつ行列 Riccati 微分方程式の周期解を用いて構築されるが、時不変系と同様に状態に関する重みを零に近づけることにより、相対軌道の移行をエネルギー消費の少ない状態フィードバックで達成できることを示した[2]。

Clohessy-Whitshire 方程式及び TH 方程式の周期解からなる相対軌道は、維持にエネルギーを余り必要としない軌道であり経済的であるが、その周期は慣性空間上の軌道の周期と一致する。従って短時間で遂行するミッションでは、短い周期を持つ指定した軌道に乗せる制御も必要となる。時不変系の追従制御理論は、出力レギュレーション理論の一部として確立されているが、TH 方程式に対しては周期系の追従制御理論が必要となる。文献[5]では、出力レギュレーション理論を周期系及び概周期系に拡張した。この理論により指定時間内に軌道上の宇宙機の周りを周回するアクティブフライアラウンドなどが可能となる。

### 2.2 システム制御機能に着目した複雑なシステムの事故解析

電子技術や情報処理技術の進展によりシステムが大規模化かつ複雑化すると、システム事故による影響は従

来にもまして大きい。従来の事故モデルでは、事故を引き起こす危険源がある状態変化(望ましくない変化)を引金として危害として発現して、その影響がシステム内を順番に伝播して事故にいたるものであった。この事故モデルでは事故とは要素故障に起因すると考えるため、比較的単純なシステム事故や要素故障が結果に直接関係する事故に対しては有効であった。しかし、ソフトウェアの仕様エラーのような、各要素は仕様通り働く、すなわち故障しなくても、システム全体としての相互作用の結果事故になるという新しいタイプの事故が現れた。起因故障が存在しないので、従来の事故モデルでは必ずしも適切に対処できない。このため、新たな事故モデルによる解析が必要とされていた。そこで、要素故障ではなく、外乱を防止するシステム制御機能の機能不全に着目して解析することが考えられる[6],[7]。本研究は、安全を維持するためのシステム制御機能に着目した事故モデルによる事故原因解析方法について検討した[8],[9]。

提案する事故モデルでは、システムを安全な状態に維持するには常にその状態に保つための管理や制御等のシステム制御機能が必要であり、事故発生は関連するシステム制御機能の不全に起因すると考える。システム制御機能が正常に作動するためには基本的なつぎの4条件が満たさなければならない：(1)コントローラは目標を持つ。(2)コントローラは制御対象の状態に影響を及ぼす。

(3)コントローラは制御対象のモデルを持つ。(4)コントローラは制御対象の状態を確認できる。基本的な条件に基づいて、システム制御機能の不全に関する汎用的な考えられる要因の分類のチェックリストが得られる。事故原因解析は、想定するシステム事故に相当する下層部分からシステム上位の境界領域まで、現在の解析対象である異常偏差に関連するシステム制御機能に対して、要因分類のチェックリストに基づいて要因を同定する操作を反復して行う。事故に直接関連する異常事象からその背後要因である組織管理における問題等をシステム全体に渡って同定できる。チェックリストの各項目が発生しているかどうかは事故調査で得られたデータから判断するが、判断できない不明確な点の抽出によりさらに調査が必要な点が明らかになる。過

去に発生したソフトウェアエラーによるロケット墜落事故や緊急遮断系の故障、航空機火災による墜落事故、鉄道における強風による鉄橋からの列車転落事故ならび乳加工製品の食中毒事故等の事例研究を行い、提案する方法が系統的に事故発生に関連する問題点を導出できることを確認した。

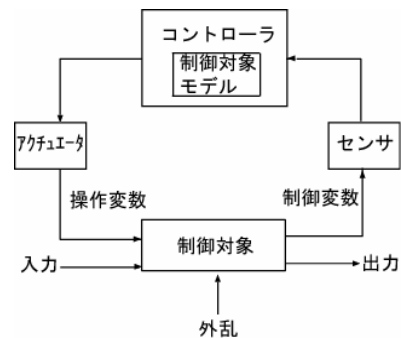


図1 一般的なシステム制御機能

## 参考文献

- [1] E. Priola and J. Zabczyk, Null controllability with vanishing energy, SIAM Journal on Control and Optimization, Vol.42, No.3 (2003), 1013-1032.
- [2] M. Shibata and A. Ichikawa, Orbital rendezvous and flyaround based on null controllability with vanishing energy, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, to appear
- [3] A. Ichikawa, Null controllability with vanishing energy for discrete-time systems in Hilbert space, SIAM Journal on Control and Optimization, (2007), to appear.
- [4] A. Ichikawa, Null controllability with vanishing energy for infinite dimensional periodic systems, Proc. 17th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (2006), 782-787.
- [5] A. Ichikawa and H. Katayama, Output regulation of time-varying systems, Systems & Control Letters, Vol. 55, No. 12, pp. 999-1005 (2006).
- [6] J. Rasmussen, Major accident prevention: What is the basic research issue? Proc. 1998 ESREL Safety and Reliability Conf., (1998) 739-740.
- [7] N. Leveson, A new accident model for engineering safer systems, Safety Science, (2004) 42, 237-270.
- [8] T. Kohda and Y. Takagi, Accident cause analysis of complex systems based on safety control functions, Proc. Annual Reliability and Maintainability Symp., (2006) 13B2 (CD-ROM).
- [9] T. Kohda, Accident analysis of protective systems based on system control concept, Proc. Annual Reliability and Maintainability Symp., (2007) 13D2 (CD-ROM).

# 機械システム創成学講座 機械システム創成学分野

教授 榎木 哲夫, 講師 中西 弘明, 助手 堀口 由貴男

本研究室では、人間と機械が協調しながら作業を遂行するためのシステム設計を大きなテーマとして研究に取り組んでいる。現在、種々の自動化技術によってさまざまな機械の高精度化・高効率化が実現されているが、そもそも機械単独で目的の機能が実現できるようなシステムは限られている。すなわち、多くの機械システムは、人間や外部環境との“相互作用”を介してはじめてその本来の機能的な目的を達成するのである。そのため、それらは、各要素にあらかじめ付与された性質よりもむしろ要素間の関係のあり方に強く依存して全体の性質が定まるという複雑系の特性を本質的に備えているとみなすことができる。我々は、本 COE プログラムにおいて、このようなシステムの設計と制御のための理論構築を目指している。以下に、2006 年度に本研究室で行った主な研究活動を紹介する。

## 1. 組織活動における作業変容プロセスの分析に関する研究[1]

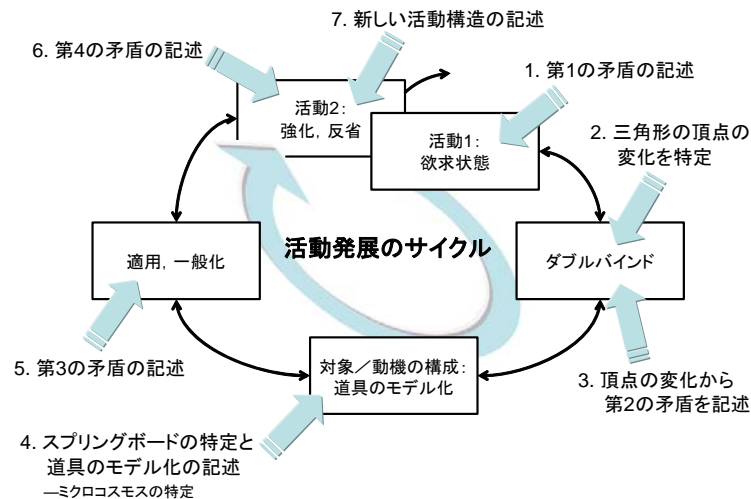


図1 作業変容過程の分析フレームワーク

社会ニーズの変化への対応や効率化のための新技術の導入は、その主導者の本来の意図とは異なる変化を組織活動の現場にもたらすことがある。そして、たとえ個々の変化が些細なものであっても、それらが組織内のさまざまな要因と相互作用を繰り返すことで本来の活動を大きく変容させ、最悪の場合には重大な事故を引き起こす。本研究では、そのような創発型の組織事故の発生メカニズムを研究するために、組織活動の現場における作業変容のプロセスの追跡する分析フレームワークを提案した。提案フレームワークはエンゲストロームの活動理論を基礎としており、階層性のある組織内の作業主体の、社会的な文脈の中での、道具を媒介とした活動を図表的表現によって記述する。そして、活動の発展を説明する「拡張的移行のサイクル」の考え方に基づいて、活動に関わる矛盾(=価値観の競合)の発生を契機とした組織活動の作業変容の過程を明らかにする。この分析フレームワークを JCO 臨界事故に対して適用し、事故発生の組織的な要因に関する分析を行った。

## 2. 自動化機械に対するユーザのモード認識に関する研究[2-7]

機械に自動化機能が導入されることで、ユーザの作業負担の軽減や作業の効率化、能力拡大が実現されている。一方で、そのような複雑な判断機構を持った機械をユーザが使いこなせずに使用を誤り、重大な事故に至るといった問題も発生している。例えば、機械に設計されたモードという内部状態が機械独自の状況判断によって切り替わる場合、それはユーザの「モード誤認識」を誘発しやすい。本研究では、複数のモードを持つ自動化機能を備える機械の操作に関して、ユーザのモード認識機構を計算論的にモデル化することでその特

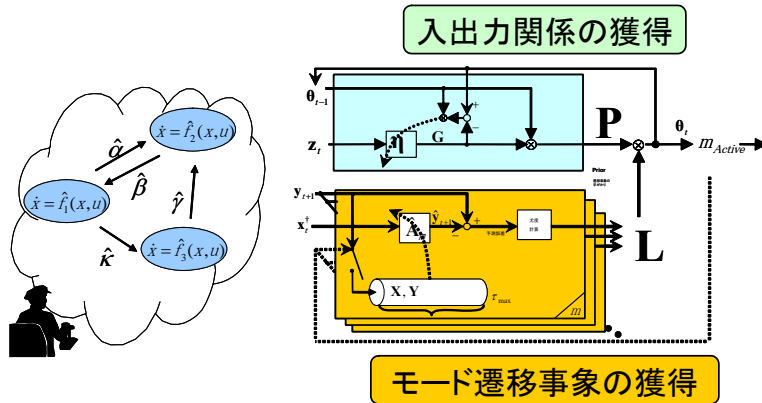


図2 ユーザのモード認識モデル

性を明らかにし、モード誤認識を防止するためのインタフェース設計の理論を構築することを目的とする。これへのアプローチとして、ユーザが機械とそれを介した環境との相互作用を通じて「各モードでの機械の入出力関係」と「モード遷移則」を学習し、さらに両者を手がかりとしてモード認識を行う過程をモジュール型学習機構の拡張によってモデル化した。そして、ACC(車間距離制御)機能を搭載したドライビングシミュレータを用いた被験者実験でドライバーの実際のモード認識と提案モデルの推定結果の照合によって、提案モデルの妥当性を検証した。

### 3. 電子機器の対話型インタフェースの評価に関する研究[8]

電子機器が備える機能の数が増大する一方で、ユーザ・インタフェース上に提示できる情報リソースには限りがあるために、十分にユーザビリティが吟味された基本機能や主要機能に対して、普段利用されることの少ないそれ以外の機能にはどうしてもメニュー階層の奥に追いやられることになる。さまざまな機能に対するアクセシビリティを確保できるインタフェースを実現するためには、ユーザ所望の機能への誘導性の観点からインタフェースを評価する手法の確立が不可欠である。本研究では、人間の情報収集・消費活動を採餌行動に見立ててモデル化する情報採餌理論(information foraging theory)を用いて、ユーザが機器を使用するときのメニュー選択行動をモデル化し、その有効性を検証した。そして、このモデルに基づいて、択一選択の繰り返しによって固定された階層構造内の機能にアクセスするメニュー・システムと、複数選択を許容し各局面での選択結果によってアクセスする経路が変化するメニュー・システムの比較評価を行った。その結果として、利用されることの少ない隅に追いやられた機能へのアクセシビリティを、設計者に多大な労力を強いることなく向上させるための手段として、後者のような対話性の導入が大きな可能性を秘めていることを確認した。

### 4. ドライバーの運転状況の認識を支援する可聴化技術に関する研究[9]

近年、自動車には各種通信・センシング技術が搭載され、ナビゲーションシステムやナイトビジョンシステムなどのように、運転中に遭遇するさまざまな状況の中でそれらを駆使してドライバーを支援するシステムが構築されている。しかしながら、得られる情報量が増大する一方で、その内容をドライバーへ伝達するインタフェースの形態は視覚的支援に偏っている。そして、運転支援情報を提供する感覚モダリティとしての聴覚の比重は極めて少ないのが現状であり、その有

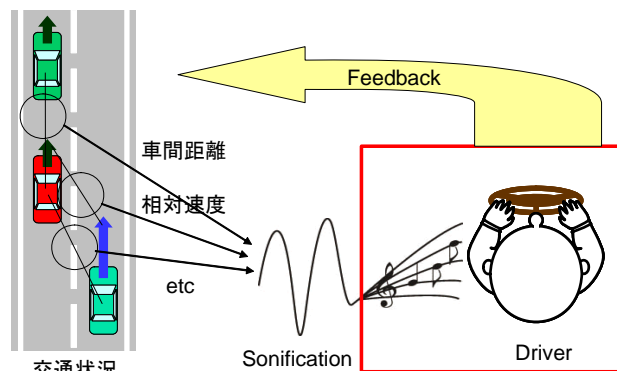


図3 ソニフィケーションによる運転支援の概念図



効利用のための技術開発の余地はかなり大きい。本研究では、自動車の運転支援において情報伝達のための感覚モダリティとして十分に活用されていない聴覚を積極的に利用するための可聴化技術に注目した。データが持つ関係情報を知覚可能な音響信号に変換することでその伝達や解釈を促進する「ソニフィケーション」(sonification)の概念に基づいて、警報のような注意喚起に留まらない、積極的な音の提示の運転操作に対する支援効果について調査を行った。また、可聴化による情報提示の設計において、その手順と考慮すべき事項について整理した。

## 5. 協調作業環境下における他者の行動意図理解のための状況弁別型強化学習[10,11]

例えば重たい荷物を2人で協力して運ぶといったいわゆる協調作業の実行において、作業員間の協調状態は言語や合図などによるコミュニケーションに基づいて調整される場合もあれば、そのような明示的なコミュニケーションを伴わない場合もある。後者の場合とは、作業実行の中で自然と意図が作業員間で共有される状態を指し、荷のバランスをとるといった下位行為が双方の移動行為に依存しているために、その実行を通じて相方の意図する移動方向や目的地が特定されるような状況がこれに相当する。そこでは、作業員が作業場との物理的な相互作用情報から他者の意図を「間接的に」読み取ることで協調作業を実践している。本研究では、このような「明示的なコミュニケーションを用いない協調作業」に着目し、これを人工エージェントで実現するための機械学習モデルとして状況弁別型強化学習機構を提案した。このモデルは環境状態のダイナミクスとして作業状況を識別する「状況弁別機構」と、その達成度合を基準にして自らの内部目標を切り替える「内部目標切替機構」から成る。シミュレーション実験より、提案モデルは「組織のための学習」の段階における作業状況と内部目標の適切な対応付けと操作行動の学習を効率的に達成することを確認した。

## 6. 観察模倣と自律強化の融合による学習機構に関する研究[12,13]

人工エージェントが効率的に様々な行動を学習することは、未知のタスク環境における活動を考える上で必要不可欠な課題である。未知の環境においてエージェントが新たな行動を学習するための手法として、他者からの明示的な教示なしに報酬という僅かな情報によって自律的に行動を学習する強化学習や、習熟した他者の技術を吸収する方法のひとつである模倣学習が挙げられる。これらの手法は機械学習の世界では別々の枠組みで考えられてきたが、人間の学習方法を考えるとそれらは独立したものではなく、模倣によって他者の行動を参照し、自らの試行錯誤を通じた強化学習と融合させることで一連の学習プロセスを形成していると考えられる。本研究では、他のエージェントの動作の観察に基づく模倣学習と自律的な強化学習を、模倣する対象の行動の観察から得られた情報を積極的に利用するための補助的な報酬の利用によって融合させる機械学習機構を提案した。そして、他のエージェントが取得しているタスクに関する知識を真似ながら効率的に行動を学習することの有効性について、仮想空間上での倒立振子の振り上げ制御のパフォーマンス比較を通じて検討した。

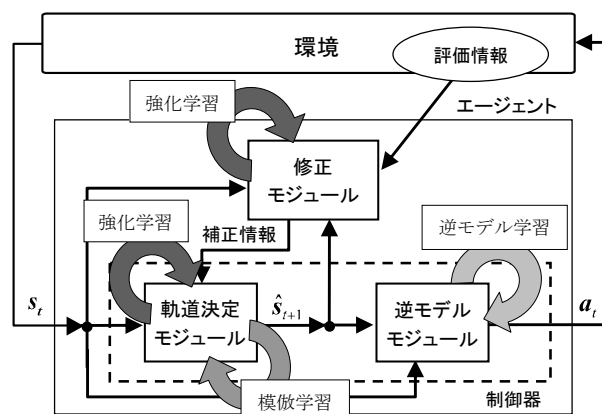


図4 模倣学習と強化学習を融合した学習機構

## 参考文献

- [1] 塚本, 榎木, 堀口, 中西: 矛盾の発生を契機とした組織活動における作業変容のプロセス分析, 第 34 回 知能システムシンポジウム資料, pp.89-94, 2007.
- [2] 堀口, 福寿, 榎木: 入出力関係の類似性がユーザによる自動化システムのモード認識に及ぼす影響について, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2006 論文集, pp.109-114, 2006.
- [3] Yukio Horiguchi, Ryuichi Fukuju and Tetsuo. Sawaragi: An Estimation Method of Possible Mode Confusion in Human Work with Automated Control Systems, Proceedings of SICE-ICASE International Joint Conference 2006, pp.943-948, 2006.
- [4] 堀口, 福寿, 榎木: ユーザ操作とシステム挙動の対応構造に注目した状況認識向上のための人間-機械間インタラクション設計, 第 49 回 自動制御連合講演会 講演論文集, SU9-2-1, CD-ROM, 2006.
- [5] 堀口, 福寿, 榎木: ドライバによる自動運転システムの動作モード認識を支援するインタラクション設計に関する研究, SICE システム・情報部門学術講演会 2006 講演論文集, pp.237-240, 2006.
- [6] 田中, 谷口, 堀口, 中西, 榎木: 自動化機械に対するユーザの複数内部モデル構成過程, 第 19 回自律分散システム・シンポジウム資料, pp.97-102, 2007
- [7] 田中, 谷口, 堀口, 中西, 榎木: 多モード自動化機械に対するユーザの複数内部モデルの動的構成過程に関する研究, 第 34 回知能システムシンポジウム資料, pp.307-312, 2007.
- [8] 黒田, 堀口, 井上, 松浦, 中西, 榎木: 情報採餌理論に基づくデジタル家電機器の対話型インタフェースに関する研究, 第 34 回知能システムシンポジウム資料, pp.297-302, 2007.
- [9] 木村, 堀口, 榎木, 中西: ドライバーの運転状況の認識を支援する可聴化技術に関する研究, 第 34 回知能システムシンポジウム資料, pp.193-198, 2007.
- [10] 谷口, 小川, 榎木: 動的目標変化を含む協調タスクに対する状況弁別型強化学習機構の適用, 第 50 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2006.
- [11] 谷口, 小川, 榎木: 状況弁別型強化学習機構に基づく自己閉鎖的な他者意図推定の実現, 第 49 回 自動制御連合講演会 講演論文集, SU9-3-4, CD-ROM, 2006.
- [12] 田淵, 谷口, 榎木: 観察模倣と自律強化の融合による学習機構に関する研究, 第 50 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, p.29-30, 2006.
- [13] 田淵, 谷口, 榎木: 模倣学習と強化学習の調和による効率的行動獲得, 人工知能学会第 20 回全国大会論文集, 3C1-2, 2006.

# システム工学講座 振動制御システム分野

教授 松久 寛, 助教授 宇津野 秀夫

## 1. はじめに

大は宇宙から小は原子の世界まで、古くは振り子時計から今の電子時計まで、動くもの森羅万象すべてに振動が関係します。本研究室は、機械と人間にまつわる振動・騒音の発生機構の解明から振動制御まで、動的な機械システムを対象にした数理モデルの構築と設計手法の確立に取り組んでいます。

## 2. 主な研究テーマ

### 人の歩行と歩道橋の振動に関する研究

人と機械の相互作用に関する研究として、人の歩行と歩道橋の振動に関する研究を行っています。人の歩行のリズムは、非線形の微分方程式である神経振動子で記述されます。一部の人の歩行リズムが歩道橋の固有振動数に近いと橋の振動が増大し、その他の人の歩行リズムに影響を与え、最終的に多くの人の歩行リズムが橋の振動周期に引き込まれる現象が発生します。このような現象を複雑系の視点から研究しています。

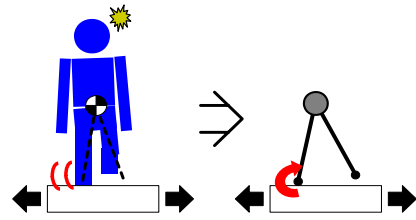


図1 横揺れする歩行機上の歩行実験

### 圧電素子を用いた平板の遮音性能向上に関する研究

スマート構造は、はりや平板などの柔軟構造体にセンサーやアクチュエータの役割を果たす機能性材料を配置して振動制御を行う構造です。

本研究室では機能性材料として圧電素子を用い、安定性に優れた受動制振をベースに、より高い制振性能が得られるハイブリッド制振やLRC自由設計回路、複数モード同時制振など、新しい制御方法を考案し、板の振動低減に適用しています。

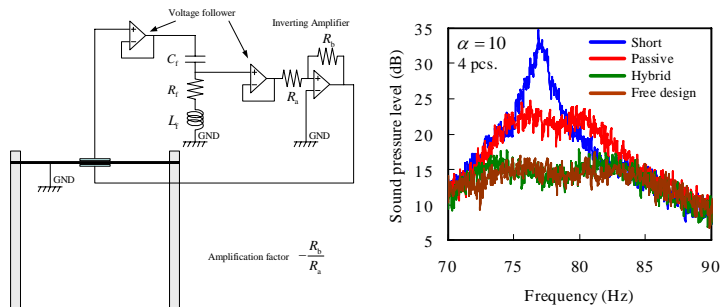


図2 ハイブリッド制振

### インパルス応答補間法を用いた能動騒音制御に関する研究

騒音に逆位相の音を重ね合わせて消音する能動騒音制御技術が注目を集めている。本研究では歩行する人の耳元騒音のように、評価点が移動する音響伝達経路を想定し、従来より簡便で高精度に音響伝達経路を補間する方法を考案しました。1次元音響管を用い、評価マイク位置を移動させて能動消音を行うと、従来法より良好な消音性能が得られます。

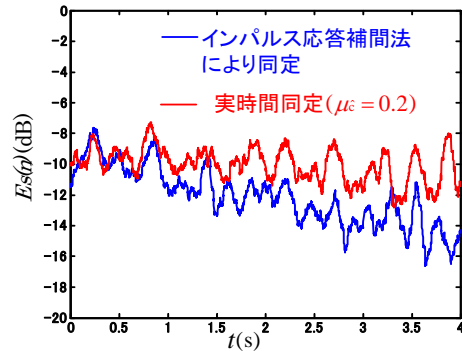


図3 能動消音効果の比較

## 動吸振器による振動の低減研究

ロープウェイやリフト、ボートなどの横揺れ（振動）は、安全運行の観点からだけでなく、乗客の乗り心地の観点からも、重要な問題で、揺れの低減が強く求められています。本研究室では、差動型動吸振器や円軌道型動吸振器などさまざまなタイプの動吸振器\*)を開発し、ゴンドラやリフト、船、橋などを制振する研究を行っています。



図4 屋根に動吸振器をつけたゴンドラ

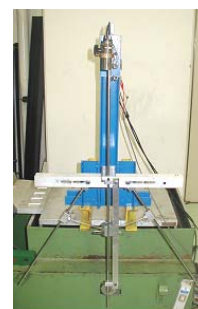


図5 コリオリ力を利用した新型動吸振器

動吸振器\*)とは、振動体(主系)に減衰を持つ付加質量を取り付け、主系との相対変位を利用して、振動エネルギーを吸収する装置です。

## 運動量交換型衝撃吸収ダンパの研究

衝撃振動を低減する新しい技術として「衝撃吸収ダンパ」を研究しています。基本原理は簡単で、玉突き現象を応用します。すなわち、質量が等しい3つの剛体球が一直線上にあり、1番目の球は運動しており、残りの2個の球は接触して静止しています。1番目の球が静止している2番目の球に衝突すると、衝突を受けた2番目の球は自ら動くことなく、3番目の球に運動量を伝達します。この現象を機械の衝撃現象に当てはめると、2番目の球が機械、3番目の球が左図の衝撃吸収ダンパとなります。衝撃源の運動量を機械に接触する衝撃吸収ダンパの運動量に変換することで、機械の衝撃変位を抑制し、衝撃振動の低減が可能となります。このアイデアを床衝撃音の低減、プレス機械の振動低減、プレジャボートパンチング振動の低減を目指して研究開発中です。

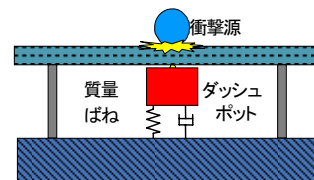


図6 床衝撃音用の衝撃吸収ダンパ

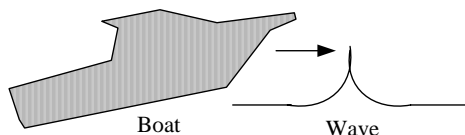


図7 船舶のパンチング現象概念図

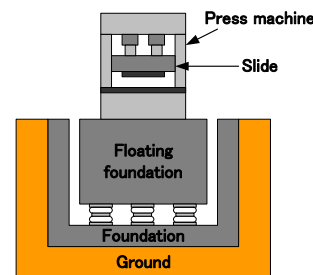
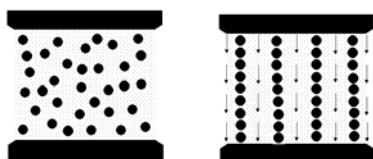


図8 プレス機械の構成

## Research and application on Magnetic Rheological (MR) fluid damper

MR fluids are the magnetic rheological fluid and consisted of micron-sized, polarizable particles dispersed in mineral or silicone oil. When a magnetic field is applied to the fluids, particle chains form, and the fluid becomes a semi-solid and exhibits viscous plastic behavior.

The characteristics of MR fluid can be applied in damper which can control the vibration of system, such as automobile suspension and elevator etc.. 2DOF of suspension model with MR damper is studied, in which the dynamics of the system can be analyzed.



Without magnetic field

With magnetic field

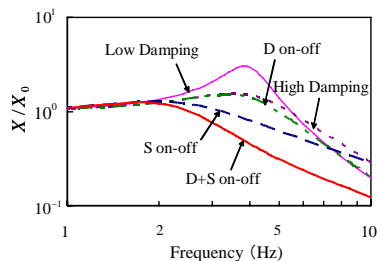


Fig. 9 2DOF model with MR damper

# 機械設計制御工学講座 メカトロニクス分野

助教授 横小路 泰義

## 1. はじめに

当分野での研究の三本柱は、ロボット、バーチャルリアリティ (VR)、テレオペレーションである。これらは図 1 に示すように、すべてお互いに密接に関係しているとともに、何らかの意味で人間とも深く関わっている。当分野ではメカトロニクス技術をベースに、これらの 3 つの方向から人間のもつ機能の本質的理解および人間に役立つ機械システムの実現という基礎と応用の両側面からの研究を目指している。

以下では、これら 3 つの柱の中での本年度に得られた個々の研究成果について簡単に紹介する。

## 2. ロボットに関する研究

本年度は、昨年度に引き続き、手を用いる複雑な動作として「折り紙」という具体的作業を取り上げて、人間による作業の観察から機能の機械的実現までを試みた [1]。図 2 に、人間の折り操作の観察に基づいて設計した折り紙ロボットシステムの外観を示す。

図 3 に、開発したロボットハンドによって折られた目標の折り紙作品「おたまじゃくし」を示す。比較のために、人間が折ったものを同時に示す。今年度は、折り操作に改良を施すことで「おたまじゃくし」の一連の折りをロボットで実現することができた。

人間の手の外観にとらわれることなく、人間と同じように折り紙を折るロボットを実現することで、操作指 2 本、固定指 2 本の計 4 本の指で折り紙作業が可能であるというある種の作業の本質を見出すことができた。

## 3. バーチャルリアリティに関する研究

VR の分野では、衝撃力の提示が可能なハプティックデバイスの開発を行った [2][3]。従来のハプティックデバイスでは、実世界での剛体壁に接触したときに生じるような大きな衝撃力が提示できなかったため、仮想壁への接触時には違和感があった。大きな衝撃力をモータの出力だけで実現しようとすると、非常に大きなモータが必要となり非現実的かつ危険である。

我々は図 4 に示すように、フライホイールにあらかじめ必要な運動量を蓄えておき、接触の瞬間に電磁クラッチによって蓄えられた運動量を衝撃力としてハンドルを介して一気にユーザの手に提示する方法を提案し、実際に図 5 に示すような装置を試作した。

ユーザが握るハンドルの速度を計測することで衝突時に必要な衝撃力が求められるので、このデバイスにより任意の反発係数の衝突の模擬が可能である。実験の結果、実際の剛体壁接触に近

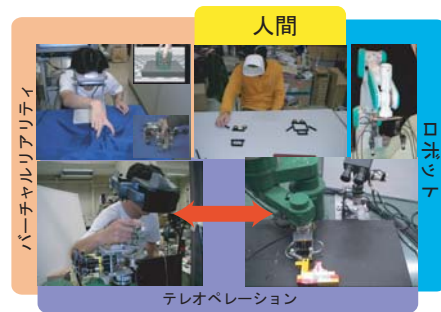


図 1: 研究テーマの関係図

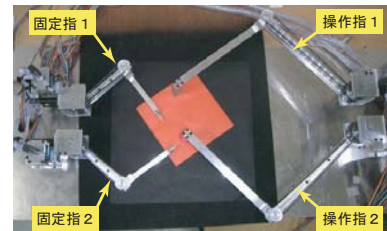
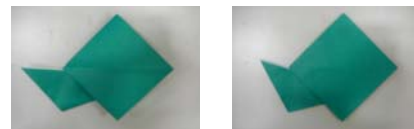


図 2: 折り紙ロボットの概観



(a) ロボット (b) 人間

図 3: 折られた「おたまじゃくし」の比較

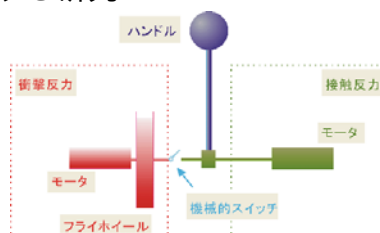


図 4: 衝撃力を提示するハプティックデバイスの原理図

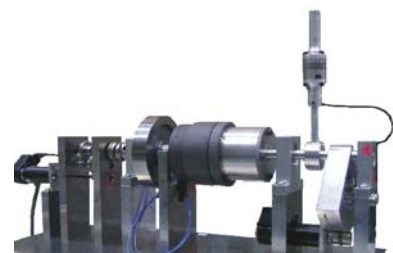


図 5: 試作した衝撃力提示ハプティックデバイス

い応答が得られることが確かめられた．今後はこの装置を用いて人間の衝撃力の弁別能力を調べるとともに，装置の多自由度化を進めることが課題である．

#### 4. テレオペレーションに関する研究

今年度は，遠隔操縦システムの視覚系に着目し，人間の作業計測結果を基にカメラシステムの機構の最適化を行った[4]．スレーブ側のカメラの視野角は約45度と通常の人間の視野角と比べてかなり制限されており，このとき人間は頭を回転させるだけでなく前後左右に大きく並進

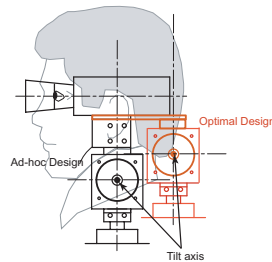


図 6: 最適化されたカメラ機構と初期の機構との比較

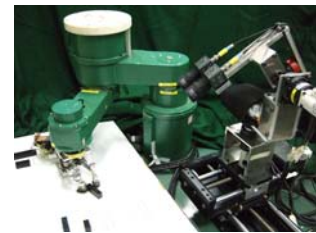


図 7: カメラヘッドを備えたスレーブロボットの外観

させることが分かっている．我々は，視野角が制限された状態での人間の頭部運動を計測し，なるべく少ない自由度で計測した頭部運動をある許容誤差以内で追従できるようなカメラシステムの機構最適化を行った．図 6 に最適化されたカメラ機構と，開発初期の人間の首の関節を単純に近似した機構との比較を示す．図 7 に最適化されたカメラヘッドを備えたスレーブロボットの外観を示す．実際にこのスレーブロボットを用いて遠隔操縦を行ったところ，違和感なく操縦が可能であり，操縦者の頭の動きとスレーブのカメラヘッドとの間の誤差もほぼ許容値内に収まっていることが確認された．

#### 5. 人間の手に関する研究

以上紹介した研究以外にも，人間の手そのものの機能の理解を目指した研究も行っている．人間の手は多くの筋肉と複雑な腱のネットワークとによって運動が実現されており，その機能はまだ工学的に厳密に説明されているとはいえない．そこで我々は，図 8 に示すような指の筋骨格モデルを構築し，数値シミュレーションを通して手の機能の解明を目指している．現在は手の筋肉の中でも特に虫様筋に注目しているが，既に器用な指の動作に虫様筋が関与していることが分かり始めている．

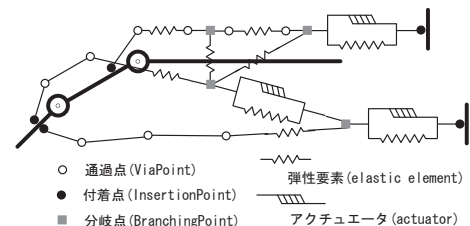


図 8: 指の筋骨格モデル

#### 6. おわりに

我々は，人間に代表される生物の持つ有用な機能の工学的な実現を目指しているが，そのためには人間や生物の機能の本質的な理解が重要である．またVRやテレオペレーションでも人間の特性の理解に基づいた設計がなされるべきである．結局，ロボット，バーチャルリアリティ，テレオペレーションの3つの柱とともに，人間自身の理解も重要な柱であるといえる[5]．

#### 参考文献

- [1] 横小路，田中，鴨谷，“ロボットハンドによる折り紙作業”，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.106，No.410，pp.113-118，2006．
- [2] E. Vander Poorten and Y. Yokokohji, “Rendering a Rigid Virtual World through an ImpulsiveHaptic Interface,” Proc. International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006), October 9-15, Beijing, China, pp.1547-1552, 2006.
- [3] E. Vander Poorten and Y. Yokokohji, “Feeling a Rigid Virtual World through an Impulsive Haptic Display,” Advanced Robotics, Vol.21, No.11, 2007. (to appear)
- [4] K. Shiratsuchi, K. Kawata, E. Vander Poorten, and Y. Yokokohji, “Design and Evaluation of Telepresence Vision System for Manipulation Tasks,” Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 10-14, Roma, Italy, 2007. (to appear)
- [5] 横小路，“テレオペレーション，VR，ロボティクスから人間を理解する”，計測と制御，Vol.45，No.12，pp.1036-1041，2006．

# バイオエンジニアリング講座 医療工学分野

教授 富田 直秀

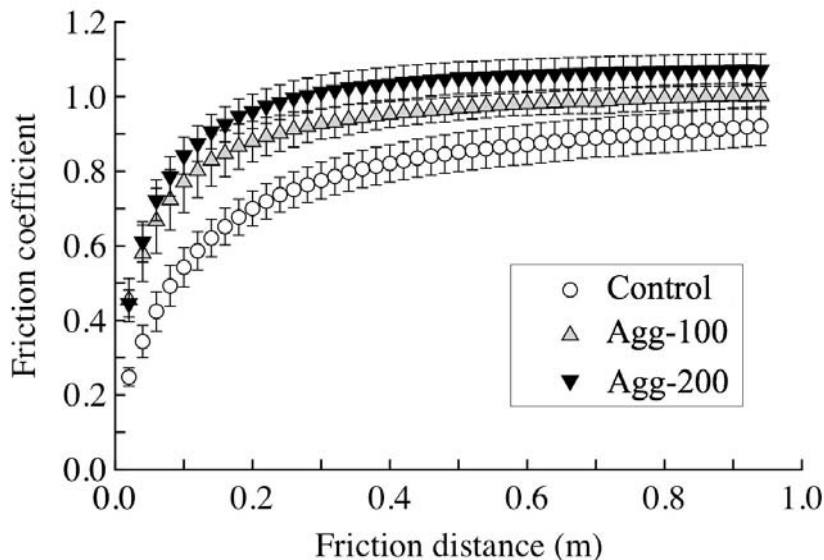
## 1. はじめに

本分野では、再生医工学分野における「生体環境設計」の実践を行っている。「生体環境設計」とは、医学の設計対象は生体機能そのものではなく生体周囲の環境であること、つまり、治療において生体機能は「作られる」のではなく「育てられる」のでなくてはならないことを主張する方法論である。具体的には、軟骨再生をターゲットとして、その様々な力学環境設定と軟骨としての機能発現との関係を観察し、その環境設計としての方法論を模索している。

## 2. 2006年度の活動

2006年度は、環境を設定して育成した軟骨組織の機能評価を主に行った。特に、その摩擦特性評価方法を確立した。胆体として、絹から抽出したフィブロインより作成したフィブロインスポンジを用い、日本白色家兎から採取した軟骨細胞を播種し、各種培養を行った。フィブロインスポンジ内では軟骨細胞はよく増殖し、基質産生も盛んである。関節軟骨の摩擦・摩耗機構にはまだ不明な事項が多いが、水和潤滑機構の成熟過程を主な評価点とした

また、滑り環境培養によって高い耐摩擦機能が発現し、その再生軟骨を再び生体内に移植することによって、良好な軟骨組織形成と、周囲軟骨との結合性が得られることを報告した。このように培養環境の設定によって軟骨の機能を変化させることが可能である。相対滑りの他にも、囲い込み培養による凝集体作成や、播種時に遠心を加える環境設定により軟骨は良好な基質産生を示す。しかし、凝集体をフィブロインに播種して得られる軟骨組織や遠心刺激が加わった軟骨組織の摩擦機能を評価すると、その摩擦係数は環境設定によりかえって上昇していた。つまり、軟骨の基質産生量と軟骨の摩擦機能との間には必ずしも一致が見られない事実を発見した。



右図は直径100 $\mu$ 及び200 $\mu$ の Micropatterned substrate を用いて軟骨細胞の囲い込み培養を行い、得られた凝集体とフィブロインスポンジから作成した再生軟骨の摩擦試験結果である。上述のように囲い込み培養によって軟骨は良好な基質産生を示すが、得られる軟骨組織の摩擦係数はかえって上昇していた。

この例のように、再生組織の環境設計を行う上において、環境中で育成された組織の機能測定を正確に行う技術開発は必要不可欠である。

Fig. 囲い込み培養によって得られた凝集体とフィブロインスポンジから作成した再生軟骨の摩擦試験結果

### 3. 参考文献

#### [雑誌]

1. Morita Y., Tomita N., Aoki H., Sonobe M., Wakitani S., Tamada Y., Suguro T. and Ikeuchi K., Frictional Properties of Regend Cartilage in Vitro, JOURNAL OF BIOMECHANICS, 39(1), 2006, 103-109
2. Seto Y., Tomita N., Harada Y., Sakoda H. and Takakura Y., Regenerated Soft Tissue Survival Using Repulsive Force of Magnetized Devices: Preliminary Report, J. Orthop. Sci., 11, 2006, 58-63
3. 寺村聡、世宮俊輔、山本浩司、波田野直也、富田直秀、遠心力を利用した物理環境が初期接着細胞に及ぼす影響, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 27, 2006, 67-70
4. 可知直芳、富田直秀, 細胞凝集体の作製とその機能評価, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 2006, 27, 83-88
5. Okano H, Onmori R, Tomita N, and Ikada Y., Effects of a Moderate-Intensity Static Magnetic Field on VEGF-A Stimulated Endothelial Capillary Tubule Formation in Vitro., Bioelectromagnetics, 27, 2006, 628-640
6. Yamamoto K., Tomita N., Fukuda Y., Suzuki S., Igarashi N., Suguro T. and Tamada Y., Time-dependent Changes in Adhesive Force between Chondrocytes and Silk Fibroin Substrate, Biomaterials, 28(10), 2006, 1838-1846
7. Shang-kai C., Tachibana Y., Uyama H., Kobayashi S. and Tomita N., Evaluation of Chondrocytes Expression Embedded in Thermoresponsive Poly(amino acid)s with Sol-Gel Transition, Tissue Engineering, 2007, 13(3)
8. Shang-kai C., Tomita N., Yamamoto K., Harada Y., Nakajima M., Terao T. and Tamada Y., Transplantation of Allogeneic Chondrocytes Cultured in Fibroin Sponge and Stirring Chamber to Promote Cartilage Regeneration, Tissue Engineering, 13(3), 2006, 483-492

#### [解説]

1. 富田直秀, 再生医療における医工連携 (医と工の立場から), 日本機械学会誌, 109(1047), 2006, 30-31
2. 富田直秀, バイオエンジニアリングの基礎Ⅲ (生体の多様性に働きかける材料), Diamond, 80号, 22(1), 2006, 53-56
3. 富田直秀, 構造形成材料, 第6版 科学便覧 応用化学編, 2006
4. Shibata N., Kurtz M.S. and Tomita N., Recent Advances of Mechanical Performance and Oxidation Stability in Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene for Total Joint Replacement: Highly Crosslinked and  $\alpha$ -Tocopherol Doped, Journal of Biomechanical Science and Engineering, 1(1), 2006, 107-123

#### [著書]

1. 富田直秀 (共同執筆), 人工関節膝のキネマティクス: 動揺性を考える, 人工関節置換術 [TKA] の全て—安全・確実な手術のために— (編集: 勝呂徹・井上一), 2007, 25-33



# 航空宇宙システム工学講座 最適システム設計工学分野

教授 吉村 允孝, 助教授 西脇 眞二, 助手 泉井 一浩

## 1. はじめに

平成18年度の最適システム設計工学研究室では、動的機能を持つ機械システムの最適設計において多種多様な評価特性を総合的に評価した意思決定を行うための方法論に関する研究を行った。主な研究テーマは、1. 機械システムの階層的最適化手法と、2. 多目的最適設計問題におけるパレート最適解の導出、である。以下に、これら2つのテーマについて詳述する。

## 2. 機械システムの階層的最適化手法

一般の機械製品の設計では、多くの評価特性を同時に考慮し、設計案を創出する必要がある。このような設計問題を最適化問題として扱うとき、複数の目的関数を含む多目的最適化問題として定式化することで、複数の評価特性間のトレードオフの関係を吟味しながら意思決定を行うことができる。しかし、大規模な機械製品の設計においてはこのプロセスは非常に複雑で困難なものとなる<sup>[4]</sup>。ここでは、多数の評価指標を満足しなければならない機械製品の多目的の意思決定を行うために、機械製品の設計評価特性を図1のようにシステムレベルから詳細レベルという階層的な関係に分割し、多段階にわたって最適化することにより、大域的な多目的最適解を探索する方法に関する研究を行った。

この階層表現による多目的最適化問題において得られる設計案は、評価する特性に対する設計者の重要度の重み付けによって決まり、各階層においてパレート解集合を得ることができる。このように大規模な問題を比較的単純な部分問題に分割し、段階的に最適化していくことにより、局所解に陥ることを防ぐことができ、単純な部分問題においては離散変数も効果的に扱うことが可能となった。また、製品の包括的レベルから詳細レベルにわたる評価特性の影響関係を把握することができるため、設計者が得られた設計案の妥当性を判断する指針が得られること、さらに、詳細レベルにおける一部の設計変更が、最終的な性能にどれだけ影響を与えるかを理解しやすくすることなど、単なる最適化手法として用いるだけでなく、設計プロセスの支援法としても有用性を発揮する。

また、製品設計において最適化手法を用いるときの問題点の1つに、製品の生産・使用時の種々の擾乱により、最適解を導出した最適化問題の前提を逸脱することがある、というものがある。そこで、予測される擾乱に対して、ロバストな設計解を提示する必要がある。設計変数  $\mathbf{x}$ 、誤差因子  $\mathbf{p}$  が擾乱の対象であるとき、目的関数の平均値を  $\mu$ 、目的関数のばらつきを  $V$  とするとき、図2のように、背誤差因子の変動を考慮することで、ばらつき  $V$  は

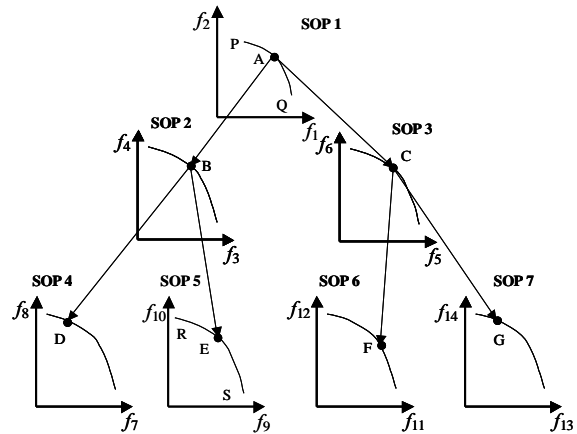


図1 機械システムの諸特性の分割と階層的最適化

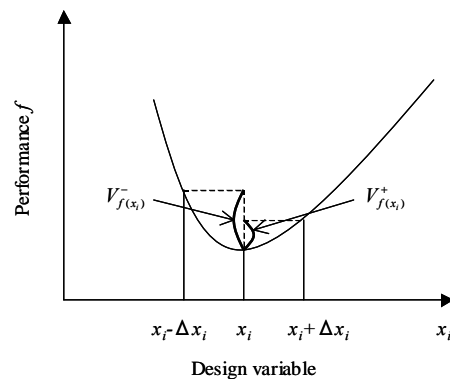


図2 ロバスト性の評価

$$V_{f(x_i)} = \left( \sum_{i=1}^m \left( \frac{|f(x_i - \Delta x_i) - f(x_i)| + |f(x_i + \Delta x_i) - f(x_i)|}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

によって定めることができる。このばらつき  $V$ を用いて、

$$\begin{aligned} &\text{find} && x_i \\ &\text{minimize} && \text{obj} = w_{\text{robust}} \times \mu_{f(x_i, p_j)} + (1 - w_{\text{robust}}) \times V_{f(x_i, p_j)} \\ &\text{subject to} && g_k(x_i, p_j) \leq 0 \\ &&& x_i^- \leq x_i \leq x_i^+ \end{aligned}$$

と最適化問題を定式化することで、ロバスト性を評価することが可能である。階層的最適化問題において、以上のようなロバスト性を評価・最適化が可能であることも確認することができた。

### 3. Particle Swarm Optimization の構造問題への応用

Particle Swarm Optimization(PSO)<sup>[2]</sup>は、鳥やイルカの群れのような生物集団の社会的行動を模擬した発見的最適化手法であり、多峰性の強い目的関数を持つ複雑な最適化問題を解くための方法として注目を集めている。特に無制約の最適化問題において、遺伝的アルゴリズムなどを凌駕するという報告がなされている。近年では、PSOを用いた多目的最適化手法も提案されている<sup>[3]</sup>。しかしながら、PSOは制約条件を明示的に扱わないという特徴があり、構造最適化問題のように制約条件上に最適解が存在するような問題への適用は困難である。そこで、構造最適化問題では比較的容易に求めることができる設計感度情報を利用し、勾配法とPSOをハイブリッド的に適用し、高速かつ大域的な最適解探索手法および多目的最適化法の開発を行った。

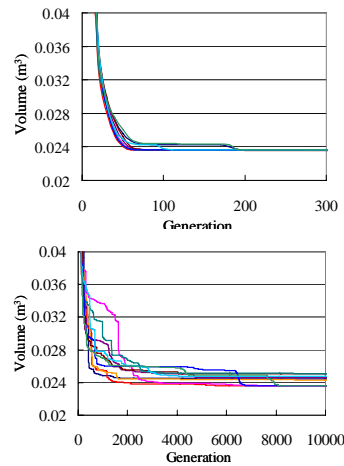


図3 通常の PSO 法（上）とハイブリッド法（下）の比較

図3は、構造最適化問題における通常のPSO法とハイブリッド法の探索性能の比較を行った例である。設計感度情報を利用した勾配法を併用的に用いたハイブリッド法を用いた場合、非常に高速に大域的な最適解に到達することが確認できた。多目的問題にも拡張し、ハイブリッド法の有効性を確認している。

### 4. おわりに

動的機能を持つ機械システムの最適設計において必須となる、大域的最適化と多目的最適化を効果的に行う方法を開発した。システムの諸特性のトレードオフ関係を正確に把握し、定められた最適化問題に対する大域的な最適解を高速に求めることで、機械システム設計の効率を大幅に向上させることが可能となる。

### 参考文献

- [1] Kim, H. M., Michelena, N. F., Papalambros, P. Y., and T. Jiang, Target Cascading in Optimal System Design, Journal of Mechanical Design, Vol.125, No.3, 2003, pp.474-480.
- [2] Kennedy, J., and Eberhart, R. C., Swarm Intelligence, Morgan Kaufmann, 2001.
- [3] Coello Coello, C. A., Pulido, G. T., and Lechuga, M. S., Handling Multiple Objectives with Particle Swarm Optimization, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 8, No. 3, 2004, pp.256-279.

# 生産システム工学講座 生産システム工学分野

講師 水山 元

## 1. はじめに

本研究室では、顧客を始めとして、従業員、株主、取引先、地域住民など、あらゆるステークホルダーに高い満足度を与えられる「生産システムのあるべき姿」について、「競争の視点」、「組織の視点」、「学習の視点」の三つの視点を重視しながら研究を進めている。現在の主な研究テーマは、「生産システムにおける革新・改善のマネジメントに関する研究[1][2]」、「予測市場システムに基づく暗黙知集約型需要予測法の研究[3]」、「統計的データ分析およびデータマイニングの理論と産業応用[4][5][6][7]」、「習熟や改善を支援するための作業分析[8]」、「加工点分析とトポロジカルソリューションライブラリの研究 (Extended TRIZ) [9][10][11]」などである。以下では、これらの概要について報告する。

## 2. 革新・改善のマネジメント

生産システムの競争力とその向上の観点から、革新・改善のマネジメント (Plan-Do-Check-Action) のあり方について研究している。例えば、現場の小集団活動を基盤とした「改善活動」には、従業員の士気を高める、現実の問題が見えやすい、などの利点があるが、それらの単なる積み上げで、総体として首尾一貫した成果を挙げられるかどうかについては疑問も残る。そこで、小集団活動の利点を活かしながら、総体としての首尾一貫性、経済合理性、戦略適合性などを確保することのできる改善活動マネジメントのフレームワークについて検討している。今年度は、(1)小集団の組織設計、(2)各小集団の業績評価尺度、(3)各小集団への改善予算配分方式、の三つによって、全体的な改善効果にどのような影響が生じるかをシミュレーションによって検討した。

## 3. 暗黙知集約型需要予測法

過去の実績から何らかのパターンを抽出し、それを未来に外装する従来型の需要予測手法は、実績データが得られない場合や、需要パターンに構造変化が生じやすい場合には無力である。これに対して本テーマでは、自社の営業員らが日々の活動の中から無意識に獲得している「需要に関する暗黙知」を予測市場システムを用いて集約、形式知化する、全く新しい予測手法の開発に取り組んでいる。なお、本テーマについては、別途、複雑系の制御・設計論グループの研究成果報告の箇所でも触れる。

## 4. データマイニングの理論と産業応用

情報技術の進展にともなって、生産システムでも様々な履歴データが日々蓄積されるようになってきた。また、生産システムでは、問題解決のために積極的に実験を計画してデータを収集することもよくある。本テーマでは、そうした観測データや実験データから、改善に役立つ知識を発見するためのアプローチの開発に取り組んでいる。観測データに対しては、特に、知識発見プロセスの完全自動化ではなく、人間の高い推論能力を最大限に発揮することのできる、人を巻き込んだデータマイニングのフレームワークの実現を目指している。一方、実験データに対しては、外乱の多い製造現場で再現性の高い知識を得るための、ロバストな実験計画法・解析法を目指している。

## 5. 習熟や改善を支援するための作業分析

本テーマでは、習熟・改善およびその効率化という観点から、人の動作の形式知化を試みている。今年度は、特に、組立作業を取り上げた。組立作業は、一般に、作業者の作業習熟に伴ってその効率がよくなっていくという性質を持っているが、製品ライフサイクルが短期化している状況下では、習熟にたよった効率向上には限界がある。新たに導入される製品の組立作業においても、習熟に時間を掛けるのではなく、初めから効率良く作業ができることが望ましい。そこで、組立作業を、曖昧性を含んだ概念

状態を目的の概念状態に遷移させることであると考え、どのような概念状態を経由して作業を進めていくのが望ましいかを判断する評価尺度を新たに導入し、概念状態の遷移に着目した新組立作業設計法を提案した。

## 6. 加工点分析の研究

本テーマでは、革新的システム開発のための問題発見と問題解決について研究している。加工点分析は、既存システムの技術課題を定式化するための手法であり、トポロジカルソリューションライブラリは、過去の様々な革新的な技術課題解決策の間にみられる類似性に着目し、類似の解決策グループをそれぞれネットワークポロジの変化として表すことで、再利用可能な問題解決パターンをライブラリ化するものである (TRIZ の新たな視点からの拡張)。

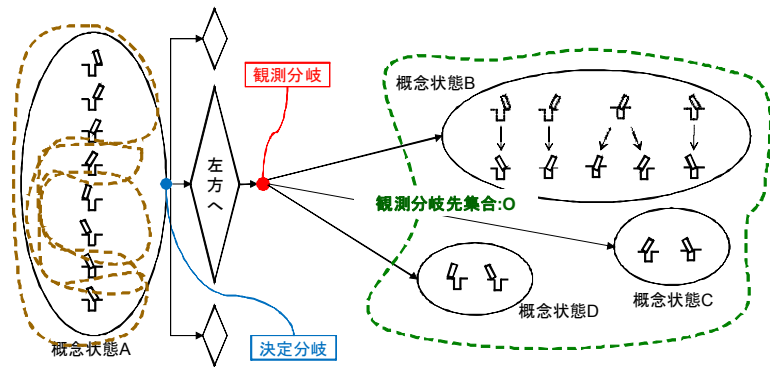


図1 組立作業設計の概念図

## 参考文献

- [1] 長尾 昂, 水山 元: 現場とエンジニア間の交渉による協調型の改善活動スケジューリングに関する研究, 平成 18 年度日本経営工学会秋季大会, 広島, Nov. (2006).
- [2] H. Mizuyama: A Time-Quality Trade-off Problem of a Project with Non-Standardized Activities, Proceedings of the 36th International Conference on Computers and Industrial Engineering, Taipei Taiwan, June (2006).
- [3] 鎌田瑛介, 水山 元: 予測市場を用いた暗黙知集約による需要予測法の研究, 平成 18 年度日本設備管理学会秋季研究発表大会, 豊田, Nov. (2006).
- [4] 水山 元, 浅田克暢, 山田賢太郎: 決定木分析援用型多段階品質情報推移モデルの提案 - 多段階品質情報推移モデルに基づく品質データマイニングの研究 (第 2 報) -, 日本経営工学会論文誌, vol.57, no.3, pp.214-221, (2006).
- [5] H. Mizuyama: Artificial-Neural-Network-Based MSQIM for Exploratory Analysis of Manufacturing Data, Proceedings of the 7th Asia-Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference, Bangkok Thailand, Dec. (2006).
- [6] H. Mizuyama: Multi-Stage Quality Information Model for Managing Complex Production Systems, IIASA - Kyoto University the 3rd Joint International Seminar on Applied Analysis and Synthesis of Complex Systems, Laxenburg Austria, June (2006).
- [7] 水山 元: 多段階品質情報推移モデルの研究, 平成 18 年度日本設備管理学会春季研究発表大会, 東京, June (2006).
- [8] 村上洋二, 水山 元: 製品の組立・分解の自動化のための作業分析, 平成 18 年度日本設備管理学会秋季研究発表大会, 豊田, Nov. (2006).
- [9] 木村圭志, 山品 元, 水山 元, 柴田大介: 加工点分析と拡張 Su-Field 分析を統合した革新的製品開発プロセス, 精密工学会誌, vol.72, no.8, pp.1054-1059, (2006).
- [10] H. Mizuyama: TRIZ-Based Systematic Product Innovation through Capturing and Structuring Elemental Conflicts, Proceedings of the 6th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, Ljubljana Slovenia, April, vol.2, pp.973-983, (2006).
- [11] 西口征郎, 水山 元: 売れる製品開発支援のための品質企画法に関する研究, 平成 18 年度日本設備管理学会秋季研究発表大会, 豊田, Nov. (2006).

# 知能機械システム講座 精密計測加工学分野

教授 松原 厚, 助教授 茨木 創一

## 1. はじめに

機械加工は、現代の「ものづくり」の産業を支える基本技術のひとつである。精密計測加工学研究室では、「ものづくり」の現場をささえる生産加工技術の高度化を目指して、そのための必須技術であるNC工作機械を核とした各種加工技術システムの高度化、及び生産加工の自動化・知能化をすすめる方法について主に研究開発を行っている。

## 2. 機械加工の知能化に関する研究

近年急速に普及した高速・高加速度マシニングセンタの能力を十分に活用し、非熟練者であっても高能率加工を行えるようにするためには、加工機の性能向上もさることながら、工程設計や、加工条件の設定、加工状態の監視がむしろ重要な課題となる。そのような観点から、加工機自体が加工状態を自律的にモニタリングし、加工条件を自動的に最適化することができる自律的加工システムについて研究している。また、熟練技術者の知識と経験に頼る部分が多い工程設計と、加工条件の設定を支援するシステムについても研究を行っている。

加工状態の監視に関しては、例えば、加工状態の重要な指標である切削抵抗を推定する手法について、幾つか異なる観点から研究を行っている。その一つとして、図1に示すように主軸ユニットに4つの変位センサを組み込み、主軸の動的なたわみを加工中に監視し、加工中の切削抵抗をオンラインで推定するシステムを開発した。主軸の変位には主軸ユニットの温度の影響が大きく現れるため、その影響を補正する手法などについて研究した。また、本システムを主軸の動的な剛性の測定・評価に活用する手法についても考察した。

また、モニタリングした切削抵抗の制御という形で、加工条件を自律的に調整するための手法を研究した。熟練技術者が加工音や主軸負荷から工具摩耗の進行度を推定し、工具摩耗の予測や、加工条件の修正を行うことをモデルとし、モニタリングした切削抵抗の制御を介して工具寿命の制御を行う手法を考察した (図2 参照)。

また、与えられた加工形状をどの順番で、どの工具を用いて、どのような加工条件で加工するかを決定する工程設計についても、工程候補の加工性能 (加工能率, 加工精度, 工具寿命など) を定量的に評価し、技術者に提示することで、その意思決定を支援するための知能化システムについて研究を行っている。

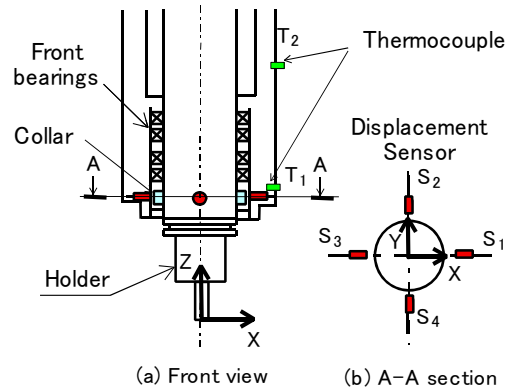
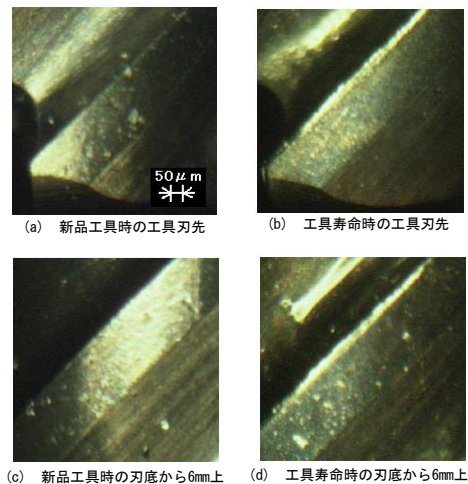
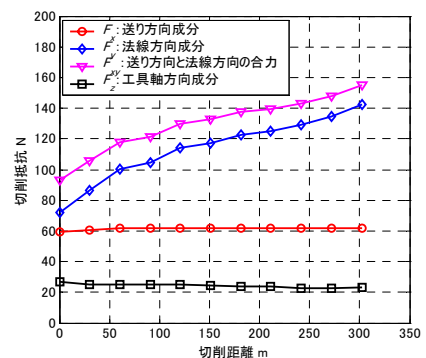


図1 主軸変位の測定による切削抵抗推定



(a) 工具刃先の写真



(b) 工具摩耗の進行に伴う切削抵抗の上昇

図2 工具摩耗の進行

### 3. 超精密位置決め技術に関する研究

デジタルカメラ、DVD レコーダ、フラットパネルディスプレイなどの情報家電の高性能化・低価格化に伴い、光学部品の精密金型や電子部品の加工に主に用いられる、超精密加工機（1～0.1nm 程度の位置決め分解能を持つ加工機）、高精度加工機（0.1μm～10nm 程度の位置決め分解能を持つ加工機）と呼ばれる工作機械が近年急速に普及してきている。本研究室では、これらの機械に対する多様な要求を満たすために必要な、要素技術、制御技術、計測技術など多くの観点から研究を行っている。

図3は、本研究室で製作した3軸加工機のテストスタンドを示す。3軸ともボールねじ駆動で、X軸は空気静圧案内、Y軸・Z軸は転がり案内を持つ。3軸とも高精度リアスケールを用いたフィードバック制御を行い、サブミクロンオーダの位置決め分解能を有している。

ボールねじとサーボモータを用いた送り系を用いた超精密位置決め課題を研究するため、特にボールねじの振れまわりなどが送り系の運動精度に及ぼす影響を調べた。それにより、依然として工作機械の位置決め方式の主流を占めるボールねじ駆動方式の高精度化について検討した。

また、Z軸には図4に示すようなボールねじ軸受を駆動する微動機構を組み込んだ。これは、ボールねじサポートユニット内に圧電素子を組み込み、ボールねじ軸受けを圧電素子で押すことによってボールねじ全体を微小に動かす微動機構である。ボールねじ駆動の粗動機構と、この微動機構を組み合わせることで、位置決め分解能5nmを実現することができを確認した。

一般的な機械加工において、加工誤差は加工機の運動誤差、工具変形などによって発生する。加工誤差を低減するために、加工精度の机上計測に基づく修正加工が用いられることが超精密加工では一般的であるが、加工機の運動誤差転写により発生した加工誤差は測定できない。本研究では、加工中の運動誤差を測定し、次の加工において運動誤差を補正することで、加工誤差を低減する方法を提案する。本研究では、上記の微動機構をZ軸に組み込み、超精密平面加工を行う際のX軸・Y軸の真直度誤差の補正を試験した。図5に実験結果の一例を示す。XY平面の運動誤差が、その測定と補正によって低減していることが分かる。今後、開発した機構を実際の超精密加工に応用していく。

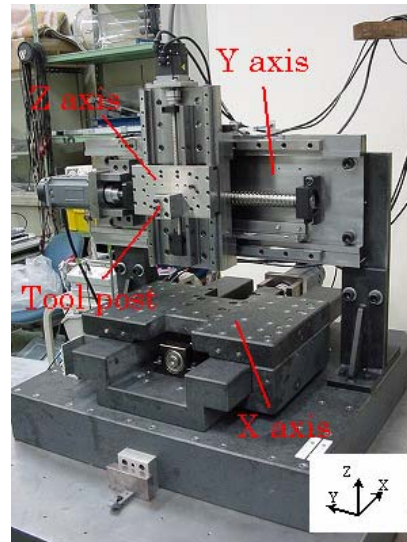
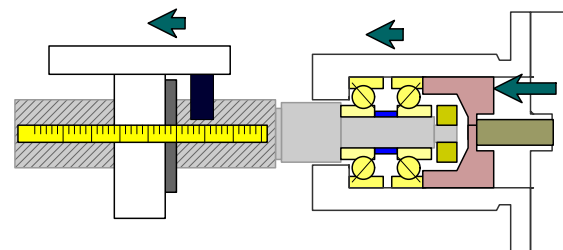
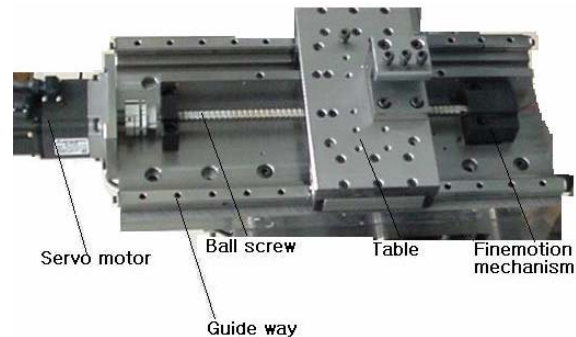


図3 3軸加工機のテストスタンド



(a) ボールねじ軸受を駆動する微動機構の構造



(b) 微動機構を組み込んだボールねじ送り系

図4 ボールねじ軸受を駆動する微動機構

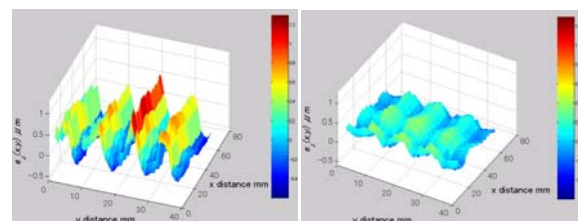


図5 平面度補正の効果  
(左:補正なし, 右:補正あり)

# 機械力学講座 機械機能要素工学分野

教授 久保 愛三, 助教授 小森 雅晴, 助手 野中 鉄也

## 1. 研究の概要

人が機械システムに求める機能は千差万別であり、そのために必要とされる運動や力の大きさはさまざまです。動力伝達システム・機械要素は、求められる多様な機能を実現するため、あらゆる機械システムに用いられています。本研究室では、高度な機械要素技術の開発により、自動車や鉄道、航空機、船舶、建設機械、風力発電、産業機械などの機械システムの信頼性の向上と人にやさしい機能の実現を目指しています。機械システムの基盤となる動力伝達機械・機能要素を対象とした、振動騒音性能・強度性能の調査や評価・最適設計手法の開発、機械部品の性能を左右する動作面の3次元形状のサブミクロンオーダー超高精度測定技術開発などの研究を行っています。

## 2. 研究紹介

### 2.1 部品形状誤差の連成によるドライブトレイン騒音の発生機構と人間の聴覚特性を介した不快さ評価

自動車や航空機などでは室内環境の快適さが重要な指標となっており、騒音に対する評価が厳しく問われる。特にドライブトレイン系に起因する騒音は目立ちやすく、不快であるため、問題となりやすい。このようなドライブトレイン騒音は歯車の形状誤差の連成により発生するケースが多いが、どのような形状誤差が、人間の聴覚特性と連成して不快さに関与しているのかは解明されていない。このため、不快さを軽減する設計指針も存在しない。本研究では、歯車の形状誤差に基づく騒音を仮想的に作り出すプログラムを開発し、ドライブトレイン系のギヤノイズ評価法を提案する。これにより、歯車形状誤差とギヤノイズ評価との関係を明らかにし、騒音の不快さを軽減する設計法を開発することを目指している。

騒音を仮想的に作り出すプログラムの基礎となる、ドライブトレイン系歯車の形状誤差を考慮した振動解析プログラムの開発を行い、それを用い

て、歯車の形状誤差の影響について調査した結果を報告する。従来より歯車の振動性能を予測・評価するためのシミュレーションの研究がなされてきたが、従来法では歯車の全歯面が同一形状であるという極めて限定的な仮定がなされていた。ギヤノイズは微細な歯面形状が強く影響するため、従来の解析法では現実との相関のある解析は困難である。そこで、歯車対の各歯の歯面形状が異なることを考慮できる歯車運転シミュレーションを開発した。まず、駆動歯車および被動歯車の全歯の歯面形状データより特定のかみあい状態に該当する歯面形状データを抽出する。回転遅れ量から同時に接触する接触線の荷重分布を求め、その総和が伝達荷重に一致するように、ニュートン法で収束計算を行う。そこから、歯車の運転性能に関する各物理量を計算する。以上の計算を駆動歯車と被動歯車の全ての歯の組み合わせについて行う。

図1に従来解析法と開発した解析法での振動起振力波形計算結果を示す。従来解析法では、各歯で同じ形状を有すると仮定しているため、同じ波形が連続している。一方、開発した解析法の場合、1ピッチご

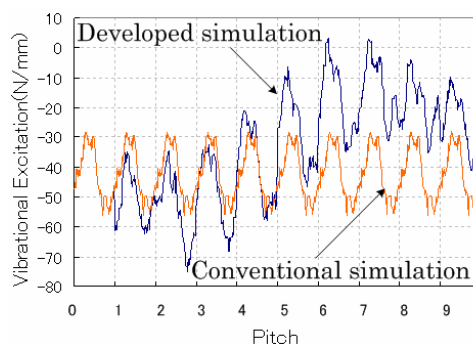


Fig.1 Comparison of calculated vibrational excitation

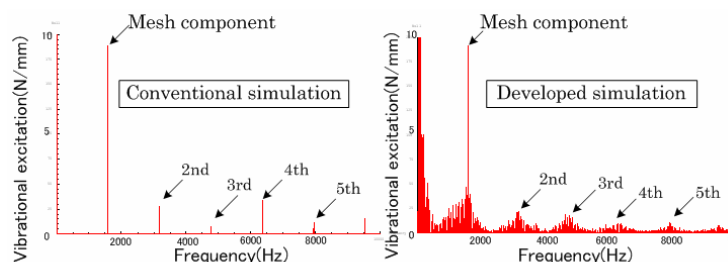


Fig.2 Comparison of calculated vibrational excitation (FFT)

との波形が変化するとともに、周波数の低いうねり成分が現れている。各波形のFFT結果を図2に示す。従来解析法ではかみあい次数成分とその高次成分のみが存在するのに対し、新解析法ではかみ合い成分以外にも多くのスペクトルを持つことがわかる。これにより騒音に影響するような微細な歯面形状を考慮した計算が可能となった。

開発した解析法を用いて、歯面誤差要因が振動性能に与える影響を調べ、ランダムに変化する歯面誤差およびピッチ誤差は低周波成分の増大につながるが、かみあい周波数成分や高次成分への影響はほとんどないことなどを明らかにした。

## 2.2 バーチャルギヤチェッカー(VGC)による歯車測定機精度検定法

自動車などに用いられる歯車は、

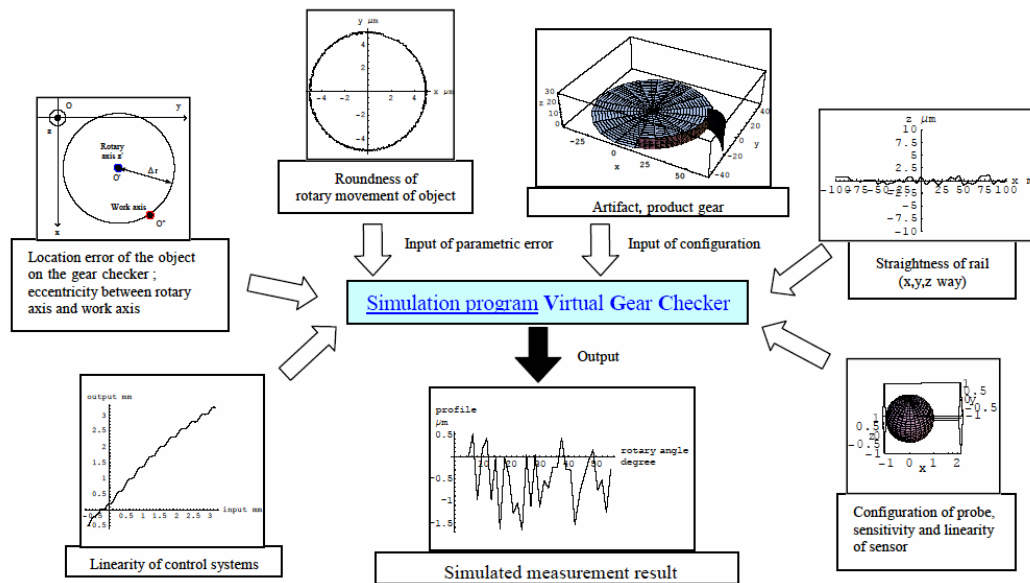


Fig.3 Concept of virtual gear checker

ミクロン単位の形状の違いがその振動・騒音性能に影響するため、高度な品質管理が必要となるが、その中心となる歯車歯面形状測定機の精度の検定・校

正方法、および、トレーサビリティ体系は現在のところ確立されていない。我々は、現実の歯車測定機に対応する仮想空間上の歯車測定機「バーチャルギヤチェッカー」を構築し、これによる、歯車測定機の不確かさの算出方法、精度の検定・校正法や、測定機の各部の誤差、外部環境などの影響の調査法を提案している。

バーチャルギヤチェッカーは、仮想空間上に現実の歯車測定機と同様の機構、運動、計測、制御系を構築し、それぞれの誤差を考慮した歯車測定機である。バーチャルギヤチェッカーの概念図を図3に示す。歯車測定機を構成する各部分の形状精度、測定対象の組み付け誤差、運動の制御等、測定結果に影響を及ぼす誤差要因を全て考慮したうえで、仮想空間上で歯車測定を行うシミュレーションプログラムである。バーチャルギヤチェッカーでは、測定機の不確かさを容易に算出することができる。実機による測定結果のみから不確かさを算出する場合、膨大な測定回数が必要となる。これに対してバーチャルギヤチェッカーによる場合、まず測定の誤差要因に、各誤差の有する特性に応じた分布を持たせて乱数的に入力することにより不確かさを与える。次に繰り返し計算を行い、計算結果に統計的処理を行って、測定機の不確かさの値を算出し、実機による測定結果を補足する。したがって実測結果のみによるよりも時間の短縮化、コスト低減等の面で簡単に不確かさを求めることが可能となる。

## 参考文献

- [1] 小森・野村・山下・久保・大水, 歯車歯面形状のばらつきが振動性能に与える影響, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集, 4, 127-128, 2005.
- [2] 小森・高橋・久保・近藤・高辻・直井・大澤, バーチャルギヤチェッカー(VGC)による歯車測定機精度検定法 (基本構想の提案とバーチャルギヤチェッカーの構築), 日本機械学会 MPT2004 シンポジウム <伝動装置>講演論文集, (2004 年 11 月), pp.55-58.