

複雑系の制御・設計論研究グループ



機械力学講座 メカトロニクス分野

准教授 横小路 泰義

[京都大学名誉教授 吉川恒夫, 山本 穰]

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連しているとともに、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、これらのトピックスの中で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

今年度も昨年度に引き続き、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に関する研究を行っている。図2に、人間の折り操作の観察に基づいて昨年度までに開発した折り紙ロボットシステムの外観を示す。

昨年度には、開発したロボットハンドによって目標として設定した折り紙作品「おたまじゃくし」を折ることに成功した[1]。今年度は、折りの成功率を向上させるために目標軌道の与え方を検討した。これまでは、あらかじめ数値的に与えた幾つかの点を直線的に補間する軌道を追従させるのでみあり、紙の挙動を外界センサで検知してオンラインで軌道を修正することは行っていない。

今年度は、まず人間がロボットハンドの先端を持って直接折り紙を折る直接教示を行うことで目標軌道を生成する手法をとった。さらに試行毎に異なる紙の挙動に対応するために直接教示を複数回行い、教示データの統計的性質に基づいてセンサフィードバック動作の生成を行う手法を検討した。作業対象としては、折りの失敗の要因の一つである谷折り動作に注目した。図3(a)に直接教示の様子を、図3(b)に動作再生の様子を示す。

図4(a)に、20回の教示データとその平均軌道を示す。図4(b)に、教示データの統計的性質に基づいて行ったセンサフィードバックの結果生成された様々な修正軌道を示す。

従来の目標軌道の与え方では、谷折を30回試行したときに13回失敗していたのが、教示データの平均軌道とすることで3回失敗する程度まで成功率を改善できた。さらにセンサフィードバックを必要な区間に導入することで30回の試行で失敗を0回とすることができた[2]。



図1: 研究テーマの関係図

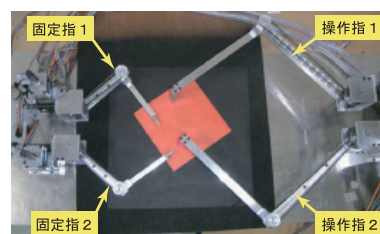
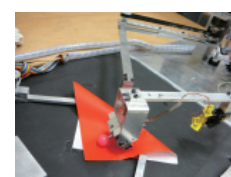


図2: 折り紙ロボットの概観

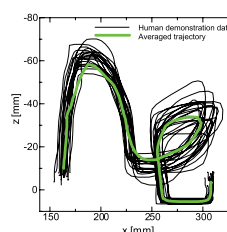


(a) 直接教示

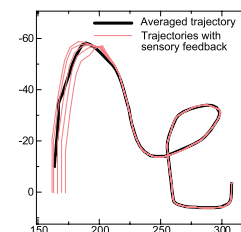


(b) 再生動作

図3: 直接教示と動作再生



(a) 教示データと平均軌道



(b) センサフィードバックによる軌道修正

図4: 教示データの統計的性質に基づくセンサフィードバック

3. テレオペレーションに関する研究

マイクロサージェリーなどの微細操作をスケールドテレオペレーションによる行うとき、適当な位置と力のスケール比が設定されるが、このスケール比を固定ではなくユーザが操作中に（ちょうどビデオカメラでの撮影時のズーム操作のように）自由に変更できるようになれば、作業の効率は大きく向上する。

しかし可変スケールとすることで、システムは一種の時変システムとなりテレオペレーションシステムとしての操作性の確保と安定性の両立が難しくなる。本研究では、制御系の設計をLMI問題に帰着させ、可変スケールに対してはゲインスケジューリングの手法を適用することでコントローラの設計を行う枠組みを提案した [3]。提案

する手法を用いて実際に実験を行った。図5に実験装置の外観を、図6に実験結果を示す。位置のスケール比5~10、力のスケール比25~100の間で自由にスケール比を変化させてもシステムが安定に動作し、またマスタとスレーブ間で位置と力がよく追従していることが分かる。



(a) マスタアーム (b) 1自由度スレーブ

図 5: 実験装置の外観

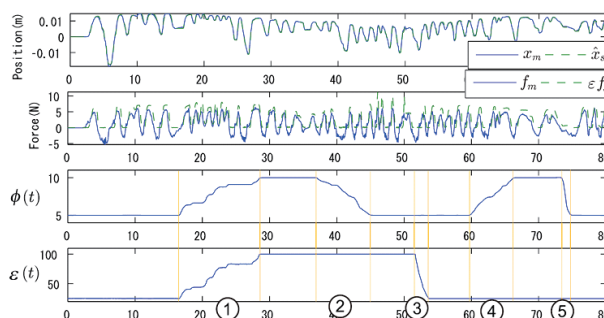


図 6: 実験結果

4. 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7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おり、数値シミュレーションによって虫様筋によって指の動きの細かな調節が可能となり、また指先力の分解能の向上にも役立っていることを示した [4]。

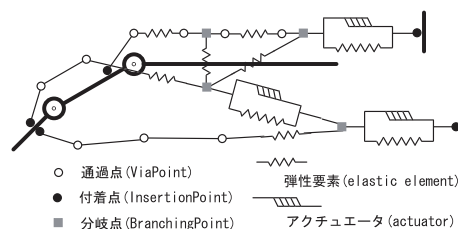


図 7: 指の筋骨格モデル

5. おわりに

ロボティクスで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、折り紙ロボットの研究を通して出来上がったロボットに対していかに望みの動作を生成させるかという観点も重要であることに気付かされた。そこにはロボットと人間との違いについての考察も必要であろう。そのためにも人間や生物の機能の本質的な理解が重要であるといえる。

参考文献

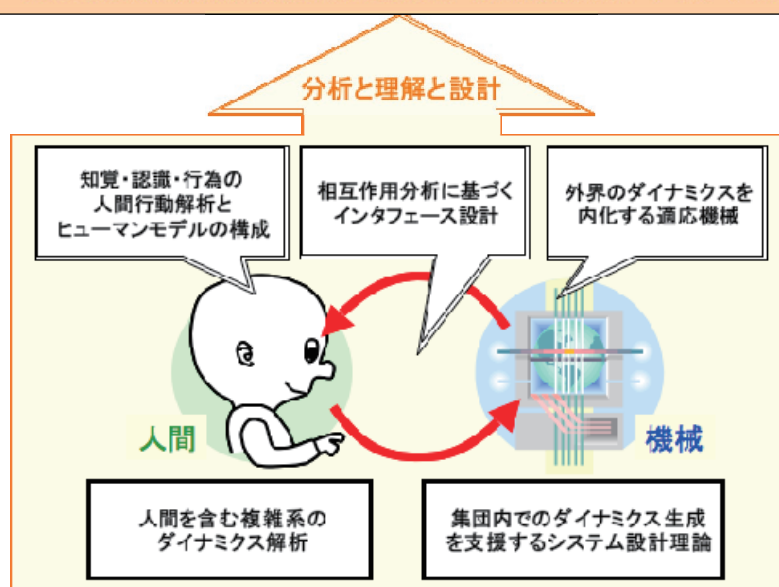
- [1] K. Tanaka, Y. Kamotani, and Y. Yokokohji, "Origami Folding by a Robotic Hand," Proc. International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2007), October 29-November 2, San Diego, CA, USA, pp.2540-2547, 2007.
- [2] 田中, 横小路, "人間の直接教示動作の統計的性質に基づいた折り紙ロボットの目標軌道とセンサフィードバック動作生成法", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.332, pp.109-114, 2007.
- [3] 菅野, Vander Poorten, 横小路, "マイクロテレオペレーションのための可変スケール型バイラテラル制御", 第 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, CD-ROM, 3F22, 2007.
- [4] T. Azuma and Y. Yokokohji, "Function Analysis of a Musculo-Skeletal Human Hand Model," Proc. The 2nd International Symposium on Mobiligence, July 18-20, Awaji, Japan, pp.251-254, 2007.

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, 助教 堀口 由貴男, COE 研究員 田 雅杰

本研究室では、21 世紀 COE プログラムのもとで、機械システムと人間が特定の作業環境のもとで安定して調和のとれた良好な関係を築いていくためのインタラクション設計の基本原理として、人間と機械の「共適応原理」の概念を提起し、この概念に沿って、人間の作業習熟や適応の過程の実験解析と数理モデルによる構成的理解に関する研究を進める一方、自動化を内包したプラント・航空機・自家用車における監視制御系、デジタル家電機器の人間中心設計、エアロロボットのような自律移動体の適応制御系や遠隔操作系、生産・物流現場での作業を支援するインタフェースやナレッジマネジメントシステムの研究を展開してきた。そしてこれらの研究の成果を、複雑環境に適応する自律行動機械の設計や、ユーザの製品利用状況を検証するためのユーザビリティ・テストやユーザビリティ設計の手法として提案し、人間とロボットやマルチエージェントシステムのような異種の行動主体・判断主体が共存する場でのインタフェース論・関係論へと展開している。研究対象は、人間個人の知覚・運動特性に関する領域から、複数の人間もしくは人間と機械人工物の間の相互作用の領域へ、そしてより多数の主体から構成される組織や共同体の次元に拡大した領域へと多岐に亘り、それぞれの領域における適応原理の究明と機械システムとしての実現に向けた研究を行っている。以下に、過去5年間に本研究室で行った主な研究活動について報告する（左図）。

『人間の知を探り、機械の知を究め、共創の知をデザインする』



1. 複雑な対象の認識に関するヒューマンモデルの構成的理解

近年、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つつあるが、一方で、こ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う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た複雑な機械の操作に関して、ユーザがこのような機器との相互作用を重ねながらどのように異なるモードを識別できるようになるかについてのモード認識機構を計算論的にモデル化する研究を遂行した。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ている。さらに、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するとともに、デザインされた多モード自動化機械が潜在的に有するユーザの誤認識リスクについて、さまざまな習熟レベルのユーザを想

定した安全設計の事前分析が可能になり、インタフェース設計を効率化できることを示した[1].

2. 外界のダイナミクスを内化する知的エージェントの構築

身体運動を伴って人間や環境と相互作用を行うロボットにとって、環境との相互作用を通して自身の内部構造を変容させていくプロセスは、人間や環境との関わり方に多様度を持たせ、さまざまな応答をつくりだしていくためにも重要な技術課題となる。人間を含む未知・不確実な環境と関わるロボット（ならびにより一般的にはエージェント）の学習では、学習は外界となる環境との相互作用の経験に基づいて、異なる応答が求められる外界の差異を識別しながら、運動生成のための内部記憶を、動的かつ適応的に組織化していく能力が必須となる。本研究では、ロボット自体の運動生成のための知覚と行為の可塑的記憶モジュールが構成される過程を双シマモデルとして提案し、これを拡張することで、関わりあう人間の意図を理解し、刺激反応的な制御器としてではなく、汎化された行為概念としてロボットが内化するための方法を提案した[2].

また、ロボットが環境適応する際には、環境の全てをセンシングすることはできず、自己の振る舞いを通じて環境を認識する必要がある。このように、自己位置など自己状態推定が環境適応性において重要となることから、極限環境を自律的に行動するロボットとして小天体探査ローバを対象に挙げ、単独母船との相対距離を測定することにより位置同定を行う手法を提案し、数値計算結果から良好な結果を得ている[3]. さらに、振る舞いを環境に応じて適切に変更するために、さまざまな状態や動作モードに応じて異なるモジュールが最適な制御則を学習し、それらモジュールを適応的に切り替え、組み合わせるモジュール型強化学習法を開発し、提案手法をエアロロボット自律飛行制御へ適用した。

このようなエージェントが相互作用する対象としては、物理的環境のみならず、他のロボット（エージェント）や人間がその対象となる場合が想定できるが、いずれも自身とは機能的にも構造的にも異なる種類の異質な主体との相互作用系となる。例えば複数のロボットによる協調作業の実行がこれに該当するが、このような場合、明示的なコミュニケーションを伴わずに、ロボット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」読み取ることができることが、協調作業の実践には不可欠となる。本研究では、このような能力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」から構成され、シミュレーション実験より、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[4].

2. 人間を含む複雑系のダイナミクス解析

機械の知能化が進み、その一般社会や日常生活への応用が拡大するなか、人間と物理的に接触する形態で実現される機械システムは今後も増え続けることが予想される。物理的な接触は人間と機械がダイナミクスを共有する場を提供する。本研究ではこの点に注目し、それぞれが固有のダイナミクスを有する人間と機械の協調作業を取りあげ、「引き込み」という非線形系に固有な特徴が、人間と機械の間においても発現する過程に着目し、人間機械系としてのダイナミクス解析に関する研究を行った。機械側のエージェントには、非線形振動子による柔軟な動作生成機構を埋め込み、この振動子のパラメータを間接的に調整することで、人間側の操作の変動に対して、自身の振る舞いを質的に変化させることができる。実験より、このモデルを組み込んだ人工エージェントは、人間との共同作業を介して、特徴的なモード遷移のパターンが内部で生成され、あらかじめ埋め込まれたものとは異なる新たな動作モードとして協調作業のなかで発現するプロセスが観察された[5].

人間と大規模複雑化する対象機械とのインタラクションは、その間に介在するインタフェースを介して行われる。従って、適正なインタラクションを保証するためのインタフェースの設計・評価が重要な課題となる。本研究室では、このような問題に対し、運転員が認識すべきプラント状態や生起する事象の数を最小限に抑え、かつ正しい認識を保証できるものに限定するための理論に関する研究を行った。従来のインタフェース設計の指針としては、静的な情報項目のデザインについては既に提案がなされて

いるものの、プラントや航空機のように、時間とともに変化する多変数の監視変数を有するプラントで、かつその変化に合わせてオペレータの側の認識が動的に変容していかねばならない動的な状況認識を支援するためのインタフェースの設計論はいまだ確立されてはいない。本研究では、オペレータにインタフェース上で提示される情報が、誤った状況認識を誘起しないか否かについて、状態遷移グラフ表現により評価するための手法を開発し、原子力プラントの次世代インタフェースの監視推論への適用を行った[6]。

3. 人間と機械システムの相互作用分析に基づくインタフェース設計

十分な経験を蓄積していないユーザに対してでも、熟練者並みの作業パフォーマンスを可能にするためのインタフェース設計が望まれている。熟練者が表示されるデータの「背後」に認識している内容を、インタフェース上に可視的に表示することで、十分な経験を蓄積していないユーザに対してでも、作業領域のタスクの意味を的確に把握させることができる。本研究室では、このような要請に基づき、介護者の身体的負荷の軽減を指向する「パワーアシスト装具」や、多機能化が益々進む家電機器、そして生産現場において導入が進められている自動計量装置、等を対象として、実際に人間がこれらの機器とどのように関わっているかの実験による心的負荷（メンタルワークロード）解析に基づいたインタフェース設計に関する研究を行ってきた。ここでのインタフェース設計の理論となるのがエコロジカル・インタフェース・デザイン（Ecological Interface Design: EID）の概念である。EIDで想定するのは、人は作業環境と相互に関わることを介して新たな秩序を作り出し、一つのシステムを形成しながら自らの存在をそのなかにうまく位置づけることで、作業対象との一体化感を享受できるためのインタフェース設計の考え方である。このためには、制御対象が有する多自由度をそのまま操作インタフェースに伝達するのは得策ではなく、いかにして次元の漸次低減化を達成するかが鍵となる。本研究室ではこの要請に対して以下の3点に集約したインタフェース設計論を展開している。まず手段- 目的次元に沿った機能的階層として対象をまとめ上げること、第二は（ユーザに頭で考えることを強いることなく）直接知覚を可能にするように、作業対象世界で成り立つ種々の関係性を、インタフェース上に提示される表象物（視覚や聴覚のモダリティ）の特徴群に同型的に変換すること、そしてその上で知覚- 行為の循環的な相互作用系を維持させること、の3点である。この考え方に立ち、生産ラインの計量装置のための視覚インタフェースや、パワーアシスト装具・監視制御系を対象とした「ソニフィケーション」（sonification）の概念に基づく聴覚インタフェースの研究を展開している[7, 8]。さらに、人間へ提示される情報デザインのみならず、人間の情報収集を動物の採餌行動に見立ててモデル化する情報採餌理論を用いて、ユーザによるデジタル家電機器使用時のメニュー選択行動をモデル化し、インタフェース設計への有効性を検証している[9]。

4. 集団内でのダイナミクス生成を支援するシステム設計

さまざまな機器がネットワークを介して繋がれるようになると、人間と機械の1対1の関係から、より多数の人間や主体によって構成されるシステム（マルチエージェントシステム）も設計対象として重要性を増してきている。このような多主体から構成される系に固有な特徴は、個体の間の相互作用のなかから全体的秩序が形成されていくというダイナミックな側面を有する点である。このような系の設計に際しては、各個体のレベルには多様化を生んでいく機構を内在させ、集団のレベルではより安定な、より決定論的な性格が強くなるように集団を管理していく機構をつくり込む必要がある。本研究室では、このような観点から、物流システムを対象として、マルチエージェント系最適化アルゴリズムに関する研究を行っている。物流システムの最適化は、多目的性と多数の制約条件の存在と変動する環境のために、実用的な時間内での解決が困難な大規模複雑問題である。従来の最適化手法は、そのほとんどが制約条件を固定したもとで目的評価関数に対する最適性のみを追求するものであり、また制約条件の数も少なく、現場の要求に十分応えられるものではなかった。本研究ではSCM（サプライチェーンマネジメント）の「制約条件の理論」に倣い、各個体（エージェント）が相反する多重基準を追及しようとするがためにもたらされる矛盾に直面する中で、他者の個体との間の競争と譲歩を繰り返していく中で、

多様性の生成とその選択が繰り返され、結果として全体最適に準じる満足解を導出することのできるアルゴリズムを開発し、コンテナ積載問題の解法に適用している[10].

この他、複数の人間から構成される集団としては、個人に宿る知識が、組織の知として熟成され蓄積されていくプロセスの解明がナレッジマネジメントの分野で求められている。過去のヒヤリハット事例や失敗事例を集めた失敗事例集が数多く作成されてきたが、事例集へのアクセシビリティの悪さや日常業務との乖離等の問題から、必ずしも有効に機能しているとは言えない。本研究室では、まず失敗事例から知識を有効に取得して活用することを目的として、失敗事例の報告文書に対してテキストマイニング処理を行うことで、過去の過誤やヒヤリハットの事例間に潜在する過誤の共通構造の抽出と分析を行っている[11]。これにより知識コミュニティでのノウハウ流通支援や組織活動における作業変容プロセスの分析[12]、さらには暗黙知を抽出する対話型機械学習システムに関する研究[13]へと展開している。いずれも、人間が組織の中で環境・他者とさまざまな相互作用を通じて発展的にその認知構造を変化させ、自己の位置づけを変容させていくことを支援するシステムの構築であり、集団としての運動法則や組織のダイナミクスと整合のとれたIT技術の活用方策について検討を行ってきている。

参考文献

- [1] Tadahiro Taniguchi, Yusaku Tanaka, Yukio Horiguchi and Tetsuo Sawaragi: Dynamic Process of a User's Development of Multiple Internal Models of Automation Behavior Including Mode Transitions, *Proc. of the 2nd International Symposium on Mobiligence*, pp.211-214, 2007.
- [2] Tadahiro Taniguchi and Tetsuo Sawaragi: Incremental acquisition of behaviors and signs based on a reinforcement learning schemata model and a spike timing-dependent plasticity network, *Advanced Robotics*, **21**(10), 1177-1199, 2007.
- [3] S. Kanata, H. Nakanishi, T. Sawaragi, T. Yoshimitsu, and I. Nakatani: Radio Wave Based Localization of a Rover for a Small Planetary Body, *Proceedings of 27th IASTED International Conference on Modeling, Identification, and Control*, Paper ID 596-036, 2008.
- [4] Tadahiro Taniguchi, Kenji Ogawa, and Tetsuo Sawaragi: Implicit estimation of other's intention without direct observation of actions in a collaborative task: Situation-Sensitive Reinforcement Learning, *SICE Annual Conference 2007*, CD-ROM, 2007.
- [5] 荒津亘, 榎木哲夫, 堀口由貴男, 谷口正大: 非線形ダイナミクスを用いたハイブリッドシステムによる人間・機械協調系設計, 第33回知能システムシンポジウム資料, pp.81-86, 2006.
- [6] Tetsuo Sawaragi and Yukio Horiguchi: Correct and Succinct Interface Design for Monitoring Automated Process Plant, *Proc. of Cognitive Systems Engineering in Process Control (CSEPC) 2004*, pp.68-73, 2004.
- [7] 堀口由貴男, ほか: 自動化の調整作業を支援するユーザ・インタフェースの開発: 自動計量を対象とした機能間の意味構造の抽出と可視化, ヒューマンインタフェース学会誌 (投稿中).
- [8] Yukio Horiguchi, Satoshi Tsukamoto, Hiroyuki Ono, Tetsuo Sawaragi and Masahiro Sato: Effects of Robotic Arm Orthosis Behaviors to User's Motion Structure, *Proc. of the 9th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-9)*, pp.883-890, 2006.
- [9] 堀口由貴男, 黒田祐至, 榎木哲夫, 中西弘明, 井上剛, 松浦聡: 情報香分析に基づく情報家電の機能探索用インタフェースの設計, ヒューマンインタフェース学会誌 (投稿中).
- [10] Yuan Liu, Yajie Tian and Tetsuo Sawaragi: A TOC-based heuristic algorithm for solving a two-row pattern container loading problem, *International Journal of Services Operations and Informatics*, **2**(4), pp.339-356, 2007.
- [11] Tetsuo Sawaragi, Yukio Horiguchi, Satoshi Tsukamoto, Koichi Ito: Approaches to identifying latent similarities among organizational accidents: Text-mining method and semiotic process analysis of human work procedures, *21st Workshop on Methodologies and Tools for Complex System Modeling and Integrated Policy Assessment*, pp. 39-40, 2007.
- [12] 榎木哲夫, 塚本智司, 堀口由貴男, 中西弘明: 組織活動における作業変容の記号論的プロセス分析, 横幹, **1**(2), pp.106-114, 2007.
- [13] Tetsuo Sawaragi, Yuan Liu and Yajie Tian: Human-Machine Collaborative Knowledge Creation: Capturing Tacit Knowledge by Observing Expert's Demonstration of Load Allocation, *International Journal of Knowledge and Systems Sciences*, **3**(2), pp.9-19. 2006.

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, 准教授 西脇 眞二, 助教 泉井 一浩

1. 緒言

最適システム設計工学研究室では、機械をシステム的に取り扱い、多目的の評価特性を同時に考慮し、調和の取れた最適な設計解を導出する手法について研究を行っている。その主な研究成果として、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、の2つのテーマをとりあげ、その内容を述べる。

2. 省エネ機能を有する製品のライフサイクルコストのトレードオフ分析

2.1 はじめに 一般に製品の省エネ化や長寿命化を進めようとする、通常製造コストの上昇が伴うことになるため、メーカーは顧客のニーズや需要動向を配慮しながら製品の販売戦略を決め、製品の価格即ち製造コストを設定しなければならない。このような意思決定問題を支援するためには、製品のライフサイクルに関わるコストを適切に評価することのできる定量的な解析方法の開発が必要である^[1,2]。そこで製造、使用、メンテナンスの段階でのコストに注目して数理モデルを構築することにより、製品のライフサイクルにおけるトータルコストを低減するための定量的な意思決定ができるような最適化手法を提案した。

2.2 モデルの設定 ここでは省エネ機能を有する製品を例にとりて考え、以下のような仮定をおく。

(1) 先ず製品をエネルギーの消費に関係しない部分と関係する部分に分け、これらをそれぞれ基本性能部および省エネ機能部と称する。さらに基本性能部は、故障をしない部分と故障をする部分に分けられるとして、これらの部分をそれぞれ、故障をしない部分 P1、故障をする部分 P2 と称する。省エネ機能部は P3 と称し、故障を起こす部分であると考え、これらの部分の部品点数を、それぞれ n_1, n_2, n_3 とすると、この製品の全部品点数 N は、 $N = n_1 + n_2 + n_3$ と表される。

(2) 次に部品の価格について、P1, P2, P3 各部の部品の平均価格をそれぞれ p_1, p_2, p_3 とし、部品価格はその耐久性(耐用寿命 l で表す) に比例して変化すると考える。今耐用寿命の基準値を l_0 として、P2, P3 部の耐用寿命をそれぞれ l_2, l_3 とすると、それらの部品の平均価格は次のように表すことができる。

$$p_2 = \{1 + k(l_2 - l_0)/l_0\} * p_{20} \quad (1)$$

$$p_3 = \{1 + k(l_3 - l_0)/l_0\} * p_{30} \quad (2)$$

本モデルでは、簡単のために P2, P3 部の耐用寿命の基準値は同じ l_0 とした。ここで k は比例定数、また p_{20}, p_{30} は l_2, l_3 が基準値 l_0 となる場合の平均価格である。

(3) 製品は部品の組立てで成り立っており、製品の組立作業費は組立作業単価に部品点数を掛けたものとする。組立作業単価を全ての部品に対し a (円/個) とすると、製品の組立作業費は、 $a \times N$ となる。

(4) 単位時間当たりの使用エネルギー e [W] は、 e は省エネ機能部の部品点数 n_3 に強く関係しているため、次のように表す。 e_0 は、使用エネルギー率 e のベースとなる定数である。

$$e = e_0 \times \{1 - n_3 / (n_1 + n_2)\} \quad (3)$$

(5) またこの製品の故障形態が指数分布に従うとする。P2 および P3 部の故障率 λ_2, λ_3 は $\lambda_2 = 1/l_2$, $\lambda_3 = 1/l_3 * n_3/50$ となる。製品の故障率 λ は、P2 および P3 の部分が直列に配置されている場合には、 $\lambda = \lambda_2 + \lambda_3$ であるため、製品の耐用寿命 L は、 $L = 1/\lambda$ となる。

(6) メンテナンス費の算出については、P2 および P3 部の故障発生時の修理作業費は、簡単のためにその内容によらず一定 r (円/回) とする。

以上の前提に基づき、製造コスト、使用エネルギーコスト、メンテナンスコストを計算する。設計変数として各部の耐用寿命 l_2, l_3 と使用エネルギー率 e を考えた場合、製造コスト C_p とメンテナンスコスト C_m および製造コスト C_p と使用エネルギーコスト C_u はトレードオフの関係にある。それらの様子を表1に示す。この表より判るように、 e に関しては、使用エネルギーコスト C_u は、製造コスト C_p と同様にメンテナンスコスト

C_m ともトレードオフの関係になっている。これは式(3)に示すように、このモデルが省エネ度を高めるためには部品点数 n_3 を増加することにしており、そのために e の値が減少することと、省エネ機能部の故障率が高くなりメンテナンスコストが増加することによるものである。また、図1に本問題のパレート最適解を示す。横軸に使用コストとメンテナンスコストの和 (C_s) を、縦軸に製造コスト (C_p) をおいた。このパレート解より、 C_s に対する C_p の感度、また部品価格に関する係数や修理単価をどのように選べば、満足する C_s や C_p が得られるかを判断することができる。

Table 1. Relation between objective costs and design variables

Design Variables	C_p	C_u	C_m
l_2 increase	increase	—	decrease
h_3 increase	increase	—	decrease
e decrease	increase	decrease	increase

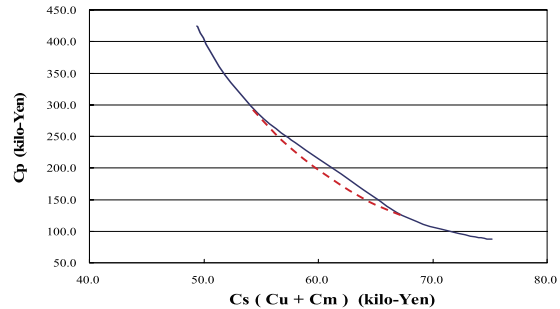


Fig. 1 Concave shape of Pareto optimal solution set

3. 工作機械のライフサイクル設計

次に、ライフサイクル設計の工作機械への応用例を示す。工作機械は他の機械製品に比べ非常に長い間使われ続けるため使用の段階の影響が大きい。その点を踏まえ、本研究では従来の設計において考慮された製造の段階の材料費、加工費に対して、使用の段階の電力費を加えたものをライフサイクルコストとしてモデル化して評価した。設計変数としては、5つの部材の中実正方形断面の一边の寸法と部材間及びモータの接合部6箇所の最大表面粗さを設定した。

図2にライフサイクルコストと静剛性の関係を示す。また、ライフサイクルコストを考慮して製品設計した場合(Proposed Method)と、考慮せずに設計した場合(Conventional Method)を比較している。おなじ静剛性をもつ解でも、ライフサイクルコストを考慮して設計することで、大幅にコストを削減することができることを示した。

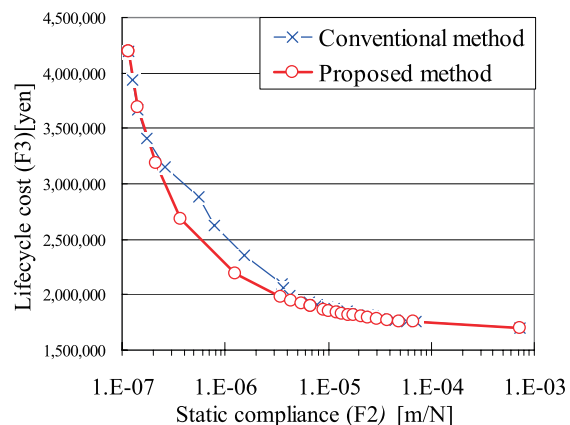


図2 環境への負荷と静剛性の関係

4. おわりに

最適設計の目的関数として、製品性能のみではなく製品ライフサイクルコストを考慮した設計法を提案した。設計者は、この方法によって導かれるパレート最適解を見ることで、諸特性やコスト間を定量的に分析することができる。また評価項目の所望の制約条件を与えることで、最適な設計解を求めることができる。

参考文献

- [1] インバース・マニユファクチャリングフォーラム監修, 木村文彦ほか編, インバース・マニユファクチャリング ハンドブック, 丸善, (2004)
- [2] 吉村允孝, モノづくりにおけるシステム設計最適化, 養賢堂, pp.16, (2007)

機械力学講座 振動工学分野

教授 松久 寛, 准教授 宇津野 秀夫, 助教 山田 啓介

[LG電子 朴 正圭]

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る。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る。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する。このような現象を機械力学と複雑系の視点から研究した。

加振振動数と足踏みリズムの関係を図2に示す。横軸が加振振動数、縦軸が足踏み振動数を示す。図中に示す直線の傾きは、大きいものから順に、1, 1/2であり、その切片は0である。図2より、加振振動数が固有歩調の n 倍近傍 (n は自然数) の値をとる際、歩調は加振振動数の $1/n$ 倍の値に同調し、それ以外の加振振動数域では歩調は固有のリズムを保つことが確認できる。よって、歩行面の振動数が固有歩調の n 倍近傍の値を取るときに引き込み現象を起こすことがわかる。以降この現象を n 次引き込み現象と呼ぶ。

本稿では歩行面の前額面内振動が歩行に与える影響について考察するため、前額面内の歩行運動を模擬する図3に示す力学モデルを用いる。錘の質量、脚部長さをそれぞれ m , l とし、脚部は質量を持たないものとする。このモデルの運動は、図3 (a) のように右足を支点とする倒立振子としての挙動と、図3 (c) のように左足を支点とする倒立振子としての挙動に分けられる。右足中心の回転運動を行う場合、回転運動を θ_r で表現する。また強制加振を加える台の変位を x_0 と表す。右足支持時、系の運動方程式は、次式で表される。

$$ml^2\ddot{\theta}_r - mgl \sin \theta_r + c\dot{\theta}_r + ml \cos \ddot{x}_0 = 0 \quad (1)$$

このモデルを用いて、歩行面の振幅 X_0 を 20mm とし加振振動数を 0Hz から 3.5Hz まで 0.5Hz ずつ変化させ、加振振動数と歩行リズムの関係を計算し、図4に示す。横軸は歩行面の加振振動数を、縦軸は歩行リズムを示す。図中直線の傾きは、傾きの大きいものから順に、1, 1/2 である。これより、 n 次引き込み現象を再現することが確認された。以上より、本稿で提案した歩行モデルが人間の歩行に生じる引き込み現象をよく再現し、妥当な歩行モデルであることが検証された。

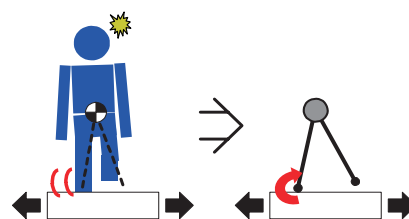


図1 横揺れする歩行機上の歩行実験

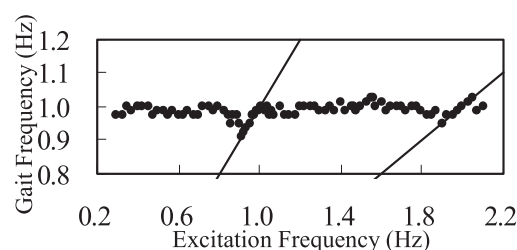


図2 加振台上での足踏みの振動数と加振振動数の関係

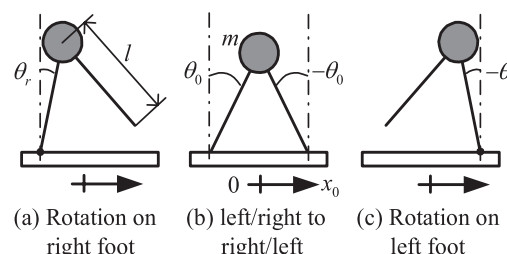


図3 受動歩行モデル

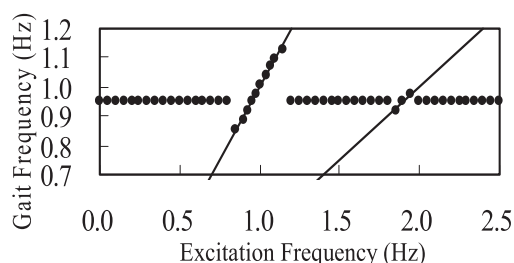
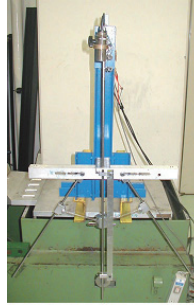
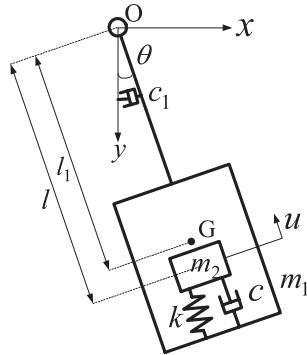


図4 受動歩行モデルの計算結果

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、乗客の乗り心地の視点からも、重要な問題で、揺れの低減が強く求められる。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る。



(a) 解析モデル (b) 実験装置
図5 コリオリ力を利用した新型動吸振器

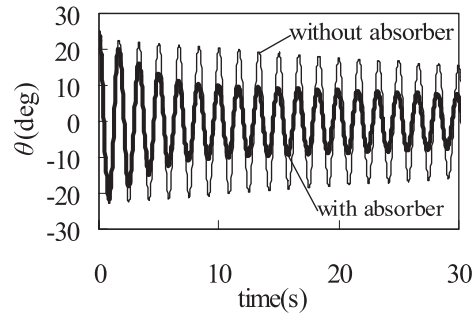


図6 新型動吸振器の制振効果

図5(a)に示すように、ゴンドラを一自由度の振り子とする。質量を m_1 、支点Oから重心Gまでの距離を l_1 、角変位を θ とする。この系には角速度に比例する減衰が働くとし、その減衰係数を c_1 とする。コリオリ型動吸振器は静止時の質量中心が支点Oから距離 l の位置になるように取り付けられ、半径方向に直線運動するとし、その変位を u とする。また、質量を m_2 、バネ定数を k 、減衰係数を c と定義する。主系に働く加振力を $Pe^{j\omega t}$ としたとき、ラグランジュの運動方程式を解くことにより、次の二式が得られる。

$$m_1 l_1^2 \ddot{\theta} + m_2 (l-u)^2 \ddot{\theta} + c_1 \dot{\theta} - 2m_2 (l-u) \dot{u} \dot{\theta} + \{m_1 g l_1 + m_2 g (l-u)\} \sin \theta = P l_1 e^{j\omega t} \quad (2)$$

$$m_2 \ddot{u} + c \dot{u} + ku + m_2 (l-u) \dot{\theta}^2 - m_2 g (1 - \cos \theta) = 0 \quad (3)$$

式(2)の第4項のコリオリ力 $2m_2 \dot{u} \dot{\theta}$ が円周方向の制振力として働いている。式(3)の第4項の遠心力 $m_2 (l-u) \dot{\theta}^2$ は動吸振器を半径方向に加振する力として働く。式(3)の第5項 $m_2 g (1 - \cos \theta)$ は動吸振器に加わる重力の半径方向成分である。図6にコリオリ形動吸振器の有無のゴンドラの揺れを示すが、制振効果が増していることが分る。

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ある。

本研究室では機能性材料として圧電素子を用い、安定性に優れる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る。

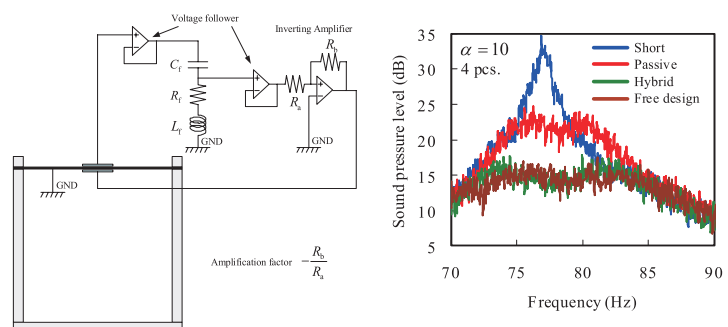


図7 ハイブリッド制振

航空宇宙システム工学講座 制御工学分野

教授 市川 朗, 准教授 幸田 武久, 助教 青井 伸也

[京都大学講師 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、動物の優れた運動生成メカニズムを利用した未知環境での高い踏破性を実現する惑星探査ローバーの開発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

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となっている。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Hill-Clohessy-Whitshire (HCW) 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、その系をエネルギー零収束原点可制御(null controllable with vanishing energy, 以下NCVEと記す)という[1]。本研究では、始めに3軸スラストにより制御される宇宙機に関するHCW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],[4]。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軸スラスト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]。

HCW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。

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、外乱を防御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基づく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して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。

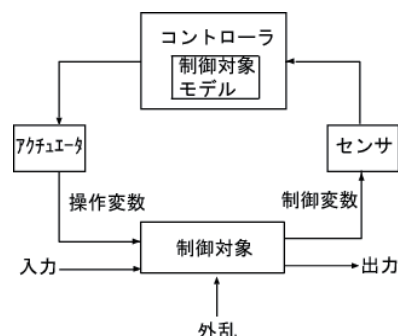


図1 一般的なシステム制御機能

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, Vol. 30, No. 4, July-August (2007), 934-945.
- [3] A. Ichikawa, Null controllability with vanishing energy for discrete-time systems in Hilbert space, SIAM Journal on Control and Optimization, (2007), Vol. 46, No. 1 (2007), 683-693.
- [4] A. Ichikawa, Null controllability with vanishing energy for discrete-time systems, Systems & Control Letters, Vol. 57 (2008), 74-78.
- [5] A. Ichikawa and H. Katayama, Output regulation of time-varying systems, Systems & Control Letters, Vol. 55, No. 12 (2006), 999-1005.
- [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).

航空宇宙力学講座

助教 杉本 靖博

COE 研究員・京都大学名誉教授 土屋 和雄, 梅田 吉邦, 大阪工業大学准教授 辻田 勝吉,
京都大学助教 青井 伸也, 東京工業大学准教授 早川 朋久

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

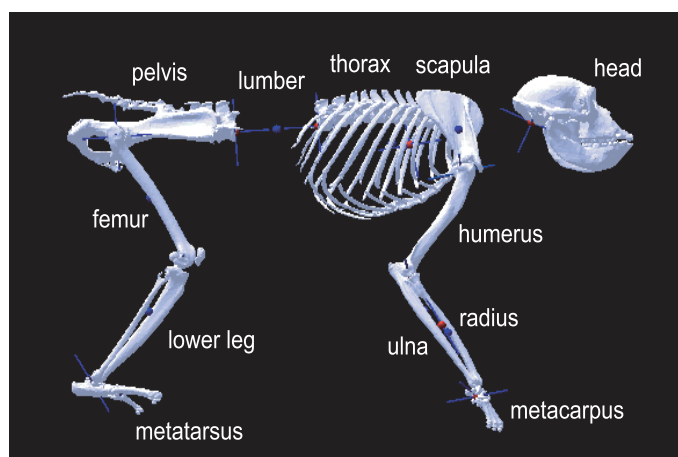


図 1: Kinematic description of the whole body skeleton of a Japanese monkey as a chain of links.

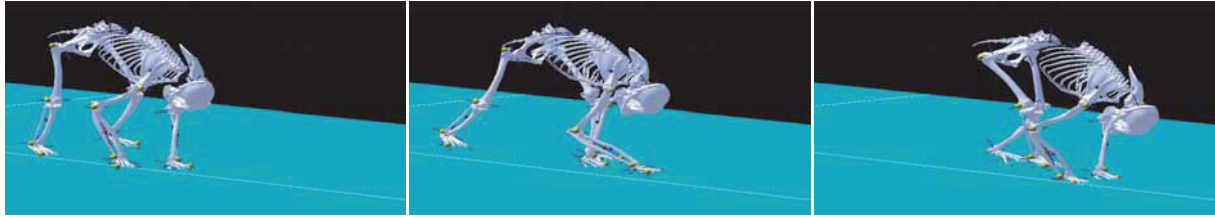


図 2: Simulation result of locomotion in the Japanese monkey.

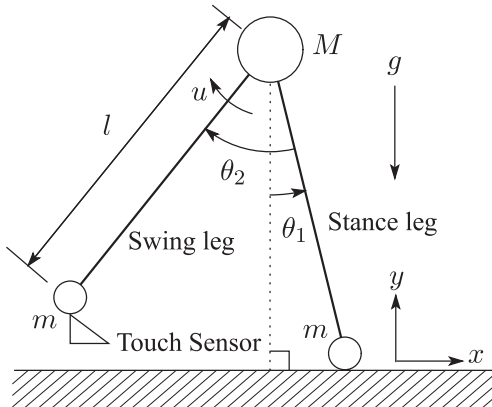


図 3: Simple walking model



図 4: Biped robot



図 5: Stable walk on flat and slope

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。

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. Ogiwara, M. Nakatsukasa, Y. Sugimoto, S. Aoi, and K. Tsuchiya, *Adaptive locomotion mechanisms inherent in the musculoskeletal structure*, Proc. SICE-ICASE Int. Conf., 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, COE 研究員 山本 浩司

Abstract: It is difficult to design an artificial function for use in the body. Artificially designed functions often ruin the surrounding biological functions or disappear in the body. Our theme is "Bio-Environment Designing" which advocates that the object of designing should not be the biological functions themselves but their environments, and that the functions are nurtured in the designed environment. The objective of this paper is to clarify the effect of mechanical environment on the cartilage regeneration.

Key words: Bio-Environment Designing, Cartilage Regeneration,

1. はじめに

医工学技術の実用化には、材料設計学、バイオメカニクス、臨床医学など様々な研究分野の有機的な融合が必要不可欠である。研究室では、再生軟骨胆体、人工膝関節用ポリエチレン材料、SERS (Surface Enhanced Raman Scattering) 基板を用いた吸着状態測定法、その他、様々な疾患治療用生体材料や新技術の開発研究を Problem Oriented な立場から行ってきた。特に再生医工学分野においては「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きた。

2. 活動報告

2.1 フィブロインスポンジ内における軟骨組織形成とその摩擦機能評価

4週齢、体重0.5kgの日本白色家兎の上腕骨、大腿骨、脛骨から関節軟骨片を採取したのち、酵素処理にて軟骨細胞を単離した。単離した軟骨細胞を直径6mm、厚さ1mmのフィブロインスポンジ内に、細胞の密度が 5×10^7 個/mlとなるように播種し、培養を行った。フィブロインスポンジ内では培養後3日目から細胞外基質の産生が認められ、培養日数に伴いフィブロインスポンジの表層及びpore内に細胞外基質に取り囲まれた細胞の増殖が見られた。

図1はフィブロインスポンジ、及びコラーゲンゲル内での軟骨細胞の密度変化を示している、また図2はフィブロインスポンジ、及びコラーゲンゲルに包埋された軟骨細胞のコンドロイチン硫酸産生量を示している。一般に軟骨細胞は材料表面に接着するとよく増殖するが、脱分化によって基質産生量は減少する。しかし、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。

フィブロインスポンジ内では少数の軟骨細胞から異染色性の高い良好な軟骨組織を得ることができることから、採取細胞数に制限のある自家軟骨細胞を用いて広範囲の軟骨修復を行う場合に用いることができる。軟骨細胞がその形質を維持したまま増殖するメカニズムは未だ明ら

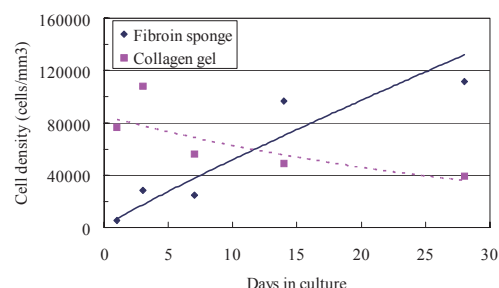


図1 フィブロインスポンジ、及びコラーゲンゲル内での軟骨細胞密度変化

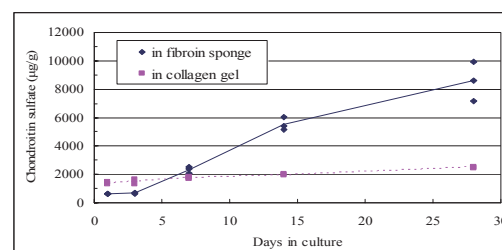


図2 フィブロインスポンジ及びコラーゲンゲルに包埋された軟骨細胞のコンドロイチン硫酸産生

かとなっていない。しかし、フィブロインスポンジ表面と軟骨細胞との接触状態がこれに関わっているものと想像される。

軟骨細胞とフィブロインとの接着力の変化を、図3に示す装置にて測定した結果を図4に示す。図4に示すごとく、軟骨細胞のフィブロイン表面への単位面積あたりの接着力は、播種後6時間後にピークとなり、その後接着力は減少する。これには、フィブロイン表面への蛋白吸着（または軟骨細胞の蛋白産生）が影響しているものと思われる。

また、再生軟骨の評価方法としては様々な方法が提唱されている。臨床現場では非侵襲非接触の評価（ex. 超音波検査（池内研），体積弾性率測定（堤研））が望ましい。しかし今回は、環境設計による軟骨の機能制御を行う立場から、摩擦機能測定に関してご紹介する。

軟骨の摩擦機構として水和潤滑機構が提唱されている。これは、池内の定義（Bioengineering News No. 35 Autumn, September 2006）によると「物体表面に固定された親水性高分子による高含水表面層の水潤滑」と表現される。水和潤滑では流体潤滑のように荷重を主に液体圧で保持していると考えられるが、その水は高分子に強く引きつけられており、また、ブラシ状に密集した親水性高分子間の立体的な構造もこの摩擦に大きく影響している。水和潤滑の定量的な定義域は未だ定められていないが、我々は液体圧によって荷重が支持されていることを重視して、マクロで固体接触が認められる状態でありながらニュートンの粘性摩擦式で表現し得る摩擦状態を示す場合を水和潤滑状態と見なしている（境界潤滑とも一部概念が重なる）。ただし、流体摩擦と異なり、流体膜形状よりも高分子の水和状態と3次元構造が

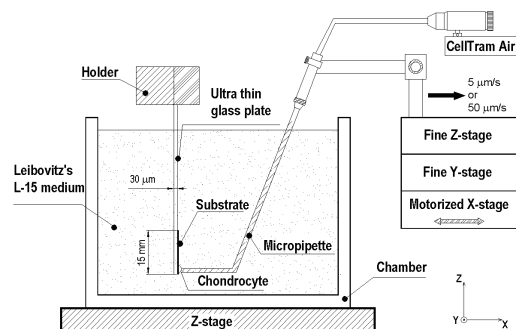


図3 細胞接着力測定装置. フィブロインをコーティングした厚さ 0.003 mm のガラス薄片上で軟骨細胞を培養し、吸引管で牽引することによりその接着力を測定する。牽引力はガラス薄片の変位より換算する。(1)

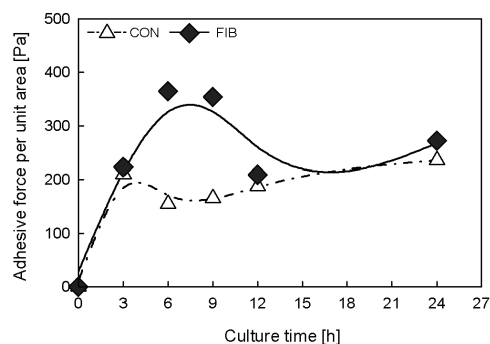


図4 軟骨細胞の単位面積あたりの接着力。ガラス面上への接着では接着力が時間とともに上昇するのに対して、フィブロイン上では播種後6時間後に接着力が減少する。(Smoothing spline regressions were applied for the curve fitting)(1)

$$\mu = \left(\frac{\eta U A}{P h_0} \right) \kappa + \alpha$$

μ ：摩擦係数， η ：流体の粘性係数， U ：摩擦速度， A ：摩擦面積
 P ：垂直荷重， h_0 ：流体膜の平均厚さ， α ：変形抵抗による摩擦 係数増分
 κ ：水和状態で定まる無次元常数

大きく関わるため、次式のように表現する。

この式において α の変形抵抗は比較的大きく、また再生軟骨の表面は不定形状である場合が多いため、表面の変形抵抗が大きな誤差となってしまう、再生軟骨の摩擦係数計測には軟骨対軟骨での測定が望ましいが、ここでは α 値を一定とするために平滑なステンレススチール面を相手面として、摩擦速度との摩擦係数とが正の相関を示す比較的低荷重下での摩擦力測定を行い、その評価とした。

試験機の外観を図5に示す。平行平板ばねを用い、下側の板ばねの反力を利用して荷重を負荷した。ステンレス板を取り付けた水槽を直動モーターにより往復運動させ、摩擦を行った。その際、上下の板ばねのたわみ量をひずみゲージによって検出し、動ひずみ測定器を介してデータレコーダによって記録

を行った。

2.2 滑り環境培養による軟骨の再生とその摩擦特性評価

組織量の増加および耐摩擦特性の改善を目指して、相対すべり刺激が加わる環境下での培養を試みた。関節軟骨細胞を単離し、 $3.75 \times 10^5 \text{ cells}/200 \mu\text{l}$ の濃度でフィブロイン・スポンジに播種した。滑り運動負荷培養では、magnetic stirring chamber を作製し、平均滑り速度 7.85 mm/sec 、荷重 $2.5 \pi \text{ N/m}^2$ の条件下で培養を行った。Magnetic stirring chamber 内で三週間培養し続けた結果、コントロール(対照群)と比較して21日目ではDNA量は38.9%、グリコサミノグリカン(GAG)量は54.3%の有意な増加が見られた ($P < 0.001$)。さらに、proteoglycan およびタイプ II コラーゲンの組織検査により、軟骨組織の成熟が促進したことが明らかになった。

さらに、臨床応用の可能性を検討するために日本白色家兎 (12 週齢, 雄, $2.4 \sim 2.6 \text{ kg}$) の膝関節大腿骨グルーブ部に直径 5 mm の骨・軟骨全欠損を作製し、同部への同種移植を行った。軟骨組織修復の定量評価には関節軟骨用の Histological grading scale の指標を用いた。その結果、Magnetic stirring chamber を用いて作製した再生軟骨移植では、Magnetic stirring chamber を用いない場合に比べて有意に良好な組織像を示した。これらの結果は、摩擦に起因する表面構造の構築が行われたことを示唆しており、相対すべり運動に含まれる力学要素が表面構造に関する特異的な遺伝子、タンパク質、あるいはそれらの相互作用を引き出した可能性が示された。また、培養中に加えられた力学刺激が生体内における組織形成にまで影響を与えていることが確認された。

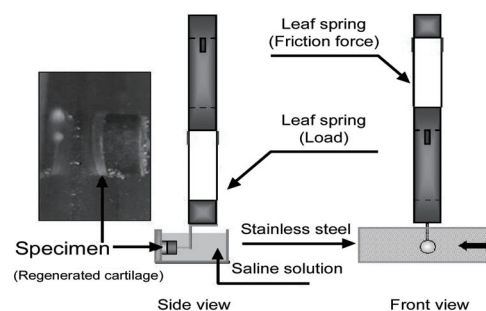


図5 再生軟骨摩擦測定装置(1,8,9)1)

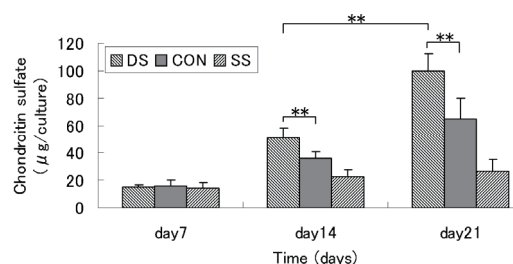


図6 再生軟骨中の Chondroitin Sulfate 濃度. 相対滑り環境下 stirring chamber group (DS)では、control group (CON)や、static in stirring chamber group (SS) に比べて有意に高い値を示した。(Values represent mean $\pm$ SD, $n=6$ each group, one-way ANOVA with post-hoc Mann-Whitney U-test on ranks; $**p < 0.01$). (3)

3. 参考文献

論文など

1. Yamamoto K, Tomita N, Fukuda Y, Suzuki S, Igarashi N, Suguro T, Tamada Y, Time-dependent changes in adhesive force between chondrocytes and silk fibroin substrat, Biomaterials, accepted.
2. Yamamoto, K., Tomita, N., Shangkai, C., Takahashi, Y., and Tamada, Y., Centrifugation increases cartilaginous matrix synthesis but deteriorates tribological performances of regenerated cartilage, Tissue Engineering (submitted).
3. Chueh S, Tomita N, Yamamoto K, Harada Y, Nakajima M, Terao T, Tamada Y, Transplantation of Allogenic Chondrocytes Cultured in Fibroin Sponge and Stirring Chamber to Promote Cartilage Regeneration, Tissue Engineering, 13 (2007), in press.
4. Okano H, Onmori R, Tomita N, 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.
5. 可知直芳, 富田直秀, 細胞凝集体の作成とその機能評価, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 27 (2006), 83-88.
6. 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.
7. 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.
 8. 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.
 9. (Yamamoto K., Takahashi Y., Tamada Y. and Tomita N., Proceeding “The 3rd Asia International Conference on Tribology 2006, Kanazawa, JAPAN”)
 10. Hattori K., Yoshikawa T., Takakura Y., Aoki H., Sonobe M. and Tomita N., Bio-Artificial Periosteum for Severe Open Fracture-An Experimental Study of Osteogenic Cell / Collagen Sponge Composite as a Bio-Artificial Periosteum, Bio-Medical Materials and Engineering, 15(3) (2005), 127-136.
 11. Sonobe M., Hattori K., Tomita N., Yoshikawa T., Aoki H., Takakura Y. and Suguro T., Stimulatory Effects of Stations on Bone Marrow-Derived Mesenchymal Stem Cells. Study of a New Therapeutic Agent for Fracture, Bio-Medical Materials and Engineering, 15(4) (2005), 261-267.
 12. Tomihata K., Suzuki M. and Tomita N., Handling Characteristics of Poly (L-lactide-co-ε-caprolactone) Monofilament Suture, Bio-Medical Materials and Engineering, 15 (2005), 381-391.
 13. Harada Y., Tomita N., Nakajima M., Ikeuchi K. and Wakitani S., Effect of Low Loading and Joint Immobilization For Spontaneous Repair of Osteochondral Defect in the Knees of Weightless (tail suspension) Rats, J. Orthop. Sci., 10 (2005), 508-514.
 14. 関 上凱, 原田恭治, 富田直秀, Effect of sliding mechanical force on regenerated cartilage tissue construct in vitro, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 26 (2005), 297-303.
 15. 山本浩司, 門林義幸, 中嶋正明, 富田直秀, 生体環境設計のための状態遷移モデルの作製, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 26 (2005), 291-296.
 16. 寺村聡, 富田直秀, 原田恭治, 関 上凱, 前北涉, 安達泰治, 鈴木基史, ナノスケールで表面形状を制御した材料上における細胞培養, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 26 (2005), 227-232.
 17. 山本浩司, 甲斐元崇, 玉島康優, 園部正人, 森田有亮, 池内健, 小泉孝之, 辻内伸好, 玉田靖, 富田直秀, 再生軟骨の摩擦・摩耗特性, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 26 (2005), 97-102.
 18. 柴田延幸, 富田直秀, 再生用 scaffold-軟骨細胞系ミクロ有限要素モデルの構築, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 26 (2005), 19-25.
 19. Shibata N., Tomita N., The Anti-Oxidative Properties of α-Tocopherol in γ-Irradiated UHMWPE with Respect to Fatigue and Oxidation Resistance, Biomaterials, 26 (2005), 5755-5762.

解説など

1. 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 α-Tocopherol Doped, Journal of Biomechanical Science and Engineering, 1(1) (2006), 107-123.
2. 富田直秀 他, 第6版 科学便覧 応用化学編 (2006).
3. 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.
4. 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.
5. 富田直秀, バイオエンジニアリングの基礎Ⅱ (生体材料設計と生体環境設計), New Diamond, 79 号, 21(4) (2005), 47-50.
6. 富田直秀, バイオエンジニアリングの基礎 (1) 生体機能解釈のパラダイムシフト, NEW DIAMOND, 21(3) (2005), 38-41.
7. 富田直秀, 生体吸収性材料の実用化と生体環境設計, 生物工学会誌, 83(5) (2005), 227-229.
8. 富田直秀, 人工関節と関節治療, 人工臓器, 33(3) (2005), 215-218.
9. 富田直秀, 環境設計の考え方とその応用, 臨床リウマチ, 17(1) (2005) [雑誌の場合] 著者名 (連名者), 論文の表題, 雑誌名, 巻数-号数 (発行年・西暦), ページ.

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

[京都大学名誉教授 山品 元]

1. はじめに

製品やサービスを生み出す「生産システム」は、複数の構成員が協業する組織としての側面を持っており、現実には、まさに「柔らかなシステム」であるといえる。本 COE において、当研究室では、生産システムをこうした「柔らかなシステム」として捉え直した上で、その個々の構成員の持つ暗黙知をシステム全体の競争力向上につなげるためのフレームワークの構築を目指してきた。

2. 柔らかな生産システムについての研究の内容

我が国の産業界では、従来、第一線の構成員に対して、所与の業務を間違いなくこなすことだけでなく、主体的な創意工夫を通じて所与の業務自体を変容させていくことが期待されてきた。日本の生産システムは、形式知ベースで中央集権的な意思決定と、暗黙知ベースで自律分散的な意思決定との相互補完によって、まさに「柔らかなシステム」として、巧みに駆動されてきたといえよう。しかし、近年、「市場環境の成熟化によって、生産システムの競争要因が多様化してきたこと」、「生産対象物の量・種類、生産システムの構成などが目まぐるしく変化するようになったこと」、「生産システムの複雑化によって、部分と全体の関係が見えにくくなってきたこと」などのために、構成員の個別の創意工夫が生産システム全体の競争力に与える影響の大きさや、その経路が見えにくくなっている。さらに、個別の創意工夫を適切に評価することが難しくなっており、適切に評価されない創意工夫へのインセンティブも維持しにくくなっている。これらの結果、第一線の構成員が日々の業務を通じて蓄積する暗黙知が競争力の有力な源泉であることに変わりはないが、それを実際に競争力向上につなげるための仕組みが有効に機能しにくくなってきているのではないだろうか。柔らかな生産システムが暗黙知を有効活用するための明示的なフレームワークの構築が急がれる。

構成員の持つ暗黙知は、何らかの意思決定に反映されることを通じて、生産システムの競争力に変化をもたらす。本研究室では、これまで、表1に示すように、暗黙知として「製造現場に関する暗黙知」と「市場環境に関する暗黙知」の二つ、それらを反映させる意思決定として「システム運用上の意思決定」と「システム変革上の意思決定」の二つをそれぞれ考え、両者の組合せとして、合計四つの暗黙知活用経路を研究対象としてきた。次節で、それらについての研究成果の一部を報告する。

表1 対象とする暗黙知とそれらの活用経路

	システム運用上の意思決定	システム変革上の意思決定
製造現場に関する暗黙知	例えば、現場の監督者が持つ暗黙知を、生産指示・差し立てなどの意思決定に反映させる活用経路	例えば、現場小集団のメンバーが持つ暗黙知を、当該小集団の改善活動計画に反映させる活用経路
市場環境に関する暗黙知	例えば、営業員が日々の営業活動を通じて獲得する暗黙知を、対象製品の需要予測に反映させる活用経路	例えば、営業員が持つ顧客に関する暗黙知から、新たな市場機会・投資機会を発掘する活用経路

3. 本 COE のもとでの成果の概要

3.1 製造現場に関する暗黙知のシステム変革上の意思決定への反映 暗黙知を反映させたローカルな意思決定をベースにして自律分散的に進められる改善小集団活動において、ライン作業者の士気が高まる、現場の課題が表面化しやすくなる、などのインタangibleな効果だけでなく、原価、品質、納期などの tangibleな面でも、総体として首尾一貫した効果が得られるようにするためには、その制度設計・環

境設計を適切に整えることが重要である。こうした観点から、当研究室では、図 1 に示すような、改善小集団の組織構成、改善予算制度、業績評価制度などを検討するためのエージェントシミュレーションモデルを開発した[1][2]。

3.2 市場環境に関する暗黙知のシステム運用上の意思決定への反映 この活用経路を機能させるためには、個々の営業員から、低コストかつ短時間で、できれば動的に、暗黙知を集約し、需要予測分布などの形に形式知化するためのアプローチが求められる。そこで、当研究室では、過去の実績から何らかのパターンを抽出し、それを未来に外挿する従来型の需要予測手法とは一線を画した、需要予測の新しい手段として、図 2 に示すような、複数の人間が持つ需要に関する暗黙知を、市場メカニズムを用いて集約し、予測に反映させる暗黙知集約型需要予測法を開発した[3-8]。

4. 今後の展望

構成員の持つ暗黙知を活用した、柔らかな生産システムの競争力向上に関する研究は、まさに本 COE によって切り開かれた新しい研究分野であり、今後の発展が期待される。

参考文献

- [1] 水山 元, 長尾 昂: 自律分散的小集団による改善活動のための制度設計—エージェントシミュレーションによるアプローチ—, 日本設備管理学会誌, to appear.
- [2] 水山 元: 改善小集団活動の制度設計・環境設計のためのエージェントベースアプローチ, 平成 19 年度日本設備管理学会秋季研究発表大会, 神戸, Nov. (2007).
- [3] E. Kamada and H. Mizuyama: Multi-Agent Simulation of Tacit Knowledge Aggregation Process through Prediction Market for Demand Forecasting, Proceedings of the 8th Asia-Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference, Kaohsiung, Taiwan, Dec. (2007), to appear.
- [4] H. Mizuyama and E. Kamada: A Prediction Market System for Aggregating Dispersed Tacit Knowledge into a Continuous Forecasted Demand Distribution, Advances in Production Management Systems, Edited by J. Olhager and F. Persson, Springer, Boston, pp.197-204, (2007).
- [5] 鎌田瑛介, 水山 元: 営業員のリスク選好の多様性を考慮した暗黙知集約型需要予測法の検証, 平成 19 年度日本経営工学会秋季大会, 小樽, Oct. (2007).
- [6] 植田盛夫, 水山 元: 営業員の主観的予測分布の非正規性を考慮した暗黙知集約型需要予測法の検証, 平成 19 年度日本経営工学会秋季大会, 小樽, Oct. (2007).
- [7] 鎌田瑛介, 水山 元: 予測市場システムに基づく暗黙知集約型需要予測法のシミュレーションによる検証, 日本機械学会生産システム部門講演会 2007, 名古屋, July (2007).
- [8] 水山 元, 鎌田瑛介: 予測市場システムに基づく暗黙知集約型需要予測法の基本設計, 平成 19 年度日本経営工学会春季大会, 武蔵野, May (2007).

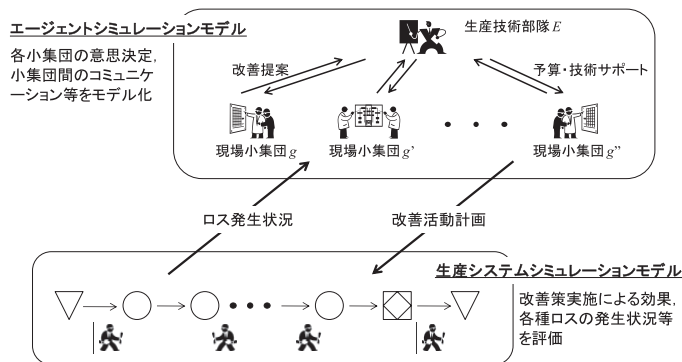


図 1 提案フレームワークの概念図

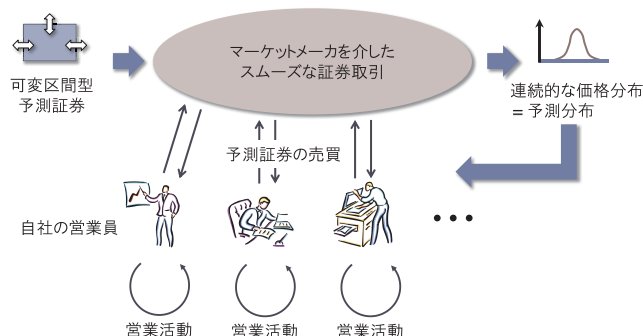


図 2 暗黙知集約型需要予測法の概念図

マイクロシステム創成講座 精密計測加工学分野

教授 松原 厚, 准教授 茨木 創一

[京都大学名誉教授 垣野 義昭]

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. 高精度加工と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（1～0.1 μm 程度の位置決め分解能を持つ加工機）、高精度加工機（0.1 μm ～10 nm 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1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軸とも高精度リニ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ーの位置決め分解能を有している。

また、Z軸には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すことで、位置決め分解能 5 nm 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、工具変形など非常に多くの要因によって発生する。本研究では、それら加工誤差の要因分析に基づき、加工機の運動誤差に起因する誤差、機械加工プロセスに起因する誤差などそれぞれについて、加工機の運動補正によって低減する手法を研究している。上記の微動機構は、超精密平面加工を行う際の誤差補正に利用される。図2に実験結果の一例を示す。今後、誤差補正を前提とした超精密加工の可能性について、研究を進めていく。

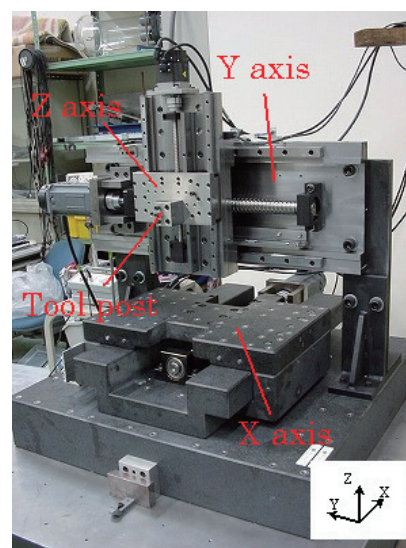


図1 3軸加工機のテストスタンド

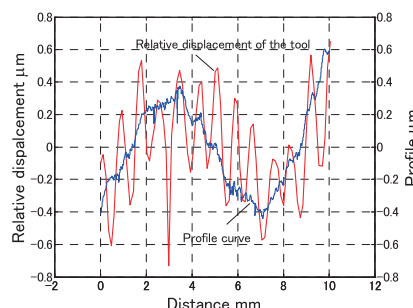
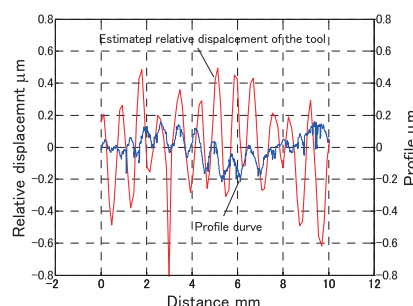


図5 加工物の断面曲線
(上:補正なし, 下:補正あり)

3. 機械加工の知能化に関する研究

金型加工や部品加工などの機械加工において、必要な加工精度を確保し、かつ可能な限り高能率な加工を実現するためには、工程設計や加工条件の設定、加工状態のモニタリングに基づく加工条件の適応的変更など、熟練技術者の経験と技術が必要不可欠であるとされている部分は多い。特に近年、工作機械の高速・高加速度化や、工具のコーティング技術の発達、難削材の加工需要の増大など、機械加工に関する技術の進歩は早く、それらを最大限に活用して高い能率で加工を行うことは、熟練技術者にとっても難しいケースがしばしば見られる。工作機械や工具、ワークに対する十分な経験がない場合にも、工作機械や工具の性能を最大限活用し安全かつ高能率な加工を行うためには、加工条件の設定や加工状態のモニタリングを自律的に行うことができ、オペレータによる意思決定を支援するシステムが必要不可欠である。このような観点から、本研究室では特にエンドミル加工の知能化に関わる研究に取り組んでいる。

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3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。本システムは、以下に示す加工プロセス制御に関連したテーマにおいても、基礎となるモニタリング手法として用いられた。また、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研究を行った。

工具の摩耗の進行など、長いスパンにおける加工プロセスの変化を観察し、それに応じて加工条件を最適設定するためには、熟練オペレータの経験と技術が必要不可欠であるとされている。そこに着目し、非熟練者であっても目標の加工能率を達成できるための加工条件の意思決定支援システムを構築することを目的として、工具摩耗の進行などより長いスパンにおける加工プロセスの変化を陽にモニタリングし、その制御を行う加工プロセス制御システムについて研究を行った（図4はこの研究における切削実験の様子。図5は実験結果の一例）。

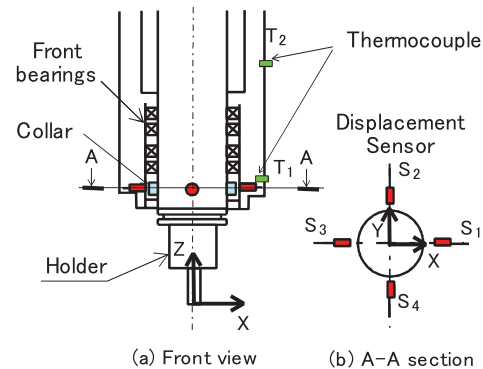


図3 切削抵抗モニタリングシステム

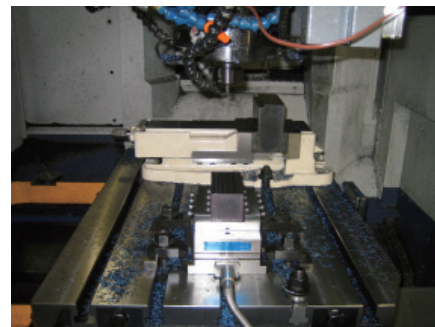


図4 切削実験の様子

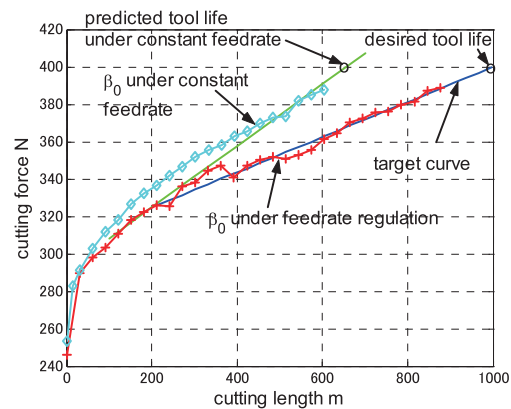


図5 工具寿命の制御のための切削抵抗の制御

機械力学講座 機械機能要素工学分野

准教授 小森 雅晴, 助教 野中 鉄也

[京都大学名誉教授 久保 愛三]

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、騒音の不快さを低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

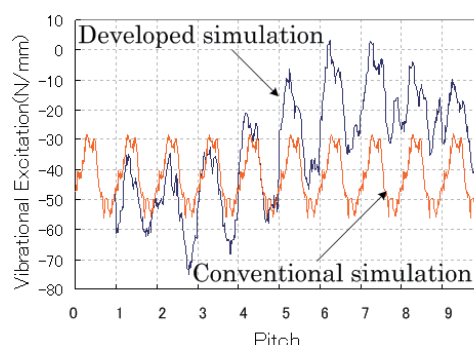


Fig.1 Comparison of calculated vibrational excitation

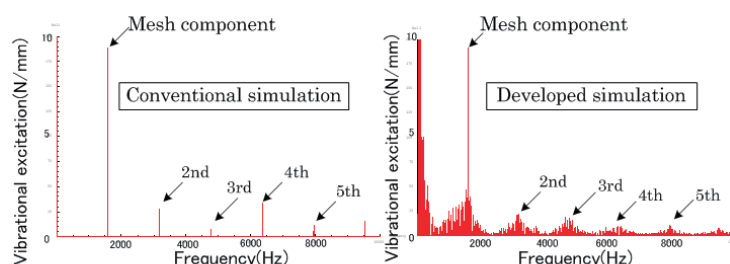


Fig.2 Comparison of calculated vibrational excitation (FFT)

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、

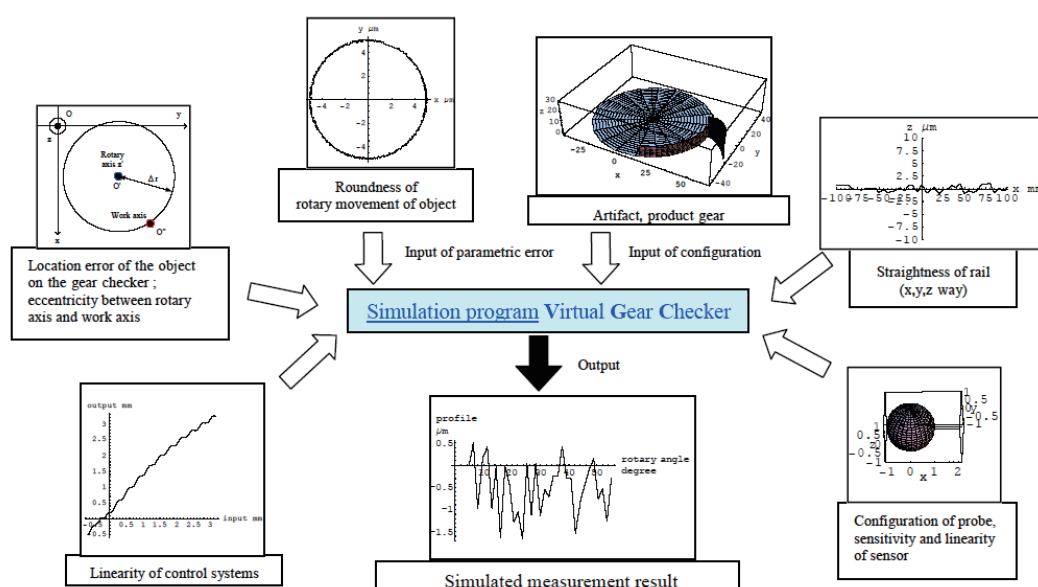


Fig.3 Concept of virtual gear checker

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・大木, 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.