
複雑系の制御・設計論グループ

航空宇宙解析工学講座 航空宇宙機構造分野

教授 土屋 和雄，助手 梅田 吉邦，助手 辻田 勝吉

1. はじめに

動物は複雑で絶え間なく変動する環境の中を，すばやくしなやかに移動する．ロシアの生理学者N．ベルンシュタインは，あらゆる状況で問題に対する正しい解決策となる運動をすばやく見つける能力を，巧みさと呼んだ．彼は，巧みさの力学的な基盤を，多数の筋・骨格系が協調して，状況および行動目的に応じた多様な行動パターンを形成することにあることを明らかにした．現在，ベルンシュタインの考え方にそった動物運動における巧みさの数理的な研究が，動的システム理論に基づいて，S.ケルソー，H．ホームズ等によって行われている．彼らは，動物の運動の特徴を，環境からの入力によりその構造を変化することのできる適応機能を持った要素から構成される非線形システムにおけるパターン形成として説明しようとしている．

ロボティクスでは，従来，環境を含めたモデルが事前に十分わかっているという枠組みのもとで，モデルベースコントロールと呼ばれる運動制御則が広く研究されてきた．しかしこの枠組みでは，動物の運動の持つ巧みさを実現することはできない．神経行動学の研究によれば，動物の歩行運動はCentral Pattern Generator (CPG) で形成・制御されていると考えられる．我々の研究室では，リズムによる多数の関節機構の統合，環境との相互作用を介しての歩行パターンの形成など巧みさにおける大自由度問題の構成論的な研究を行っている．我々は研究対象として2脚，4脚の脚歩行ロボットを取り上げ，そのタスクとして床面の状況の変化など，力学的な環境変化に適応した歩行パターンを自発的に形成・実現して安定に歩行することと設定し，研究を進めている．

2. 適応機能を持つ脚歩行ロボット

CPGは，非線形振動子系でモデル化される．CPGは，外部入力のない状態で定常的な振動パターンを形成するが，脚先の接地センサ入力あるいは上部入力等外部入力に敏感であり，その影響のもとで多様な振動パターンを形成する．対象とする歩行ロボットの運動制御系をCPGに基づいて設計する．制御系は，各関節の運動を制御する運動制御系と非線形振動子系から構成され，その振動パターンから運動を生成する運動生成系から構成される（図1）．運動制御系は，各関節に取り付けられたモータによる局所フィードバック制御系であり，運動生成系は各四肢に対して設置された非線形振動子間の力学系として構成される（図2）．制御系は各脚先に取り付けられた接地センサ信号による振動子間の引き込みにより，環境に適応した歩行パターンが形成され，運動制御系を介して実現される．提案する制御系の設計法の有効性を数値およびハードウェア実験で検証している．特にここでは2脚歩行ロボットについて紹介する．図3に対象とする2脚歩行ロボット（HOAP-1，富士通オートメーション(株)）を示す．図4に平坦な床面上をゆっくりと歩行速度を変化させながら歩行させた場合，そして図5に平坦な床面となだらかな勾配を持つ傾斜面をそれぞれ歩かせた場合の歩行周期を示す．これらの図から，2脚歩行ロボットは様々な環境変化に対して歩行周期を適応的に変化させることで，環境の変化に対応する機能を実現していることが確認される．更に，上位系からの外部指令に対して，運動生成系における軌道生成系において，非線形振動子系の振動パターンから生成する運動を修正することによって，任意に歩行パターンを変化させる．図6に直線歩行と曲線歩行の間のパターン遷移を実現している実験結果を示す．これらの結果から，2脚歩行ロボットの適応機能が実現され，更に任意に歩行パターンを変化させることで自律歩行の実現に近づいていることが確認される．

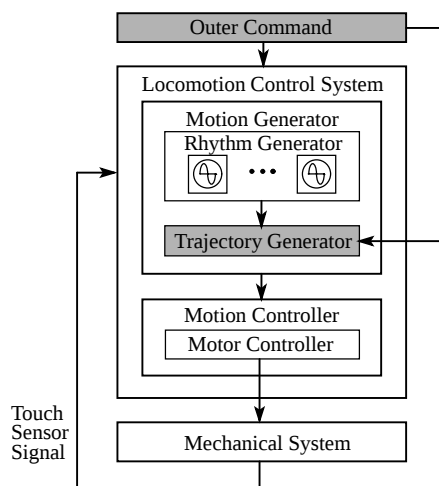


図 1: 歩行制御系

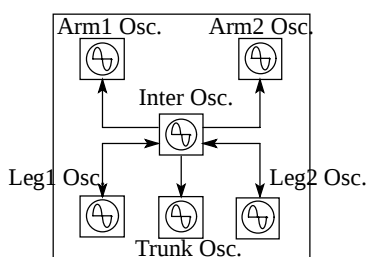


図 2: 非線形振動子系



図 3: 2 脚歩行ロボット

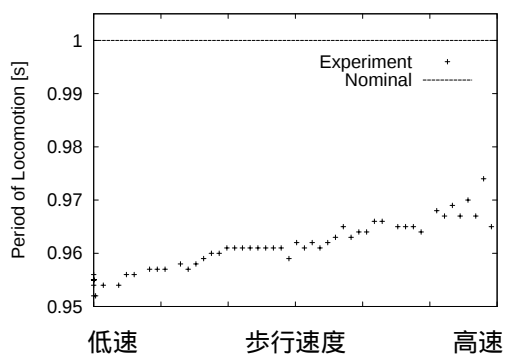


図 4: 歩行周期 (歩行速度の変化)

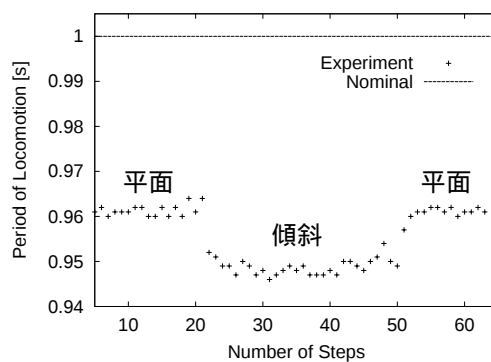


図 5: 歩行周期 (歩行面の变化)

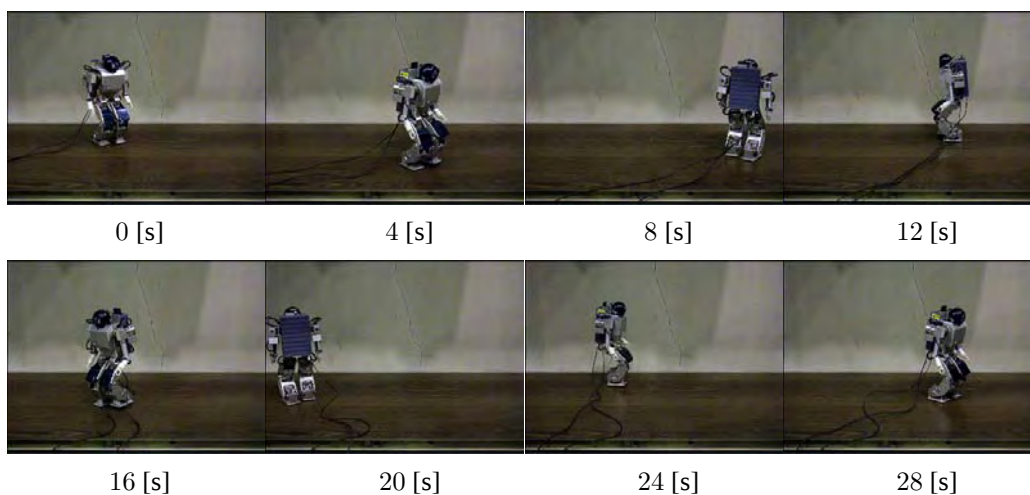


図 6: 直線, 曲線の歩行パターン遷移

参考文献

- [1] S. Aoi, K. Tsuchiya, and K. Tsujita, *Turning Control of a Biped Locomotion Robot using Nonlinear Oscillators*, In Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3043–3048, 2004.
- [2] K. Tsuchiya, S. Aoi and K. Tsujita, *Locomotion Control of a Biped Locomotion Robot using Non-linear Oscillators*, In Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1745–1750, 2003.

航空宇宙解析工学講座 振動制御工学分野

教授 市川 朗, 助教授 幸田 武久, 助手 中西 弘明

1. はじめに

振動制御分野では、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、サンプル値系、時変系のシステム制御理論、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、システム制御理論および安全性・信頼性に関する研究について簡単に紹介する。

2. 研究内容

2.1 システム制御理論

・ **ジャンプ系の制御理論** サンプル値系では、制御対象は連続時間系であるが、一定時間ごとに出力を取り出し、入力を変化させる離散時間処理を伴う。入力を微分方程式表現すると一定時間ごとに状態が不連続的に変化するジャンプ系となる。連続時間系の代表的制御理論はジャンプ系に拡張できるので、その一般論からサンプル値系の制御理論が導ける。ジャンプ系表現の利点は、元の連続時間系が維持されること、出力の時間遅れや一般化ホールドを含む系、非線形系、分布系などへの拡張が容易であることなどがあげられる。また、ジャンプ系は宇宙機の制御に用いられるインパルス制御も含んでいる。振動制御分野では、ジャンプ系の制御理論とその応用の研究を行っており、本年度は、ファジィシステムで表現される非線形サンプル値系に H_∞ 制御理論を拡張した。

・ **時変系の制御理論** 環境が時間とともに変化する時変系に対して、時不変系の制御理論は拡張できるが、その実現には系の情報がすべて必要になり実用的でない場合が多い。Receding horizon 制御は、各時刻で有限区間の制御問題を設定しその時刻の入力を決定する方法であり、必要な系の情報量を抑えることが可能である。パラメータが周期的に変動する系は時変系の特殊な場合であるが、宇宙機の軌道制御問題などに関連する。当分野では、時変系の制御理論の研究をテーマの一つとしており、本年度は、離散系・非線形系の Receding horizon H_∞ 制御および周期系・概周期系の出力レギュレーションの研究を行った。

・ **複数モデルによる非線形系の制御** 滑らかな非線形関数は局所的に線形近似できるが、複数の線形系により表現可能あるいは近似可能な非線形系も多い。局所線形表現が得られると線形制御を局所的に適用できるため応用上便利である。ファジィシステムは複数モデル表現の一例である。不確定性や環境の変化を考慮する場合には、線形系を固定せず予測モデルとして用い適応的に学習を行う。当分野では、複数モデルによる非線形系の学習と制御の研究を行っており、ファジィシステムの安定化制御系設計法が得られている。

・ **2.2 複雑なシステムの安全性・信頼性解析** 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、複雑化すると、システムで事故による影響は従来にもまして大きい。事故対策の検討で、事故モデルは事故解析の基礎となる。従来の事故モデルは主にイベントベースのモデルであり、ある状態変化(望ましくない変化)を引金としてその影響がシステム内を順番に波及して事故になるという概念を基礎としていた。すなわち、この事故モデルは事故とは要素故障に起因するという見方をしているため、比較的単純なシステムの事故や要素故障に由来するタイプの事故に対しては有効に機能していた。しかし、近年科学技術が著しく発達してシステムが大規模・複雑化したため、事故の中には要素故障に由来するタイプの事故に加え、要素故障にはあたらない変動が要素間の密な相互作用の結果システム全体としての事故になるというような新しいタイプの事故が出現してきた。このため、従来の事故モデルでは後者のタイプの事故を導出できず、新たな事故モデルによる解析が必要とされている。本研究では、安全制約ベースに基づいた要素間の機能関係に着目した事故モデルによる事故原因解析について検討した。

事故とは関連する制御系(制御構造)の機能不全に起因するという考え方をとる。また、従来の事故モデルが要素単位に着目するのに対し、新しいモデルは制御ループ単位に着目し、システムを構成する要素を制御者と制御対象として関係付ける(図1)。すなわち、2つの要素間の制約・フィードバックの流れを見たとき、一方が制約(命令)を出し、他方がその制約に基づいて行動をとり、行動結果をフィードバックする関係で表現される。このように新しい事故モデルはシステム全体の制御機能を上位レベルの要素(制御者)から下位レベルの要素(制御対象)へと階層的な制御構造で表現する。

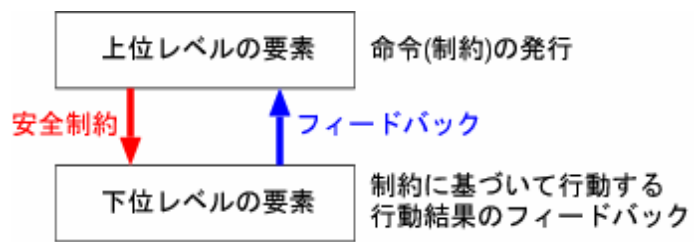


図1 安全制約とフィードバック

本研究では新しい事故モデルを用いた2種類の事故解析を示した。一つは発生した事故の原因を同定する事後解析、もう一つは対象システムで検討すべき事故事象の考えられる発生原因を設計段階で同定する事前解析である。事後解析では、航空宇宙機のような大規模・複雑なシステムで実際に起こった事故に対して原因解析を行った。その結果、下位の制御ループから上位の制御ループへと事故原因(不適当な制約・フィードバック)を遡っていくことで、システム事故(通常システム構造の最下層で起こる)の背景要因を上位レベルの階層(上位レベルの制御ループ)の機能不全として求めることができた(今回の事故解析では組織の管理レベルの背景要因まで求めることができた)。また、このときに求めた不適当な制約・フィードバックを適切なものに修正することで事故の再発防止策を検討することができた。事前解析においては予防すべきシステム事故の考えられる発生原因の抽出法を提案し、この手法を実際のシステムに適用して従来の手法(システムのフォールト・ツリー表現による事故の発生原因の抽出法)と比較検討を行った。本研究で提案した事前解析手法がより広範囲な発生原因を抽出でき、その有効性を確認した。また、この手法で抽出された事故の発生原因を基に対策を立てる(不適当な制約・フィードバックの修正)ことで、より適切なシステム事故の予防が行えることも示した。

2.3 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 災害が発生した場合、被害を最小限に食い止めるには防災・レスキュー活動が重要となる。そのため被災地の情報収集を可能な限り迅速に行うことが必要となる。このため、産業用無人ヘリコプタをもとに情報収集用の自律型エアロボットの開発をおこなっている。本年度の研究の詳細は、第4章研究成果報告(中西)を参照されたい。

3. 国際交流

英国バース大学(University of Bath)の数理科学科 E.P. Ryan 教授を2004年11月20日～27日に訪問し、同学科制御理論グループに時変系の出力レギュレーションについての講演を行うとともに、ロバスト適応制御に関する意見交換を行った。今後、サンプル値フィードバック制御系、ロバスト適応制御などに関する研究交流を行うことを確認した。

また、フィンランドのフィンランド科学技術センター(VTT)産業機構と複雑なシステムの安全性・信頼性解析に関する研究協力ならびに共同研究について、昨年と同様に検討を続けている。

参考文献

- [1] A. Ichikawa and H. Katayama, Linear Time Varying Systems and Sampled-data Systems, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol.265, (2001), Springer, Berlin.
- [2] R. Murray-Smith and T.A. Johansen (eds.), Multiple Model Approach to Modeling and Control, Taylor & Francis, (1997), London.

デザインシステム論講座

教授 榎木 哲夫, 助手 堀口 由貴男

1. はじめに

本研究室では、ヒト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成就され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ふ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、2004年度に本研究室で行った主な研究活動を紹介する。

2. 人間を含む複雑系のダイナミクス解析

2.1 操作のゆらぎを考慮したコックピットインタフェースの安全性解析[1]： 現在の航空機死亡事故の4割は、航空機に何ら異常がないのに地表面に衝突するCFIT (Controlled Flight Into Terrain) と呼ばれる事故である。その発生は何らかの根本原因に帰せられるようなものではなく、航空機の技術的要因や人的過誤要因、航空機やパイロットを取り巻く環境要因などが動的にからみ合う中で創発的に事故にいたったと考えられている。この問題について2つの観点から人間—機械システムのダイナミクスの解析を行った。1つは、パイロットの状況認識が設計者の組み込んだ自動化のロジックとの間でどのような齟齬を生み得るかについてであり、Michael Heymannらの提唱するComposite Modelを用いて事故事例の解析を行った。もう1つは、パイロットの操作がゆらいだときに、それが他の手順にどのような変容をもたらすのかについてであり、Erik Hollnagelの提唱するFRAM (Functional Resonance Accident Model) を用いて一連の操作手順の中で「ゆらぎに対して脆弱な部分」を同定する安全性解析を行った(図1)。

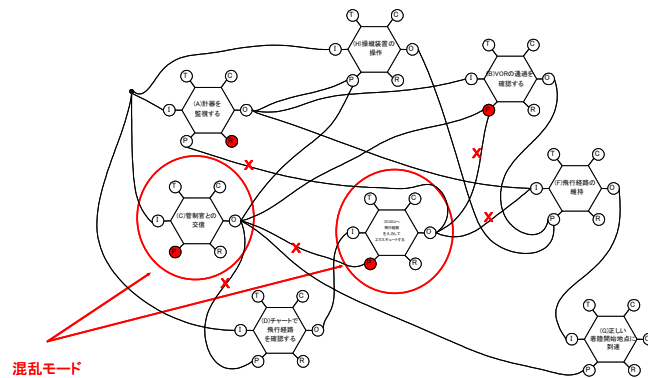


図1 FRAMによる安全性解析

2.2 需要と供給の共創場ダイナミクスに基づく消費購買行動の構成論的解析[2]： 人間の行動の多くは認知主体である人間の中に閉じた認知の結果によるものではない。たとえその行動が普段の決まりき

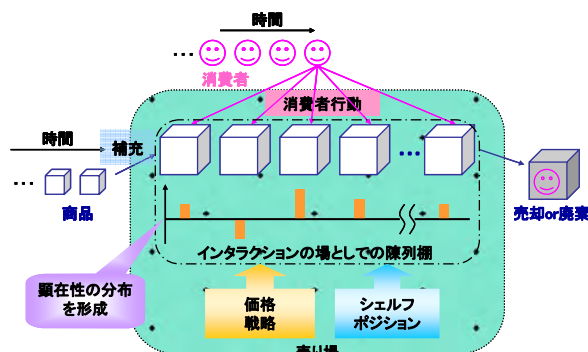


図2 需要と供給の共創場モデル

ったルーチン化されたようなものであっても、実は外的環境からの刺激に対する複雑な即興的対応から成り立っており、消費購買行動はその典型と言える。固有の価値観を有する消費者が、自身の価値観を堅持する一方で、売り手側が意図的に変化させる価格設定や商品配置といった売り場環境要因が、消費者の行動に少なからず影響を及ぼしている。そこで、消費購買行動が行われる売り場を商品の売り手（供給側）と買い手（需要側）の相互作用場として捉えたモデル（図2）を提案し、売り手と買い手の相互限

定的な共創場のダイナミクスを構成論的に解析することを行った。

3. 人間と機械システムの相互作用分析

3.1 パワーアシスト装具の開発と協調系実現に向けた相互作用分析： ロボット技術の福祉・介護用途への一つの展開として、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」の研究開発がある。



図3 製作したパワーアシスト装具

装具によるパワーアシストは、ユーザの身体と直に接するというその実現の形態のために、作業に必要な機械的性能だけでなく、ユーザが自身の身体の自然な拡張として感じられるような使用感を実現することがより強く求められる。そして、自然なアシストとは、ユーザが装具の介在を意識せずに所望の作業が実施できている状態をもって評価されると考えられる。そこで、上肢の屈曲・伸展運動をサポートするパワーアシスト装具（図3）を製作し、ユーザと装具からなる協調系の実現に向けて、ユーザと装具の境界面で発生する圧力のパターンに基づくユーザの動作意図を読み取り、パワーアシストの介在が人間の動作に与える影

響について実験と分析を行った（詳細は本報告書堀口由貴男助手研究成果報告の項に別掲）。

3.2 遠隔操作ロボットを用いた探索行為における技能解析と生態学的考察[3][4]： 遠隔操作系では、遠隔に働きかけるための媒体である機械（ロボット）の操作のみならず、それと外界の関係についての知覚情報が利用可能なモダリティやクオリティの点から大きく制約される。そのため、遠隔のロボットと外界との相互作用の状況を的確に認識してその振る舞いを意のままに操るには多くの困難が伴う。一方で、このような認知活動が利用

する「道具」によって大きく制約されるタスク環境において、その道具にうまく適合したユーザが獲得した操作戦略の中には、ユーザがそのシステムを効果的に使用するための情報リソースが組み込まれていると考えられる。そこで、遠隔操作による探索の模擬実験

（図4）に通じてレベルの異なる操作戦略の比較を行い、移動ロボットの操作技能を解析した。そして、ロボットの定位のための手が

かり情報を画面内に“外在化”するような積極的な操作の点において違いがあることを確認した。

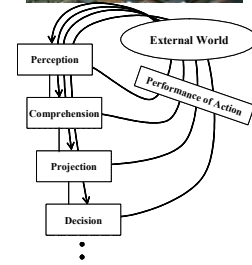


図4 遠隔操作による探索と活動モデル

3.3 インタラクション時の動的適合性を保証するインタフェースの設計と評価[5],[6]： 人間と大規模複雑化する対象機械の監視・制御に際して、人間ユーザに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・評価の方法論の開発を行った。設計された対象機械の動作原理を表わすマシンモデル（＝対象機器が有する動的特性）、寄与のインタフェースを介してユーザが把握可能な機械状態の遷移を表わすインタフェースモデル（＝対象機器利用に際してユーザに許容される動的特性）、さらにインタフェース上の情報アイテムを部分的に選択し作業状況に合わせてユーザ自らが動的に対象を捉えている内容を表わすユーザモデル（＝対象機器に対するユーザの認識の動的特性）、の3つの異なるモデルの状態遷移グラフによる表現法を確立し、各々のグラフの可到達性の比較評価に基づいたコンポジットモデル解析手法により、対象機械の実状態遷移とユーザの認識における状態遷移予測の間の動的整合性と人的過誤へのロパス

ト性、の観点からインタフェースを解析的に評価し、検証するための手法を開発した。以上の手法を原子力プラントの MCR (Main Control Room) におけるクルー協調を支援するインタフェースを対象として研究を遂行した。

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理論

4.1 知識コミュニティでのノウハウ流通

支援[7][8]： システムの設計や運用に関するノウハウについて、各技術者が個々人でノウハウを蓄えるのではなく、組織内でそれらを再利用可能な形で共有し、流通させるための場の構築が求められている。そこで、このような情報共有を目的として、技術者が自らの作業内容を文書の形でデータベースに蓄積する試みが行われてきている。しかしながら、多大な労力をかけてデータベースを作成しても目的とする情報を

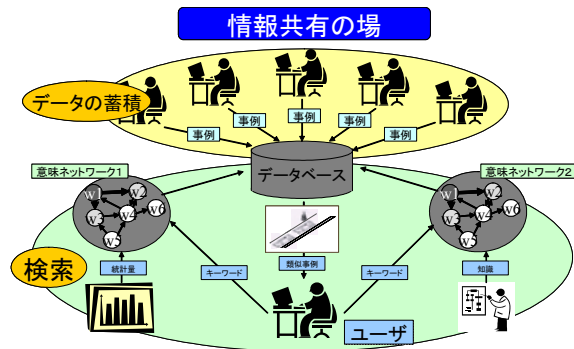


図5 ユーザ支援手法の概要

引き出す苦勞が多いため使用されず、充分な活用を見ないまま休眠知と化している場合が多いのが現状である。この問題に関して、画像データを用いた事例の診断や解析に際して熟練者が利用している専門的なノウハウを知識コミュニティ内でヒトからヒトへ流通させるためのユーザ支援手法について研究を行った。提案手法は、画像の諸特徴について解析者が断片的に付記していくアノテーション（注記）を手がかりに、当該事例に関連があると推測される他の事例をシステムが適宜提示することで、解析者自身が能動的に関連性知識を獲得していくための新たな機会やリソースを提供する（図 5）。このために、蓄積事例データの統計処理と DEMATEL の手法を用い、解析者集団のもつ暗黙的な知識構造を意味ネットワークとして抽出し、その情報検索への影響を分析した。

4.2 動的環境下におけるマルチエージェントによる社会的・組織的学習モデルの開発 [9], [10]: 人間

を含む異種エージェント群の相互作用場において、エージェントが他者の行為実行を観察しながら模倣学習を行うような社会的相互作用を想定した際に、どのようにマルチエージェント組織としての動態が変容を受けるかについて構成論的な解析とその応用について研究を遂行した。個体集団が組織内外の予期しない環境変動に対してロバストな協調と適応を実現するためのマルチエージェント学習アルゴリズムを開発した。具体的には、生産現場におけるコンテナ積み付け問題を具体的な問題対象として、社会組織における複数意思決定者の自律分散的な動態のモデリング手法であるガバージカンモデルを積載問題の解法に拡張した新たな手法を提案するとともに、計画の実際の運用段階のための社会的強化学習のアルゴリズムを開発した。さらにコンテナ積載問題を対象として、演繹学習手法(Explanation-Based Learning)を用いた熟練者からの対話型知識獲得手法の開発を行った。

5. 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技術

5.1 運動記憶の動的・適応的組織化:身体運動を伴って人間と社会的な相互作用を行うロボットにとつ

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構成的なプロセスは人間との関わり方に多様度を持たせ、様々な応答を引き出すためにも重要な技術課題となる。社会的存在となり得るロボットの学習では外部との相互作用の結果を完全には制御できないがために、学習はむしろロボット自体の閉鎖された認知の中で自己を変容させていく過程に向けられる。本研究では、昨年度の研究を受け、我々の提案している双シマモデル (Dual-Schemata model) (図 6) において行為シマ (Intentional Schema) の学習に強化学習の手法を導入し、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内化するための方法を提案した。また、計算機上で多様環境下における平板上でのボール制御問題と pan-tilt カメラによる運動球追跡課題を用いて、その有効性を検証した（詳細は本報告書谷口忠大博士学生研究成果報告の項に別掲）。

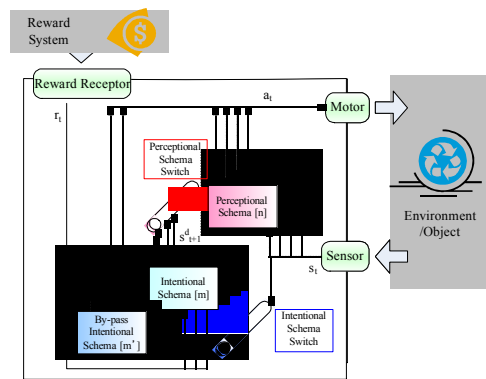


図6 Dual-schemata モデル

参考文献

- [1] 日名, 榎木, 堀口: 操作のゆらぎを考慮したコクピットインタフェースの安全解析, 第 32 回知能システムシンポジウム資料, 2005, 139-144.
- [2] 林, 榎木, 谷口: 需要と供給の共創場ダイナミクスに基づく消費購買行動の構成論的解析, 第 32 回知能システムシンポジウム資料, 2005, 127-132.
- [3] Y. Horiguchi, T. Sawaragi, and M. Kuwatani: Analysis of Search Activity via Remote Robot Towards Natural and Effective Human-Machine Collaboration Design, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004, 1077-1082.
- [4] 堀口, 榎木, 桑谷, 遠隔操作ロボットを用いた探索行為における技能解析と生態学的考察, 日本知能情報ファジィ学会誌 (採録決定, 印刷中).
- [5] T. Sawaragi and Y. Horiguchi: Correct and Succinct Interface Design for Monitoring Automated Process Plant, Proc. of Cognitive Systems Engineering in Process Control (CSEPC) 2004, 68-73, 2004.
- [6] T. Sawaragi and Y. Horiguchi: Semiotic Approach to Collaborative Conversation Modeling for Establishing Sociality between Interface Agent and Human User, *Preprints of IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design and Evaluation of Human-Machine Systems 2004*, CD-ROM (2004)
- [7] Y. Horiguchi, T. Sawaragi, Y. Kaneda and A. Nakajima: Knowledge Management Framework to Share Technical Know-How in Organization, Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics, 2004.
- [8] 黒田, 堀口, 榎木, 仲島: 画像データベースを介した知識コミュニティでのノウハウ流通支援, 第 32 回知能システムシンポジウム資料, 2005, 151-156.
- [9] Qiang Wei and Tetsuo Sawaragi and Yajie Tian: An Online Bin Packing Solution Using Garbage Can Model, 計測自動制御学会論文集, 40(8), 2004, 870-872.
- [10] Qiang Wei and Tetsuo Sawaragi and Yajie Tian: A Bounded Multi-Goals Optimization Using an Organizational Decision Model, Advanced Engineering Informatics (accepted for publishing, in print).

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, 助手 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物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。

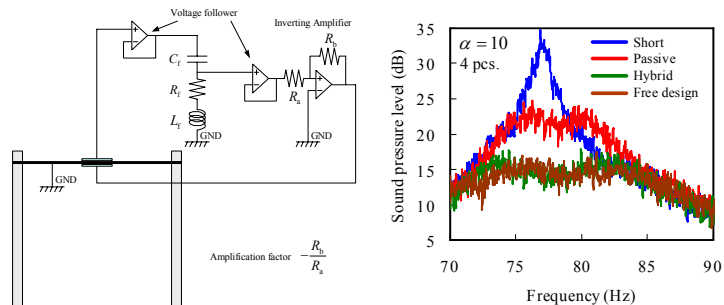


図2 ハイブリッド制振

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。

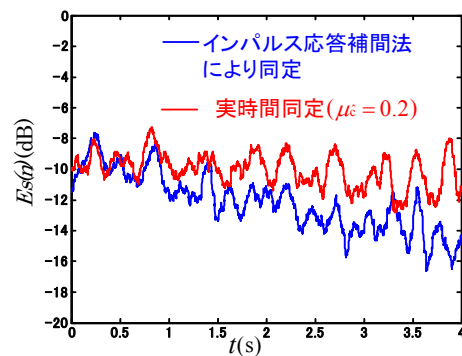


図3 能動消音効果の比較

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、乗客の乗り心地の視点からも、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。

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。



図4 屋根に動吸振器をつけたゴンドラ

床の重量衝撃音の低減研究

重量床衝撃音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。この現象を床衝撃音に当てはめると、2番目の球が床、3番目の球が左図の衝撃吸収ダンパとなります。衝撃源の運動量を床を介して衝撃吸収ダンパの運動量に変換することで、床の衝撃変位を抑制し、重量床衝撃音の低減が可能となります。

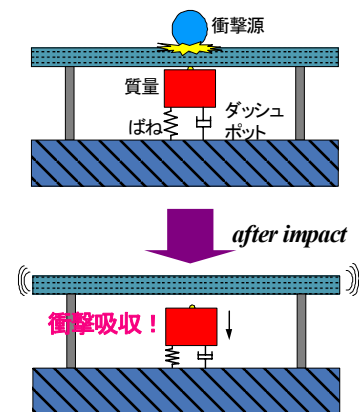
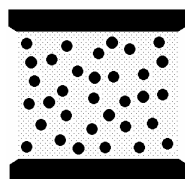


図5 衝撃吸収ダンパ概念図

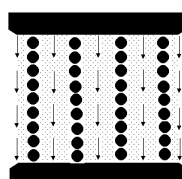
Research and application on Magnetic Rheological (MR) fluid damper

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. 6 2DOF model with MR damper

システム工学講座 知識情報システム分野

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 16 年度の知識情報システム研究室における研究テーマは、主として以下の通りである。

1. 複合領域最適設計手法の開発
2. 動的機械構造システムの創成設計法の開発
3. 生物集団の挙動を利用した最適設計手法の開発

ここでは、生物集団の挙動を利用した最適設計手法の開発について詳述する。

2. 生物集団の挙動を利用した最適設計手法の概要

強い多峰性のある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、遺伝的アルゴリズム[1], シミュレーテッドアニーリング[2]のような自然現象を模倣した発見的最適化手法が、幅広い分野で多く適用されるようになってきている。これらの方法は、局所最適解への収束の回避、多目的最適化問題におけるパレート最適解集合の探索など、従来の数理的な方法では扱いが困難であった問題において、大きな効果をあげている。

Kennedy らにより提案された Particle Swarm Optimization (PSO)[3]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倣した新しい発見的手法であり、個体の最適点と個体が所属する集団全体の最適点に基づいて次の探索点を決めるという特徴を持つ。PSO 法は多峰性のある無制約の最適化問題において、遺伝的アルゴリズムを性能的に凌駕するという報告^[4]もある。しかしながら、従来の発見的手法と同様に、制約条件を明示的に扱わないという特徴があり、大域的な探索は可能でも詳細な探索における収束性がよくないという問題がある。これは、これらの手法が設計感度情報を利用していないという特徴によるものである。しかしながら、一般的に機械設計や構造設計の最適化問題は、制約条件を含む問題が多く、スワーム型の最適化手法がうまく適用されていない一因になっている。制約条件を明示的に扱う機構を組み込み、詳細な最適化の効率を向上させるためには、設計感度の情報をより積極的に利用する必要がある。特に線形な構造最適化問題においては、感度は順解析的に求められるため、感度情報はより簡便に活用できると期待できる。そこで、当研究室では、スワーム型の最適化手法において、目的関数、制約条件の感度情報を利用する方法を検討した。

3. 最適化の手順

PSO 法の個体の探索点は、以下の式のように、個体それぞれの速度に基づいて更新される。

$$\mathbf{x}_{k+1,i} = \mathbf{x}_{k,i} + \mathbf{v}_{k+1,i} \Delta t \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}_{k+1,i}$ は第 $k+1$ 世代の個体 i の探索点であり、 $\mathbf{v}_{k+1,i}$ はその速度である。 Δt は単位時間を示している。速度 $\mathbf{v}_{k+1,i}$ は、その個体 i が発見した最も良い点 $\mathbf{p}^i$ と、全個体の探索経過で発見された最も良い点 $\mathbf{p}^g$ に基づいて、以下のように計算される。

$$\mathbf{v}_{k+1,i} = w \mathbf{v}_{k,i} + c_1 r_1 \frac{(\mathbf{p}^i - \mathbf{x}_{k,i})}{\Delta t} + c_2 r_2 \frac{(\mathbf{p}^g - \mathbf{x}_{k,i})}{\Delta t} \quad (2)$$

ここで、 w は個体の慣性係数、 c_1 と c_2 は信用パラメータ、 r_1 と r_2 は $[0, 1]$ の範囲のランダムな値である。この方法は、制約条件を明示的に扱わず、より良い処理方法の開発が課題となっている。特に機械設計における最適化問題は、比較的多くの制約条件を含む傾向にあり、PSO 法を代表とするスワーム型の最適化手法は、未だうまく活用されていないのが現状である。そこで以下の節では、Sequential Linear Programming (SLP) 法をスワーム型最適化手法の中で併用的に導入する方法を述べる。

本研究では、制約条件の処理において、SLP 法を用いる方法について検討を行う。SLP 法は、ある探索点における目的関数および制約条件を 1 次近似した線形計画問題を構築し、これを逐次解きながら最適解を求める方法である。ここでは PSO 法の各世代において線形近似と線形計画問題の求解を併用的に実施する。その流れを以下に述べる。

- Step 1 スwarm 内の個体集合を、PSO 個体集合と SLP 個体集合にランダムに分割する。
- Step 2 すべての個体の評価を行う。
- Step 3 SLP 個体については目的関数と制約条件の感度を計算する。
- Step 4 求めた感度を用いて、SLP 個体のすべてについて、最適化問題を線形近似した問題を解く。
- Step 5 SLP が収束していれば、SLP と PSO の個体集団を混ぜ合せ、もう一度 SLP 個体集団を選びなおす。
- Step 6 SLP 個体集合、PSO 個体集合の両方あわせて集団全体でこれまで最も良い解を選ぶ。これをリーダーと呼ぶ。
- Step 7 PSO 個体の速度を計算する。
- Step 8 Step 7 で計算した速度を用いて、PSO 個体の移動を行う。
- Step 9 収束の判定を行う。もし収束していなければ Step 2 に戻る。

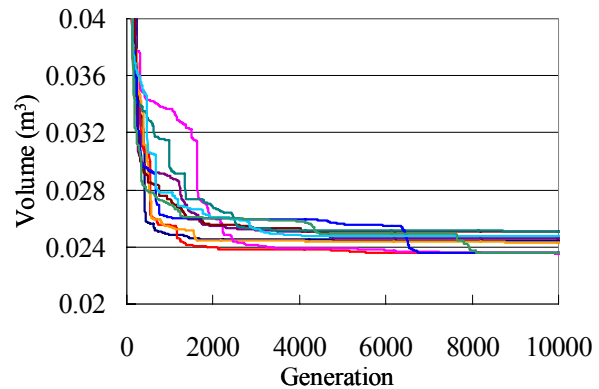


図1 従来の PSO 法による最適化結果

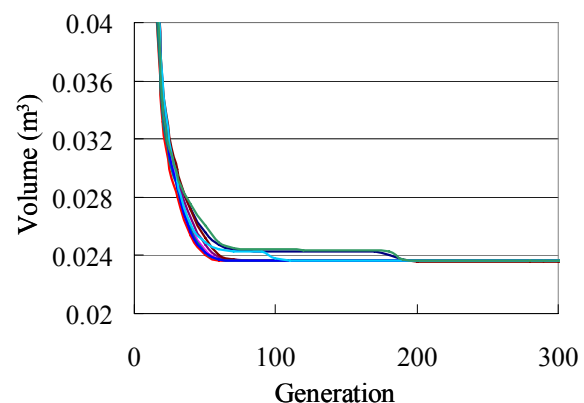


図2 提案法を用いた場合の収束の様子

従来の PSO 法と、提案するハイブリッド型 PSO

法を、多峰性のあるトラス構造物の最適設計問題にそれぞれ 10 回ずつ適用した。その収束の様子を図 1、および図 2 に示す。提案法を用いることで、非常に短い計算時間で最適解が得られている。ことがわかった。

4. おわりに

生物集団の挙動を模擬した最適化手法である PSO 法を構造最適化問題に適用する方法として、SLP 法との組み合わせによるハイブリッド化を行う方法を示した。PSO の個体によるマルチエージェント的な振る舞いと、感度解析法による数理的な最適化の組み合わせにより、多峰性をもつ最適化問題において効率的に大域的最適解が得られることを確認した。

参考文献

- [1] Goldberg, D. E., Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, Addison-Wesley, New York, (1989).
- [2] Kirkpatrick, S., Gelat, C. D. and Vecchi, M. P., Optimization by simulated annealing, Science, **220**-4598(1983), 671-680.
- [3] Kennedy, J., Eberhart, R., and Shi, Y., Swarm Intelligence, Morgan Kaufmann, San Francisco, (2001).
- [4] Fourie, P. C. and Groenwold, A.A., The particle swarm optimization algorithm in size and shape optimization, Structural and Multidisciplinary Optimization, **23**-1(2002), 259-267.

機械設計制御工学講座 メカトロニクス分野

教授 吉川 恒夫，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 つのアプローチで人間の本質的理解および人間に役立つ機械システムの実現を目指している．

以下では，これら 3 つの柱の中での個々の研究テーマについて簡単に紹介する．

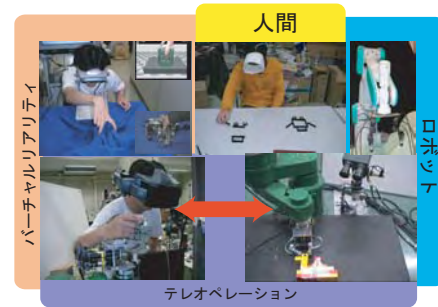


図 1: 研究テーマの関係図

2. ロボットに関する研究

本年度は，人間の歩行機能と手によるマニピュレーション機能に焦点を絞り，それぞれの機能の理解とその機械的実現を目指した．



図 2: 歩行機能解析用靴型装具

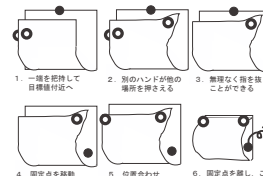


図 3: 折り紙の手順の解析

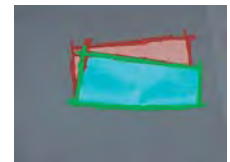


図 4: 折り紙画像認識

歩行機能に関しては，昨年度に引き続き，足先自由度を有する靴型装具を人間

に履かせて歩行の様子を観察することで，ロボットに適した足先機構を検討した．直線歩行では，足先自由度は 1 自由度で十分であるが，方向転換をする場合には，親指が独立した 2 自由度の足先機構が有効であることなどが分かった [1]．図 2 に靴型装具の概観を示す．

マニピュレーション機能に関しては，これまでの単に人間の手の概観を模したロボットハンドを作るというアプローチとは訣別し，限定されたものでも良いから対象とすべき作業をまず明確にし，その作業に適した機構を設計するというアプローチを積み重ねていくこととした．その一つの例として折り紙を取り上げ，折り紙を折る作業を詳細に解析して，機械的に実現するための方法を検討している．図 3 に，折り紙を折る際の指先の運びの解析例を示す．平行して，図 4 に示すような，折り紙の状態を認識する画像処理システムも開発中である．

3. バーチャルリアリティに関する研究

VR の分野でも今年度は手の機能に焦点を絞り，昨年度開発した多指遭遇型ハプティックデバイスを用いて，任意の形状の物体把持を模擬できるシステムの構築を行った．把持を模擬するために，仮想世界で人間が物体を把持する瞬間に，接触点を模擬する平面パッチを指先と遭遇させるのであるが，この平面パッチを無駄なく適切に人間の指先と遭遇させるためには，人間が物体を把持する際の行動様式をよく理解しておくことが大切である．



図 5: 多指遭遇型ハプティックデバイスによる物体把持のシミュレーション



図 6: 提示される仮想環境の映像

本研究では，人間の把持動作を仔細に観察して，物体を把持する一連の動作を把持物体決定フェーズ，把持面決定フェーズ，接触点決定フェーズに分け，デバイスの動作計画アルゴリズムを構成し [2]，実験的に確かめた．図 5，6 にその様子を示す．

4. テレオペレーションに関する研究

今年度は、マスタ・スレーブシステムでのマニピュレーション作業におけるカメラの自由度に焦点を当てて研究を行った。図7に示すように、本システムのカメラと同じ視野角となるように視野を制限した場合、人間は頭の回転運動だけでなく前後左右の並進運動も顕著であることを見出し、図8に示すようにスレーブ側において従来のパンチルト機構のみのカメラシステムに、並進の2自由度機構を付加した。玩具ブロックの配置作業をマスタ・スレーブシステムを介して行ったところ、並進自由度を付加したカメラシステムを用いたほうが操作性が良いことが確かめられた[3]。

また、これとは別にテレオペレーションの応用的研究として、株式会社テムザックと共同で図9に示すレスキュー活動支援用の双腕型油圧駆動重作業ロボットとその操縦装置を開発中であり、愛・地球博にてデモンストレーションを行う予定である。

5. その他の研究

以上紹介した研究以外にも、昨年度に引き続き、災害現場で実際に役立つレスキューシステムの研究や医療ロボットに関する研究なども行



図 7: 人間の頭部運動計測

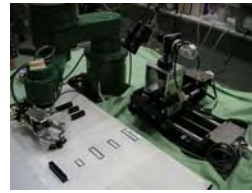


図 8: 4 自由度カメラシステムを持つスレーブロボット



図 9: T-52 援電

っている。開発したレスキューシステムの例として、図10に画像安定化機構を備えたカメラシステム[4]、図11に瓦礫内3次元マップ生成のためのレーザーレンジファインダ(東京電機大学栗栖助教授らと共同開発)[5]を示す。

6. おわりに

以上のように当分野では、ロボット、テレオペレーション、バーチャルリアリティを3つの研究の柱として、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すと同時に、人間や生物の機能の本質的な理解を目指している。



図 10: 画像安定化機構を備えたカメラシステム



図 11: 瓦礫内3次元マップ生成のためのレーザーレンジファインダ

参考文献

- [1] T.Saida, H.Ohta, Y.Yokokohji and T.Yosikawa, Function Analysis of Human-like Mechanical Foot, using Mechanically Constraint Shoes, Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2004), (2004), 3847-3852.
- [2] Y.Yokokohji, N.Muramori, Y.Sato, T.Kikura and T.Yoshikawa, Design and Path Planning of an Encountered-type Haptic Display for Multiple Fingertip Contacts based on the Observation of Human Grasping Behavior, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2004), (2004), 1986-1991.
- [3] 河田浩平・横小路泰義・吉川恒夫, 遠隔操作のためのマスタ・スレーブ型視覚システムの設計と評価, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, (2004).
- [4] 林浩一郎・横小路泰義・吉川恒夫, 不整地走行時の画像安定化機構を備えた臨場感の高いレスキューロボット用カメラシステムの評価, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2004) 論文集, (2004), 44-45.
- [5] M. Kurisu, Y. Yokokohji, Y. Shiokawa and T. Samejima, Development of a Laser Range Finder for 3D Map-Building in Rubble, Proc. International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004), (2004), 443-448.

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

本研究室の特徴は多分野の研究者が同居している点である。機械系エンジニアをはじめ、生物学出身者、整形外科医、理学療法医、針治療免許保持者など、多分野の研究者が生体環境設計を目指して様々な研究を行っている。また、学外からも、高分子科学者、臨床医師、企業研究者など多彩な人が助っ人として研究に参加している。研究室が第一に掲げる目標は「実際に医療に役に立つ技術開発」であり、生体環境設計はその方法論としての礎となる。COEにおける本研究室の役割は、生体を対象とした設計論の確立とそのモデル化、生体環境設計の生物学的検証、及びその医学臨床における実践である。

日本の医工学研究は一般に医療現場との結びつきが弱く、医療と工学（機械物理系）の両方を知る研究者が非常に少ないのが現状である。実際に医療に貢献することができる研究者を育て、拡大しつつある医工学研究を人材面から支えるのも当研究室の役割であると考えている。

2. 研究内容

具体的な研究内容は以下のごとくである。

2.1 生体内環境設計による生体機能の育成とその機能評価

（様々な物理環境下に生成する生体機能を観察し、生体環境設計の基礎とする）

2.2 生体内環境設計の実用化

（様々な物理環境設定機器や、生体内環境設定による関節再生療法などの実用化研究を行う）

2.3 物理環境設計のモデル化

（セル・オートマタ等をツールとして用いて生体内環境を設計し、生体組織を再生させる）

2.3 人工膝関節の力学的最適化設計、その他、スポーツバイオメカニクス、吸収性、組織誘導性人工靭帯の開発、磁気生体に及ぼす影響に関する研究、生体組織-材料間の摩擦、等

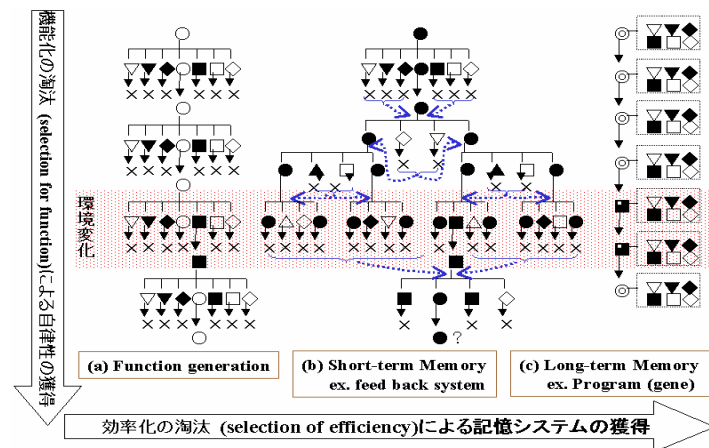


図 生体機能の分類 (自律性と記憶システム)。多様性からの淘汰 (機能化の淘汰 "selection for function") によって自律機能が生じ、「効率化の淘汰 "selection of efficiency"」が働くことによって短期記憶システム (ex. フィードバック, 調節因子) (b) や長期記憶システム (遺伝子) (c) が出現する。このように機能の起源を考えると、生体機能の根底には「自律性」があって、その土台の上に「記憶システム」が築かれている事がわかる。(この図全体に表されているのがゲノムである)

3. 最近2年間の成果など

(書籍)

- 1) 富田直秀. 機能設計から生体環境設計へ-「安心」を育てる科学と医療-. 丸善株式会社, 2005
- 2) 富田直秀. ちゃっちゃんの遊園地. 株式会社ゆみ出版, 2003
- 3) 富田直秀(共同執筆). 生体評価の臨床・力学的要件. 土屋利江. 医療材料・医療機器の安全性と生体適合性. 株式会社シーエムシー出版. 68-73, 2003

(解説など)

- 4) 富田直秀. 環境設計の考え方とその応用. 臨床ウマチ. 17(1):9-15, 2005
- 5) 富田 直秀. 生体材料と生体内環境設計(Bio-Environment Designing for Biomaterials). 材料. 53(1):91-94, 2004
- 6) 富田 直秀. 生体内設計(方法論としてのオートポイエティック・マシンの). 骨・関節・靭帯. 17(3):269-274, 2004
- 7) 富田 直秀. 人工関節の工学デザインの限界と可能性. 関節外科. 23(7):17-22, 2004
- 8) 富田直秀. 生体組織の自律性と効率化. 京機短言. No.4, 2004
- 9) 富田直秀. 最近の生体材料設計に関して. NEW DIAMOND. 19(2):5-8, 2003
- 10) 富田直秀. 不良学者から不良学生たちへ. BME. 17(1):59-62, 2003

(論文)

- 11) R. Ohata, N. Tomita, and Y. Ikada. Effect of a Static Magnetic Field on Ion Transport in a Cellulose Membrane. Journal of Colloid and Interface Science. 270:413-416, 2004
- 12) Shigeyuki Wakitani, Hideyuki Aoki, Yasuji Harada, Masato Sonobe, Yūsuke Morita, Ying Mu, Naohide Tomita, Yukio Nakamura, Satoshi Takeda, Takeshi K. Watanabe, and Akira Tanigami. Embryonic Stem Cells Form Articular Cartilage, not Teratomas, in Osteochondral Defects of Rat Joints. Cell Transplantation. 13:331-336, 2004
- 13) 寺村 聡, 富田直秀, 河島俊一郎, 藤田所久, 青木正彦, 井須俊郎. 人工関節に用いた Vitamin E 添加超高分子量ポリエチレンの酸化劣化. 表面科学. 25(9):568-572, 2004
- 14) 小林正和, 山下健介, 西脇眞二, 泉井一浩, 吉村允孝, 富田直秀. トポロジー最適化と形状最適化に基づいたコンプライアントメカニズムの多段階最適化法. 精密工学会誌. 70(11):1455-1460, 2004
- 15) 柴田延幸, 富田直秀. ビタミン E の酸化作用がデグレーションを含む UHMWPE の疲労特性の向上に及ぼす影響. 日本臨床バイオメカニクス学会誌. 25:357-362, 2004
- 16) 丹羽康二, 山田修一, 柴田延幸, 倪 慶青, 増田 稔, 村田功二, 寺村 聡, 小林広樹, 富田直秀. 人工関節に用いた超高分子量ポリエチレンの微小領域変形挙動に関する研究. 日本臨床バイオメカニクス学会誌. 25:363-368, 2004
- 17) Kohji Yamamoto, Mariko Yamaguchi, Masahiko Tani, Masanori Hangyo, Satoshi Teramura, Toshiro Izu, Naohide Tomita. Degradation Diagnosis of Ultra-High-Molecular Weight Polyethylene with Terahertz-Time-Domain Spectroscopy. Applied Physics Letters. 85(22):5194-5196, 2004
- 18) Nobuyuki Shibata, Naohide Tomita and Ken Ikeuchi. Gamma-Irradiation Aggravates Stress Concentration along Subsurface Grain Boundary of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene(UHMWPE) under Sliding Fatigue Environment. Bio-Medical Materials and Engineering. 13:35-45, 2003
- 19) Nobuyuki Shibata, Naohide Tomita and Ken Ikeuchi. Microscopic Destruction of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene(UHMWPE) under Uniaxial Tension. Bio-Medical Materials and Engineering. 13:47-57, 2003
- 20) 園部正人, 青木秀之, 勝呂 徹, 服部耕台, 吉川隆章, 高倉義典, 富田直秀. 骨髄間質細胞に対するフルボスタチンの骨形成促進効果. 骨折. 25(1):57-60, 2003
- 21) 森田希子, 富田直秀, 金妹明, 渡辺英一郎, 永田昌也, 尾坂明義, 蔵本孝一. ビタミン E 添加 UHMWPE 材料の疲労特性—人工関節における life-off を考慮して. 生体材料. 21(5):403-409, 2003
- 22) Nobuyuki Shibata, Naohide Tomita, Naoki Onmori, Koji Kato, Ken Ikeuchi. Defect Initiation at Subsurface Grain Boundary as a Precursor of Delamination in Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene. J Biomed Mater Res. 67A:276-284, 2003
- 23) 園部正人, 富田直秀, 青木秀之, 原田恭台, 森田有亮, 池内 健, 服部耕台, 玉田 靖, 脇谷滋之, 勝呂 徹. 硫酸化ヒyaluronin を用いた軟骨再生の試み. 日本臨床バイオメカニクス学会誌. 24:45-51, 2003
- 24) 森田有亮, 富田直秀, 青木秀之, 園部正人, 脇谷滋之, 玉田 靖, 勝呂 徹, 池内 健. 再生軟骨の潤滑特性. 日本臨床バイオメカニクス学会誌. 24:53-58, 2003
- 25) Hideyuki Aoki, Naohide Tomita, Yūsuke Morita, Koji Hattori, Yasuji Harada, Masato Sonobe, Shigeyuki Wakitani and Yasushi Tamada. Culture of Chondrocytes in Fibroin-Hydrogel Sponge. Bio-Medical Materials and Engineering. 13(4):309-316, 2003
- 26) Yūsuke Morita, Naohide Tomita, Hideyuki Aoki, Shigeyuki Wakitani, Yasushi Tamada, Toru Suguro and Ken Ikeuchi. Evaluation of Dynamic Visco-Elastic Properties during Cartilage Regenerating Process in Vitro. Bio-Medical Materials and Engineering. 13(4):345-353, 2003
- 27) Hideyuki Aoki, Naohide Tomita, Yasuji Harada, Koji Hattori, Masato Sonobe and Toru Suguro. The Report of the Cartilage Regeneration Using Total Joint Regeneration System(Internal-Fixator Type). Bio-Medical Materials and Engineering. 13(4):411-417, 2003
- 28) Shibata N, Tomita N, Ikeuchi K. Numerical Simulations on Fatigue Destruction of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Using Discrete Element Analyses. Journal of Biomedical Materials Research Part A. 64A(3):570-582, 2003

システム工学講座 生産システム工学分野

教授 山品 元, 講師 水山 元

1. はじめに

人間生活をゆたかにしていくためには、市場にいまだ存在しない革新的な製品を常開発し続けることにより、新しいニーズを創出し、それらの製品の生産を技術的・経済的に可能とする生産システムを構築していく必要がある。本研究室は、人間生活をゆたかにする高度なものづくりの深化・発展に向けて、革新的な新製品開発の標準化手法、開発・設計で品質・コストを織り込む手法、設備開発運用に伴うリスクの分析法と対策、統括的成本・プロフィット展開法などの研究を行っている。

2. 統括的成本・プロフィット展開法

本研究室で開発したコスト展開法は、現在、実用期に入っている。このコスト展開法の特徴は、ソフトサイエンスに属すると言えるもので、ムダや損失などを同定できる「目」のレベルによって適用結果は変わってくる。また、逆にそれほど目を持っていなくても適用できるところに利点があるとも言える。この方法は、従来の TQC, TPM, JIT などの欠陥を補うものとして、欧米で急速に普及している。イギリス BPB 社の 53 の工場では、製造コスト管理に使用され、フランスのシャンベリ工場では、第 1 回目のコスト展開で 1.8M ユーロ、2 回目の展開で 3.2M ユーロ、3 回目の適用で 3.7M ユーロのロス摘出の効果をあげている。これは、コスト展開を行う人の、見るべき「目」の成長によっている。ヨーロッパ キャンベル社は、これに基づいた、管理会計に用いられるコスト管理コンピュータソフトを開発している。また、世界最大手の鉄鋼会社 Arcelor 社で適用研究が進められ、全社展開がはかれることになった。さらに、イタリア FIAT 社が適用研究を始めることになった。

適用上の課題として浮かび上がってきたものは、資本効率についての追加的考察と、製造能力と市場の需要との乖離から生じる機会損失についての配慮である。我が国では、間接コストの適正化についての指針が強く求められている。また、コストは製品開発・設計とも強く関連しており、特に、この分野での品質コストの取り扱いについての配慮が必要になってきている。この世界では、投資リスクとの関連も重大で、これらについて、現在、論文をまとめつつあるが、多くの要因が重なっており、理論の検証には相当の期間を必要としているのが現状である[1]。

3. 革新的な新製品開発の標準化手法

革新的製品の開発を支援するためのツールとして、近年、TRIZ が注目を集めており、それによる製品革新の成果もいくつか報告されている。TRIZ は、所定の形式で表現された技術課題に対して革新的解決策のヒントを提示するものであり、これを製品開発に利用するためには、「革新によって解決すべき技術課題の同定」および「TRIZ で取り扱い可能な形式での当該技術課題の定式化」が必要となる。しかしながら、それらの作業は、開発担当者の属人的なアプローチに委ねら

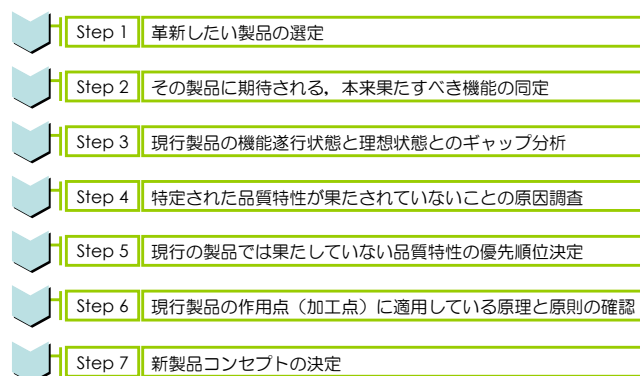


図1 製品革新のための7ステップ

れているのが現状であり、TRIZ による製品革新の最大のネックとなっていた。そこで本研究室では、それらのネック作業を系統的に実施することによって、TRIZ に基づく革新的製品開発プロセスを標準化するための研究を進めている[2][3]。

4. 設備開発運用に伴うリスクの分析法と対策

近年、製造企業において、設備に関する事故や不祥事が後を絶たない。その中でも特に、「人間の非合理的な行動」による事故や不祥事が多発している。人間の非合理的な行動とは、隠蔽やデータ捏造や手抜きなど「人間の意図的な、社会に反する行動」を指す。HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique) や THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) など、従来のヒューマンエラーに対する手法は、主にスキルベースのエラーやミステイクなど善意のもとでのエラーに対する手法であり、人間は非合理的な行動を起こすという前提のもとに設計されておらず、人間の非合理的な行動による事故や不祥事に対応しきれない。また、将来に発生しうる事故や不祥事は一般的に「リスク」という形で表され、従来の ETA (Event Tree Analysis) や FTA (Fault Tree Analysis) に見られるようなリスク評価方法は主に問題となる事象の発生の可能性と、事象が発生した場合の損害の大きさをもとにリスクを評価していた。しかしながら、人間の非合理的な行動による事故や不祥事は、ふたつの理由から従来のリスク評価方法では評価しきれない。一つ目は、人間の非合理的な行動は、一度発生するとたとえその時事故や不祥事が発生しなくても、潜在的なリスクとして組織に堆積する性質をもっていること。二つ目は、人間の非合理的な行動は、一度発生すると次第にその行動が習慣化する性質をもっていること、である。

以上のような認識から、本研究室では、設備に関する人間の非合理的な行動によるリスクを合理的に評価し、管理する手法を提案した。提案手法では、まず設備に関するリスクを体系的に把握し整理する。次に設備に関するリスクの中でも「人間の非合理的な行動」によって生じるリスクを詳細に把握し、評価する。また、各リスクに対して有効な対策を分析し、整理する。さらに、対策の効果を考慮したうえで、適切なリスク管理計画の策定を行う[4]。

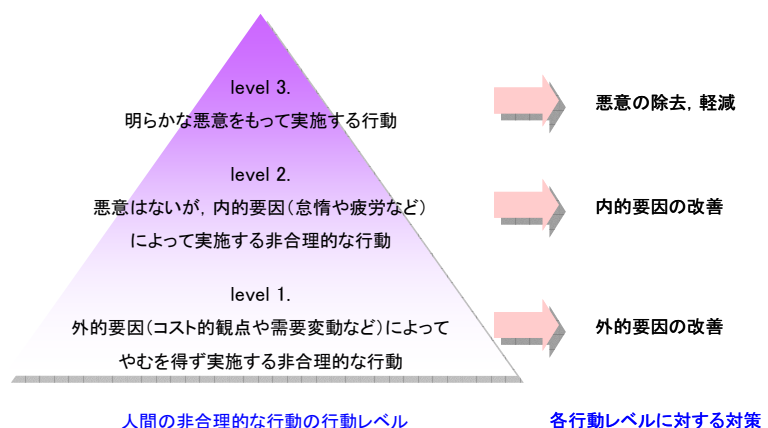


図2 人間の非合理的な行動のレベル

参考文献

- [1] Yamashina, H. and Kubo, T.: Manufacturing Cost Deployment, Int. J. Prod. Res., vol.40, no.16, pp.4077-4091, (2002).
- [2] Yamashina, H., Ito, T. and Kawada, H.: Innovative Product Development Process by Integrating QFD and TRIZ, Int. J. Prod. Res., vol.40, no.5, pp.1031-1050, (2002).
- [3] 山品 元, 石田賢一, 水山 元: 本質的対立に着目した新たなIPDPの提案, 精密工学会誌, vol.71, no.2, pp.216-222, (2005).
- [4] 荒井直樹, 山品 元: 人間の非合理的な行動を前提とした設備リスクマネジメントに関する研究, 平成16年度日本設備管理学会秋季研究発表大会論文集, pp.43-44, (2004).

教授 松原 厚, 助手 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。精密計測加工論研究室では、「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システムの自動化・知能化をすすめる方法について主に研究開発をおこなっている。以下では、これらの研究テーマについて簡単に紹介する。

2. 知能化 NC 工作機械の開発

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、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、及びそれに必要とされる要素技術、制御技術、計測技術の研究・開発を行っている。

本年度は特に、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た。NC工作機械が本来備えている内部センサであるサーボモータ及び主軸モータの電機子電流センサのみを用いて、モータに対する外乱の組み合わせとして切削抵抗を推定する手法について、実用化の観点から研究を行った。

また、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、主軸の動的な剛性を測定・評価する手法を提案した。この動的剛性の測定を基礎として、切削抵抗の推定に応用することが可能となる。

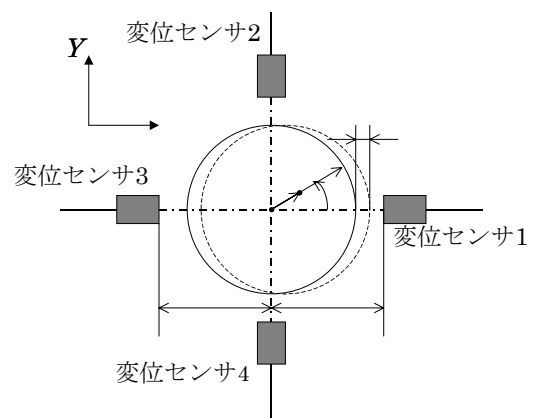


図1 主軸変位のインプロセス測定による主軸剛性の測定、及び切削抵抗の推定法の模式図

2. 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）、高精密加工機（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。

本年度は、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について、高精度化の可能性及び限界について研究するため、高精度ボールねじと空気静圧案内を持つテストスタンドを製作（図2参照）、特にボールねじの振れまわりなどの問題について検討した。

また、超精密加工機や高精密加工機の運動精度を検定する手法についても研究を行った。1次元の位置決め精度を測定するためには、レーザ干渉計など十分な測定精度を持つと考えられている測定機器が普及しているが、真直度や直角度などの幾何誤差を検定するための手法は全く確立されていないのが現状である。本研究では、交差格子スケール(KGM)（図3参照）を用いて超精密加工機や高精密加工機の幾何誤差を検定する手法を構築することを目的として、その基礎となる交差格子スケールの測定誤差の自己較正（セルフキャリブレーション）法を提案した。

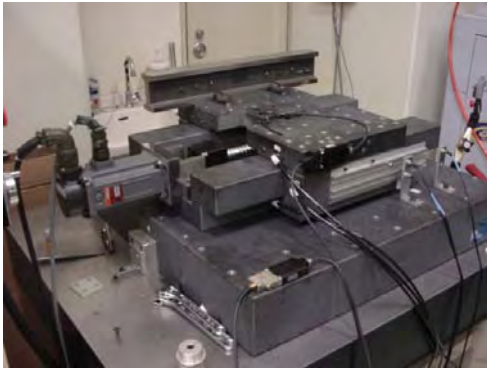


図2 ボールねじ駆動の超精密位置決め装置のテストスタンド

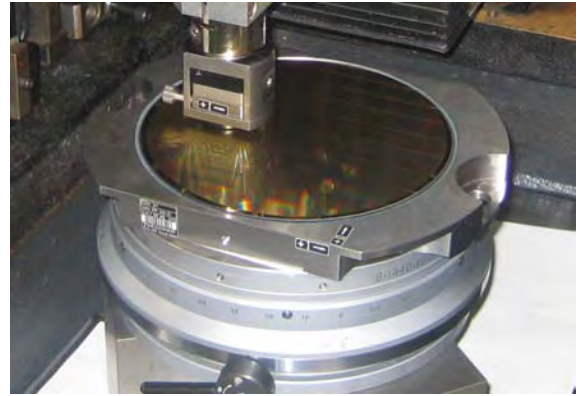


図3 交差格子スケールによる運動精度の測定

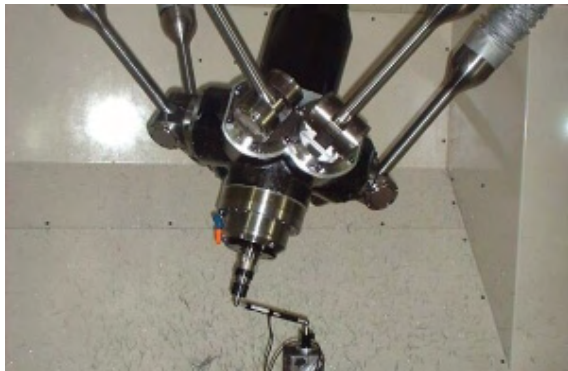


図4 パラレル機構工作機械（オークマ（株）製）の DBB 法による運動精度測定



図5 提案した工具経路生成法を用いた加工試験

3. パラレル機構工作機械の動作制御

互いに直交する送り駆動軸を基本としている従来の工作機械の機構と完全に異なり、回転ジョイントとリンクにより機械を駆動されるパラレル機構工作機械が近年提案されている(図4参照)。本研究室では、位置決め精度や剛性に関するパラレル機構の課題を克服するため、主に動作制御の観点からパラレル機構工作機械の高精度化について研究を行っている。特に、円弧運動誤差測定(DBB 測定)に基づく機構パラメータのキャリブレーション法、重力による部材の変形に起因する運動誤差の補正法、外乱オブザーバの構築、などについて顕著な成果をあげている。

4. 金型加工のための知能化 CAM システム

高硬度材の金型加工を非熟練者であっても高能率に行うため、知能化 CAM システムの構築に必要な基礎的技術について研究している。特に、切削抵抗の制御を基本とした加工条件の最適化、固定サイクルを基本とした工程設計法、工具への負荷の変動を抑制し、より高い加工精度を得るための工具経路生成法(図5参照)などについて研究を行っている。

5. NC 工作機械送り系のサーボ制御

NC 工作機械の高速・高加減速化に伴い、高精度位置決め装置においてサーボ制御の重要性はますます高まっている。このような高精度位置決め技術に必要とされる制御技術を研究し、その効果を工作機械の振動特性を模したテストスタンドや、実機において検証している。

知能機械システム講座 機素工学分野

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 動力伝達機械要素の振動騒音性能・強度性能評価技術

乗用車などでは, 動力伝達機械要素の振動に起因する騒音が商品性を左右するため, その低減が重要な課題となっています. また, 当然ながら, 高い信頼性が同時に求められます. このような厳しい要求を満足する機械装置を開発するためには, 現実の現象と相関のとれたシミュレーションによる検討が必要となります. 本研究室では, 動力伝達機械要素である平歯車・はすば歯車・かさ歯車・ハイポイドギヤの振動騒音性能・強度性能を評価するため, 動作面のサブミクロン単位の幾何学的3次元形状を考慮したシミュレーション技術を開発しています. (図1)

この技術は乗用車や船舶など幅広い機械に応用されています. (図1)

2.2 低振動騒音化・高信頼性設計法の開発 現実の機械部品には, 製造誤差や組付け誤差, 支持部品の弾性変形のため, 数ミクロン単位の誤差が存在します. 歯車の振動騒音性能はミクロンオーダーの歯面3次元形状によって決まるため, これらの誤差は強く影響することになります. そのため, これらの誤差を考慮した設計が求められます. 本研究室では, 製造誤差という不確定要因が存在する条件下でも, 優れた振動騒音性能と十分な信頼性を保証する歯車を設計するための技術開発をおこなっています. (図2)

2.3 損傷に関する調査・研究 動力伝達機械要素である歯車にはピッチング, スカフティングなどと呼ばれる多種多様な損傷が発生します. これらの損傷には, 温度, 湿度, 潤滑状況, 装置姿勢, 回転数, 負荷, 歯面粗さな

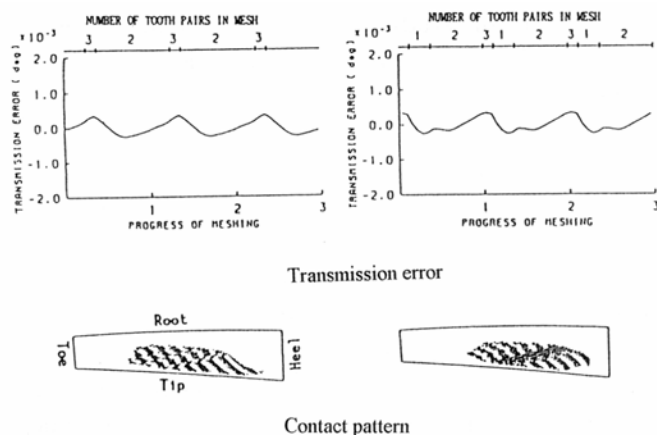


図1 歯面形状精度を考慮したハイポイドギヤの伝達誤差と歯当たりの計算結果

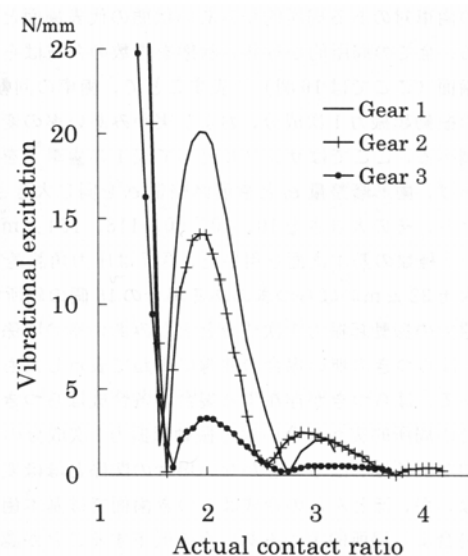


図2 はすば歯車の実かみあい率と振動起振力の関係

どの要素が複雑に絡み合って影響するため、損傷の予測と防止は容易ではありません。本研究室では、このような歯車損傷の特性・進展過程の調査をおこない、種々の設計条件に対応可能な高信頼性歯車の設計法の開発、機械システムに及ぼす影響の評価、トラブル対策法・メンテナンス法の確立などの研究をおこなっています。(図3)

2.4 切削工具の機構解析と寿命向上 環境にやさしい機械加工を実現し、製造コストを低減するため、切削油を用いないドライ切削が採用されつつあります。しかしながら、ドライ切削では切れ刃の損傷や加工面品質不良などの新たな問題が発生しており、製造現場の大きな課題となっています。本研究室では、ドライ切削機構解析法の開発、切りくず挙動の分析などを行い、高度なものづくりの実現を目指しています。(図4)

2.5 機械部品の3次元形状のナノレベル計測

動力伝達機械部品の性能は、その動作面のサブミクロン($1\mu\text{m}$ 以下)単位の3次元幾何形状精度によって決まるため、その計測技術は産業上不可欠なものです。また、ISOなどの製品の品質保証体制の根幹をなす国家標準に対しては、ナノレベルの超精密計測技術が必要とされます。本研究室では、機械部品の動作面の3次元曲面形状のナノレベル測定技術の開発を行い、機械分野の基盤技術の確立と品質保証に対する国家標準、ISO規格提案を目指しています。(図5)

参考文献

- [1]小森雅晴・久保愛三・高橋知之・田中貴文・市原義雄・小宮山優, 歯車の歯の側端や歯先稜の接触による損傷(第2報, 歯側端と接触する表面に発生するピッチング), 機論, 69-685, C(2003), 2505-2513.
- [2] Masaharu KOMORI, Masaaki SUMI and Aizoh KUBO, Remedies for Cutting Edge Failure of Carbide Hob Due to Chip Crush - Some Results of Evaluation by This Method in Automotive Industry -, Proceedings of ASME 9th PTG Conf., Chicago, 2003.
- [3] 小森雅晴・久保愛三・川崎芳樹, 圧力角ならびに歯筋の傾きがばらつくはすば歯車の振動最適化歯面設計法, 機論, 66-646, C(2000), 1959-1966.
- [4] 汪中厚, ハイポイドギヤの運転性能シミュレーションと性能解析に関する基礎的研究, 京都大学博士論文, 1998.

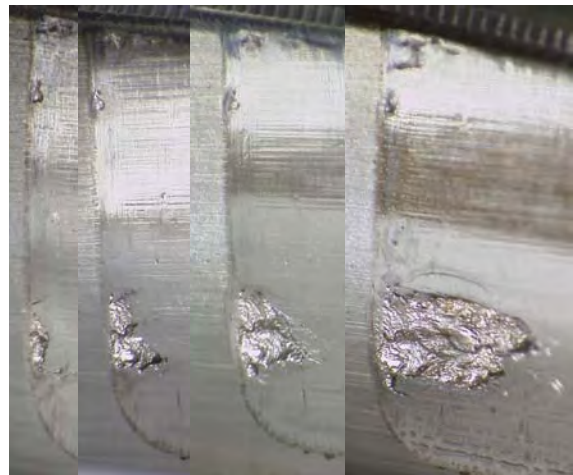


図3 接触端部からの表面損傷の進展



図4 切削工具ホブとその損傷

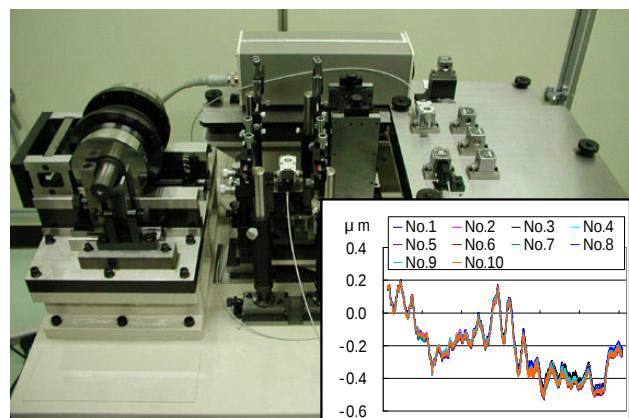
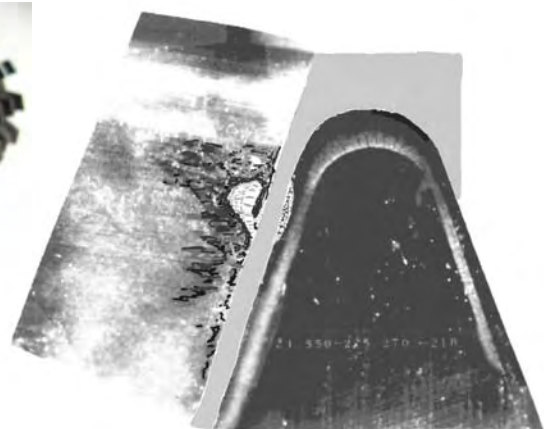


図5 超精密幾何形状計測装置