

---

---

複雑系の制御・設計論グループ

---

---



# ニホンザルの神経筋骨格モデルに基づく歩行生成

工学研究科航空宇宙工学専攻 青井 伸也

**Abstract:** Animals generate locomotion adaptive to various environments by cooperatively manipulating their complicated and redundant musculoskeletal systems. To elucidate such intelligent locomotor mechanisms, we study locomotion in the Japanese monkey based on numerical simulation. In particular, we constructed its sophisticated skeletal model based on the anatomical data obtained from CT and achieved physical kinematics during locomotion based on motion capture data. By generating locomotion by numerical simulation based on the skeletal model, kinematic data, and neurophysiological knowledge, we clarified how adaptive locomotion is achieved through dynamical interactions between the skeletal system, the nervous system, and the environment.

**Key words:** Locomotion, Japanese monkey, neuromusculoskeletal model, CPG, Numerical simulation

## 1. はじめに

動物は、冗長で複雑な筋骨格系を巧みに動かし、多様な環境に対して適応的な歩行運動を実現する。こうした動物の優れた歩行生成メカニズムの解明に向けて多くの研究が行われてきたが、従来、歩行神経回路網の形態や活動を直接計測することでアプローチする神経生理学的研究と、ロボットやそのシミュレーションモデルを用いて制御系を構成し歩行を再現することでアプローチする工学的研究がそれぞれ独立して行われてきた。しかしながら、歩行運動は神経系と筋骨格系、そして環境との力学的相互作用によって形成される秩序だった運動であり、神経活動記録のみから歩行の支配原理を理解するには限度がある。一方、ロボットの運動制御は生体の運動制御とは直接対応がつかないものではなく、ロボットが歩くという事実は必ずしも生体の運動原理の理解につながってはいない。動物の歩行生成原理を真に理解するためには、生物学的データに基づく要素論的方法と、力学に基づく構成論的方法の両アプローチを融合した新しい研究パラダイムを構築することが不可欠である。

本研究では、動物の筋骨格構造の解剖学的データに基づく詳細な数理モデルと、神経生理学的知見に基づく歩行神経制御系の数理モデルを構築し、両力学系の機能的な統合により発現する歩行運動を数値シミュレーションを通して実現することで、動物の適応的歩行運動生成原理の解明を目指している。特に本研究では、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、ニホンザル (*Macaca fuscata*) の歩行を対象に研究を進めている [11]。これは、1. ニホンザルが歩行神経生理学の実験動物として用いられているため [7, 8]、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ること、2. ニホンザルの4足歩行から2足歩行への遷移が、2足歩行の起源を探る上で人類学的に興味深い研究対象となっていること [9, 10]、3. ヒトと系統的に近い霊長類の解析によって得られる知見は、ヒトにも直接応用可能であると期待されること、による。ここでは特に、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、ニホンザルの実現する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、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考察を行ったことについて報告する。

## 2. ニホンザルの骨格モデル

近年、生物・生理学からの知見の蓄積が進み、また計算機、計算アルゴリズムの発展にともなって、対象とする生体の数理モデルに基づいた数値シミュレーションを用いた研究が盛んに行われるようになってきた。しかしながら、そのほとんどの研究において、対象とする生体の骨格系に対して単純な直交系直鎖型の剛体リンクモデルに基づいて研究が行われている。生体の骨格の形態は、その運動・移動様式と密接な対応関係にあり、複雑な骨格系を協調的にかつ巧みに動かす

ことによって運動を実現している．この生体の動きには，骨格系の構造が規定する運動学的・生体力学的拘束が強く反映されており，生体の複雑な運動を解析するためには，この拘束を正確に再現することが重要となる．そのため，これまでのような単純なモデル化では，生体の骨格系が持つ構造的特性を十分に反映した解析を行うことは困難であった．

本研究では，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た．具体的には，X線ヘリカルCTスキャナ TSX-002/41(東芝メディカル)を用いてスキャンし，得られた0.5mm間隔，計1935枚の連続断層画像から，全身の形状を再構成した．ここで，断層画像のピクセルサイズは0.75mmであり，詳細な形状情報を必要とする関節部や手・足部節については，各部位ごとに高解像度(0.2mm)でスキャンし直し，そのデータを合成した．図1(a), (b), (c)はそれぞれ，断層画像，全身の表面形状，骨形状である．

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．初めに，各骨の形態情報から主軸を計算し，それぞれの骨座標系を定義した．そして，各関節面の形状を二次曲面で近似し，骨座標系に対する二次曲面の向きから関節座標系を定義した．この関節座標系における座標軸から関節の回転軸を定義し，二次曲面頂点の曲率から回転中心を決定した．例えば，図2は肘部における関節面形状の近似を示している．上腕骨遠位部と尺骨近位部はそれぞれ双曲放物面により近似され，その近似結果を元に関節軸と回転中心を推定し，それらが一致するように両者を関節させている．このようにして，すべての関節に対して，CTスキャンから求めた関節面の3次元形状情報に基づいて隣接する骨を関節させることによって，ニホンザルの持つ運動学的な幾何学的拘束を表現した．

図3に構成した全身骨格モデルを示す．本研究では，ニホンザルの全身骨格を，体幹部4節(頭部，胸郭，腰部，骨盤)，前肢左右各5節(肩甲骨，上腕骨，尺骨，橈骨，手部)，後肢左右各3節(大腿骨，脛骨，足部)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た．体幹の関節は，それぞれ3軸の関節としてモデル化している．肩甲骨の運動は，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，実際には歩行の推進力の生成にとって重要な要素であることが指摘されている[5]．そのため本研究では，胸郭面に沿って並進し，その面に垂直な軸まわりに回転する肩甲骨の自由度を3軸の回転関節でモデル化した．ここに鎖骨や筋が付着することによって，実際の肩関節の幾何学的な構造制約を再現することができる．前肢の肩甲骨上腕関節は2軸，肘関節と橈尺連結は1軸，手首(橈骨手根関節)は2軸の関節で表現した．後肢の股関節，膝関節，足首(距腿関節)は，それぞれ3軸，1軸，2軸の関節でモデル化した．したがっ

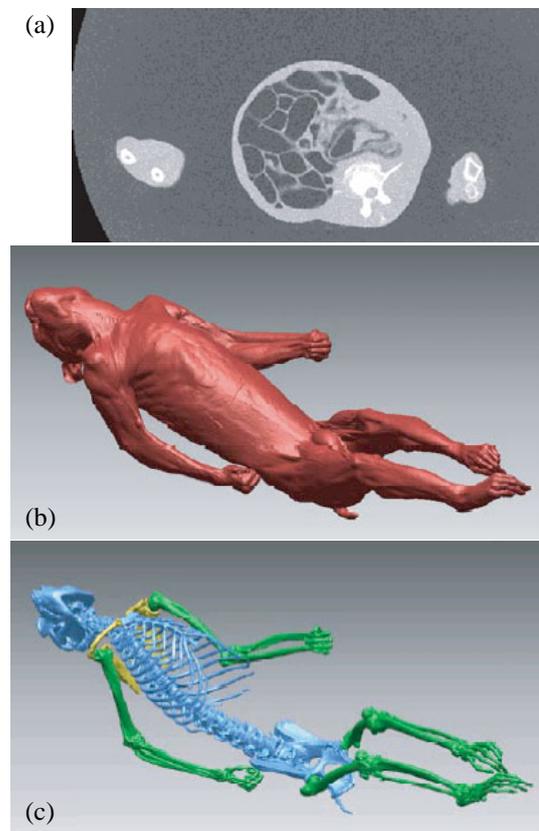


図1: 3D representation of the musculoskeletal system of a Japanese monkey. (a) Cross-sectional CT image, (b) body surface data to calculate inertial parameters, (c) skeletal data to define link configuration.

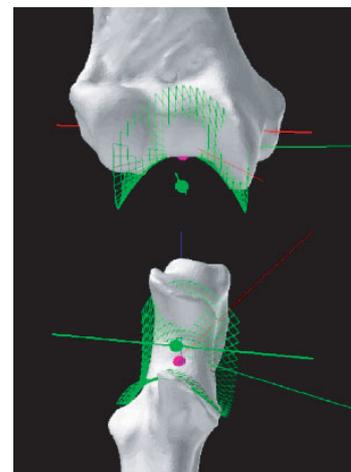


図2: Approximation of elbow joint articular surfaces using a quadric function.

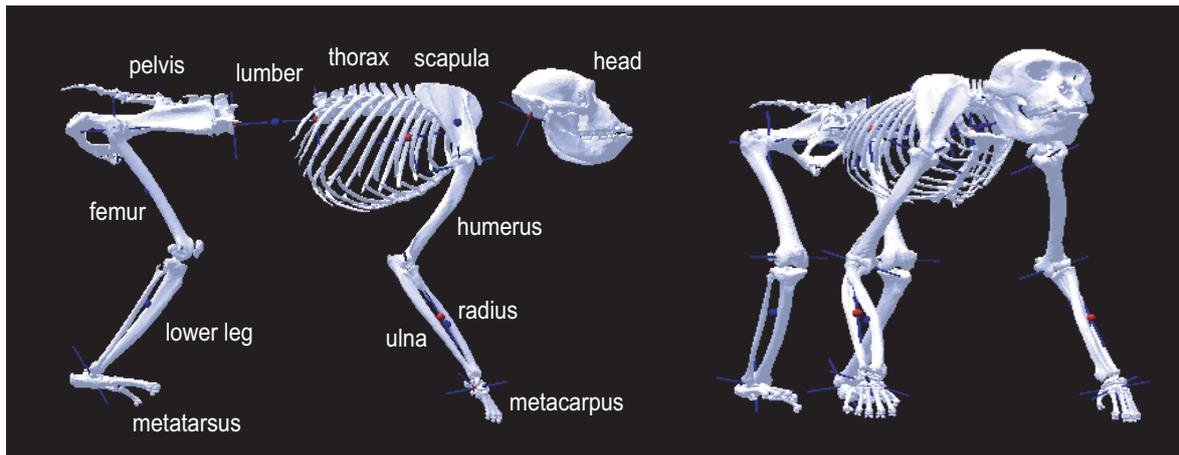


図 3: Kinematic description of the whole body skeleton of a Japanese monkey as a chain of links.

て，モデルの関節による内部自由度は計 39，そして全体の並進・回転を加えて，モデルの全自由度は計 45 となる．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，関節の回転軸が骨座標系の軸と必ずしも一致していないことが分かる．

### 3. キネマティクスデータに基づく歩行再現

前述したように，生体の骨格の形態は，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．そのため，生体の詳細な骨格モデルに基づいた解析を行うことで，実現する運動をより詳細に再現することができ，また骨格構造と運動学的・生体力学的拘束から規定される運動機能を上手く表現することができる．前節で述べたように，本研究では実際のニホンザルの計測データを用いることで，骨格系の詳細な数理モデルを構築した．そのため，その詳細なモデルに基づいて，次に実際のニホンザルが実現する歩行中の運動を運動学的に再現することが重要となる．

歩行運動は，生体の骨格系を形成する多数の骨が複雑に連動して動くことで実現されており，実際にそれらを計測し，解析することは非常に困難である．そこで，本研究では以下の方法を用いることで，ニホンザルの歩行中の運動を推定した．まず，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た(図 4(a))．このときのトレッドミルの速度は約 3.0 km/h であり，ニホンザルは歩行周期がほぼ 0.96 s の歩行を実現した．その際，ニホンザルには片側 8 個のマーカー(第五中足骨頭，腓骨外顆，大腿骨外顆，大転子，肩峰，上腕骨外顆，尺骨茎状突起，第五中手骨頭)を取り付け，撮影された画像データからそれらの位置をデジタル化し，その 3 次元位置の時系列データを求めた．図 4(b) は，ニホンザルに取り付けたマーカーを，前節においてモデル化した骨格系に対応させて示したものである．得られたマーカーの運動データを，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が可能となる．具体的には，各時刻において，計測したマーカー位置と骨格モデル上での対応する点の距離の自乗和と，各関節の可動域中心からの偏差の自乗和を最小化するモデルの状態を，準ニュートン法を用いて計算した．図 5 は推定した歩行運動の様子である．マーカーの持つ位置情報は，骨格モデルの自由度を全て規定するには十分ではないが，解剖学的な制約を利用する，すなわち，各関節の運動学的拘束をその形状に基づいて正しく規定し，また関節可動域のなるべく中心で運動を推定することで，解剖学的にも無理のない自然な骨格運動を推定できていることが確認できる．

### 4. 歩行生成シミュレーション

歩行運動のようなリズム運動は，脊髄に存在するリズム生成神経回路網(CPG)が発生する運動指令により生成されていると考えられている[12]．この CPG は，様々な感覚器からの情報に基づいて発生するパターンを協調的に変化させ，多様な環境や外乱に対して適応的な歩行を実現する．

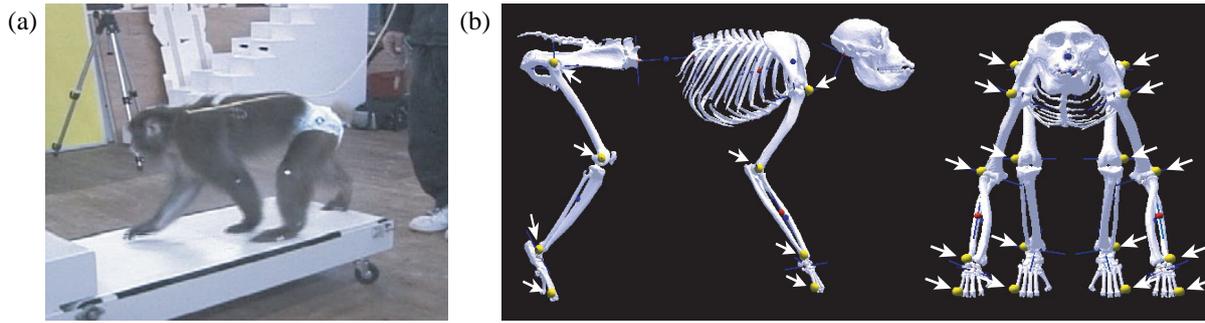


図 4: Acquiring kinematic data during locomotion in the Japanese monkey. (a) A Japanese monkey walking on a treadmill, (b) sixteen markers attached to the monkey displayed on the skeletal model.

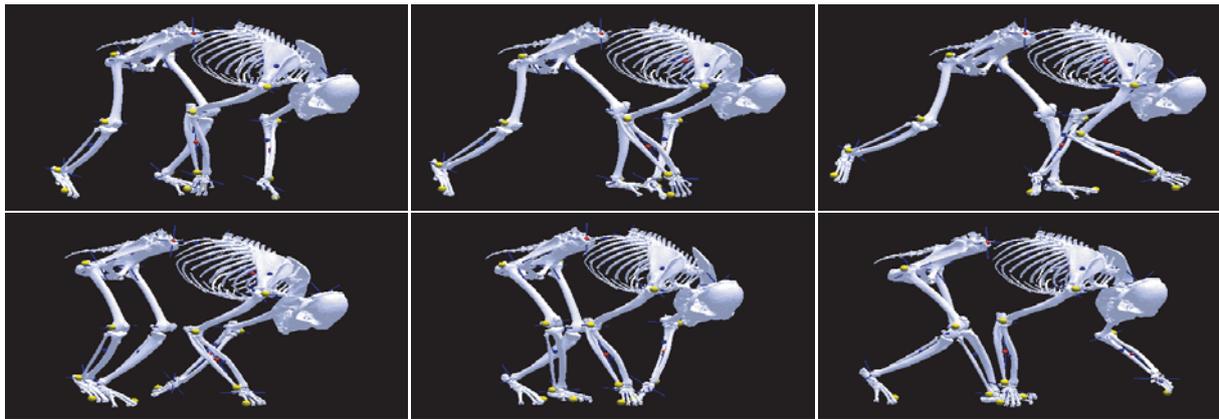


図 5: Estimated skeletal states in walking

CPG が実際内部において、具体的に何をコードしているのかは必ずしも明らかにはなっていないが、近年、脊髄から小脳に脚の感覚情報を投射する神経の生理学的研究から、自己受容器からの局所的感覚情報は、介在ニューロンにより脊髄レベルで統合され、脚全体の大域的な運動状態、すなわち、脚の最近位関節から接地点を結ぶ軸（脚軸）の向きと長さに変換されてコードされていることが明らかとされている（図 6）[4]。このことは、脚の運動パターンを適応的に変化させるための求心性信号として、個々の筋や関節といった多数の局所的感覚信号ではなく、脚のキネマティクスを表現する少数の大域的信号が用いられていることを示唆している。一方、Grasso らは、ヒトの前進 2 足歩行と後進 2 足歩行では、筋活動パターンは大きく異なるものの、関節角度変化パターンはほとんど変化しないことを示した [6]。このことは、歩行運動の生成もキネマティクスに基づいて行われていることを示唆している。これらの知見は、1. CPG は内部において脚のキネマティクス、すなわち、脚の中心軸の向きと長さを表現しており、それに基づいて運動指令が作られていること、2. CPG 間の相互作用と脚からの大域的感覚信号により、CPG の位相がダイナミックに変化することによって環境や外乱に対して適応的な歩行が生成されていること、を示唆していると考えられる。

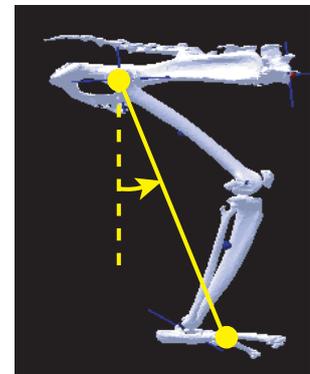


図 6: Length and orientation of the hindlimb axis that defines the foot position relative to the hip

本研究ではこれらの知見を参考にして、これまでに構成した二ホンザルの詳細な骨格モデルとその身体運動に基づいて、動力学的に歩行運動を実現させた。具体的には、CPG の数理モデルとして以下のように振動子を用いて歩行を生成した [1, 2, 3]。初めに、四肢と体幹に位相  $\phi_i$  を持つ振動子をそれぞれ独立に配置した。ここで、添え字  $i=RF, LF, RH, LH, TR$  はそれぞれ右前肢、左前肢、右後肢、左後肢、そして体幹を示す。前節で推定した身体運動から、四肢と体幹の運動はほぼ二

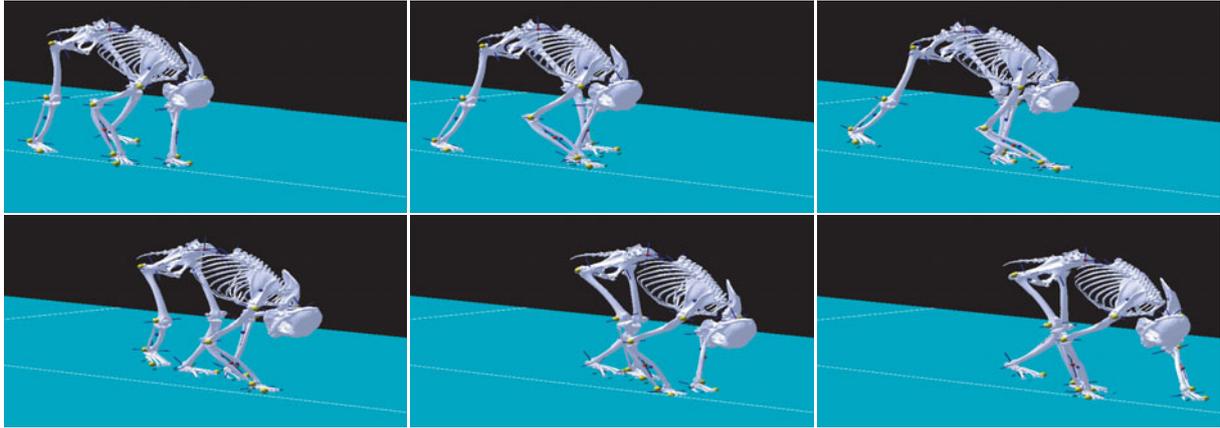


図 7: Simulation result of locomotion in the Japanese monkey.

ホンザルの実現する歩行周期に一致する周期 ( $= T$ ) を持った周期運動を実現していることが確認できる．そこで、それぞれの振動子は一定の角速度でその周期運動を行うものとし ( $\dot{\phi}_i = 2\pi/T$ )、以下のようにして推定した身体運動をこの振動子の位相を用いてコードした．まず、前肢に関しては肩関節から手部、後肢に関しては股関節から足部までの距離  $L_i$  と方向  $\theta_{i1,2,3}$  をそれぞれ対応する振動子の位相でコードした．すなわち、この距離と方向を  $L_i \equiv L_i(\phi_i)$ 、 $\theta_{i1,2,3} \equiv \theta_{i1,2,3}(\phi_i)$  として、振動子の位相からの写像として表現した．次に、この距離と方向を実現している四肢の関節の運動を同様にして振動子の位相でコードした．そして、体幹の運動に関しては、その周期運動を同様にして体幹に配置した振動子の位相を用いてコードした．すなわちここでは、時刻に対応して与えられていた身体キネマティクスを、振動子の位相を用いて表現したことになる．

動力学的に歩行運動を実現する上で最も重要な要素は、外界との力学的な相互作用である．ニホンザルの歩行運動において、四肢の運動は地面に対して浮いている遊脚相と、接触している支持脚相から構成され、この支持脚相において地面との接触を通して力学的な拘束を受けることで身体を支え推進力を得て歩行を実現している．この四肢の運動においては、手足が地面に接地して地面からの力学的な拘束を受けることによって、運動学的に遊脚相から支持脚相に運動を切り替えている．しかしながら、動力学的に歩行運動を実現させる際に、例えニホンザルの歩行中の運動を再現した身体運動を用いたとしても、実際ニホンザルが実現している運動どおりのタイミングで手足が地面に接地して遊脚相から支持脚相に切り替わるとは限らず、それよりも早いタイミングや遅いタイミングで地面に接地する可能性がある．遊脚相と支持脚相では、四肢にかかる力学的相互作用が大きく変化するため、このタイミングのずれは、動力学的に安定な歩行を実現する際に大きな影響を及ぼす．すなわち、安定な歩行運動の実現には、遊脚相から支持脚相へ切り替えが運動学的にかつ動力学的に整合性の取れたものとなっている必要がある．

そこで本研究では、身体運動を時刻に変えてコードした振動子の位相を用いて、次のようにしてこの調整を行った．四肢の地面に対する接地条件はニホンザルの姿勢状態と、その四肢のキネマティクス、すなわち、腕や脚軸の長さと言きで決定される．そのため、この軸の長さと言きが、歩行において運動学的かつ動力学的に整合性の取れたものとなっている必要がある．そこで、遊脚相において実際に手足が地面に接地した直後に、対応する振動子の位相を支持脚相を開始する位置までリセットすることで、これらの長さと言きを支持脚相の運動に切り替えるように変化させた．そしてこれに伴い、この軸の長さと言きを実現するように、それぞれの関節の運動も調整した．これはすなわち、上述した神経生理学的知見に基づいて、内部状態として身体と環境との力学的相互作用から適応的に変化する振動子を用い、そこからの運動指令に基づいて身体運動を生成することで、動力学的に安定な歩行を実現させようという意図である．

これらを用いて実際に数値シミュレーションから動力学的に歩行を生成した結果を図 7 に示す．この結果から、ニホンザルの詳細な骨格モデルと身体キネマティクス、そして神経生理学的な知

見に基づいて歩行を生成し、身体と環境、そして振動子系との力学的な相互作用から適応的に安定な歩行が生成されることが確認できた。

## 5. おわりに

動物は、複雑な筋骨格系を巧みに協調させ、適応的な歩行を実現している。こうした動物の優れた歩行生成知能の解明に向けて、本研究ではニホンザルの歩行を対象に数値シミュレーションを通して考察を行った。特に、ニホンザルの解剖学的データに基づいて詳細な骨格モデルを構築し、歩行中のデータを用いて運動を解析することで、その骨格形態の持つ運動学的・生体力学的拘束が反映された歩行身体キネマティクスが得られた。そして、これら詳細な骨格モデルと身体キネマティクス、そして神経生理学的知見に基づいて動力的に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が確認できた。

現在、ニホンザルの詳細な骨格系のモデル化だけでなく、解剖学的データに基づいて筋系の詳細なモデル化を行っている。これより、歩行中の筋活動の様子を詳細にシミュレートすることができ、身体筋骨格系、環境、そして神経系の力学的相互作用を通していかにして適応的な歩行が実現されるかについて、より詳細な解析が行える。筋骨格系の形態情報と、その動きを支配する物理学的法則を解剖学的に詳細に記述した本モデルによる解析が、直接計測が困難な生体内の運動中の力学現象と情報処理のメカニズムを明らかにする上で有効なツールになることが期待される。

## 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] S. Aoi and K. Tsuchiya, *Adaptive behavior in turning of an oscillator-driven biped robot*, Autonomous Robots, in press.
- [4] G. Bosco and R.E. Poppele, *Proprioception from a spinocerebellar perspective*, Physiol. Reviews, 81: 539–568, 2001.
- [5] M.S. Fischer, *Locomotory organs of mammals: New mechanics and feed-back pathways but conservative central control*, Zoology, 103: 230–239, 2001.
- [6] R. Grasso, L. Bianchi, and F. Lacquaniti, *Motor patterns for human gait: Backward versus forward locomotion*, J. Neurophysiol., 80: 1868–1885, 1998.
- [7] F. Mori, K. Nakajima, A. Tachibana, C. Takasu, M. Mori, T. Tsujimoto, H. Tsukada, and S. Mori, *Reactive and anticipatory control of posture and bipedal locomotion in a nonhuman primate*, Prog. Brain Res., 143: 191–198, 2004.
- [8] K. Nakajima, F. Mori, C. Takasu, M. Mori, K. Matsuyama, and S. Mori, *Biomechanical constraints in hindlimb joints during the quadrupedal versus bipedal locomotion of *M-fuscata**, Prog. Brain Res., 143: 183–190, 2004.
- [9] M. Nakatsukasa, N. Ogihara, Y. Hamada, Y. Goto, M. Yamada, T. Hirakawa, and E. Hirasaki, *Energetic costs of bipedal and quadrupedal walking in Japanese Macaques*, Am. J. Phys. Anthropol., 124: 248–256, 2004.
- [10] N. Ogihara, H. Usui, E. Hirasaki, Y. Hamada, and M. Nakatsukasa, *Kinematic analysis of bipedal locomotion of a Japanese macaque that lost its forearms due to congenital malformation*, Primates, 46: 11–19, 2005.
- [11] 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.
- [12] G. N. Orlovsky, T. Deliagina, and S. Grillner, *Neuronal control of locomotion: from mollusc to man*, Oxford University Press, 1999.

# 受動的歩行の安定解析と応用に関する研究

工学研究科航空宇宙工学専攻 杉本 靖博

**Abstract:** Animals generate various motions by cooperatively manipulating their complicated and redundant musculo-skeletal systems controlled by the nervous system. To reveal the mechanism with which a steady movement is generated, a lot of researches are performed. In such previous researches, it has been shown that the musculo-skeletal properties themselves are able to provide stability of its motion without the need of a sensory feedback system if the muscle architecture and the parallel elastic elements within a muscle are tuned appropriately. Then, in this study, we show that the condition of stability is greatly eased by limiting the targeted movement to the periodic motion. And, the force-length relationship, which is one of the most famous propriety of muscle, plays a decisive role of realizing of the self stabilizing ability of the musculo-skeletal system.

**Key words:** self-stability, periodic motion, musculoskeletal system, reflex

## 1. はじめに

近年歩行ロボットの研究において McGeer により提唱された Passive Dynamic Walking(受動的歩行)が着目されている [1]. この受動的歩行に関して様々な興味深い現象が起こることがよく知られており, その運動の解析や実際のロボットの歩行制御への応用の研究が数多くなされてきた. そうした研究の中で, 対象を非常に簡単なモデルと限定したり, 線形化したロボットの運動方程式を用いることで, 状態のジャンプを有するシステムとなる受動的歩行の解析的な安定解析を行なわれるようになり, その結果, 近似的ではあるが解析的なポアンカレマップを導出すると, その内部にフィードバック構造を見いだすことができることが示され (図 1 参照), つまりは受動的歩行は「自己安定性」をもつシステムであるといえることがわかってきた [2],

一方, 人を含む動物は, その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している. 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が, 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-筋骨格系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. そうした研究の中で, Loeb により “reflex” という言葉が提唱された [3]. これは, 筋骨格系が持つ固有で非線形な特性に由来する時間遅れのない応答のことをいう. 神経系のフィードバックでは, 神経伝達, 神経情報処理などにより生じる時間遅れが存在しているため, 安定な運動の実現は神経系のフィードバック制御だけでは困難と考えられる. そこで, 筋や骨格構造自体が持つ時間遅れのない reflex な特性が運動の安定性に対しどう寄与しているかに関する研究がいくつかなされている [4, 5, 6, 7]. 特に Wagner らは, ヒトの屈伸運動を対象にした非常に単純なモデルを用いて, 筋肉で駆動される運動が安定となる条件を求め, 筋骨格構造と筋の粘弾性要素が適切に調整されれば, 筋骨格系自身が神経系のフィードバック無しに運動を安定化できる自己安定性を持つことを示した [6].

そこで, 本研究では, 対象とする運動を, 生物の運動の中で最も特徴的なものの一つである周期運動と限定し, さらにフロケの定理を用いることで, Wagner らが求めた自己安定性の条件がどう緩和されるのかを求める. そして, 求められた条件が, 生物学的にどういった意味を持つのかを考察する.

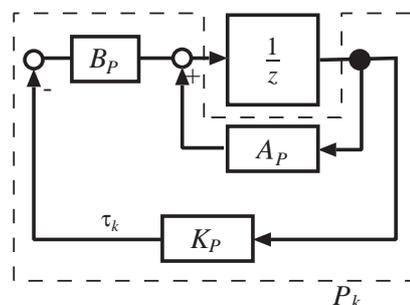


図 1: Implicit feedback structure in PDW

## 2. 筋骨格モデル

**2.1 骨格モデル** 今回対象とするシステムを図2に示す．二つの質量の無視できるリンク（大腿と脛に相当），体に相当する質量  $m$  の質点と筋肉（膝の伸筋）で構成されている．このモデルに腰部の上下運動，つまり，膝の屈伸運動をさせることを考えるが，簡単のため，腰部は水平方向には運動せず，鉛直方向のみの一次元の運動をするものとする．腰部の位置（高さ）を  $X$ ，その速度を  $V = \dot{X}$ ，筋肉の長さを  $l_m$ ，その収縮速度を  $v_m = -\dot{l}_m$  とする．また，膝関節のモーメントアーム  $r$  は一定とする．

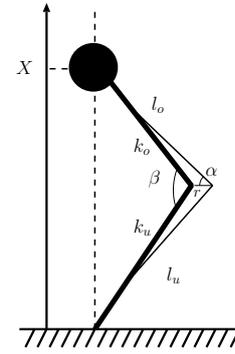


図 2: The geometric model of knee joint

床反力  $F(X, V)$  と筋で発生する力  $f_m(t, X, V)$  を関係づける幾何関数  $G(X)$  は，以下のように求めることができる [8]．

$$F(X, V) = G(X)f_m(t, X, V) \quad (1)$$

$$G(X) = \frac{r \sin \alpha}{l_o l_u \sin \beta} X \quad (2)$$

ただし，

$$\beta = 2\alpha + \arcsin\left(\frac{r}{k_o} \sin \alpha\right) + \arcsin\left(\frac{r}{k_u} \sin \alpha\right)$$

$$X = \sqrt{l_o^2 + l_u^2 - 2l_o l_u \cos \beta}.$$

なお，膝関節の可動域 ( $0 < \alpha < \pi$  ,  $0 < \beta < \pi$ ) より常に  $G(X) > 0$  である．

また， $V$  と  $v_m$  の速度の関係については，同じ  $G(X)$  を用いて次のように書ける．

$$V = \frac{1}{G(X)} v_m \quad (3)$$

## 2.2 筋モデル

本研究では，筋肉の発生する力は，区間  $[0, 1]$  の間で値をもつ筋肉の活性関数  $E(t)$  と最も単純な筋のモデルである Hill のモデル [9] をもとにした

$$f_H(X, V) = \frac{c}{v_m(X, V) + b} - a \quad (4)$$

の積となる，

$$f_m(t, X, V) = E(t)f_H(X, V) \quad (5)$$

で表されるものとする．式 (4) 中の  $a, b, c$  は，実験により求められているパラメーターで，短縮性収縮 ( $v_m \geq 0$ ) と伸張性収縮 ( $v_m < 0$ ) の場合で，異なる値を持つ [8][10]．従って  $v_m$  の正負で  $f_H(X, V)$  は異なるモデルとなるが，後の議論のため， $v_m = 0$  において連続と仮定しておく

また，式 (3), (4) 及び  $v_m$  の正負にかかわらず式 (4) 中の  $c$  が常に正になることより， $f_H(X, V)$  は  $V$  に関して単調減少，つまり，

$$\frac{\partial f_H(X, V)}{\partial V} < 0 \quad (6)$$

という性質を持つ (図 3 参照)．

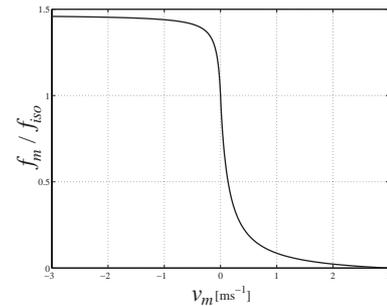


図 3: Hill-type force-velocity relation.  $f_{iso}$  is the isometric force of muscle.

2.3 運動方程式 2.1, 2.2 節にて述べた, 幾何関数  $G(X)$  と筋肉のモデル  $f_m(t, X, V)$  を用いれば, 今回対象とするシステムの運動方程式は,

$$\frac{1}{dt} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V \\ \frac{1}{m}G(X)f_m(t, X, V) - g \end{pmatrix} \quad (7)$$

とすることができる. ただし,  $g$  は重力加速度である.

### 3. 周期運動に対する安定条件

先行研究では, システム (7) を線形化して得られたシステム:

$$\frac{1}{dt} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_2 & a_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \quad (8)$$

の固有値を考え, それが負となる条件から

$$a_1 < 0, \quad a_2 < 0 \quad (9)$$

という安定条件を求め議論を行っていた [6]. ただし,

$$a_1 = \frac{\partial}{\partial V} \left( \frac{1}{m}G(X)f_m(t, X, V) \right), \quad a_2 = \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{1}{m}G(X)f_m(t, X, V) \right) \quad (10)$$

である. また, 筋の活性関数  $E(t)$  はシステムに行わせたい運動  $X$  を実現する  $E(t)$  が遅延なく入力されているものとしている.

本研究では, 想定する運動  $X$  を周期運動と限定し, フロケの定理を用いることで安定条件 (9) を緩和することを考える.

そうした周期運動に対するシステムの安定条件は, 以下の定理でまとめられる.

**Theorem 1.** システム (8) が周期運動に対して安定となる必要十分条件は,

$$\int_0^T a_1(t)dt < 0 \Leftrightarrow \int_0^T \left( \frac{\partial}{\partial V} \left( \frac{1}{m}G(X)f_m(t, X, V) \right) \right) dt < 0 \quad (11)$$

*Proof.* 紙面の都合上, 省略. [11] 参照.

□

**Remark 1.** 上述の議論は, 任意の周期軌道に対して成立するが, 生理学的に意味を持つのは, このシステムにおいて実現可能な周期軌道, つまり, その運動を実現するような筋の活性関数  $E(t)$  を,  $0 \leq E(t) \leq 1$  という条件のもとで設計することが可能な周期運動のみである.

## 4. 考察

**4.1 生理学的観点から見た安定条件の意味** 前節では, 想定する運動を周期運動と限定することで, 運動が安定となる条件を (9) から (11) へと緩和した. 対象とする運動のクラスを限定しているので, 安定条件が緩和されることは当然のことと思われるが, 今回得られた条件 (11) は非常に興味深い性質を持つ. 以下にそれを述べる.

2.1 節にて述べたように  $G(X) > 0, m > 0$  であるので, もし,

$$\frac{\partial}{\partial V} (f_m(t, X, V)) < 0 \quad (12)$$

が成立するのであれば, 式 (11) は常に成り立つことがいえる (ただし, 必要十分条件から十分条件になる). ところが, 2.2 節にて述べたように, 筋の活性度  $E(t)$  は常に区間  $[0, 1]$  の値を持ち, さらに, 今回考えている Hill-type の筋モデルについては, 式 (6) で表されるように力-速度関係が単調減少であるので, 式 (12) は常に成立する. その結果, 式 (11) も常に成立することになる. 従って次の系がいえる.

**Corollary 1.** システム (7) に周期運動を行わせる場合，その運動が実現可能であれば ( $0 \leq E(t) \leq 1$  の条件を満たすような  $E(t)$  を設計可能であれば)，その周期運動は常に (局所) 安定となる。

この系は，周期運動に限れば脊髄でのフィードバック (reflex) すら無しに，その運動の局所安定性を筋骨格系のみで保証できるという非常に強い結果である。筋の特性の中でも最もよく知られた性質の一つである，力-速度関係が単調減少となる (式 (4)) という性質が，運動の安定性に関して大きな役割を果たしているということは，Wagner ら [6] や Brown ら [12] などでも述べられているが，周期運動に限ればその性質が安定性の保証に本質的な役割を果たしているということは非常に興味深い。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では，非常にシンプルな筋骨格系による運動を対象に，その運動が安定となる条件の導出を行ったが，特に，対象とする運動を周期運動に限定しフロケの定理を用いることで，先行研究にて導出されている条件を大きく緩和できることを示した。さらに，非常によく知られている筋の力-速度関係の特性を考慮すれば，常にその安定条件が成立することを示した。

今後の課題としては，筋の活性関数  $E$  に関する考察が挙げられる。今回，周期運動に限定すれば筋骨格系のみでその運動の局所安定性を保証できるという結果を導いたのだが，安定性を向上させるためには神経系は必要不可欠である。神経系のフィードバック部のモデルの一つとして， $\alpha$ - $\gamma$  連関を含む脊髄反射系に基礎をおいたフィードバックに基づく運動モジュールの形成モデルである  $\lambda$  モデルが提案されている [13]。こうしたフィードバック部を導入した際，運動の安定性がどう変化するかを考察していくことは，安定な運動が生成される原理を解明するためには非常に重要であると考えられる。

## 参考文献

- [1] T. McGeer : Passive Dynamic Walking, The Int. J. of Robotics Research, **9**-2, 62/82 (1990)
- [2] 杉本, 大須賀 : 受動的動歩行の安定性に関する一考察-ポアンカレマップの構造解釈からのアプローチ-, システム制御情報学会論文誌, **18**-7, 255/260 (2005)
- [3] G.E. Loeb : Control implications of musculoskeletal mechanics, 21st annual international conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 13/16 (1999)
- [4] A. J. von Soest and M. F. Bobbert : The contribution of muscle properties in the control of explosive movements, Biol. Cybern., **69**-3, 195/204 (1993)
- [5] K. Gerritsen, A. van Bogert, M. Hulliger and R. Zernicke : Intrinsic muscle properties facilitate locomotor control - a computer simulation study, Motor Contr., **2**, 206/220 (1998)
- [6] H. Wagner and R. Blickhan : Stabilizing Function of Skeletal Muscles: an Analytical Investigation, J. theor Biol., **199**, 163/179 (1999)
- [7] H. Wagner and R. Blickhan : Stabilizing function of antagonistic neuromusculoskeletal systems: an analytical investigation, Biol. Cybern., **89**, 71/79 (2003)
- [8] M. Sust, T. Schmalz and S. Linnenbecker : Relationship between distribution of muscle fibres and invariables of motion, Hum. Mov. Sci., **16**, 533/546 (1997)
- [9] AV Hill : The Heat of Shortening and the Dynamic Constants of Muscle, Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, **126**-843, 136/195 (1938)
- [10] Van Leeuwen JL : Mechanics of animal locomotion. Advances in comparative and environmental physiology, Vol. 11, Springer (1992)
- [11] 杉本, 青井, 荻原, 土屋 : 周期運動に対する筋骨格系の安定化作用に関する一考察, 第 7 回制御部門大会 (2007)
- [12] I. Brown and G. Loeb : Biomechanics and neural control of posture and movement, chapter A reductionistic approach to creating and using neuro-musculoskeletal models, 148/163, Springer (2000)
- [13] A.G. Feldman : Once more on the equilibrium-point hypothesis ( $\lambda$ -model) for motor control, J. Mot. Behav., **18**-1, 17/54 (1986)

# Adaptive Output Regulation of Multilinear Systems

Mai Bando

**Abstract:** In this paper the output regulation problem for multilinear systems with unknown parameters is considered. Based on the Lyapunov stability theory, an adaptive controller which stabilize the system is derived. Then sufficient conditions for the output regulation problem with full information to be solvable are established. Simulation results are given to illustrate the theory.

**Key words:** Fuzzy System, Output Regulation, Adaptive Control, Stabilization

## 1. Introduction

The purpose of this paper is to develop a method for designing an adaptive controller for a class of unknown nonlinear system described by multilinear system. Multilinear system contain the Takagi-Sugeno fuzzy model which describe a nonlinear systems in terms of a set of local linear models which are smoothly connected by fuzzy membership functions. Stability analysis of T-S fuzzy systems have done mainly by Lyapunov stability theory[1]. Stability analysis based on common Lyapunov functions is proposed in [2]. It however requires that the so-called common quadratic Lyapunov function can be found for all the local models in a T-S fuzzy model.

In this paper, we propose an approach for stability analysis and control design of multilinear systems. First we consider stabilization problem of multilinear systems. Then, we consider stabilization and output regulation problem of multilinear systems which contain unknown parameters in system matrices.

## 2. Stabilization of multilinear system

Consider the multilinear system

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r \lambda_i(x)(A_i x + B_{2i} u), \quad \sum_{i=1}^r \lambda_i(x) = 1, \quad (1)$$

where  $x \in \mathbb{R}^n$  is the state, and  $u \in \mathbb{R}^m$  the control input. The matrices  $A_i, B_{2i}$  are constant and of appropriate dimensions.  $\lambda_i$  are continuous functions of state  $x$ . We assume that the state  $x$  is accessible and consider the regulation problem for (1) under the following condition.

**Assumption 2..1.**  $(\sum_{i=1}^r \lambda_i(x)A_i, \sum_{i=1}^r \lambda_i(x)B_{2i})$  is stabilizable.

Let  $Q$  be positive-definite. Then  $(C, \sum_{i=1}^r \lambda_i(x)A_i)$  is observable where  $C = \sqrt{Q}$ . Since  $(\sum_{i=1}^r \lambda_i(x)A_i, \sum_{i=1}^r \lambda_i(x)B_{2i})$  is stabilizable by Assumption 2..1, there exists a positive stabilizing solution  $X$  of the algebraic Riccati equation

$$\left(\sum_{i=1}^r \lambda_i A_i\right)^T X + X \left(\sum_{i=1}^r \lambda_i A_i\right) + Q - X \left(\sum_{i=1}^r \lambda_i B_{2i}\right) \left(\sum_{i=1}^r \lambda_i B_{2i}\right)^T X = 0. \quad (2)$$

Now we set

$$\sum_{i=1}^r \lambda_i A_i \triangleq A, \quad \sum_{i=1}^r \lambda_i B_{2i} \triangleq B_2.$$

and introduce the control law

$$u = -B_2^T X x \quad (3)$$

and consider the stability of the control system.

**Theorem 2..1.** *If  $Q - \dot{X} \geq \delta I$ , then the multilinear system (1) is asymptotically stable.*

### 3. Adaptive regulation and Adaptive Output regulation

Consider the multilinear time-invariant system

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sum_{i=1}^r \lambda_i(x)(A_i x + B_{1i} w + B_{2i} u), \quad \sum_{i=1}^r \lambda_i(x) = 1, \\ z &= C_1 x + D_{11} w + D_{12} u, \end{aligned} \quad (4)$$

where  $z \in \mathbb{R}^q$  is the output to be regulated and the matrices  $A_i, B_{1i}, B_{2i}$  contain unknown parameters and the other matrices are assumed to be known. We assume that the state  $x$  is accessible and consider the regulation problem for (4) under the following conditions.

#### Assumption 3..1.

1.  $(\sum_{i=1}^r \lambda_i(x)A_i, \sum_{i=1}^r \lambda_i(x)B_{2i})$  is stabilizable for any unknown parameters of  $(A_i, B_{2i})$ .
2. The matrix

$$A_1 = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^r \lambda_i(x)A_i - \lambda I & \sum_{i=1}^r \lambda_i(x)B_{2i} \\ C_1 & D_{12} \end{bmatrix}$$

has full row-rank for each eigenvalue  $\lambda$  of  $S$  for any unknown parameters of  $(\sum_{i=1}^r \lambda_i(x)A_i, \sum_{i=1}^r \lambda_i(x)B_{2i})$ .

Note that if each  $(A_i, B_{2i})$  is in the controllable canonical form then  $(\sum_{i=1}^r \lambda_i(x)A_i, \sum_{i=1}^r \lambda_i(x)B_{2i})$  is stabilizable for any unknown parameters of  $(A_i, B_{2i})$ .

#### Assumption 3..2. One of the following conditions is satisfied.

1.  $A_1$  is a square matrix, i.e. the input signal  $u$  and the reference signal  $w$  have the same dimension.
2.  $D_{12} = 0$  and  $(\sum_{i=1}^r \lambda_i(x)A_i, \sum_{i=1}^r \lambda_i(x)B_{2i}, C_1)$  is controllable canonical form.

**3.1 Preliminaries** We shall consider the regularity properties of solution of the algebraic Riccati equation and the regulator equation with respect to system matrices. We consider the algebraic Riccati equation:

$$A^T X + X A + C^T C - X B B^T X = 0. \quad (5)$$

Here we consider the solution  $X$  as  $X = X(A, B, C)$ .

**Lemma 3..1.** *Let  $(A_0, B_0, C_0)$  be stabilizable and detectable.*

1. *There exists a neighborhood  $N_1$  of  $(A_0, B_0, C_0)$  such that each  $(A, B, C) \in N_1$  is stabilizable and detectable. Moreover for each  $(A, B, C) \in N_1$ , there exists a nonnegative stabilizing solution  $X = X(A, B, C)$  of (5).*
2. *There exists a neighborhood  $N_2$  of  $(A_0, B_0, C_0)$  such that for each  $(A, B, C) \in N_2$ , there exists a unique solution  $X = X(A, B, C)$  of (5) which is continuous and continuously differentiable in each element of the matrices  $A, B$ , and  $C$ .*

Next we consider the regulator equation [3]:

$$\begin{aligned} A\Pi - \Pi S + B_1 + B_2\Gamma &= 0, \\ C_1\Pi + D_{11} + D_{12}\Gamma &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

We recall that the regulator equation (6) is solvable if and only if the matrix

$$A_1(\lambda) = \begin{bmatrix} A - \lambda I & B_2 \\ C_1 & D_{12} \end{bmatrix}$$

has full row-rank for each eigenvalue  $\lambda$  of  $S$  [3]. For fixed  $C_1$ ,  $D_{11}$  and  $D_{12}$  we show that the solution of the regulator equation (6) is a continuously differentiable function of the elements of  $A$ ,  $B_1$  and  $B_2$ . Suppose

$$\text{rank} \begin{bmatrix} A_0 - \lambda I & B_{20} \\ C_1 & D_{12} \end{bmatrix} = n + q \quad \forall \lambda \in \sigma(S).$$

Then there exists a neighborhood  $M_1$  of  $(A_0, B_0)$  such that for any  $(A, B_2) \in M_1$ ,

$$\text{rank} \begin{bmatrix} A - \lambda I & B_2 \\ C_1 & D_{12} \end{bmatrix} = n + q \quad \forall \lambda \in \sigma(S). \quad (7)$$

**Lemma 3..2.** *Suppose  $A_1$  is a square matrix, i.e., the input signal  $u$  and the reference signal  $w$  have the same dimension. Then the solution  $(\Pi, \Gamma)$  of the regulator equation (6) is continuously differentiable function of  $B_1$  and  $(A, B_2)$  in  $M_1$ .*

**3.2 Adaptive regulation of a multilinear system** First we consider the stabilization problem. Introduce an estimator and adaptive laws of the form

$$\dot{\hat{x}} = A_m \hat{x} + \sum_{i=1}^r \lambda_i(x) (\hat{A}_i - A_m) x + \sum_{i=1}^r \lambda_i(x) \hat{B}_{1i} w + \sum_{i=1}^r \lambda_i(x) \hat{B}_{2i} u, \quad (8)$$

$$\dot{\hat{A}}_i = \dot{\Phi} = -\lambda_i(x) P e x^T, \dot{\hat{B}}_{1i} = \dot{\Psi}_1 = -\lambda_i(x) P e w^T, \dot{\hat{B}}_{2i} = \dot{\Psi}_2 = -\lambda_i(x) P e u^T, \quad (9)$$

where  $A_m$  is an  $n \times n$  stable matrix,  $P$  is the solution of the following matrix equation

$$A_m^T P + P A_m = -Q$$

for some positive-definite matrix  $Q$  and  $e = \hat{x} - x$ ,  $\Phi_i = A_i - A$ ,  $\Psi_{1i} = B_{1i} - B_1$ ,  $\Psi_{2i} = \hat{B}_{2i} - B_2$ . Then the error equation is given by

$$\dot{e} = A_m e + \sum_{i=1}^r \lambda_i(x) (\Phi_i x + \Psi_{1i} w + \Psi_{2i} u). \quad (10)$$

If some elements of  $A_i$ ,  $B_{1i}$  and  $B_{2i}$  are known, we can omit their adaptive laws in (9), but for notational convenience we use (9).

**Lemma 3..3.** *The system (10) and (9) is globally stable.*

Let  $Q$  be positive-definite. Then  $(C, \hat{A})$  is observable where  $C = \sqrt{Q}$ . Since  $((\sum_{i=1}^r \lambda_i(x) A_i(t), \sum_{i=1}^r \lambda_i(x) B_i(t)))$  is stabilizable by Assumption 3..1, for each  $t$  there exists a positive stabilizing solution  $X(t)$  of the algebraic Riccati equation

$$\left( \sum_{i=1}^r \lambda_i \hat{A}_i(t) \right)^T X(t) + X(t) \left( \sum_{i=1}^r \lambda_i \hat{A}_i(t) \right) + Q - X(t) \left( \sum_{i=1}^r \lambda_i \hat{B}_i(t) \right) \left( \sum_{i=1}^r \lambda_i \hat{B}_i(t) \right)^T X(t) = 0. \quad (11)$$

**Lemma 3..4.**  $X(t)$  is continuously differentiable with respect to  $t$  and is uniformly bounded.

Now we set

$$\sum_{i=1}^r \lambda_i \hat{A}_i(t) \triangleq \hat{A}, \sum_{i=1}^r \lambda_i \hat{B}_{1i}(t) \triangleq \hat{B}_1, \sum_{i=1}^r \lambda_i \hat{B}_{2i}(t) \triangleq \hat{B}_2.$$

and introduce the control law

$$u = -\hat{B}_2^T(t)X(t)\hat{x} \quad (12)$$

and consider the stability of the adaptive control system.

**Theorem 3..1.** If  $Q - \dot{X} \geq \delta I$ , then  $x$  and  $\hat{x}$  are bounded and  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ . Moreover, if  $w = 0$  then  $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$ .

**Corollary 3..1.** If  $\dot{\hat{A}}(t), \dot{\hat{B}}_2(t) \rightarrow 0$  as  $t \rightarrow \infty$ , then  $x$  and  $\hat{x}$  are bounded and  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ . Moreover, if  $w = 0$  then  $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$ .

**3.3 Adaptive output regulation of a multilinear system** Now we consider the adaptive output regulation problem associated with (4), (8) and (9). In this case regulator equation is given by

$$\begin{aligned} \hat{A}\Pi - \Pi S + \hat{B}_1 + \hat{B}_2\Gamma &= 0, \\ C_1\Pi + D_{11} + D_{12}\Gamma &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

**Lemma 3..5.** Under Assumptions 3..1 and 3..2, then there exists a solution  $(\Pi, \Gamma)$  of (13) which is continuously differentiable function of  $\hat{A}, \hat{B}_1$  and  $\hat{B}_2$  and is uniformly bounded.

We choose the controller

$$u = -\hat{B}_2^T(t)X(t)\hat{x} + (\Gamma(t) + \hat{B}_2^T(t)X(t)\Pi(t))w, \quad (14)$$

where  $X(t)$  is the solution of the Riccati equation (11) corresponding to (4), (8) and (9). The following result is obtained.

**Theorem 3..2.** Suppose Assumptions 3..1 and 3..2 hold. If  $Q - \dot{X} \geq \delta I$  and  $\dot{\Pi} \rightarrow 0$ , then the adaptive output regulation is fulfilled i.e.,  $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = 0$ .

**Corollary 3..2.** Suppose Assumptions 3..1 and 3..2 hold. If  $\dot{\hat{A}}(t), \dot{\hat{B}}_2(t) \rightarrow 0$  as  $t \rightarrow \infty$  and  $\dot{\Pi} \rightarrow 0$ , then the adaptive output regulation is fulfilled i.e.,  $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = 0$ .

## 4. Simulations

### Example 7.1

Consider the nonlinear mass-spring system

$$\ddot{\xi} = -0.01\xi - 0.67\xi^3 + u, \quad (15)$$

The nonlinear term satisfies the following conditions for  $\xi \in [-1 \ 1]$ :

$$-0.67\xi \leq -0.67\xi^3 \leq 0\xi, \quad \xi \geq 0, 0\xi \leq -0.67\xi^3 \leq -0.67\xi, \quad \xi \leq 0.$$

Hence it can be represented by the following multilinear system:

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^2 \lambda_i(x)(A_i x + B_i u), \quad (16)$$

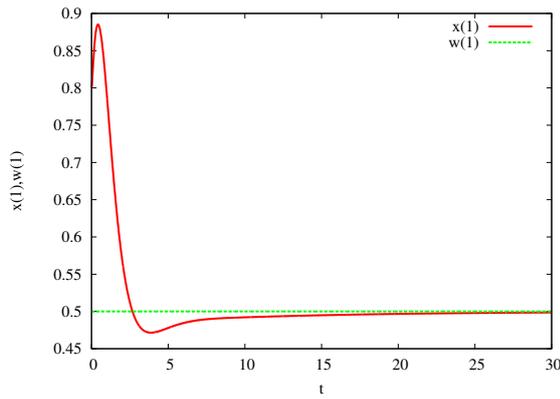


图 1: Step tracking.

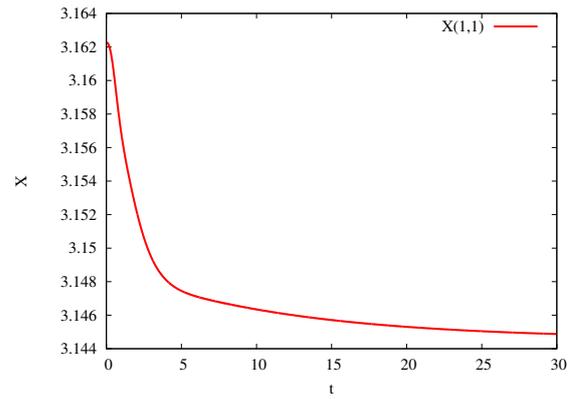


图 2: Solution of the Riccati equation.

where

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & a_2 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} \xi \\ \dot{\xi} \end{bmatrix},$$

$$\lambda_1(x) = 1 - \xi^2, \lambda_2(x) = \xi^2, a_1 = -0.01, a_2 = 0, a_3 = -0.68, a_4 = 0.$$

When  $a_i$  are unknown but  $\lambda_i$  is given function and state  $x$  is accessible, this is an example of the multilinear system (4). We design a state feedback controller such that  $x_1(t) \rightarrow 0.5$ . For this purpose we set  $C_1 = 1, D_{11} = -1$  and take the following exosystem

$$S = 0, w(0) = 0.5.$$

In this case  $\Pi$  become a constant matrix. The simulation result with  $x(0) = [0.8 \ 0]^T, \hat{a}_i(0) = 0$  and  $\hat{b}_1(0) = 0$  is shown in Figure 1. Note that  $\dot{X} \rightarrow 0$  and assumption holds in Figure 2.

### Example 7.2

For the system (15) we design a state feedback controller such that  $x_1(t) \rightarrow 0.3\sin(t)$ . In this case we can set  $C_1 = [1 \ 0], D_{11} = [-1 \ 0]$  and take the following exosystem

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

In this case  $\Pi$  become a constant matrix. The simulation result with  $x(0) = [0.1 \ 0]^T, w(0) = [0 \ 0.3]^T, \hat{a}_i(0) = 0$  is shown in Figure 3 and Figure 4. Figure 5 and Figure 6 show the results when all the matrices are assumed to be known. When all matrices are known, we can see the output  $z$  goes to zero from Figure 5. In this example  $\dot{X}$  does not go to zero but assumption in the Theorem 2.1 hold.

### 参考文献

- [1] G. Feng: A Survey on Analysis and Design of Model-Based Fuzzy Control Systems Fuzzy Systems, IEEE Transactions on Volume 14, Issue 5, Oct. 2006 pp. 676 - 697, 2006
- [2] J. Yoneyama, M. Nishikawa, H. Katayama, A. Ichikawa: Output stabilization of Takagi-Sugeno fuzzy systems, Fuzzy Sets and Systems 121, pp.127-148, 2000
- [3] A. Saberi, A. A. Stoorvogel and P. Sannuti, Control of Linear Systems with Regulation and Input Constraints, Springer, 2000.
- [4] B. Zhou and G. -R. Duan, A new solution to the generalized Sylvester matrix equation  $AV - EVF = BW$ , Systems & Control Letters, 55, (2006), 193-198.

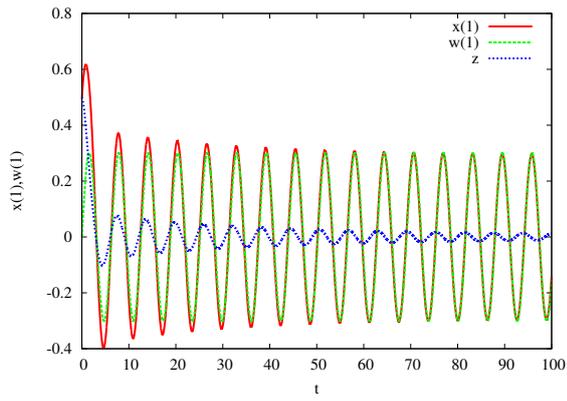


Figure 3: Sine tracking.

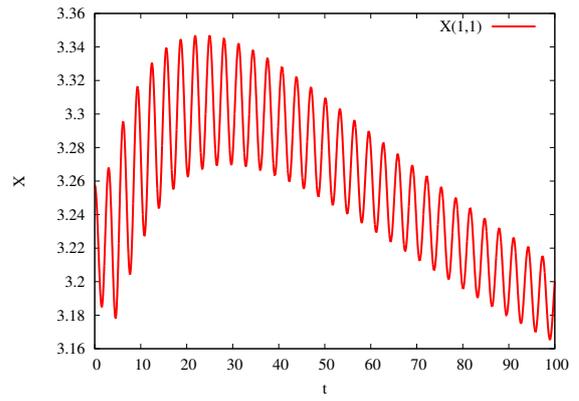


Figure 4: Solution of the Riccati equation.

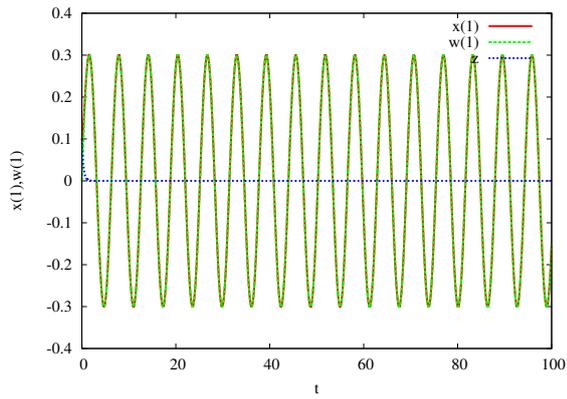


Figure 5: Sine tracking(known model).

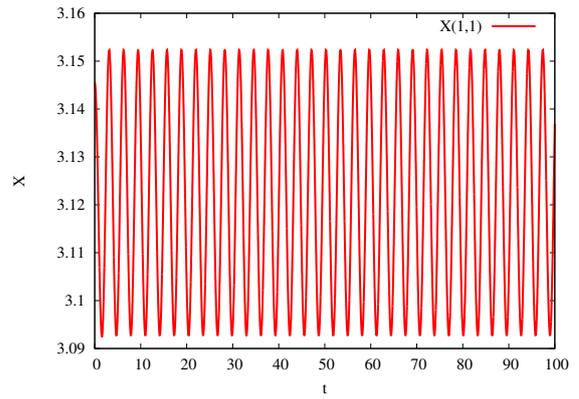


Figure 6: Solution of the Riccati equation(known model).

[5] P. A. Ioannou and J. Sun, Robust Adaptive Control, Prentice Hall, 1996.

[6] K. S. Narendra, A. M. Annaswamy, Stable Adaptive Systems, Prentice Hall, 1989.

[7] H. K. Khalil, Nonlinear Systems, Prentice Hall, 2001.

# 人間環境相互作用を通じた認識構成過程の計算論的理解

工学研究科機械理工学専攻 谷口 忠大

**Abstract:** This paper describes computational models of a cognitive process of mode awareness and estimation of other agent's goal by people. The both cognitive processes are required to work with automated systems composed of multiple control modes. These models are built to represent two concurrent processes of the people. One is the process through which they develop multiple internal models corresponding to system's multiple control modes or other agent's internal goals through interactions with their facing systems and external environments. The other is the process that the people recognize current mode by using prediction errors calculated by their developing internal models. This paper is composed mainly of two parts. First, We describe a Situation-Sensitive Reinforcement Learning (SSRL), which enables an agent to notice the other agent's change in his/her intention and learn adequate behaviors. We evaluated the model through a simulation. Secondly, concerning human mode awareness, experiments of observing human user's mode awareness about a driving simulator with ACC (adaptive cruise control) system are made. Additionally, the simulation results using a computational model of the user's mode awareness based on our proposal model are presented. The result suggests that our proposal model is valid by comparing those data with the experimental data.

**Key words:** multiple internal models, reinforcement learning, ACC, mode error.

## 1. はじめに

人間の環境認識機構は生得的、つまり系統発生的にデザインされたものではなく、個体発生的な発達、学習により自律的に構成されるものである。このような人間の認識の構成過程を捉えることは、人間の動的環境下における振る舞いを理解するのみならず、複雑な機械を設計する際にも重要な要素となってきた。例えば、人間同士が協調的に荷物運びのような力学的な作業を行う際に、荷物を間に挟んだ力学的な相互作用を通して補助者が先導者の行動意図をどのようなプロセスで読み取る事が出来るようになるのかという問題は車

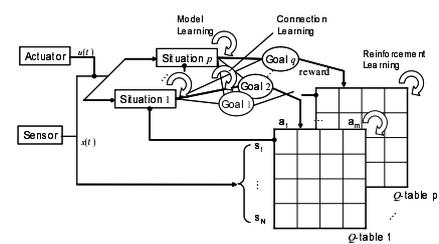


図 1: 状況弁別型強化学習機構

の運転支援システムやパワードスーツといった、人間の行動意図まで読んだ上で力学的補助を与えなければならない知的システムの設計論について考える上で重要である。また、実際に様々なモードを持ちドライバを補助する自動運転補助機能を有した自動車を運転する際に、人間が車の行動意図をどのようなプロセスで認識し得るのかという問題は、安全な自動化機械を設計する際の指針として重要である。現在まで、このような人間の作業を補助したり軽減したりする為の知能化機械の設計論は往々にして、動的に変化し続ける人間要素を明示的に系の内部に捉える事のないシステム設計となっていた。本年度の研究では、我々が昨年までの研究で提案してきた、人間の認識機構の構成論的モデルである、シエマモデルについての研究をベースに、人間の認識機構が構成され、他者や自動化機械の力学的特性に対する理解とその行動意図の推定がコンカレントに形成されていくプロセスの計算論的なモデリングを行った。

## 2. 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

人間が社会生活を営む上で、複数人で協調してある種のタスクを行うという能力は欠くことができない。ここでは、「自己閉鎖的なエージェント間での言葉を用いない意図推定」が如何にして、どの様に可能かという問題に対して構成論的な接近を試みる。これを実現するために、状況弁別型強化学習機構 (SSRL: Situation Sensitive Reinforcement Learning)[4] に内部目標の切り替え機構を付加したモデルを提案する。実験では、Leader の意図解釈者としての Follower が上記の適応機構を持つことによって、Leader から Follower への一切の明示的な伝達無しに、Follower が自らの観

測しうる状態変化だけから間接的に Leader の意図変化を読み取り，Leader が動的に目標を変化させて行動する際にも協調タスクを持続的に達成し得るようになることを示す．

**2.1 状況弁別型強化学習機構** 動的に変化する物理環境において適応的に行動するためには，過去の経験に対する適応の結果を系内部に分散的に蓄積する機構が有効である．それらを系内部で構造化して獲得する方法論として，モジュール型や階層型の学習機構が提案されている．このような適応機構は，物理的要因での環境の動的変化のみならず，他者の意図変化を含むような社会的要因での環境の動的変化に対しても有効であると考えられる．我々はエージェントの持つ物理的動的環境への適応能力が，社会的な環境への適応能力の基礎を形成しているという仮説に立ち，力学的な状況変化を適応的な学習を通じて検知する機構である状況弁別強化学習機構が，他者の意図推定においても重要な役割を果たし得ることを示す．

**2.2 ダイナミクスからの間接的意図推定** 本稿では「エージェントがどのようなゴールを目指して行動しているか？」という事を指して意図と呼ぶ．強化学習の枠組みでは，ゴールは報酬関数で表わされる．複数目標を持つエージェントを考えると，あるゴール  $G_m$  を選ぶとそのゴールに基づいて学習された方策  $u^m$  が選択される事になる．今，2体のエージェントについての議論を行う．

$$y = f(x, u_1, u_2^m) = f(x, u_1, u_2^m(x)) = F^m(x, u_1) \quad (1)$$

ここで， $x$  は系の状態変数， $u_i$  は  $i$  番目のエージェントの行動出力である．通常，自己閉鎖的なエージェントは他者の行動出力を感知する事が出来ない．そのような場合，エージェント 1 にとっての環境ダイナミクスは 1 のように見え，エージェント 2 の方策の切り替えが環境ダイナミクスの変化として間接的にエージェント 1 に伝わる事となる．上の議論より，エージェントは物理的ダイナミクス  $f$  が時不変な系においては，自らにとっての環境ダイナミクス  $F$  の変化を検知することで，間接的に他者の意図の変化を読み取る事が出来る．「状況」を「知覚された状態  $x$  と自分の行為  $u$  から出力  $y$  が変化の様子」と定義すると，他者の意図変化は自らの状況変化を引き起こす．得られた予測誤差短時間平均  $\bar{e}_t^j$  が関数  $F^j$  から生じたものであるとする事後確率を  $P(j|\bar{e}_t^j)$  を次式で定義する．

$$P(j|\bar{e}_t^j) = \exp(-\frac{\bar{e}_t^j}{2\sigma^2}) / \sum_{k=1}^p \exp(-\frac{\bar{e}_t^k}{2\sigma^2}) \quad (2)$$

$$j^* = \arg \min_j P(j|\bar{e}_t^j) \quad (3)$$

となり，これを現在の状況と捉える．また，適切な予測モデルが一つも存在しなかった場合に仮説検定理論に基づいて予測モデルを累増的に追加する [5]．これはベイズ推定に基づく MOSAIC モデル [1] と仮説検定に基づくシエマモデル [5] との中間的手法といえる．

**2.3 内部目標切替機構** 状況弁別により他者の意図の変化を読み取ることは出来るが，意図そのものの正確な推定は出来ない．ここでは自らの意図と他者の意図に齟齬があった場合には自らの目的の達成が妨げられるという条件下での受動的な意図推定の手法を定式化する．

$$p(m|j) = \exp(Bw_{jm}) / \sum_{i=1}^q \exp(Bw_{ji}) \quad (4)$$

ここで， $p(m|j)$  は状況  $F^j$  において内部目標  $G_m$  が選択される確率を表している．そして，その選択された内部目標に基づいて方策を学習した結果，つまり一定時間内に得られた報酬総和  $R_t^{jm}$  をもとにして現在の状況  $F^j$  と選択されている内部目標  $G_m$  の結合  $w_{jm}$  を次式のように変化させる．

$$w_{jm} = \nu R_t^{jm} + (1 - \nu)w_{jm} \quad (5)$$

ここで， $\nu$  は慣性項の影響を定めるパラメータである．式 (4) から分かるように，結合が強いほどその報酬関数が選択されやすくなり，内部目標切替機構の学習が進んでいくにつれて，一つの状況に対してある特定の一つの内部目標が定まる．

**2.4 実験** 前節までの提案手法を，図 2 に示すような 1 台の台車を Leader, Follower という 2 体のエージェントが各々力を加え，台車を目標地点まで移動させるようなタスクに適用する．Leader はあらかじめ各目標地点に向かう為の複数の方策を固定的に保持しているものとする．

まず、Leader が 3 種類の短期目標を選択し行動する中で Follower がそれを推察し、協調的に行動するための学習 (図 3 上) を行う。目標地点の候補は 3 種類存在し、Leader は目標を目標 1 目標 2 目標 3 の順番に変化させる。次に、組織による学習では、2 者のエージェントは図 3 下に示すような環境に置かれる。ここでのタスクはゴールまでに配置されている離散化された地点を經由し、目標地点に辿り着くタスクである。Leader はあらかじめ各目標地点に向かう為の複数の方策を固定的に保持しているものとする。実験結果として、Follower が Q-learning のみを持ちいて協調を行おうとした場合よりも、高いパフォーマンスを得ることが出来た。

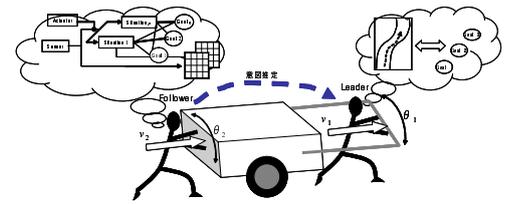


図 2: 台車押しタスク

2.5 結論 本論文では、他者の意図が時々刻々変化するという動的環境下の中で、明示的でコミュニケーションを用いずとも協調可能であることを状況弁別型強化学習機構を用いた構成論により示した。自己閉鎖的なエージェントは、自らの周囲の状況変化から間接的に他者の意図の変化を知覚し、それに応じた協調行為を行い得る。しかし、あらゆる環境で本稿の意図推定の枠組みが上手く作動するわけではなく、環境の設定によっては意図推定が解決しない場合もある。また、本枠組みでは Follower の意図推定学習時に Leader の方策が複数に固定されていることを前提とするために、マルチエージェントの共時的な学習における収束不安定性の問題は残る。このような点についての研究が今後とも必要である。

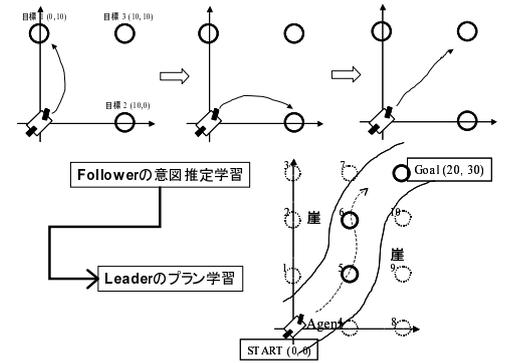


図 3: 上: Follower による意図推定タスク. 下: Leader によるプラン生成タスク

### 3. 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

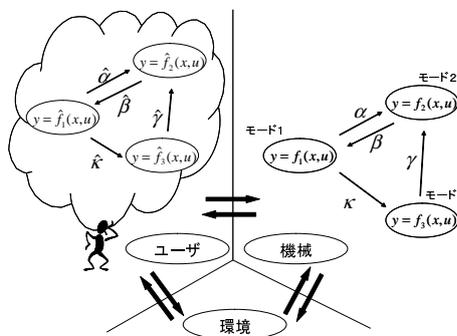


図 4: ユーザの複数内部モデルと多モードを有する自動化機械

ユーザの作業負担や効率化のため様々な場面で自動化機械が導入されている。これらの中で機械内部に非常に複雑な制御ロジックが組み込まれているような場合、それをユーザが全て把握して機械を使用することは難しい。このような自動化機械に起因する人的過誤の代表的なものに、ユーザが機械内部に設計されたモードを取り違え、誤った操作をしてしまうというモード誤認識(mode error)の問題がある。複数のモードを有する機械においては、ユーザが同じ操作入力をした場合や同じ環境状態にある場合でも、モードが異なれば機械の応答は一般的には異なるものになるため、ユーザが機械のモードを誤認識したまま操作を続けると、機械とユーザの齟齬は次第に拡大し重大な事故につながる可能性があることが問題視されている [2]。

れている [2]。

本研究では、堀口らが示したユーザが各モードに設計された入出力関係を用いて主にモード認識を行っているという仮説 [6] を元に、ユーザのモード認識機構の構成論として、計算論的神経科学 [3] やパターン認識等の領域で提案されているモジュール型学習機構を適用した計算論的モデルを提案する。これにより、ユーザが作業中に刻々と変化する状況の中で、各モードに設計された入出力関係を獲得し、それらをモード認識の手がかりとして利用するという動的な認知過程を計算論的に表現することが可能となる。

3.1 ハイブリッドダイナミカルシステムとしての自動化機械 複数のモードを持つ機械は図 4 右に示すように、異なった入出力関係 ( $f_1, f_2, \dots$ ) を持った複数の離散状態と、その間のモード遷移

事象  $(\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \dots)$  によるハイブリッドダイナミカルシステムとして表現される．機械はユーザの操作入力だけでなくその他の環境の状態に起因して出力を変化させるので，ここでの  $\vec{f}_1, \vec{f}_2, \dots$  はユーザの操作入力及び環境状態を変数として持つ．

ユーザはこのような複数のモードを有する機械を使用するとき，図4左のように，事前知識や機械及び環境との相互作用を通じて， $\hat{f}_1, \hat{f}_2, \dots$  と  $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \dots$  を構成しつつ，また同時に機械のモードを推定しているものと考えられる．特にユーザが構成した各モードに対応する入出力関係  $\hat{f}_1, \hat{f}_2$  を内部モデルと呼ぶ．

**3.2 提案モデル** 図5に提案するモデルの概要を示す．本モデルはモード数に対応した複数のモジュール  $m(m = 1, 2, \dots)$  を有し，それぞれ推定された入出力関係  $\hat{A}_m$  を持つ．また，各  $\hat{A}_m$  より算出された予測誤差による評価値によって，Active なモジュール  $m_{Active}$  が選択される．これを認識したモードと捉える．

**3.2.1 入出力関係の獲得** ユーザから機械への操作入力  $\vec{u}$  と，ユーザが観測可能な入力時の環境状態  $\vec{x}$  を，簡単のために併せて  $\vec{x}^\dagger = (\vec{x}, \vec{u})^T$  とおく．時間  $t$  における，操作入力と環境状態を表す複数の変数はベクトル  $\vec{x}_t^\dagger = (x_1^\dagger, x_2^\dagger, \dots, x_j^\dagger)^T$  で表わされる．またその次の時間の機械の応答出力を  $\vec{y}_{t+1} = (y_1, y_2, \dots, y_i)^T$  とするとき，その入出力関係は，関数  $\vec{f}$  を用いて  $\vec{y}_{t+1} = \vec{f}(\vec{x}_t^\dagger)$  と表わされる．ここでは線形なシステムと仮定し， $i$  行  $j$  列の行列  $\vec{A}$  を用いて  $\vec{y}_{t+1} = \vec{A}\vec{x}_t^\dagger$  と表すことができる場合を考える．したがって，この行列  $\vec{A}$  が入出力関係  $\vec{f}$  を表すことになる．システムがモード  $m(m = 1, 2, \dots)$  を持つとき，それぞれが持つ真の入出力関係を  $\vec{f}_m, \vec{A}_m$  で表す．

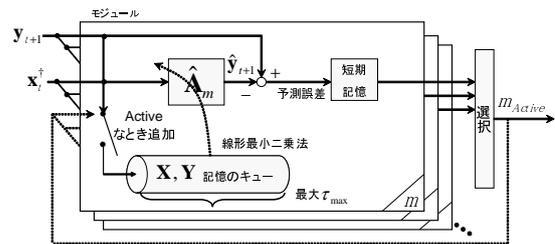


図5: モード認識モデルの概観

各モジュール  $m$  はそれぞれ記憶として，行列  $\vec{Y}_m = (\vec{y}_m^1, \dots, \vec{y}_m^T)^T$ ，及び行列  $\vec{X}_m = (\vec{x}_m^1, \dots, \vec{x}_m^T)^T$  を持つ． $\vec{y}_m^l, \vec{x}_m^l$  はモジュール  $m$  にとって  $l$  時間前に学習データとして入力された  $\vec{y}_{t+1}, \vec{x}_t^\dagger$  である．過去にさかのぼって記憶できる容量の上限を  $\tau_{max}$  とする．

$\vec{Y}_m, \vec{X}_m$  から線形最小二乗法を用い， $\vec{A}_m$  の推定値である  $\hat{A}_m$  が求まる．これによりモジュールの推定された入出力関係  $\hat{f}_m$  が求まることになる．

ある時間  $t$  において知覚されたデータ， $\vec{y}_{t+1}, \vec{x}_t^\dagger$  が与えられたとき，現在 Active となっているモジュール  $m$  の  $\vec{Y}_m, \vec{X}_m$  のみに対してこのデータが追加される．このとき，記憶容量  $\tau_{max}$  上限まで満たされているならば，一番古い時間の1データ  $\vec{y}_m^{\tau_{max}}, \vec{x}_m^{\tau_{max}}$  と入れ替える．すなわち，各モジュールは最大  $\tau_{max}$  分しか記憶できず，それらを用いて  $\hat{A}_m$  を求めることになるため， $\tau_{max}$  が小さければ直近の応答系列のみから学習し，大きければより長期的な記憶に基づく学習を行うことになる．

**3.2.2 予測誤差の短期記憶の更新とモジュールの選択** 予測誤差の短期平均を以下のように定義する．

$$E_{m,t+1} = (1 - \gamma)E_{m,t} + \gamma \|\vec{y}_{t+1} - \hat{f}_m(\vec{x}_t^\dagger)\| \quad (6)$$

これは Doya [1] における MOSAIC の選択則を winner-take-all 型にしたものに等しい．この  $E_m$  が小さければ小さいほど，そのモジュールの尤もらしさが大きいことを表す．ここで定数  $\gamma$  は  $0 < \gamma < 1$  の値をとる． $\gamma$  が1に近づけば直前の予測誤差を重視した値が，0に近づけば長期的な変動を重視した値となる．この  $E_m$  が最も最小となるモジュールを Active なモードとして選択する．

**3.3 ドライビングシミュレータを用いたモード認識実験** 提案するモデルを評価するために，ACC (Adaptive Cruise Control) 機能を搭載した簡易ドライビングシミュレータを用い，ドライバのモード認識の特性を調べた．ACC はドライバのアクセル操作を代行し，設定した車速の維持，または状況に応じて先行車との車間を安全な距離に維持し追従する機能である．

3.3.1 ドライビングシミュレータとACC機能 図6に本研究で使用したドライビングシミュレータの画面と操作部を示す。これはPC 1台とアクセル、ブレーキペダル及びステアリングホイールの代わりにジョイスティック<sup>1</sup>を用いた簡単な定置型のものである。ジョイスティックには操作入力量が分かりやすいように常に中心位置へ向かう力覚フィードバックを与えた。走行する環境には、交差点や信号などが全くなく、高速道路を模擬した見通しの良い片道2車線の直進道路を用意した。他車両は左右の車線上にランダムに現れ適当な加減速を行い車線変更をせずに走行するように設定した。

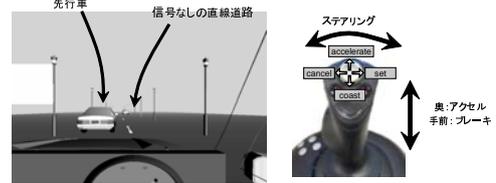


図6: ドライビングシミュレータの概観

ドライビングシミュレータに搭載したACC機能のモードはidle(通常走行モード)、設定した車速を維持して走行するconstant-speed(定速走行)、先行車との車間距離を車速に応じ一定に保ち走行するcar-following(追従走行)モードである<sup>2</sup>。これらの間のモード遷移則を図7に示す。

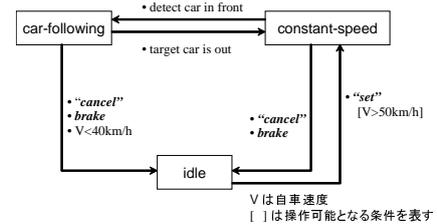


図7: ACCのモード遷移則

以上のモードをドライビングシミュレータ上で実現するために、各モードの制御ダイナミクス $\vec{f}_m$ を次のように実装した。ドライバが操作したアクセルブレーキ量を $\nu$ 、自車速度を $\mu$ 、先行車との車間距離と目標車間距離との差を $\omega$ 、設定車速を $\theta$ とする。このとき、自車両の出力応答として加速度 $\rho$ は、 $\vec{x}^\dagger = (\nu, \mu, \omega, \theta)^T$ と $\vec{A} = (a_\nu, a_\mu, a_\omega, a_\theta)$ を用いて $\rho = \vec{A}\vec{x}^\dagger$ で表される。また、各モードの $\vec{A}$ の要素の数値は正規化した値で、idleにおいて $a_\nu = 1$ 、constant-speedにおいて $a_\mu = -5.5$ 、 $a_\theta = 6.5$ 、car-followingにおいて $a_\omega = 1$ と設定した。これら以外の全ての成分は0とした。

3.3.2 実験条件 実験は、以上のドライビングシミュレータを用いた15分間の走行タスクとした被験者には通常の運転に加えて、出来る限りACCの機能を使用し、定速走行と追従走行を行うよう指示した。被験者にはタスクの遂行中、予め用意したキーボード上の3つのキーからジョイスティックを操作していない方の手で、認識しているモードを入力するよう課した。

被験者にはまず、各モードの動作、遷移則及び操作方法を詳しく説明した。実験の結果と考察については後のシミュレーション実験と併せて行う。

### 3.4 モード認識のシミュレーション実験

3.4.1 実験方法 シミュレーション実験では $y = \rho$ 、 $\vec{x}^\dagger = (\nu, \mu, \omega, \theta)^T$ 、 $\hat{\vec{A}} = (\hat{a}_\nu, \hat{a}_\mu, \hat{a}_\omega, \hat{a}_\theta)$ としモデル化した。このとき各モジュールの出力予測値 $\hat{y}_{t+1}$ は $\hat{y}_{t+1} = \hat{\vec{A}}\vec{x}^\dagger$ で表される。またモジュール選択の評価値には式(6)を用い、全てのモジュールの $E_m$ の初期値を0とした。

シミュレーション実験では被験者実験と比較するため以下の設定で行った。被験者実験において、被験者が予め3つのモードしかないと教えられ、その3つの中からモードを選択し認識していたことを再現するために、モジュールの数は3に固定して与えた。また、被験者に予め、追従走行や定速走行など各モードの動作の説明しているの、それらに対応するに対応する短時間(10[s])の教師データを事前に与え学習させた。

シミュレーションで用いた各パラメータは $T_{step} = 100[ms]$ 、 $\gamma = 0.3$ 、 $\tau_{max} = 600[step]$ 、 $\tau_{del} = 30[step]$ とした。ここで、 $T_{step}$ はシミュレーションの単位時間[step]である。また、 $\tau_{del}$ はモード切替時にリセットする長期記憶の量である。

<sup>1</sup>実験中ユーザにもう一方の手でモード認識記録のための入力操作を課すため、前後でアクセル・ブレーキ操作、左右でステアリング操作を入力することができる。また取り付けられたボタン("set","cancel","accelerate","coast")によりACCの操作ができる。

<sup>2</sup>実際のACC機能に変更を加えた簡易版である。

3.5 実験結果と考察 被験者実験におけるユーザ認識モードと、シミュレーションでそれを模擬した認識モードは、タスク全時間に対して被験者 A は 80.7%，被験者 B は 81.4%の時間で一致した。被験者 A の実験における走行状態のもとでのデータを用いシミュレーションを行ったモード認識結果と、被験者 A のモード認識の様子の一部を図 8 に示す。図 8 の I で示した部分においては実際のモードが頻繁に切り替えられていることに気づかず、モード誤認識を起こしているという特徴においてシミュレーションと被験者で一致している。また図 8 の IV, V

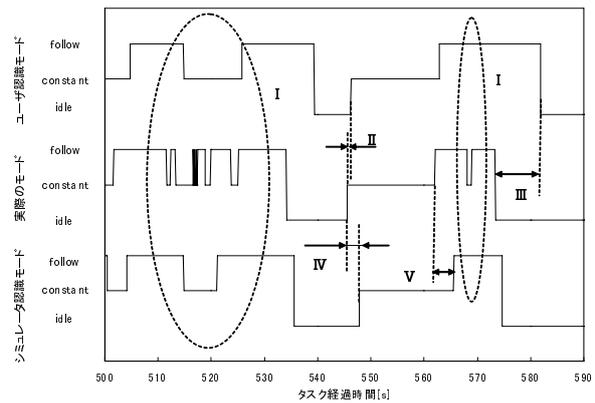


図 8: 被験者 A のモード認識と実際の車のモード遷移、及び、シミュレータのモード認識予測の比較 (500[s]-590[s])

で示した箇所においては実際のモード認識切替に時間差をもって認識されることが再現されている。また、被験者実験において car-following モードから idle モードに遷移したときの時間遅れは、idle モードから constant-speed モードへ遷移したときに比べ、0.1%水準で有意に長かった。この 2 つ以外の遷移では時間遅れがシミュレーションと被験者でほぼ一致しているが、この 2 つに関して再現できなかった。前者の遷移の場合にユーザは“set”ボタンを押すというモード遷移事象を手がかりとしていることが、これらの時間差の相違の原因であると考えられる。また、図は割愛するが、提案モデルを用いて、モードエラーが起きた場合に、入出力関係のみからモード復帰を行うユーザのモデルと、モード遷移事象のみを頼りに復帰するモデルを比較した場合、入出力関係のみからモード復帰を行うユーザのモデルの方が早く、かつ実際のユーザと似た形でモードに復帰することが確認された。これは、モード認識において入出力関係が主な役割を果たしていることを示唆している。

#### 4. おわりに

本研究では、複数のモードを持つ他のエージェントや自動化機械に対してダイナミクスの入出力関係を手がかりとし意図推定及びモード認識を行うユーザの認知モデルを提案した。今後は本モデルでは捉えられなかったモード認識の部分に注目し、ユーザのモード認識機構の包括的なモデルの構築を目指す。

#### 参考文献

- [1] K. Doya, et al. Multiple model-based reinforcement learning. *Neural Computation*, Vol. 14, pp. 1347–1369, 2000.
- [2] B.Sarter N, D.D. Woods, and C.E. Billings. *Automation Surprises*, (G. Salvendy, Ed.) *Handbook of Human Factors & Ergonomics*. Wiley, 1997.
- [3] D.M. Wolpert and M. Kawato. Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, Vol. 11, pp. 1317–1329, 1998.
- [4] 小川賢治, 谷口忠大, 榎木哲夫. 複数の q-table を用いた多様環境下での状況弁別型強化学習. 第 21 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 pp.724–727., 2005.
- [5] 谷口忠大. 環境との相互作用に基づく自律適応系の構成論的研究. PhD thesis, 京都大学大学院工学研究科, 2006.
- [6] 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.

# 学習・適応機構による秩序形成に関する研究

工学研究科機械理工学専攻 中西 弘明

**Abstract:** Designing robust controllers by use of neural networks is based on a competition. Competition between a neural network, which acts as a robust controller and uncertainties of the plant, plays a very important role to be robust, and it also causes simple order formation, such as power law scaling, which can be found in a set of trained robust controllers. Such simple order is widely found in nature and complex systems and natural systems. Any learning methods without considering uncertainties can not form such relations. Therefore competitive learning will have important relationship to order formation in various systems. Using numerical simulation of a toy problem for designing robust controllers, Order formation in competitive training is intensively analyzed.

**Key words:**

## 1. はじめに

生体システムや自然界は複雑なダイナミクスに支配されていると考えられてるが、非情に簡単なルールに支配されているようにみえること、つまり秩序が形成されてそれに従っていることが多い。その秩序としてはべき乗則がよく知られている。東 [1] によると動物の運動にもべき乗則が広くみられることがわかる。このような秩序は人工物であるインターネットなどネットワークにもみられ、WEB 上であるノードに接続しているノード数の密度とノード数がべき乗則に従っており、これは Barabasi-Albert のモデルでよく説明がされている [2]。また、べき乗則が現れる数理物理的なモデルには雪崩モデル、森林火災モデルが知られているが、これらのモデルでは発生確率と規模にべき乗則が現れる理由としては自己組織化が挙げられる。Doyle らによる Highly Optimized Tolerance (HOT) は、自己組織化とは異なる方法でべき乗則に従う被害の耐性を持つシステムの設計手法が有名である [3]。HOT とはあるハザードが発生した場合でも得られる利益の期待値を最大化する、あるいは、発生する被害の期待値を最小化する構造のことをいう。具体的には存在するリスク要因とその発生確率分布があらかじめわかっているシステムを対象とし、ある制約条件が存在する防御資源を用いて、発生する被害を最小にするシステム構造を設計するものである。HOT では損失規模とその累積確率の間にべき乗則がみられ、これがシステムの優れた耐性をもつと考える。HOT は制御理論において 1980 年代～90 年代に研究が進んだロバスト制御理論との関連が深い。例えば、HOT がシステムに存在するリスクの発生確率分布を仮定して設計することは、ロバスト制御系では制御対象に存在する不確かさに関する情報 ( $H_\infty$  ノルムなど) を仮定して設計を行うことと対応している。知的システムの学習を利用した設計方法により構築したロバスト制御系にべき乗則のようなシンプルな秩序が形成されることは [4] に報告されている。本稿ではその数値解析をさらにすすめた結果を示す。

## 2. ロバストな制御系の学習法

本研究では (1) で表される制御対象を取り扱う。

$$x(t+1) = f(x(t), u(t), v(t)) \quad (1)$$

ここで、 $x(t)$ ,  $u(t)$  はそれぞれ状態変数、制御入力であり、 $v(t)$  は制御対象の不確かな成分である。不確かさ  $v(t)$  に対してロバストな制御系を、図 1 に示したようなニューラルネットワークを用いた状態フィードバック制御系により構築することを考える。

ここで示したような対象に対して、図 2 に含まれる二つのニューラルネットワークを競合させながら学習させることにより、ロバスト制御系を学習する方法を提案している [5]。ここでは簡単にその方法を説明する。図 2 に示したニューラルネットワークの一方は  $u(t)$ 、他方は  $v(t)$  を出力

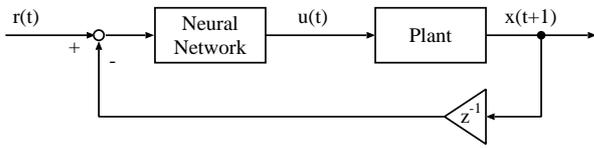


図 1: 制御系ブロック図

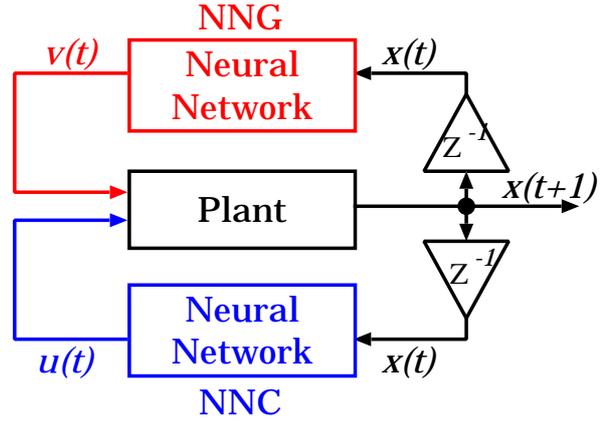


図 2: 競合によるロバスト制御系の学習

とする．このようなシステムに対して (2) のような評価関数を選び，ニューラルネットワークを学習させる．

$$\min_{\mathbf{u}(t)} \max_{\mathbf{v}(t)} \sum_{t=0}^T \|\mathbf{z}(t)\|^2 - \gamma^2 \|\mathbf{v}(t)\|^2 \quad (2)$$

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \quad (3)$$

ここで  $\mathbf{z}$  は評価出力である．このとき，制御器としてのニューラルネットワークは制御結果を最良にするように，制御対象の不確かさを表すニューラルネットワークは制御結果を最悪にするように学習する．つまり，二つのネットワークが競合して学習を行う．評価関数 (2) により，このロバストな制御系の学習は仮定した不確かさの中で最悪なものが存在するとし，最悪環境において最適な方策を持つ制御系を選ぶことから，1. 節で述べたように HOT 構造を持つニューラルネットワークが学習により得られる．また，この学習法に含まれる  $\gamma$  は不確かさと評価出力の  $L_2$  ノルムの比に当たり，小ゲイン定理から  $1/\gamma$  は制御系が安定にできる不確かさの大きさを表す．このため，この方法ではロバスト性を保証した制御器がニューラルネットワークにより学習することができる．学習を実行した結果，対象を安定にすることができる制御器が得られればニューラルネットワークはロバストな制御系を学習したことになる．また，安定な制御系が得られる  $\gamma$  には下限があることに注意する．これは不確かさに対して無制限の不確かさを持つことはできないことから自明である．このことから  $\gamma$  の下限  $\gamma^*$  は制御系が実現可能なロバスト性の最大値を示す．

### 3. 数値実験

本稿では簡単のために以下のような入力に制約のある非線形制御対象を例にあげて数値実験を行った．

$$x_1(t+1) = x_1(t) + h \cdot x_2(t) \quad (4)$$

$$x_2(t+1) = x_2(t) + h \{ (1.0 - x_1^2(t)) x_2(t) - x_1(t) + u(t) + v(t) \} \quad (5)$$

$$[x_1(0), x_2(0)] = [\pm 0.5, 0] \quad (6)$$

$$|u(t)| \leq U \quad (7)$$

制御目的は状態を原点に収束させること，つまりレギュレータ問題とする．また，評価出力  $\mathbf{z}$  には

$$\mathbf{z}(t) = [\sqrt{a}x_1(t), x_2(t), u(t)]^T \quad (8)$$

として学習を行った結果を示す．終端時間  $T$  は 1500 とした．制御対象 (4), (5) において制御入力  $u(t)$  と不確かさ  $v(t)$  は同じ加わり方をしている．このような不確かさは  $u(t) = -v(t)$  と仮にできればその影響を完全に打ち消すことができることからマッチング外乱と呼ばれている．

ここで、設定パラメータについてまとめておく。(7)に現れる  $U$  は入力の上下限である。制御入力  $u$  には大きさの制約があるが、不確かさ  $v$  の大きさの制約は考えないので考慮している不確かさはマッチング外乱であるが完全に除去することができるとはいえない。また、制御対象(4),(5)は val-del-pole 方程式の Euler 差分モデルであることからその原点は不安定である。よって、制御系は不確かさの影響を少なくするだけでなく原点を安定化せねばならない。(8)に含まれる  $a$  は制御性能、ここでは原点への収束の早さを示す。これは(8)を評価出力として定める評価関数(2)は二次形式であること  $a$  はその評価関数において  $x_1^2(t)$  に係るパラメータであるためである。つまり、 $a$  が大きいとして学習を行うと制御性能の優れた制御系が構築できる。このことから、制御性能の定量的な指標として  $a$  を用いることができる。一般に知られているように制御性能の向上はロバスト性の劣化をもたらす。つまり、制御性能指標  $a$  とロバスト性指標  $\gamma$  との間にはトレードオフの関係がある。よって、この二つを同時に最適化することはできず、ロバスト制御設計問題は多数のパレート最適解が存在する多目的最適化問題であるといえる。

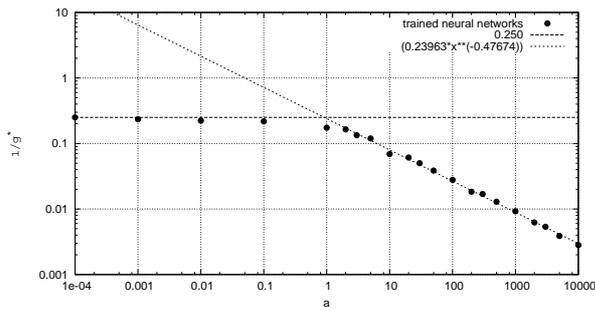
様々な大きさの入力制約  $U$  の元で、制御性能指標  $a$  とそのときの最大ロバスト性  $1/\gamma^*$  についてまとめたものを図3に示す。図より、異なる大きさの入力制約であるが  $a-1/\gamma^*$  の関係としては同じような特性があることがわかる。すなわち、解は大きく二つのグループに分かれる。まず、 $a$  が小さいとき、すなわち制御性能がそれほど高くない制御系であるときはほぼ一定のロバスト性を示すグループを形成する。これはそのときに課せられている入力制約  $U$  において実現できる最大のロバスト性に達しているためである。一方、 $a$  が大きいとき解は右肩下がりの直線としてほぼ近似することができている。図3は両対数表示であることからべき乗則に従っている。この領域は、 $a$  の増加により制御性能への要求が大きくなり、それに伴って入力の制約に係ることが頻繁となり、制御対象そのものの非線形性だけでなく、制御入力の飽和特性という非線形性も存在することからより強い非線形特性が存在する領域である。また、図3からは入力制約  $U$  を大きくなるとべき乗則が現れる  $a$  の領域が右にシフトしているが、これらの結果は制御入力の飽和特性という非線形性に強い関連があることを意味している。

#### 4. まとめ

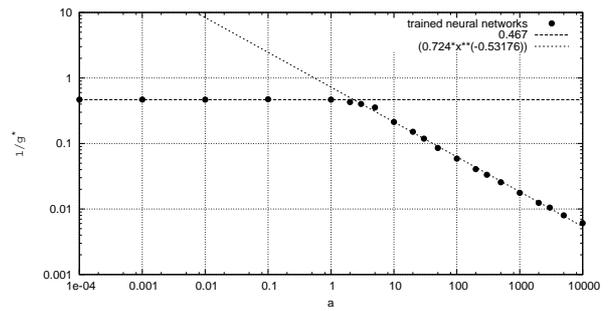
本稿では[5, 6]に提案されているニューラルネットワークによるロバスト制御系の学習方法により構築された制御系が Doyle らの提案する HOT の構造をもつことを示した。その特徴として自然界や生体によく見られるようにべき乗則が現れることを確認した。また、本研究で行った数値計算からは強い非線形特性である制御入力の飽和特性がより大きく影響する領域にべき乗が現れた。制御性能指標とロバスト性指標の間にはトレードオフの関係があることから、本研究で行った数値計算ようなロバスト制御設計問題は多目的最適化問題を解いていると見なせることから環境などの不確かさとの競合学習によるロバスト性の確保と多目的最適化パレート最適解の形成は計算結果にみられるような秩序の形成の一因であるといえる。[1]に示されているように生物の運動にはしばしばべき乗則がみられるが、これは競合相手の存在、生存環境の変動など様々な不確かさに対してロバストとなるようにそれぞれ競合的に進化したことにその一因があるといえるだろう。しかし、発現した秩序がべき乗則のようにシンプルであるのか、そのメカニズムを明らかにするには、より簡単なモデルを用いて解析的に研究を実施することが必要と考える。また、本稿で示したように制御性能とロバスト性にこのような簡単な関係が成り立つということは環境の不確かさに対して適応的に能力やふるまいを変更する適応的な制御系の構築へと発展できる可能性があると考えている。

#### 参考文献

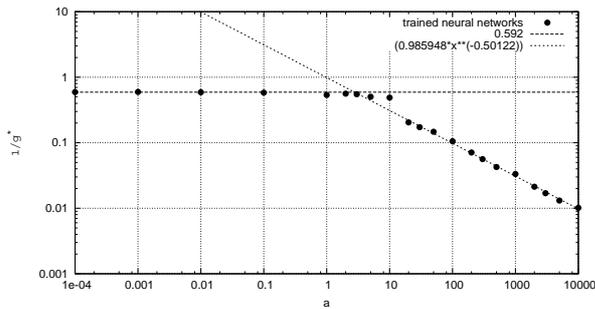
- [1] 東 昭; 生物の動きの事典, 朝倉書店, 1997
- [2] Albert Barabasi(翻訳; 青木): 新ネットワーク思考, NHK 出版, 2002
- [3] J. M. Carlson and J. Doyle, "Highly Optimized Tolerance: A Mechanism for Power Law in Designed system," Phys. Rev. E, vol. 60, no. 2, pp. 1412-1427, 1999



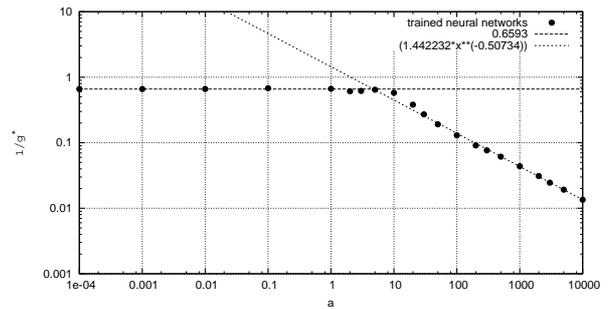
(a)  $U = 0.5$



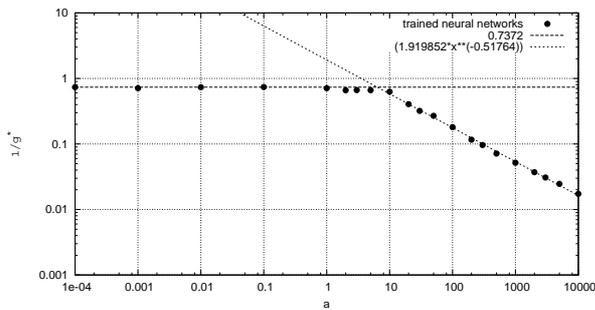
(b)  $U = 0.75$



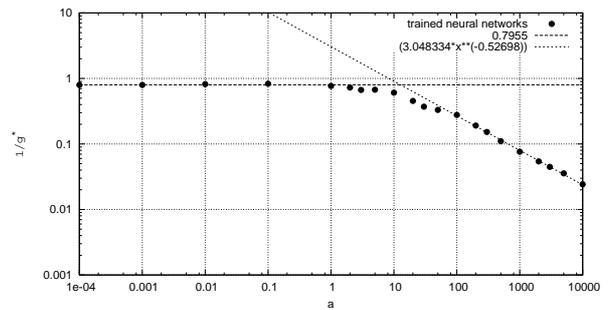
(c)  $U = 1.0$



(d)  $U = 1.25$



(e)  $U = 1.5$



(f)  $U = 2.0$

図 3: 異なる入力制約の大きさ  $U$  における  $a$  と  $1/\gamma^*$  の関係

- [4] Hiroaki Nakanishi and Koichi Inoue: Order Formation in Learning Nonlinear Robust Control Systems by Use of Neural Networks, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks 2006(CD-ROM), 2006
- [5] Hiroaki Nakanishi and Koichi Inoue: Design Methods of Robust Feedback Controller by Use of Neural Networks, Proceedings of the International ICSC/IFAC Symposium on NEURAL COMPUTATION(NC'98), pp. 731–736, 1998
- [6] 中西, 井上: ニューラルネットワークの学習によるロバストな制御系の構築法, システム制御情報学会論文誌, vol. 12, no. 10, pp. 625-632, 1999

# 人間と自律機械の協働における機能分担と 相互調整の設計について

工学研究科機械理工学専攻 堀口 由貴男

**Abstract:** The main interest of this work is appropriate function allocation between humans and machines in a complex technological system in order to maximize the operational effectiveness of the system. To address this issue, cooperation structures between perceptual and motor systems to produce natural human behaviors are focused on, especially in terms of the criterion for deciding which functions should be assigned to the automation newly introduced to the system. A cooperation structure of a natural human ambulatory movement, i.e. walking, was analyzed from the perspective of ecological psychology, and then applied to the design of an automated behavior of a remote controlled robot in a tele-operation environment. Effects of the purposefully embedded connection between robotic behavior for viewing and for ambulation were examined for the system's performance and usability.

**Key words:** Human-machine systems, function allocation, user interface design

## 1. はじめに

機械化は、特定の目的を達成するために工学システムが実行すべき諸機能のうちの一部を、コンピュータ制御を基礎とする自動化によって本来の作業員である人間から新たにシステムに導入された機械に委譲することを意味する。そして、このような機械化はシステムのパフォーマンス向上や人間作業員の負担軽減を目的として実施される。本研究課題では、このシステムの機能的な設計を共同作業員である人間 - 機械間の機能分担の設計であると捉え、設計段階の機能分担の最適化のみならず、両者の共同作業中のインタラクションを通じてより良い分担の状態へと調整することの実現可能性と拠るべき規範について研究する。

作業領域において目的指向の工学システムを成立させる機能構造を目的 - 手段関係の観点から明らかにする分析手法が既に提案されている (例えば, [1] など)。そこで、この分析によって明示された機能構造に対してどのような機能分担を人間と機械の間で為すべきかの基準を人間の認知的な特性の観点から検討し、その基準に基づく機能分担と相互調整の考え方を取り入れた人間機械系設計のための指針を提案することを本研究課題の目的とする。本年度は、人が自然に実現している知覚と行動の連動、中でも歩行などの移動時における移動動作と知覚動作の協調構造 [2] に注目した。そして、移動ロボットの遠隔操縦システムを対象作業領域として、人が移動時に自然に実現している協調構造を自動化の機能としてシステムに実装することの操作パフォーマンスに対する効果を調査した [3, 4]。本稿ではその結果について報告する。

## 2. 人の歩行時の視知覚行動のコントロール

人が歩行時に実行している視知覚行動のコントロールについて、アイマークレコーダを用いた計測実験を実施した。自然に移動している時に歩行者の視野と注視点はどこに向けられているかを調査するためである。実験で得られた視野画像の光学的流動 (optical flow) を解析ソフトで抽出し、その流動の様子から歩行者の移動を特定した。そして、その移動と歩行者の注意の対象を照合して、移動と視知覚行動の関係性を分析した。

図1は廊下を左折する際の視野の光学的流動と注視点の記録である。この記録からは、歩行の結果として生じる光学的流動の湧き出しが常に曲がり角の近傍に現れ、歩行者の注視点はその突出した角の付近に集中することが確認された。そして、このような歩行者の行動は本人の自覚がないままに実行されていた。突出した角はその向こう側の景色を遮る遮蔽縁 (occluding edge) [5] を構成する。そこへ近づく移動によって奥から新たな景色が次々と出現するために、遮蔽縁はいわば環境の構造についての新たな情報の源泉となっており、歩行者の注意がそこに惹きつけられ

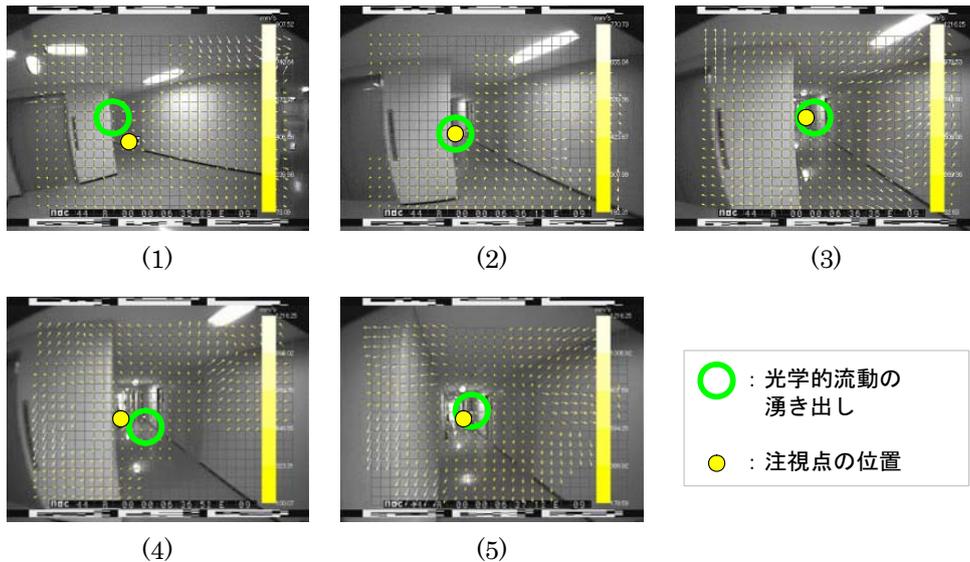


図 1: 歩行時の視野の光学的流動と注視点

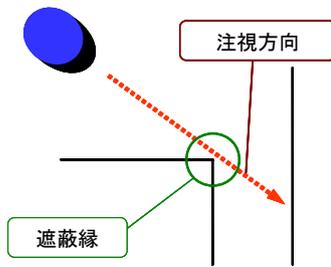


図 2: 斜交い注視

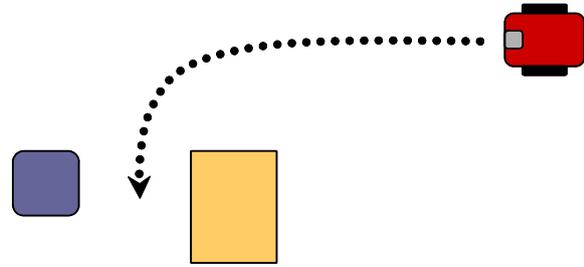


図 3: 遠隔操縦実験タスク

るのは自然なことである．このように遮蔽縁越しにその奥の面を見るという図 2 に示す注視の仕方は斜交い注視と呼ばれる．この実験では，角を曲がる際に歩行者の注意が自然と遮蔽縁の近傍に向けられ，移動と視知覚行動の連動が観察できたことになる．そして，この振る舞いは，歩行者の身体の移動と視野の移動が斜交い注視という身体部位間の協調の関係で結びつけられていることを示している．

### 3. 移動動作と知覚動作を連動させる移動体操作系

「知覚 - 行為循環」という概念が代表するように，知覚と行為の関係は前者が後者を駆動するというような一方向の単純な関係で捉えられるものではない．環境の知覚が実現可能な行為を特定する一方で，その行為の実行は新たな環境の知覚を引き起こし，次の行為の選択を促す．すなわち，知覚と行為は絶えず循環を繰り返しており，相互に影響を与え合う関係にある．

人が自身の身体を使って移動する場合，外界を知覚する認知主体とそこで行動する行為主体は同一である．しかし，いわゆる遠隔操作環境ではこの構図が，認知主体が人間（オペレータ）に，行為主体が機械（ロボット）にという形に分離する．さらに，行為主体の身体性が変化することとあいまって，自己の身体を用いる場合とは異なる新たな物理的操作と認知的負荷が課せられ，遠隔作業環境内でロボットの置かれている状況の認識はオペレータが直感的に達成できるものではない．心身が分離した結果として「身体」の操作が煩雑化し，作業の認知面での複雑さが増大しているためである．人間機械システムの作業効率に影響するこのような操作性の低下について，人間と自動化の機能分担の観点から改善を試みる．そのために，人間が無意識・無自覚のうちに実行している知覚と行為の連動（協調構造）を自動化に委譲することの，オペレータへの影響を移

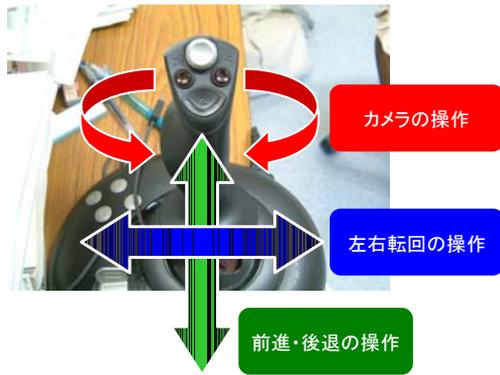


図 4: ロボットとカメラを操作するためのコントローラ

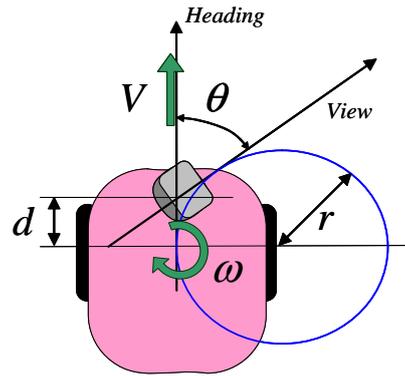


図 5: 移動動作と知覚動作を連動させる自動化の振る舞いに関するパラメータ

動ロボットの遠隔操縦実験によって調査した。

実験タスクは図 3 に示す移動ロボットの狭路への誘導である。ロボットの移動指令はその前後方向の直進速度と左右方向の転回速度を指定することで行う。遠隔の作業環境についての情報としてはロボットの前方上部に取り付けられたパン・チルト・カメラからの映像のみが与えられる。ロボットとカメラの操作にはジョイスティックを用い、図 4 に示すような操作指令との対応を基本的に与えている。すなわち、スティックの前後と左右の傾斜がロボットの直進速度と転回速度の指定に対応し、スティックのひねり量がカメラのパン角の指定に対応する（チルト角は操作しない）。

自動化への委譲の対象とする協調構造は、前節の計測実験で観察できた斜交い注視の振る舞いをもとにして決定した。すなわち、曲がるという移動動作と曲がる方向を見るという知覚動作の協調をロボット内で自動化した。図 5 にこの自動化の振る舞いに関するパラメータを示す。自動化は、カメラのパン角  $\theta$  と直進速度  $V$  を入力としてロボットの転回速度  $\omega$  を決定する。その決定式は、タイヤの回転軸からカメラの回転軸までの距離  $d$  を用いて式 (1) で与えられる。

$$\omega = \frac{\sin \theta}{d(\cos \theta + 1)} V \quad (1)$$

なお、この自動化を実装したロボット操作系では、図 4 において説明したジョイスティックを左右への傾斜による転回速度の指定を無効にしている。

上述の自動化を用いない操作系 A と自動化を用いる操作系 C を比較対象として、図 3 の操縦タスクを実行する実験を実施した。図 6 に、光学的流動解析にかけて特定した流動の湧き出しと通路の遮蔽縁を記した、ある被験者が操作系 C を用いて操作しているロボットのカメラ画像を示す。この図において、光学的流動の湧き出しや遮蔽縁が画像中に現れていることが確認できる。これは図 1 に示した歩行の場合と同様な行為主体の振る舞いの徴候であり、実装した自動化がうまく機能していることを意味している。昨年度の研究において、これと同様の振る舞いが操作系 A に関して確認されたことを報告したが、視野画像や光学的流動といったロボットの振る舞いの解析からは、作業パフォーマンスも含めて 2 つの操作系の違いは確認できなかった。しかし、被験者にとっての操作感において両者は明確に区別された。具体的には、「操作がしやすい」という直接的な感想や、「練習を重ねればよりうまく扱えそう」といった手応えなど、より肯定的な意見を操作系 C の場合には得られた。

角を曲がる際の外界の情報とそこにある行為主体の定位には、視覚的情報、特に遮蔽縁と光学的流動は重要な情報である。そして、そこで得られた情報は主体の移動に影響を与える。人が自身の身体を移動させる場合、その一連の活動はほとんど無意識化で実践され、それに割かれる認知的なリソースは非常に小さい。しかし、ロボットを（遠隔）操縦する場合、情報を取得してからそれをジョイスティックの操作に反映させることを全くの無意識下で実践することは難しく、

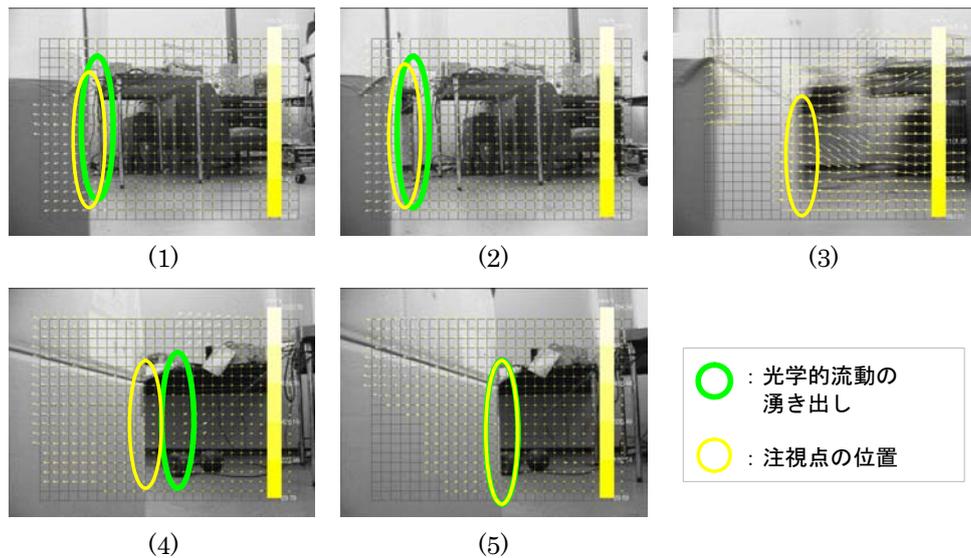


図 6: 移動ロボットのカメラ画像における光学的流動と遮蔽縁（操作系 C）

認知的なリソースをそこに多く割かねばならない。操作系 A ではカメラの操作によって移動のための情報を得ることができるが、カメラ操作と移動操作を独立して操作しなければならない。この操作系は要求される操作の複雑さが大きいために、オペレータへの認知的負担が大きい。一方、カメラの操作を移動操作と連動させた操作系 C は、操作の自由度が制限されたが、その連動は人が無意識に実行している移動動作と知覚動作の協調構造と一致するため、オペレータは映像とロボットの移動をより自然に関連づけることができるはずである。このことが操作系 C でのオペレータの認知負担の低減に寄与したと考える。

#### 4. おわりに

本年度は、人が歩行において自然に実行している斜交い注視の振る舞いを身体部位間の協調構造として注目し、その構造を行為主体と認知主体が分離する遠隔操縦環境の設計に利用することの効果について調査を行った。習熟した行為では意識されることのない下位動作間の協調のコントロールが否応なく意識化に上る機械システムの操作において、そのような協調構造の自動化機能への委譲はオペレータの認知負担の低減にとって非常に有効であることが見込まれる。その効果を定量的に評価することが直近の課題である。

#### 参考文献

- [1] Rasmussen, J., A. M. Pejtersen, and L. P. Goodstein. *Cognitive Systems Engineering*. Wiley-Interscience, August 1994.
- [2] 三嶋. エコロジカル・マインド: 知性と環境をつなぐ心理学. 本放送出版協会, 2000.
- [3] 袴着, 堀口, 榎木. 移動体の遠隔操縦において操作系に埋め込まれた制約構造の知覚 - 移動間協応への影響について. 第 22 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 549-554, 2006.
- [4] 袴着, 堀口, 榎木. 知覚行為と移動行為の協調構造の分析と移動体操作系設計への適用. 第 19 回自律分散システム・シンポジウム資料, pp. 245-250, 2007.
- [5] Gibson, J. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton Mifflin, Boston, MA, 1979.

# 環境適応性に優れたヒトの手の機能の解明および その機械的実現

工学研究科機械理工学専攻 横小路 泰義

**Abstract:** For the purpose of realizing the functions of the human hand on mechanical systems, fundamental understanding of the human hand is necessary through intensive observations of manipulation tasks by humans. As an example of a skilled manipulation task, we target origami folding. We first analyzed the difficulty of origami manipulation and designed a robotic mechanism that can make an origami work, *Tadpole*, based on the observation of origami folding by a human. Although the appearance of the developed robotic hand is dissimilar to a human hand, we succeeded in performing the origami task *Tadpole*.

**Key words:** Multi-fingered hand, Origami folding, Dextrous manipulation, Flexible objects

## 1. はじめに

本研究課題では、環境に対して適応的に働くヒトの手足の機能の解明およびその機械的な実現を、機構、センシング、アクチュエーションの側面から目指し、人の動作を詳細に観察し解析を重ね、その結果に基づく設計論や数理モデルを提案し、機械的な機能の実現を通してヒトの手足の機能の本質的理解を目指してきた。昨年度からは「物体を操る手」にテーマを集中し、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ている。

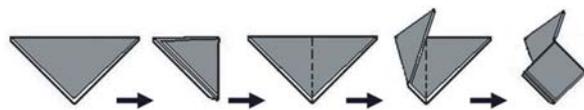


図 1: おたまじゃくしの折り手順

昨年度は、各指3自由度からなる4本の指をもつハンドを設計・試作し、図1に示す「おたまじゃくし」という作品の要素作業を実行できるまでにはなかった。一連の折りを実行することはできなかった。本年度は、人間の折り動作の観察結果から、ロボットの動作を一部改良し、「おたまじゃくし」の一連の折りを試みた。

昨年度は、各指3自由度からなる4本の指をもつハンドを設計・試作し、図1に示す「おたまじゃくし」という作品の要素作業を実行できるまでにはなかった。一連の折りを実行することはできなかった。本年度は、人間の折り動作の観察結果から、ロボットの動作を一部改良し、「おたまじゃくし」の一連の折りを試みた。

## 2. 折り紙ロボット

**2.1 ロボットの機構設計方針** 折り紙を折るロボットとしては既に Balcomらによるもの [1]がある。ただし、Balcomらのロボットはある意味折り紙専用機械である。折り紙を折ることのみが目的ならば、専用機械を作ることには何の問題もないが、ロボットを通して人間の手の器用さを理解したいのならば、人間と同じように折るロボットを作らなければならない。ただし、ロボットの機構設計に際しては、我々はあえてロボットの外観にはこだわらずに、与えられたタスクを実現する最小自由度のハンドを設計することを心がけた。したがって、設計の課題としては、「人間の外観にはとらわれずになるべく自由度の少ない機構で、ただし人間が折り紙を折るのと同じように図1に示した手順の「おたまじゃくし」を折ることができるロボットを実現せよ」とした。

ただし目標とする折り紙作品を、特定のものに限ってしまうと結局設計するロボットが一種の専用機械となってしまうがちなことが懸念されたので、あらかじめ目標とすべき折り紙作品のロード

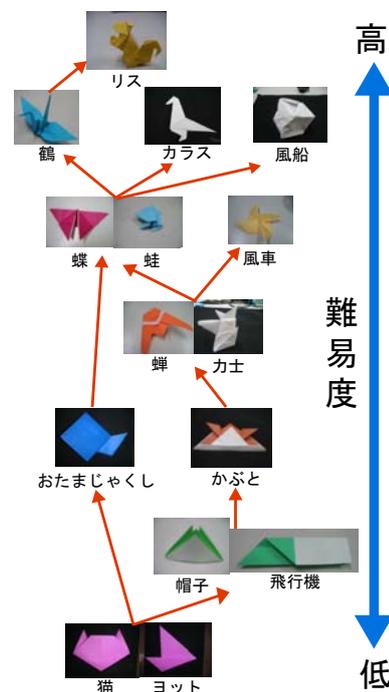


図 2: 難易度に基づく折り紙作品のロードマップ

マップを作っておくべきと考えた．そこで，我々は折り紙の難易度として「操りの種類」「ステップ数」「折りの堅さ」「折りのサイズ」の4つの指標に注目し，代表的な15種類の折り紙作品についてこれらの指標を評価した．この難易度に応じて各作品を並べた図が図2である．図2より，今回目標として設定した「おたまじゃくし」の位置づけが明確になっている．

2.2 試作した折り紙ロボットシステムの概要 昨年度は，図1に示した「おたまじゃくし」を折るための個々の動作について必要な指の本数と指先の動きを検討した．一例として，図3に袋折りの作業解析の結果を示すが，全体を通して最終的に4本の指があれば作業が可能であることが分かった[2]．具体的には，主に紙を操作する指2本（操作指）と固定する指2本（固定指）の計4本である．

図4に試作した折り紙ロボットを示す．ロボットは，主に紙を固定する2本の固定指と，主に紙を操作する2本の操作指からなる．いずれも構造は基本的に同一で，鉛直上下にはボールねじスライドを用い，平面内移動には2リンクの機構を持つ．固定指と操作指ではリンクの長さが異なり，固定指は約120[mm]，操作指は約220[mm]である．なお作業対象の折り紙は，一般的な150[mm]四方のものを想定している．

折り紙作業において視覚が重要な役割を果たしているのは言うまでもない．開発した折り紙ロボットシステムの視覚認識部は，市販のWebカメラ（30万画素）を使用した．カメラは折り紙の真上約400[mm]の位置に固定して配置し，折り紙全体がとらえられるようにした．このとき画面の実質的な解像度は約0.5[mm]である．

折り紙作業において視覚が不可欠なのは，折りの際の紙の位置合わせの際である．このため，カメラ画像中の折り紙の角の位置を自動的に見つけ出さなくてはならない．画像処理によって折り紙の角の位置を見つけるシステムは，筆者らの研究グループで開発中である．図5はその一例であり，Hough変換によって正しく角の位置が認識されているのが分かる．

しかし残念ながら現状では誤認識も多く，十分に高い信頼性を持って角の検出ができるわけではない．そこで，現時点では画像処理による折り紙認識の手法は

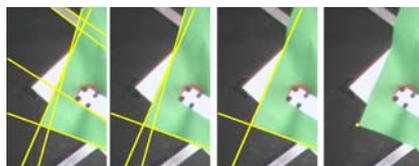


図5: Hough変換を用いた折り紙の頂点検出

継続して開発を続けるものの，構築するシステムでは本来画像処理での折り紙認識が必要な場面で人間がカメラ画像上で介入を許すこととする．具体的には，図6に示すようにパソコン画面上にカメラ映像を表示し，人間は画面上の折り紙の頂点や辺の位置情報をマウスでクリックして与える．システムは人間から与えられた情報を基に折り紙位置の修正動作を生成し，折り紙の位置合わせを行う．人間の介入は画面上での折り紙の角などの位置を入力するだけであり，各指動作を直接指令することはない．したがって，将来的に画像処理による折り紙位置の自動認識が可能とあったときには，それと簡単に置き換えられるものであることに注意されたい．

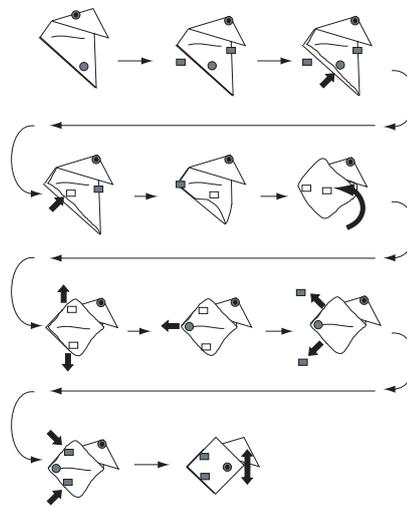


図3: 袋折りの作業解析

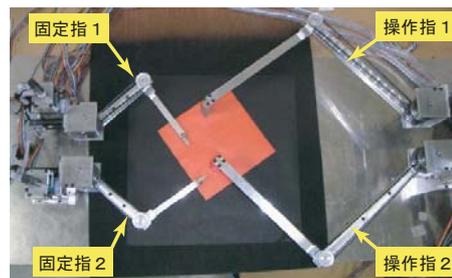


図4: 折り紙ロボットの概観

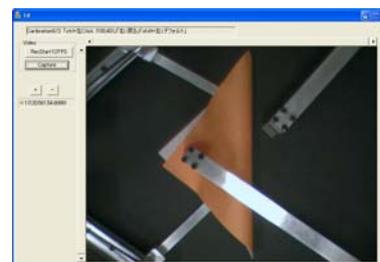


図6: 状態認識システム

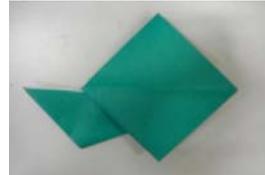


(a) 改善前



(b) 改善後

図 7: 袋折りの操作の改善



(a) ロボット



(b) 人間

図 8: 一連の折りによるおたまじゃくし

### 3. 実験

3.1 要素作業実験 昨年度は「おたまじゃくし」の一連を手順を実現する前に、まず3つの要素作業に分解し、それぞれの要素作業を実現する実験を行った。

最初の要素作業Ⅰは、図1の始めの三つの手順、すなわち、「谷折り1 谷折り2 折りを元に開く」までとする。これは袋折をするための準備作業と位置づけられる。要素作業Ⅱは、最後の袋折りであるが、初期状態としては本来の「おたまじゃくし」のように尻尾が折られた状態ではなく、要素作業Ⅰの終了段階とした。最後の要素作業Ⅲは、図1の3番目から4番目までの作業に相当し、「折を元に開く 谷折り3」によって尻尾を折る作業である。各要素作業における初期状態は、要素作業Ⅰでは新品の折り紙、要素作業Ⅱでは人間が要素作業Ⅰに相当する作業を予め施した折り紙、要素作業Ⅲでは人間が「谷折り1 谷折り2」までの作業を予め施した折り紙とする。

実験の結果、試作したシステムで要素作業Ⅰ、Ⅱ、Ⅲそれぞれの実行に成功した。表1に各要素作業の実験結果を示す。

表 1: 各要素作業の実験結果

	要素作業Ⅰ	要素作業Ⅱ	要素作業Ⅲ
所要時間 [min]	20	9	4
誤差 [mm]	1	5	1
成功確率 [%]	80	20	40

3.2 一連の折りの実現 本年度は、昨年度の成果をベースに「おたまじゃくし」を一連で折ることを試みた。表1より、特に袋折りの作業(要素作業Ⅱ)の成功確率が低く、一連で折るためにこの作業の成功率の向上が必要と考えた。

要素作業Ⅱにおいて作業が失敗する大きな原因の一つに、袋折をする際に指先を紙の間に挿入するシーケンスで一番上の紙だけをたわませる時に失敗することが挙げられる。要素作業Ⅱでは、図7(a)に示すように紙同士と紙とゴム球との摩擦力の差を利用して上の紙をたわませ、できた隙間に指先を挿入しようとしていた。この方法の問題点としては、かなり大きな指先力を要することと、紙がたわんだとしてもうまく隙間ができない場合が多いことということであった。そこで再び人間が折り紙を折る際の手の動作を観察し、図7(b)に示すように折り紙の折の山の部分を押しこむことによって袋を広げ、できた隙間に指先を挿入する方法に変更した。この動作改良の結果、うまく紙をたわませられる確率が向上した。これ以外にも、要素作業Ⅰ中の「谷折り2」において、折り紙の回転と並進動作を削除して再位置合わせの手間を省くと共に、再位置合わせによる誤差累積を押しさえることにした。

以上のような改良を行った結果、おたまじゃくしを一連で折ることに成功した[3]。図8にロボットによる作品と人間による作品との比較を示す。図では分かりにくいですが、ロボットで折った作品は、全体的に折りが甘くなっている。今後より複雑な折り紙作品を折るには、折りをより鋭くする対策が必要となろう。そのためには指先の形状を変更する必要がある、また機構自体の剛性を上げるために何らかの設計変更が必要であるかもしれない。

作業に必要な時間は、現在のところ約30分であり人間が折るスピードに比べるとはるかに遅いが、画像処理の自動化、折り操作の効率化、個々の動作の高速化を図ることで、時間の短縮は可能であると考えている。ロボットが一連で折る様子を図9に示す。所要時間よりも問題なのが成功率である。現在のところ成功率は約20%程度でしかない。失敗する原因は、紙の挙動に不確実性があるためであり、現状で行っている限られた局面のみでの修正動作だけでは不十分である。今後は、カメラに加えて指先に力センサや触覚センサを付加し、常に紙の状態をモニタして失敗を

未然に防ぐ方法を取り入れて行く予定である。

#### 4. まとめ

本報告では，人間の手の器用さを理解するために同じ機能を機械的に実現するボトムアップアプローチの一例として，折り紙作業を取り上げた場合を紹介した。

それぞれ3自由度の4本の指で「おたまじゃくし」が折れることが分かった後で，再び人間が折り紙を折る様子を見てみると（図10），親指と人差し指で折り紙をつまんで操作しており（＝操作指），その間は他の指は指の側面を使って紙を固定しているように見える（＝固定指）。つまり，人間の手の形にこだわらずに，人間と同じような方法で折り紙を折るロボットを作ったことで，この折り紙作業に必要な機能を抽出できたのではないかと考えている。

今回おたまじゃくしの成功率を上げるために指の動作の改良を行ったのであるが，そのために人間がどのようにしているかを詳細に観察して分かったこととして「紙さばきの巧さ」が挙げられる。つまり人間は長年の経験から紙の癖をよくわきまえていて，柔軟な紙を失敗せずにうまくさばく方法を知っているようである。このことから「器用さ」とは，指の動作そのものではなく，いかに対象物の癖を熟知して巧妙に対象物を扱っているかが重要ではないかと考えられる。結局現時点では，我々は折り紙ロボットを通して「巧みさは運動それ自体にあるのではなく，変わりゆく外界の条件との相互作用によって現れてくる」というベルンシュタインの指摘[4]を再認識しただけなのかもしれない。その意味では，失敗を未然に防ぐメカニズムを組み入れることができ初めて器用な折り紙ロボットと言えるのであろう。

将来的には「鶴」程度の複雑さの作品が折れるロボットの開発を目指したいが，このためにはもちろん新たな機構を設計する必要がある。そのときの機構として，結局人間の手のような機構が最も適当ということになるのか，それともまったく違った機構になるのかは興味深い問題である。

#### 参考文献

- [1] Devin J. Balcom and Matthew T. Mason, “Introducing Robotic Origami Folding,” Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, (2004), 3245-3250.
- [2] 鴨谷悠介, 横小路泰義, 折り紙作業の解析とロボットハンドによる実現に関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2P1\_D37, 2006.
- [3] 鴨谷悠介, 田中健太, 横小路泰義, 折り紙作業を題材とした作業解析に基づくロボットハンドの設計と作業実現, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2C12, 2006.
- [4] ニコライ A. ベルンシュタイン (工藤和俊 訳), デクステリティ 巧みさとその発達, 金子書房, 2003.

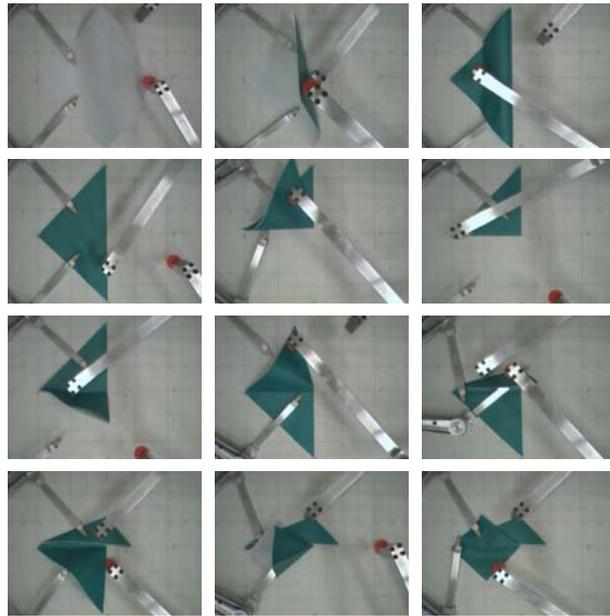


図9: 「おたまじゃくし」を一連動作で折る様子

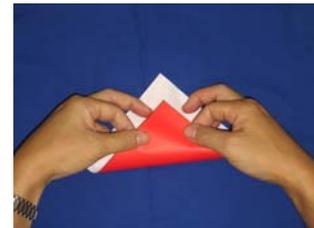


図10: 人の手による折り紙

# 歩行面の振動と歩行リズムの相互作用に関する研究

(引き込み現象を実現する歩行モデルの作成に関する研究)

工学研究科機械理工学専攻 宇津野秀夫, 後藤一孝

**Abstract:** Human locomotion system has ‘pull-in effect’, in which if the ground swings with specific frequencies in one’s frontal plane, a human’s gait rhythm changes into the ground swinging frequency from one’s natural gait rhythm. However the cause of the effect is still not clear. This paper notices human’s posture controlling system, and refers to the cause of pull-in effect with suggesting a dynamical human gait model which has two legs and posture controller. Firstly the features of pull-in effect are clarified experimentally and secondly the posture controller which works for stabilizing frontal body behavior is studied. Then a dynamical human gait model is established from the results. The model consists of two beams and a mass representing legs and center of gravity of one’s body. It basically behaves passively, but only the posture is controlled actively. The model shows the features of pull-in effect very well, and looking at the behavior of the model, it is explained that the posture controller causes pull-in effect.

**Key words:** Synchronization, human walk, vibration, Human Gait Model, Pull-In Effect, Posture Control

## 1. はじめに

人間の歩行リズム生成機構には、人体の前額面(体の正面)に対して特定の振動数域で横振動する歩行面上を歩行する時、歩行リズムが歩行面の振動数に同調するという引き込み現象が生じることが報告<sup>1)</sup>されている。そこで歩行を模擬した力学モデルを作成し、そのモデルを用いて強制変位加振台上で引き込み現象を実現し、引き込み現象の発生を説明する研究が行われた。しかし引き込み現象の性質を物理的に解明することに重きをおいたため、人間に比べて引き込まれる振動数域が広いことに加え、人間の横方向加振力を定量的に評価できていない問題点が残されている。

本研究ではこの力学モデルをベースに、人間と同等の横方向加振力と引き込み振動数域をもつモデルに拡張し、強制変位台における引き込み現象の定量的な解析を可能にした。続いて、実際の橋上を複数人が歩行する場合を解明するため、自由振動台上を歩行する改良モデルのシミュレーションを行った。実際の引き込み現象において、台と人との位相差に着目して引き込み現象の解釈を試みた。

## 2. コンパス形歩行モデル

**2.1 コンパス型モデル** 力学モデルを作成する上で、McGeerの提案する受動歩行モデル<sup>2)</sup>を用いる。受動歩行モデルとは、人間の足を模した二脚構造を有するモデルが、各関節に能動的なトルクを加える制御なしに、倒れこみ動作により自立的に歩行運動を生成する二足歩行モデルであり、その挙動は実際の人間の歩行をよく再現する。McGeerの受動歩行モデルでは矢軸面内の挙動と前額面内の挙動が独立にモデル化されているので、本稿では前額面内の歩行面の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力学モデルのみを用いる。図1(a)に示すような人間の前額面内歩行運動を模擬するため、図1(b)に示す二脚を有するコンパス型受動歩行モデルを用いる。図1(b)に示すように、錘の質量、脚部長さ、脚

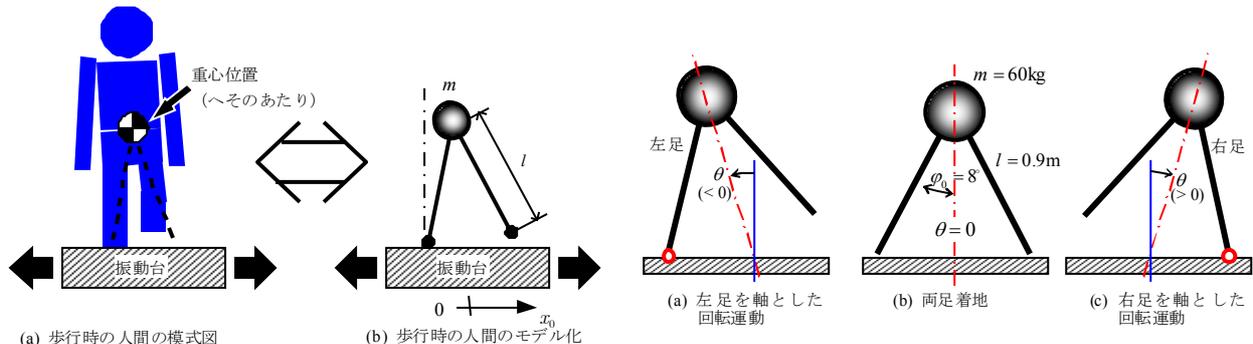


図1 前額面内の歩行モデル

図2 歩行モデルの挙動

の開き角をそれぞれ  $m, l, \varphi_0$  とし, 脚部は質量を持たないものとする. ここでコンパスモデルの脚部長さとは人間における足裏から重心 (へそのあたり) までの長さに相当する.

このモデルの運動は 2 種類の挙動に分けられる. 一つは図 2(a) のように左足を支点とする倒立振り子としての挙動, 他方は図 2(c) のように右足を支点とする倒立振り子としての挙動である. 強制加振を加える台の変位を  $x_0$  と表す. また, 倒立振り子の回転運動は  $\varphi$  で観測するのが一般的であるが, コンパスモデルの挙動は人間の重心の横揺れと対応させていることに考慮し, 中心軸の鉛直線からのずれ  $\theta$  で計測する. ここで  $\varphi$  と  $\theta$  の関係は次のようになる.

$$\text{右足支点 } \theta = \varphi_0 + \varphi \quad (> 0) \quad (1)$$

$$\text{左足支点 } \theta = -\varphi_0 + \varphi \quad (< 0) \quad (2)$$

パラメータは実際の人間に基づき表 1 のように定めた.

表 1 定めたパラメータ

質量 $m$	脚部長さ $l$	脚の開き角 $\varphi_0$
60 kg	0.8 m	$8^\circ$

**2.2 台上のコンパスモデル** 減衰を考慮したコンパスモデルの運動方程式を考える. 図 2(a)(c) のように片足を軸とした回転運動は, 運動する台の上の倒立振り子の挙動とまったく同じである. よって倒立振り子の挙動を扱いやすい  $\varphi$  に関する運動方程式を用い, 式(1),(2)を用いてコンパスモデルの挙動  $\theta$  に変換することとする.

図 3 より

**振り子**

$$J\ddot{\varphi} = Vl \sin \varphi - Hl \cos \varphi - c\dot{\varphi} \quad (3)$$

$$m \frac{d^2}{dt^2} (x_0 + l \sin \varphi) = H \quad (4)$$

$$m \frac{d^2}{dt^2} (l \cos \varphi) = V - mg \quad (5)$$

※ 重心まわりの慣性モーメント  $J = 0$

**台車**

$$M\ddot{x}_0 = U - H \quad (6)$$

となり, 式(3)~(6)から,  $H$  と  $V$  を消去して次式を得る.

$$\ddot{\varphi} - \frac{g}{l} \sin \varphi + \frac{\ddot{x}_0}{l} \cos \varphi + C\dot{\varphi} = 0 \quad (C = c/ml^2) \quad (7)$$

$$(M + m)\ddot{x}_0 + ml\ddot{\varphi} \cos \varphi - ml\dot{\varphi} \sin \varphi = U \quad (8)$$

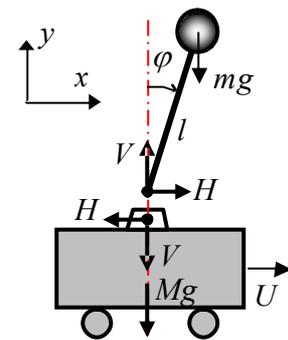


図 3 倒立振り子

**2.3 コンパスモデルの撃力と減衰** 減衰のあるコンパスモデルの挙動のうち, 右足を支点に回転する場合を考える (図 4). その挙動  $\theta$  は図 5 のようになる.

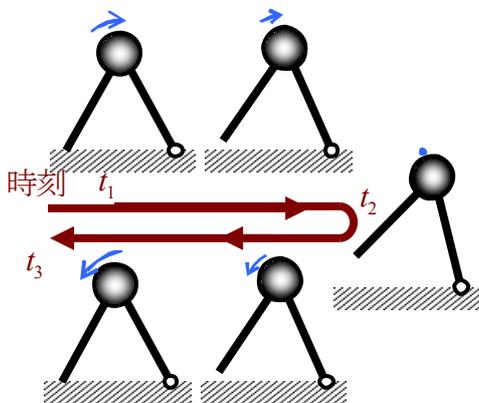


図 4 右足支持の様子

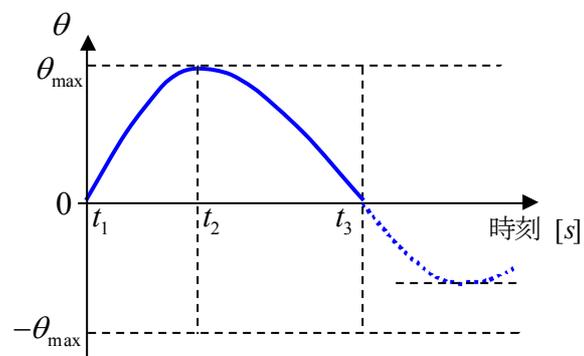


図 5 減衰をもつコンパスモデルの振れ角

時刻 $t_1$ に右足を支点とした回転運動がはじまり、時刻 $t_2$ に最高点に達し、時刻 $t_3$ に左足が接地し右足支点の運動が終了する。最高点の角変位を $\theta_{\max}$ とする。

図5から読み取れるように、減衰の影響で、回転速度の絶対値 $|\dot{\theta}|$ が時刻 $t_1$ に比べて、時刻 $t_3$ では遅くなっていることがわかる。そのままでは、左足支持による運動後、点線波形(.....)のように再び最高点 $-\theta_{\max}$ に達することができず、いずれ収束し周期運動が維持できない。そこで両足が接地する時刻 $t_3$ で周期運動を維持できるような撃力を加える。この撃力は人間の左足による歩行面の蹴り上げに対応する。表2に足踏み歩行時の減衰係数測定結果を示す。個人差もあるが同じ被験者でもばらつきが見られたので、目安として $\mu$ が1.1~1.2の間におさまるように減衰係数を決定する。

表2 減衰係数の測定実験結果

	被験者 A	被験者 B	被験者 C	被験者 D	平均
$\mu$	1.36	1.11	1.17	1.03	1.17

**2.4 人間の横方向加振力** 人間が歩行する際、足裏には床反力が生じ、それは進行方向・上下方向・左右方向にわけて観測することができる。この床反力は通常、体重すべてがかかった時の力(=体重×重力 [N])を100%として表される。3方向の中でも左右方向の床反力が、モデル作成に必要な横方向加振力である。人間の横方向床反力は上下方向加振力に比べて個人差や歩き方に大きく左右されるということは想像に難くない。実際に論文<sup>3,4)</sup>によっても結果がさまざまである。図6は横方向床反力の概形である。 $t_1$ が片方の足が着地した瞬間で、 $t_3$ がその足が地面を離れる瞬間である。おおよその評価として、歩行モデルによって生じる横方向床反力を平均10%前後に収める用にパラメータを決定していく。不安定な床面を歩く際は少し足幅を広げて歩くため一般的な歩行より少し高めに目標とする床反力を設定した。

**2.5 作成モデルまとめ** 図7に作成したモデルの挙動をまとめた。表3に本章で調整したパラメータをまとめ、それによって自動的にきまる通常歩行時におけるモデルの性質を表4に示した。通常歩行時における実際の人間の性質をよく模擬していると言える。

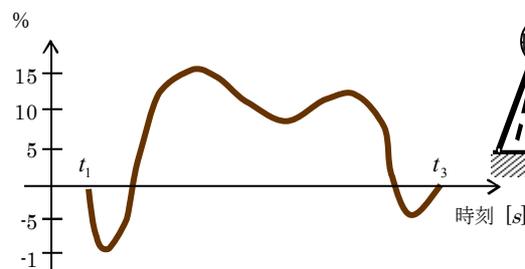


図6 人間の片足から生ずる横方向床反力(概)

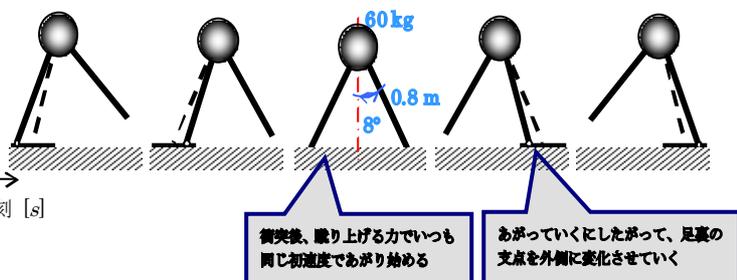


図7 作成モデルのまとめ

表3 調整したパラメータ

質量 $m$	脚部長さ $l$	脚の開き角 $\varphi_0$	最大角変位 $\theta_{\max}$	減衰係数 $C$
60.0 kg	0.800 m	8.00°	4.00°	1.20 /s

表4 自動的に定まる通常歩行時の性質

初期角速度	歩行リズム $f_p$	$\mu$	横方向床反力 $\bar{R}$
29.1°/s	0.866 Hz	1.14	11.0%

### 3. 強制変位台上での引き込み現象

**3.1 計算と実験との比較** 振幅 10mm で強制変位させる床面の加振振動数を 0.3Hz から 2.1Hz まで 0.025Hz ずつ変化させた時、足踏みの振動数を観測する。実際の人間での結果が図 8、作成モデルでのシミュレーション結果が図 9 である。ともに 1 次および 2 次の引き込み現象が確認できる。引き込み幅は人間に比べ、作成モデルの方がやや広いがほぼ同等と言える。

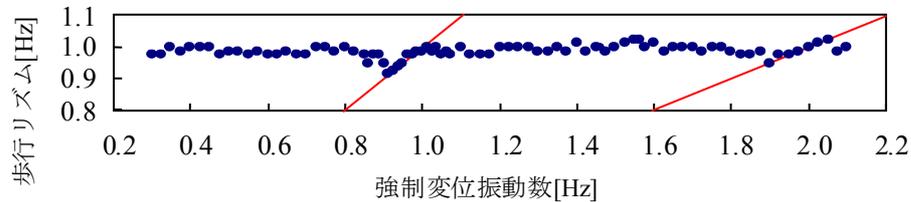


図 8 加振振動数と歩行リズムの関係 (人間)

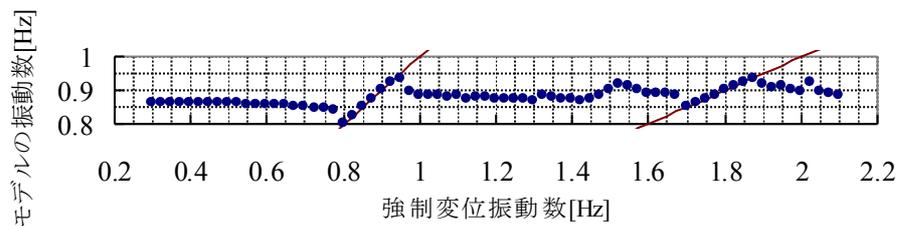


図 9 加振振動数と歩行リズムの関係 (コンパスモデル)

**3.2 強制振動台と歩行モデルとの位相差** 作成したモデルが 1 次の引き込み現象を起こす際のモデルと台の位相差を求めた。人間での実験結果と比較するため、図 9 の 1 次引き込み域において横軸を「強制変位振動数 / モデルの固有振動数」に変更したグラフが図 10(a)、その位相差を描いたグラフが図 10(b)である。位相差  $\pm 90$  度が同相と逆相の境目であるとする、低い振動数への引き込み時は同相気味で、高い振動数への引き込み時は逆相気味であることがわかる。また、引き込み振動数域において、やや同相に偏っている様子が読み取れる。人間における実験結果は実験数が少なく、また、かなりのばらつきがあるため、現状では作成モデルとの整合性を確認することができなかったが、高い振動数への引き込み時(横軸が 1 より大きい部分)は実験においてもシミュレーションにおいても逆相であることなど共通点も存在する。

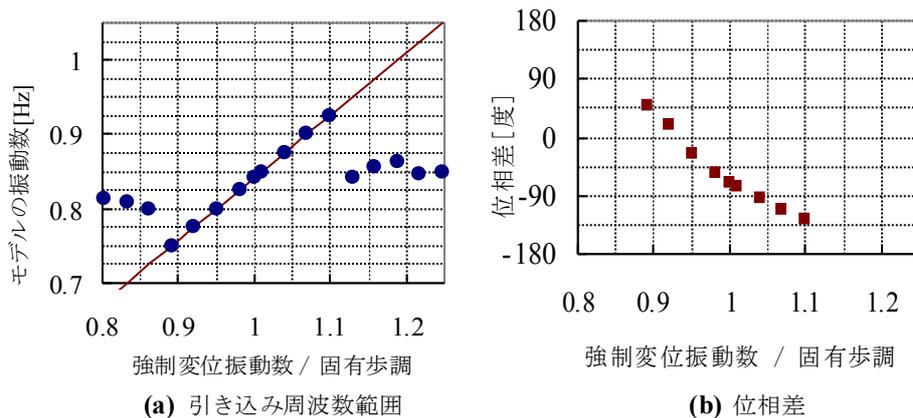


図 10 1 次引き込み現象と位相差

### 4. 自由振動台上での引き込み現象

**4.1 自由振動台上での引き込み現象** 本研究の目的は実際の橋上を歩行する人間が橋の揺れに及ぼす影響を求めることである。そのため本節では、自由振動する台上に作成したモデルを歩行させるシミュ

レーションを行う。自由振動台のモデルを図 11 に示す。

人の運動方程式は 2 節に示したものと同じで、台の運動方程式は

$$M\ddot{x} = -Kx + F$$

であらわされる。台の初期変位は 0 とする。台の固有振動数  $f_b$  は、

台上に歩行モデルが乗っていることを考慮し、

$$f_b = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M+m}} \quad (9)$$

であらわされるから、目標とする固有振動数  $f_b$  を実現するために

ばね定数  $K$  を

$$K = 4(M+m)\pi^2 f_b^2 \quad (10)$$

に基づいて決定した。橋と人が同じ周期をもつ時、橋を揺らす力は橋と人の位相差に大きく影響をうける。図 12 の破線は第 2 節に示した片足が地面に付着している間の人間の横方向加振力である。横軸全体で足が接地している時間をあらわす。本節では簡単のため図 12 の実線のように地面に付着している間ほぼ均等に横方向に力が作用すると考える。

この場合、速度を常に増大させる方向に力がかかる場合が最も橋の揺れを増大させる位相差であり、速度を常に減少させる方向に力がかかる場合が最も橋のゆれをおさえる位相差である。図 13 にそれぞれの様子を示す。

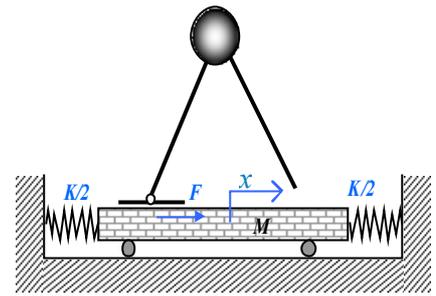


図 11 横方向床反力

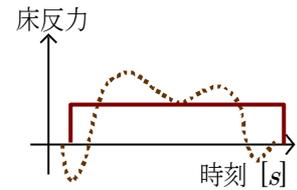


図 12 横方向床反力

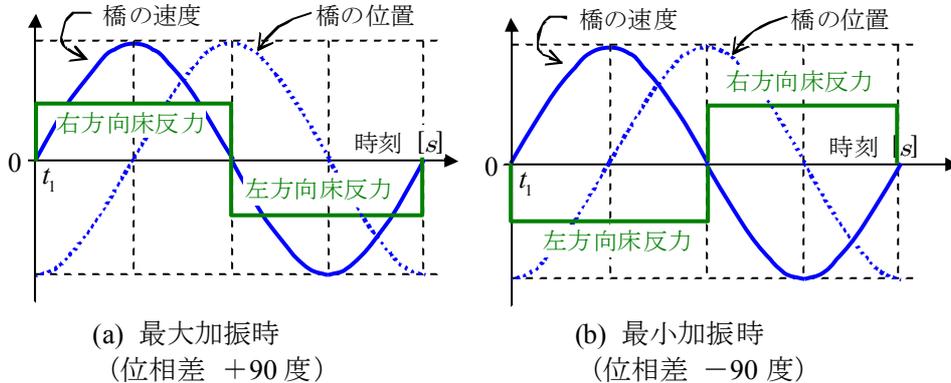


図 13 橋の揺れに及ぼす位相差の影響

**4.2 自由振動台上を 1 人の人間モデルが歩行した場合** 最大角変位や支点移動機構の差異によって引き込み周波数域での位相差の特徴にわずかな差をもつモデル A (固有歩調 0.84Hz) に、それぞれ固有振動数 0.8Hz, 0.87Hz の 2 種類の台上を歩行させた。固有歩調より低い固有振動数をもつ台上に歩かせた場合 (図 14), 自身の横方向加振力により台の振幅が増幅し、それによって台と歩行モデルの振動数が想定通り同相で同調し、台の固有振動数付近に引き込まれていることが読み取れる。振動数の収束値が台の固有振動数から少しずれているのは、人が歩行することによる横方向加振力の影響である。また、高い固有振動数をもつ台上を歩かせた場合 (図 15), 振幅があまり増幅することがなく、台と歩行モデルの振動数は想定していた逆相ではなく同相で同調し、台の固有振動数よりは自身の固有歩調付近に収束した。共に同相に同調した原因は、強制変位台上での引き込み周波数域で位相差がやや同相に偏っていたためと考えられる。

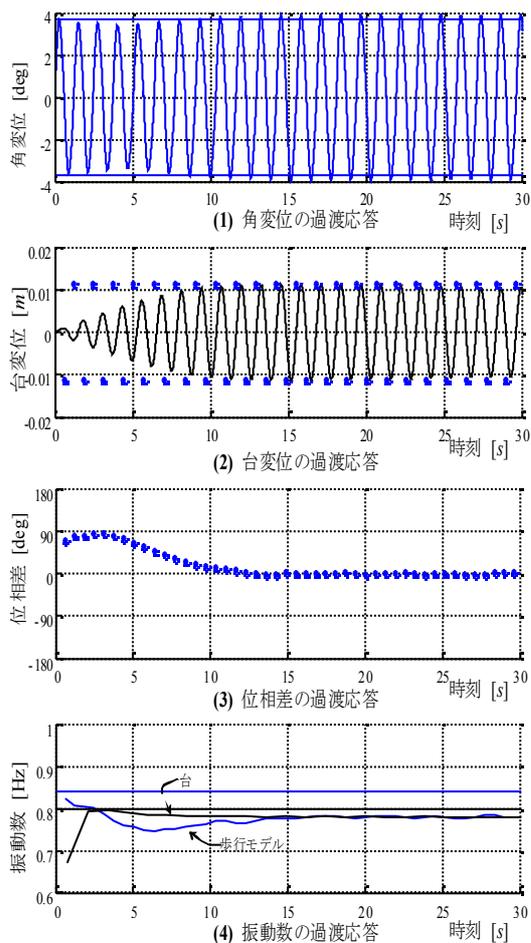


図14 固有振動数 0.8Hz 台上でのモデル A(0.84Hz)の歩行

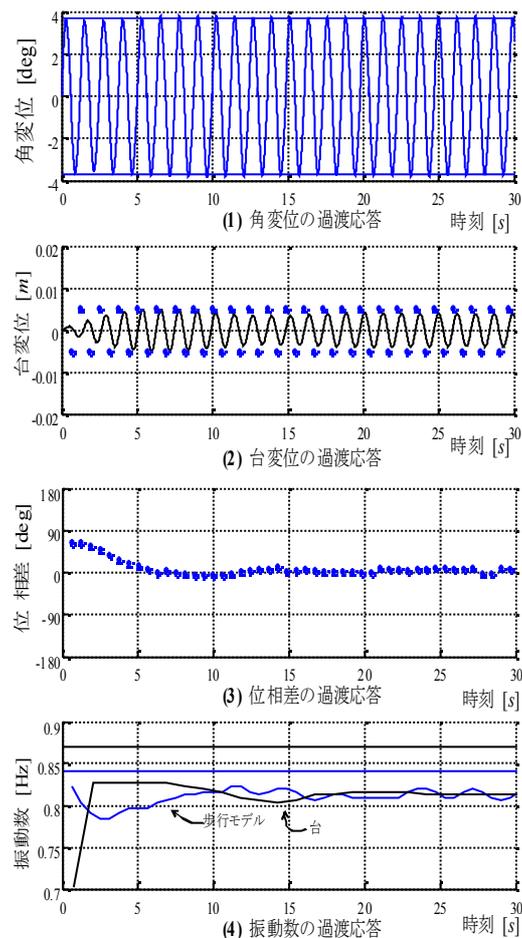


図15 固有振動数 0.87Hz 台上でのモデル A(0.84Hz)の歩行

## 5. 結言

本研究では静止した歩行面での歩行を模擬した歩行モデルを作成し、それを用いて引き込み現象の発生機構の物理的な説明、さらに実際の橋の上での引き込み現象を説明することを目的とした。はじめに、前額面の歩行を模擬したコンパス型受動歩行モデルを改良することで人間の通常歩行時に与える横方向加振力を模擬する歩行モデルを作成した。次に作成した歩行モデルを強制変位する台上で歩行させるシミュレーションを行い、人の歩行の引き込み現象の特徴を再現することを確認した。その結果、強制変位台上での引き込み現象の定量的な解析が可能となった。最後に、横揺れする橋上を歩行する状況の再現を目指し、自由振動する台上でモデルを歩行させるシミュレーションも行った。その際、人間と台の重心位置の位相差が台の揺れに与える影響を説明し、作成した歩行モデルが自由振動台上を歩行した際の収束値に関する特徴を示した。しかしこの特徴が実際の現象を再現しているかどうかについては、実証方法も含め今後の課題である。

## 文献

- (1) 松久寛他, 歩道橋の横揺れによる歩行リズムの同期現象, D&D, 2003, CD-ROM 論文集, No.458
- (2) T. McGeer, Passive Dynamic Walking, Int. J of Rob. Res., Vol.9, No2, pp, 62-82, 1990.
- (3) 高見正利・他, 床反力計による健康者歩行の研究 特に年齢および性別による違いについて, 「リハビリテーション医学」誌, 第24巻, 93~101頁, 1987.
- (4) Adrienne E. Hunt etc, Inter-segment foot motion and ground reaction forces over the stance phase of walking, Clinical Biomechanics 16, 592~600, 2001.

# 環境負荷履歴が再生組織の潤滑機能発現・形成に及ぼす影響

工学研究科機械理工学専攻 山本 浩司

**Abstract:** The physiological and physical characteristics of articular cartilage are constructed and maintained through complex joint movements, involving in fluctuations of compression, rotation and friction. In the field of regenerative medicine, recent efforts at creating a morphologically and functionally matured cartilage have focused on developing an effective culture method using various external mechanical stimuli. Lubrication properties can be strongly affected by the tissue structure including surface properties in addition to the biological conditions of the tissue. In this study, following the concept of “bio-environment designing”, chondrocytes were cultured under the tribological stimulations using a lab-made stirring chamber, and the effect of loading history including loading time and period on the expression of tribological properties was examined.

**Key words:** Regenerated cartilage, Tribological property, Loading history, Bio-environment designing

## 1. はじめに

再生医療において、単離細胞を用いた様々な生体外組織培養法が提唱されている。軟骨細胞に関しては周期的な静水圧や機械的圧縮、あるいはせん断流れといった物理的刺激の負荷により、環境に応じて細胞レベルの基質産生能が変化することが報告されている[1-3]。しかし、軟骨組織の機能、例えば潤滑特性は組織表面の物理化学的性質や、マクロな組織構造の影響を受けることが知られており、細胞レベルの組織産生量が必ずしも組織レベルの潤滑機能改善に結びつくわけではない。軟骨再生過程において、細胞レベルでの環境応答が組織レベルの機能発現に至るには、遺伝子発現や組織産生のみならず、組織構成要素の配位や分布、構造構築の概念も含み込んだ培養環境が重要である。また、生体組織の機能は個体レベルの生命活動を通して発現・形成していることを考慮すると、環境の負荷履歴が組織構築・機能発現に寄与していると考えられる。そこで本研究では、特に関節軟骨を取り巻く環境に着目し、相対すべり運動の負荷履歴が *in vitro* 軟骨再生における潤滑機能の発現・形成に及ぼす影響を検討した。

## 2. 再生軟骨組織の培養および機能評価法

**2.1 軟骨細胞の単離および播種** 4週齢の日本白色家兎の大腿骨、頸骨、上腕骨より軟骨片を採取し、コラゲナーゼ処理によって軟骨細胞を単離した。単離した軟骨細胞を一度継代し、フィブロインスポンジ(直径：8 mm, 厚さ：1 mm)にマイクロシリンジを用いて $5.0 \times 10^5$  cells播種した。播種後3日間は軟骨細胞の培養担体への接着期間として、インキュベータ内で静置培養を行った。

**2.2 相対すべり運動負荷培養** 臨床応用を考慮し、図1に示す培養装置を開発し[4]、形成過程の組織に対して相対すべり運動を負荷した。培養装置の主要部はテフロンスターラーおよびガラスディッシュから構成されている。図2に示すように、細胞播種面を底面に向け(ディッシュ上面に相対する方向)、各組織に対して約30 mgのステンレスメッシュをおもりとして設置した。回転速度は5 rpm(組織中心のすべり速度：12.0 mm/s)に設定し、相対すべり運動を負荷する群には24時間/day連続した回転を行った。

**2.3 環境負荷履歴の設定** 3日間の静置培養の後(Ad)、上述の相対すべり運動負荷培養装置に移す群(D群)と、そのまま静置培養を継続する群(S群)に分け、4日間培養を行った。更に、その培養環境を維持し続ける群(DD群、SS群)と、培養環境を入れ替える群(DS群)に分け、7日間培養を行った。図3に各群の培養プロセスを示す。

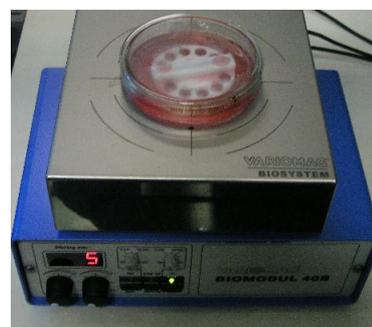


図1 Photograph of stirring chamber.

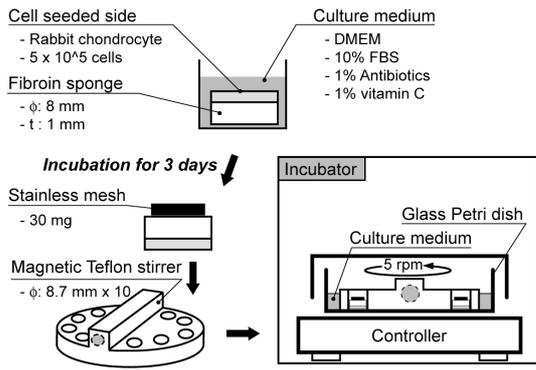


図2 Schematic diagrams of the culture method using the lab-made stirring chamber.

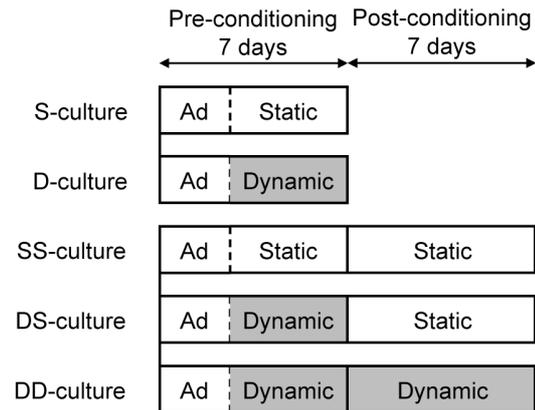


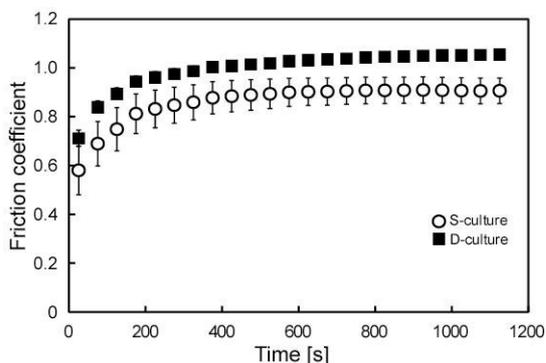
図3 Design of loading history. Ad: Cell adhesion period. Static: Incubation without stimulation. Dynamic: Incubation using the stirring chamber.

**2.4 潤滑特性評価** 潤滑特性は摩擦時間に対する動摩擦係数の変化、および start-up friction を計測することにより評価した。Start-up friction とは、見かけ上組織試料と対摩擦面に相対すべりが生じていない静止摩擦であり、主に組織表層の物理化学的な性質との関連が報告されている[5]。なお、結果に示している short-term friction とは、摩擦開始直後の約 20 秒間における動摩擦力(動摩擦係数)の平均値である。摩擦実験には、往復動摩擦試験機を用い[6]、ステンレス平板( $Ra=0.06 \mu\text{m}$ )に対して、生理食塩中にて摩擦速度  $0.8 \text{ mm/s}$ 、垂直荷重  $29 \text{ mN}$  の条件で測定した。なお荷重および摩擦力は、ワイヤー放電によって加工された平行平板ばねにより設定・計測し、荷重および摩擦速度はステップングモータを用いて制御した。

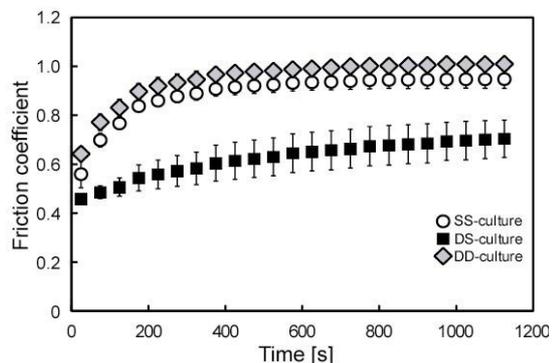
**2.5 生化学的評価** 再生軟骨組織の成熟度を評価する指標の一つとして、軟骨組織の細胞外基質産生量が用いられている。そこで各試料の各培養期間において、再生軟骨組織中のコンドロイチン硫酸量およびタイプ II コラーゲン量を測定した。

### 3. 実験結果

**3.1 潤滑特性** 図 4(a)に示すように、播種後 7 日に相当する S 群と D 群の間では、すべり運動を負荷した D 群の方が摩擦係数は高い値を示す傾向にあった。更にその後 1 週間培養すると、図 4(b)に示すように、すべり運動下培養の後静置培養を行った DS 群では、摩擦時間に対する摩擦係数の上昇が抑えられ、顕著な摩擦特性の変化が見られた。一方他群は 7 日目同様、摩擦係数は急激に上昇した。(SD 群は本結



(a) S-culture and D-culture group



(b) SS-culture, DS-culture and DD-culture group

図4 Time-dependent transitions of friction coefficient of regenerated cartilage. (Mean $\pm$ SD., n=3).

果に示していないが SS 群, DD 群と同様の傾向を示す。)また, 図 5 は各群において, start-up friction と short-term friction を比較した結果である. DS 群のみ start-up friction が short-term friction より高い値を示す傾向にあった. この傾向は正常な軟骨組織を測定した場合と同様であり, DS 群の組織表層における物理化学的性質の変化を示唆している.

**3.2 生化学的特性** 図 6(a)および(b)にすべり運動を負荷した群に関するコンドロイチン硫酸量およびタイプ II コラーゲン量の結果を示す. ここで Ad とは細胞接着期間として設定した 3 日目の組織群を意味している. 摩擦の結果では D 群と DD 群に大きな違いはなかったものの, 組織量はコンドロイチン硫酸量, タイプ II コラーゲンともに明らかに DD 群の方が増加している. 一方, DS 群と DD 群では異なる摩擦結果が得られたものの, 全体の組織量に関する有意差は見られなかった.

**3.3 組織学的特性** 図 7 は D 群および DS 群, DD 群の組織断面のタイプ II コラーゲン免疫染色画像である. DS 群および DD 群に組織全体量の差は見られなかったが, DS 群における軟骨細胞の方が高い活性を示す細胞形態であった.

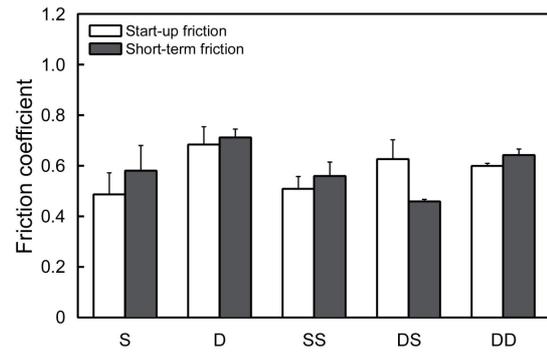
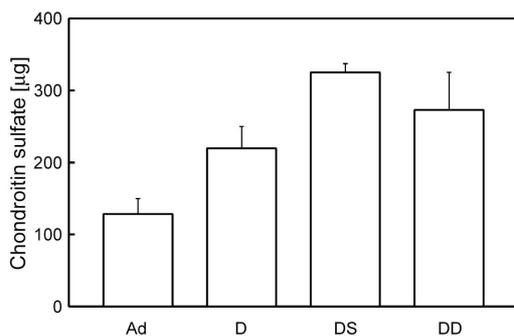
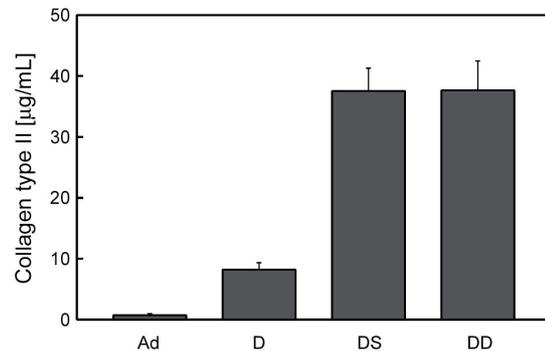


図 5 The results of start-up friction and short-term friction of regenerated cartilage. (Mean±SD., n=3).

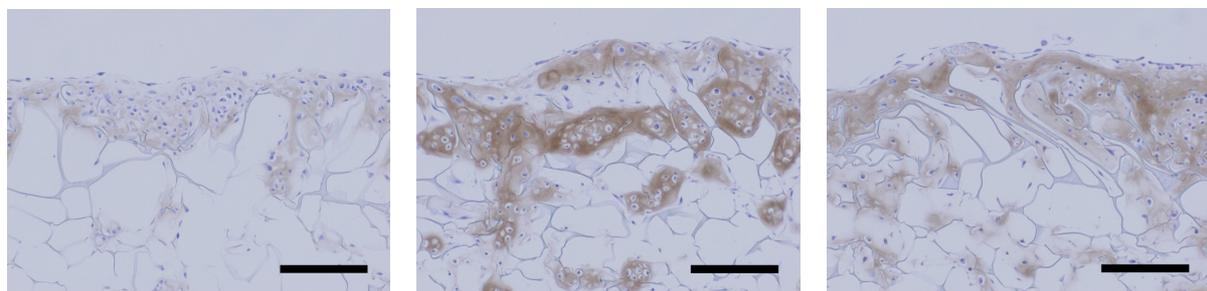


(a) GAG content



(b) Type II collagen concentration

図 6 Comparison of the extracellular matrix synthesis in regenerated tissues. (Mean±SD., n=3).



(a) D-culture group

(b) DS-culture group

(c) DD-culture group

図 7 Immunohistological observations for type II collagen. (a) D-culture group, (b) DS-culture group, (c) DD-culture group. Scale bar=200 μm.

## 4. 考察

S群とD群を比較すると、培養初期の1週間においては、すべり運動が組織の潤滑特性に対して阻害的な効果として現れている。しかし、その後静置培養を行ったSS群とDS群の摩擦結果を比較すると、初期のすべり運動が長期的な組織の潤滑特性改善に関して重要な因子であることがわかる。この結果は、初期の1週間におけるすべり運動が、組織再生過程の潤滑機能発現に対して促進的な作用を及ぼし、その作用による効果が後の静置培養によって機能として成熟したと考えられよう。一方DD群では初期のすべり運動による効果が、潤滑特性に関しては見かけ上消失している。しかし、全体の組織量はD群からDD群の培養過程でDS群と同等の増加を示しているため、培養1週間後に更に継続して負荷したすべり運動は、潤滑に寄与するミクロな表面特性の変化や表面特異的な蛋白質の発現を阻害した可能性がある。ところが、我々は以前本実験のDD群に相当する組織において耐摩耗特性が改善するという結果を報告している[7]。本実験と使用細胞の継代数が異なっていたことが、違う結果を導いた大きな要因の一つではあるが、培養初期の1週間におけるすべり運動の効果が、本実験とは異なる段階で発現したことによって細胞・組織の環境が変化し、後のすべり運動が潤滑機能改善に対して促進的な効果に転化していた可能性がある。すべり運動環境の負荷履歴が組織再生過程における潤滑特性の発現・形成に影響を及ぼすことが認められたが、それらの期間や時期あるいは因子分析は今後の課題である。

## 5. 結言

すべり環境の負荷履歴が軟骨再生過程の潤滑特性に及ぼす影響を調べた結果、培養初期のすべり運動が長期培養後の潤滑特性に対して効果的な作用を及ぼすことがわかった。そして、その効果はその後の環境負荷履歴によって変化する。また、組織のマクロな産生量増加は必ずしも潤滑特性改善には結び付かず、表面特性や構造構築を考慮した培養環境およびその評価指標が組織機能の発現・形成には重要である。

## 参考文献

- [1] Buschmann M.D., Gluzband Y.A., Grodzinsky A.J., Hunziker E.B., Mechanical compression modulates matrix biosynthesis in chondrocyte/agarose culture, *J Cell Sci.*, 108, (1995), 1497-1508.
- [2] Smith R.L., Donlon B.S., Gupta M.K., Mohtai M., Das P., Carter D.R., Cooke J., Gibbons G., Hutchinson N., Schurman D.J., Effects of fluid-induced shear on articular chondrocyte morphology and metabolism in vitro, *J Orthop Res.*, 13, (1995), 824-831.
- [3] Toyoda T., Seedhom B.B., Yao J.Q., Kirkham J., Brookes S., Bonass W.A., Hydrostatic pressure modulates proteoglycan metabolism in chondrocytes seeded in agarose, *Arthritis Rheum.*, 48, (2003), 2865-2872.
- [4] 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 Eng.*, 13, (2007), *in press*.
- [5] Pickard J.E., Fisher J., Ingham E., Egan J., Investigation into the effects of proteins and lipids on the frictional properties of articular cartilage, *Biomaterials*, 19, (1998), 1807-1812.
- [6] Yamamoto K., Takahashi Y., Chueh S., Tamada Y., Tomita N., Centrifugation increases ECM synthesis but deteriorates tribological performances of regenerated cartilage, 53rd Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society, San Diego 2007.
- [7] Yamamoto K., Kosaki T., Tamashima Y., Igarashi N., Chueh S., Tamada Y., Tomita N., Change in friction durability of regenerated cartilage through bio-environment designing, Proceedings of the 5th Kobe International Forum Biotribology 2005 and the 25th Japanese Biotribology Symposium (2005), 78-80.

# 長寿命化人工関節に関する研究

工学研究科機械理工学専攻 寺村 聡

**Abstract:** UHMWPE wear and oxidation-fatigue resistance are regarded as the main two mechanical properties to extend longevity of the knee prostheses because the wear debris causes osteolysis and the oxidation-fatigue leads to severe destruction so called delamination of the knee prostheses. Our group reported that the vitamin E-added UHMWPE can prevent delamination destruction. However, there are no reports on knee simulator wear tests conducted on VE-added UHMWPE. In this study, wear performance of vitamin E (DL- $\alpha$ -tocopherol)-added ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) was examined using knee simulator test. Wear volume and volume distribution of debris was compared between virgin and 0.3 wt% VE-added UHMWPE tibial component. The VE added UHMWPE showed lower wear volume and less percentage in the size range of 0.1 – 1 mm which is believed as the most influential size for osteolysis. The results obtained in the current study suggest that VE-added UHMWPE may prolong the lifetime of UHMWPE knee components by preventing not only delamination destruction but also osteolysis.

**Key words:** Artificial joint, UHMWPE, Vitamin E, Debris, Osteolysis

## 1. 緒言および目的

人工膝関節用摺動部材として用いられている超高分子量ポリエチレンに、デラミネーション破壊と呼ばれる、酸化・疲労破壊がみられることがある。我々は、超高分子量ポリエチレンへのvitamin E (D,L- $\alpha$ -Tocopherol; VE) 添加が、デラミネーション破壊の低減や、摩耗特性の改善に有効であることを報告してきた。しかし、実際の膝関節の動きを模擬した、膝関節シミュレーターを用いた摩耗試験はまだ行われていない。また、人工関節の再置換に至る主な理由であるオステオライシスは、摩耗粉のサイズに影響を受けることが報告されている[1]。つまり、臨床応用に対する有効性を検討するためには、膝関節シミュレーターを用いた摩耗試験と、その摩耗試験の際生じる、摩耗粉のサイズ分析が必要であると考えられる。これらのことから、本研究では、VE添加UHMWPEの臨床応用に対する有効性を検討するため、膝関節シミュレーターを用いた摩耗試験を行い、摩耗試験中に採取された摩耗粉の解析を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 試料

GUR1050 を Direct Compression Molding にて、大気雰囲気下、最高温度 220℃、最大圧力 25MPa で成型した (Virgin-UHMWPE)。VE 添加試料は Direct Compression Molding 時に VE を 0.3 wt% 添加した (VE added UHMWPE)。

### 2.2 膝関節シミュレーター試験

ハイテックニーII 型人工膝関節 (ナカシマプロペラ, Japan) を用いて、500万サイクルまで、膝関節シミュレーター試験を行った。膝関節シミュレーターは、AMTI-Boston 6 Station Knee Simulator (AMTI, USA) を用いた。Fig. 1に膝関節シミュレーター試験時の様子を示す。試験条件はPaulの歩行パターンとし、最大荷重は2600N、最大屈曲角は58度とした。Fig. 2に試験条件を示す。潤滑液には0.3 %アジ化ナトリウム (Wako Pure Chemical



**Fig. 1** Knee simulator test (AMTI-Boston 6 Station Knee Simulator, AMTI, USA). Ti-6Al-4V alloy (NAKASHIMA propeller) was used as femoral component and Hi-tech Knee II (Total Knee System, NAKASHIMA Medical, Japan) which has flat surface geometry, was used as tibial component.

Industries, Ltd., Japan) を添加した, 25 %牛血清 (JRH BIOSCIENCES, Inc., USA) を使用した. 潤滑液は50万サイクル毎に交換した. 最初の50万サイクル, 以降100万サイクル毎に, 化学天秤(Mettler Toledo AX205 Delta Range, Mettler-Toledo GmbH, Switzerland)を用いて, コンポーネントの重量を測定し, 摩耗量を求めた. また, コンポーネント表面の摩耗状況を観察するために, 表面形状測定装置 (SurfTest SV-3000, Mitutoyo, Japan)を用いて, 試験終了時のコンポーネントの表面形状を測定した.

### 2.3 摩耗粉抽出, 評価

400-450 万サイクル時に得られた摩耗粉を用いて, 摩耗粉のサイズ分布を調べた. 摩耗粉の抽出, 回収は Tipper et al.[2]の方法に準じて行った. 概略としては KOH, クロロホルム, エタノール等 (すべて KISHIDA REAGENTS CHEMICALS, Japan)を添加し, 遠心分離により牛血清中のタンパク質を分離することにより, 摩耗粉を抽出した. 抽出した摩耗粉を 10, 1, 0.1  $\mu\text{m}$  のポアサイズを有するフィルター (Cyclopre™ Track Etched Membrane, Whatman International Ltd., UK)に吸引濾過することにより, 各サイズの摩耗粉を回収した. 回収された摩耗粉を Scanning Electron Microscope (S-4500, HITACHI, Japan; SEM) を用いて, 画像を撮影し, 得られた画像から, 各サイズにおける体積割合を求めた. 画像解析には Image J (free software downloaded from <http://rsb.info.nih.gov/ij/>, National Institute of Health, USA) を用いた.

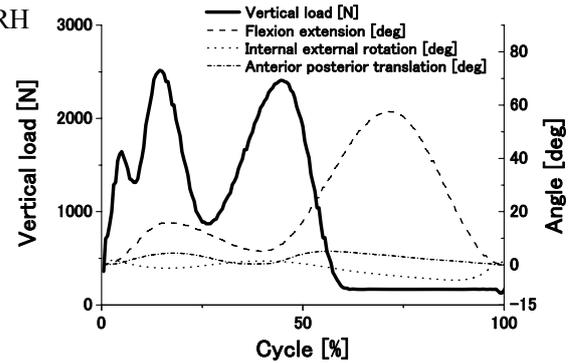


Fig. 2 Applied waveforms used in the knee simulator wear test. The maximum load was 2600 N and the maximum flexion extension angle was 58°.

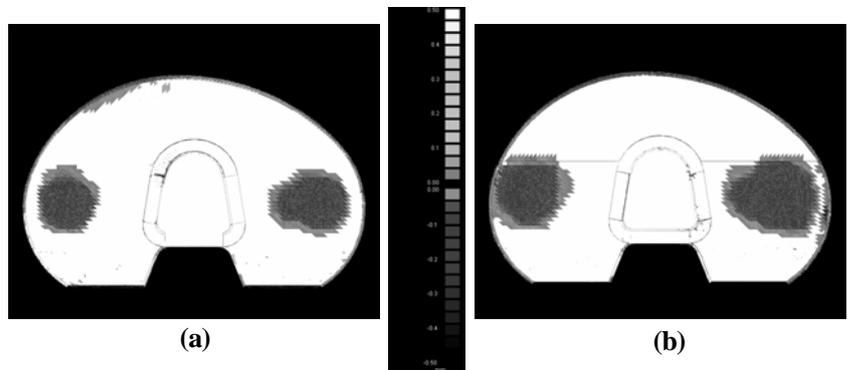


Fig. 3 Typical results of geometric measurements for tested knee component. There was no marked difference between (a) virgin, and (b) vitamin E-added UHMWPE.

## 3. 結果

### 3.1 膝関節シミュレーター試験

500 万サイクル終了時のコンポーネントの摩耗状況を Fig. 3 に示す. Virgin UHMWPE と VE added UHMWPE 間に, 顕著な差は見られなかった.

各試料の摩耗量の結果を Fig. 4 に示す. 全サイクルにおいて, Virgin UHMWPE よりも, VE added UHMWPE の方が, 常に低い摩耗量を示していた.

### 3.2 摩耗粉のサイズ分布

400 - 450 万サイクル時に得られた摩耗粉のサイズ分布の結果を Fig. 5 に示す. Virgin UHMWPE と VE added UHMWPE で, 顕著な差は見られな

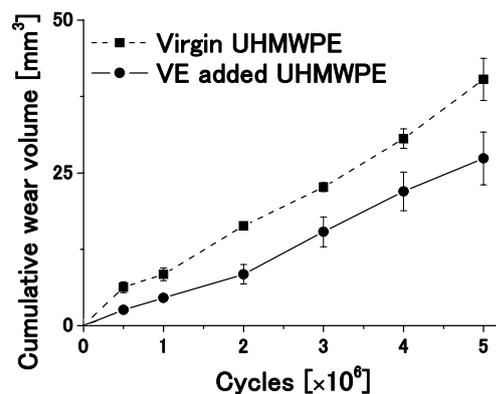


Fig. 4 Cumulative wear volume, as determined by the gravimetric method, for virgin and vitamin E-added UHMWPE tibial component (n=3). Gravimetric wear was found to decrease consistently with vitamin E addition. The error bars represent the standard deviation from the mean at each weighing interval.

かった。しかし、オステオライシスに最も影響を与えるとされている、0.1-1  $\mu\text{m}$  の摩耗粉の割合は、VE added UHMWPEの方がやや少なかった、

#### 4. 考察

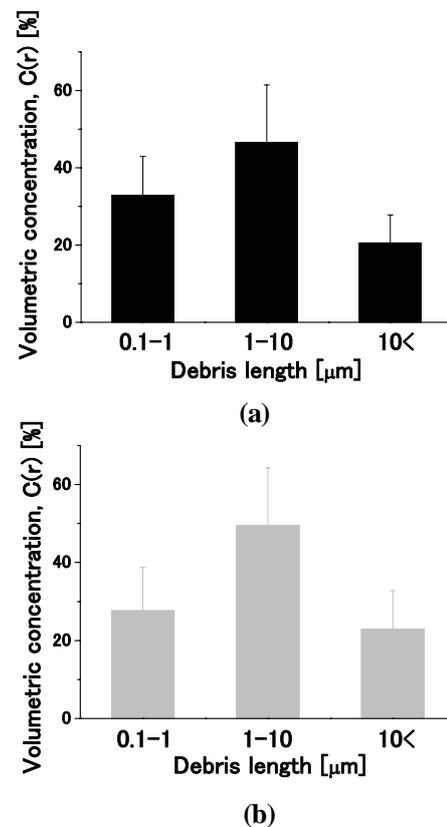
Virgin UHMWPEよりもVE added UHMWPEの方が、摩耗量が少なく、0.1-1  $\mu\text{m}$ の摩耗粉の割合がやや少ない傾向を示した。これらの変化に対する理由として、VE添加による酸化の抑制が考えられる。UHMWPEにVEを添加することにより、酸化が抑制されることが、多数報告されている[43,18-20,21]。また、酸化は摩耗量の増加を誘因することも知られている[15,16]。本研究で用いたUHMWPEは大気中において、圧縮成型により作製しているため、UHMWPEに酸化が生じていることが考えられる。この試料の作製の際に生じた酸化が、VE添加により抑制されたことにより、Virgin UHMWPEよりもVE added UHMWPEの方が摩耗量が少なかった理由と考えられる。しかし、摩耗の機序は複数の因子が関連しており、複雑であるため、今後更なる検討が必要である。

#### 5. 結言

Virgin UHMWPE, VE added UHMWPE を用いて、膝関節シミュレーター試験を行った。Virgin UHMWPE よりも VE added UHMWPE の方が、摩耗量が少なく、オステオライシスに最も影響を与えるとされている0.1-1  $\mu\text{m}$  の摩耗粉の割合がやや少ない傾向を示した。これらの変化に対する機序は現在、検討中であるが、VE added UHMWPE は人工関節の超寿命化に有効な材料である可能性が示唆された。

#### 参考文献

- [1] Green TR, Fisher J, Stone M, Wroblewski BM, Ingham E. Polyethylene particles of a 'critical size' are necessary for the induction of cytokines by macrophages in vitro. *Biomaterials*. 19 (1998), 2297-2302.
- [2] Tipper JL, Ingham E, Hailey JL, Besong AA, Fisher J, Wroblewski BM, Stone MH. Quantitative analysis of polyethylene wear debris, wear rate and head damage in retrieved Charnley hip prostheses. *J Mater Sci: Mater Med*. 11 (2000), 117-124.
- [3] Shibata N, Tomita N. The anti-oxidative properties of alpha-tocopherol in gamma-irradiated UHMWPE with respect to fatigue and oxidation resistance. *Biomaterials*. 26 (2005), 5755-62.
- [4] Shibata N, Tomita N, Ikeuchi K. Effect of Gamma-irradiated on delamination of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). *Jap J Cli Biomech*. 23 (2002), 367-371
- [5] Mori A, Tomita N, Kaneeda T, Watanabe E, Nagata K, Osaka A, Kuramoto K. Fatigue performance of UHMWPE mixed with vitamin E supposing lift off in total knee arthroplasty. *J Jap soc Biomech*. 21 (2003), 403-409.
- [6] Mori A, Tomita N, Kaneeda T, Nagata K, Moriya H, Osaka A, Kuramoto K. Wear resistance of UHMWPE mixed vitamin E supposing lift-off in TKA. *Proc 48th Ann Meet Orth Res Soc*. Poster No: 1041.
- [7] Teramura S, Tomita N, Kawashima S, Fujita K, Aoki M, Isu T. Oxidation Resistance of Vitamin E additive Ultra High Molecular Weight Polyethylene for an Artificial Knee Joint. *J Sur Sci Soc Jap*. 25 (2004), 568-572.
- [8] Toohey SK, Blanchet AT, Heckelman DD. Effect of accelerated aging conditions on resultant depth-dependent



**Fig. 5** Volumetric concentration of particles,  $C(r)$ , as a function of debris length, for (a) virgin, and (b) vitamin E added UHMWPE ( $n=4$ ). Error bars represent the standard deviation from the mean value.

oxidation and wear resistance of UHMWPE joint replacement bearing materials. *Wear*. 255 (2003), 1076–1084.

[9] Sakoda H, Fisher J, Lu S, Buchanan F. The effect of accelerated aging on the wear of UHMWPE. *J Mater Sci: Mater Med*. 12 (2001), 1043-1047.

# 動的機能を有する機械構造システムの創成設計法の開発

(マルチフィジックス現象とマルチスケール現象に基づく新機能機械構造システムの開発)

工学研究科航空宇宙工学専攻 西脇 眞二

**Abstract:** Topology optimization methods have been successfully applied to a variety of innovative mechanical structure and system designs. This research proposes new topology optimization methods for the designs of multiple-band dielectric resonator antennas and phononic band-gap structures as extensions of the topology optimization to multi-physics and multi-scale problems. Several numerical examples are also provided to show the utility of the methodology presented here for the optimal designs for dielectric resonator antennas and phononic band-gap structures using multi-physics phenomena and multi-scale effects.

**Key words:** Topology Optimization, Multi-physics, Dielectric Resonator Antenna, Phononic Band-gaps, Structural Vibration

## 1. はじめに

一般の機械構造は、破壊や共振現象を回避し、システムの安定性を確保するため、剛性の最大化や固有振動数の最大化を目標として設計されることが多い。しかし、機械構造に動的な柔軟性や、特定の固有振動数と固有モードを有する動的特性を適切に付加することが可能となれば、全く新しい機能を有する複雑な機械システムを設計することができる。本研究では、これらの新しい機械構造システムを創成する方法をトポロジー最適化の考え方に基づき構築している。現在までに、その開発の一環として、特定の振動特性をもつ機械式レゾネータや、非線形な大変形を伴う柔軟性をもつコンプライアントメカニズムの創成設計法を開発した。さらに、このような設計法の考え方をマルチフィジックス現象に展開し、ピエゾ抵抗効果を利用したセンサー、ピエゾ電気材料を利用したアクチュエータ、さらにマイクロ波導波管の断面形状設計の方法論の構築を行ってきた。本年度は、さらなる展開として、誘電体共振アンテナの設計法の構築を行う。さらに、マルチスケール現象への展開の試行として、フォノンニックバンドギャップ構造の設計法の構築を検討する。併せて、簡単な数値例により、これらの方法の妥当性について検証する。

## 2. 誘電体共振アンテナの最適設計

**2.1 トポロジー最適化の方法** トポロジー最適化の基本的な考え方[1]は固定設計領域と次式に示す特性関数  $\chi_\Omega$  の導入にある。すなわち、最適構造となるべき設計領域  $\Omega_d$  を包括する固定設計領域  $D$  を最初に設け、その固定設計領域と特性関数  $\chi_\Omega$  を用いて、最適化問題を材料分布問題に置き換えることにある。

$$\chi_\Omega(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \mathbf{x} \in \Omega_d \\ 0 & \text{if } \mathbf{x} \in D \setminus \Omega_d \end{cases} \quad (1)$$

上式の  $\chi_\Omega$  を用いれば固定設計領域  $D$  内の座標  $\mathbf{x}$  にある点が  $\Omega_d$  内にあるかの判断をすることにより、最適構造を決定することができる。このとき、この特性関数を用いると設計空間において無限の不連続点を持つことが許容される。しかし、このような設計空間の特性を取り扱うことは数値計算上不可能である。この問題を克服する設計空間の緩和の方法として均質化法[1]や密度法[2]などの方法が利用される。ここでは、等方的な材料特性の応答に対して、簡易に定式化が可能である密度法に基づいた方法により設計空間の緩和を行う。すなわち、現象を記述するために必要な代表物理テンソルを  $\mathbf{a}$  とすれば、

$$\mathbf{a}(\rho) = \mathbf{a}_0 + (\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_0)\rho^p, \quad (0 \leq \rho \leq 1) \quad (2)$$

として求める. ここで,  $\rho$  は正規化された体積密度で, 空孔状態で 0 充填状態で 1 をとる. また,  $\mathbf{a}_0$  は空孔状態における物理テンソル量を,  $\mathbf{a}_1$  は充填状態における物理テンソル量, を示し,  $p$  は体積密度に対する材料特性へのペナルティを与えるパラメータである. 誘電体共振アンテナ[3](以下 DRA と略す)の設計には電磁波伝搬問題と構造問題の二つの物理系に関する性能の向上を必要とする. そして, その性能に関連する物理テンソル量は, それぞれ比誘電率  $\epsilon_r$  と弾性テンソル  $\mathbf{C}$  である. まず, 比誘電率  $\epsilon_r$  を, 式(2)を用いて表せば, 次式となる.

$$\epsilon_r(\rho) = \epsilon_r^{\text{air}} + (\epsilon_r^{\text{solid}} - \epsilon_r^{\text{air}})\rho^{p_d}, \quad (0 \leq \rho \leq 1) \quad (3)$$

ここで,  $\epsilon_r^{\text{air}}$  は空気の比誘電率,  $\epsilon_r^{\text{solid}}$  は誘電体材料の比誘電率である. ここでは, 等方材料を仮定して, 比誘電率をスカラーの実数として表す. なお, 誘電体材料においては, 誘電率と誘電体の含有率, すなわち体積密度には物理的に比例関係があると考えられることと, 電磁波伝搬問題ではペナルティを与えるパラメータ  $p_d$  を構造問題のように 1 以上に設定しても, グレースケールを減少させることができない理由から, ここでは 1 に設定した. 次に, 弾性テンソル  $\mathbf{C}$  を, 式(2)を用いて表せば, 次式となる.

$$\mathbf{C}(\rho) = \mathbf{C}^{\text{solid}}\rho^{p_e}, \quad (0 \leq \rho \leq 1) \quad (4)$$

なお, 空孔状態では弾性係数はゼロであるので, 上式では,  $\mathbf{C}^{\text{air}}$  を 0 としている. また, ペナルティを与えるパラメータ  $p_e$  は, グレースケールを減少させるため SIMP [4]法の考え方に基づき 3 に設定した.

**2.2 解析領域と設計領域の設定** 図1に, DRA の設計のための解析領域と設計領域を示す. 立方体形状の解析領域の上面, 側面を Perfectly Matched Layer (以下, PML と略す) [5]で表された吸収境界条件で囲み, 自由空間中を電磁波が伝搬する状態を表す. 底面は完全導体境界条件で遮蔽し, 無限地板をモデル化する. 設計領域は, 図に示したように, 無限地板上に設置された直方体の領域とし, 無限地板の中央下部に垂直に接続された同軸ケーブルから, 設計領域に貫入した針状電極を介して電気信号を設計領域に受け渡す. なお, ケーブルの下端は Mur 一次吸収境界条件[6]で終端している. 次に, 構造解析のための解析条件を示す. 図に示したように, アンテナ上部中央からの荷重が作用する場合を想定し, 直方体の設計領域の底面の四隅を変位拘束し, 上面中央の円形の領域に荷重を負荷した場合について考える.

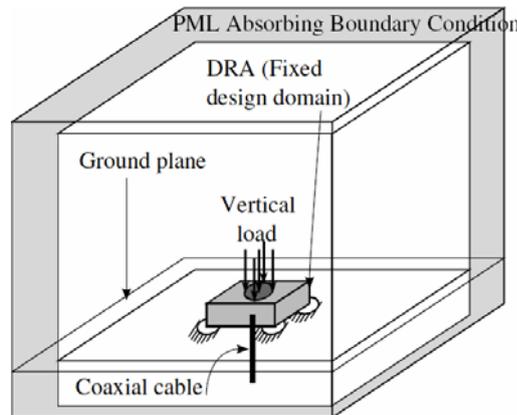


図1 DRA 設計のための解析領域と設計領域

**2.3 目的関数の設定** 最初に, アンテナの電磁場伝搬に関する設計要件について考える. アンテナ設計において満足すべき最も基本的な要件は, 電気回路から供給させた電気信号をできるだけ多く空間中に放射することで, この放射された電気信号の量は放射電力量  $W_{\text{rad}}$  により定量的に評価できるので, 目的関数は 放射電力量  $W_{\text{rad}}$  の最大化にすればよい. しかし, この放射電力量の算出にはアンテナ構造全体を内包する平面上での電磁界を面積積分する必要があり, 計算過程が複雑になる. 他方, 今, 解析空間における電波損失を無視した場合, 給電点における入力電力  $P_{\text{in}}$  と, 放射電力  $P_{\text{rad}}$ , および反射電力  $P_{\text{ref}}$  の間には,

$$P_{\text{in}} = P_{\text{rad}} + P_{\text{ref}} \quad (5)$$

なる関係が成り立つので、入力電力が一定とした場合、放射電力  $P_{\text{rad}}$  の最大化は反射電力  $P_{\text{ref}}$  の最小化により達成できることになる。この反射電力は、給電点における電力の計算のみで得られ、その時間積分である電力量  $W_{\text{ref}}$  の計算も極めて容易になる。そこで、本研究では、放射電力量  $W_{\text{rad}}$  の最大化と等価となる次式の給電点における反射電力量  $W_{\text{ref}}$  の最小化を目的関数とする。

$$W_{\text{ref}} = \int_0^T \int_{\Omega_{\text{obs}}} \frac{1}{2} |\mathbf{E}_t(t) - \mathbf{E}_{\text{in}}(t)|^2 d\Omega dt \quad (6)$$

ここで、 $T$  は電磁界解析終了までの経過時間、 $\Omega_{\text{obs}}$  は、反射電力量を算出するための観測面であり、ここでは給電点を取り囲む閉曲面である。 $\mathbf{E}_t(t)$  は  $\Omega_{\text{obs}}$  にて得られる電界で、 $\mathbf{E}_{\text{in}}(t)$  は  $\mathbf{E}_t(t)$  のうちの入射パルスによる電界である。なお、今回の問題設定では、給電点は同軸ケーブルの midpoint に設定している。この反射電力量  $W_{\text{ref}}$  を定式化すれば次式となる。

次に、アンテナの構造的な設計要件について考える。この場合、アンテナ設計の満足すべき設計要件は、アンテナに作用する荷重に対して十分な剛性をもつことにある。ここでは、DRA の境界  $\Gamma_i$  に表面力  $\mathbf{t}$  を作用させた場合の DRA の変位場  $\mathbf{u}$  とし、次式に示す平均コンプライアンス  $l$  を最小化することにより、アンテナ構造の剛性最大化を図る。

$$l(\mathbf{u}) = \int_{\Gamma_i} \mathbf{t} \cdot \mathbf{u} d\Gamma \quad (7)$$

前述のように本最適化問題は、電磁波伝搬問題と構造力学問題のそれぞれに対し目的関数を持つ多目的最適化問題となる。本研究では、一般的に広く利用されている重み付け総和法を用いて多目的問題を解く。このとき、目的関数  $F$  は次式の最小化として定式化される。

$$F = w \frac{W_{\text{ref}}}{W_{\text{ref}}^{\text{init}}} + (1-w) \frac{l(\mathbf{u})}{l(\mathbf{u})^{\text{init}}} \quad (8)$$

ここで、 $w$  は重み係数である。

**2.4 数値例** 解析領域および設計領域は、図 1 に示したように設定した。解析領域は 60mm の立方体形状とし、下面から 10mm の位置に、完全導体の水平板を設定した。設計領域は 32 mm×32 mm×8mm の直方体形状とし、前述のように、固定設計領域の底面の四隅の半径 2mm 以内を変位拘束し、上面中央の半径 2mm の領域に荷重 1N を負荷した、そして、5.0GHz と 7.0GHz の近辺の二つの周波数領域において、アンテナの放射電力量が最大になるようマルチバンドアンテナを設計するため、入射パルスには、中心周波数が、それぞれ 5.0GHz と 7.0GHz、半値幅は両方とも 0.5GHz とするガウシヤンパルスの混合パルスを与えた。そして、設計領域の体積の最大許容値を固定設計領域の 50% に設定し、最適化を図った。

図 2 にパレート解を示す。この図では、横軸を正規化反射電力量  $W_{\text{ref}}/W_{\text{ref}}^{\text{init}}$ 、縦軸を正規化平均コンプライアンス  $l(\mathbf{u})/l(\mathbf{u})^{\text{init}}$  として表している。また、×印で示している点については、そのときの重み係数  $w$  を右上に示している

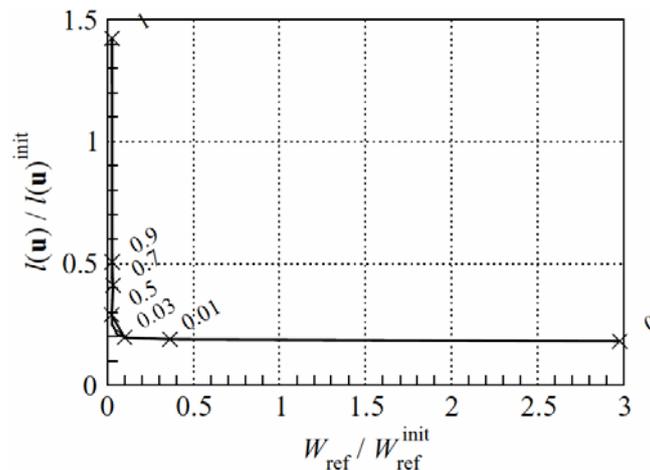


図 2 パレート解

これより, 反射電力量  $W_{\text{ref}}$  と平均コンプライアンス  $l(\mathbf{u})$  には相反傾向にあることがわかる. すなわち, アンテナの電磁波伝搬性能を向上させれば剛性は低下し, 逆に, 剛性を向上させれば電磁波伝搬性能は低下することがわかる. 図3に重み係数  $w$  が 0.03 の場合の最適構造を, 図4にはその構造の入力電力  $P_{\text{in}}$  に対する反射電力  $P_{\text{ref}}$  の比である反射係数 (Reflection coefficient) の周波数応答を示す. 比較のため, 重み係数  $w$  が 0, すなわち剛性のみを考慮した場合の応答も示す.

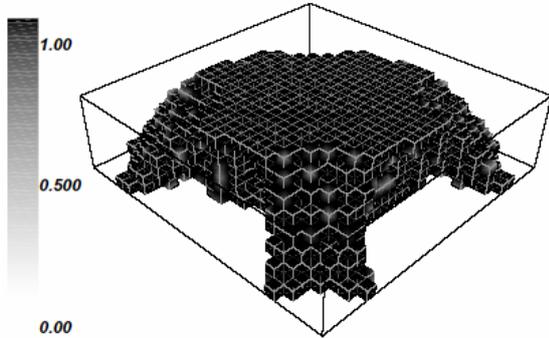


図3 重み係数  $w$  が 0.03 の場合の最適構造

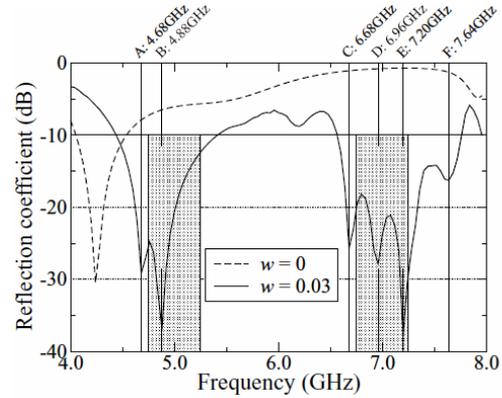


図4 重み係数  $w$  が 0.03 の場合の反射係数

図3より本方法により明瞭な最適構造が得られていることがわかる. さらに, 図4より適切な重み係数の設定により図からわかるように,  $-10\text{dB}$  以下に達する明確な共振点が  $5.0\text{GHz}$  近辺に二つ,  $7.0\text{GHz}$  近辺に四つ, 合計六つ動作周波数近辺に存在することがわかる. なお, この図では, 縦軸に反射係数を表記しており, アンテナの共振周波数にて反射係数が下にピークを持つことを注記しておく. さらに, 応答は網掛けの範囲内にあり, 最適構造は,  $5.0\text{GHz}$  と  $7.0\text{GHz}$  のそれぞれの領域で  $0.5\text{GHz}$  以上の動作帯域幅を確保できていることがわかる. 以上より, 本方法により DRA を設計可能であることがわかった.

### 3. フォノニックバンドキャップ構造の最適設計

3.1 解析領域と設計領域の設定 図5に示すように, 固定設計領域  $D$  の境界  $\Gamma_{\text{in}}$  に特定の角周波数  $\omega$  の周期荷重を作用させた場合, または弾性波を入射した場合について考える. この場合にも, 固定設計領域  $D$  はフレーム要素あるいはパネル要素で構成される構造物とする. 図に示すような進行波問題, すなわち開放領域を伝搬する波について考える場合には, 解析領域を仮想的な吸収境界で閉じておく必要がある. 本研究の進行波問題においては, この PML 境界条件の考え方に基づいた吸収境界[5]を適用する.

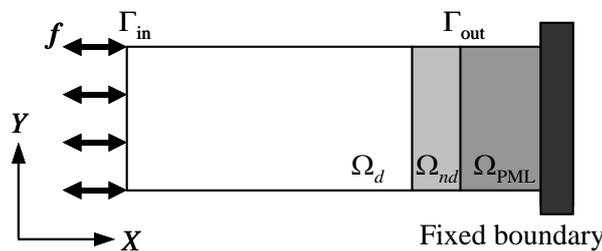


図5 フォノニック構造の設計のための解析領域と設計領域

3.2 目的関数の設定 バンドギャップ構造を設計するために, Sigmund と Jensen[7]は次の目的関数を提案している.

$$f_1 = |\mathbf{U}|^T \mathbf{L}_{\text{r\_out}} |\mathbf{U}| = \bar{\mathbf{U}}^T \mathbf{L}_{\text{r\_out}} \mathbf{U} \quad (9)$$

ここで、 $L_{\Gamma_{out}}$  は減衰させる境界上に存在する節点の指定した自由度に対応する対角成分が1で他の成分が0のマトリックスであり、 $\bar{U}$  は  $U$  の共役複素数を表す。また、 $|U|$  は  $U$  の各成分の絶対値で構成されるベクトルである。しかし、二次元設計問題では、多くの振動モード、波の伝搬方向が存在することによる波の拡散や境界での反射が最適化の段階において非常に大きな問題となる。すなわち、作用させる周期荷重や入射波と異なる位相をもつ振動モード、拡散波または反射波による干渉作用が起こり、固定設計領域内の特定の場所、極端には応答を考慮する部分で振動が打ち消されることがある。この問題を解決し、二次元設計領域の最適化における解の発散を改善するため、次式の目的関数を定式化する。

$$f_2 = |U|^T L_D |U| = \bar{U}^T L_D U \quad (10)$$

ここで、 $L_D$  は固定設計領域  $D$  に存在する全節点の周期荷重の作用方向または波の入射方向の自由度に対応する対角成分が1で他の成分が0のマトリックスである。この評価関数は、固定設計領域における全節点の周期荷重の作用方向または波の入射方向と関係する振幅を評価することから、不明瞭な局所最適解に収束する可能性が低く、より明確かつ高性能な最適構造を得ることができる。また、固定設計領域の全節点を考慮することから、自発的に周期性を有する構造を創成することができると考えられる。

**3.3 数値例** 図6に解析する固定設計領域を示す。初期構造として、45個の正方形のパネル要素と、それらの各パネル要素を取り囲むようにフレーム要素を配置した。固定設計領域の上下の境界に周期境界条件を設定し、境界  $\Gamma_{in}$  に振幅1N、周波数22kHzの波を入射させた場合について、境界  $\Gamma_{out}$  における出力波の振幅を最小化した。

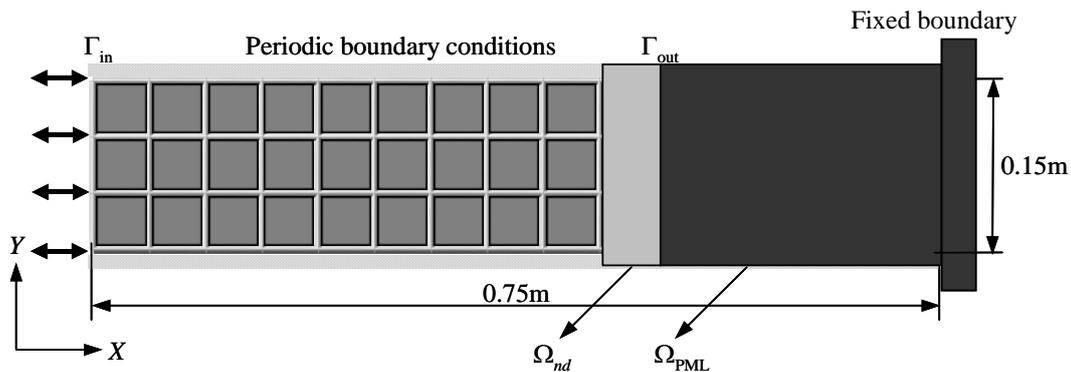
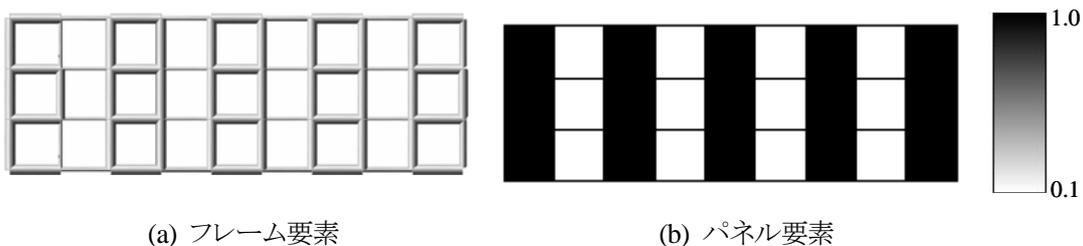


図6 2次元問題の設計領域

図7に最適構造、図8に最適構造の周波数応答を示す。図8からわかるように、最適構造では指定した周波数22kHz付近でバンドギャップ効果が現れている。しかし、フレーム要素における最適構造は完全な周期構造とはならず、そのためバンドギャップ効果は明確ではないことがわかる。これは、弾性波には縦波と横波が存在することから、構造物に  $X$  方向にのみ波を入射させても  $Y$  方向の進行波が現れ、この  $X, Y$  方向の進行波が複雑に影響し合うことから、 $X$  方向に対して完全な周期性をもつ最適構造とはならなかったと考えられる。また、入力端、出力端付近において構造が乱れていることから、境界における影響が現れているといえる。しかし、最適構造は周期的に近い構造となり、指定した周波数におけるバンドギャップ効果が現れていることから、本方法が有効であることがわかる。



(a) フレーム要素

(b) パネル要素

図7 2次元問題の最適構造

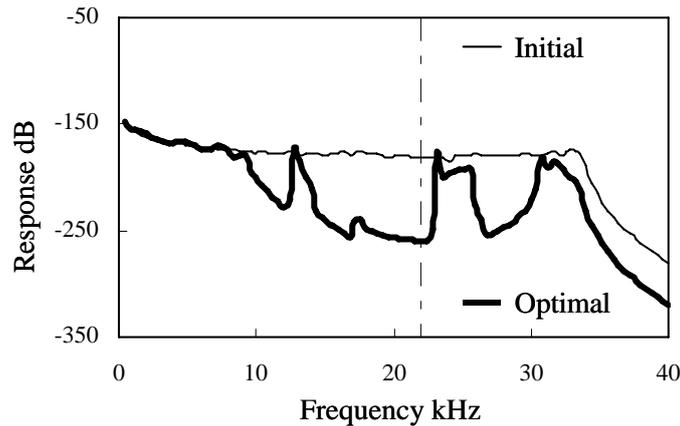


図8 最適構造の周波数応答

#### 4. まとめ

本研究では、動的機能を有する機械構造システムの創成設計法の開発の一環として、昨年度までに開発したトポロジー最適化の方法を、新たなマルチフィジックス現象に展開し、誘電体共振アンテナの設計法の構築を行とともに、マルチスケール現象への展開の試行として、フォノンニックバンドキャップ構造の設計法の構築を検討してみた。さらに、簡単な数値例により、これらの方法の妥当性について検証した。その結果、フォノンニックバンドキャップ構造の設計法には幾つかの改善すべき点があるにせよ、構築した方法により誘電体共振アンテナとフォノンニックバンドキャップ構造の最適設計は可能であることがわかった。

#### 参考文献

- [1] Bendsøe, M. P. and Kikuchi, N., Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, *Comput. Meth. Appl. Mech. Engrg.*, 71, (1988), 197-224.
- [2] Yang, R. and Chuang, C., Optimal topology design using linear programming, *Comput. Struct.*, 52, (1994), pp. 265-275.
- [3] Long, S. A., Conway, G. L. and Shen, L., The resonant cylindrical dielectric cavity antenna, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 31, (1983), pp. 406-412.
- [4] Bendsøe, M. P., Optimal shape design as a material distribution problem. *Struct. Optim.*, 1, (1989), 193-202.
- [5] Berenger, J., A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves”, *J. Comput. Phys.*, 114, (1994), pp. 185-200.
- [6] Mur, G., Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations, *IEEE Transaction Electromagn. Compat.*, 23, (1981), pp. 377-382.
- [7] Sigmund, O. and Jensen, J. S., Systematic design of phononic band-gap and structures by topology optimization, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 361,(2003), pp. 1001-1019.

# 人間機械共働系としての生産システムにおける改善の研究

工学研究科機械理工学専攻 水山 元

**Abstract:** This research proposes a novel demand forecasting method which will work effectively even in such circumstances where extrapolate-able demand patterns are hardly available. The proposed method uses a market mechanism, called the prediction market system, to aggregate the tacit knowledge of the firm's sales people on the future demand of a product into a continuous forecasted demand distribution. In order to make it work effectively and smoothly, the paper introduces a new type of prediction securities and an original market maker algorithm suitable for the security type, and furnishes them to an intra-firm prediction market system. As a result, the transactions can be conducted with the computerized market maker whenever necessary, and hence a sufficient liquidity is supplied into the market even when the number of the traders is small. Further, the market maker can output at any time an aggregated demand forecast of the sales people as a continuous distribution. An agent simulation model, where each trader has a log-utility function, is also developed to show how the proposed method works, and running it reveals the parameters upon which it depends how quickly the forecasted demand distribution converges and how stable the forecasting process is.

**Key words:** Demand forecasting, information aggregation, information markets, market maker, micro macro loop, prediction markets, tacit knowledge

## 1. はじめに

生産システムは、競争力の維持・向上、収益性の向上、環境変化への対応などのために、いつも変革を迫られている。そこでは、人間は、改善の主体（改善者）であると同時に、客体としての生産システムの構成要素（作業員）でもある（改善者の内部性）。また、当該生産システムの全体像を完全に把握しているわけではない（改善者の不完全性）。さらに、市場環境は、確定的あるいは確率的に外部から与えられるものではなく、対象生産システムと相互作用するものである（生産システムと市場環境の相互依存性）。本研究では、これらの点を考慮して、「改善者と生産システムとのインタフェースの設計」、「改善者の内部性と不完全性を考慮した生産システムとその改善のモデル化」、「生産システムと市場環境の相互依存性を考慮した改善評価フレームワークの構築」などの課題に取り組んでいる。

生産システムに任意の改善策を施すことによる効果は、一般に、市場環境に依存している。したがって、改善策の事前評価のためには市場予測が必要になる。しかしながら、当該企業、競合他社、消費者などの多数の主体を含んだ市場環境は、製品の多品種化、短命化が進んだ結果、近年、ますます複雑な挙動を示すようになっており、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予測手法では、その将来像を把握するのは困難になっている。以下では、こうした状況に対応するための市場予測の新たなフレームワークとして、予測市場システムを基礎とした暗黙知集約型需要予測法について研究した成果の概要を報告する。

## 2. 暗黙知集約型需要予測法の研究

2.1 予測市場システムに関する従来の研究と課題 「市場メカニズムは、複数の人間の頭の中に分散して存在している情報を集約する機能を持つ」という主張（Hayek の仮説）は古くからなされてきた。ここでいう「情報を集約する機能」とは、「個々の市場参加者が財の自分にとっての価値（すなわち、個々人にとってのローカルな需要曲線や供給曲線）しか知らない状況下で、市場メカニズムが（誰も知らないはずの）参加者全体のグローバルな需給曲線から導かれる競争価格に財の価格を調整し、パレート最適な財の配分を実現する」という弱い意味だけではなく、さらに、「財の価値に不確実性が伴う場合に、その価値を、個々人が、自分自身が直接所持している情報だけではなく、あたかも市場参加者の間に分散して存在しているすべての情報をあわせもって予測

したかのように、財の価格や配分が決定される」という強い意味での情報集約をも含んだ概念である。これは、個々の市場参加者が、財の価格推移などのシグナルから、他者の持っている情報を学習してミクロな行動を変化させ、それがまたマクロな価格推移に影響を与えるという「ミクロ・マクロループ」の機能を指しているともいえる。

Plott と Sunder[1, 2], Forsythe と Lundholm[3], Camerer と Weigelt[4] らは、ラボラトリ実験によって、強い意味での情報集約機能が実際に出現し得ることを確認した。ただし、その機能は必ずしも完全であるわけではなく、情報集約の程度は、証券のタイプ、市場の制度、被験者の経験、などの要因に依存している。例えば、Plott と Sunder[2] は、Arrow-Debreu 型の証券（所定の事象が生じた場合、そしてその場合にのみ、単位金額のリターンが得られる証券）が情報集約に特に有効であることを見出している。Camerer と Weigelt[4] は、この情報集約機能を生み出しているミクロ・マクロループには、価格のランダムな変動などを、あたかも有用な情報であるかのように誤って学習してしまう、「情報屋気楼」と呼ばれる一種の過学習現象が生じる恐れがあることを示している。また、Forsythe ら [5, 6] は、例えば、ある選挙における特定の候補者の得票率に比例したリターンが得られる証券の市場を IEM(Iowa Electronic Markets) 上に構成し、そこでの価格推移や取引履歴を分析している。結果として、市場参加者に認知バイアスや非合理的な投資行動が見られたにもかかわらず、証券の市場価格からたいてい世論調査よりも優れた得票率予測値が得られることが確認された。こうした結果は、市場メカニズムが将来予測のツールとして有効であるということを示唆した [7]。IEM のような実通貨による予測市場を立ち上げることは法制上容易ではないが、一種のゲームとして運営されている仮想通貨を用いた先物市場との比較を通じて、Pennock ら [8] や Servan-Schreiber ら [9] は、仮想通貨の場合でも、実通貨を用いた予測市場とほぼ同等の予測性能が得られることを明らかにしている。なお、Arrow-Debreu 型証券の市場価格を対応する事象の生起確率と解釈することについては、Manski[10] のリスク中立を前提とした分析によって一度は疑問が投げかけられたが、その後、Gjerstad[11] および Wolfers と Zitzewitz[12] のリスク回避を前提とした分析によって近似的な正当性が確認されている。

しかしながら、企業での需要予測に上述のようなオープンな構成の予測市場システムを単純に適用しただけでは、まず、予測結果がオープンになってしまうという問題点がある。また、予測市場システムの機能は、無から新しい情報を生み出すことではなく、市場参加者個々人が既に持っている情報をできるだけ余すことなく集約し予測に反映させることである。これらのことから、企業での需要予測においては、多くの場合、例えば、業務を通じて需要に関する情報を暗黙知として日々蓄積している自社の営業員などを参加者とした、クローズドな構成の予測市場システムの方がむしろ有効な手段になり得ると考えられる [7]。現在のところ、企業内ツールとしてのクローズドな予測市場システムについては、唯一、Chen と Plott[13] が販売量予測の先駆的な事例研究を報告しているのみである。この事例では、対象製品の販売量をいくつかの区間（例えば、 $[0, 100]$ ,  $[101, 200]$ ,  $[201, 300]$ , ...）に分け、それらの区間に対応した Arrow-Debreu 型証券（以後、区間固定型予測証券と呼ぶ）を用いている。市場参加者は 20~30 人、取引期間は一週間程度、取引手段は参加者間のコンピュータ上での単純なダブルオークションで、取引終了前の一定の期間内における取引履歴から、対象製品の販売量に対して、企業のオフィシャルな予測値よりも良好な点推定値が得られたとしている。

この事例研究から、需要予測のためのクローズドな予測市場システムに対して、二つの重要な課題が浮かび上がる。一つは、製品の需要量の点推定値が得られるだけでは必ずしも十分でないということである。例えば、実務上は需要量の平均だけではなくばらつきも重要な情報であるため、点推定値よりもむしろ、需要量の予測分布が必要とされることが多い。上述のような区間固定型の予測証券を用いた場合、各区間の証券の価格を需要量が当該区間に入る確率とみなしてヒストグラムの形で予測分布を得ることは可能である。しかし、それでは、予測市場システムの動的な予測能力を活かして予測分布の精度を徐々に高めていこうとしたときに、区間の幅が制約となって限界が生じてしまう。もう一つの課題は、企業内のクローズドな構成では、オープンな構成の場合と比べて、市場参加者が少数になるため、予測証券の流動性を確保するのが難しいとい

うことである．予測市場システムは予測証券の売買を通じて情報を集約するものであり，その機能を働かせるためには十分な流動性が必要になる．ところが，上述の事例 [13] においても，十分な流動性があると消失するはずの裁定機会が明らかに残存していたことが報告されている．クローズドな予測市場システムでは，たいていの場合，十分な流動性を確保し，市場の平衡状態を実現するためにマーケットメーカが必要になるのである．予測市場のためのマーケットメーカアルゴリズムの研究としては，Hanson[14]，Pennock[15] などがあるが，マーケットメーカの設計は予測証券の設計と独立ではないため，一般には，需要予測の目的に応じた設計が課題となる．

## 2.2 需要予測のための新たな予測市場システムの提案

**2.2.1 区間変動型予測証券の導入** 需要の点推定値だけではなく連続的な予測分布を得ることを目的に，需要予測のための新たな予測市場システムを提案する．提案システムは，所定の期間に生じるある製品の需要  $x$  を予測するものである．前述の区間固定型予測証券の限界を解消し，需要  $x$  に関する連続的な予測分布を得るために，「区間変動型予測証券」を導入している．これは，区間固定型と同じく，需要  $x$  の実現値が予測区間  $[a, b]$  内に収まった場合，そしてその場合にのみ単位金額のリターンが得られる Arrow-Debreu 型証券である．ただし，区間固定型とは異なり，市場参加者は購入時に証券の数量  $v$  だけではなく予測区間  $[a, b]$  も自由に指定してよい．なお，本予測証券の追加購入や一部売却については，市場参加者の認知負荷を抑えるため，所有証券のポジションを表すパラメータ  $(a, b, v)$  の値を変更することによって行うものとする．

**2.2.2 マーケットメーカの展開** 提案するマーケットメーカは，価格分布を表す密度関数  $g(x)$  を備えており，それに基づいて価格を提示する．ここに，価格分布とは，任意の予測区間  $[a, b]$  の証券 1 単位あたりの価格を次式で算出するものである：

$$p(a, b) = \int_a^b g(x) dx \quad (1)$$

したがって，任意の市場参加者が予測証券のポジションを  $(a, b, v)$  から  $(a', b', v')$  に変更する証券売買を行う場合には， $p(a', b') v' - p(a, b) v$  の金額が課金されることになる．ここに，需要  $x$  の実現値は必ず  $[0, \infty]$  に収まり，したがってこの区間の予測証券には無リスクで仮想通貨 1 単位のリターンが得られることから：

$$\int_0^{\infty} g(x) dx = 1 \quad (2)$$

が成立する．また，どの区間を指定しても証券価格は負にならないことから，価格分布  $g(x)$  は確率密度関数としての条件を備えている．以下では，簡単のため，価格分布  $g(x)$  として正規分布  $N(g, \frac{2}{g})$  を用いるものとして議論を進める．

提案システムでは，この価格分布  $g(x)$  をシグナルとしてマイクロ・マクロループを通じた学習を進めることになる．そのため，市場の平衡状態では，単に予測証券の売買が均衡し，価格分布が安定することだけではなく，その価格分布が次の二つの条件を満足していることが望ましい：

- 主観的な予測分布が市場参加者によって異なっている段階では，価格分布から他者の予測分布に関する情報を得ることができる．
- すべての市場参加者の主観的な予測分布が一致した段階では，その一致した予測分布を価格分布によって取り出すことができる．

本マーケットメーカは，市場取引の履歴に基づいて下述のように価格分布を更新していくことによって，これらを実現し，需要予測分布を価格分布  $g(x)$  として取り出せるようにする：

**Step 0:** 需要  $x$  に関する市場参加者の暗黙知を反映していない，事前の需要予測分布として，価格分布のパラメータ  $(g, \frac{2}{g})$  を初期化する．

Step 1: 当該時点での価格分布  $g(x)$  を市場参加者に提示する．任意の市場参加者が予測証券のポジションを更新・確認したら Step 2 へ．

Step 2: 価格分布のパラメータ  $(g, \frac{2}{g})$  を更新式（詳細省略）に従って更新し，Step 1 に戻る．

## 2.3 エージェントシミュレーションによる機能の確認

2.3.1 市場制度と市場参加者に関する仮定 提案したマーケットメカを備えた予測市場システムの基本的な機能を，エージェントシミュレーションによって確認する．シミュレーションでは，市場制度と市場参加者に関して以下の仮定と記法を設ける：

- 市場参加者は総勢  $K = 10$  人であるとし，彼ら・彼女らを市場参加者  $1, 2, \dots, K$  と呼ぶ．証券取引は一度に一人ずつ行うものとし，取引を行う市場参加者は，毎回， $K$  人の中からランダム抽出で選んだ．
- 任意の市場参加者  $k$  は，需要  $x$  に関して，自身の暗黙知を反映した主観的な予測分布を持っている．この分布の確率密度関数  $f_k(x)$  は，正規分布  $N(\mu_k, \frac{2}{f_k})$  で与えられるとする．
- 任意の市場参加者  $k$  が所持する予測証券のポジションを  $(a_k, b_k, v_k)$ ，手元の仮想通貨の価値を  $u_k$ ，所持証券の時価を含めた総資産の価値を  $w_k$  とそれぞれおく．このとき，次式が成立する：

$$w_k = p(a_k, b_k) v_k + u_k \quad (3)$$

- 取引開始前に各市場参加者にあらかじめ一定額  $u_0$  の仮想通貨を支給しておくことにする．したがって，取引開始時点での任意の市場参加者  $k$  の所持資産は  $w_k = u_k = u_0$  となる．
- 任意の市場参加者  $k$  は仮想通貨に関して対数型の効用関数を持っている．
- 市場参加者一人あたりのシステム全体への影響を  $u_0$  の多寡によって制御できるようにしておくために，取引期間を通じて，仮想通貨のショートポジション（ $u_k$  が負の値をとること，すなわち所与の金額  $u_0$  を使い切ってさらに仮想通貨の借入れを行うこと）は許可しない．
- 予測証券については，仮想通貨がショートになり得ない範囲であれば，ショートポジション（証券の数量  $v_k$  が負の値をとること）を許可する．ある予測区間でのショートポジションは，その補区間でのロングポジションと等価になる．

なお，特に混乱を招く恐れがない場合には，市場参加者を表す記号  $k$  は省略することがある．

任意の市場参加者のある時点での総資産の価値が  $w \geq 0$  であるとする．当該市場参加者は売買行動によって式 (3) を満足する任意のポジション  $(a, b, v)$  をとることができる．この場合，この市場参加者の主観的な期待効用は次式で与えられる：

$$EU = q(a, b) \log\{w + \bar{p}(a, b) v\} + \bar{q}(a, b) \log\{w - p(a, b) v\} \quad (4)$$

ここに， $q(a, b)$  は，予測区間  $[a, b]$  に需要  $x$  が収まる主観的な確率であり，当該市場参加者の予測分布  $f(x)$  を用いると，次式で与えられる：

$$q(a, b) = \int_a^b f(x) dx \quad (5)$$

また， $\bar{p}$  および  $\bar{q}$  は，それぞれ  $(1 - p)$  および  $(1 - q)$  を表している．

当該市場参加者は，式 (4) の主観的な期待効用を最大化するような売買行動に出ると考えられる．この時点での  $w$  は  $(a, b, v)$  には依存しない定数であり，また， $p(a, b)$  と  $q(a, b)$  も  $v$  には依存しないことから，まず， $(a, b)$  は所与として，式 (4) を最大化する  $v$  を求めると次式となる [12]：

$$v = \frac{q(a, b) - p(a, b)}{p(a, b) \bar{p}(a, b)} w \quad (6)$$

そこで，この  $v = v$  を式 (4) に代入して整理すると：

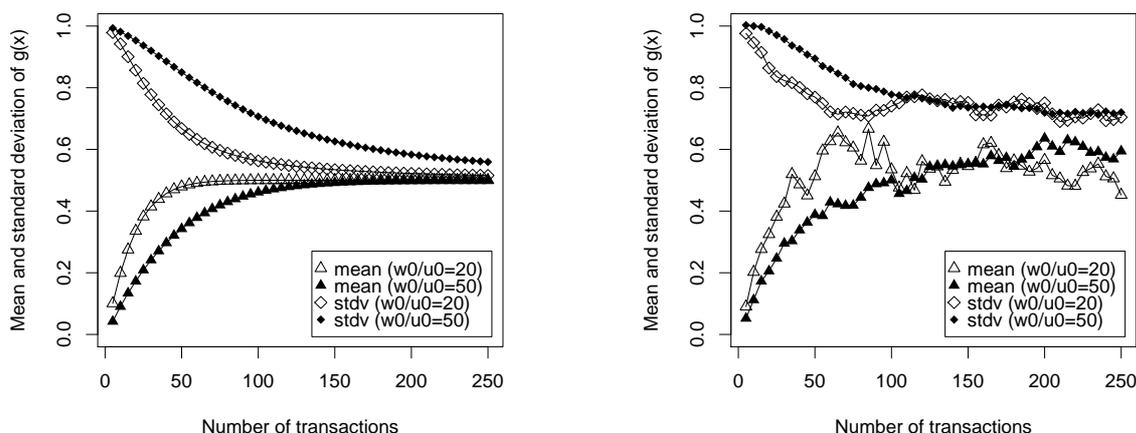


図 1: シミュレーションの結果

$$EU = q(a, b) \log \frac{q(a, b)}{p(a, b)} + \bar{q}(a, b) \log \frac{\bar{q}(a, b)}{\bar{p}(a, b)} + \log w \quad (7)$$

を得る。したがって、当該市場参加者は、この  $EU$  を最大化するように予測区間  $[a, b]$  を指定することになる。シミュレーションでは、任意の市場参加者が購入するであろう予測証券の区間  $[a, b]$  および数量  $v$  を以上のようにして求めている。

**2.3.2 シミュレーション結果の一例と考察** まず、すべての市場参加者の主観的な予測分布が一致している場合を想定する。事前の価格分布を  $g(x) = N(0, 1)$  として、共通の予測分布  $f(x)$  の平均  $\bar{f}$  や標準偏差  $\sigma_f$ 、ならびに  $u_0$  の与え方を変えながら、証券取引が進むに従って価格分布がどのように更新されていくかを調べた。図 1 (左) に、結果の一例として、 $f(x) = N(0.5, 0.5)$  および  $w_0/u_0 = 20, 50$  (ただし、 $w_0$  は価格更新式のパラメータ) の下での価格分布  $g(x)$  の平均  $\bar{g}$  および標準偏差  $\sigma_g$  の推移を示す。このように、市場参加者の予測分布が一致している場合は、 $g(x)$  はその一致した  $f(x)$  に向かって収束していくことが確認できた。

次に、主観的な予測分布が市場参加者によって異なる場合を想定する。事前の価格分布は、この場合も同様に、 $g(x) = N(0, 1)$  として与えた。また、各市場参加者の予測分布  $f_k(x)$  については、平均  $\bar{f}_k$  を  $[0, 1]$  からの、標準偏差  $\sigma_{f_k}$  を  $[1/3, 1/2]$  からの、それぞれ一様乱数で与えた。そして、同様に  $u_0$  の与え方を変えながら、証券取引が進むに従って価格分布がどのように更新されていくかを調べた。図 1 (右) に、結果の一例を示す。このように、市場参加者の予測分布が一致していない場合も、 $g(x)$  はある特定の分布に向かって収束していくことが確認できた。ただし、完全に収束するのではなく、平均  $\bar{g}$  および標準偏差  $\sigma_g$  とともに多少の振動は残る。

最後に、市場参加者の予測分布が一致していない場合の価格分布  $g(x)$  の収束先が、マイクロ・マクロループを通じた学習を進める上で望ましい分布になっているかどうかを確認する。ここに、望ましい価格分布とは、それによって他者の予測分布に関する情報が得られるものである。そうした分布の一つとして、全市場参加者の予測分布  $f_1(x), f_2(x), \dots, f_K(x)$  の単純な合成分布が考えられる。ここでは、この合成分布の平均および標準偏差と、収束した価格分布の平均および標準偏差とを比較した。この結果、平均および標準偏差とともに、両分布の間に強い正の相関があることがわかった。すなわち、収束した価格分布は、各市場参加者に他者の予測分布に関する情報をフィードバックする機能を持ち得ることが確認できた。

### 3. まとめ

本研究では、「改善者の内部性」、「改善者の不完全性」および「生産システムと市場環境の相互依存性」を考慮して、「改善者と生産システム間のインタフェースの設計」、「改善者の内部性と不完全性を考慮した生産システムとその改善のモデル化」、「生産システムと市場環境の相互依存性を考慮した改善評価フレームワークの構築」などの課題に取り組んでいる。本年度は、特に、複雑な市場環境における改善評価のための、市場予測の新たなフレームワークとして、予測市場システムを基礎とした暗黙知集約型需要予測法について研究した成果の概要を報告した。

#### 参考文献

- [1] Plott, C.R. and Sunder, S.: “Efficiency of Experimental Security Markets with Insider Information: An Application of Rational-Expectations Models”, *Journal of Political Economy*, Vol.90, pp.663-698 (1982)
- [2] Plott, C.R. and Sunder, S.: “Rational Expectations and the Aggregation of Diverse Information in Laboratory Security Markets”, *Econometrica*, Vol.56, pp.1085-1118 (1988)
- [3] Forsythe, R. and Lundholm, R.: “Information Aggregation on an Experimental Market”, *Econometrica*, Vol.58, pp.309-347 (1990)
- [4] Camerer, C. and Weigelt, K.: “Information Mirages in Experimental Asset Markets”, *Journal of Business*, Vol.64, pp.463-493 (1991)
- [5] Forsythe, R., Nelson, F., Neumann, G.R. and Wright, J.: “Anatomy of an Experimental Political Stock Market”, *American Economic Review*, Vol.82, pp.1142-1161 (1992)
- [6] Forsythe, R., Rietz, T.A. and Ross, T.W.: “Wishes, Expectations and Actions: A Survey on Price Formation in Election Stock Markets”, *Journal of Economic Behavior & Organization*, Vol.39, pp.83-110 (1999)
- [7] Plott, C.R.: “Markets as Information Gathering Tools”, *Southern Economic Journal*, Vol.67, pp.1-15 (2000)
- [8] Pennock, D.M., Lawrence, S., Giles, C.L. and Nielsen, F.A.: “The Real Power of Artificial Markets”, *Science*, Vol.291, pp.987-988 (2001)
- [9] Servan-Schreiber, E., Wolfers, J., Pennock, D.M. and Galebach, B.: “Prediction Markets: Does Money Matter?”, *Electronic Markets*, Vol.14, pp.243-251 (2004)
- [10] Manski, C.F.: “Interpreting the Predictions of Prediction Markets”, *Economics Letters*, Vol.91, pp.425-429 (2006)
- [11] Gjerstad, S.: “Risk Aversion, Beliefs, and Prediction Market Equilibrium”, *A Working Paper in ESL at University of Arizona* (2004)
- [12] Wolfers, J. and Zitzewitz, E.: “Interpreting Prediction Market Prices as Probabilities”, *National Bureau of Economic Research Working Paper #12200* (2006)
- [13] Chen, K., and Plott, C.R.: “Information Aggregation Mechanisms: Concept, Design and Implementation for a Sales Forecasting Problem”, *California Institute of Technology. Social Science Working Paper #1131*, (2002)
- [14] Hanson, R.: “Combinatorial Information Market Design”, *Information Systems Frontiers*, Vol.5, pp.107-119 (2003)
- [15] Pennock, D.M.: “A Dynamic Pari-Mutuel Market for Hedging, Wagering, and Information Aggregation”, *Proceedings of the 5th ACM conference on Electric Commerce*, pp.170-179 (2004)

# 機械加工プロセスに対する意思決定支援システムの構築

工学研究科マイクロエンジニアリング専攻 茨木 創一

**Abstract:** In conventional job-shop manufacturing, a machine operator's expertise plays an indispensable role in conducting process planning and determining machining conditions. Although computer-aided process planning systems (CAPP) has been long studied to support the decision making process of human operators, it is still a difficult issue to model an expert operator's decision making to perform safe, and yet efficient machining process. In this project, we have been developing a manufacturing system support an operator's process planning.

**Key words:** manufacturing, process planning, machining conditions, end milling

## 1. はじめに

従来のジョブショップでの機械加工では、熟練技術者がその経験に基づき加工中の音や振動あるいは排出される切りくずの観察結果を手がかりとして加工状態を推定し、最適と考えられる加工条件の選定や、工具の交換時期の判断などを行ってきた。しかし、こうした熟練技術者は年々減少しており、経験が乏しい非熟練技術者では様々な加工状況に対して適切な加工条件を選定することは難しく、製品の質の低下や、工程の能率の低下などの問題が生じている。

非熟練技術者による工程設計を支援するための、コンピュータ支援工程設計技術 (computer-aided process planning, CAPP) については、過去から多くの研究がなされてきた[1,2]。これまでに提案されたコンピュータ支援工程設計技術は、大きく二つに分けることができる。ひとつは、熟練技術者の知識をファジー論理などのツールを用いて機械知能に翻訳しようとするアプローチである。知識の翻訳が適切になされれば有効なアプローチであるが、熟練技術者の判断基準は多くの場合陽に記述することが困難である。もうひとつは、数値最適化の手法を導入して、加工プロセスのモデルに基づき加工条件を最適決定するものである。この手法の有効性は、加工プロセスのモデルと目的関数をどのように設定するか完全に依存し、結局のところ熟練技術者の知識の適切な翻訳が必要不可欠である。

近年の高速・高加速度マシニングセンタの普及と、工具の性能向上によって、加工のトレンドとして高速加工が急速に広まりつつある。高速加工とは、切り込み量を小さく、切削速度・送り速度を高くして、加工能率の向上を図る加工法である。しかし、ジョブショップでの機械加工では、熟練技術者は一般に、大きな切り込み量と小さな送り速度による、低速重切削を選択することが多い。高速切削と低速重切削のどちらが有利であるかは、加工形状、工具寿命・コスト、加工条件の詳細、など様々な要因によるため、たとえ熟練技術者であっても判断は難しい。

本研究では、加工能率、コスト、加工精度、工具寿命などの様々な要因を含んだ加工性能の定量的な評価をオペレータに提示し、非熟練技術者による工程設計・加工条件設計を支援するためのシステムの構築に取り組んだ。ケーススタディとして、上記のようなエンドミル加工における高速加工、低速重切削の加工性能評価と、それに基づく工程設計のプロセスを取り上げる。

## 2. 加工フィーチャと工程設計

**2.1 加工フィーチャの抽出** 3次元モデルの形で与えられた加工形状に対する工程設計は、フィーチャ認識、工具選択、工具経路設計、加工条件設定など、幾つかのステップからなる。本研究では、フィーチャベースの工程設計を基本とする。本研究で扱う加工フィーチャと、それを加工するための工具経路の例を図1に示す。

工程設計は、与えられた加工形状を、加工フィーチャの集合として認識し、個々の加工フィーチャを抽出するプロセスから開始する。同じ形状を除去するために、幾何的に幾つかのフィーチャの組み合わせが可能となる。そのうちのどれを選択すべきかは、加工性能の評価を基礎として判断する。本報告書

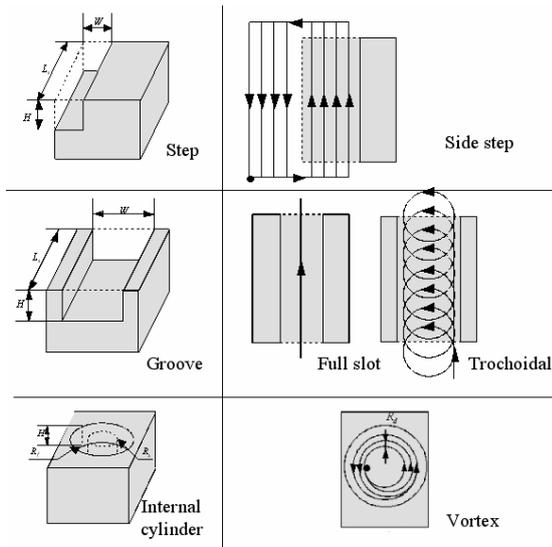


図1 加工フィーチャと工具経路の例

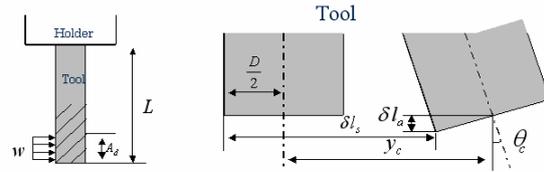


図2 工具倒れと加工誤差

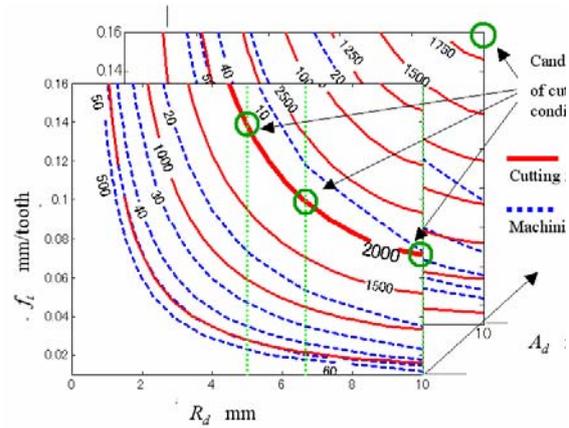


図3 加工条件の候補

では、主に加工性能の評価と、加工条件の決定法について述べる。

**2.2 加工性能の評価** 加工法を評価するための指標として、一般には以下のような点が挙げられる：加工時間（加工能率）、加工精度（形状精度、寸法精度、表面粗さなど）、工具寿命（工具コスト）。本研究では、以下の指標から加工法の評価を行う。

- (1) 加工時間：加工時間は、工具経路の距離と加工条件(送り速度)から計算される。
- (2) 加工精度：加工プロセスは大きく、荒加工と仕上げ加工に分けられる。要求加工精度を得るために、仕上げ加工における加工条件の設定に選択の余地は小さい。本研究では加工能率を主な評価指標とし、荒加工における工程設計を主な対象とする。荒加工では、加工精度に対する要求は重要ではない。しかし、加工誤差が過度に大きいと、仕上げ加工における切込みに影響し、最終的な仕上げ精度を悪化させる。ここでは、図2で示すような単純なモデルを用いて加工誤差の評価を行う。図では、工具は単純な梁としてモデリングされている。工具中心の変位を $y_c$ 、工具先端での傾き角を $\theta_c$ 、切削力を $w$ とすると、加工面の誤差(水平方向 $\delta l_s$ 、垂直方向 $\delta l_a$ )は以下で与えられる。

$$\delta l_s = y_c + D(1 - \cos \theta_c) / 2, \quad (1)$$

$$\delta l_a = (D/2) \sin \theta_c. \quad (2)$$

- (3) 工具寿命：工具寿命を正確に見積もるためには、工具と加工条件に応じたデータベースが必要不可欠である。しかしそのようなデータベースを全ての工具について準備することは現実的ではないので、ここでは切削抵抗の大きさを、工具寿命に重要な影響を与える因子として、工具寿命の評価指標として用いることとする。

**2.3 加工法の解釈：** 熟練技術者が選択し得る加工法の選択肢は、加工条件、または加工性能に対する制約という形で記述する。例えば、第1節にも述べたように、一般的なエンドミル加工においては、以下の加工法の選択肢が可能である：1) 小切り込み量、高送り速度による高速切削、2) 大切り込み量、低送り速度による低速重切削。例として、これらの加工法は以下のような制約の形で解釈する。

- (1) 制約1（低速重切削）：低速重切削では、工具損傷を起こさないという制約のもとで加工条件は決定されるべきである。例えば、加工中の切削抵抗がある許容値以下となるように制約される。
- (2) 制約2（高速切削、加工形状に対する制約がある場合）：加工誤差がある許容値以下となるという

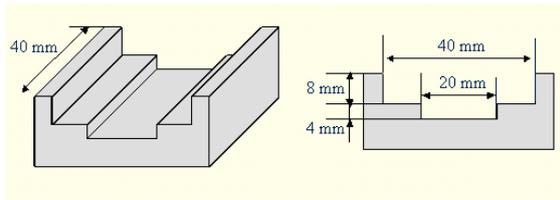


図4 ワーク形状

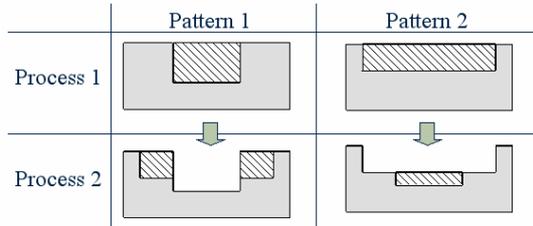


図5 加工パターンとプロセス

表1 工具の仕様

Material	Sintered carbide
Diameter $D$	10 mm
Number of teeth $N$	4
Helix angle $\theta_h$	$2 \cdot \pi / 9$ rad
Young modulus $E$	$534.4 \times 10^9$ Pa

表2 加工条件の制約

Projection length $L$	35 mm
Cutting feed rate	$\leq 10000$ mm/min
Feed rate at air cut	10000 mm/min
Cutting velocity $V_c$	88.0 m/min
Spindle speed $S$	$2800 \text{ min}^{-1}$
Feed per tooth $f_t$	0.019~0.16 mm/tooth
Axial depth of cut $A_d$	$\leq 22$ mm
Radial depth of cut $R_d$	$\leq 10$ mm

制約のもとで、加工条件が探索される。

- (3) 制約3 (高速切削) : 加工誤差に対する制約がない場合、切り込み量と切削抵抗の上限に対し制約を与え、加工条件が探索される。

**2.4 工程設計** 以上をまとめ、工程設計を行う手順は以下のように要約される。

- (1) 加工法の選択肢を加工条件、または加工性能に対する制約という形で与える。
- (2) 加工条件に対する制約を与える。
- (3) 切削抵抗に対する制約を与える。
- (4) 加工フィーチャの組み合わせとして、加工パターンを記述する。
- (5) 加工条件を決定し、加工時間の見積もりを行う。

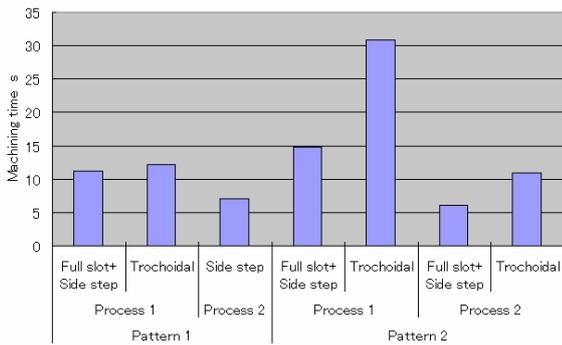
図3は、ステップ(5)において、各加工フィーチャにおける加工条件の決定するプロセスの一例を示したものである。図は、径方向切り込み量 $R_d$ 、一刃当たり送り量 $f_t$ 、軸方向切り込み量 $A_d$ に対し、切削抵抗の予測値を等高線線図の形で表したのである。例えば、切削抵抗の制約が $F_{xy} < 2000\text{N}$ と与えられたとき、加工形状と工具の制約から、 $R_d$ 及び $A_d$ の取り得る値には幾つかの候補が与えられる(図中○印)。これら候補の中から、加工時間を最小化する加工条件を選択する。

### 3. ケーススタディ

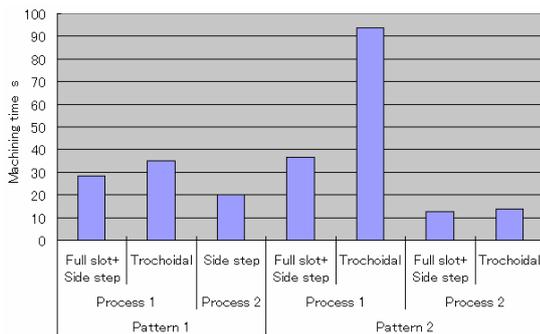
本手法の有効性を示すため、非常に簡単な適用例を示す。加工ワーク形状を図4に示す。ワーク材質は炭素鋼を想定する。本ケーススタディで使用する工具の仕様を表1に示す。加工機と工具の性能から決定される、加工条件の現実的な制約を表2に示す。また、加工パターンと加工順序を図5に示す。

2.3節に示した3つの加工法を考える。それぞれ加工条件を決定し、加工時間の見積もりを行った。図6は各加工フィーチャの加工時間を、加工法ごとに比較したものであり、図7はそれらのまとめである。これらの図から分かるとおり、総加工時間は制約3-2-1の順に小さい。これは明らかに、幅の広いトロコイド加工に多くの時間が消費されているためである。図3に各加工法・各プロセスにおける加工条件及び切削抵抗のまとめを示す。制約2(高速切削、加工形状に対する制約がある場合)では、切削抵抗は1000N以下であるが、加工時間は制約3(高速切削)よりも短い。これは、制約3ではトロコイド加工が選択されているのに対し、制約2では溝加工+側面加工が選択されているためである。また、使用している工具が高速加工用ではないため、加工条件をこれ以上あげることができず、制約3にとっては不利に働いている。

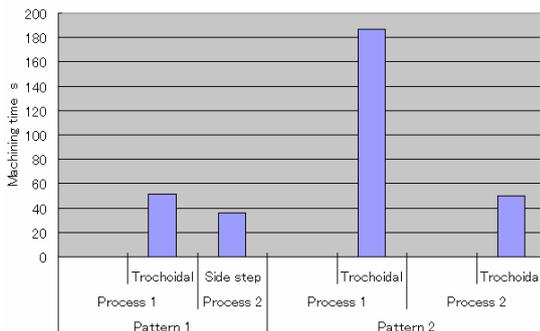
金型加工では、高速加工用工具を用いた高速加工(小切り込み、高送り速度)が、工具損傷を避ける



(a) 制約 1 (低速重切削)



(b) 制約 2 (高速切削, 加工形状の制約あり)



(c) 制約 3 (高速切削)

図 6 加工プロセス毎の加工時間の比較

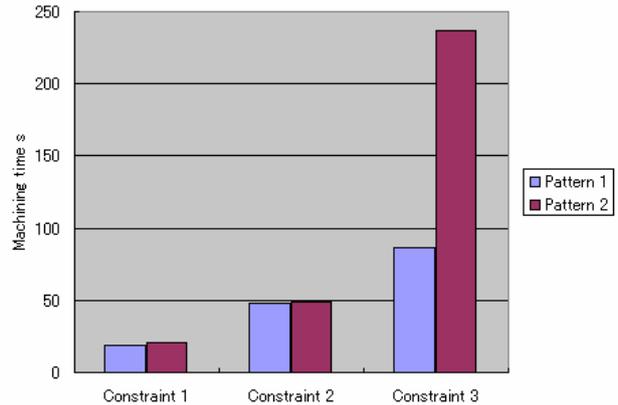


図 7 加工法毎の総加工時間の比較

表 3 各加工法・プロセスの加工条件及び切削抵抗 (パターン 1)

Constraint -Process - Feature	$f_t$ mm /tooth	$A_d$ mm	$R_d$ mm	$F_{xy}$ N	
1-1-	Full slot	0.14	6	10	2000
	Side step	0.11	12	5	2000
1-2-	Side step	0.09	8	10	2000
2-1-	Full slot	0.02	12	10	766
	Side step	0.16	12	1.67	908
2-2-	Side step	0.13	8	2.5	791
3-1-	Trochoidal	0.16	12	1	1000
3-2-	Side step	0.16	8	1	365

ためにも有利であり、一般的に行われる。しかし本ケーススタディのような部品加工では、工具コストの観点からそのような工具を用いることが出来ず、本ケーススタディの結果からも明らかな通り、低速重切削を選択することが有利である。熟練技術者は、工具コスト・加工能率などを考慮し、低速重切削を選択することが一般的であると考えられる。

## 参考文献

- [1] L. Alting, H. Zhang, Computer Aided Process Planning: the State-of-art Surevey, International Journal of Production Research, 27-4 (1989), 553-583.
- [2] R. Weill, G. Spur and W. Eversheim, Survey of Computer Aided Process Planning Systems, Annals of CIRP, 31-2 (1989), 539-552.

# 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

工学研究科機械理工学専攻 小森 雅晴

**Abstract:** Demand for comfortable cabin condition is increasing for vehicles such as automobiles and airplanes and therefore machine noise must be improved. Drive train noise is one of the serious problems because it is outstanding and uncomfortable. Drive train noise is caused mainly by micrometer-order form error of gear. However, the relationship between the characteristics of gear noise and form error of gear is difficult to analyze because noise evaluation is related with human sense. Therefore, there is no design method to improve noise evaluation. This research proposes the virtual gear noise generating system based on form error of gears and the evaluation method of gear noise. By this method, the influence of form error on gear noise is investigated and the design method to realize comfortable gear noise is developed. In this report, new evaluation method of gear noise at design stage is proposed, where the characteristics of human sense are considered. The effect of proposed evaluation method is investigated using sensual evaluation.

**Key words:** Noise, Gear, Comfort, Form Error

## 1. 緒言

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 경우가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ャノイズ評価法を提案する。これにより、歯車形状誤差とギャ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。

これまでに、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、すなわち、歯車対の各歯の歯面形状が異なることを考慮した振動解析プログラムの開発を行っている。また、それを用いて、歯形勾配誤差、ピッチ誤差などの影響、およびかみあう歯車間での歯面誤差の非対称性が及ぼす影響を明らかにした。

歯車の騒音低減化では、開発したシミュレーションにより歯車の振動起振力を計算し、最適な歯面形状を求める方法がひとつの有力な手法である。しかし、従来の歯車の振動騒音性能評価では、振動起振力波形の振幅や特定のスペクトル成分に着目するだけであったため、音として捉えるという視点に欠けていた。本調査では、これまでのプログラム開発と振動面での調査をもとにして、ギャノイズの騒音としての評価に重点を移し、人間の聴覚特性を考慮した歯車騒音評価法を開発する。これにより、歯車の最適歯面を求める有力なツールの提供を目指す。

## 2. 各歯の微細歯面形状の違いを考慮した歯車振動解析プログラム

本プログラムでは、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は一般的な自動車用はすば歯車について、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が、開発した解析法の場合、1 ピッチご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ることを確認することができる。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である。

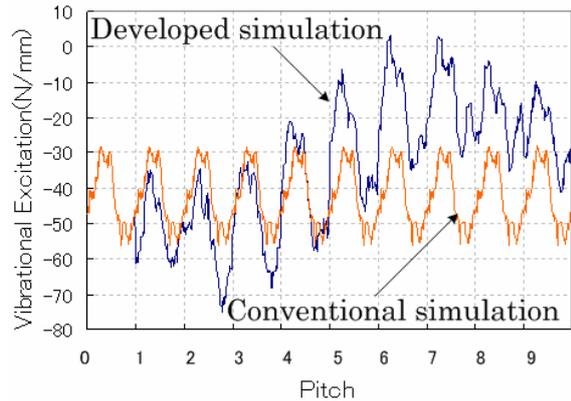


Fig.1 Comparison of calculated vibrational excitation

### 3. ギヤノイズの従来評価法

設計段階におけるギヤノイズ予測評価法としては、従来は歯車運転性能シミュレーションの計算結果である振動起振力を用いていた。その際、振動起振力FFT結果の各次(特に1次)かみあい周波数成分を評価指標としていた。全歯同一形状の仮定の上での計算では、各次かみあい周波数成分のみにピークを持つ。このことから、全歯同一形状の仮定の下では、この評価指標は適当なものといえる。

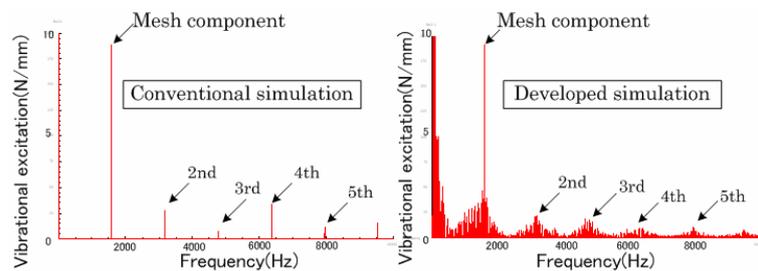


Fig.2 Comparison of calculated vibrational excitation (FFT)

一方、歯車の全歯が歯面形状に相異性を持つとした場合、図2のように、各次かみあい周波数付近に側帯波の周波数成分が発生し、また低周波領域にも大きなピークを持った周波数成分が発生する。このように、かみ合い成分以外にも多くのスペクトル成分が存在するにも関わらずかみあい周波数成分を用いて比較を行う従来評価法には限界があると考えられる。また、人間の聴覚特性が考慮されていない点にも問題がある。

### 4. ギヤノイズ新評価法の提案

歯車の騒音は、かみ合い周波数やその高次成分が問題となることが多い。前述のように、歯面形状にばらつきがあると、かみ合い周波数成分とその高次成分だけでなく、それらの側帯波が発生する。従来の騒音性能評価ではこの側帯波を考慮に入れていないが、実際には側帯波も含めて騒音評価に影響すると思われる。人間の聴覚の音の大きさに対する周波数分解能は1/3オクターブ幅にほぼ一致することがわかっている。そこで、周波数領域をかみ合い一次成分あるいは各かみ合い高次成分を中心とした1/3オクターブバンドに区切り、そのバンド内に含まれる周波数成分を合算し、ノイズ評価指標値とすることを提案する。

### 5. ギヤノイズの官能評価法

従来評価法と提案した新評価法の比較を行なう。ここでは人間の耳で音を評価する官能評価を評価基準とする。音は、空気中の疎密波であり、波の進行方向と粒子の変位方向が同じ縦波である。音波が存在しない時の圧力を $P_0$ 、音波が発生した時の圧力を $P_1$ とすると、圧力の変動分 $p = P_1 - P_0$ が音圧 $p$  [Pa]となる。また、このときの空気中の音を伝える粒子の粒子速度 $u$ は、 $u = p / \rho c$ となる。

$\rho$  : 空気の密度

$c$  : 音速

これを用いることで、音の進行方向に垂直な面を通るエネルギー、すなわち音の強さ  $I$  は、 $I = pu = p^2 / \rho c$  となる。音の強さ  $I$  の基準値  $I_0$  は、次のように定められる。

$$I_0 = p_0^2 / \rho_0 c_0 = 0.968 \times 10^{-12} \cong 1.0 \times 10^{-12} [W/m^2]$$

$$\rho_0 = 1.205 [g/m^3] \quad : \text{空気の密度 (空気温度 } 20^\circ\text{C)}$$

$$c_0 = 343 [m/sec] \quad : \text{音速 (空気温度 } 20^\circ\text{C)}$$

$$p_0 = 2.0 \times 10^{-5} [N/m^2] \quad : \text{上記条件時の音圧}$$

音の強さに対する指標値は、

$$\text{音の強さレベル (音圧レベル) [dB]} = 10 \times \text{Log}(I/I_0) = 20 \times \text{Log}(p/p_0)$$

と表せる。これが、音の物理的な視点での大小の指標である。

一方、人間の耳については、同じ音圧レベルを示す音であっても、同じ大きさの感覚にはならない。すなわち、周波数の低い音に対する人間の感覚と高い音に関する感覚と異なるのである。そこで、1kHz の純音を基準音とし、基準音と異なる周波数の音とを一对比較することで、1kHz と同じ音圧レベルを求め、これを用いた音の大きさの値は、

$$\text{音の大きさレベル [dB]} = 20 \times \text{Log}(p/p_0') \quad (\text{phon})$$

$p$  : 対象とする音と同じ大きさに聞こえると判断した 1000Hz 純音の音圧

$p_0'$  : 1000Hz 最小可聴音の音圧 (一定値)

と表せる。

同じ音の大きさレベルを持つ音の音圧レベルを各周波数で測定した結果を示したものが Fletcher-Munson の等感覚曲線である。本研究においては、この音の大きさの指標値を応用することで、次のような官能評価指標値を定めることにした。

$$\text{ノイズレベル [dB]} = 20 \times \text{Log}(p/p_0'')$$

$p$  : 対象とする振動起振力音と同じ大きさに聞こえると判断した 1000Hz 純音の振幅

$p_0''$  : 最小可聴の 1000Hz の純音の振幅 (各個人の聴覚特性に由来)

各個人の聴覚能力の差に対応するため、基準値  $p_0''$  を上記のように定めた。また、被験者は聴覚が正常と思われる 21 歳から 25 歳までの男女 10 人である。

## 6. 新評価法の有効性

対象とした歯車は一般的な自動車用はすば歯車で、モジュール 2.5、歯数駆動側 30、被動側 53、圧力角 20 度、ねじれ角 30 度、歯幅 20mm、軸間距離 120.1mm、被動歯車の伝達トルクを 245Nm、回転速度を 1,800rpm とする。

各歯毎に誤差量が周期的に変化する歯形勾配誤差を与えた仮想歯面における従来評価法と新評価法の結果を図3に示す。ここでは、駆動・被動歯車の合成誤差量は一定のもと、駆動・被動の各歯車に与える誤差の大きさを段階的に変化させ、振動起振力を求めた。得られた振動起振力は、かみ合い一次成分(1,590Hz)付近の周波数成分が支配的であった。かみ合い1次成分のみを評価する従来法(図3左)と、側帯波まで含めて評価する新評価法(図3右)では、ほぼ逆の傾向を示している。

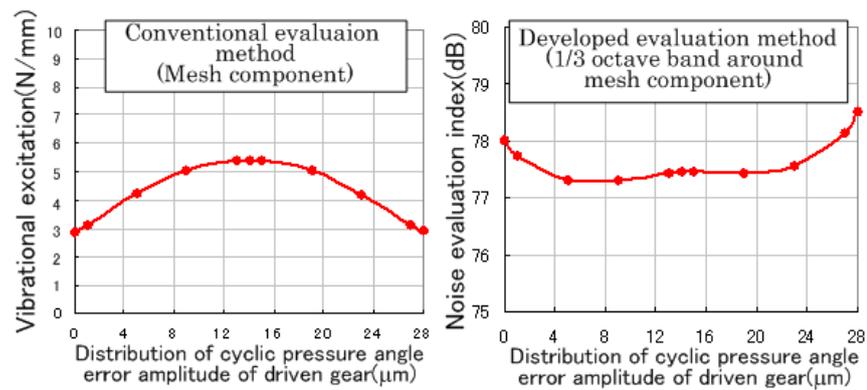


Fig.3 Comparison of results of each evaluation method when the distribution of cyclic pressure angle error between drive gear and driven gear varies under the fixed composite error

官能評価の結果を図4に示す。官能評価結果は、新提案評価法結果と定性的に同じ傾向を示している。これより、従来評価法と比べ、提案した評価法が有効であることを確認できた。

## 7. 結言

設計段階におけるギヤノイズ予測評価法として、周波数領域をかみ合い一次成分あるいは各かみ合い高次成分を中心とした1/3オクターブバンドに区切り、そのバンド内に含まれる周波数成分を合算し、ノイズ評価指標値とすることを提案した。また、ギヤノイズの官能評価法を提案した。提案したギヤノイズ予測評価法を従来法と比較し、提案した評価法が有効であることを確認した。すなわち、歯車の各歯の歯面形状が異なる条件では、かみ合い成分やその高次成分周辺に側帯波が発生するため、この側帯波の影響を考慮することで、従来法よりも官能評価に近い評価が得られた。

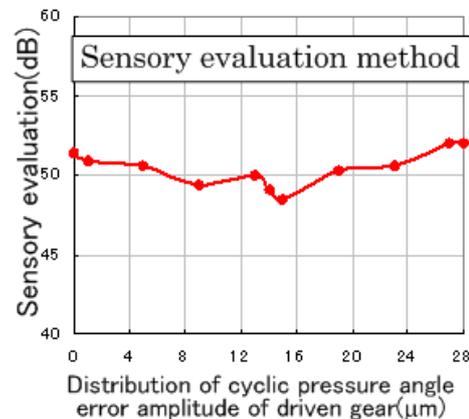


Fig.4 Result of sensual evaluation

## 参考文献

- [1] 小森, 野村, 山下, 久保, 大水, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集 (4), 2005 年, pp. 127-128
- [2] 北條, 日本機械学会 RC184 研究報告書

# グラスゴー武者修行報告

工学研究科航空宇宙工学専攻 坂東 麻衣

## 1. はじめに

私は、21世紀COEプログラム「動的機能機械システムの数理モデルと設計論」の助成を受けて、平成18年3月11日から25日までの間スコットランドのグラスゴーに滞在した。グラスゴーに着いて、まずはじめに私を驚かせたのはスコットランド最強最悪といわれるグラスゴー訛りだった。

## 2. グラスゴーでの生活

グラスゴーはスコットランド最大の都市であるが、グラスゴー大学は市内のウエストエンドと言われる地域に位置し、公園や大きな美術館などに囲まれた静かな場所にある。大学のメインビルディングはかなり古い建物でハリーポッターに出てくるお城のような建物だった。グラスゴー大学ではDept. of Aerospace Engineeringに滞在させてもらった。もともと京大の航空の学生であった村上さんが、現在ここで博士課程の学生としてオートジャイロの研究を行っているの見学させてもらおうというのが今回の滞在のきっかけだった。

Dept. of Aerospace Engineeringでは、いくつかのグループが存在し、テーマも水中を動くシャークロボットの研究から、衛星のフォーメーションフライトなど幅広く、話相手には困らなかった。日本の研究室とは違い、研究室というものはなく、同じデパートメントの博士課程の学生が大きな部屋に各自のスペースを持っている。またスコットランド出身の学生は1名で留学生が大半を占めるため、恐れていたスコットランド訛りはあまりなくほっとした。また私を招待してくれたDr. Houstonはオートジャイロの研究を行っているが、数年前にエアコマンダー社製のオートジャイロが数機連続して墜落してその調査を依頼されたことから始まったらしい。それに関連して、オートジャイロの回転翼下の気流のモデル化の研究、回転翼による地面効果の研究について話をきくことができた。オートジャイロのグループは数値シミュレーションを行う学生がほとんどで実験を行っている学生は1人だけであった。また、ロボットの研究を行うグループは、羽ばたきで飛ぶロボットや水中を泳ぐシャークロボットなど生物にインスパイアされたロボットを自分たちの手で作り、コンテストなどにも参加して賞金をもらったこともあるそうだ。また、制御の研究を行っている学生と紅茶を飲みながらじっくりお互いの研究について話をすることができた。こちらの学生は、何でも実際の値を代入して計算を行い、具体的な数値にイメージを持つことが得意であるということに驚いた。

学生は夕方5時になると一斉に席を立ち帰宅していくのが印象的だった。私も滞在中は、研究室の人たちと映画を見に行ったり、パブでビールを飲んだりして過ごすことができた。研究室の人にぜひ食べてみなさいと強く勧められ、自分でスコットランド名物のハギスを作って食べてみたりもした。ハギスというのは、羊の内臓、オートミール、タマネギを羊の胃袋に詰めて茹でたもので、ソーセージのような形でスーパーでも売られている。マッシュポテトを添えて食べるそうなので、言われた通りにしてみると意外とくせもなくおいしかった。また、ある教授には「スコットランドに来てこんなところで何をしている！自然をみにいきなさい！」と強く勧められた。グラスゴーからバスや電車で小1時間も行けばスコットランドの誇る世界遺産、美しい湖が広がっている。今回の滞在期間中も週末にはバスや電車で足をのばしてハイキングへでかけた。

## 3. おわりに

急な訪問にも関わらず快く了承いただき親切にくださった先生方、研究室内だけでなくスコットランド生活全般について教えてくれた学生の皆様にこの場をかりてお礼申し上げます。今回の滞在を通じて知り合った人たちと次は必ず共同研究をしようと約束をして帰国したので必ず実現したいと思う。



図 1: グラスゴー大学メインビルディング



図 2: ドクター部屋



図 3: オートジャイロ

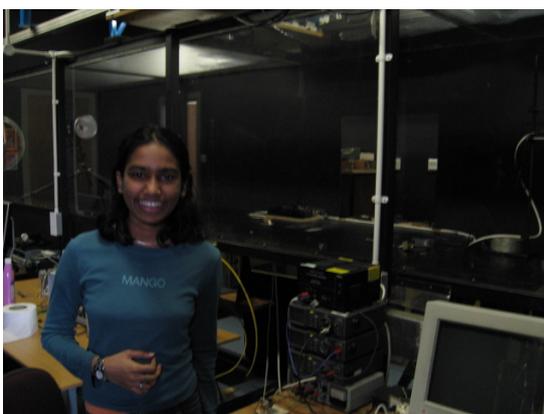


図 4: 地面効果の実験について説明する nita



図 5: シャークロボット

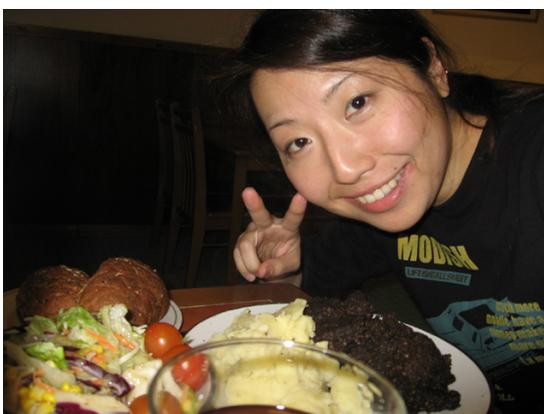


図 6: ハギスを食べる！