

平成22年3月31日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2005～2009

課題番号：17075006

研究課題名（和文） 感覚・運動連関の実時間拘束ダイナミクスの構成論的理解

研究課題名（英文） Understanding of Intra-cerebral Mechanisms for the Motor Adaptation to Unknown Environments

研究代表者

伊藤 宏司 (ITO KOJI)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号：30023310

研究成果の概要（和文）：

我々は未経験の変換を持つ外部環境であっても、能動的な運動と感覚フィードバックの受容を繰り返すことによって、適切な運動ができるようになる。この知覚運動経験の結果として、脳内には状況に応じて適切な運動指令を生成するための感覚運動連関が内部モデルとして獲得される。しかしながら、内部モデルが脳内でどのように表象されているかについては、明らかにされていない。本研究課題では、力場環境下での上腕到達運動学習による脳内機構の獲得メカニズムおよびその成果をもとにリハビリテーションにおける運動機能再建システムを開発下結果について報告する。

研究成果の概要（英文）：

Even if we situated in unfamiliar environments with any kinematic and/or dynamic transformations, we can adapt to them in several trials-and-errors. As a consequence of the motor learning process, we can acquire a neural representation of the relation between motor command and the movement, i. e. internal model of the environment. However, it is still open question to explain the neural representation, i. e. how the internal models are represented in our brains. We clarified the intra-cerebral mechanisms to recognize unfamiliar environments and to generate suitable motor commands through psychophysical experiments and computational modeling of human movement learning and applied its mechanism to EEG-FES system for stroke rehabilitation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	15,300,000	0	15,300,000
2006年度	16,600,000	0	16,600,000
2007年度	14,700,000	0	14,700,000
2008年度	10,600,000	0	10,600,000
2009年度	8,900,000	0	8,900,000
総計	66,100,000	0	66,100,000

研究分野：運動制御工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：運動学習、運動制御系、内部モデル、感覚・運動連関、拘束ダイナミクス

## 1. 研究開始当初の背景

高次の身体自由度を有する生物が予測不可能に変化する動的環境で迅速な適応行動を実現するためには、自らの感覚・運動連関を周囲状況の文脈に基づいて巧みに統合できることが肝要である。しかしながら、現在こうした能力を有する人工物が存在しないことから明らかなように、我々はこのような生物型適応システムの構成理論を持ち合わせていない。動的に変化する実環境では、すべての起こり得る状況をあらかじめ網羅的に経験・記憶しておくことは不可能であり、エキスパートシステムとは異なる新しい知の創成原理が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、未知動的環境下で探索的に行動適応を行う生物の感覚・運動統合機能を構成論的に実現し、その動作を解析することで、移動知の発現原理を解明することを目的とする。このため、過去に経験した感覚・運動連関から身体自由度を拘束する力学的条件を抽出し、これが、未知環境で学習する際に有効に機能することを計算機実験および実機実験により示す。ここでは学習初期の拘束条件を仮説推論（アブダクション）的に生成する手法、ならびに獲得された拘束条件を状況に応じて適切に想起する手法を導入することにより、生物の未知環境適応時の感覚・運動統合メカニズムをモデル化する。

## 3. 研究の方法

### (1) 身体・環境の力学的相互作用に基づく拘束条件の獲得モデル

我々はそれまでに経験したことがないダイナミクスやキネマティクスの変換を持つ外部環境であっても、能動的な運動とそれに基づく感覚フィードバックの受容を繰り返すことによって、適切な運動ができるようになる。この知覚運動経験の結果として、脳内には状況に応じて適切な運動指令を生成するための感覚運動連関が内部モデルとして獲得される。しかしながら、外部世界は複数のダイナミクスやキネマティクス変換が複雑に合成された無限定環境であり、内部モデルが脳内でどのように表象されているかという問題については、依然として明瞭な説明がなされていない。また、獲得された複数の内部モデルを、適切な状況（環境）で利用するためには、感覚運動連関の文脈に基づいて行動・運動を選択するための環境認知モデルの存在も併せて考える必要がある。

### (2) 環境の文脈に基づいた拘束条件選択のダイナミクス

多自由度な感覚・運動自由度を有するシステムの挙動を合目的的に拘束し運動生成するためには、環境および行動意図の文脈に基

づいて適切な拘束条件が選択される必要がある。選択された拘束条件は運動自由度を拘束し、外部環境に力学的な変更を加える。さらに環境の変化は感覚器を通してシステムの力学系に摂動を加える。この感覚運動循環の安定性について力学系設計の立場から考察を行う。

### (3) リハビリテーションへの応用

脳卒中の運動機能回復を運動学習の観点で捉え、脳波 (EEG) と機能的電気刺激 (FES) を組み合わせた、運動意図を反映できるリハビリテーションシステムの構築および検証を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 力場環境下における内部モデル制御とインピーダンス制御の協調機構

対象物操作や道具操作など、外力が加わる環境下で腕運動を行う際には、人間の中枢神経系は、内部モデルによる制御と腕インピーダンスによる制御をフィードフォワード的に協調させる必要がある。近年、生体運動制御・計算論的神経科学の分野では、到達運動中の人間の手先に負荷を加える実験によって、外部負荷に対する腕運動の適応プロセスが詳細に調べられてきた。しかしながら、未だ、上記2つの制御戦略（内部モデル制御とインピーダンス制御）を協調させるメカニズムは明らかにされていない。

### ① 力場環境での二点間到達運動に関する心理物理実験

学生複数名を被験者とし、右腕による水平面内の二点間到達運動（運動距離は 0.125m, 運動時間は  $300 \pm 50$ ms.）を実験課題とした。実験装置として二次元マニピュラタムを用いた。実験では、被験者は2種類の力場環境で到達運動を学習した。1つは、被験者の手先速度に比例した負荷が腕に加わる速度依存力場であり、もう1つは被験者の手先速度と位置に比例した負荷が腕に加わる合成力場である。各力場の作る負荷のパターンはそれぞれ図1, 図2示した矢印ようになる。合成力場は、運動中に腕に加わる負荷の向きが左から右向きに逆転する点で速度依存力場よりも複雑な力場となっている。

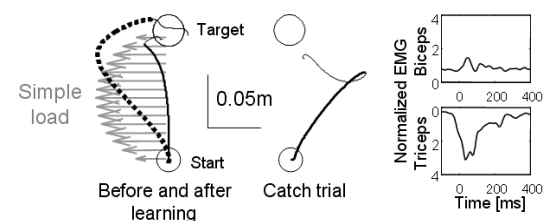


図1 速度依存力場での到達運動

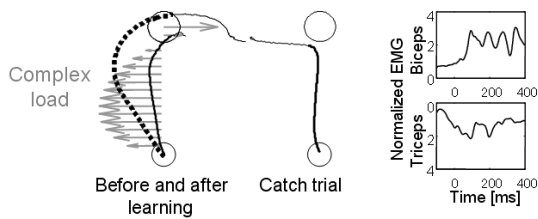


図2 合成力場での到達運動

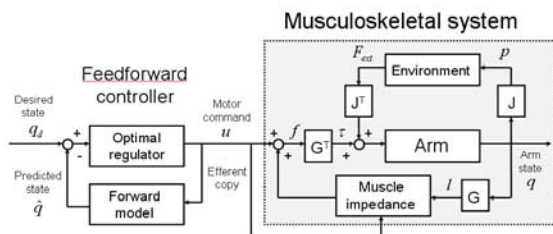


図3 運動制御モデル

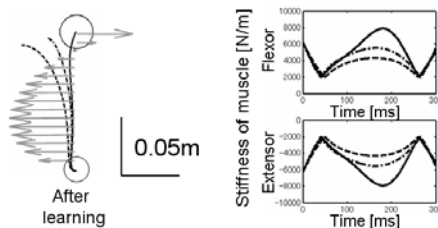


図4 シミュレーション結果

図1, 図2は, 各力場で到達運動を学習した際の学習初期 (破線), 学習後 (実線), キャッチトライアル (Catch trial: 学習後の無負荷試行) での手先軌道, 及び学習後の上腕二頭筋・三頭筋のEMGパターンを示している. 図2より, 合成力場では速度依存力場に比べて, キャッチトライアルでの手先軌道の湾曲が少なく, 筋が同時活性していることがわかる. これは, 被験者があらかじめ負荷の向きを予測して, フィードフォワード的に負荷に対抗する力を生成する制御戦略 (内部モデル制御) をとっているのではなく, 腕のインピーダンスを高めること (インピーダンス制御) で負荷を補償していることを示している. このように, 力場の複雑さに応じて, 2つの制御戦略の協調が変わってくるのが, 実験より明らかとなった.

### ②腕運動の計算モデルを用いた数値シミュレーション

上記の心理物理実験結果 (環境の複雑さに応じて, 内部モデル制御とインピーダンス制御の協調の仕方が変わること) を, 最適レギュレータを用いた腕の運動制御モデルの観点から理論的に検証した. モデルの概要を図3に示す. 図のように, 制御器は最適レギュレータと順モデルを組み合わせた構造とな

っており, 順モデルによる内部シミュレーションを利用してフィードフォワード制御則を計算する. 最適レギュレータは, 運動の終端精度と消費エネルギーで表される評価関数を最小にするような最適フィードバックゲインを計算する. 制御対象である腕は, 環境 (力場) から負荷を受けると共に筋インピーダンスによるフィードバック力を受ける.

図4は, 本モデルを用いて, 合成力場での到達運動をシミュレーションした結果である. 図は学習後の手先軌道と肩関節筋の筋ステイフネスの時間変化パターンを示している. ここでは, 破線, 一点鎖線, 実線となるにつれて, 最適レギュレータの評価関数の終端精度の重みを大きくしている. 図より, 重みが大きくなるにつれて, 筋ステイフネスが大きくなり, 筋が同時活性することがわかる.

### (2) 脳波 (EEG) と電気刺激 (FES) による脳卒中運動機能再建システム

脳卒中患者への運動機能回復リハビリテーションの中で, 運動学習の視点 (繰り返し運動を行うことによる脳内神経回路の更新過程) の重要性を唱える研究例が数多く存在する. 本研究では, 脳卒中中の運動機能回復を運動学習の側面で見え, 脳波 (EEG) と機能的電気刺激 (FES) を組み合わせた, 運動意図を反映できるリハビリテーションシステムの構築および検証を行った (図5). 運動意図情報として事象関連脱同期 (ERD) を使用した. ここでは, 提案システム (EEG-FES システム) を実際に脳卒中患者に適用した際の短期訓練効果 (1日) について報告する.

#### ① 実験方法

1名の脳卒中患者 (男性, 年齢=55歳, 発症後30カ月経過) で実験を行った. 被験者は脳幹部に梗塞があり, 左半身にマヒが生じている. 訓練では足首の背屈運動に重要な前脛骨筋を対象としており, 事前評価ではほとんど筋活動が認められない (SIAS, foot-pat test: 0/5). タスクはマヒ側前脛骨筋運動に伴うERD検出の有無を, 図5に示すように画面上のbarの高さおよび前脛骨筋に添付したFESの出力値変更により, 患者に500msecずつ更新し提示している. 1回1分間のタスクを計20回行わせた. EEG-FESシステムによる訓練の前後に, 足首の背屈運動のみを繰り返し Cue 提示に合わせて行わせ (計30試行), 訓練前後の評価として用いた.

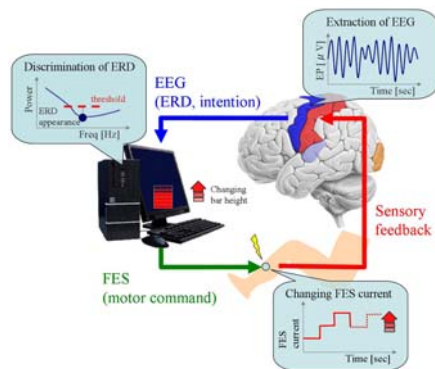


図5 EEG-FESシステムの概略

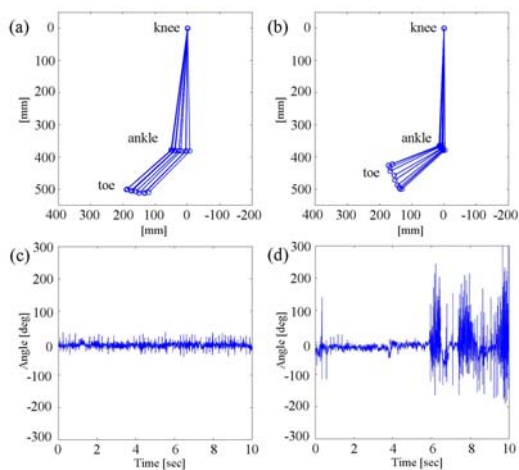


図6 訓練前後の動作, EMG解析:

(a)訓練前脚動作, (b)訓練後脚動作, (c)訓練前EMG(1試行), (d)訓練後EMG(1試行)

## ② 実験結果

図 6(a)は訓練前の脚動作のうち 10 サンプルを提示したものであり, 図 6(b)は訓練後を示している. 訓練前は, 前脛骨筋を動かそうとした結果膝関節が動いてしまっているが, 訓練後では足首背屈運動を実現できていることがわかる. 図 6(c), (d)は訓練前後の 1 試行の前脛骨筋 EMG を示しており, 5 秒から 10 秒までの間に動作指示をしている. 図 6(d)の訓練後において, 筋活動に改善が見られた. 全 30 試行分の EMG を全波整流平滑化後, 6 秒から 9 秒間の動作中最大 EMG を用い定量化筋活動を評価したところ, 訓練前後において有意差 ( $p < 0.05$ ) があることが示された.

1 名の脳卒中患者に提案システム (EEG-FES システム) を適用したところ, 1 日 20 分程度の訓練にも関わらず, 全く動かすことができなかったマヒ側前頸骨筋に有意な改善が見られた. 回復メカニズムは不明であるが, 運動指令とそれに伴う感覚フィードバックを組み合わせるにより, 脳内において運動学習による神経可塑性を進行させたと予想

され, 提案システムの有用性を示唆するものとなる.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

① Manabu Gouko, Koji Ito: An Action Generation Model by Using Time Series Prediction and Its Application to Robot Navigation, International Journal of Neural Systems, 19-2, 105-113, 2009, 査読有.

② 井部 鮎子, 郷古 学, 伊藤宏司: 表面筋電位を用いた前腕義手の複合動作識別, 計測自動制御学会論文集, 45-12, 717-723, 2009, 査読有.

③ 高橋 光, 郷古 学, 伊藤宏司: 運動想起フィードバック訓練による事象関連脱同期 (ERD) 出現の検証, システム制御情報学会論文集, 22-5, 199-205, 2009, 査読有.

④ 郷古 学, 伊藤宏司: センサ情報の変化量を利用した移動ロボットによる環境のモデル化と識別, 電子情報通信学会論文誌, J92-A, 7, 498-506, 2009, 査読有.

⑤ 郷古 学, 登美 直樹, 長野 智晃, 伊藤宏司: 状態パターンの変化にもとづく行動生成モデル, 電気学会論文誌, C129-9, 1690-1698, 2009, 査読有.

⑥ 櫻田武, 五味裕章, 伊藤宏司: 体性感覚情報は左右指協調運動に影響を与える, 電子情報通信学会論文誌, J91-D, 2382-2393, 2008, 査読有.

⑦ 登美直樹, 郷古学, 近藤敏之, 伊藤宏司: 力場環境下における内部モデルの不完全性とインピーダンス制御による補完, 計測自動制御学会論文集, 44-11, 896-904, 2008, 査読有.

⑧ 高橋光, 郷古学, 伊藤宏司: 機能的電気刺激 (FES) による脚運動野における事象関連脱同期 (ERD) への影響, 計測自動制御学会論文集, 44, 699-704, 2008, 査読有.

⑨ 郷古学, 伊藤宏司: 環境変化の予測情報を利用するモジュール切り替え型行動生成モデル, 電子情報通信学会論文誌, 91-D, 813-822, 2008, 査読有.

- ⑩ 青代敏行, 井澤淳, 清水崇弘, 伊藤宏司, 遠山茂樹: MRI 対応指運動用マニピュレーションの開発, 精密工学会誌, 74, 405-410, 2008, 査読有.
- ⑪ Koji Ito, Makoto Doi and Toshiyuki Kondo: Feed-forward Adaptation to a Varying Dynamical Environment during Reaching Movements, Jr. of Robotics and Mechatronics, 19, 474-481, 2007, 査読有.
- ⑫ Toshiyuki Kondo and Koji Ito: An Environment Cognition and Motor Adaptation Model by Eliciting Sensorimotor Constraints based on Time-series Observations, Jr. of Robotics and Mechatronics, 19, 395-401, 2007, 査読有.
- ⑬ Toshiyuki Kondo and Koji Ito: An Intrinsic Neuromodulation Model for Realizing Anticipatory Behavior in Reaching Movement under Unexperienced Force Fields, in M.V. Butz et al. (eds.): Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems: Advances in Anticipatory Processing, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 4520, 254-266, 2007, 査読有.
- ⑭ 長野智晃, 近藤敏之, 伊藤宏司: 脊髄と筋骨格系の機構に基づく分散運動制御系, 計測自動制御学会論文集, 43, 369-376, 2007, 査読有.
- ⑮ 伊藤宏司: バイオメカトロニクスと認知・行動機能, 人工知能学会誌, 22, 179-184, 2007, 査読無.
- ⑯ 近藤敏之, 伊藤宏司: 拘束条件の実時間選択による運動生成, 計測と制御, 44, 596-601, 2005, 査読無.

[学会発表] (計 13 件)

- ① Naoki Tomi, Manabu Gouko, Koji Ito: Cooperative Mechanisms of Internal Model Control and Impedance Control under Force Fields, Proceedings of 19th International Conference on Artificial Neural Networks, 2009.09.14, Limassol, Cyprus.
- ② Mitsuru Takahashi, Manabu Gouko, Koji Ito: Muscular Sensation Induce Event Related Desynchronization (ERD) on Foot Motor Area, Proceedings of IMEKO World

Congress, 2009.09.09, Lisbon, Portugal.

- ③ Mitsuru Takahashi, Manabu Gouko, Koji Ito: Fundamental Research about Electroencephalogram (EEG) - Functional Electrical Stimulation (FES) Rehabilitation System, Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2009.06.26 Kyoto, Japan
- ④ Mitsuru Takahashi, Manabu Gouko, Koji Ito: Fundamental Research about Brain Computer Interface for Stroke Rehabilitation, Italy-Japan International Seminar, Musculoskeletal System and Computational Neuro Science for Rehabilitation, 2009.06.15, Milano, Italy.
- ⑤ Naoki Tomi, Manabu Gouko, Koji Ito: Inaccuracy of Internal Models in Force Fields and Complementary Use of Impedance Control, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008.09.26, Nice, France.
- ⑥ Naoki Tomi, Manabu Gouko, Koji Ito: Impedance Control Complements Incomplete Internal Models under Complex External Dynamics, Proceedings of IEEE International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society, 2008.08.21, Vancouver, Canada.
- ⑦ Mitsuru Takahashi, Manabu Gouko, Koji Ito: Electroencephalogram(EEG) and Functional Electrical Stimulation (FES) System for Rehabilitation of Stroke patients, Proceedings of IEEE International Symposium on Computer-Based Medical System, 2008.06.17, Jyvaskyla, Finland.
- ⑧ Tomoaki Nagano, Manabu Gouko and Koji Ito: Distributed Motor Control System With Transmission Time Delay, Proceedings of International Symposium on Communications, Control and Signal Processing, 2008.03.13, Malta.
- ⑨ Koji Ito, Masakatsu Tsukamoto and Toshiyuki Kondo: Discrimination of

Intended Movements based on Nonstationary EMG for a Prosthetic Hand Control, Proceedings of International Symposium on Communications, Control and Signal Processing, 2008.03.12, Malta.

⑩ Koji Ito, Makoto Doi and Toshiyuki Kondo: Feedforward Adaptation to Stable and Unstable Dynamics in Arm Movements, Proceedings of Mediterranean Conference on Control and Automation, 2007.06.27, Athens, Greece.

⑪ Koji Ito: Mobiligence: Adaptive Motor Behaviors in Dynamic Environments, Proceedings of International Symposium on Measurement Analysis and Modeling of Human Functions, 2007.06.14, Cascais Portugal(Plenary Lecture).

⑫ Koji Ito, Tsutomu Imai and Toshiyuki Kondo: Motor Adaptation to Dynamic Environments in Arm Reaching Motions, Proceedings of XVIII IMEKO WORLD CONGRESS, 2006.09.20, Rio de Janeiro, Brazil.

⑬ Koji Ito, Takahiro Shioyama and Toshiyuki Kondo: Lower-limb Joint Torque and Position Control by Functional Electrical Stimulation (FES), Proceedings of International Conference of Complex Medical Engineering, 2005.05.18, Takamatsu, Japan.

[図書] (計 4 件)

- ① 浅間 一, 伊藤宏司 (編), オーム社, シリーズ移動知全 4 巻, 2010, 1196.
- ② 伊藤宏司, 近藤敏之 (編著), オーム社, 環境適応-内部表現と予測のメカニズム (シリーズ移動知第 3 巻), 2010, 267.
- ③ 伊藤宏司, 共立出版, ニューロダイナミクス, 2010, 225.
- ④ 伊藤宏司, 共立出版, 身体知システム論, 2005, 395.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊藤 宏司 (ITO KOJI)  
東京工業大学・大学院総合理工学研究科  
・教授  
研究者番号：30023310

### (2) 研究分担者

近藤 敏之 (KONDO TOSHIKI)  
東京農工大学・共生科学技術研究院・准教授  
研究者番号：60323820

郷古 学 (GOUKO MANABU)  
東京工業大学・大学院総合理工学研究科  
・助教  
研究者番号：30447560

### (2) 連携研究者

なし