

平成22年 5月21日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2005年度～2009年度

課題番号：17075003

研究課題名（和文）大脳皮質運動関連領野が創る「見なし情報」による随意運動制御

研究課題名（英文）Voluntary Movements Controlled by "Mi-Nashi" Created in the Motor Cortices

研究代表者

矢野 雅文 (Masafumi Yano)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：80119635

研究成果の概要（和文）：実世界において生命システムは環境や身体の状態を完全に把握することはできない。よって、生命システムは自分自身と環境の関係を仮設せざるを得ない。我々は、このシステムが仮設する環境との関係を「見なし情報」と呼ぶ。本研究では、歩行及び腕到達運動において、見なし情報としての環境や身体の情報に基づいた拘束条件のリアルタイムな生成・充足機構が、運動制御システムが予測不可能に変化する環境で機能するために必要不可欠であることを明らかにした。本研究において提案した制御手法は、実世界で柔軟に機能するシステムの原理的機構となりうる。

研究成果の概要（英文）：We clarified that emergence and satisfaction of constraints based on the real time information about body and environment are essential for the control system of walking and arm reaching movements in unpredictably changing environment. The proposed control mechanisms are vitally important for designing systems to work flexibly in the real world.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	21,000,000	0	21,000,000
2006年度	19,200,000	0	19,200,000
2007年度	17,400,000	0	17,400,000
2008年度	12,500,000	0	12,500,000
2009年度	10,400,000	0	10,400,000
総計	80,500,000	0	80,500,000

研究分野：生命システム工学

科研費の分科・細目：

キーワード：見なし情報，随意運動制御，生物・生体工学，脳・神経，実世界，リアルタイム性，拘束条件

1. 研究開始当初の背景

生命システムを取り囲む環境は常に変化しつづけるが、どのような環境であっても運動は適切かつ柔軟に実行される。これまで、生命システムにおける運動制御の問題は、環

境とシステムを分離し、環境をあらかじめ限定しモデル化することで解かれてきた。しかしながら、運動遂行中においても環境及びシステムの状態は予測不可能に変化するため、全ての環境変化をモデル化することは事

実上不可能である。実世界における多様かつ柔軟な運動制御の実現には、「生命システムの認知機能や運動機能は環境との調和的關係を創り出すための機能である」と捉え、環境とシステムの相互作用を取り扱う新しい方法論が必要となる。

環境の状態を全て知ることは不可能であるから、生命システムは自分自身と環境の關係を仮設せざるを得ない。我々は、このシステムが仮設する環境との關係を「見なし情報」と呼ぶ。ある環境における運動目的は、生命システムが仮設する「見なし情報」によって具体的に設定される。環境に応じて目的を達成する行為は随意運動であり、この制御は一般的に不良設定問題となるが、「見なし情報」は随意運動に必要な最上位の拘束条件ということができる。また、運動遂行に必要な様々なレベルでの拘束条件は、仮設された「見なし情報」に依存して設定されるべきものとなる。さらに、環境及びシステムの状態の予測不可能的变化に対応するためには、「見なし情報」を環境との相互作用から時々刻々生成し、それをリアルタイムで充足する必要がある。これらの過程こそが、随意運動を実行するために運動制御系すなわち大脳皮質運動関連領域に求められる計算論的課題となる。このスキームを実現するためには、生理学的知見を基に構成論的に随意運動モデルを構成し、その環境適応能力を評価する必要がある。

2. 研究の目的

大脳皮質運動領域を中心として小脳や基底核などを含む階層構造として実現されていると考えられる「見なし情報」としての拘束条件生成充足機構を明らかにする。

3. 研究の方法

随意運動として歩行および腕到達運動に関し、生物学的知見に基づき構成論的に運動制御機構をモデル化し、心理物理実験及び実機製作により提案モデルを検証する。

4. 研究成果

(1) 筋緊張レベル制御系を備えた二足歩行モデル

歩行は地面と脚の力学的な接触が不連続に繰り返される運動であり、重力場内で行われるので、身体に加わる瞬間的な外力や荷物などの定常的負荷、路面状況による負荷の変化にリアルタイムに対応する必要がある。そのため、歩行系がリアルタイムに環境に適応するためには、歩くことにより自分自身の神経生理学的/身体力学的な特性、すなわち筋緊張レベルを変化させる機構が必要不可欠である。しかしながら適切な身体特性は実際に「歩く」ことでしかわからない。我々は二

足歩行モデルを構築し、環境と身体との力学的相互作用項である床反力情報を用いて筋緊張レベルを適切に設定し続けることで、歩行運動におけるロバストな環境適応能力が得られること明らかにした。

モデルの制御系は位相調節と筋緊張調節の2制御パスを持ち、身体系は片脚5筋、腰部4筋の計14筋、体重60kgとした(Fig. 1)。歩行は重力場で行われるので、身体に加わる瞬間的な外力や荷物などの定常的負荷、路面状況による負荷の変化にリアルタイムに対応することが必要になる。環境/状況変化に即した身体剛性の調節を働かせた結果、定常歩行中の不意の外乱(60kgの負荷)に対しても適切に応答し歩行を維持し続けることが分かった(Fig. 2)。また提案モデルが臨床現場で観察されている様々な運動失調の理論的解析に有用であることを示した。

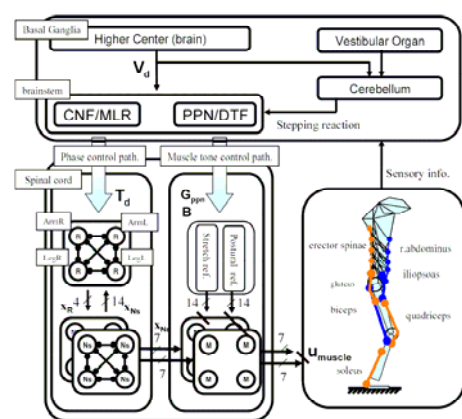


Fig. 1 Bipedal walking model.

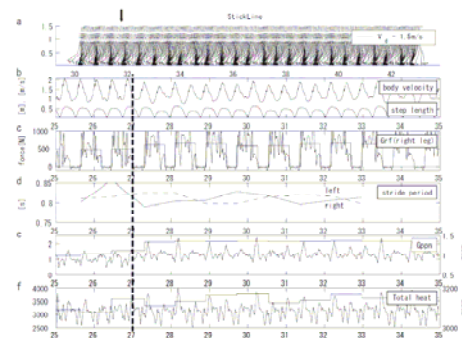


Fig. 2 Simulation result. 20kg weight is added to the waist during a walk.

(2) 腕到達運動制御機構モデル

腕到達運動制御の計算論的課題を明確にする上で、Fig. 3 に示す運動インピーダンスマップは有用である。列にあたる要素はそれぞれ“力”と“運動”の次元を表し、行はそれぞれ手先空間、関節空間、筋空間という身体配置空間を表す。列間のあるいは配置空

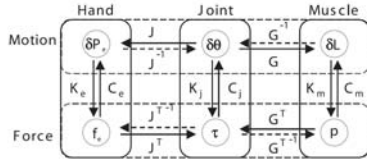


Fig. 3 An impedance map of the body for reaching movement.

間同士の変換には、それぞれ行列が必要となる。腕到達運動制御の計算論的課題は手先空間から筋空間への変換に必要な行列を定めることである。しかしながら、生命システムの身体は冗長で不良設定性が存在するため、制御系には行列を決定するための拘束条件が必要となる。予測不可能な変化に対応するためには、拘束条件自体が適応性を有する必要がある。我々は、腕到達運動に必要な変換行列をリアルタイムかつ自律分散的に決定することで拘束条件自体に適応性を導入する制御手法として以下の2つを提案した。

(2)-① 運動学的情報に基づく自律分散的モデル

平面内を運動する3関節3リンク系冗長腕を考え(Fig. 4)、運動実行中に運動学的情報がリアルタイムで得られるとする。上位拘束としての目標手先ベクトルをリアルタイムのセンサ情報から生成する。

$$\mathbf{v}_d = G_t(\mathbf{x}_d - \mathbf{x}), \quad (式1)$$

ただし、 \mathbf{x}_d G_t 、 \mathbf{x} はそれぞれ、目標手先位置、時間ゲイン、現在手先位置である。 \mathbf{v}_d を動き易い関節に分配するために、関節に対する速度指令 $\tilde{\mathbf{v}}_{di}$ を、次の自律分散的なネットワークに基づき決定した：

$$\tilde{\mathbf{v}}_{di} = \prod_{j \neq i}^m (1 - k_j) \mathbf{v}_{di}^j + \sum_{j \neq i}^m k_j \mathbf{v}_{di}^{cj}, \quad (式2)$$

ここで、 \mathbf{v}_{di}^j は、 \mathbf{v}_d に対して寄与できる最大のベクトル(局所ベクトル, Fig. 4 A), \mathbf{v}_{di}^{cj} は、関節 j から関節 i に要請される指令(カップリング速度, Fig. 4 B) である。 k_i はセンサ情報により更新される動き易さの指標であり、動き易い時に1、動きにくいときに0に近づく：

$$k_i = \exp[-4 \ln 2 (\|\mathbf{v}_{di}^i - \mathbf{v}_i\|^2 + \epsilon_1) / (\|\mathbf{v}_{di}^i\|^2 + \epsilon_2)], \quad (式3)$$

速度指令は式4、式5によりトルク指令へ変換される。

$$\dot{\theta}_{di} = \tilde{\mathbf{v}}_{di} \cdot \mathbf{e}_{xi} / \|\mathbf{a}_i\|, \quad (式4)$$

$$\tau_{di} = G_i(\dot{\theta}_{di} - \dot{\theta}_i). \quad (式5)$$

モデルは、予測不可能に変化する環境においても運動目的を達成することができ、関節粘性の変化、ターゲット位置の変化、特異姿勢からの運動においても柔軟に対応し、5自由度系への拡張も容易であった(Fig. 5)。自律分散的に表現された個々の制御器式4お

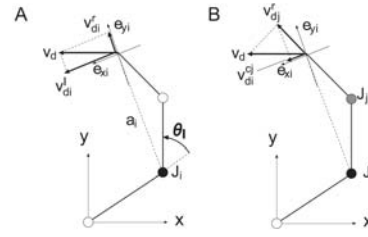


Fig. 4 Three-joint arm model. A: Definition of local vector for joint i and its residual vector. B: Definition of coupling term relating joint j and joint i .

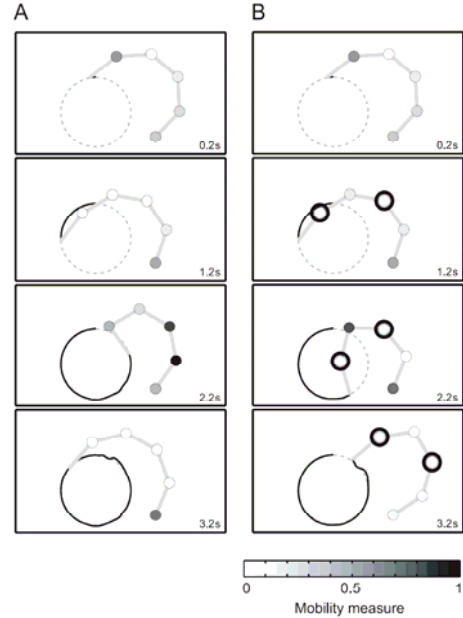


Fig. 5 Rotating movements by 5 dof arm. A: Normal condition. B: Perturbed condition, in which the viscosity of the two joints 3 and 5 were abruptly increased from 0.4 to 10 kg m²/s during motion (shown by tick circles). Joint color shows which joint is instantaneously mobile. Black: mobile joint ($k_i = 1$). White: immobile joint ($k_i = 0$).

よび式5は次のような行列表現にまとめることができる：

$$\dot{\theta}_d = \left[K_t D^{-1} J^T + D^{-1} J_{\perp}^T J D^{-1} K_c J_{\perp}^T \right] \mathbf{v}_d, \quad (式6)$$

$$\tau_d = \tilde{J}(\theta, \dot{\theta})^T G_t(\mathbf{x}_d - \mathbf{x}) - G \dot{\theta}. \quad (式7)$$

また、式8を可変ヤコビアンとよぶ：

$$\tilde{J}(\theta, \dot{\theta}) \equiv \left[G K_t D^{-1} J^T + G D^{-1} J_{\perp}^T J D^{-1} K_c J_{\perp}^T \right]^T. \quad (式8)$$

可変ヤコビアンは、動き易さの指標 k_i の関数であり、運動中にその性質は状況に応じて適切に変化する。すなわち、本制御器は、腕到達運動における不良設定問題を解消するために必要となる変換行列をセンサ情報に基づき実時間で生成する。このような自律分散的な不良設定問題の解消方法は、予測不可能な環境変化に適応する有効な手段ととらえることができる。

(2)-② 動力学情報に基づく姿勢制御モデル
 身体に加わり姿勢を変化させる力やトルクは、筋自体が出力する“能動的成分”と運動や外力によって生じる“受動的成分”に分けられる。ここでは能動的成分を筋トルク、受動的成分を相互作用トルクとする。相互作用トルクは、関節を介して授受される慣性力、反作用力、反作用トルクより定義される。生物の筋肉や関節には様々な特性を持つ機械受容器が備わっており、身体各部位に加わる力情報を検知することができる。そこで本モデルでは、能動的成分である筋トルクと、受動的成分である相互作用トルクを機械受容器でリアルタイムに検知できるとした。

受動的成分を直接制御することは不可能だが、身体姿勢が変化すればその成分も相対的に変化する。受動的成分が能動的成分をサポートできる方向に各リンクの姿勢を変化させれば、身体姿勢は局所的なエネルギー効率最適解にむかう。個々の関節に配置された制御器は筋トルクと相互作用トルクとを比較、筋肉が楽できる姿勢変化方向を決定し、目標姿勢変化トルクを生成する。目標姿勢変化トルクは動力学の情報に基づく姿勢制御指令として働く。

上記アルゴリズムを自律分散的に実装したモデルに対して手先負荷を加えると姿勢が変化した (Fig. 6)。最終到達姿勢は解析的に得られたトルク二乗和最小姿勢と一致した。この結果は、Fig. 3 のインピーダンスマップにおける“力”の次元、すなわち動力学的情報のパスを利用して運動姿勢を最適化したことを示す。このような制御を用いれば、上位中枢が決定した運動目的 (拘束条件) を下位神経系が外部負荷に応じて再設定することができ、それにより随意運動をより環境適応的に実行することが可能となる。

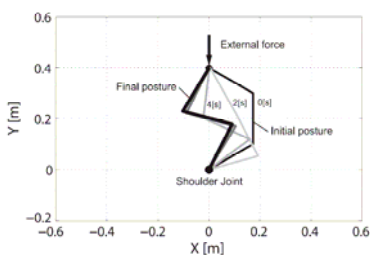


Fig. 6 Simulation result of the posture controller. External force (10N) was added to the hand. As a result, model was able to change own posture to the analytically optimal posture. The stick figure was traced every 1.0 second.

(3) 予測不可能環境における行動発現

我々は、新規環境に対する運動の適応過程解明を目的とし、到達運動中に様々な視覚的・力学的擾乱を加えた際の運動軌跡を計測するマニピュラタムを開発した (Fig. 7)。機構的特徴は、位置追従制御と手先への負荷

制御とが機構的に分離独立していることである。位置追従制御に伴い被験者が感じるフリクションは数 N 程度であり、被験者は手先追従時に余分な力を入れることなく運動することが可能である。また、手先位置をリアルタイムに測定し PC-プロジェクターシステムにより手先情報を与えることで、視覚座標-身体座標の関係を任意に設定できる。これにより座標変換に関する認知・学習の影響を低減し、日常生活に近い自然な状態で運動を計測することが可能となった。

予測不可能的に環境が変化する場合の適応過程を検討する心理物理実験として、目標到達運動において、試行ごとに異なる回転座標変換を視覚的手先位置に加えたときの運動の計測を行った。結果の典型例を Fig. 8 に示す。被験者は、実際に動くことで始めて視覚回転変換情報を取得し、その情報に基づいて運動を修正しゴールへ到達する。1 試行内で実行されるこの過程は、予測不可能な環境への対応を繰り返すことで、よりすばやく実行できるようになることを確認した。また、タスクにおける予測不可能性の程度が、この適応過程に影響することも見出した。

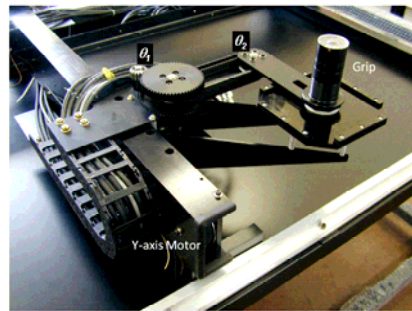


Fig. 7 Slider mechanism of the Manipulandum.

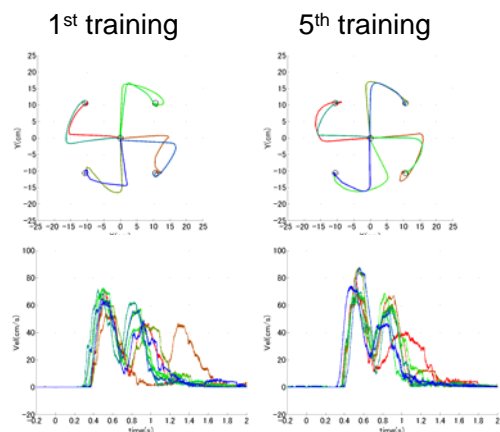


Fig. 8 Typical reaching movements during the visual rotation task. The visual rotation angle (VRA) is 0 degree in pre- and post-sessions, and one of 0, ± 45 , ± 90 , ± 135 , or 180 degree during training sessions. In this figure, panels show only the results when VRA = 45 degree. Top, trajectory of the hand-end; Bottom, velocity profile of the hand-end.

他 33 件.

[学会発表] (計 39 件)

1. 小原 桂二, 伊藤 仁, 矢野 雅文, 「フォルマントピークとスペクトル傾きが母音知覚に及ぼす影響」, 日本音響学会春季研究発表会, 2010/03/08, 東京.
2. 伊藤 岳大, 牧野 悌也, 矢野 雅文, 「時空間表現された匂い情報の記憶と想起の神経モデル」日本神経回路学会第 19 回全国大会, 2009/09/25, 仙台.
3. Sakamoto K et al., “A simple device allowing silicon microelectrode insertion for chronic neural recording in primates,” The 4th International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering, 2009/04/28, アリタリア/トルコ.
4. Makino Y, Yasuie M, Naka Y, Miura H, and Yano M, “A computational algorithm for odor representation using a spatiotemporal sequence” Annual meeting of Society for Neuroscience, 2008/11/17, ワシントンDC/アメリカ
5. 富田 望, 矢野 雅文, 「環境適応的な随意運動を可能とする自律分散制御機構」, 計測自動制御学会第 20 回自律分散システム・シンポジウム, 2008/01/24, 長野
6. Sakamoto K et al., “Transition of goal representation of putative pyramidal neurons and interneurons in the primate prefrontal cortex,” Neuro 2007, 2007/09/10, 横浜.
7. Tomita N, and Yano M, “Bipedal Robot Controlled by the Basal Ganglia and Brainstem Systems Adjusting to Indefinite Environment,” IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering, 2007/05/22, 北京/中国
8. Yoshihara Y, Tomita N, Makino Y, and Yano M, “Control of Voluntary Movement in Indefinite Environment - Real-time Optimization of Reaching Patterns by Constraints Emergence and Satisfaction -” IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering, 2007/05/22, 北京/中国

他 31 件.

[図書] (計 4 件)

1. 矢野 雅文, オーム社, シリーズ移動知 第一巻 移動知-適応行動生成のメカニズム, 2010 年, 21-36.
2. 矢野 雅文, オーム社, シリーズ移動知 第一巻 移動知-適応行動生成のメカニズム, 2010 年, 109-121.
3. 富田 望, 矢野 雅文, オーム社, シリー

ズ移動知 第二巻 身体適応-歩行運動の神経機構とシステムモデル, 2010 年, 189-236.

4. 矢野 雅文, オーム社, シリーズ移動知 第三巻 環境適応-内部表現と予測のメカニズム, 2010 年, 1-36.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 音響信号分析方法および音響信号合成方法

発明者: 伊藤仁, 矢野雅文

権利者: 国立大学法人東北大学

種類: 特許

番号: 特許出願 2006-74939

出願年月日: 平成 18 年 3 月 17 日

国内外の別: 国内

[その他]

<http://www.race.u-tokyo.ac.jp/~ota/mobiligence/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢野 雅文 (Masafumi Yano)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号: 80119635

(2) 研究分担者

牧野 悌也 (Yoshinari Makino)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号: 90250844

坂本 一寛 (Kazuhiro Sakamoto)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号: 80261569

(3) 連携研究者

富田 望 (Nozomi Tomita)

東北大学・電気通信研究所・研究員

研究者番号: 00375156

(4) 研究協力者

吉原 佑器 (Yuki Yoshihara)

理研・BSI-トヨタ連携センター・研究員

研究者番号: 60537025

伊藤 仁 (Masashi Ito)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号: 00436164