

# 論文内容要旨 (和文)

氏名 澤畑 博人



論文題目 視覚フィードバック運動制御のメカニズム

動物は視覚情報をフィードバックすることによって行動を巧みに制御している。問題として、視覚入力から運動出力までには数百ミリ秒の遅れ時間（反応時間）が含まれていることである。一般に、遅れ時間要素が含まれるフィードバック系は不安定になり易い。ヒトや動物が姿勢バランスを制御する際はこの遅れ時間にどのように対抗しているのだろうか？本研究では、この問題の解明のために2つの実験を行った。

最初に、視覚フィードバックを利用した運動制御の例であるヒトの倒立振り子制御について、運動出力のパターンにどのような特徴があるのか調査した。倒立振り子とは掌上の棒を立て安定な状態を維持する制御だが、本実験では、コンピュータ仮想空間上に倒立振り子の力学系を再現した仮想倒立振り子実験系を開発して用いた。被験者はディスプレイに表示された棒（振り子）を見ながら、これが倒れないようにマウスを用いて棒下端を操作した。このとき棒の運動を解析した結果、制御中の棒下端の運動には、静止する時間相（“stop”、持続時間  $207 \pm 213\text{ms}$ ）と急速に移動する時間相（“go”、持続時間  $245 \pm 180\text{ms}$ ）が繰り返される特徴があった。単一の“go”で動かされる距離は、運動開始直前の棒の角度と角速度に比例して調節されており、これが繰り返し実行されることによってバランスが維持されており、一種の間欠制御が用いられていることが明らかになった。

このような間欠制御はどのような脳内メカニズムによって実現されているのか？この問題のためには、直接的に脳の活動を記録解析する必要がある。しかも、視覚系から運動系に至る広範囲な大脳皮質を対象として、数  $10\text{ms}$ ～数  $100\text{ms}$  の短時間のサイクルで実行される情報処理を解析するために十分な時間分解能を備えた計測手法が必要となる。そこで、大脳皮質の表面に電極を貼り付けて電気記録する皮質脳波法（ECoG）の多チャンネル記録が最適だと考えた。しかしこの手法は、得られる信号に重要な成分がどれだけ含まれているのか、長時間の安定した記録が可能かどうかなど不明な点が多い。本研究では、フォトリソグラフィ技術を用いて、パリレン樹脂フィルム（ $20\mu\text{m}$  厚）を基材とした柔軟な電極アレイを新規開発し、動物実験によって有用性を検証した。32極の電極を  $1\text{mm}$  間隔で配置し、フィルムの形状を網状にしたことによって脳表面に柔軟に定着させた。これを用いてラットの一次視覚野（V1）を含む領野から ECoG を記録し、記録側に対して同側と対側の眼を視覚刺激した条件で応答を比較した。その結果、同側眼刺激に比べて対側眼刺激では、応答の振幅が大きく（ $p=0.001$ ）、応答の空間分布にも差が見られた。得られた応答波形からは高次の情報処理に関わるといわれる  $\text{gamma}$  帯域（ $30-100\text{Hz}$ ）の信号も抽出でき、また、長時間の計測でも良い S/N で視覚刺激に応答する信号が得ることができた。

以上より、開発した ECoG 電極は今後視覚フィードバック運動制御の脳内メカニズムの解明に役立つと期待される。

学位論文の審査及び学力確認の結果の要旨

平成24年 2月20日

理工学研究科長 殿

論文博士論文審査委員会

主査 新関 久一

副査 大久保 重範

副査 佐藤 学

副査 山口 峻司

副査



学位論文の審査及び学力確認の結果を下記のとおり報告します。

記

1. 論文申請者

氏名 澤畑 博人

2. 論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記する。)

視覚フィードバック運動制御のメカニズム

3. 審査年月日

論文審査 平成24年1月24日 ~ 平成24年 2月 9日

論文公聴会 平成24年 2月 9日

場所 工学部4号館セミナー室

学力確認 平成24年 2月 9日

4. 学位論文の審査及び学力確認の結果 (「合格」・「不合格」で記入する。)

(1) 学位論文審査 合格

(2) 学力確認 合格

5. 学位論文の審査結果の要旨 (1,200字程度)

別紙のとおり

6. 学力確認の結果の要旨

別紙のとおり

## 別紙

氏名	澤畑 博人
学位論文の審査結果の要旨	
<p>本論文の内容は、仮想倒立振子を用いたヒトの視覚フィードバック制御に関する研究と動物を用いた視覚情報に関連する脳活動計測法の開発研究の2つに大別される。論文は4章で構成されており、第1章は緒言である。第1章では研究の背景と目的を記述し、本論文の研究意義を明確にしている。</p> <p>第2章は倒立振子を用いた視覚フィードバック制御について記述している。倒立振子制御の特徴を抽出し、仮想倒立振子をコンピュータ内に実現するシステムを開発した。これを利用して、遅れ時間が人為的に加わった場合、重力の影響で倒れる速さが変わった場合、外乱が加わった場合について実験的に詳細に検討している。倒立振子の制御には'stop'と'go'が繰り返し実行される間欠制御が有効に働いていることを明らかにした。個々の'go'はopen-loop制御で実行されると考えられ、その移動量は大きく2つの戦略で決定される。1つは、'stop'期間中の視覚情報から棒の傾き情報を取得し、それに基づいて'go'の移動距離を決定するfeed-back戦略であり、もう1つは、一度出された'go'の運動指令を自己評価しその誤差に基づくことによって、視覚情報に頼らずに'go'を実行するfeed-forward戦略である。ヒトの倒立振子制御ではこれら2つのfeed-backとfeed-forward戦略が組み合わされて振子を安定にしていると結論付けた。</p> <p>視覚入力から運動出力へと変換されてゆく脳内処理過程において、視覚feed-backによる間欠制御はどの段階で形成されるのか明らかではない。視覚系の段階ですでに間欠的な制御情報を取得しているか、もしくは、運動系の段階で間欠的な運動指令に変換される可能性が考えられる。しかしヒトでこれを確かめるのは困難であり、脳活動を直接観測しなければならない。第3章では、動物モデルを用いることによってこの手がかりを得るための信号計測手法（皮質脳波の多チャンネル記録法）を開発している。網膜に入力された像は視床を介して大脳皮質の一次視覚野に入力されるため、メッシュ型32チャンネルの電極を用いて一次視覚野とその内側、外側に位置する二次視覚野部位から、対側眼視覚刺激と同側眼視覚刺激の条件による活動パターンの差を詳細に調査した。記録した皮質脳波の空間解像度、周波数分解能、および安定性は優れており、視覚feed-back運動制御に見られる間欠制御が実現される脳メカニズムを解明するために有用であると結論した。</p> <p>第4章は結論であり、研究を総括し、今後の課題、展望を述べた。また、補足として仮想倒立振子の力学的モデルについての理論を記載した。</p> <p>本学位論文の内容は、脳内視覚情報のメカニズムに関して学術的示唆を与えるものであり、開発した多チャンネル皮質脳波記録法は今後、そのメカニズム解明に応用が期待されるものである。本学位論文に関連する2報の英文による学術論文（内、筆頭著者1報）と2報の国際会議（内、筆頭著者1報）で研究成果を印刷・公表している。審査委員全員による協議の結果、論文博士の審査基準を満たしており、論文博士の学位を授与するに十分であると認め、合格と判定した。</p>	
学力確認の結果の要旨	
<p>学力確認は、学位論文公聴会における質疑応答と個別面接を通じて、博士論文に関連ある内容について約30分実施した。その結果、博士として必要とされる専門知識、理解力は十分にあると認められた。また、英語による学術論文が筆頭著者1報を含め3報あること、2報の国際会議発表の実績があることから外国語科目の能力は十分高いと認められる。以上を踏まえ、審査委員全員による協議の結果、合格と判定した。</p>	