

## 論文の内容の要旨

論文題目 感覚-運動系の相互作用を利用した  
インタフェースの研究

氏名 安藤 英由樹

本論文では感覚-運動系の相互作用である行動を実質的に支えている、高速・安定で工学的に機械的応答特性のよい無意識的な脳内の情報処理（低次系の感覚-運動変換処理機能）に着目し、この情報処理に作用する人間の機能拡張や行動支援のためのインタフェースを設計、実現する。

第1章では人間とインタフェースの関わり合いと本論文で提案するインタフェースの概要について述べる。人間の中枢神経系は、感覚受容器を通じて環境から感覚情報を受け取り、感覚情報から運動指令を変換・生成し、効果器を通じて運動を環境へ作用させている。そして、環境は運動により変化し、この変化を再び感覚情報として人間の感覚受容器が受け取る（図1）。人間の行動はこのような感覚と運動のループ形成によって成立している。このとき、中枢神経系側（図1左側）は神経生理学の知見をもとに、想起記憶を検索するなど低速で離散的な高次系（意識的な）の経路と高速で連続的な低次系（無意識的な）の経路の2つの経路に分けられ、それぞれの速度で感覚-運動ループが形成されている。一方で、人間の中枢神経系と環境（図1右側）の情報を橋渡ししている感覚受容器と効果器の2つのみに介在することができるインタフェースは、実空間と情報空間の感覚-運動ループ形成を拡張し、インタフェースは実空間に存在する。このとき、人間の機能拡張、行動支援を行うインタフェースの設計指針を本論文の視点から考えると、高速で無意識的な低次系の感覚-運動変換経路を利用することでより直感的で、脳に対して負荷が少ないインタフェースが実現されると期待される。

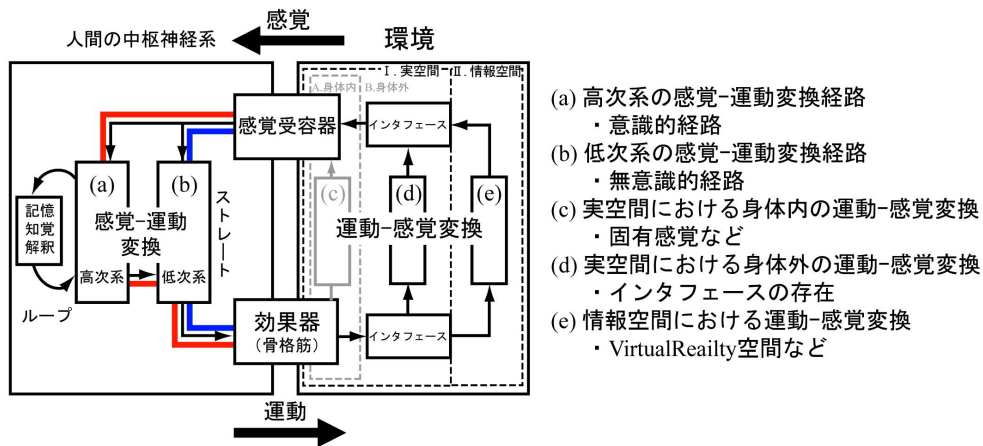


図1. 感覚-運動系 (ループ)

ここで、インターフェースが人間に作用する機能 (図2) について考えると、インターフェース側から人間の中枢神経系に作用する要素は、(1)感覚受容器、(2)効果器、(3)感覚-運動変換器の3つの要素があり、それぞれに作用する機能は(a)感覚提示、(b)運動誘導、(c)感覚-運動変換器の獲得の3つの機能がある。



図2. インターフェースが人間に作用する3つの機能

このとき、中枢神経系の高次系と低次系の2つの経路とインターフェース設計論 (構成) の観点からすると、従来型は高次系の経路を経由するもののみを対象とし、低次系を考慮したものはない。一方で、低次系の感覚-運動変換経路を活用することによって脳に対する負荷の低減などが期待される。そこで、本論文では主に低次系の感覚-運動変換の経路を利用したインターフェースの設計指針を探り、図3に示すインターフェースを提案する。



図3. 提案するインターフェース

第2章では、低次系の情報処理機能と考えられる探索運動を利用した感覚提示手法として、触覚は環境に対して運動出力と感覚入力を同時に起こす能動触覚（アクティブタッチ）が知られている。人間は触覚を得るために環境に対して常に運動出力（なぞり動作）を行い、そこから受け取った感覚入力と運動情報を無意識的に統合し、知覚していると考えられ、なぞり動作は感覚を知覚するために典型かつ重要な運動である。本論文ではこの無意識的な感覚運動統合機構を利用した触覚提示インタフェースを実現した。このインタフェースは物体のなぞり動作時に爪上から振動刺激を加えることによって、指腹部に適切なインパルス刺激を生成することで、凹凸のエッジ知覚を再現している。このインパルス刺激の特性を調べるために実環境と爪上からの振動刺激によるバーチャル環境の2つの環境のそれぞれをなぞる時の指腹部の局所的な一点の力学的応力を計測し、両者の圧力変化について比較した。さらに、バーチャル環境と実環境の凸幅を比較する実験によりこの手法によって提示される感覚の特徴を明らかにした。

またこの技術を応用して、Augmented Realityのシステムに効果的に用いるための小型のセンサ群と組み合わせた爪装着型触覚ディスプレイを開発し、このアプリケーションを実現するための爪側から指腹の圧力を計測する手法を実用化するための解析手法を提案する。

探索運動を利用した感覚提示手法においては、振動刺激を適切なタイミングに感覚受容器へ与えることによって凹凸感覚を生じさせることが可能であることを示した。このインタフェースは爪側から振動を与えることで指腹側に何もつけることなく、直接実環境に触れたまま、つまり実環境との感覚-運動ループを保持したまま、付加的な触覚を重畳することができるものであり、これまでにないアプリケーションが実現可能となる。

第3章では、低次系の感覚-運動変換経路へ訴えかける感覚入力を利用して運動誘導する手法として、低次系の情報処理を司ると考えられる脳の機能部位（脊髄や脳幹）の神経振動子や前庭系のバランス制御によって行われている歩行運動をとりあげ、2つの歩行誘導インタフェースについて提案する。1つはある周期的な刺激に対して低次系の感覚-運動変換器が作用を受け、運動周期が合うように変化する「引き込み現象」と呼ばれる現象を利用した靴型歩行誘導ウェアラブル・インタフェースであり、もう1つは前庭感覚に対して電気刺激を行うことで平衡感覚が左右にシフトする「電気性身体動揺」を利用した頭部搭載型（ヘッドホンタイプの）ウェアラブル・インタフェースである。

前者は歩行者の歩行周期を力センサによって計測し、計測された周期にある範囲内の周期変化を歩行者に振動刺激によって与えることで、歩行周期と歩行方向の誘導を行うものである。実験では、装着者ができるだけ少ない注意で歩行誘導を実現されるための条件を求めた。その結果、特定の範囲内であれば歩行周期の誘導が可能である。

後者は頭部耳後部の乳様突起に電極を固定し電流を流すことで前庭感覚に変動を与え歩行方向を誘導するものである。この手法によって起こる歩行方向の変化は不随意的な動作によるため、意識上には動作が起きた後に他の感覚（固有感覚、視覚）との情報の矛盾が生じて初めて昇ることになる。したがって動作前に注意を向けることはない。実験では、電流量と重心の移動量、歩行変化の曲率の関係を調べ、任意の方向へ歩行者を追従させるフィードバックループを実現した。

このように感覚入力による運動誘導において、運動を無意識的に起こさせるためには、日常の運動の大部分に対して意識的調節を必要としない中脳・橋・脊髄・脳幹の階層といった脳の低次系の感覚-運動変換経路に作用する刺激を運動中の適切な空間位置において適切な時間タイミングで感覚受容器へ入力することが重要である。

第4章では、低次系の感覚-運動変換機能を利用した感覚-運動変換器の学習支援インタフェースとして、運動中に運動誤差を的確に指示する回転モーメントを利用した機械ブレーキ式力覚提示装置である「ウェアラブル・モーメント・ディスプレイ」を提案した。

本インタフェースは回転モーメントを機械ブレーキによって取り出すタイプの小型軽量のインタフェースであり、任意の方向、大きさのトルクを任意の時間に出力可能であることを実験によって確認する。

そして、このインタフェースは運動の学習支援に効果的であることを検証するために同一人物が過去に行った運動を学習し再現する実験を行った。その結果、空間的な要素（位置、速度、加速度）の時系列を記録し、同じ空間的な要素の時系列になるようにモーメントディスプレイを用いて人間にトルク刺激を提示することで動作学習が可能であることを検証した。また結果から、少ないエネルギーで人間に知覚させるためには、軽量であること、腱の力検出受容器に対して効率良くインパルス状のトルクが伝達できる装着方法を選択することが重要であることが明らかとなった。

低次系の感覚-運動変換器の学習を促進させるために重要なことは、運動と誤差情報を提示する感覚モダリティの質が近い（例えば、運動誤差をトルクで与える）こと、空間的誤差を提示すること、時間誤差を提示することであると考えられる。

第5章では感覚-運動系の相互作用を利用したインタフェースの設計指針について結論を述べる。ここまで低次系の感覚-運動変換機能（感覚-運動系の相互作用）を利用した探索運動を利用した感覚提示、感覚入力による運動誘導、感覚-運動変換器の学習支援というインタフェースの各機能について述べてきた。これら3つの機能を持つインタフェースの共通点として、低次系経路を経由する感覚-運動系の相互作用を利用したインタフェースの設計指針は、

- 非言語的な感覚・運動の情報を扱う
- 感覚-運動系（ループ）を妨げない
- 時空間統合を考慮した感覚入力を与える

の3点が重要であると結論づけられる。

これらの非言語的な情報を扱うインタフェースの研究はまた、生理学的、解剖学的、神経学的な知見を踏まえて、現在多くの科学者が取り組んでいる「人間の行動メカニズムを知る」という問題のさまざまな研究成果を人間の生活を豊かにするための道具に還元することを最終的な目標としている。また逆に、このようなインタフェースがさらに「人間の行動メカニズムを知る」ための道具として使用されるべきであろう。