

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 安藤 英由樹

本論文は「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」と題し、5章からなる。人間の意識的な行為を伴うインタフェースの研究は従来から多数あるが、無意識な状況下で、非言語的な方法で人間の感覚-運動ループに直接働きかけるウェアラブルなインタフェースシステム実現のための研究は数少ない。本研究は、行動の制御、行動の記録と再生、行動の増強支援の視座に立ち、基本要素を考察し、それぞれについて具体的な例を取り上げ、独創的な方法で具体的に実現して、応用への道を拓いている。

第1章「序論」は緒言で、人間の感覚と運動の相互作用を利用して人間と環境とを無意識下でインタフェースするシステムを、運動を利用した感覚提示、感覚を介した運動誘導、感覚-運動変換の学習支援について考察し設計するという本研究の目的と立場と意義とを明らかにしている。

第2章は、「探索運動を利用した感覚提示」と題し、触覚の探索運動(なぞり動作)を阻害せず、なぞり動作時に人工的な触覚を重畳するための爪側から指腹部に刺激を与える感覚提示インタフェースを提案している。指腹面に提示する刺激と同じ刺激を爪上から与えても指腹面に触覚情報は提示できない。そこで、物理的に与える情報が異なってもバーチャルに等価的な情報を与える手法を考案している。人間はなぞり動作によって触覚受容器からの凹凸に伴う刺激感覚と指先の動きの感覚の2つを感覚統合し、なぞっている対象の表面情報を知覚している。まず、なぞり動作を行っているときに指腹部にはどのような振動的刺激が起きているか観察した結果、凹凸が変化するときインパルス状の力が発生することがわかり、この刺激に類似した刺激を爪上から包絡線がインパルス状のバースト波形を指腹部に与えれば、この刺激が凹凸として知覚されることを見出している。

また、押しつけ圧力に比例した刺激量を提示することが知覚特性の向上に効果的であるため、爪上から指腹部にかかる力の検出手法が必要となる。爪下の血流分布から指腹部にかかる力、指の屈曲角を推定する従来手法を改良し、従来の問題点であった指腹部にかかる力と指の屈曲角の分離を、力と屈曲角という事象自身の独立性に着目して、「独立成分分析(ICA)」を利用することで分離する方法を提案している。

なお本章で提案したインタフェースは、実環境に触覚を重畳する触覚AR(Augmented Reality)のウェアラブル・インタフェースとして効果的に利用できる。その例として、紫外線励起発光塗料等で描かれた文字や図形などの不可視情報を、このインタフェースを用い触覚で知覚することによって、五感で感じることの出来ない情報を特定の感覚モダリティに変換する具体的な応用システムも実現している。

第3章は「感覚情報を用いた運動誘導」と題し、低次系の感覚-運動変換経路に着目し、神経振動子に対する引き込み現象と頭部電気刺激による前庭動揺の2つを利用することで無意識的な歩行運動誘導が実現可能であることを示している。ここで研究している無意識的な歩行誘導インタフェースは、(1)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同調する「引き込み現象」を利用した靴型歩行誘導ウェアラブル・インタフェースと(2)前庭感覚に対して電気刺激を行うことで平衡感覚に変動をきたす「電気性前庭動揺」を利用した頭部搭載型(ヘッドホン型)ウェアラブル・インタフェースの2つである。

(1)は歩行者の歩行周期を靴底の圧力分布センサによって計測し、踵接地時に刺激を入力することが

引き込みを発現するために最も有効であることを見出し、周期変化を歩行者に振動刺激によって与えることで、歩行周期の誘導を行うものである。高負荷の注意を要するボタン押しのタスクを実行しながら、同時に誘導周期の誘導が可能な歩行周期変動量を求めたところ、歩行周期の変化量が $-100\sim 150$ [ms]のときには、ボタン押しのタスク遂行に要する時間が周期刺激無しの時とほぼ同時間であったことから、ボタン押しのための高次系タスクを妨げることなく歩行周期の誘導が可能であることが確認されたとしている。

(2)は歩行方向の誘導を可能とするため、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を変動させ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、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意識に上ることになる。知覚されずかつ歩行方向誘導に十分と考えられる前庭動揺のための電流量は約 2 [mA]であることを求め、歩行の曲率が電流量に比例する(1 [mA]あたり約 20 [deg])との知見を得ている。外乱(固有感覚等)による曲率の分散が約 10 [deg]と大きいと、歩行方向を追従させるフィードバックループを形成したところ、直径約 25 [m]円周の曲率を持つ目標軌道上から 0.8 [m]以内の誤差範囲で追従が可能であることを示している。

第4章は「感覚-運動変換器の学習支援」と題し、未獲得の感覚-運動変換器を学習によって取得することを支援するインタフェースについて議論している。テニスやゴルフのスイングなどの高速運動は、運動中に「高次系」が実時間に介入できないため「低次系」に形成されている運動プログラムをフィードフォワード的に利用しており、運動終了後の結果から運動プログラムの修正を行っている。このため、高速運動の獲得には膨大な試行錯誤的な訓練を必要とする。このような高速運動の学習を支援するためには、運動中に運動の「方向」、「タイミング」、「大きさ」を提示するインタフェースが必要となる。

そのため、小型軽量かつ、運動中に運動誤差を的確に指示するのに十分な力覚を提示することが可能な、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を提案し、同一人物による記録された運動を学習し再現する実験を行いその効果を示している。

動作記録として着座した状態で腕を後方から前方へ高速運動したときの空間的な要素の時系列を 10 種類記録し、そのうち無作為に 2 つ教師運動として選び、運動時にこの教師運動との時空間的偏差量を減少させるように力覚によって提示を 10 試行連続で行い、その結果、時空間的な誤差は試行が進むにつれて減少することを確認している。このうち、タイミング、方向、大きさの3つの要素が学習にどのような効果があるか、それぞれの要素を除いた場合に空間的誤差、時間的誤差の2つがどのような影響を受けるかを調べ、「タイミング」は運動の時間的誤差に対し相関性が高いこと、運動開始から終了までの運動速度分布に影響を与えることを見出している。一方、「方向」、「大きさ」はどちらも空間的誤差に対し相関性が高く、かつ、どちらか一方が欠けた場合には運動軌跡の学習による収束に著しく影響を与えることが分かったとしている。

第5章「結論」は結語で、本論文の結果をまとめ、今後を展望している。

以上これを要するに、従来はあまり取り上げられることのなかった、非言語的な方法で人間の感覚-運動ループに直接働きかけるウェアラブルなインタフェースシステム実現を目指し、行動の制御、行動の記録と再生、行動の増強支援の視座から、具体的な例を取り上げ独創的な方法で実現するとともに、その設計指針を明らかにして、それに基づく設計法を構築し、実際に利用可能なディスプレイを試作することでその有効性を示して応用への道を拓いたものであってシステム情報学及び人工現実感(VR)に貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。