

学 位 論 文 題 名

振動感覚特性を考慮したVibration Alert Interface の振動
提示方法

学位論文内容の要旨

近年では、携帯電話等の通信機器やロボットにおいて触覚提示や感覚フィードバックなど触覚を利用した新たなインタフェースの開発が盛んに行われており、これに伴い触覚に関する研究ニーズが高まっている。本論文では触覚を利用した情報伝達装置である Vibration Alert Interface (VAI) の振動感覚特性を考慮した設計について述べる。VAI は手持ち型の振動デバイスであり、VAI の振動周波数の違いを利用してユーザに情報を伝達する装置である。従来の振動による情報提示は振動の ON/OFF 制御によるものであり、これは危険・安全といった情報の有無を伝えるものであったのに対し、VAI では振動周波数を変化させることでより情報の有無だけでなく、危険度や距離といった情報の内容をユーザに伝達することが可能であり、視覚・聴覚による情報伝達が困難な場合でも情報を伝えることが可能である。VAI の振動によって、ユーザには振動の周波数や強度の複合感覚である振動感覚が発生し、この振動感覚が VAI の伝えるべき情報に対応することになる。このユーザの振動感覚を VAI の周波数により制御することで情報を伝達するが、VAI はその性質上、正確な情報をユーザに伝達することが要求される。しかし、VAI が同じ周波数で振動した場合でも様々な外乱によってユーザの振動感覚が一定にはならずに変化し、正確な情報を提示できない事が分かった。そこで本研究では VAI の振動周波数とユーザの感じる振動感覚の関係を明らかにし、外乱に対する振動感覚の変化とその補正方法を提案する。

本論文で扱う外乱は 2 つである。1 つは VAI を把持する把持力である。VAI は手持ち型のデバイスであることから VAI を握る把持力の変化が振動感覚を変化させる要因となり得る。把持力を考慮した VAI の設計では、初めに VAI を周波数により前方の障害物との距離を伝える歩行用の障害物警告装置として、周波数による振動感覚と障害物までの距離の関係を求める実験を行った。被験者に VAI を把持させた状態で、提示された振動に対して感じた振動強度から想像する障害物までの距離を口答させる実験であり、その結果、VAI の振動周波数と距離は対数の関係にあり、周波数が高いほど近い距離を答えた。把持力による振動感覚の変化を調べるために、この得られた距離を被験者に教えたうえで、VAI の振動から距離を口答する実験を被験者の把持力を変化させながら行ったところ、把持力によって口答する距離に変化が見られた。すなわち VAI の周波数が一定でも、その時のユーザの把持力によって異なる情報として認識されることになる。さらに、把持力が強いほど口答した距離は近く、把持力が弱いほど距離は遠くなった事から、VAI を強く把持すると振動を強く感じる事が分かった。この要因として皮膚の変形に着目した。皮膚中には振動を感じる受容器 (パチニ小体) が存在するが、皮膚の変形によって皮膚表面とパチニ小体との距離が変化することで振動の減衰度合いが変化し、パチニ小体が受容する振動が異なる事になる。超音波エコーにより把持力と皮膚表面-パチニ小体間距離を測定し定式化した。また、精神物理学の法則である Weber-Fechner の法則をベースにして、皮膚の変形や皮膚中の振動の減衰を考慮することで把持力が変化したときの周波数補正

式を導出した。この周波数補正式では把持力がパラメータとなっており、把持力の変化に応じて、補正周波数を求めることができる。補正周波数はある周波数において把持力が変化したときに、振動感覚を変化させないための周波数であり、この補正周波数を用いて被験者実験を行い、周波数補正式の有効性について確認した。補正実験では被験者の把持力が変化したときでも VAI 補正周波数で振動させることにより、距離感覚を一定にすることができ、これにより把持力によらない振動による情報伝達を可能にした。

2 つ目の外乱は振動感覚の順応である。視覚における明順応・暗順応のように人間の感覚には順応が存在し、触覚においても順応により振動感覚が変化することが考えられる。マグニチュード推定法による被験者実験により、順応による振動感覚の変化を測定した。ここでいう振動感覚の順応とは振動周波数が変化したときに、ユーザが感じる変化後の振動感覚が、変化前の振動周波数に影響を受けることを意味している。VAI の周波数を変化前周波数→変化後周波数と変化させ、変化後周波数の振動感覚を口答させることで変化前周波数が振動感覚に与える影響を測定した。実験結果では順応によって振動感覚に変化が現れた。変化後の周波数が同一でも変化前の周波数が異なることで、被験者は異なる振動と認識した。つまり被験者の振動感覚は、現在振動している周波数だけではなく、過去の周波数にも依存していることになる。変化前周波数が高いほど、変化後の周波数をより弱く感じ、変化前の周波数が低いほど変化後の振動を強く感じるということが分かった。このように順応によって振動感覚が変化するため、VAI において正確な情報を伝達するには順応を考慮して設計をする必要がある。把持力による振動感覚の変化と同様、補正周波数により順応の影響を補正するが、補正周波数を求めるために順応による振動感覚の変化のモデル化を行った。モデル化では興奮性ニューロンと抑制性ニューロンから構成される神経回路モデルである KI (Katagiri-Aida model) モデルを利用した KI-VPA (Vibratory Perception Adaptation) モデルを提案した。モデルの入力を振動周波数とし、1Hz 毎に各ニューロンがそれぞれ 1 回ずつ発火する。興奮性ニューロンは正の方向に発火し、抑制性は負の方向に発火、さらに抑制性ニューロンは興奮性より遅れて発火するため、これにより変化前の周波数に依存する振動感覚の特性を表現することが可能であった。最適な KI-VPA モデルのパラメータを選択し行ったシミュレーションでは、順応による振動感覚の変化を表現することができ、さらに実験結果とほぼ一致する結果となった。また、クロスバリデーションによりモデル化精度を検証したが、十分な精度で順応をモデル化できることが示され、順応による振動感覚の変化をモデルにより表現することが可能となった。KI-VPA モデルから変化前周波数に応じた変化後の補正周波数を求め、補正周波数を被験者に提示した補正実験では変化前の周波数によらない、順応の影響を受けない結果が示され振動感覚の順応に対してロバストな VAI の設計が可能となった。

本論文では振動を利用した情報伝達装置である Vibration Alert Interface の振動強度の設計を行った。ユーザの特性を考慮するため、把持力と順応による振動感覚の変化を明らかにし、モデル化を行い、その補正手法を提案した。補正手法の効果はそれぞれ補正実験により確かめられ、十分に有効であり、VAI において外乱によらない正確な情報伝達が実現した。

学位論文審査の要旨

主 査 准教授 田 中 孝 之
副 査 教 授 金 子 俊 一
副 査 教 授 山 下 裕

学 位 論 文 題 名

振動感覚特性を考慮したVibration Alert Interface の振動 提示方法

近年では、携帯電話等の通信機器やロボットにおいて触感提示や感覚フィードバックなど触覚を利用した新たなインタフェースの開発が盛んに行われており、これに伴い触覚に関する研究ニーズが高まっている。本論文では触覚を利用した情報伝達装置である Vibration Alert Interface (VAI) の振動感覚特性を考慮した設計方法について述べる。VAI は手持ち型の振動デバイスであり、VAI の振動周波数の違いを利用してユーザに情報を伝達する装置である。従来の振動による情報提示は振動の ON/OFF 制御によるものであり、これは危険・安全といった情報の有無を伝えるものであったのに対し、VAI では振動周波数を変化させることでより情報の有無だけではなく、危険度や距離といった情報の内容をユーザに伝達することが可能であり、視覚・聴覚による情報伝達が困難な場合でも情報を伝えることが可能である。VAI の振動によって誘起されるユーザの振動感覚が VAI の伝える情報に対応することになり、この振動感覚を VAI の周波数を制御することで情報を伝達する。VAI はその性質上、正確な情報をユーザに伝達することが要求されるが、VAI の意図する情報が一定であり、VAI が同じ周波数で振動した場合でも様々な外乱によってユーザの振動感覚が一定にはならずに変化し、正確な情報を提示できない事が分かった。そこで本研究では VAI による情報伝達において外乱に対する振動感覚の変化を明らかにし、その補正方法を提案する。

本論文で扱う外乱は 2 つである。1 つは VAI を把持する把持力である。VAI は手持ち型のデバイスであり VAI を握る把持力の変化が振動感覚を変化させる要因となり得る。把持力を考慮した VAI の設計では、初めに VAI を周波数により前方の障害物との距離を伝える歩行者用の障害物警告装置として、周波数による振動感覚と障害物までの距離の関係を求める実験を行った。被験者に VAI を把持させた状態で、提示された振動に対して感じた振動強度から想像する障害物までの距離を口答させる実験であり、その結果、VAI の振動周波数と距離は対数の関係にあり、周波数が高いほど近い距離を答えた。把持力による振動感覚の変化を調べるために、この得られた距離を被験者に教えたうえで、VAI の振動から距離を口答する実験を被験者の把持力を変化させながら行ったところ、把持力によって口答する距離に変化が見られた。すなわち VAI の周波数が一定でも、その時のユーザの把持力によって異なる情報として認識されることになる。さらに、把持力が強いほど口答した距離は近く、把持力が弱いほど距離は遠くなった事から、VAI を強く把持すると振動を強く感じる事が分かった。この要因として皮膚の変形に着目した。皮膚中には振動を感じる受容器・パチニ小体が存在するが、皮膚の変形によって皮膚表面とパチニ小体との距離が変化することでパチニ小体に到達する振動の減衰度合いが変化し、パチニ小体を受容する振動が異なる事になる。超音波エコーにより把持力と皮膚表面-パチニ小体間距離を測定し定式化を行った。また、精神物理学の法則である Weber-Fechner の法則をベースにして、皮膚の変形や皮膚中の振動の減衰を考慮することで把持力が変化したときの周波数補正式を導出した。この周波数補正式では把持力がパラメータとなってお

り、把持力の変化に応じて、補正周波数を求めることができる。補正周波数はある周波数において把持力が変化したときに、振動感覚を変化させないための周波数であり、この補正周波数を用いて被験者実験を行い、周波数補正式の有効性について確認した。補正実験では被験者の把持力が変化したときでも VAI を補正周波数で振動させることにより、距離感覚を一定にすることができ、これにより把持力によらない振動による情報伝達を可能にした。

2 つ目の外乱は振動感覚の順応である。視覚における明順応・暗順応のように人間の感覚には順応が存在し、触覚においても順応により振動感覚が変化することが考えられる。マグニチュード推定法による被験者実験により、順応による振動感覚の変化を測定した。ここでいう振動感覚の順応とは振動周波数が変化したときに、ユーザが感じる変化後の振動感覚が、変化前の振動周波数に影響を受けることを意味している。VAI の周波数を変化前周波数→変化後周波数と変化させ、変化後周波数の振動感覚を口答させることで変化前周波数が振動感覚に与える影響を測定した。実験結果では順応によって振動感覚に変化が現れた。変化後の周波数が同一でも変化前の周波数が異なることで、被験者は異なる振動と認識した。つまり被験者の振動感覚は、現在振動している周波数だけではなく、過去の周波数にも依存していることになる。変化前周波数が高いほど、変化後の周波数をより弱く感じ、変化前の周波数が低いほど変化後の振動を強く感じるということが分かった。このように順応によって振動感覚が変化するため、VAI において正確な情報を伝達するには順応を考慮して設計をする必要がある。把持力による振動感覚の変化と同様、補正周波数により順応の影響を補正するが、補正周波数を求めるために順応による振動感覚の変化のモデル化を行った。モデル化では興奮性ニューロンと抑制性ニューロンから構成される神経回路モデルである KI (Katagiri-Aida model) モデルを利用した KI-VPA (Vibratory Perception Adaptation) モデルを提案した。モデルの入力を振動周波数とし、1Hz 毎に各ニューロンがそれぞれ 1 回ずつ発火する。興奮性ニューロンは正の方向に発火し、抑制性は負の方向に発火、さらに抑制性ニューロンは興奮性より遅れて発火するため、これにより変化前の周波数に依存する振動感覚の特性を表現することが可能であった。最適な KI-VPA モデルのパラメータを選択し行ったシミュレーションでは、順応による振動感覚の変化を表現することができ、さらに実験結果とほぼ一致する結果となった。また、クロスバリデーションによりモデル化精度を検証したが、十分な精度で順応をモデル化できることが示され、順応による振動感覚の変化をモデルにより表現することが可能となった。KI-VPA モデルから変化前周波数に応じた変化後の補正周波数を求め、補正周波数を被験者に提示した補正実験では変化前の周波数によらない、順応の影響を受けない結果が示され振動感覚の順応に対してロバストな VAI の設計が可能となった。

以上を要すると、著者は振動を利用した情報伝達装置である Vibration Alert Interface の振動強度の設計を行った。その上で、ユーザの特性を考慮した設計を行うため、把持力の変化と順応による振動感覚の変化を明らかにし、そのモデル化を行った。モデルから把持力や順応に応じて変化する補正周波数を求め、補正周波数で振動させた補正実験では把持力の変化や順応に対してロバストな振動感覚を提示でき、その有効性を確認している。

本研究は触覚による情報伝達において、外乱による振動感覚の変化とその補正方法を提案した点において新規性が高く、また、研究成果は VAI だけではなく、近年、開発の盛んな触覚インタフェースに応用することでその発展に寄与できるものである。よって、著者は北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格があるものと認める。