

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330321

研究課題名(和文)四肢協調作業時の筋運動感覚特性の解明と操縦インタフェース制御技術の開発

研究課題名(英文) Study on muscle kinesthetic sense mechanism in limbs' operations with applications to driving interface control systems

研究代表者

田中 良幸 (TANAKA, Yoshiyuki)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40336920

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ロボット技術を活用して4自由度ドライビングシミュレータを開発し、ステアリングとペダルの操作時に受ける反力負荷に対する筋運動感覚特性を測定するとともに、筋運動特性との相互関係を解析評価した。そして、上肢と下肢による操縦時に知覚する等価反力の大きさを物理量に換算すると、約30%の相違があること等を明らかにした。また、ペダル操作時の反力負荷と下肢姿勢から反力知覚量を精度よく推定できる多入力型の反力知覚モデルを考案するとともに、その反力知覚モデルを用いてペダル操作特性の強弱を鋭敏にすることでペダル操縦性を向上できる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：The new 4-DOF driving simulator using robotic technology was developed, and the properties of human force perception in driving operations were measured in considerations of human motor properties. The experimental results demonstrated that the force magnitude in steering by the arms was 30% smaller than one in pedaling by the leg even where the perceived values in both operations were same. Furthermore, a multi-input-typed computational model for human force perception in pedaling was proposed, which can successfully estimate a perceiving force magnitude for the reaction force and leg posture, and the effect of the modification of reaction force using the perception model was confirmed in the force tracking control test by the leg.

研究分野：ロボティクス, 生体工学

キーワード：筋運動感覚特性 筋運動インピーダンス特性 多肢協調制御 自動車操縦シミュレータ

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年のロボット技術の発展に伴い、アクチュエータとセンサを活用した運動アシスト福祉器具や次世代自動車ステアリングなど、知的操縦デバイスの研究開発が活発にされている。それらのハードウェア的な完成度は高い域にあるが、操作感に大きな影響を与える操縦特性の設計に関しては未だ十分とは言えない。真に人間と一体となって可動する操縦デバイスを実現するには、筋運動感覚特性と筋運動インピーダンス特性（以下、筋運動特性）の特徴を踏まえて、操作者の運動能力と微妙な感覚心理までを考慮した、新しい操縦インタフェース制御技術を開発する必要がある。

(2) これまでに研究代表者は、単腕/単脚における力知覚特性と運動特性の空間的な相互関係は概ね近似楕円で表現できることを示すとともに、それら知見に基づいた操縦デバイスの反力設計および制御手法を開発してきた。一方で、自動車運転などを想定すると、運転状況に応じてドライバは両手によるステアリング操作と両足によるペダル操作を同時に行っている。したがって、全身運動における生体運動制御メカニズムを解明するには、上肢/下肢だけでなく四肢の感覚-運動特性の相互関係を明らかにしておく必要がある。

2. 研究の目的

(1) 四肢協調作業の一例として自動車運転に着目し、四肢協調作業における感覚・運動特性の測定・解析を行う。

(2) 測定・解析で明らかにした人間特性に基づいて、より人間に親和性の高い操縦インタフェース制御技術を考案する。

3. 研究の方法

(1) ロボット技術を活用して、左右独立で自在に制御できるステアリング機構とペダル機構を有する4自由度の据置型ドライビングシミュレータを開発する。シミュレータには、実車運転時と同じような操縦負荷だけでなく、全く異なる操縦負荷を、リアルタイムで自由に設定できる機能を実装する。

(2) ステアリング/ペダル操作中に発生する操縦負荷に対する筋運動感覚特性を実験心理学的手法を用いて測定すると同時に、筋運動特性を計測する。そして、実験結果に基づいて、四肢協調作業時の感覚・運動特性を、操縦姿勢と操縦負荷から推定する数理モデルを構築する。さらには、筋運動感覚特性の数理モデルを、自動車操縦インタフェースの制御系に組み入れる手法を考案する。

4. 研究成果

(1) ステアリング機構とペダル機構を有する運転シミュレータを開発した。具体的には、ACモータと力覚センサからなる1軸リニアモータ1台と1軸リニアモータ2台を直交配置して左右独立で二次元平面運動を可能とし、操縦ハンドルにはリスト型6軸力覚センサを取り付けて手先力の計測・記録を可能とした。また、運動解析装置にはロボットインピーダンス制御を実装し、さまざまな反力負荷や仮想拘束条件を左右独立に実現させる機能を持たせた。これにより、双腕拘束作業における反力負荷に対する力感覚・運動特性の計測実験を可能とする環境を整備した(図1参照)。



図1

(2) 実験測定(上肢・下肢との知覚差異)

被験者に着座させ、ステアリング角度を $\theta_1 = 0, 30, 60 \text{ deg.}$ 、ペダル角度を $\theta_2 = 115 \text{ deg.}$ と設定し、右足で受けるペダルからの標準刺激を基準として、それと同じ知覚量となるステアリング操舵反力の大きさを恒常法に基づいて測定した。

図2に、ステアリング操舵とペダル操作を同時に課した際に得られた測定結果を示す。縦軸は、ペダル操作反力(20 N)と等価としたステアリング操舵反力の大きさである。ステアリング操舵度によらず、等価反力は100%(20 N)を下回っていることがわかる。これは、ステアリング操舵時に使用する上肢筋群による力発揮能力が、ペダル操作時に使用する下肢筋群のそれには及ばないことが原因の一つと考えられる。また、ステアリング操舵角度に比例して等価反力が減少する原因は、力発揮能力が低下する上肢姿勢であるためと考える。

以上の結果から、上肢と下肢による操縦負荷に対する反力知覚特性は、同じ反力負荷を与えても、それらの等価反力の大きさには物理量に換算すると約30%の違いがあることを確認した。

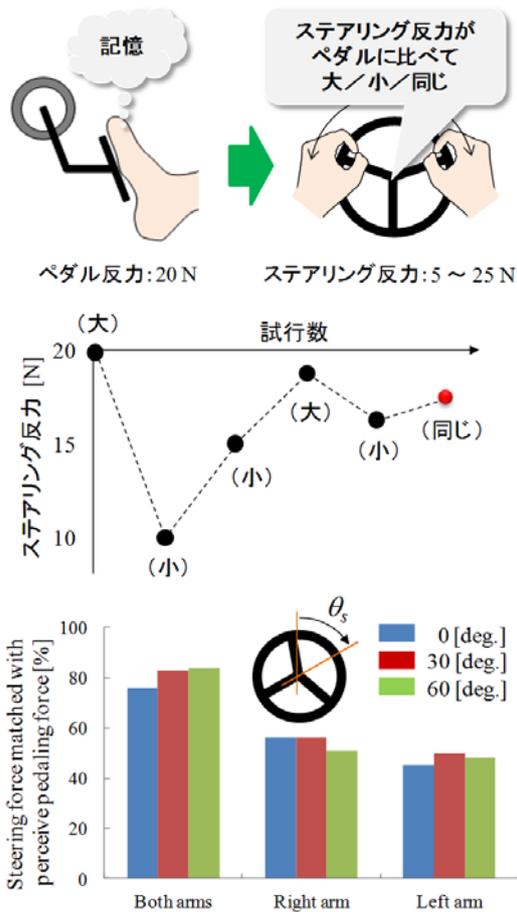


図 2

(3) 多入力型反力知覚モデルと操縦系設計

異なる標準刺激 $F_s = 10, 20, 30$ N に対するペダル操作時の反力知覚特性を、マグニチュード推定法に基づく測定手法により実施した。またこのとき、足首関節角度を $\theta_2 = 115, 130, 145$ deg. と変化させた。

図 3 に、標準刺激 F_s と足首関節角度 θ_2 を変化させた際に得られた測定結果を示す。標準刺激が大きな場合は、足首関節角度に応じて反力知覚特性に顕著な変化は見られなかったが、小さくなると発生した。このことから、大きな反力負荷に耐える為に下肢運動インピーダンス特性が高くなる条件では、反力知覚特性は足首関節角度には寄らないが、反力負荷の繊細な違いを感じるには難しくなることが示唆された。なお、事前に肘関節角度 θ_1 による影響は無視できるほど小さいことも確認した。次に、各標準刺激に対する反力知覚特性は、3次元対数曲面で精度よく数理モデル化できることを確認した。そしてさらに、標準刺激と足首関節角度の二つを入力として、反力知覚量の推定値を出力する数理モデルを考案した。また、今回実施した測定条件においては、反力知覚特性を精度よく推定できることを確認した。これにより、(2)の結果と合わせることで、自動車操縦時の四肢による反力知覚量を、ある程度の精度で予測

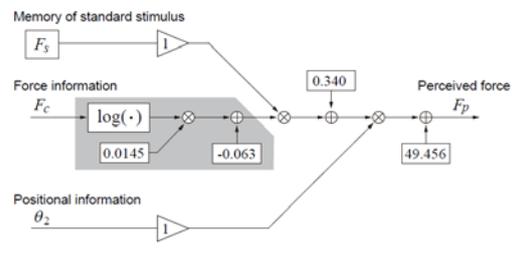
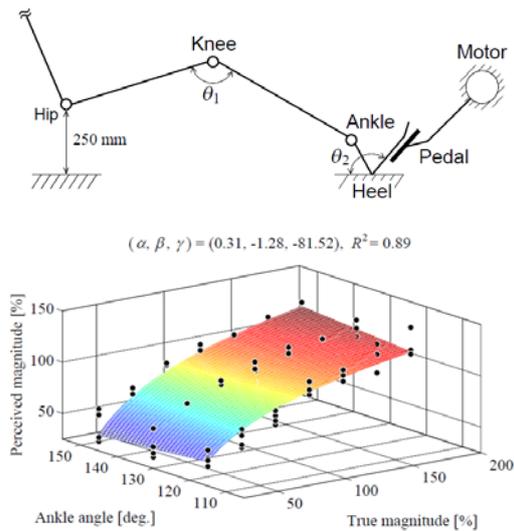


図 3

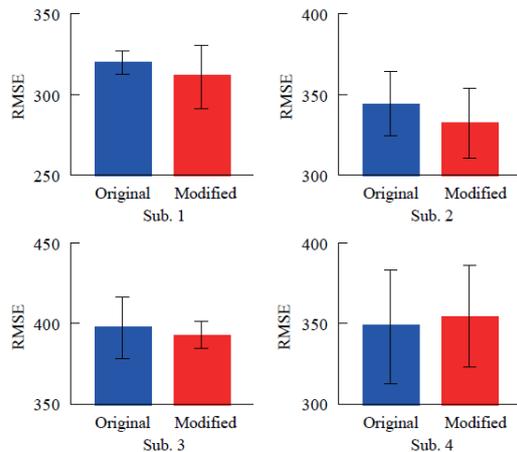


図 4

する事が期待できる。

最後に、考案したペダル操作に対する多入力型反力知覚モデルを用いて、実際の自動車運転時より比較的速く変化するランダム状の目標反力波形(カットオフ周波数: 1.5 ~ 2 Hz)に対する追従実験を行った。実験では、被験者にはディスプレイに表示されるペダル踏力の目標値と実測値に対応するバーを、できるだけ一致させるように教示して実施した。その結果、考案反力知覚モデルを用いてペダル操作特性の強弱を鋭敏にすることで、追従特性が改善される傾向を確認した(図 4 参照)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① Yoshiyuki TANAKA, Genki MIZOE, Tomohiro KAWAGUCHI, Development of a Robotic Evaluation System for the Ability of Proprioceptive Sensation in Slow Hand Motion, Proc. of the 37th Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 査読有, Milano, Italy, 2015.8, pp. 6975-6978.
- ② Yoshiyuki TANAKA, Kazuo NISHIKAWA, Naoki YAMADA, Toshio TSUJI, Analysis of Operational Comfort in Manual Tasks Using Human Force Manipulability Measure, IEEE Transactions on Haptics, 査読有, Vol. 8, Issue 1, 2015.1, pp. 8-19.
- ③ Yoshiyuki TANAKA, Naoki YAMADA, Toshio TSUJI, and Takamasa SUTOMI, Vehicle Active Steering Control System Based on Human Impedance Properties of the Arms, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 査読有, Vol. 15, Issue 4, 2014.8, pp. 1758-1769
- ④ 田中 良幸, ペダル操作時の反力知覚特性の力学的解析と反力設計への応用, 自動車技術会論文集, 査読有, Vol. 45, No. 2, 2014, pp. 361-367.
- ⑤ Yoshiyuki TANAKA, Mitsuhiro NARUSUE, Hiroaki MATSUBARA, Toshio TSUJI, Tomonori OHTSUBO, Hiroshi OKIYAMA, Mitsuhiro TANAKA, Shunichiro MIYAWAKI, Biomechanical and Psychophysical Evaluation of Operating Loads in Vehicular Driving, Proc. of the 2013 IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, 査読有, Manchester, U.K., 2013.10, pp. 3687-3692.

[学会発表] (計9件)

- ① 田邊 周平, 古賀勇雅, 田中 良幸, 自動車操縦タスクにおけるドライバーの筋骨格系に関する感覚・運動特性の解析評価と応用, 自動車技術会 2015 秋季大会産学ポスターセッション ～シーズとニーズの出会い～, 西日本総合展示場 (北九州市), 2015.10.14-16
- ② 田邊 周平, 古賀 勇雅, 岡野 任記, 田中 良幸, 自動車ペダル操縦インタフェース装置を用いた下肢の反力知覚特性の解析評価, 日本機械学会九州支部長崎講演会 2015 講演論文集, 長崎大学 (長崎市), 2015.9.24-25, G02.
- ③ 岡野 任記, 田邊 周平, 田中 良幸, 自動車操縦インタフェース操作時の人間特性計測, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 京都市勧業館 (京

都市), 2015.5.17-19, 1A1-G04.

- ④ 川口 智大, 田中 良幸, 双腕動作における感覚・運動特性の解析評価, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 京都市勧業館 (京都市), 2015.5.17-19, 1P2-I01.
- ⑤ 川口 智大, 田中 良幸, 双腕動作による感覚・運動訓練支援システムの開発, 機械学会九州学生会第46回卒業研究発表会, 北九州工業高等専門学校 (北九州市), 2015.3.3, G43.
- ⑥ 岡野 任記, 田邊 周平, 田中 良幸, 自動車操縦系に関する研究ドライビングシミュレータによるステアリング操作時の人間特性測定, 機械学会九州学生会第46回卒業研究発表会, 北九州工業高等専門学校 (北九州市), 2015.3.3, G42.
- ⑦ 溝江 元気, 田中 良幸, 筋感覚診断支援システムの開発, 機械学会九州学生会第46回卒業研究発表会, 北九州工業高等専門学校 (北九州市), 2015.3.3, G31.
- ⑧ 田邊 周平, 岡野 任記, 田中 良幸, 下肢姿勢に対するペダル操作時の反力知覚特性のモデリング, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2014 講演論文集, 岡山大学 (岡山市), 2014.11.21-23, pp. 205-206.
- ⑨ 山地 弘譜, 田中 良幸, 生体感覚・運動特性を組み込んだ自動車操縦システム, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2013 講演論文集, ピアザ淡海 (大津市), 2013.11.18-20, pp. 841-842.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 筋感覚測定評価装置及び方法
発明者: 田中 良幸
権利者: 田中 良幸
種類: 特許
番号: 2015-164304
出願年月日: 2015年8月22日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等
<http://hms.mech.nagasaki-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 良幸 (TANAKA, Yoshiyuki)
長崎大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 40336920