

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26540104

研究課題名(和文) 身体全体への力触覚提示装置による人間身体拡張の可能性に関する研究

研究課題名(英文) Study on possibility of augmented human by using haptic device for whole body

研究代表者

赤羽 克仁 (Akahane, Katsuhito)

東京工業大学・精密工学研究所・助教

研究者番号：70500007

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人間身体拡張を具現化するための手段として人間の身体全体に対し、力触覚を提示可能なシステムの実現を目的とした。従来の視覚による教示とは異なる、力覚による教示が、ストリートダンス訓練に有効であると考え、ストリートダンス訓練のための等身大力覚提示システムの提案と開発を行った。特に初心者にとって難しいとされるアップ動作の訓練を行うために、経験者と未経験者の動作を計測・比較し、その特徴から訓練時に提示する力の決定に必要な要素のモデル化を行った。評価実験の結果より、主観軸からも客観軸からも提案システムによる力覚提示を伴う訓練が有効であることが確かめられた。

研究成果の概要(英文)：In this research, I propose a system for a haptic device for whole body to achieve augmented human. Recently, street dancing has attracted a great deal of attention. Almost all conventional training environments for street dancing have only visual information, such as watching videos. However, by contrast, the training in which trainers take trainees by the hand and teach them step by step has haptic information. Given this information, more effective training environments for street dancing could be constructed by using haptic information. Deciding that the target task should be "keeping the beat", this research designed and developed human-scale wire-driven haptic interface which enable street dance training. As a result of evaluation experiment, effectiveness of training using the proposed interface was confirmed.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：ハプティックデバイス

1. 研究開始当初の背景

これまでのインタフェースの研究では、人間と機械というものがあつた。それを研究するというものであつた。近年、拡張現実感 (Augmented Reality) の普及に伴つて、人間身体拡張 (Augmented Human) という概念が注目されている。これは常に変化する人間と環境の関わりにおいて、人間を中心として考え、人間の身体能力を増強し環境の変化などに対し適応し、さらに自分自身の身体能力を高めることを目的とした概念である。ワイヤ(糸)は我々生命にとって重要な役割を果たしている。我々が自由自在に身体を動かせるのも腱駆動によるものであり、腱の冗長性を利用し巧みに制御を行っている。ワイヤは素材や製造法により軽量で高い剛性が得られ柔軟性や耐久性にも優れる。この優れた素材を生かして身体全体への力触覚提示ができないだろうか。本研究では人間を中心とした人間身体拡張技術に必要な不可欠となる身体全体への力触覚提示を可能にするシステムの実現を目的とし、今後のこの分野における新たな可能性を切り拓くものである。2008年に文部科学省により告示された新学習指導要領では、学校教育の保健体育科において「武道」「ダンス」領域が新たに必修化された。「ダンス」領域は「創作ダンス」「フォークダンス」「現代的なリズムのダンス」の中から選択し履修することとなっている。ここで、「現代的なリズムのダンス」は社会一般に言われるストリートダンスに相当する。新指導要領の施行前の時点で行われた調査によると、「ダンス」領域の3種目のうち「現代的なリズムのダンス」の実施率が最も高かつた。2012年の施行に伴い、「現代的なリズムのダンス」すなわちストリートダンスはますます注目を浴びているといえよう。しかし、指導者の不足や指導者のスキル不足などが問題となつており、ダンスの訓練が可能な環境が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、人間身体拡張 (Augmented Human) を具現化するための手段として人間の身体全体に対し、力触覚を提示可能なシステムの実現を目的とする。身体全体に力触覚を提示するためには、身体の関節部分に力を提示する機能が必要である。しかし、機械的なリンク構造では身体全体にそのような力触覚を提示することが困難である。そこで、空間自由度が高いワイヤ駆動方式を用いる。全身に複数のワイヤを適切な位置に接続することで身体全体への力触覚提示を実現する。このシステムにより人間身体拡張技術における人間中心の身体全体への力触覚提示機能を実現する。今後、新たにこの分野の可能性が開けると考える。特にアシストスーツ、運動トレーニング、リハビリなど様々な人間身体拡張の応用が期待できる。学習指導要領の改訂により、ストリートダンスが以前にも

増し注目を浴びるようになったが、指導者不足などの問題を抱えており、訓練環境が求められている。しかし、従来のストリートダンスの訓練環境は視覚情報が主であり、あまり直観的であるとは言えなかつた。本研究では、力触覚情報の提示により、直観的なストリートダンスの訓練が可能となるシステムを提案する。身体各関節に対し力触覚を提示し、動作の補助を行う。これにより、人間は身体の動かし方、力の込め方を伝達、学習することができ、「踊る」という人間の能力を拡張することができるようになる。この人間の能力を拡張する概念は Augmented Human として近年注目を浴びている。

3. 研究の方法

人間の自由な行動を計測し力触覚を提示するには、関節の位置(姿勢)の計測および力触覚提示が必要である。そのために、ワイヤを冗長に配置し、冗長なワイヤの中から人間がどのように行動しても物体を干渉しない駆動可能なワイヤを用いて、関節の位置計測と力触覚提示を行うシステムを実現する。ワイヤの張力制御には専用のドライバ基板、および制御基板を用いる。専用基板による、1kHzで身体全体への高精度な力触覚提示を実現する。

訓練タスク

ストリートダンスは種々のダンスの総称であり、動作は多岐に渡る。そこで、本研究ではまずストリートダンスの基本動作を訓練の対象に選定した。その中でも本論文はリズムを刻む動作である、リズム取りに焦点を置いた。リズム動作は2種類存在する。一つは曲のビートのタイミングで膝を屈曲するダウン動作、もう一つは曲のビートのタイミングで膝を伸展するアップ動作である。一見、同一に見えるこの2つの動作は異なる協調運動のモードである。アップ動作の方が不安定な協調運動のモードであり、未熟練者は、より安定なモードであるダウン動作へと相転移してしまう。しかしながら、熟練者は訓練によりこの相転移を抑えることができる。

提案システム

訓練対象とするリズム動作では、体幹にあたる肩、胸と、膝の動きが重要となる。したがって、上記箇所力触覚を提示する。力触覚の提示には、ワイヤ駆動型の力触覚提示装置 SPIDAR のシステムを用いる。被訓練者はそれぞれの箇所にエンドエフェクタを装着し、モータとエンドエフェクタをワイヤで接続する。モータを制御することにより各箇所に力触覚を提示する。

フレーム設計

他の訓練タスクへの対応のためのモータの再配置などの拡張性を考慮して、縮小環境で用いた直方体型のフレームの代わりに八角柱型のフレームを提案する。八角柱は直方体よりも円柱に近く、これによりモータ位置の計算や配置がより容易になることが期

待される。AIST 身体データベースによると、日本人の平均身長は 1654.7mm, 肩の高さは 1352.1mm, 腰の高さは 935.3mm である。フレーム下端に腰用のモータを配置し, フレーム上端に肩用のモータを配置すると作業領域が最大となる。簡単のためにフレームから肩と腰の距離を等しくすると, フレーム上端の高さはおよそ 2300mm となる。水平面に関しては閉塞感を感じないように直径 1800mm の円に外接する正八角形とした。材料には 20mm 角のアルミフレーム並びにそれに対応する角度付フレームを用いた。また, 剛性を高めるため, 底面と平行な面にフレームを設けた。このフレームは後述のモータの配置にも用いることができる。更に, 転倒防止用伸縮棒を用いてフレーム上面と天井との接続を行った。これにより, フレームの剛性が飛躍的に向上した。

エンドエフェクタ設計

被訓練者の体幹や膝に力覚を提示するには, それらの箇所にエンドエフェクタを装着する必要がある。体幹に装着するエンドエフェクタとして一般的に高所作業時に用いられる安全ハーネスとベルトサポーターを, 膝に装着するエンドエフェクタとしてニーパッドを選定した。安全ハーネスやベルトサポーターは既にワイヤを取り付けるための部品が装備されていることが多いが, ニーパッドにはそのような構造にはなっていない。したがって, ニーパッドにはワイヤを取り付けるための機構を設けなければならない。膝を屈伸させるには膝関節を前後から引っ張る必要があるが, 膝の裏側にワイヤ接続部を取り付けると膝の屈曲の妨げになるため, 膝の裏側は空けておく必要がある。したがって, 前方向から膝を引くワイヤは膝前面の中心に, 後ろ方向から膝を引くワイヤはそれぞれ膝の左右に接続する。

モータ配置

配置するモータには, Maxon 社製 DC コアレスモータ RE-max 220429 を用いた。本論文ではリズム動作を訓練対象に選定した。力覚提示箇所は両膝, 体幹にあたる肩, 腰である。リズム動作においては特に, ビートのタイミングでの膝の動作に重きを置くため, 膝への力覚提示が重要となってくる。そのため, 体幹とは独立して力覚提示を行う。リズム動作のタスクにおいて, 各提示箇所は軸に沿って運動する。これらの軸の正負方向に運動ができるように, かつワイヤが干渉しないように, モータを配置する必要がある。リズム動作のタスクにおいては, 両膝, 体幹ともに軸方向に運動できればほぼ十分である。したがって各部位に 1 自由度以上の力覚を提示できればよい。ここで, N 自由度の力覚の提示には最低でも N+1 個のモータが必要となるので, 各部位に最低でも 2 個のモータが必要である。膝のエンドエフェクタを後ろから引くには後方からくるワイヤを膝の左右に装着する必要があることを述べた。したがって, 膝を軸

方向に運動させるには最低でも 3 個のモータが必要となる。したがって, 各膝用のモータの数は 3 個と決定した。体幹に関しては, 上下方向への力が効率よく提示できるように, かつ膝のワイヤと干渉しないよう, モータを冠状面上に配置した。対称性を考慮しモータの基本単位を 4 個とした。さらに体幹の質量の大きさを考慮し, 出力を増大させるため, モータの数を基本単位の 4 倍にした。したがって体幹への力覚の提示には 16 個のモータを使用した。モータ配置座標の原点は底面の八角形の中心とした。

安全性の考慮

ワイヤ駆動型の力覚提示装置は比較的安全だが, 全身への力覚提示を行うので被訓練者の安全性の確保は重要である。例えば, Oculus Rift HMD は健康上の理由から 13 歳以下の使用を制限している。これに倣い, 本システムも, 提示力に耐えられない恐れのある使用者に対し制限を設けることを検討している。また, 提示力に耐えうる使用者でも, 転倒に備え, ヘルメット等頭部を保護できる装備の装着を強く推奨している。加えて, 被訓練者が提示力覚に対し少しでも違和感を覚えた時, 被訓練者自身が直ちに訓練を停止できるような非常停止装置を配置した。

4. 研究成果

評価実験

本章では, 設計したデバイスがストリートダンスの訓練に有効であるか評価実験を行う。訓練タスクはビートに合わせ膝の屈伸を行うリズム取りである。そのなかでも, アップ動作はこれまで述べたように不安定な協調運動のモードであり, 初心者には難しいとされる。したがって, 今回はアップ動作の訓練を行い, その効果を評価する。テンポは一般的に初心者向けといわれる BPM90 とした。

客観評価

力覚提示による訓練前と訓練後に計測した関節のデータを用いて, 提案システムでの訓練が有効であったかの評価を行う。被験者はストリートダンス未経験の 20 代の男性 6 名である (24.7 ± 1.8 歳)。計測した関節は SPINE_MID である。正しいアップ動作ではビートのタイミングで SPINE_MID が立ち上がりきると仮定した。そこで, ビートのタイミングの時刻と SPINE_MID の立ち上がりきりの時刻の誤差の絶対値をビート毎で平均を取った。もっとも誤差の少なかった連続 2×8 区間の結果を考察した。結果から, 力覚による訓練前の誤差が訓練を通して減少していることがわかった。これらの結果から, 提案システムによる訓練が有効であったと考えられる。

主観評価

実験終了後に実施したアンケート結果から提案デバイスの評価を行った。アップは不安定な協調運動のモードであり, 初心者にとってはより難しいタスクであることを述べ

た.実際にダンス未経験者を対象に,ダウン動作とアップ動作を行ってもらい各動作の主観的な難易度を回答してもらった.この結果に対し,対応のある片側 t 検定を行った. $p < 0.001$ より,有意水準0.1%で平均値の有意差が確認できる.この結果からも,初心者にとってアップ動作は明らかにダウン動作に比べ難しいことがわかる.このように初心者にとって難しいアップ動作であるが,力覚を用いた訓練後のアップ動作の主観難易度と比較した結果から,訓練前後のアップ動作の主観難易度に対し,対応のある片側 t 検定を行った. $p = 0.006 < 0.01$ より,有意水準1%で平均値に有意差が確認できる.これより,力覚による訓練によってアップ動作の主観難易度が下がった,すなわち訓練効果があったと考えられる.本研究では,人間身体拡張(Augmented Human)を具現化するための手段として人間の身体全体に対し,力触覚を提示可能なシステムの実現を目的とし,従来の視覚による教示とは異なる,力覚による教示がストリートダンス訓練に有効であると考え,ストリートダンス訓練のための等身大力覚提示システムの提案と開発を行った.ストリートダンスの動作は多岐に渡るが,その中でも基本的な動作である,リズム取りを訓練対象とした.拡張性をもたせ閉塞感を感じさせないフレームの設計,膝の屈伸を阻害しないエンドエフェクタの設計,各力覚提示部位へのワイヤが干渉を抑えリズム取りに必要な運動方向へ効率よく力を伝達するモータ配置,被訓練者の危険防止のための非常停止装置の配置を行い,ストリートダンス訓練のための等身大の力覚提示デバイスを開発した.また,力覚提示によるリズム取り,その中でも特に初心者にとって難しいとされるアップ動作の訓練を行うために,ストリートダンス経験者と未経験者の動作を計測・比較し,その特徴から訓練時に提示する力の決定に必要な,エンドエフェクタの目標の位置のモデル化を行った.評価実験の結果より,主観軸からも客観軸からも提案システムによる力覚提示を伴う訓練がストリートダンス習得に有効であることが確かめられた.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

- [1]赤羽 克仁, 肥後 明豪, 佐藤 誠: ワイヤ駆動型力覚提示装置における受動粘性制御の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, ハプティックコンテンツ特集号, 査読有, Vol.19, No.4, pp.495-502, 2014.12
 [2]Anusha JAYASIRI, Katsuhito AKAHANE, Makoto SATO: Adding 3D Interactivity to a 2D Image Sequence Using the String-Based Haptic Device, IEEEJ Transactions on Image Electronics and Visual Computing, 査読有,

Vol.2, No.2, pp.159-167, 2014.12

〔学会発表〕(計16件)

- [1]丸山 直紀, 劉 蘭海, 田上 想馬, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: フレーム可動型両手多指力覚提示装置の フレーム制御に関する提案, 情報処理学会インタラクシオン 2014, DVD, 2014.2.27-3.1
 [2]村石 辰徳, 川喜田 裕之, 大久保 貴博, 田島 寛之, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: スマートフォンをエンドエフェクターに用いる力覚インタフェースの開発, 情報処理学会インタラクシオン 2014, DVD, 2014.2.27-3.1
 [3]田島 寛之, 季 雨農, 馬 姝涵, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: 6 自由度力覚提示装置 SPIDAR-I の提示力等方性について, 情報処理学会インタラクシオン 2014, DVD, 2014.2.27-3.1
 [4]大久保 貴博, 本多 健二, 戸島 幹智, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: 動物画像のためのモデルベース可触化システムの開発, 情報処理学会インタラクシオン 2014, DVD, 2014.2.27-3.1
 [5]加藤十磨, 田川和義, 丸谷宜史, 田中弘美, 神田輝, 赤羽克仁, 佐藤誠: 6 自由度手首力覚提示装置を用いた手術手技訓練支援のための基礎的検討, 第19回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 557-560, 2014.9.17-19
 [6]戸島幹智, 村石辰徳, 大久保貴博, 赤羽克仁, 佐藤誠: 携帯端末に装着可能な力覚提示装置の提案, 第19回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 602-603, 2014.9.17-19
 [7]田上想馬, 神田輝, 赤羽克仁, 丸谷宜史, 田中弘美, 佐藤誠: 手術シミュレーションのための 手首力覚提示装置に関する研究, 第19回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp.529-532, 2014.9.17-19
 [8]徐美玲, 赤羽克仁, 佐藤誠: 装着感に優れた小型軽量な点接触 ハプティックデバイスの開発, 第19回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 355-358, 2014.9.17-19
 [9]稲本和幸, 赤羽克仁, 佐藤誠: 動的粘性制御を実現するワイヤ駆動型力覚提示装置用 モータドライバの提案, 第19回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp.598-601, 2014.9.17-19
 [10]三宅慧, 小金山洋, 赤羽克仁, 佐藤誠: 両手 10 本の指先位置情報を基にした 3D 手モデルによる VR 操作システムの構築, 第19回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 604-607, 2014.9.17-19
 [11]田中 駿, 赤羽 克仁, 田中 弘美, 佐藤 誠: 手首力覚提示による手術教示システムに関する研究, 第20回日本バーチャルリアリティ学会, pp. 72-73, 2015.9.9-11
 [12]内山 貴雄, 赤羽 克仁, 長谷川 晶一, 佐藤 誠: 高速な多指操作シミュレーションのための柔軟な指先モデルの提案, 第20回

日本バーチャルリアリティ学会, pp. 68-71,
2015.9.9-11

[13]永井 一樹, 田上 相馬, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: 装着可能な力覚提示デバイスの開発について, 第 20 回日本バーチャルリアリティ学会, pp. 148-149, 2015.9.9-11

[14]川崎 太雅, 赤羽 克仁, 長谷川 晶一, 佐藤 誠: 力覚提示によるストリートダンス訓練システムの提案, 第 20 回日本バーチャルリアリティ学会, pp. 471-474, 2015.9.9-11

[15]銭 亦ハン, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: 可動するウェアラブルファッションの検討, 第 20 回日本バーチャルリアリティ学会, pp. 170-171, 2015.9.9-11

[16]永井 一樹, 田上 想馬, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: 没入型 VR 環境のためのウェアラブル手首力覚提示デバイス, Entertainment Computing 2015, 2015.9.25-27

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://sklab-www.pi.titech.ac.jp/blog/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

赤羽 克仁 (AKAHANE Katsuhito)

東京工業大学・精密工学研究所・助教

研究者番号: 70500007

(2) 研究分担者

佐藤 誠 (SATO Makoto)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号: 50114872

(3) 連携研究者

長谷川 晶一 (HASEGAWA Shoich)

東京工業大学・精密工学研究所・准教授

研究者番号: 10323833