

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 17 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500593

研究課題名(和文)片麻痺膝屈伸への促進的電気刺激・筋力補助を用いた下肢装具装着型歩行訓練装置の開発

研究課題名(英文)Development of Wearable Walk Training Device for Hemiplegic Lower Limbs with Promotable Electrical Stimulation and Power Assistance

研究代表者

余 永(Yu, Yong)

鹿児島大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：20284903

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、筋電気刺激機能とパワーアシスト機能を備え軽量で下肢装具に装着できる装置を開発して、歩行訓練における膝屈伸の神経路強化的随意運動促進療法を確立し、片麻痺膝の麻痺自体と歩行機能を効果的に改善させることを行った。

(1)筋電気刺激機能には、特定された筋への収縮閾値下の持続的電気刺激による膝の随意屈伸運動への促進機能の実現；(2)パワーアシスト機能には、能動的に膝の筋力や随意屈伸運動を補助する他動介助訓練、および膝の伸張反射を起して自動伸展を促進する周期的筋振動刺激機能の実現；(3)これらの機能を併合した下肢装具装着型歩行訓練装置とその随意運動促進療法および訓練効果評価方法の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：The rehabilitation for hemiplegic is based on the theory of the plasticity of cerebrum. "Repetitive Facilitation Exercise" (RFE or Kawahira Method), as an effective method of training and healing to exploit the plasticity of cerebrum, can reach the purpose of helping the sufferer to realize moving with the expected movement.

This research aims to develop a training unit that is a wearable walk training device for hemiplegic lower limbs with promotable electrical and vibration stimulation and power assistance based on RFE (Kawahira Method). In other words, the aim is to develop wearable walk training device that has intellectual sensing, control, and driving functions that control motion and force and can be used in training to improve movement of the hemiplegic lower limbs. The device's motion, sensing, mechanisms, control systems and promotable electrical muscle stimulation and vibration muscle stimulation are discussed in this paper and its performance is evaluated experimentally.

研究分野：人間医工学

キーワード：片麻痺患者用歩行訓練装置 力情報に基づくパワーアシスト制御 足装着型自重免荷パワーアシスト装置 閾値下筋電気刺激 周期的筋電気刺激 筋閾値測定方法 股関節・膝関節運動順応機構 訓練効果評価方法

1. 研究開始当初の背景

現在日本には脳卒中の患者数は現在約 280 万人といわれ、その代表的な後遺症として片麻痺がある。これまで、脳の神経細胞は回復出来ないものと考えられてきた。しかし近年、脳には損傷を受けた部分の役割を他の部分が代行する働き「脳の可塑性」があることが分かっている。これは効果的なリハビリを行うことにより回復に向かうことが出来ると考えられているが、可塑性の発現には長時間のリハビリが必要であり、患者が多数の場合は医師の負担が増大してしまう。そこで医師・療法士の負担軽減のため、機械によるリハビリの需要が高まっている。

2. 研究の目的

本研究では片麻痺股関節・膝関節を能動的にアシストしかつ促進的電気刺激を加え、効果的なリハビリが可能となる片麻痺歩行機能回復訓練装置の開発を目的とする。

3. 研究の方法

3. 1 回復理論

徒手ではなく機械で片麻痺歩行リハビリ訓練を行うために、以下のような回復理論を考案する (Fig.1)。

まず、筋肉と神経を電気刺激と物理刺激で刺激する。電気刺激は、筋収縮閾値は超えるが、関節運動閾値は超えない程度の弱いパルス電流である。物理刺激は促通反復療法によるタッピング刺激で、振動モータによる振動を考えている。すると、筋肉への指令の閾値が下がるので患者が足を動かし易くなる。そして、微小な動きをパワーアシスト装置によりセンシングしてアシストし、自分の意思で歩行することが可能となり、神経回路の再建強化が図れ効果的なリハビリ訓練をできると考える。

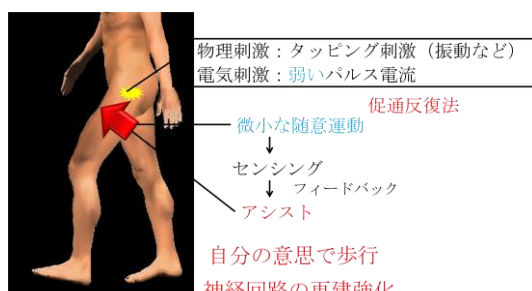


Fig.1 Rehabilitation principle

3. 2 装置への要求仕様

装置に対する要求仕様を示す。

1. 装着ユニットの自重を使用者に負担させない。
2. 歩行時の腰の上下起伏を妨げない。
3. 筋力補助（パワーアシスト）を有する。
4. 膝関節の運動を妨げない。
5. 股関節の3自由度回転運動を妨げない。
6. 足の太さや長さの個人差に適応できる。
7. 患足側の横転倒を防止する。
8. 電気刺激機能と物理刺激機能を有する。

4. 研究成果

4. 1 装着ユニットの固定と歩行時起伏の順応機構

まず、人に装着するユニットの自重を装着者に負担させないために、歩行補助機を導入し、装着ユニットの自重を歩行補助機が支える。

次に、股関節の高さの個人差に対応するために、歩行補助機と装着ユニットを高さ調節機構により位置を上下に調節した後ネジで固定することで、腰の高さの個人差に対応する (Fig.2)。

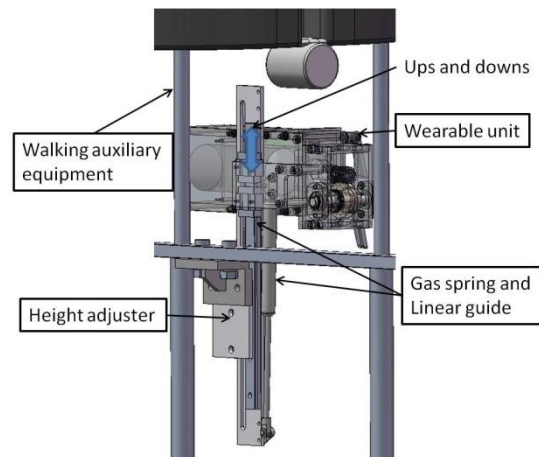


Fig.2 Height adjuster, ups and downs spring unit and wearable power assist unit

さらに、通常人は歩行の際に上下に起伏するため、股関節の高さと股関節パワーアシスト装置の回転軸を高さ調節機構により調節してもずれてしまう。そこで歩行時にずれないようにするために、高さ調節機構と装着ユニットの間にリニアスライダとガススプリングを導入した。弾性のあるガススプリングによって高さ調節機構から装着ユニットを支持でき、装着ユニットは歩行時に上下に起伏することができる。

4. 2 股関節・膝関節パワーアシスト装置

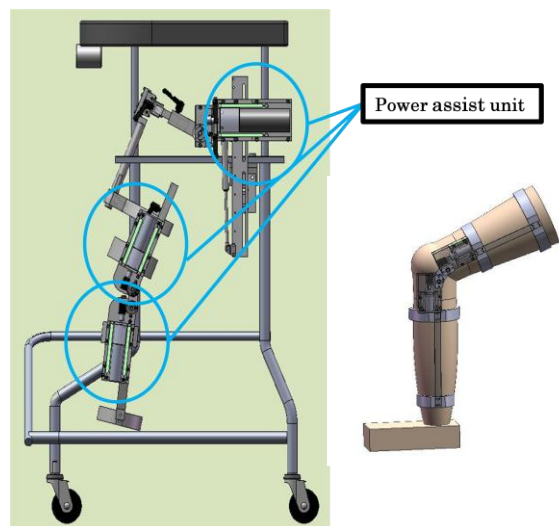


Fig.3 Hip and knee power assist units

本研究では開発した膝関節パワーアシスト装置を応用したものを股関節に用いる (Fig.3~5). このパワーアシスト装置は人の動作意図の取得に歪ゲージを使用しており、ウォームギアの特徴であるセルフロックを利用してウォームの軸方向の力を、既に開発した歪拡大メカニズムを用いて、計測している (Fig.6). 物理的な力を計測しているため、個人差の影響が少ないといったメリットがある. また、軸とウォームギアの固定をキーではなくキーレスブッシングを用いることで、バックラッシュの低減が望め、センサ情報の精度向上が見込める.

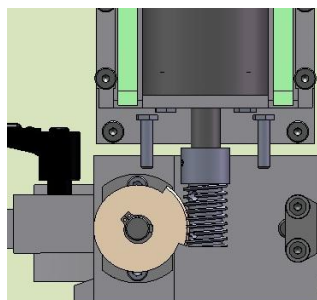


Fig.4 Hip joint power assist unit

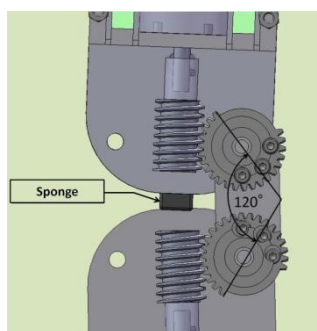
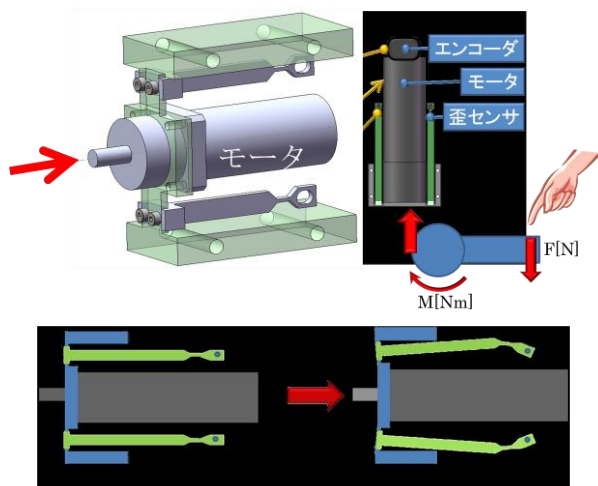


Fig.5 Knee joint power assist unit



(a) Before deforming (b) After deforming

Fig.6 High sensibility force sensing

膝関節は、股関節と違い滑り運動と同時に転がり運動も起こっており、単純な一軸回転運動ではないということが分かる. よって膝関節パワーアシスト装置は瞬間中心の移動軌跡に沿った動きをする機構でなければな

らない. 使用するパワーアシスト装置の動作原理はこれを満たす (Fig.5).

股関節・膝関節パワーアシスト装置 (Fig.2) はセンサに振動などの入力がないよう、従来まで金属製カバーを用いていたが、軽量化及び患者への恐怖感軽減を目的とし、樹脂製カバーを用いた (Fig.7). 実験を行った後、金属製と同等のセンサ値を示したため、採用するに至った.

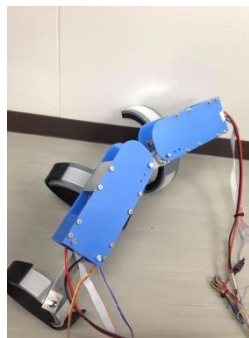


Fig.7 Knee assist unit

4. 3 3自由度股関節運動への順応機構

ヒトの股関節は3つの回転運動自由度を持っており、屈曲・伸展はパワーアシスト装置により股関節中心を通る運動をアシストする. 残りの外転・内転、外旋・内旋の運動は歩行時に必要であり、股関節運動を妨げない機構にしなければならない. そこで、3自由度股関節運動への順応機構を考案した (Fig.8). 外転・内転運動は股関節中心を通る回転機構を設けることで、外転・内転運動に順応できる. 外旋・内旋運動はリアスライダの直線運動と回転機構の回転運動の合成で股関節を通る外旋・内旋運動を実現できる.

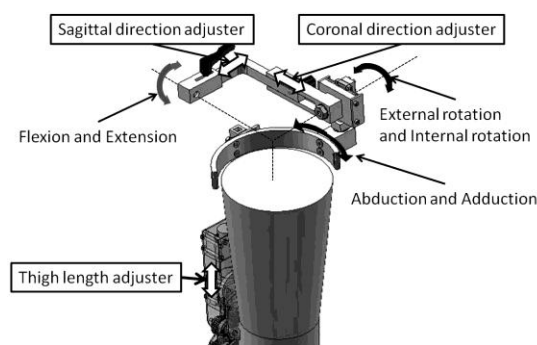


Fig.8 3 DOF rotation mechanism for hip joint and joint position adjuster

4. 4 股関節・膝関節への位置調整機構

股関節パワーアシスト装置の回転軸と股関節の屈曲・伸展軸が、ヒトの足の太さが変わっても一致することができるようにするために、装着ユニットを前後・左右方向に調節することができる機構とした (Fig.8). 更に、大腿の長さの個人差に対応できるように、膝関節パワーアシスト装置を上下に調節可能な機構にすることで膝関節パワーアシスト装置を最適な位置にすることができる.

4. 5 患足側横転倒防止機構

片麻痺患者の多くは、体幹のバランスを取るために何らかの支えが必要である。本研究では歩行補助機を用いるが、麻痺の段階によっては歩行補助機だけでは姿勢を崩し、転倒してしまう恐れがある。そこで、使用者の安全を確保するために、麻痺側の上半身を何らかの方法で支える必要がある。傾きを横から押さえる方法とすると、横から支えられないため、横方向に移動または転倒してしまうため非常に危険である。よって、横移動を発生させないためには常に重心を体の中心に置くことが重要であると考え。そこで肩を下から支えることを考案し、これにより床反力から回転モーメントを生成し、横移動と転倒を防止することで、使用者は体勢を崩すことなく訓練を円滑に遂行できる。

提案した機構の全体図と試作機を Fig.9 に示す。訓練評価方法、パワーアシスト基本性能実験と検証実験の結果、電気刺激機能と物理刺激機能等に関する記述を後日発表する。

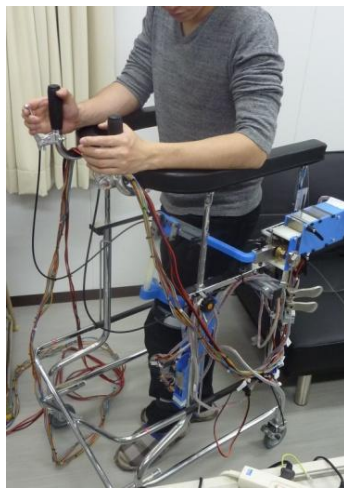
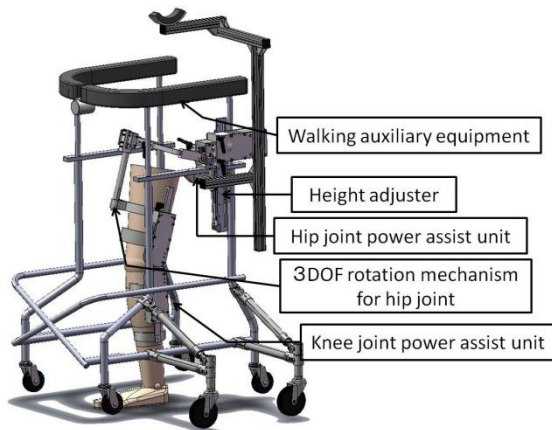


Fig.9 Overall view of the proposed device

4. 6 制御方法

本システムの制御には、PID 制御と仮想コンプライアンス制御を用いる。この仮想コンプライアンス制御とは、外力の作用した方向に逃げるような動作をする制御法で、計測された力に対し仮想的に設定した慣性、粘性、

弾性を満たすような速度を生成するものである。ここで、人の動きは当然ながら無数に存在し、さらに一人一人操作する対象部分の慣性パラメータや関節の粘性、弾性などの運動特性がバラバラである。そこで、この制御理論を用いることによってこれらを事前に把握することなく、取得した力から必要となるアシスト動作を生成できるような制御が可能となる。

本システムの膝関節ユニットと股関節ユニットで用いる仮想コンプライアンス制御の基礎式を示す。

$$w_{n+1} = w_n + \Delta w_n$$

$$\Delta w_n = (\tau_n - Cw_n - K\theta_n) \Delta t / I$$

これは、連続時間 t を離散時間 n に変換したもので、 $n = t/\Delta t$ となる。さらに、 w_n は時刻 n の時の足装着リンク角速度、 Δt はサンプリングタイム、 I は仮想慣性モーメント、 C は仮想粘性係数、 K は仮想弾性係数、 τ_n は時刻 n の時の膝関節の回転トルクとなる。これらの式より、回転トルク τ_n に対して、任意の仮想係数を満足する目標角速度 w_{n+1} を決定することができる。

本システムでは、膝関節あるいは股関節の回転トルク前述した高感度力覚センサによって取得できるので、膝あるいは股の動きの情報をもとに装置を動作させることができる。このようにして生成した目標角速度に対して、PID 制御を用いて各足装着リンクを膝関節または股関節にパワーアシストさせる (Fig.10)。

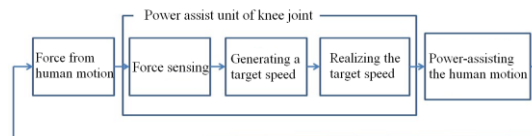


Fig.10 Principle of power assisting operation

4. 7 まとめ

本研究では、片麻痺股関節・膝関節を能動的にアシストしかつ促進的電気刺激を加えた片麻痺歩行機能回復訓練装置を開発した。まず、力学情報から動作意図を取得できる股関節・膝関節をパワーアシストする機構、次に人体の関節の運動を踏まえた股関節・膝関節運動への順応機構、さらに個人の体形に対応でき、一人で使え、横転倒防止機能を有する機構を考案した。その上、装置全体の機構原理を提案し、装置の設計、試作及び動作実験を行いその有効性を確認できた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

① [Yong Yu](#), [Tatsuya Tooyama](#), [Ryota Hayashi](#), [Megumi Shimodozono](#), [Kazumi Kawahira](#), Research of Wearable Walk Rehabilitation Device for Hemiplegic Legs with Facilitative Vibration Stimulus and Power Assistance, Proc. of 2014 IEEE International Conference on

Robotics and Biomimetics, 査読有, 2014, pp. 819-824 <T. J. Tarn Best Paper in Robotics Award 受賞>

②Yong Yu, Wenyuan Liang, Manipulability Inclusive Principle for Hip Joint Assistive Mechanism Design Optimization, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 査読有, Vol.70, No.5, 2014, pp. 929-945, DOI: 10.1007/s00170-013-5323-0

③余永, 岩下説志, 川平和美, 林良太, 伸張反射による指伸展促通機能を有する片麻痺指機能回復訓練装置の開発, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.48, No.7, 2012, pp.413-422

[学会発表] (計 8件)

①余永, 遠山達也, 林良太, 下堂蘭恵, 川平和美, 促進的多種刺激・筋力補助機能を有する下肢装具装着型片麻痺歩行訓練装置の開発, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会, 2014年 9月 5日, 福岡

②余永, 遠山達也, 林良太, 下堂蘭恵, 川平和美, 促進的電気刺激・筋力補助を用いた下肢装具装着型片麻痺歩行訓練装置の研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 2014年 5月 28日, 富山

③松田純, 余永, 仲西洋介, 林良太, ヒトと装置間の力情報交換による装着型パワーアシストの効果的制御に関する研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 2014年 5月 27日, 富山

④遠山達也, 余永, 林良太, 下堂蘭恵, 川平和美, 促進的電気刺激・筋力補助を用いた下肢装具装着型片麻痺歩行訓練装置機構の提案, 日本機械学会九州支部鹿児島講演会, 2013年 9月 28日, 鹿児島

⑤余永, 仲西洋介, 川平和美, 下堂蘭恵, 林良太, 片麻痺前腕機能回復訓練装置における伸張反射を促す効果的な訓練の実現, 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2012年 12月 20日, 福岡

⑥余永, 前田克也, 川平和美, 下堂蘭恵, 林良太, 片麻痺指リハビリ装置を用いた促通反復療法におけるタッピング刺激及び電気刺激・振動刺激の訓練効果評価, 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2012年 12月 20日, 福岡

⑦余永, 前田克也, 川平和美, 林良太, 麻痺指リハビリ装置における効果的な伸張反射を促す方法とその評価, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 2012年 5月 28日, 浜松

⑧余永, 松田純, 吉松春樹, 林良太, シンプルかつ高感度な Sensor-Motor Mechanism による膝関節パワーアシストの実現, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 2011年 9月 7日, 東京

[産業財産権]

○出願状況 (計 3件)

①名称: 片麻痺患者用歩行訓練装置
発明者: 余永, 遠山達也, 川平和美, 下堂蘭恵
権利者: 国立大学法人鹿児島大学
種類: 特許
番号: 特願 2013-200858
出願年月日: 25年 9月 27日
国内外の別: 国内

②名称: 片麻痺運動機能回復訓練装置を用いた訓練効果評価方法, および訓練効果評価演算装置, ならびにプログラム
発明者: 余永, 川平和美, 前田克也, 仲西洋介, 下堂蘭恵
権利者: 国立大学法人鹿児島大学
種類: 特許
番号: 特願 2013-126836
出願年月日: 25年 6月 17日
国内外の別: 国内

③名称: 膝関節パワーアシスト装置
発明者: 余永, 吉松春樹
権利者: 国立大学法人鹿児島大学
種類: 特許
番号: PCT/JP2011/061393 (特願 2012-515903)
出願年月日: 23年 5月 18日 (25年 4月 2日)
国内外の別: 外国 (国内)

○取得状況 (計 1件)

①名称: 膝関節パワーアシスト装置
発明者: 余永, 吉松春樹
権利者: 国立大学法人鹿児島大学
種類: 特許
番号: 特願 2012-515903
取得年月日: 27年 3月 18日特許査定
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

余 永 (YU, Yong)
鹿児島大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 20284903

(2) 研究分担者

川平 和美 (KAWAHIRA, Kazumi)
鹿児島大学・大学院医歯学総合研究科・
客員研究員
研究者番号: 20117493

下堂 蘭 恵 (SHIMODOZONO, Megumi)
鹿児島大学・大学院医歯学総合研究科・
准教授
研究者番号: 30325782

林 良太 (HAYASHI, Ryota)
鹿児島大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 40288949