

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21700579

研究課題名(和文) 受動要素で構成される安全な下肢ウェアラブルリハビリシステムの開発

研究課題名(英文) Development of wearable lower limb rehabilitation system composed of passive elements

研究代表者

中山 学之 (NAKAYAMA TAKAYUKI)

名古屋工業大学・工学研究科・特任研究員

研究者番号：80332344

研究成果の概要(和文)：

本研究では、高齢者や脊髄損傷患者等の脚に重度の運動疾患を抱える患者が、可能な限り自分の力で日常生活を送ることができるように補助する、受動要素のみから構成される下肢リハビリ支援システムの開発を行った。まず、バネの復元力のみを用いて任意の姿勢で患者の体重を支えることのできる下肢装着型自重補償装置の開発と腰部に目標のステイプネス特性を生成することで立位姿勢を安定化する立位姿勢補助装置の開発を行い、さらに弾性体にゴムを用いた軽量・薄型の自重補償機構を開発することで、自重補償付き歩行支援装置の開発および小さな力で任意に座高を調整することが可能な自重補償機構付き車椅子の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：

In this study, to establish the rehabilitation environment where the patient with heavy disorder on the lower limbs can perform the common activities of daily life by himself without support from the caregiver, we tried to develop some new wearable rehabilitation devices wholly composed of the passive elements such as springs and dampers. At first, we constructed a wearable gravity compensation device which can generate the large assistant forces to compensate the weight of patients in arbitrary posture and a new mechanical system which can generate the desired impedance characteristic around the hip to stabilize the standing posture. In addition, by introducing the rubber based new gravity compensation mechanisms to reduce the size and weight of devices, a walking support system which compensate the weight of patients and the wheel chair which makes the change of the seating height easy by supporting the weight of patients were developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：福祉・介護用ロボット

1. 研究開始当初の背景

社会の高齢化に伴い、脚に障害を抱えている人の数は年々増加している。中でも、膝関節や股関節の変形により自力歩行が不能になる患者は多く、年間数千件を越す人工関節への置換手術が行われている。幸いにして現在では、人工関節の普及と置換術の向上により、これらの患者の多くが手術によって歩行能力を再び回復することが可能になってきているが、彼らが元の生活に復帰できるようになるまでには、それでもなお多くの時間を歩行訓練などのリハビリテーションに費やす必要がある。また、交通事故などにより脊椎を損傷し、下半身の運動能力を失った患者であっても、ある程度の歩行能力を回復することができるが、このような場合にも長期にわたる継続的なリハビリテーションが必要になる。このような状況下において、現代の医療におけるリハビリテーションが占める重要度は年々増しており、リハビリ支援装置のさらなる性能の向上が強く望まれている。

従来から、歩行能力の回復を目的としたリハビリ支援装置として天井吊り上げ式の重力補償装置が開発され、多くの病院で使用されてきた。しかし、これらの装置は構造が大きく、いくつか可動式のタイプも存在するものの、その使用は病院内の特定の領域に限定されるため、患者に大きな精神的苦痛を与えていた。長期にわたるリハビリテーションが必要な患者が、心地よくリハビリトレーニングに専念できるような環境を整えるためには、患者が自立して、ある程度の日常動作であれば介護者の手助けなしに患者自身の力で行うことができるように支援するシステムの開発が必須となる。そのため、これからのリハビリテーションにおいては、患者の下肢に簡単に装着することができ、任意の姿勢で患者の体重全部もしくは一部を補償することのできる、軽量・コンパクトな自重補償機構の開発が強く望まれる。

このようなウェアラブル式の重力補償装置に関しては、これまでにも多くの研究が行われており、たとえば筑波大学で開発されたHALは患者の筋電位を測定し、それに応じて関節に配したモータを駆動することにより、重度の運動疾患を持つ患者に対しても運動の再建を実現することに成功している。

しかし、その反面、これらの装置はいずれも電動モータを駆動源としているため、バッテリーの制限から長期の連続使用を行うことができず、また機械の誤動作により逆に患者を傷つけてしまう危険性がある。機構が複雑なためメンテナンスが困難である、一過性の使用を目的とするリハビリ装置としてはコストが高くつくという問題があり、リハビ

リの装置として実用的なものとは言い難かった。

患者が安心して使用することのできるウェアラブルなリハビリ装置を実現するには、人へ与える危険性が少なく、長時間の継続的な使用が可能で、かつメンテナンスも容易な装置を構築する必要がある。そこで、福祉機器開発の分野では、電力を用いずに、バネやブレーキといった受動素子のみを用いて構成される下肢ウェアラブルリハビリ装置の開発が近年盛んに行われるようになってい

2. 研究の目的

このような状況の下、本研究ではバネ・ブレーキといった受動素子のみを用いて構成される、軽量かつコンパクトなウェアラブル自重補償装置を開発するとともに、長時間のリハビリトレーニングを可能にするための立位姿勢補助装置、在宅での歩行訓練を可能にするための踏み出し動作アシスト付き歩行支援装置の開発、座面を任意に変更することでベッドからの移乗が容易な自重補償機能付き車椅子の開発を行うことで、安全かつ長期継続使用が可能な下肢リハビリシステムを構築することを目指す。

3. 研究の方法

本研究課題では、これらの研究目的を実現するため、①リンク間のワイヤの取り回しを必要とせずに任意の姿勢で自重を正確に補償することのできる軽量・コンパクトなウェアラブル自重補償機構の設計と試作機の製作、②任意の姿勢周りに所望のスティッフネス特性を生成することで長時間のリハビリトレーニングを可能にする立位姿勢補助装置の設計と試作機の製作、③在宅での歩行訓練を可能にするための踏み出し動作アシスト付き歩行支援装置の設計と試作機の製作、④自重補償機構により患者の体重を補償することで、小さい力で座高を任意に変更することを可能にした自重補償機能付き車椅子の設計と試作機の製作を行った。これらの開発においては装置の剛性を十分に保ちながら装置の軽量化を図るため、全部品をCADにより設計を行い、機構解析・構造解析により、想定される最大の荷重をかけた場合にも十分な剛性が維持されるように各部材の寸法・材質の選定を行った。提案手法の有効性を示すため、それぞれ、3～5人の被験者に対して官能評価試験を行い、その結果に基づいて、各種設計パラメータの最適値の導出および改良すべき点の検討を行った。

4. 研究成果

①リンク間のワイヤの取り回しを必要とせず任意の姿勢で自重を正確に補償することができる軽量・コンパクトなウェアラブル自重補償機構の設計と試作機の製作

本開発課題では、図1左上に示すような機構の自由補償機構を開発した。本装置では、姿勢が傾くにしがって、各関節に配置したギヤが回転し、リンクと平行に張られたバネが伸長させられることにより、任意の姿勢において、装置の自重と装置先端に吊した負荷が作る重力モーメントをちょうど打ち消すようなトルクがバネの復元力によって生

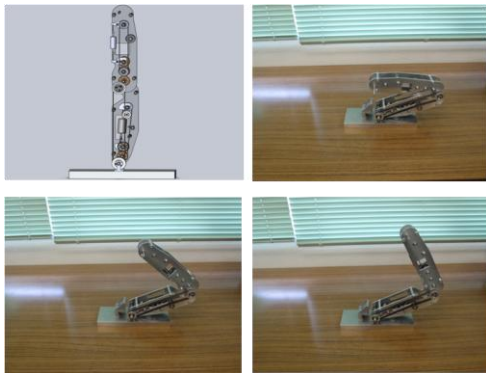


図1：開発した自重補償装置の試作機

成される。図1に、本装置を様々な姿勢に動かしたときの様子を示すが、広い領域で正確に装置の自重が補償され、任意の姿勢でバランスが保たれることが確認される。

本装置ではリンク内にバネを含む可動部をすべて収納することにより、広い可動域での自重補償を可能にするとともに、患者が装着した際に誤って可動部に手を挟むなどの危険性を排した安全な装置が実現されている。また、関節軸周りの加工精度および強度を上げるとともに、肉抜きによる装置の軽量化も行われているため、従来の自重補償機構よりも低摩擦で正確な自重補償を行うことができる。

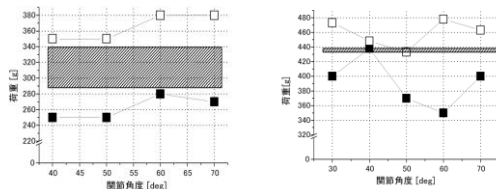


図2：各姿勢で生成される補償力

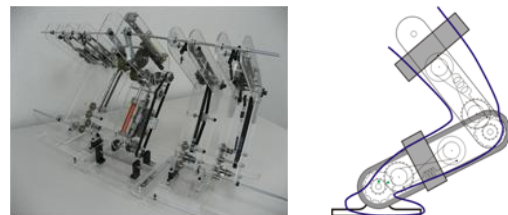
本装置の有効性を検証するため、数十名の被験者による感応評価試験を行った。その結果、いずれの被験者においても、非常に広い領域で低摩擦かつ正確な自重補償が実現されているとの高い評価を得ることができた。

本装置によって生成される補償力を計測した結果について図2に示すが、任意の姿勢で所望の一定補償力が生成されていることが確認される。

②任意の姿勢周りに所望のスティッフネス特性を生成することで長時間のリハビリトレーニングを可能にする立位姿勢補助装置の設計と試作機の製作

本開発課題では、任意の姿勢において腰周りに線形バネ特性を生成することのできる立位姿勢補助装置の開発を行った。これにより患者は仮想的に椅子に座ったような感覚で各種トレーニングを行うことが可能になり、重度の運動疾患を持つ患者であっても安全にリハビリトレーニングを行うことができるようになると期待される。

装置先端に指定する線形スティッフネス特性を、各関節の角度から構成される関節角座標系で記述しなおすと、これはちょうど、①で開発した自重補償装置と同様の構造を持つ5つの装置から生成される補償力の和と等しくなる。そこで、本研究では、図3に示すような自重補償装置と同形の5つのバネ機構を並列に組み合わせた形式の機構により、立位姿勢補助装置を構築した。



a) 下肢リハビリ支援装置 b) 装着イメージ

図3：下肢リハビリ支援装置

本装置では、関節に配置したクラッチを開いた状態で目標作業姿勢まで姿勢を変化させ、そこでクラッチを接続することにより、目標作業姿勢周りに目標のスティッフネス特性を生成することができる。

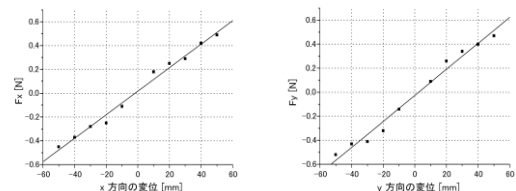


図4：生成されたスティッフネス特性

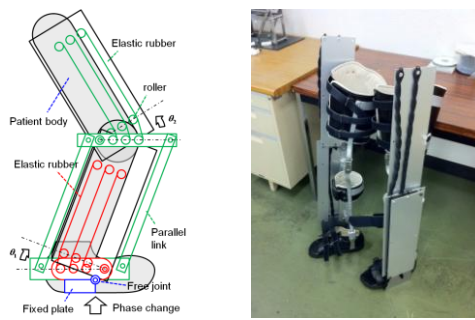
等方的な目標スティッフネス10[N/m]が腰周りに呈示されるようにバネ定数を設定し、膝を90度曲げて屈伸姿勢をとった場合、腰部を変位させたときに変位方向に生じる復元力を計測した結果を図4に示す。これよ

り、本提案機構により、実際に装置先端（腰部）周りに等方の線形スティッフネスが生成され、x方向、y方向ともに、9.87[N/m]、10.83[N/m]と目標値に近いスティッフネス特性が呈示されることが確認される。

③在宅での歩行訓練を可能にするための踏み出し動作アシスト付き歩行支援装置の設計と試作機の製作

本研究課題では、介護士の介助なしに患者に装着して使用することのできる歩行補助装置の開発を目指して、ゴム弾性体を用いた自重補償装置の開発を行った。

ウェアラブルな自重補償装置においては、装置が軽量かつコンパクトであることが最重要課題になる。そこで、本課題では、精度と剛性を犠牲にして、大幅に機構の簡素化を図った新しい自重補償機構を構築した。



(a) 概念図 (b) 製作した 試作機

図 5: ウェアラブル歩行アシスト装置

図 5 に開発した装置の概念図と写真を示す。本装置では、足底の角度をかかと関節・膝関節に伝達するように閉リンク系が構成され、その上面と各リンク間に補償力生成用のゴム弾性体が張られている。このように装置を構成することにより、図 4 (a) に示すように、各リンクが θ_i 傾いたときに各リンクに配置したバネは $\sin(\theta_i)$ に比例して伸張することになり、その結果、任意の姿勢においてちょうど自重による重力を補償するように復元力が生成されることになる。

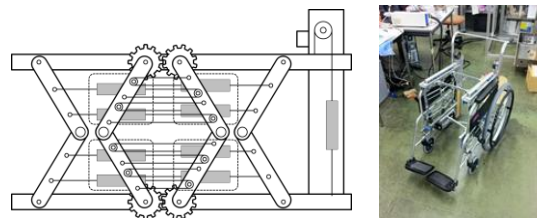
ただし、無負荷状態において自重補償機構は直立姿勢を取るような補償力を発生するため、歩行中の浮遊期においては、下肢を伸展させ、患者の転倒を誘発するように働いてしまうという問題がある。この問題に対して本装置では、図 4(a) に示すように、自重補償機構の下部にフリージョイントが設置されており、これにより、患者の重心がこのフリージョイントよりも後方（かかと側）にある場合には、自重補償機構底面が床と平行に拘束され、自重補償力が生成されるが、重心がこれより前方にあるか、浮遊期にある場合には自重補償機構の底部が自由に回転し、補償

力が発生しないように設計されていることに注意する。本装置の有効性を確認するため、5名の被検者による官能試験を行い、いずれの被検者においても、

- ・装置を装着することで体重の一部が軽減され、楽に屈伸エクササイズを行うことが可能になる
 - ・装置を装着することで楽に歩行ができるようになる
 - ・踏み出し動作を安全に行えるようになる
- との評価を得ることができた。

④座面を任意に変更することでベッドからの移乗が容易な自重補償機能付き車椅子の設計と試作機の製作

本研究課題では患者が自分自身の力でベッドから車椅子、車椅子からトイレ・バスへの移乗を行うことを可能にする座高可調整車椅子の開発を行った。介護の現場では、ちょっとした移動でも介護者に介助を依頼し



a) 薄型自重補償機構 b) 座高可調整車椅子

図 6: 自重補償機構付き座高可調整車椅子

なければならぬことで患者にかかる精神的な負担をいかに軽減するかが課題になっている。そこで、介護を受ける患者の自立および QOL の向上を目指して、図 6(b) のような自重補償機能付きの車椅子の開発を行った。本装置では車椅子の両側に鉛直方向の自重補償を行う機構が 2 組内蔵されており、これにより、患者の体重がほぼ正確に補償されるので患者は自分の力だけで自由に車椅子の座高を調節し、ベッドやトイレに移乗することができる。車椅子は折り畳めることが望まれるため、新たに追加される自重補償機構にはきわめて薄く構成されることが必要となる。そこで、本研究では図 6 (a) のように縦方向と横方向の 2 組のゴム群により自重補償を行う機構を新たに開発した。本機構ではゴム素材を縦に並べることにより、空間的な無駄を極限まで減らすことが可能であるため、きわめて薄型であるにも関わらず、大きな補償力を生成することができる。図 6(b) の試作機では変形量の大きい部分にシリコンゴム、変形量の少ない部分にフッ素ゴム、鉛直方向に配置する弾性体にアメゴムを用い、合計 26 本のゴムによって 70kg の自重補償を実現している。本車椅子では、自重補償機構により常に一定の力で下から患者を押

し上げる力が生成されるので、患者が椅子から起立したいときには、上体を少し前方に傾けて、重心を前方に移動するだけで容易に立ち上がることが可能になる。これにより、本車椅子は起立補償装置としての機能も同時に併せ持つことになる。

本装置の有用性は5名の被検者による官能評価試験により行った。試験では、座高の変更および移乗、起き上がり動作が楽になるとの評価を得ることができたが、一方で、乗り心地・操作性を向上するには座面の形状および材質を改善する必要がある、ある程度の座高で押し上げ力が減少するようにした方が安全に感じる、移乗の際の安全を確保するため、任意の位置でストッパーがかけられる機構を追加すべきである等の問題点も指摘された。これらの問題の解決が今後の課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

①中山学之, 荒木洋輔, 杉本幸夫, 藤本英雄, 腱機構を用いた機械式下肢パワーアシスト装置, バイオメカニズム 20, 査読有, 20 巻, 2010, pp. 111-122

②中山学之, 脳の運動制御系のモデル化とそのロボット制御への応用, システム/制御/情報, 53 巻 12 号, 査読有, 2009, pp. 518-523

〔学会発表〕(計6件)

①荒木洋輔, 中山学之, 藤本英雄, エンジン搬送型自重補償装置の開発, Proceedings of the 2010 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 査読無, 1A2-A22, 2010 年 6 月 13 日, 旭川

②荒木洋輔, 中山学之, 藤本英雄, 広い領域で自重補償を実現可能な自重補償装置の開発', 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 査読無, 3J3-4, 2010 年 9 月 22 日, 名古屋

③中山学之, 荒木洋輔, 藤本英雄, 大きな重量を補償可能な機械式自重補償装置の開発, 第 11 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予稿集, 査読無 2K2-3, 2010 年 12 月 23 日, 仙台

④杉本幸夫, 荒木洋輔, 中山学之, 藤本英雄, 大域的な重力補償と剛性制御を同時に実現することのできる受動腱機構, Proceedings of the 53rd Annual Conference of the Institute of System Control and Information Engineers, 査読無, pp. 97-98, 2009 年 5 月 20 日, 大阪

⑤中山学之, 荒木洋輔, 杉本幸夫, 藤本英雄, 腱機構を用いた機械式下肢パワーアシスト装置, 第 21 回バイオメカニズムシンポジウム前刷り, 査読有, pp. 415-422, 2009 年 8 月 4 日,

箱根

⑥Takayuki Nakayama, Yousuke Araki and Hideo Fujimoto, A New Gravity Compensation Mechanism for Lower Limb Rehabilitation, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 査読有, pp. 943-948, 2009 年 8 月 10 日, 長春

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 機械式自重補償装置
発明者: 藤本英雄, 中山学之
権利者:
種類: 特願
番号: 2011-002376
出願年月日: 2011 年 1 月 7 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://fujimoto.mech.nitech.ac.jp/fujimoto/jap/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中山学之 (NAKAYAMA TAKAYUKI)
名古屋工業大学・工学研究科・特任研究員
研究者番号: 80332344

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし