

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24650381

研究課題名(和文)高親和運動支援技術による身体装着型免荷装置

研究課題名(英文)Wearable unloading device based on motion support technology

研究代表者

長谷川 泰久(Hasegawa, Yasuhisa)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：70303675

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：腰部支援効果検証実験より、腰部を持ち上げるように体重の30%相当の支援をすることによって心拍数を11%減少させることを明らかにした。次に、装置重量影響検証実験より、体重の30%相当の支援をする外骨格型走行支援装置の支援効果がほとんど相殺されないためには装置重量を3.4kg以下に抑える必要があることを明らかにした。さらに、長さが可変の杖のような構造を持ち、ロックすることでその長さを短縮させない、あるいはアンロックすることで自由に伸縮させることが出来る支持脚支援機構を提案した。ホッピング実験にて6km/hでの走行における重心の振動数である2.2Hzにて16%の心拍数の減少を確認した。

研究成果の概要(英文)：We conducted two experiments to investigate the relationship between the assist force and heart rate and between mass of the exoskeleton and heart rate. From the results of these experiments, we set design objectives and develop the running assist exoskeleton which is called as PEXER V. PEXER V assists upper body mass through waist belt and strap over the crotch. The mass is 2.8[kg] that is light weight enough to reduce 11[%] in heart rate during 6[km/h] running. PEXER V adapts a mechanism assisting a stance leg. The mechanism locks itself in the stance phase and transmits the assist force from the leaf spring to wearer's body. The mechanism unlocks and allows PEXER V to follow the leg motion in the swing phase. The mechanism is controlled based on the estimation of the running-phase. Through the hopping experiment as evaluation of PEXER V in the stance phase, we confirm that PEXER V decreased 16[%] in heart rate during 2.2[Hz] hopping.

研究分野：ロボット工学

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学，スポーツ科学

キーワード：走行支援 受動機構

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は、人の運動を適切かつ効果的に支援する高親和運動支援技術を開拓し、従来では支援が困難であった走行等の動的な動作に対して運動量の軽減を目的とする。運動を支援するには、人の持つ関節自由度を拘束することなく人の優れた様々な能力に基づく運動制御・調節を受け入れることが可能な高い親和性を担保しつつ、負担の高い筋肉の活動量を低減する必要がある。つまり、障害者の補助装具のような自ら制御できない運動自由度を拘束するのではなく、あたかも支援装置を身に付けていないように支援装置は高度に身体と一体化する必要がある。これにより、装着者は自由に運動を行うことができ、また、自分の筋力が向上したように感じることができる。そこで、支援装置の駆動機構、身体への装着部位および装着方法、質量分布などを考慮し身体と高い親和性を実現する技術を研究する。また、その応用例として、体重の一部を地面から直接支持し、脚部にかかる体重を軽減する身体装着型免荷装置を実現する。

## 2. 研究の目的

速度の点で歩行よりも優れる走行を移動手段としてより有力なものにするため、走行中の身体負荷の軽減を目指し、外骨格型走行支援装置の開発を行う。走行支援装置の必要条件は、次の3つであるが、

- 1) 身体負荷の軽減に十分な支援力を伝達すること、
  - 2) 身体に装着するため、軽量の装置であること、
  - 3) 立脚期において着地から遅れることなく支援力を伝達する一方で遊脚動作を妨げないこと
- これら全ての条件を満たし支援効果を発揮する外骨格型走行支援装置はなく、1)及び2)に関する定量的な設計目標が存在しなかった。

本研究では、腰部を持ち上げる支援を行った際の支援力と支援効果の関係、装置重量と支援効果の関係を明らかにすると共に、立脚期において遅れなく支援力を伝達し一方で遊脚期での遊脚動作を妨げない支持脚支援機構を有する外骨格型走行支援装置 PEXER V の開発を目的とした。

## 3. 研究の方法

定量的な設計目標を決定するために、まず腰部支援効果検証実験を行い、支援力と支援効果の関係を明らかにする。

次に、今回の走行のような動的運動では問題となる、装置重量と支援効果の関係を実験によって調べる。

その後、これまでの実験によって得られた支援力と支援効果の関係、装置重量と支援効果の関係をを用いて、心拍数を 10[%]軽減するための設計目標は決定し、設計・製作する。最後に、製作した走行支援装置の性能評価を、走行動作にて心拍低減を確認する。

## 4. 研究成果

### (1) 支援力と支援効果の関係評価実験

#### 実験手順

人の身体は剛体ではないため支援力の逃げを無くすことは出来ず、支援力の逃げの影響を直接評価することが難しい。そこで、走行支援装置が腰部を持ち上げるように支援すると想定した上で、この実験では免荷装置を用いて腰部を持ち上げる支援を行った際における支援力と支援効果の関係を調べる。これにより支援力の逃げを考慮することなく、実際に開発した走行支援装置が腰部を持ち上げるように支援を行う場合では支援効果の予測が可能になる。

健康な成人男性(23歳, 体重 56[kg], 身長 172[cm])1名の被験者が、免荷装置(BDX-UWSZ: Sakaimed., Japan)によって体重を免荷されながら 6[km/h]でトレッドミル上を 310[sec]走行し、心拍数を 5[sec]毎に記録する。

被験者の腰周りと股下にハーネスが巻かれ、腰部を持ち上げるように体重免荷が行われる。心拍数の計測には胸部に巻かれるベルトと腕時計からなる心拍計(RS800CX: Polar Electro., Finland)を用いる。

体重に対する免荷量は 0, 18, 30, 36, 61, 71[%]のいずれかが直立状態で設定される。各試行開始時の心拍数をほぼ同じにするため、終了時に休憩

を 30[ $\text{min}$ ]以上設ける．疲労による影響を減らすため、計測は連続しない 4 日間に渡って行われる．心拍数は走行開始から 1 分程度で急激に上昇し、その後は僅かに上昇していく傾向となるため、120-300[ $\text{sec}$ ]間の平均心拍数を評価に用いる．

#### 実験結果と考察

各免荷量で計測された心拍数の変化の平均を求めプロットしたものを図 1 に示す．このデータより、走行支援装置が腰部を持ち上げるように体重の 30[%](17[kg])に相当する支援を行った場合、通常走行時に比べ心拍数を最大 11[%]減少させると予測される．

通常走行時に比べ、心拍数が 10[%]減少すると、主観的に運動強度の減少を十分感じることが出来る．そのため、開発する走行支援装置の目標支援力を体重 30[%]相当の支援とする．

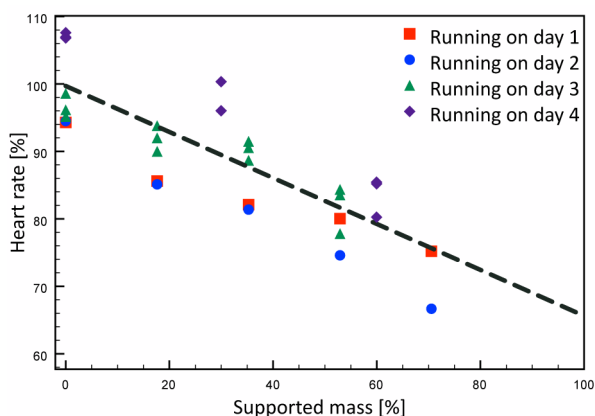


図 1 免荷量と心拍数変化の関係

### (2) 装置重量と支援効果の関係評価実験

#### 実験手順

腰部支援効果検証実験と同一成人男性 1 名の被験者が脚に重りを取り付け、免荷装置によって体重を免荷されながら 6[km/h]でトレッドミル上を 310[ $\text{sec}$ ]走行する．そのときの心拍数を 5[ $\text{sec}$ ]毎に記録する．開発する外骨格型走行支援装置の支援力目標を 30[%]免荷相当とした．そのため、設定される免荷量(Supported mass)は 30[%]と比較のための 0[%]である．左右の大腿と下腿の計 4 力所に同じ重さの重りを取り付ける．脚に付加される重りの質量の合計(Additional mass)は 5 通りと

する．各試行開始時の心拍数をほぼ同じにするため、終了時に休憩を 30[ $\text{min}$ ]以上設ける．評価には腰部支援効果検証実験と同様に、120-300[ $\text{sec}$ ]間の平均心拍数を用いる．

#### 実験結果と考察

各条件で計測された心拍数の平均を求めプロットしたものを図 2 に示す．ただし、図中の水平な一点鎖線は免荷量 0[%]、脚に付加される重りの質量 0[kg]の通常走行時の平均心拍数であり、これを 100[%]とした．図 2 より、免荷量が一定であった場合、脚に付加される重りの質量の増加に従って、二次関数的に心拍数が上昇することが確認出来る．最小自乗法より求めた近似曲線から、この被験者における免荷量が 30[%]の時の脚に付加される重りと心拍数の関係を求め、走行支援装置が免荷量 30[%] (17[kg])に相当する支援を行う場合、8.7[kg](免荷量の 51[%])の装置重量で支援効果が相殺されてしまうことが予測される．

また、3.4[kg](免荷量の 20[%])以下であれば心拍数に大きく影響せず、心拍数を通常走行時に比べ 10[%]程度減少させることが出来ると予測される．

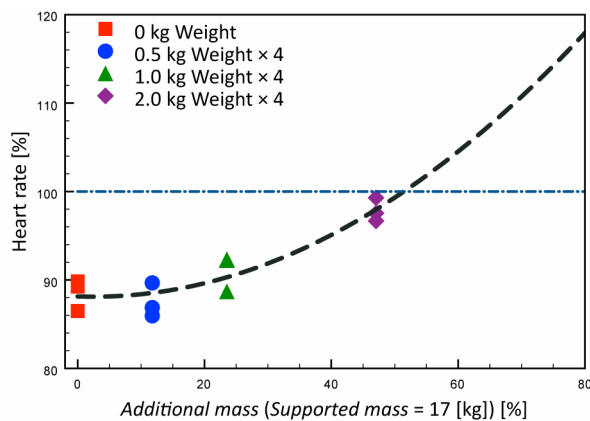


図 2 装置重量と支援効果の関係

### (3) 外骨格型走行支援装置の設計

腰部を持ち上げる支援と装置重量を考慮し、心拍数を 10[%]軽減するための設計目標は次のようになる． 1) 腰部を持ち上げる支援を行う． 2) バネを用いて、体重 30[%]免荷と同等の支援力を立脚期に発生． 3) 立脚期での支持力の伝達と遊脚動作の許可を切り替える支持脚支援機構． 4) 装

置重量を 3.4[kg]以下に抑える。

この設計目標に基づき、走行支援装置 PEXER V を設計する。図 3 に示すように、PEXER V は支援力を発生させる板バネ、伸縮を切り替えることが可能な支持脚支援機構とそのコントロールボックスから構成される。また、板バネには糸が張られ、初期反力を増加させることが可能になっている。PEXER V は腰部パーツを介してズボンに直接固定され、腰の屈曲伸張方向に 1 自由度、支持脚支援機構部は伸縮方向に 1 自由度、板バネ下部の靴との接続部に矢状面方向の回転 1 自由度、支持脚支援機構と板バネとの接続部に冠状面方向の回転 1 自由度を持ち、合計 4 自由度である。そのため、股関節、膝関節、足関節の矢状面での動き及び股関節の内旋、外旋を阻害しない。

板バネから支持脚支援機構を介して伝達される支援力を可能な限り逃がさず装着者に伝達するために、腰部でズボンのベルトを締め、腰部パーツに取り付けられたベルトを股下に通す。このようにすることで、免荷装置のハーネスを介した支援と同様の腰部を持ち上げるような支援が PEXER V でも可能となる。

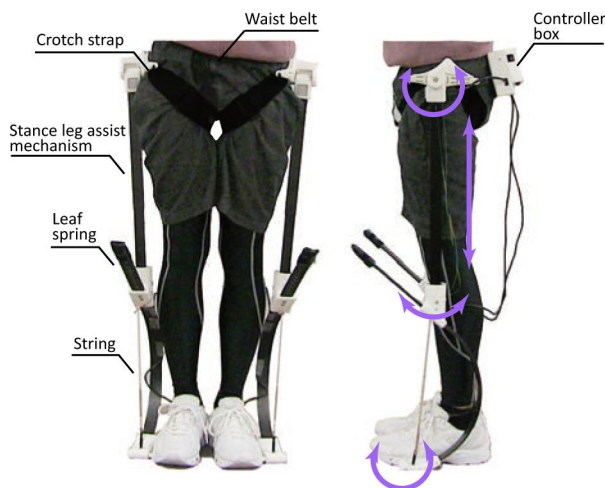


図 3 走行支援装置 PEXER V

#### (4) ホッピング実験

##### 実験方法

これまでの実験と同一の被験者 1 名が、PEXER V を着ていない場合 (Normal) と着た場合 (With PEXER V) で 310[sec]間ホッピングを行う。そのと

きの心拍数を 5 秒毎に記録する。PEXER V の支持脚支援機構は常にロック状態とし、ホッピング中の体の沈み込みに合わせて板バネが縮み、支援力を発生する。ホッピングの目標振動数は 2.0, 2.2, 2.4, 2.6[Hz]とし、低い振動数から順に、PEXER V を着ない状態での試行、PEXER V を着た状態での試行を 1 度ずつ行う。各試行開始時の心拍数をほぼ同じにするため、終了時に休憩を 30[min]以上設ける。

心拍数はホッピング開始から 60[sec]程度で急激に上昇し、その後計測終了まで僅かな上昇が続いていく。そのため、心拍数は 120-300[sec]間の平均値で評価する。

##### 実験結果と考察

支持脚支援機構はクランプの食い込みによってアンロックしないことがあるという問題が解決できなかった為、支持脚支援機構をロックした状態で行えるホッピング実験にて PEXER V による支援の評価を行った。図 4 に示すように、PEXER V を装着することによって、2.0, 2.2, 2.4, 2.6[Hz]の目標振動数に対して、それぞれ 10, 16, 12, 7.5[%]の心拍数の低下が見られた。人の重心の振動数が 2.2[Hz]程度である 6[km/h]の走行において、通常走行に対して 11[%]の心拍数の軽減が可能であると予測していた。この予測に対し、ホッピング実験で目標振動数を 2.2[Hz]として PEXER V を装着してホッピングした際には、通常ホッピングに対して 16[%]の心拍数の軽減が行われた。ホッピングの方が支援効果が大きかった要因は、走行と異なり、ホッピングには遊脚動作が存在しないことであると考えられる。遊脚動作でエネルギーを消費することがないため、重心が同じ振動数で上下動するとしても走行より消費エネルギーが少ない。そのため、PEXER V が立脚中に同じ量の支援をした時、ホッピングの方が通常時よりも心拍数の減少割合が大きくなる。

Teunissen らの研究によると、走行全体の消費エネルギーを 10 としたとき、立脚動作と遊脚動作の仕事量の比はそれぞれ 7.4:2.6 となる。PEXER V によって 11[%]の消費エネルギーを減らすため、

消費エネルギーは 8.9 となる。一方、ホッピング動作全体の消費エネルギーは 7.4 であり、そこから 1.1 を減らすと 6.3 となる。このときのホッピングでの消費エネルギーの減少割合は 15[%]であり、ホッピング実験における心拍数の減少割合にほぼ一致する。

したがって、PEXER V は立脚期において体重 30[%] 免荷相当の支援を行えると考えられる。

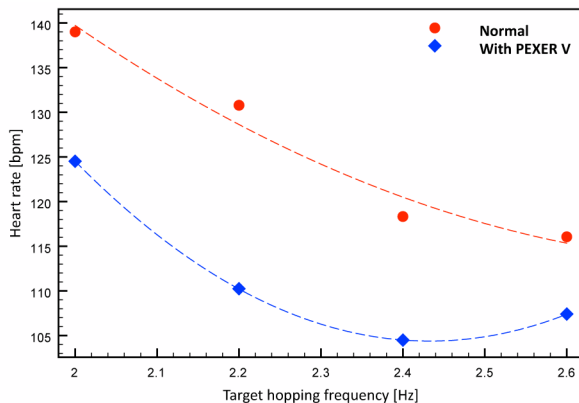


図4 走行支援装置 PEXER V

## 5. 主な発表論文等

[学会発表](計1件)

Yasuhisa Hasegawa and Keiichi Ogura, First Report on Passive Exoskeleton for Easy Running: PEXER IV, IEEE International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, pp.333-338, 2013, Nov.12, Nagoya, Japan

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 泰久 (Hasegawa Yasuhisa)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：70303675