

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 4 日現在

機関番号：54601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500669

研究課題名(和文) 組込み技術を活用した革新的歩行訓練システムの開発

研究課題名(英文) Development of the Innovative Walking Training System using Embedded Technology

## 研究代表者

早川 恭弘 (Hayakawa, Yasuhiro)

奈良工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：50180956

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、リハビリによる安定した歩行を実現する為に、スポンジとシリコンで構成され、空気圧で人間を支えるスポンジコア・ソフトラバーアクチュエータを用いた歩行バランス提示用高性能靴(高機能靴)の改良と歩行計測システムを構築した。本システムは高機能靴部及び視覚提示機能部から構成され、高機能靴部では足裏荷重による歩行状態検出及び中敷部の剛性変化による歩行アシスト、視覚提示機能部ではコンピュータ画面上への視覚的表示を行うことができる。開発した本システムにより、歩行動作における有効性を実験により示した。すなわち、靴の歩行アシスト効果が靴を装着している部位で大きく作用していることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：One of the most popular reasons that fall down of elderly person is a gap of the center of balance due to power down of muscle for aging and outside walking. Most elderly people have outside walking and they tend to leaning their posture outside. That is also factor of fall down. So we began to product new rehabilitation system that treated a gap of the center of the balance. We produced High-Performance training shoes that show status of walking balance. Further, we also produced walking assist system of human sole distribution from High-Performance Insole. We can change stiffness of High-Performance Insole corresponded to human sole distribution. So we can correct subject's walking form for rehabilitation. We evaluated pressure distribution during walking by using newly produced High-Performance Training Shoes. Further, we compared two distribution patterns between normal and corrective pattern. After comparison, we clarify that the assist system reforms subject's posture inside.

研究分野：油空圧制御工学

キーワード：福祉用具 支援機器 歩行訓練 靴 空気圧 筋電位 中敷き HMD

## 1. 研究開始当初の背景

近年、日本では高齢者の増加と若年層の減少による少子高齢化が問題となっている。日本の将来推計人口割合図によると、おおよそ50年後の2060年には、総人口に占める高齢者の割合が、39.9%に達し、国民の約2.5人に1人が65歳以上の高齢者となる社会の到来が推測される。これに伴い、高齢者が高齢者を介護する老老介護を招き、介護士の不足や負担が深刻な問題となりつつある。そのため、高齢者が自身で肉体・精神的健康を保つ「自立化」を目指した働きが、各自治体や団体で推進されている。そこで、高齢者の健康を維持するために、有酸素運動の一種であり、我々の生活に密着した行為である歩行が注目を浴びている。

しかしながら、高齢者の歩行時における転倒事故が数多く報告されている。厚生労働省の調べによると、要介護度別に見た介護が必要となる主な要因では、要支援1、要介護4において、各々第3位となっている。いずれの割合も1割を超えており、今後高齢者の転倒事故率の増加が予測される。

高齢者の歩行時における転倒を防止するためには、下肢部筋力低下を抑え、平衡感覚を維持するトレーニングを継続的に行う必要がある。そのため、介護者がつきっきりで歩行トレーニングに同伴する必要がある。介護士の負担増加や、高齢者の自立化を目指した働きを妨げる恐れがある。

## 2. 研究の目的

長期間入院した高齢患者のリハビリにおいては、歩行バランスに問題が生じることから、転倒しやすくなる。この問題に対し、歩行の実態から歩行の仕方を指導するのが一般的である。そこで、実用的な足部圧力分布測定・バランス提示用靴を開発し、物理的・視覚的提示方法を構築することにより、歩行時の身体バランス及び安定歩行パターンをリアルタイムに提示可能な革新的歩行訓練システムを構築する。そこで、本研究では、下記の項目を目的とする。

- (1) 足部分布圧力センサとゴム要素を内蔵した中敷きに関して、安定歩行を提示するための重心バランスのズレをゴム要素変形により足裏部に提示する中敷き(以下、総合して高機能靴と呼ぶ)を製作する。さらに、測定データを端末にグラフィック表示するための基礎実験として、計測データをSDメモリに保存し、コンピュータ上でグラフィック化する方法を構築する。そして、個人個人の歩行パターンを視覚的に確認できるシステムを開発する。
- (2) 歩行時における測定データを無線で液

晶端末及びハンズフリー装置にグラフィック表示させるために、家庭向けの通信規格のひとつである ZigBee を満たした小型無線モジュールを使用する。そして、足部圧力分布データをリアルタイムにグラフィックで提示することにより、視覚的に歩行バランスの状態(歩行時における重心位置の状態)を判断できるシステムを実現する。また、Bluetooth による通信機能を持つ Arduino を用いて、無線通信により高機能靴に配置した弁の開閉制御を行う。

- (3) 高機能靴によるリアルタイム歩行訓練システムが生体に及ぼす影響を明らかにするため、筋電位及び歩行姿勢を測定する。そして、中敷きの形状変形による足裏への刺激が、生体に与える影響を定量的に調べる。

## 3. 研究の方法

高機能靴における計測・制御回路の小型・軽量化と端末装置とを無線で繋ぐための基礎実験を行う。具体的には、リアルタイムで端末装置の画面に足部バランスを表示するシステム構築の検討を行う。すなわち、高機能靴と足部圧力表示デバイス(タッチパネル液晶端末装置とアイウェアディスプレイ装置)を無線で繋ぐシステムを完成させる。また、端末装置の操作により、高機能靴を制御するためのシステムに関して検討する。さらに、開発した高機能靴を使用した場合の生体への負担を明らかにするため、筋電位及びゴニオメーターによる生体計測を検討する。

これらを検討するために、以下の方法により研究を実施する。

### (1) 圧力分布測定及びバランス調整提示機能を有する高機能靴の製作

バランスのズレを足裏部に提示する部位として使用するゴム要素、小型圧力分布センサ、制御弁及びマイコンを搭載した高機能靴計測制御システムの小型・軽量化を図る。さらに、センサからの信号を汎用SDメモリに格納し、リアルタイムにセンサ信号を記憶する計測システムを構築する。そして、SDメモリカードへ計測データを格納するシステムを構築し、パソコン上で個人個人の歩行パターンを視覚的に確認できる環境を開発する。また、足部筋電位及び関節角度を測定し、歩行リハビリ時に使用する靴が生体に及ぼす影響を明らかにする。

### (2) 中敷き部センサデータをリアルタイムにグラフィックで表示するシステムの構築

歩行時における足部圧力分布の状態をリアルタイムにタッチパネル液晶端末装置に表示させ、理学療法士が歩行時のバ

ランスを確認可能なシステムを構築する。また、端末上に表示された歩行バランス問題部位をタッチパネル操作することにより、高機能靴に配置した弁の開閉制御を行うための基礎実験を行う。

### (3) 中敷き部センサデータをリアルタイムに表示するハンズフリーシステムの製作

歩行訓練において、訓練者自ら自分の歩行を提示装置により確認しながら訓練する場合、安全のため訓練者の両手が自由に使える必要がある。そこで、ハンズフリー型提示システムを試作する。具体的には、高機能靴計測部の測定データを無線により、ビデオアイウェアディスプレイに提示する。ここで、測定データを無線で提示装置に送信する方法として、通信機能を持つ Arduino を使用する。そして、無線により取り込まれた足部圧力分布データをグラフィックで提示するアイウェアディスプレイシステムを開発し、患者自身が視覚的に歩行バランスの状態を判断できるシステムを構築する。

### (4) 高機能靴を用いた歩行訓練時における生体への負担計測

高機能靴によるリアルタイム歩行訓練システムが生体に及ぼす影響を明らかにする。具体的には、開発したシステム使用時における足部関節角度変化（関節角度リアルタイム計測システム装置使用）及び足部筋電位を調べ、生体への負担を明らかにする。また、高機能靴使用時における苦痛の度合を官能試験（履き心地、中敷き動作時の痛みの程度、歩き易さ等）し、苦痛を軽減するための条件（中敷き材質、中敷き変形度合、中敷き剛性（加圧力）、制御パターン、総質量など）を明らかにする。これらの結果を踏まえ、人間に最適な歩行訓練システムを再構築し、病院内及び自宅でリハビリを行うことができるシステム開発を行う。

## 4. 研究成果

本研究では、歩行時に足裏で発生する踏み込み圧を計測し、中敷のゴム要素の剛性を変化させることにより、踏み込み時に体重心位置を補正提示するトルクを発生する中敷きプレート、及びその制御装置の開発を行った。

### (1) 中敷構造

図 1 に、本研究で提案する高機能靴用中敷の構成を示す。中敷部は、スポンジコア・ソフトラバーアクチュエータ（Sponge-Core-Soft Rubber-Actuator 以下 SCSRA とする）を使用する。圧力検知に使用する SCSRA は、いずれも直径 27mm、高さ 15mm であり、図 2 に示すような円形のものを使用する。

本研究では、これらの支持パターンを検出するために、足部後方にあたる踵部、立脚中期における前足部の小指部と拇指球部、前遊脚

期における前足部の親指部における足裏圧力の測定が妥当であると考え、圧力検知用 SCSRA を踵部 (SCSRA 1)、拇指球部 (SCSRA 2)、親指側 (SCSRA 3)、小指側 (SCSRA 4) に配置し、これらに対応させる形で、歩行アシスト用 SCSRA を中敷状に整形したものを高機能中敷とする。各圧力検知用 SCSRA 要素には内圧計測用のセンサ、歩行アシスト用 SCSRA には内圧制御用のスプール弁をそれぞれ配置する。圧力検知用 SCSRA の内圧変化を計測することで歩行状態を検出し、スプール弁制御により歩行アシスト用 SCSRA 内の圧力制御を行う。

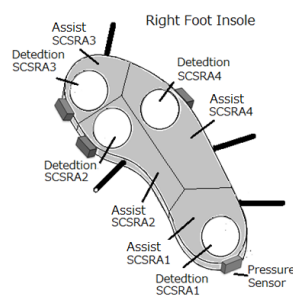


図 1 中敷部構成



図 2 圧力検知用 SCSRA 要素

### (2) 歩行計測システム構成

本研究の現在の段階として、歩行状態を正確に検知する計測機能と、歩行訓練中の事故の発生率を下げるアシスト機能の複合が求められている。そこで圧力センサとスプール弁、SCSRA を用いた装置の製作を行う。また、装置は両手の使用を制限せず、なおかつ自然に近い状態での歩行を実現するために、制御回路の小型化及び、無線化を行う。図 3 に製作した歩行計測靴、図 4 にそのシステム構成を示す。本計測システムは、2つの構成で成り立っている。1つめが足圧測定及び歩行アシストに使用する高機能中敷部、2つめが足圧の測定やデータの処理、歩行のアシスト動作を行う制御回路部である。このような構成のシステムを左右の靴に組み込み、両足の歩行データを計測する。また、XBee と呼ばれる無線モジュールを靴-モニター間の送受信構成を行うために使用している。システムの流れとしては次のとおりである。歩行計測が開始されると XBee によって左右の足圧計測が開始される。圧力センサにより得られた足圧データを計測回路部のマイコンにより処理を行う。各圧力センサの値を A/D 変換し、上位

コントローラであるコンピュータに無線送信を行う。また、提示システムをコンピュータ上に構築し、制御回路部から送信されたデータの保存及び画面上への表示を行っている。一方で、圧力センサから得られた値が閾値を超えると、各歩行アシスト用 SCSRA に設置されているスプール弁が ON になり、マイクロポンプから得られる供給空気圧を SCSRA に送り込む。加圧された各歩行アシスト用 SCSRA はその剛性を変化させ、負荷がかかっている部位の周辺の支持を行う。

図 5 に製作した計測回路を示す。計測回路の大きさは縦 50 mm×横 40 mm×高さ 8 mm とコンパクトであり、歩行計測時に邪魔にならない大きさとなっている。制御マイコンには ATMEL 社の AVR を使用している。また、SCSRA の内圧調節用のスプール弁も接続できるようになっており、マイコンにより制御が可能である。

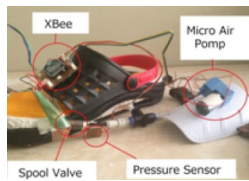


図 3 歩行計測

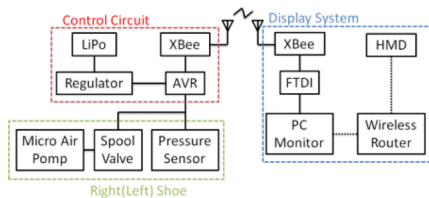


図 4 歩行計測システム

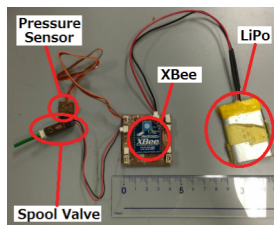


図 5 計測回路

### (3) 視覚提示システム

視覚的な提示機能を実現するために、Java 言語をベースとしたオブジェクト指向のプログラミング言語である Processing を用いてシステムを構成する。製作を行ったシステムの構成を図 6 に示す。実行画面には左右の足形を表示しており、青く塗りつぶされた 8 つの丸はそれぞれ中敷きの同位置にある

SCSRA と対応している。踏み込み圧が上昇すると、青→緑→黄色→赤と色相を変化させ、どの部位に圧力が掛っているか瞬時に把握することが可能である。色相を変化させた実行画面を図 7 に示す。図は右足前方で接地を行った際の実行画面である。左足及び右足踵部は色相の変化はないが、右足前方の 3 点においては色相が変化しており、踏み込みが生じていることが分かる。なお、制御回路部からのデータ受信は、提示システム部からのリクエストに依存している。そのため、提示システムのリクエストを 20ms 毎に実行し、これをサンプリング周期としている。

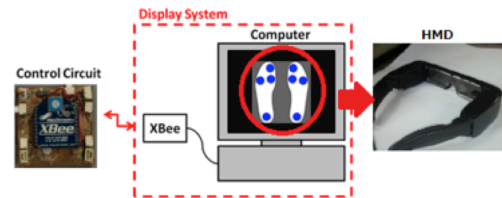


図 6 提示システム構成

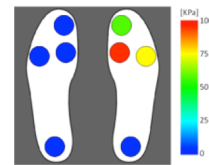


図 7 色相変化

### (4) 歩行訓練システム

図 8 に歩行訓練システムの構成を示す。被験者は、高機能靴及び HMD を装着することにより歩行訓練が行えるように構成しており、被験者自身の負担もなるべくかからないようになっている。また、両手が完全に自由な状態となっており、歩行器などを握った状態でも歩行訓練がおこなえるため、歩行補助を受けながらも使用が可能となっている。

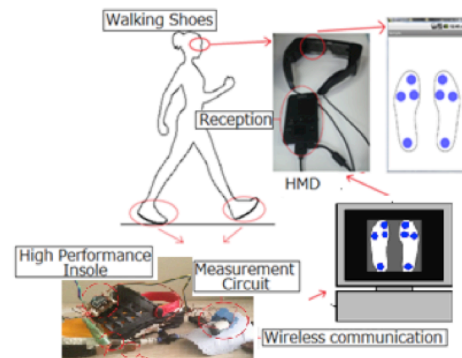


図 8 歩行訓練システム

## (5) 歩行中の荷重分布推移

図9に被験者の歩行中の荷重分布の推移を示す。色相変化から、被験者は、一度足を完全にから、拇指球に力を入れて前方に足を出していることが確認された。また、一度踏ん張って(足裏を全て地につけた状態から、拇指球に力を込めて)、その力んだ状態で前方に脚を出す人間は、自ずとフラフラ歩行をしていることが考えられる。すなわち、フラフラ歩行を行う高齢者が多いことから、高齢者の転倒要因として考えられるフラフラ歩行において、下肢筋力の低下による力み不足も重要な要因であることが考えられる。

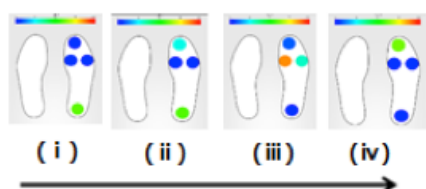


図9 歩行中の荷重推移

## (6) まとめ

本研究では、歩行訓練に関する実用的な基システムを開発した。直感的及び客観的に歩行状況を理解し、トレーニングするシステムは存在しないことから、社会的貢献度は大きいと考える。今後は、さらに直感的に歩行訓練できるシステムを開発する。

## 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4件)

- 1) Yasuhiro Hayakawa and Kazuma Kanazaki, “Study on high performance shoes for Walking Training”, Journal of BIOTECHNOLOGY, 査読有, Vol.185, Supplement, September 2014, pp. 590, ISSN 0168-1656, 2014
- 2) 早川 恭弘, “フルードパワーの挑戦 空気圧を用いた歩行訓練用高機能靴の開発”, 日本フルードパワー工業会 フルードパワー, 査読無, Vol. 27, No. 1, pp. 47-52, 2013
- 3) 早川 恭弘, “歩行リハビリ訓練用高機能靴”, 日本フルードパワーシステム学会誌, 査読無, Vol. 43, No. 6, pp. 347-349, 2012
- 4) 早川 恭弘, “福祉機器の研究”, 日本工業出版, 油空圧技術, 査読無, 641号, Vol. 51, No. 11, pp. 94-98, 2012

[学会発表] (計21件)

- 1) 金崎 和馬, 早川 恭弘, “高機能靴を用いた歩行訓練提示システムの開発”, 日本機械学会 第27回バイオエンジニアリング講演会, 2015年1月10日講演, 新潟

- 2) Shogo KAWANAKA, Yasuhiro HAYAKAWA, “Development of Walking Training System using High Performance Shoes”, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Technology for Sustainability, 2014, ISTS 2014 Presentation Award, 2014年11月20日講演, 香港
- 3) 早川 恭弘, “背負い式介護ロボット「ひびき」”, The 39<sup>th</sup> International Healthcare Engineering Exhibition (HOSPEX Japan 2014), 2014年11月12日～14日, 東京ビックサイト (東京)
- 4) Kazuma KANEZAKI, Yasuhiro HAYAKAWA, Shogo KAWANAKA and Shigeki Doi, “Study on High-Performance Shoes for Walking Training”, Proceedings of the 9<sup>th</sup> JFPS International Symposium on Fluid Power, 2014年10月30日講演, 松江
- 5) Y. HAYAKAWA, “Development of Walking Training System using High-Performance Shoes”, Proceeding of 6<sup>th</sup> European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering, T3-P2.1 (MBEC2014), Dubrovnik, 2014年9月9日講演, Croatia
- 6) K. KANEZAKI, Y. HAYAKAWA, S. Kawanaka and S. Doi, “Study on High-Performance Shoes for Walking Training”, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Motion and Vibration Control, Invited session, Hokkaido, Japan, 2014, 2014年8月5日講演, Sapporo Convention Center (北海道)
- 7) 金崎 和馬, 早川 恭弘, 河中 祥吾, 土井 滋貴, “歩行訓練用高機能靴に関する研究”, 日本フルードパワーシステム学会 平成26年春季フルードパワーシステム講演会, 2014年5月29日講演, 機械振興会館 (東京)
- 8) 早川 恭弘, 河中 祥吾, 金崎 和馬, 土井 滋貴, “高機能靴を用いた歩行訓練提示システムの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2014年5月26日講演 富山国際会議場 (富山)
- 9) Yasuhiro HAYAKAWA, “Study on High Performance Shoes for Walking Training”, Proceedings of European Biotechnology Congress 2014, 15-18 May 2014, 2014年5月16日講演, Lecce, Italy
- 10) 金崎 和馬, 早川 恭弘, 河中 祥吾, 土井 滋貴, “歩行バランス提示機能を有する高機能靴に関する研究”, 日本機械学会 バイオエンジニアリング部門 第26回バイオエンジニアリング講演会, 2014年1月11日講演, 東北大学片平キャンパス(宮城県)

- 11) Kazuma KANEZAKI and Yasuhiro HAYAKAWA, "Study on High-Performance Shoes for Walking Training", Proceedings of 2013 3<sup>rd</sup> International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2013), 2013年11月21日講演, Hong Kong
- 12) 金崎 和馬, 早川 恭弘, 河中 祥吾, 土井 滋貴, "歩行訓練用高機能靴に関する研究", 日本フルードパワーシステム学会 平成25年秋季フルードパワーシステム講演会, 2013年11月8日講演 機械振興会間 (東京)
- 13) 早川 恭弘, "直感的にバランス補正を理解できる歩行訓練用高機能靴の開発", イノベーション・ジャパン2013, 2013年8月29日~30日講演, 東京ビックサイト (東京)
- 14) 早川 恭弘, 金崎 和馬, 土井 滋貴, 尾田 友憲, "歩行訓練用高機能靴に関する研究", 日本フルードパワーシステム学会 平成25年春季フルードパワーシステム講演会, 2013年5月30日講演, 機械振興会館 (東京)
- 15) 早川 恭弘, 金崎 和馬, 尾田 友憲, 土井 滋貴, "歩行訓練用高機能靴に関する研究", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 '13, 2013年5月24日講演 つくば国際会議場 (茨城県)
- 16) 檜谷 信義, 早川 恭弘, 金崎 和馬, 林田 平馬, "人間親和性を有する歩行訓練システムの開発", 日本機械学会 第25回バイオエンジニアリング講演会, 2013年1月11日講演, (独)産業技術総合研究所つくばセンター (茨城)
- 17) 早川 恭弘, 檜谷 義信, 金崎 和馬, "歩行訓練用高機能靴の開発", 日本フルードパワーシステム学会 平成24年秋季フルードパワーシステム講演会, 2012年11月29日講演, 福岡工業大学 (福岡)
- 18) Yasuhiro Hayakawa, "Development of High Performance Shoes with Human Compatibility", 12<sup>th</sup> International Conference on Control, Automation and System, Oct 17-21, 2012 in ICC, Jeju Island, 2012年10月18日講演, Korea
- 19) 早川 恭弘, 檜谷 義信, 上治 卓也, "歩行訓練用高機能靴の開発", 日本機械学会 第23回バイオフロンティア講演会, 2012年10月5日講演, 弘前 (青森県)
- 20) 早川 恭弘, "空気圧を用いた福祉介護機器の開発", 日本機械学会2012年度年次大会, フォーラム "フルードパワーアクチュエータ技術の最前線" 講師, 2012年9月12日講演, 金沢

- 21) 早川 恭弘, 檜谷 義信, "歩行トレーニング用高機能靴の開発 —組み込み技術の活用—", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2012年5月29日講演, 浜松 (静岡県)

[産業財産権]

○取得状況 (計 1件)

名称: 靴底及び靴  
 発明者: 早川 恭弘  
 権利者: 独立行政法人国立高等専門学校  
 番号: 特許第 4411439  
 出願年月日: 平成 17 年 12 月 20 日  
 取得年月日: 平成 21 年 11 月 27 日  
 国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等  
[http://www.nara-k.ac.jp/seeds/book\\_swf.html](http://www.nara-k.ac.jp/seeds/book_swf.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

早川 恭弘 (HAYAKAWA, Yasuhiro)  
 奈良工業高等専門学校・電子制御工学科・教授  
 研究者番号: 50180956