

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 ( 共通 )

## 科学研究費助成事業

## 研究成果報告書



平成 2 9 年 6 月 2 4 日現在

機関番号： 1 2 1 0 2

研究種目： 基盤研究(B) ( 一般 )

研究期間： 2014 ~ 2016

課題番号： 2 6 2 8 9 0 5 8

研究課題名 ( 和文 ) 随意的な姿勢変換を支援するソフトロボットアシスト技術の基盤化

研究課題名 ( 英文 ) Foundation of Soft Robotic Assistive Technologies for Supporting Voluntary Postural Transitions

研究代表者

鈴木 健嗣 ( SUZUKI, Kenji )

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号： 3 0 3 5 0 4 7 4

交付決定額 ( 研究期間全体 ) : ( 直接経費 ) 12,900,000 円

研究成果の概要 ( 和文 ) : 本研究を通じて、既存の車椅子の概念を超え、立位姿勢をとることが困難な方々への全く新しい移動支援機器を可能にするとともに、モータを用いない受動機構により、乗員による姿勢変換を随意運動に準じた形で実現可能であることを明らかにした。また、小児の臥位・座位間の姿勢遷移および姿勢保持を支援モデルの理解の深化という生体医工学分野における新たな知見を得て、全身着用型ソフトロボットの実現可能性を示した。これらは、臨床研究を通じてその有効性を明らかにしている。これにより、随意的な姿勢変換を支援するソフトロボットアシスト技術の基盤化が大きく進展し、肢体不自由者・児に対する生活支援機器への応用可能性を拓いた。

研究成果の概要 ( 英文 ) : A novel approach of soft robotic assistive technologies for supporting voluntary postural transitions was investigated. In this study, we developed several robotic devices such as a standing mobility vehicle and full-body soft robot suit. The developed mobility vehicle with a passive exoskeleton without using any electrical actuators can assist the user's voluntary postural changing: sitting to standing solely with a passive mechanism. We also investigated a novel approach for supporting an infant's body posture change between lying and sitting by using a wearable soft robotic device. To assist the dominant joint motions, a novel pneumatic accordion actuator is proposed. Possible application to support the postural change of children with cerebral palsy is also discussed. We consider that developing an integrated robotic system with rigid, soft, and flexible mechanisms provide the appropriate solution for the future wearable robots.

研究分野： 人支援ロボティクス

キーワード： 装着型ロボット ソフトロボット 人支援ロボット ロボット支援機器 リハビリテーション支援機器  
脊椎・脊髄疾患 脳性麻痺

## 1. 研究開始当初の背景

下肢機能障害を有する脊髄損傷者は日本に現在 10 万人以上おり、毎年約 5 千人が新たに受傷している。近年、若年・高齢重度脊損者やより重度な脊損者の増加が問題であり、車椅子での生活を余儀なくされている。一方、小児の運動障害・肢体不自由者の約 7 割は、脳性麻痺が原因とされ、新生児医療の発達した現在においても発生率は減少していない（厚労省）。日本では毎年 1000 人に 2～4 人の脳性麻痺児が出生し、晩産化による早産児や低出生体重児など脳性麻痺発症リスクの高い児の発生率は増加している。なお米国でも約 50 万人の脳性麻痺患者がいるとの報告がある。このような運動障害児・者の運動支援や姿勢ケアが注目されているが、これを支援する保持具（座位保持装置、排便保持具、起立保持具）や移動具（車椅子・歩行器）は別々の装具であり、24 時間の姿勢ケア、姿勢変換支援・立位姿勢移動が実現可能な支援機器はない。

代表者はこれまで、自脳卒中患者や脊髄損傷者のロボット歩行支援研究を通じ、障害を持つ小児や下肢機能障害を持つ方々と協働してフィールド研究を行うとともに、特に、小児から成人にわたり運動機能の基本となる「立位姿勢変換と保持」のメカニズム理解に取り組み、医学、神経科学、心理学の研究者との交流を深めてきた。年齢や疾病・障害に関わらず、幅広い対象者にとって姿勢能力評価及び姿勢ケア器具は重要であり、歩行・社会行動の基本である臥位・座位・立位の姿勢変換の実現には、その根本的問題である筋力低下・易疲労性・協調性に対処して行く必要がある。

## 2. 研究の目的

そこで代表者は、小児療育支援やロボット・リハビリテーションの知見を活かし、実世界における日常生活の中で立位・座位・臥位の姿勢変換を支援するソフトロボットアシスト技術の基盤化（既存のモータと異なり柔軟でかつ対人親和性の高いアシスト技術）を実現することで、脊髄損傷患者の立位保持・立位移動支援、また脳性麻痺児の上下肢協調運動の促進・訓練・日常生活支援といった立位姿勢が重要な生活の場面を劇的に変容させる新たなロボット支援機器の実現により社会を変革させたいという着想を得た。

本研究は、装着者の随意的な意思に基づき、かつ受動的な機構のみにより姿勢変換を可能とする支援法とソフトロボット姿勢変換装具の実現を目指した基礎研究・機器開発から実証実験の実施を目的とする。

## 3. 研究の方法

ここでは、以下の通り 3 つのサブテーマ課題に基づき研究を実施した。

（1）生体力学的解析：臥位・座位・立位の遷移における上下肢協調運動の解析、（2）

ソフトロボット姿勢変換装具の開発：対人親和性の高い柔軟なロボット装具の開発、（3）応用研究：日常生活支援応用のための実証研究・リハビリテーション臨床研究を実施する。

## 4. 研究成果

（1）生体力学的解析：ここでは、特に小児（脳性麻痺）・青年（脊髄損傷者）・高齢者および健常被験者を対象とし、過去に行われて来た研究成果の検証もあわせて行うとともに、姿勢遷移に関する上下肢協調運動（上肢と下肢の同時協調動作）の生体力学的な解析を行った。特に、臥位から座位への姿勢変換支援機器の開発のための生体力学解析を行い（図 1）、ソフトロボットスーツの開発に成功した。

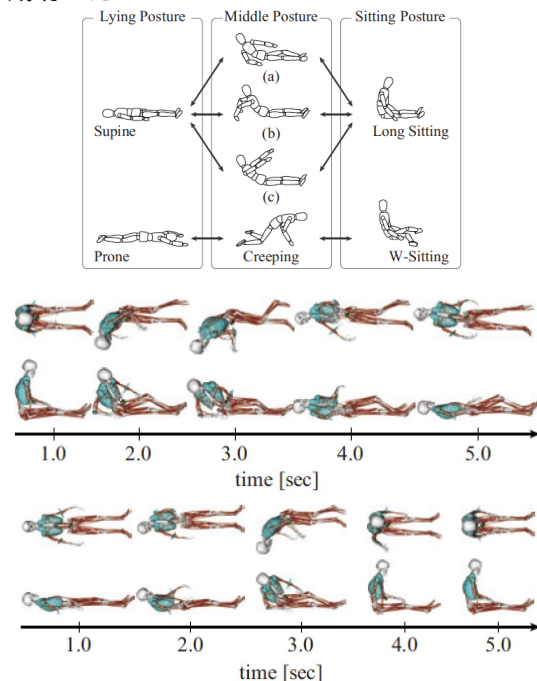


図 1. 姿勢変換支援機器の開発のための生体力学解析

（2）ソフトロボット姿勢変換装具の開発：受動機構のみにより起立、着座の双方を支援可能なソフトロボット技術により、随意的な上肢運動に基づき立位・座位間の姿勢変換における下肢動作を支援する姿勢変換支援用外骨格ロボットの開発を行って来た（図 1）。

ここで開発している立位移動支援機器は、日常生活の基本動作である立位座位姿勢間の姿勢遷移及び両姿勢の維持を支援し、装着者の胴体姿勢を読み取る受動型外骨格機構と、胴体姿勢に基づき制御される電動車輪から構成される。これは、Passively Assistive Limb (PAL) と呼ぶ受動型の外骨格装置を備えることにより、下肢が不自由な使用者の自発的な起立着座動作を支援する能力を有する。

本支援機器においては、健常者の起立着座動作に近い自然な動作を実現するため、本研究では胴体の前後傾による重心位置の変化を利用した起立着座動作の制御を行う。下肢

関節の負荷モーメントを推定した結果、胴体を前傾させた場合に負荷モーメントが減少し、後傾させた場合に増加することは明らかである。これにより、使用者は胴体を前後へ傾けることにより、姿勢遷移における基準的な負荷モーメントと、取り得る姿勢の中での最大負荷モーメントの間において、屈曲もしくは底屈方向の下肢関節負荷モーメントを任意に制御可能であることを意味する。これにより、基準負荷モーメントを超え最大負荷モーメント未満の伸展もしくは背屈方向の支援モーメントを各関節へ与えることにより、使用者による負荷モーメントとの釣り合いによって、胴体前傾による起立動作と後傾による着座動作の制御が可能となる。ここでの力学系を実現するために、両足間に収納可能な大きさの小型の外骨格により、使用者の起立着座動作に必要な支援モーメントを発生させる大きな力を蓄えることができるバネが必要である。

そこで本研究では、小型高出力で取り扱いが容易なガスパリングと呼ばれる圧縮バネを使用した。ガスパリングはコイルバネと比較してバネ定数が低いことから、長い圧縮ストロークにおいてほぼ一定の反発力が得られることや、内部にオイルを使用しており素早い伸縮に対して減衰作用を持つことから外骨格を安定的かつ安全に駆動する受動部品である。これにより本機構は、モータやセンサを使用せず電源が不要であるという特徴を持つ。また、外骨格によって立った姿勢を維持したまま、胴体の傾きに応じて電動車輪を制御することにより立位姿勢を保ったままの移動を可能とするものである。この移動機器は、使用者が椅子やベッドへ腰掛け、自然な動作で立ち上がることを可能とするほか、立った姿勢のまま手を使うことなく操縦することが可能である。

本研究により、既存の車椅子の概念を超え、立位姿勢をとることが困難な方々への全く新しい移動支援機器を可能にするとともに、モータを用いない受動機構により、乗員による姿勢変換を随意運動に準じた形で実現できるという人支援ロボット工学における新たな知見を示した。

一方、(1)で得られたソフトロボット開発の知見を活かし、臥位・座位姿勢変換を支援する全身型ソフトロボットスーツの開発を行った(図3)。これにより、関節の固定と制動による臥位姿勢変換補助を用い、早期介入により異常運動パターンを抑制し、感覚・運動系を通じて正常な動きを入力し、抗重力姿勢を形成する支援が可能になった。

これは、肢体不自由児の姿勢遷移および保持の支援を目的とした新たな全身着用型ソフトロボットを提案するものである。脳性麻痺に代表される種々の運動機能障害に起因する肢体不自由児は、全身の姿勢の保持や姿勢間の遷移が困難であり、これが日常生活上

の支障となるばかりか将来的な運動・認知機能発達の遅延や姿勢異常などの疾患の原因となり得る。こうした肢体不自由児の姿勢支援を実現するため、全身の運動支援に適した新たなアクチュエータを開発し、これを着用型ソフトロボットに利用した。これにより、着用者の臥位・座位姿勢間の遷移と、遷移後の座位姿勢の保持を行うことを目的とする。提案するソフトロボティクス技術は、空気圧によって柔軟物体を膨張させ、その際の形状と体積の変化により姿勢遷移動作に対して支配的な関節への回転トルクの付加と、動作時の支持基底面増大による安定性の向上に資するものである。なお、一連の姿勢変換動作を支援するためには駆動するアクチュエータの順序関係が重要である。そこで、空気弁により個別のアクチュエータを制御することなく、空気圧の印加のみで、複数のアクチュエータを所望の順序で膨張させる直列型膨張アクチュエータを提案する。ここでは、流体シミュレーションを利用し所望の圧力損失を発生させるオリフィス管を用いることで、直列的に連結されたアクチュエータの膨張順序を操作する。

ここでは、オリフィス管が接続された膨張物体への空気圧印加時の挙動を始めとする直列型膨張アクチュエータの性能評価を行うとともに、小型ポンプと電磁弁による簡便な空気圧源を開発し、アクチュエータとあわせて一般的な小児用の衣服に取り付けることで、柔軟物のみで構成された全身着用型ロボットを実現した。さらに、ダミー人形を利用した検証実験によりその有効性を明らかにした。

本研究を通じて、小児の臥位・座位間の姿勢遷移および姿勢保持を支援モデルの理解の深化という生体医工学分野における新たな知見を得て、全身着用型ソフトロボットの実現可能性を示した。これにより、肢体不自由児に対する生活支援機器への応用可能性を拓くとともに、運動学習を支援するロボット支援機器として臨床研究への発展が大きく期待できる。

(3)リハビリテーション臨床研究：提案する姿勢変換支援機器と電動車椅子を組み合わせることで、上部体幹運動を利用して座位から立位へ随意的な姿勢変換を支援し、かつハンズフリーで移動可能な全く新しい立位移動機器を実現した。またさらに、主に脊椎・脊髄疾患の方々に対し姿勢変換支援の介入研究を行い、上下肢協調運動の促進効果・立位保持訓練に関する効果検証実験に関する臨床研究を行った。(UMIN000016357:受動型下肢運動支援外骨格による脊椎・脊髄疾患患者の起立・着席動作の評価に関する研究)ここでは、患者様を対象として受動型下肢運動支援外骨格機器の評価を行った。これにより、提案する機器の有効性が明らかになった。



図2．立位移動パーソナルモビリティ機器

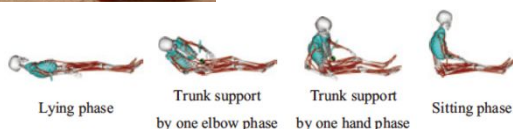


図3．臥位 - 座位変換（姿勢変換着衣）

## 5．主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計10件)

Visentin, F., Fiorini, P. and Suzuki, K., A Deformable Smart Skin for Continuous Sensing Based on Electrical Impedance Tomography, Sensors 2016, 16(11)、査読有、(2016)、1928.

DOI: 10.3390/s16111928

Sasaki, K., Eguchi, Y., and Suzuki, K., "A Wheelchair with Lever Propulsion Control for Climbing Up and Down Stairs," Proc. of Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society、査読有、(2016)、3358-3361.

DOI: 10.1109/EMBC.2016.7591447

Shimokakimoto, T., Ueno, T., Akimichi, N., and Suzuki, K., "Building Blocks System for a Prosthesis Training of a Child with Congenital Amputee," Proc. of Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society、査読有、(2016)、5034-5037.

DOI: 10.1109/EMBC.2016.7591858

Grüneberg, P., Kadone, H., and Suzuki, K., Voluntary Initiation of Movement: Multifunctional Integration of Subjective Agency, Frontier in Psychology, 22(6), 査読有、(2015)、688.

DOI: 10.3389/fpsyg.2015.00688

Visentin, F. and Suzuki, K., "Deformable sensors for soft robot by

electrical impedance tomography," Proc. of IEEE Intl. Conf. on Robotics and Biomimetics、査読有、(2015)、1006-1011.

DOI: 10.1109/ROBIO.2015.7418903

Yamamoto, T., Kadone, H., and Suzuki, K., "Wearable Inflatable Robot for Supporting Postural Transitions in Infants between Sitting and Lying," Proc. of IEEE Intl. Conf. on Robotics and Biomimetics、査読有、(2015)、2289-2294.

DOI: 10.1109/ROBIO.2015.7419115

Hassan, M., Kadone, H., Suzuki, K. and Sankai, Y., "Feasibility Study of Wearable Robot Control based on Upper and Lower Limbs Synergies," Proc. of the 2015 IEEE International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science、査読有、(2015)、1-6.

DOI: 10.1109/MHS.2015.7438305

Sasaki, K. Yosuke, E. and Suzuki, K., "Step-Climbing Wheelchair with Lever Propelled Rotary Legs," Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems、査読有、(2015)、1190-1195.

DOI: 10.1109/IROS.2015.7354285

Tone, T., and Suzuki, K., "Deforming Control for Object Transportation with Ferrofluid-based Sheet-type Soft Robot," Proc. of 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering、査読有、(2015)、1171-1176.

DOI: 10.1109/CoASE.2015.7294256

Tone, T., Visentin, F., and Suzuki, K., "Sheet type soft robot with magnetic fluid for object transportation," Proc. of 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering、査読有、(2014)、852-857.

DOI: 10.1109/CoASE.2014.6899425

### 〔学会発表〕(計17件)

鈴木 健嗣、(招待講演) "Subjectivity-Oriented Computing to Understanding and Empowering Individuals," AAAI Spring Symposium 2017 - Wellbeing AI: From Machine Learning to Subjectivity Oriented Computing, 2017/03/28, パロアルト・米国

Visentin, F. and Suzuki, K., "Deformable sensors for soft robot by electrical impedance tomography," IEEE Intl. Conf. on Robotics and Biomimetics, 2016/12/03, 青島・中国

鈴木 健嗣、(招待講演) "スマートなヘルスケアとライフケア", 情報処理学会連続セミナー2016, 2016/09/30, 日本大学,



東京

鈴木 健嗣、(招待講演)"Human Technology for Empowering People," 2016 AEARU Young Researchers International Conference, 2016/09/16, つくば国際会議場、茨城県つくば市  
Sasaki, K., Eguchi, Y., and Suzuki, K., "A Wheelchair with Lever Propulsion Control for Climbing Up and Down Stairs,," Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society、2016/08/16、オランダ、米国  
Shimokakimoto, T., Ueno, T., Akimichi, N., and Suzuki, K., "Building Blocks System for a Prosthesis Training of a Child with Congenital Amputee," Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society、2016/08/15、オランダ、米国  
鈴木 健嗣、(招待講演)"Smart Mechanics for Assistive Soft Robotics and Exoskeleton," UK-Japan Workshop on Bio-inspired Soft Robotics, 2016/07/14, ケンブリッジ、英国  
鈴木 健嗣、(招待講演)"ロボットと人工知能による医療・介護・福祉支援技術", 第8回在宅医療・チーム医療セミナー, 2016/05/25, 京都府立医科大学, 京都府京都市

Yamamoto, T., Kadone, H., and Suzuki, K., "Wearable Inflatable Robot for Supporting Postural Transitions in Infants between Sitting and Lying," Proc. of IEEE Intl. Conf. on Robotics and Biomimetics, 2015/12/06、珠海・中国

Hassan, M., Kadone, H., Suzuki, K. and Sankai, Y., "Feasibility Study of Wearable Robot Control based on Upper and Lower Limbs Synergies," Proc. of the 2015 IEEE International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, 2015/11/23、名古屋大学、愛知県名古屋市

鈴木 健嗣、(招待講演)"Smart mechanics of wearable robot for healthcare and rehabilitation," Italy-Japan Workshop 2015, 2015/11/30, 早稲田大学、東京都新宿区

鈴木 健嗣、(招待講演)"Humanoid Robot-Assisted Activities based on Affective Feedback," IEEE/RSJ IROS2015 Workshop on Grounding robot autonomy, 2015/10/02, ハンブルク・ドイツ

Sasaki, K. Yosuke, E. and Suzuki, K., "Step-Climbing Wheelchair with Lever Propelled Rotary Legs," Proc. of IEEE/RSJ International Conference on

Intelligent Robots and Systems、2015/09/30、ハンブルク・ドイツ  
Tone, T., and Suzuki, K., "Deforming Control for Object Transportation with Ferrofluid-based Sheet-type Soft Robot," 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 2015/08/26、イヨテボリ・スウェーデン

鈴木 健嗣、(招待講演)"人々の身体動作と情動表現の理解に基づく拡張生体技術", 第3回東京大学ソシオグローバル情報工学研究センター講演会, 2014/11/28, 東京大学、東京都目黒区

鈴木 健嗣、(招待講演)"Smile Sharing: Technologies for Facilitating Social Positive Behaviors," European Conference on Ambient Intelligence, 2014/11/14, アイントホーフェン・オランダ

Tone, T., Visentin, F., and Suzuki, K., "Sheet type soft robot with magnetic fluid for object transportation," 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 2014/08/22、台北・台湾

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 段差昇降機能付き車椅子

発明者: 佐々木海, 鈴木健嗣

権利者: 筑波大学

種類: 特許出願

番号: 特願 2015-188702

出願年月日: 2015 年 9 月 25 日

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

鈴木 健嗣 (SUZUKI, Kenji)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号: 3 0 3 5 0 4 7 4

### (2)研究分担者

江口 清 (EGUCHI, Kiyoshi)

筑波大学・医学医療系・准教授

研究者番号: 0 0 2 1 3 5 3 8