

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 19 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26560313

研究課題名(和文)バイオミメティックな外筋・内骨格型服ロボットの開発

研究課題名(英文)Development of a biomimetic soft wearable robot

研究代表者

安藤 健(Ando, Takeshi)

早稲田大学・理工学術院・講師

研究者番号：40535283

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人の筋肉の構造/構成を模倣した服型の装着型ロボットを開発した。人の筋線維のように細い線状アクチュエータを並列に配置した服型ロボットを開発し、人の歩行支援が可能かを検証した。服型ロボットを装着した状態で歩行をすると、装着しない時よりも膝が高く上がった状態で歩行ができ、転倒の原因となる躓きを予防できる可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have been developing a soft and biomimetic wearable robot. In the developed robot system, the SMA actuators are arranged parallel such as human muscle fibers. We evaluated the proposed robot in gait movement. We confirmed that the height of subjects' knee became higher when the subjects wearing the developed robot walked. This result shows our robot has possibility to prevent from the falling down.

研究分野：生活支援ロボティクス

キーワード：知能機械 ロボティクス ソフトアクチュエータ ウエアラブルロボット 確率共鳴 リハビリテーション

1. 研究開始当初の背景

近年少子高齢化といった社会的背景から、高齢者・障害者の動作・生活を支援することを目的として、サイバードイン社のロボットスーツ HAL に代表されるような外骨格ロボットの開発が進められている。これらのロボットでは金属部材があたかも“力を発生することができる骨と関節”を体の外側に形成することで、人間が発生する力をアシストする役割を担っている。しかし、その特性から、装着までの時間の長さ、装着感の硬さ、高価であることなど、非常にユーザには敷居が高いロボットであり、現在運用が進められているリハビリテーション分野における「特殊な人・用途のための特殊なロボット」であるといえる。

一方、ワコール社のクロスウォーカーなどのゴムテーピングを用いた日常動作の支援に役立つ機能性服・下着市場が拡大している。これらの製品のように「手軽に、装着するのみで」、日常動作の支援を実施できる機器のニーズは非常に高い。これらの服が人間の力を用いて受動的（パッシブ）にアシストしているため、行動を起こすための力をアシストすることができず、ユーザは健常者に制限されている。

本研究の発想は、形状記憶合金（SMA）アクチュエータを服に組み込むことで、ロボットが能動的（アクティブ）に人の動作をアシストすることである。能動的な力の発生により、受動的な機器では力が弱く使用不可能な人にも、適用範囲が広がる、より適切なアシストが可能である等のアドバンテージが得られると考えられる。

2. 研究の目的

ハードウェア、ソフトウェアの両方で人の筋肉の構造/構成を模倣したバイオミメティックな服型の装着型ロボットを開発する。これまでに装着型ロボットは多く開発されているものの、重量は重く、装着感という点で違和感を与えるものであった。本課題では、フレキシブルかつ柔軟/軽量の装着型ロボット（服型ロボット）の開発を目的とする。技術的には、人の筋肉の構造（アクチュエータの並列分散構造）や制御（確率共鳴現象の利用）を課題として取り組む。これにより、「一般の人が手軽に使える装着型の服型ロボット」の開発が実現でき、あたかも“人のもう一つの筋肉”として振る舞い、誰でも気軽に装着でき、日常動作を柔軟に支援することをコンセプトと新しい概念のロボットを実現する。

具体的には、服型ロボットのハードウェアとソフトウェアに関して、以下の開発をすることを目的とする。

【ハードウェア】

現在開発されている外骨格ロボット機器では、ひとつの関節にひとつのアクチュエータを使用する構成となっており、その動作には

DCモータのような回転型のアクチュエータが使用されている。一方、本研究では、服型ロボットの開発のために、生地の中に細径小型の直動型アクチュエータを埋め込む案を採用する。1つのアクチュエータのみの使用では力不足となるため、多数のアクチュエータを服の中に埋め込み、それらの協調動作で人をアシストするのに十分な力を発生させる。具体的には、細径小型の直動型アクチュエータとして、形状記憶合金（以下、SMA：Shape Memory Alloy）を用いたアクチュエータを用いる。SMAアクチュエータは、非常に細い糸のような形状を持ち、伸縮方向に力を発生させることが可能である。

【ソフトウェア】直列・並列結合した多数のSMAアクチュエータ1つ1つを、従来の外骨格ロボットのアクチュエータのようにフィードバック制御するのは次の理由から困難である。

- ・複数のSMAアクチュエータ毎にセンサを配置することが困難
 - ・SMAアクチュエータのばらつきに対応するため、其々チューニングすることが困難
- そこで本研究では、人間の筋肉の制御手法にも応用されている確率共鳴という現象を用いた制御手法を提案する。確率共鳴とは、雑音を故意にシステムの入力を加える手法である。確率共鳴で動作させる個々の素子をネットワーク化することで、確率共鳴のピークに雑音を調整する必要がなくなる。また、個々のデバイスの特性ばらつきが遮蔽することができる。つまり、確率共鳴現象の利用により、「SMAを其々制御する必要がない」、「SMA特性のばらつきを考慮した制御系を開発する必要がない」という利点がある。

3. 研究の方法

(1) SMAアクチュエータ基礎実験

2で示した服型ロボットのハードウェア、ソフトウェアのコンセプトが実現可能かを検証するために、基礎実験として服型ではなく、卓上型で並列結合したSMA駆動装置を開発し、制御則や制御性の評価を実施した。

(2) 服型ロボットの開発

SMAアクチュエータを搭載した服型ロボットを開発するにあたり、現在高齢者などが転倒する最大の要因になっている躓きを防止するための股関節を引き上げることができる服型ロボットを開発した。

(3) 服型ロボットの歩行評価

段昇段降時における下肢振り上げ動作中に開発した服型ロボットを駆動させ、その支援効果を検証する。躓きの原因となる下肢の振り上げ高さの指標としては、膝関節高さを用いる。同時に、今回の支援方法が人間にどのような影響を与えるかを検証し、提案ロボットの妥当性について議論する。

実験の様子を図1に示す。床反力計の上に

段差(高さ 50[mm])を設置した状態で歩行し、その際に体節の位置を光学式モーションキャプチャによって、床反力を床反力計によって計測する。それらの計測値を基に、膝関節高さを求めた。実験は、若年健常者男性 2 名にて行った。

実験方法を以下に述べる。(1) 歩行開始位置と踏切位置を決定する。歩行開始位置に関しては、一定の歩行後に昇段動作が行えるように、歩行開始から 4 歩目にて踏切位置に到達するように歩行開始位置を決定し、目印のためにテープを張り付ける。踏切位置に関しては、段差手前から 200[mm]とし、各踏切位置にも目印のためにテープを貼る。(2) メトロノームにより歩調が一定になるようにする。はじめに、被験者は、平常時と同様な平地歩行を実施し、歩調をそれぞれ計測する。計測した歩調を被験者の通常の歩調とする。今回はすべての被験者において 95[bpm]であった。(3) 各被験者が段差を昇段する際の下肢動作を、光学式モーションキャプチャを用いて、装具の駆動の有無をランダムに行い、10 回ずつ、計 20 回計測する。昇段については、利き足(本研究では被験者がボールを蹴る方の足と設定)が先に段上に着くように昇るよう事前に指示した。昇段後は、非利き足を段上につくことなく直進方向に降りるよう指示した。(4) 計測したデータより、下肢の振り上げ高さの推移を導出する。



図 1 実験の様子

4. 研究成果

(1) SMAアクチュエータ基礎実験

図 2 に開発した SMA アクチュエータ基礎実験用装置を示す。この装置では、SMA アクチュエータが並列に 16 本配置されており、各アクチュエータに電流を入力とした制御および確率共鳴を検証するためのノイズを付加できるようになっている。また、力制御が可能のように各アクチュエータの力および合力を計測できるようにした。

図 3 には実際に構築した制御ブロック線図を示す。図 3 に示したように実験では、16 本のアクチュエータの合力を制御する力制御を実施した。各アクチュエータには全体の目標値の $1/16$ の力に正規分布のノイズが付加された値が所定の閾値を超えた場合

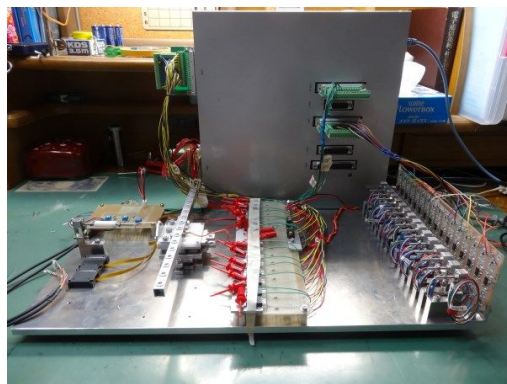


図 2 開発した並列 SMA 制御装置

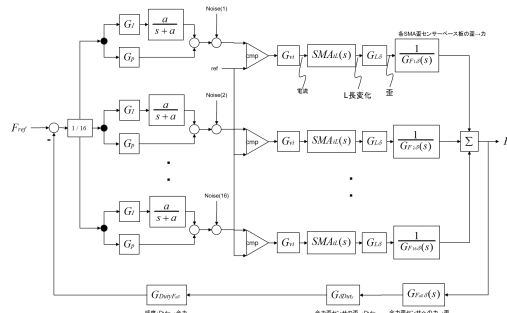


図 3 確率共鳴を用いた制御則の開発

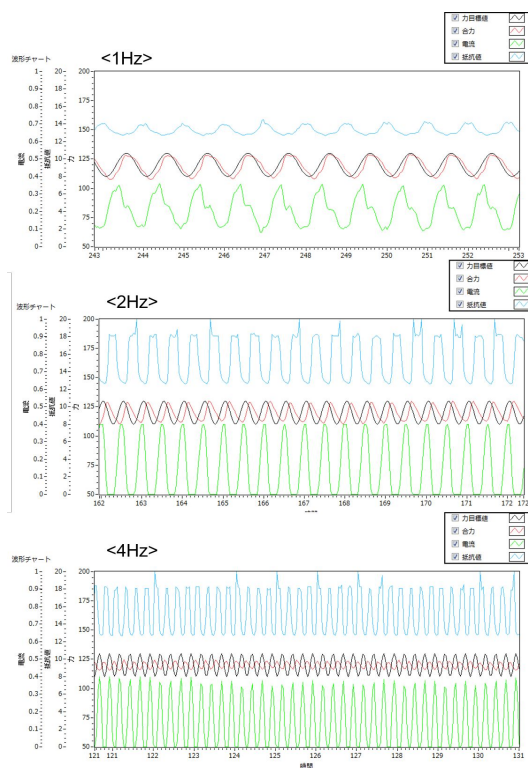


図 4 確率共鳴利用時の制御性能評価

には ON, 超えなかった場合には OFF という ON・OFF 制御が実装された。

上記の制御則を適用したときの制御性能例を図 4 に示す。図 4 には、全体の目標値を 1 Hz, 2 Hz, 4 Hz としたときの 16 本の合力の目標値と実測値を示した。図 4 からわかるように、1 Hz ではほぼ遅れがなく、2 Hz で 45 度の位相遅れ、4 Hz で約 18

0度の位相遅れが発生することが確認でき、2～3Hzであれば、十分に制御可能であることがわかった。

(2) 服型ロボットの開発

服型ロボットの全体図を図5に示す。人体への固定には、装具上端はベルト、下端は歩行を阻害しないようシリコンで作成したバンドを用いた。装具下端についてはバンドのずり上がりを防ぐために、膝を跨いで固定することでずり上がりが発生しないように対処することとし、歩行をなるべく阻害しないように、スポーツ用サポータで固定した。SMAの端点をベルトおよびサポータに取り付けることで、収縮力を人体に伝達する。SMAはネジに巻き付け締結することで固定しており、長さが調節可能である。腰部には股関節の角度が計測できるようにゴニオメータを搭載した。また、立脚期から遊脚期への移行を検知するために、フットスイッチを作成し、足裏部に搭載した。

本ロボットを開発する上で、使用する布の素材は重要である。布の弾性が高いもの、例えばスパッツ生地を用いると、布の伸びが出力の伝達を阻害する。搭載するSMAは、受動的に長さが変化するものではないため、弾性を持つ布を用いた場合のフィット感などの恩恵は得られない。また、SMAを使用するため、絶縁性・耐熱性は重要である。そのため、本研究では、布素材としてデニム生地を用いた。SMAは絶縁対策をした上で布に搭載する必要があるため、SMAはシリコンゴムで覆い、シリコンチューブを布に刺繍した。

制御は、Arduino UNOを用い、ゴニオメータおよびフットスイッチの計測値からSMAの駆動タイミングを判断し、電源の制御を行った。まず、段差1歩手前の時点で、制御を開始するスイッチを実験実施者が手動で入れる。続いて、つま先につけたフットスイッチで遊脚期に移行したかどうかを判断する。フットスイッチがOffになることで、スイッチ装着側のToe-Offを判別し、SMAの電源がOnとなる。そしてゴニオメータにより、股関節角度の推移を計測する。股関節の振り上げ角速度が減少した時点で、SMAの電源がOffとなる。これにより、装具自体による被験者の状態のセンシングを可能とした。

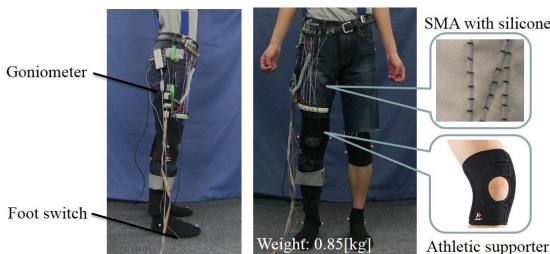


図5 開発した服型ロボット

(3) 服型ロボットの歩行評価

支援の有無による下肢振り上げ量の変化の結果について、被験者Aの結果を図6に示す。被験者Aについては、装具の支援を行う場合では、行わない場合よりも膝関節高さが平均22.8[mm]増加した。また、10回の試行結果に対し、有意水準5%でt検定を行った結果、図7に示すように、 $p < 0.05$ となり、膝関節高さの変化に有意的な差があることが示された。よって、開発した装具により下肢の振り上げ量が増加することが示された。つまずきを防止するためには、距離、速度、タイミングといった様々な要因が絡み合ってくるため一概には述べることは難しいが、本装具によるつまずきの防止が可能であることが示唆された。被験者Bについても支援を行う場合に平均7.8[mm]の上昇がみられた($p < 0.05$)。

以上より、提案したSMAを用いた服型ロボットの有用性を示すことができた。

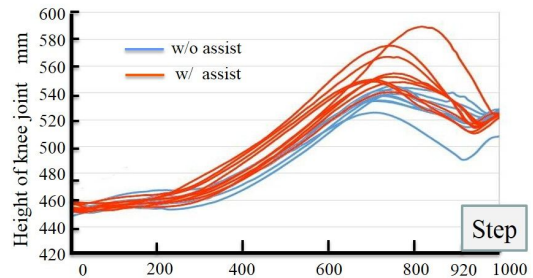


図6 被験者Aにおける歩行時の膝高さ

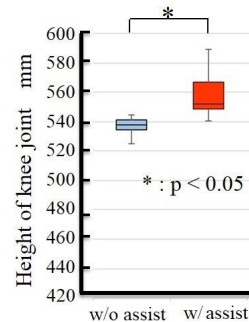


図7 支援の有無での膝高さの比較

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1件)

安藤健, 医工連携による実践的医療福祉ロボットの開発, 日本顎口腔機能学会学会誌, 査読無, Vol. 22, 2016

〔学会発表〕(計3件)

— 安藤健, ロボティクスから学び、共創する、歯科のブレイクスルー 医工連携による実践的医療福祉ロボットの開発, 日本顎口腔機能学会第55回学術講演会(招待講演), 2015.10.31, 大阪

- 中島康貴, 安藤健, 小林洋, 藤江正克, 医療福祉ロボット研究の実証実験における課題, LIFE2015, 2015.9.7, 福岡
- 中山正之, 松本侑也, 中島康貴, 安藤健, 小林洋, 藤江正克, 形状記憶合金アクチュエータを用いた服型下肢装具の開発 服型形状におけるアクチュエータ配置と股関節モーメントの関係の導出, 第20回ロボティクスシンポジア, 2015.3.15, 489 - 496, 軽井沢

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

〔その他〕
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤 健 (ANDO Takeshi)
早稲田大学・理工学術院総合研究所・客員
研究助手
研究者番号: 40535283

(2) 研究分担者

小林 洋 (KOBAYASHI Yo)
早稲田大学・理工学術院総合研究所・研究
院准教授
研究者番号: 50424817