

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420197

研究課題名(和文)高齢者の転倒予防を意図した標準化歩行診断技術の確立と倒れない受動アシスト杖の開発

研究課題名(英文) Development of the Gate Diagnosis Method and the Gait Assist Cane to Prevent Fall of Elderly People

研究代表者

伊藤 友孝 (ITO, Tomotaka)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：00283341

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、高齢者の転倒予防を目的に、(a)個々の歩行状態を定量的かつ的確に診断できる手法の開発と(b)屋外の不整地でも安心して使用できる受動アシスト杖の開発の二点を重点課題とした。課題(a)に関しては、歩行を簡便に計測して個々の歩容の特徴量を自動抽出し、歩行タイプやバランス状態などの診断を行える「歩行計測・診断システム」を開発した。実際に72名の診断を行い、高齢者の歩容の実態や転倒の要因を把握することができた。課題(b)に関しては、伸縮式の支持脚を有し不整地での段差吸収とバランス制御機能を併せ持つ「ロボット杖」の開発に成功した。本研究により今後の高齢者の転倒予防に関する重要な知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：Recently, the population ratio of elderly people is increasing rapidly and so, to improve the QOL of elderly people is a today's important social issue. Most urgent problem is how to prevent the gradual decrease of the walking ability and how to prevent the elderly people's fall. In this research, we aimed to develop (a) a gait measurement and diagnosis system and (b) a robotic gait-assist cane for preventing fall. The developed gait measurement and diagnosis system can be applied for the clinical gait analysis by analyzing the gait feature values and by detecting the gait type of each person. We conducted the gait measurement experiments for 72 elderly persons by using the proposed system. We also developed a new multi-legs gait assist cane which can improve the stability of the walk on the uneven terrain by using robot technologies. In this study, we obtained important knowledge about the prevention of falls.

研究分野：ロボット工学

キーワード：転倒予防 高齢者 歩行診断 杖 ロボット 計測 福祉機器

1. 研究開始当初の背景

近年、我が国は超高齢社会へと突入し、高齢者の生活の質（QOL）の向上が重要な課題となっている。中でも重要視されているのが転倒問題である。転倒により骨折などの怪我をした場合、静養期間中の運動不足やバランス能力の低下によって、回復後にさらに転倒しやすくなるという負のスパイラルに陥りやすく、寝たきりになる大きな原因の一つになっている。また、加齢による筋力やバランス能力の低下を補うために歩行補助杖が広く用いられているが、研究目的の項で述べるように、屋外の不整地での使用時にバランスを崩して転倒する事故が多く発生しており、その対策も急務と考えられる。高齢者の転倒を未然に防ぐことは、健康寿命を延ばすための最重要課題であり、学術的にも社会的にもその意義は非常に大きい。

そこで本研究では、高齢者の個々の歩行の状態を明瞭化し的確に診断できる歩行計測・評価システムの開発と、不整地でもバランス良く安心して使用できる倒れない杖（ロボット杖）の開発の二つを重点課題として設定した。

2. 研究の目的

本研究では、高齢者の転倒を未然に防ぐための支援を行うことを目的に、二つの重点課題に関して取り組みを行った。以下に、それぞれの課題の背景と目的を説明する。

(1) 高齢者の歩行状態を的確に診断するための歩行計測・評価システムの開発

高齢者の転倒を予防するためには、転倒の要因を解明すると同時に、各個人の歩行状態を的確に診断し、それに合わせたバランス改善や意識付けなどの転倒予防対策をとることが重要となる。しかしながら、現在の歩行診断は医師や理学療法士の主観的な判断によってなされており、定量的かつ統一的に歩行を評価・診断する方法がほとんど存在しない。Tinetti 歩行評価などの観察評価や、転倒リスク・転倒予防自己効力感尺度などのアンケート式の評価指標も提案されているが、個々の歩容の差異や転倒要因を具体的に明らかにするものではない。そのため、福祉施設などで容易に計測でき、個々の歩行状態を明瞭化して診断できる手法が確立できれば、転倒を予防するための大きな助けになると考えられる。

そこで本課題では、高齢者個々の歩行状態をその場で簡単に計測し診断できる歩行計測・診断システムを開発することを目的とした。また、開発したシステムを用いて歩行計測を実施し、高齢者の歩容の実態の把握と転倒要因の検討、診断結果のフィードバックの効果の検証などを行った。

(2) 不整地での安全な利用を可能にする倒れない杖（ロボット杖）の開発

加齢による筋力低下や脳梗塞などが原因で歩行に支障をきたし杖を利用する高齢者が年々増加している。杖は歩行の安定性向上に有効であることが知られているが、誤ったつき方をすれば転倒につながる。例えば、図1のように、一般に広く使われている一本杖は一点支持のために接地面に対して対向モーメントが働かず、接地位置や荷重方向によっては体のバランスを崩してしまう。そのため、屋外の不整地での使用で転倒する事例が多く報告されている。一方で、図2のように、接地性向上のために支持脚を増やした多脚型の杖も市販されているが、路面が平面でなく段差や凹凸がある場合には全脚を同時に接地できず、かえって安定性を害してしまう。車輪型の移動ロボットと杖を組み合わせ、能動的に歩行の安定化支援を行う研究も存在するが、一般に広く使う上では、重量や屋外の不整地への対応などの課題がある。

そこで本研究では、通常の高齢者の杖の延長として、安定性や不整地への対応能力、転倒防止機能等を備えた全く新しい受動歩行補助杖を開発することを目的とした。安全面に配慮してモータなどの能動的な可動部を排除し、ロボット技術を用いて段差吸収とバランス制御を両立させた安心して使える杖を目指した。

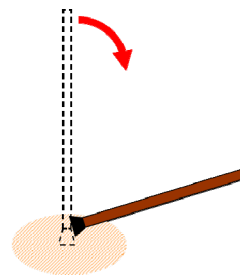


図1 一本杖

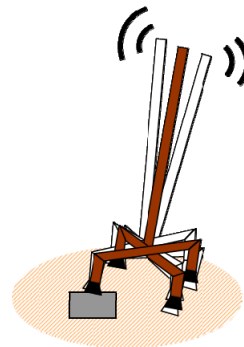


図2 多脚杖

3. 研究の方法

ここでは、研究の方法および手順について、課題別に説明する。

(1) 高齢者の歩行状態を的確に診断するための歩行計測・診断システムの開発

本課題では、高齢者の歩行状態の調査・検討のため、地域の高齢者福祉施設A、Bで実施されている介護予防教室と体操教室に通う高齢者にご協力頂いた。まず、歩行状態を

計測するためのシステムの構築を行い、それを元に実際に高齢者の歩行計測を行ってデータを分析し、高齢者の歩行の明瞭化(特徴量の自動抽出)と歩行タイプの自動分類を行えるシステムを開発した。そして、それを用いて高齢者の歩容の実態把握と転倒要因の検討、診断結果のフィードバックの効果の検証などを行った。

①歩行計測・評価システムの構築

はじめに、高齢者の歩行状態をその場で容易に計測し評価できるシステムの開発を行った。環境を選ばずに足の動きを計測可能な点を重視して、モーションキャプチャではなく慣性センサ方式を採用することにし、角速度センサと加速度センサを内蔵した無線式の複合センサをサポートベルトで装着する形式とした。また、歩行中のバランス状態を計測するために、インソール型の足裏圧力センサもシステムに組み入れて統合した。図3にシステムの概要を示す。

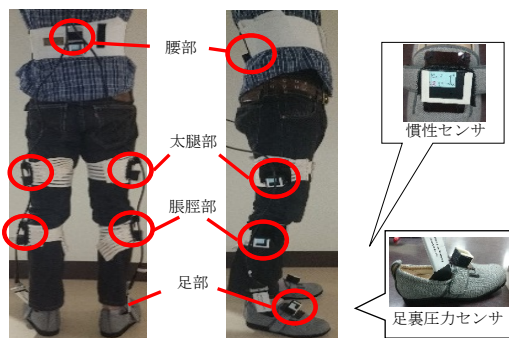


図3 歩行計測システム

本システムでは、計測で得られた下肢の運動データを分析することで、歩行中の各関節角度の時間変化や関節の三次元的な移動軌跡、歩幅やスイング速度、体幹動揺などの様々な特徴量を抽出することができる。また、着地時の衝撃や動きの特徴からタイミングを判断し、初期接地や踵離地など6つもしくは8つの相に歩行を自動分割する機能も実現した。

②高齢者の歩行タイプの診断機能の実現

開発した計測システムを用いて若年者と高齢者の歩行計測実験を実施し、それらの結果を分析して、高齢者の歩行タイプを解析的に分類した。まず、若年者と高齢者の様々な歩行特徴量を比較し、歩幅やスイング速度等の相違の大きかった項目と転倒に関わる身体直下通過時の遊脚の各関節角度の計7項目を抽出し、それらが高齢者の歩行を特徴付ける変数と見なすことにした。次に、高齢者にはどのような歩容が多く見られるのかを明確にするために、自己組織化マップ(SOM)とクラスター解析の手法を用いて、高齢者の歩行データを歩容の特徴別に分類し、歩行タイプを表す群(クラスター)を形成した。自己組織化マップは、多次元のベクトル量を

低次元の空間に写像する手法の一つで、似かよった成分を持つベクトル同士で群が形成される。図4に、高齢者のデータから構成したマップを示す。A~Fは歩行タイプを表し、麻痺などの特別な障害を持たない高齢者の場合は大きく6つの歩行タイプに分かれることが判明した。順に、A:すり足歩行(低速)、B:すり足歩行(高速)、C:若年者に近い歩行、D:膝の引き上げ歩行(背屈)、E:若年者に近い歩行(低屈)、F:膝の引き上げ歩行(低屈)であり、地面から足先があまり上がらない“すり足歩行(図5)”や、脚を前後に大きく動かし地面から足先も上がっている“若年者に近い歩行(図6)”, 膝がほとんど体の後方に動かず膝の引き上げで地面とのクリアランスをかせぐ“膝の引き上げ歩行(図7)”などが存在する実態がわかってきた。また、Tinettiの歩行評価や転倒リスク、転倒予防自己効力感尺度による評価や聞き取り調査も行ったところ、評価の悪かった被験者は、A、D、Fタイプに集中していた。図4の歩行分類マップは新規の計測データを当てはめて歩行タイプを診断することも可能であり、これを用いてその後の検討を行った。

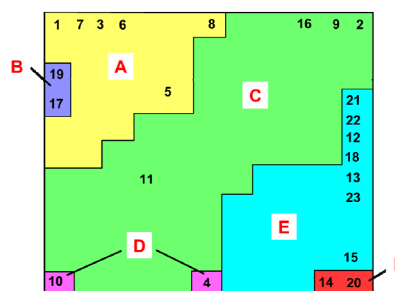


図4 歩行分類マップ

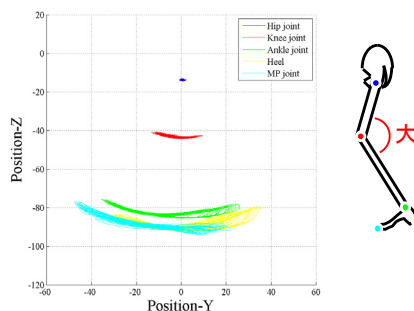


図5 すり足歩行(低速)

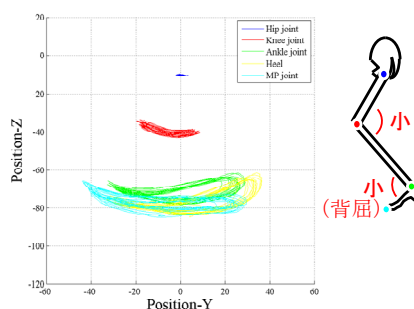


図6 若年者に近い歩行(背屈)

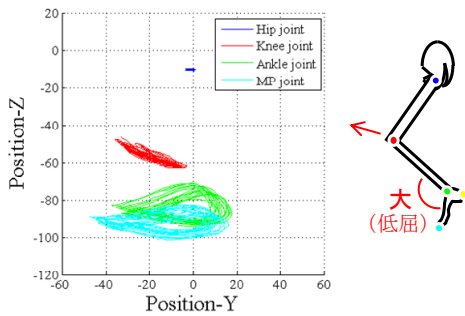


図7 膝の引き上げ歩行 (低屈)

③高齢者の歩行診断と転倒要因の検討

開発したシステムを用いて、実際に高齢者の歩行診断を行った。同一被験者に協力して頂いて経年変化の調査を行った他、仮想障害物のまたぎ実験や曲線路の歩行実験により、バランス能力の分析や転倒との関連性などを調査した。計測に協力して頂いた被験者は64歳から94歳までの計72名である。

通常の歩行計測では、加速区間3m、計測区間10m、減速区間3mの計16mの直線路を2回歩いてもらい、10mの計測区間のデータを使用した。曲線路については、安全面を考えて半径を4.4mと大きめに設定し右カーブと左カーブの両方の歩行の様子を計測した(図8)。仮想障害物またぎ実験では、安全に配慮して、立体感が得られるように撮影した写真を床に貼って仮想障害物とし、図9のように連続で二つまたいで頂いて計測を行った。

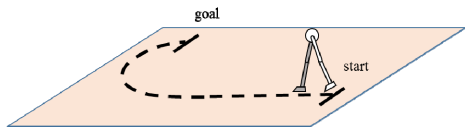


図8 曲線路 (直線区間7m, 曲線区間9m)

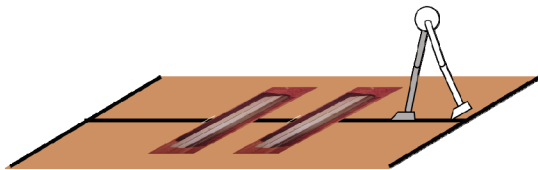


図9 仮想障害物またぎ実験

尚、計測は毎年秋に実施し、施設職員を通じて歩行の分析結果とアドバイスシートを被験者に返却し、自己分析や歩行改善に役立ててもらおうようにした。

(2) 不整地での安全な利用を可能にする倒れない杖 (ロボット杖) の開発

本課題では、まず不整地での安全な利用を可能にするためのロボット杖の開発コンセプトの明確化を行った。そして、その構想を実現するための機構の検討、および、基礎実験を行った。その後、二回の試作・改良を経てロボット杖のプロトタイプを完成させた。

①ロボット杖の開発コンセプトの明確化

まず、通常の杖の欠点を補うためにロボット杖に必要な機能を検討した。一本杖は安定性の面で劣るため接地面に対して対向モーメントが働く多脚型が望ましいが、凹凸のある不整地に突いた場合には接地面に対応できずにかえって倒れやすく不利である。そこで、開発する歩行補助杖では、多脚型杖の各支持脚に独立に伸縮のコンプライアンス (柔軟性) を持たせ、路面形状 (凹凸) に対応する段差吸収特性を実現することを考えた。これは同時に、着地時の衝撃を吸収するサスペンションとしての役割も担う。ただし、体重を支持する際には支持脚が固い状態で無ければならず、実現すべき杖は“柔らかくて硬い杖”，つまり、柔軟性を自由に変えられる杖である。また、杖の傾きや接地状態に応じて転倒の危険性を使用者に警告したり、支持脚の伸縮によりバランスの安定化支援を行ったりする高次機能も付加することで、転倒予防性能を向上させることができると考えた。なお、杖の軽量化と使用時の安全性を考慮し、モータなどのアクチュエータは極力持たず、受動的な機構を主として支援機能を実現することを念頭におくことにした。

②ロボット杖実現のための機構の検討

次に、上記のコンセプトに基づいて、ロボット杖の基本機能である支持脚の柔軟性の可変機構を検討した。支持脚の柔軟性は、例えば機械式バネでも実現できるが、単純なバネでは柔軟性を変えられない。そこで、機能性流体の一つであるMR流体 (磁気粘性流体) をバネと組み合わせてこの機能を実現することを考えた。MR流体は、ベースオイルに鉄の微粒子を分散させた流体で、外部からの磁界により微粒子が架橋することで粘性が変化する。そのため、杖の着地時や凹凸吸収時には粘性を低くしてバネを動きやすくし、体重支持を行う際には粘性を高めて固化させるなど、様々な状況に対応可能である。図10に、考案した伸縮機構の模式図を示す。車のサスペンションのようなバネ+シリンダ (可変ダンパ) 構造ではサイズや重量に問題があるため、ベローズの中にMR流体を封入する構造としたのが大きな特徴で、磁界が印加されていない状態ではベローズがバネの役割を果たし、流路にかかる磁界の強度を上げればMR流体を固化させてバネの動きを抑制し体重を支持させることも可能となる。

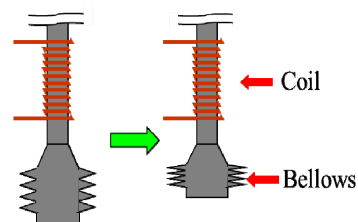


図10 MR流体を用いた可変伸縮機構

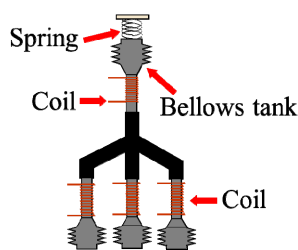


図 1 1 ロボット杖の構想図

図 1 1 は、ロボット杖への応用イメージである。前述の可変伸縮機構を各支持脚に配置し、戻しバネを備えたリザーバタンクを上部に設置する。流路を共通化し、各流路に印加する磁界を独立に制御することで、状況に応じて選択的に MR 流体の流れを調整可能である。これにより、不整地への接地時に荷重が集中した脚の柔軟性を増して段差を吸収したり、体重支持の際の支持脚間の負荷分配を行ったりすることができる。脚の収縮によって上方に押し上げられた流体は、リザーバタンクに一時的に貯蔵され、無負荷時にタンク上部の戻しバネによって下方に戻される。

③機構部の試作と機能確認実験

実際に MR 流体とベローズを用いた可変伸縮機構を設計製作し、コイルの巻き数や長さ、流路径、印加電圧などの仕様決定と機能の確認実験を行った。制御の簡便さを考慮し、磁界の強度の調整は印加電圧一定のまま PWM 制御により行うことにした。実験の結果、コイルの周囲に磁気シールドテープを巻くことで十分な磁力が得られ、また、PWM 制御により、目標とする可変伸縮特性が得られることを確認した。

4. 研究成果

(1) 高齢者の歩行状態を的確に診断するための歩行計測・診断システムの開発

ここでは、開発したシステムを用いて実施した高齢者の歩行分析の主な結果と成果について説明する。

①高齢者の歩行タイプの分析

診断した 72 名の高齢者の歩行タイプ毎の人数は、すり足歩行（低速）が 38 名、すり足歩行（高速）が 9 名、膝の引き上げ歩行（背屈）と膝の引き上げ歩行（低屈）が 3 名ずつ、若年者に近い歩行（背屈）が 12 名、若年者に近い歩行（低屈）が 7 名であった。また、複数年に渡る経年変化の計測も含めた延べ人数 147 名のうち、計測の直近 1 年間の転倒経験者の割合を歩行タイプ別に見ると、すり足歩行（低速）は 7.2%、すり足歩行（高速）が 25.0%、膝の引き上げ歩行（背屈）が 28.6%、膝の引き上げ歩行（低屈）が 33.3%、若年者に近い歩行（背屈）が 29.4%、若年者に近い歩行（低屈）が 10.0% だった。すり足歩行（高速）や膝の引き上げ歩行の転倒率の高さは予

想通りであったが、すり足歩行（低速）の転倒率の低さと若年者タイプの転倒率の高さは予想に反する結果となった。すり足歩行（低速）に属する高齢者は、自己効力感尺度が低く普段から慎重な歩行をしているのに対し、すり足（高速）と若年者タイプの高齢者は相対的に活動度が高く、転倒リスクが増えるのではないかと推測される。

②歩行の経年変化の調査

複数年にまたがって調査に協力頂けた対象者に対して、歩行の経年変化の調査を実施した。その結果、歩行タイプを維持できていた対象者も多かったが、若年者タイプからすり足歩行や膝の引き上げ歩行へと変化した対象者も相当数存在した。歩行タイプが変化した対象者には直近一年間の転倒経験者が多く含まれており、歩行状態の継続的な診断が重要であることが確認できた。逆に、すり足歩行から若年者タイプに歩行が改善されていた事例もあり、毎回の計測後にフィードバックしているアドバイスシートによって、歩き方を意識するようになったとの声も聞かれた。

③曲線路及び仮想障害物またぎ動作の分析

歩行計測システムを用いて、曲線路の歩行や仮想障害物またぎ動作の計測と分析を行った。曲線路やまたぎ時の体幹の動揺やリズムの乱れ、足裏圧力の遷移の様子などを分析し、若年者の計測データと比較したところ、高齢者の歩容の様々な特徴が見えてきた。例えば、図 1 2 は若年者と高齢者の歩行中の足裏圧力の時間推移を比較したものである。若年者は、踵での着地後に圧力の中心が足の外側に一旦遷移し、親指側に戻って踏み切っている“あおり歩行”をしているのに対して、高齢者は着地後に圧力中心がすぐに内側に切り込んだり、歩によって圧力中心の移動軌跡がばらばらだったりする例が目立ち、数値の統計分析でもそれが実証された。また、図 1 3 のように、高齢者には体幹の左右へのぶれの大きさやリズムが均一でない例が多く見られた。

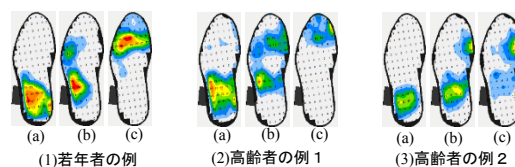


図 1 2 足裏圧力の遷移

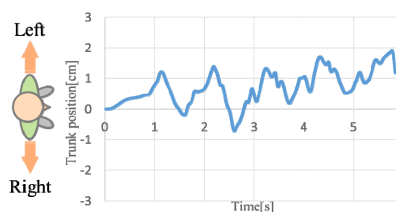


図 1 3 高齢者の左右への体幹動揺の例

また、転倒経験の有無と歩行特徴との関連を調べたところ、左右の体幹バランスが悪くかつ筋力の低い高齢者に転倒が集中していることがわかった。さらに、2つ目の障害物をまたぐ際の踏み切りには有意な差があることも判明した。

本研究で得られた知見は、高齢者の歩行状態の把握や今後の転倒要因の解明につながるものであり、さらに詳細な分析を進めながら、歩行改善のための歩行訓練法の開発を行って行きたい。

(2) 不整地での安全な利用を可能にする倒れない杖(ロボット杖)の開発

前述の機構の検討結果を元に具体設計を行い、ロボット杖のプロトタイプを製作した(図14)。二度の試作を経て完全な自立化に成功し、内蔵したマイコンボードにより制御が可能な状態になっている。各支持脚の底部にはシート状の圧力センサを配置し、マイコンボードに搭載されているジャイロセンサ・加速度センサから得た杖の姿勢と合わせて、段差吸収とバランス制御に利用している。電源は、電磁コイル用の単三充電電池4本とマイコン用の9V電池1個で約3時間使用できる。全体の重量は約1.2kgとなった。

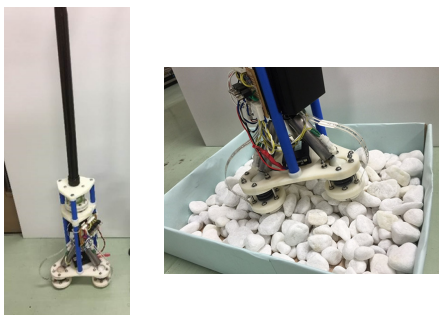


図14 完成したロボット杖(左)

完成した杖の評価のため、Japan Robot Week2016をはじめ、学会の研究会や福祉施設などで多くの人に体験をして頂き、砂利の上で着いても安定感がある、地面に吸い付いているようだとの評価を頂くことができた。メディアにも多く取り上げられ学会賞も2件受賞することができた。しかしながら、実用化の段階に進めるためには、更なる軽量化やコンパクト化、高齢者への個別対応や歩行に合わせた制御の最適化などの必要があり、今後、継続して研究を進めていく予定である。

本研究は静岡大学と浜松医科大学の倫理委員会の承認を得て実施されました。ご協力頂きました計測対象者および施設職員の皆様に深く感謝申し上げます。

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0件)

[学会発表] (計14件)

- ①伊藤 友孝, 屋外での歩行を支援するロボット杖の開発, 第29回日本生体医工学会BME on Dementia研究会, 2017年3月5日, 富塚倶楽部(静岡県・浜松市)
- ②Syota Okuno, Tomotaka Ito, Analysis of factor of elderly people's fall by using gait measurement and diagnosis system, 21th Shizuoka Forum on Health and Longevity, Nov. 25, 2016, コンベンションアーツセンター(静岡県・静岡市)
- ③伊藤友孝, 秋山泰彦, 大下彦太, MR流体を用いた高齢者用歩行補助杖の改良, Robomec2016, 2016年6月9日, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)
- ④伊藤 友孝, 奥野 彰太, 海瀬 悟, 鈴木みずえ, 谷 重喜, 足裏圧力の計測に基づく高齢者の歩行特徴の分析, Robomec2016, 2016年6月9日, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)
- ⑤Tomotaka Ito, Satoru Umise, Mizue Suzuki, Shigeki Tani, Gait Measurement and Evaluation System for Diagnosis of Elderly People's Gait Condition to Prevent Fall, IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, July 9, 2015, Busan (Korea)
- ⑥Tomotaka Ito, Genta Oshita, Development of MR fluid-based Gait Assist Cane for Elderly People, IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, July 9, 2015, Busan (Korea)
- ⑦伊藤 友孝, 海瀬 悟, 中澤 悠, 鈴木みずえ, 谷 重喜, 高齢者の転倒予防を目的とした仮想障害物またぎ動作の分析, 第54回日本生体医工学会, 2015年5月8日, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)

[その他]

ホームページ等

<http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~tmtitou/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 友孝 (ITO, Tomotaka)
静岡大学・工学部・准教授
研究者番号: 00283341

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

谷 重喜 (TANI, Shigeki)
浜松医科大学・医学部・教授
研究者番号: 80217116

鈴木 みずえ (SUZUKI, Mizue)
浜松医科大学・医学部・教授
研究者番号: 40283361