

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06260

研究課題名(和文) 高齢者の健康な自立歩行を包括的に支援するロボティックツール群の開発

研究課題名(英文) Development of Robotic Tools to Support Healthy Walking for Elderly

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高齢者の転倒を予防しながら自発的な歩行を促すことを目的に、歩行計測診断システムに加え、ロボット杖や歩行訓練補助装置等の福祉機器の開発を含む「ロボティックツール群」を開発することを重点課題とした。本研究では、まず、個々の歩行状態を的確に計測して分析する歩行計測診断システムを構築し効果を確認した。また、歩行中の突き方や傾きに応じて自動的にバランス制御されるロボット杖も開発し、スマートフォンと連携して歩行状態のモニタリングを行う機能も搭載した。さらに、施設設置型の歩行訓練補助装置も開発し試験利用により機能確認を行った。一連の研究により、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。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、歩行を的確に計測して診断するシステムの開発に加え、安全な歩行を効果的に支援するバランス機能付のロボット杖や、使用者が歩行訓練中の状態やバランスをリアルタイムに知ることができる歩行訓練補助システムなどの福祉機器の開発を行った。個々の歩き方の特徴を明確化することで、転倒予防や歩行トレーニングに効果的に生かすことができるため、社会的意義が大きいと考える。また、転倒予防には、歩行診断や各種の支援機器を包括的に利用していくことが重要で、今回の成果をさらに発展させていきたいと考えている。

研究成果の概要(英文)：Recently, the population ratio of elderly people is increasing rapidly and how to prevent the gradual decrease of the walking ability and how to prevent the elderly people's fall are most urgent problems. In this research, we aimed to develop effective robotic tools including a gait measurement and diagnosis system and a robotic gait-assist cane and a gait training system. In this research, we conducted the gait measurement experiments for over 250 elderly people and develop a gait diagnosis system based on the analyzed data and a machine learning technique. It can be applied for the clinical gait analysis by analyzing the gait feature values and by detecting the gait type of each person. In addition to that, we designed and developed a robotic gait-assist cane which has automatic balancing functions and a gait training assist system which can visualize the gait condition of the user in real time. In this study, we could obtain important knowledge about the prevention of falls.

研究分野：ロボット工学，制御工学，福祉工学

キーワード：高齢者 転倒予防 歩行計測と分析 福祉機器 ロボット技術

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

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。転倒予防には、歩行状態の的確な診断やそれに基づくアドバイスやトレーニング、健康的な歩行を支援する各種の福祉機器などを包括的に利用することが大切で、本研究の重点課題と捉えている。

そこで本研究では、高齢者の健康的で自立的な歩行を包括的に支援することを目的に、歩行診断、歩行支援、歩行トレーニングのための一連の技術および機器を開発することを目指すことにした。

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包括的な支援を行うことを目的に、三つの重点課題に関して取り組みを行った。以下に、各重点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・診断システムの開発

高齢者の転倒を予防するためには、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である。しかしながら、現状の歩行診断は主観的な判断によってなされることが多い。判断の助けになるように、Tinetti 歩行評価などの観察評価や、転倒予防自己効力感尺度・転倒スコアなどのアンケート式の評価、10m 歩行テストなどの簡易計測なども使用されているが、個々の歩行特徴や歩き方の問題点を明らかにするものではなく、直接的な改善アドバイスにつながりにくいという大きな問題がある。

そこで重点課題(1)では、高齢者個々の歩行状態をその場で簡単に計測して、歩き方の特徴や注意点を明瞭化できる歩行計測・診断システムの開発を行った。今回の研究期間では、計測・分析件数を大幅に増やすことによって、これまでに開発してきた診断手法を発展させて診断精度を高めるとともに、Tinetti 歩行評価や転倒予防自己効力感尺度、転倒スコアなどの指標との関連についても調査し、様々な指標を併用することの意義を確認することにした。

(2) スマートフォンと連携して歩行支援を行える自動バランス機能付きロボット杖の開発

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、杖などの支援機器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、一般に広く使われている一点杖や多点杖は屋外の不整地では安定性が低く、実際に転倒する事例が報告されている。それに対して本研究室では、平成 26 年度～28 年度の基盤研究（課題番号：26420197）において、杖の傾きや荷重の状態に応じてバランスを自動的に調整する機能を有し屋外の凹凸面でも安心して使用できるロボット杖を開発してきた。

重点課題(2)では、この機能をさらに発展させて包括的な歩行支援につなげるため、スマートフォンと連携させることで、個人の歩行状態や好みに合わせて杖の特性をカスタマイズできる機能や、杖の突き方や歩行状態をリアルタイムにモニタリングして使用者に知らせる機能などを実現することを目的とした。また、ロボット杖のバランス機能の歩行器への応用にも取り組んだ。

(3) 施設設置型の歩行訓練補助システムの開発

本研究室で開発してきた歩行計測診断システムは、精度よく歩行を計測して診断できる反面、価格面や専門性から、福祉施設での普段の活動の中で日常的に使用するには現状では適していない。そのため、歩行計測診断システムでの計測は健康診断のような詳細診断に用いるものとし、その結果を受けて普段は簡易的なシステムを使用することが望ましいと考えられる。各施設では、様々な転倒予防体操やバランス訓練が工夫して実施されているが、対象者が自分自身の状態や運動の効果を把握しにくいという問題がある。その場で自分の状態をチェックできることは、モチベーションアップや転倒予防にとっても効果的である。

そこで重点課題(3)では、施設職員でも簡単に使用できるセンサおよび方法を用いて、日常的な使用を可能とする施設設置型の歩行訓練補助システムを開発することを目的とした。

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

本重点課題では、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て歩行計測と調査を実施し、歩行計測・診断システムの歩行特徴診断機能の向上と診断精度の向上に取り組んだ。図 1 は、開発して計測に利用した歩行計測・診断システ

ムである。角速度センサと加速度センサを複合した慣性センサを身体各部にベルトで装着し、歩行を計測する。靴にはインソール型の分布荷重センサを挿入し、歩行中の足裏荷重やバランス状態を測定することが可能である。本システムでは、計測で得られた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ようになっている。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なども実現されている。

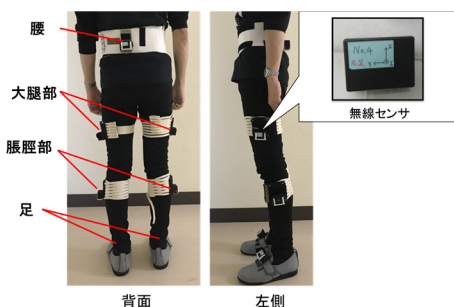


図1 歩行計測・診断システム

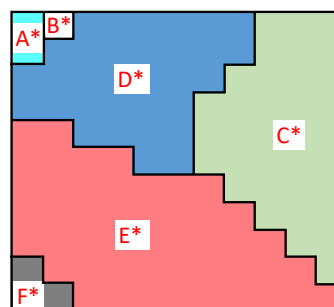
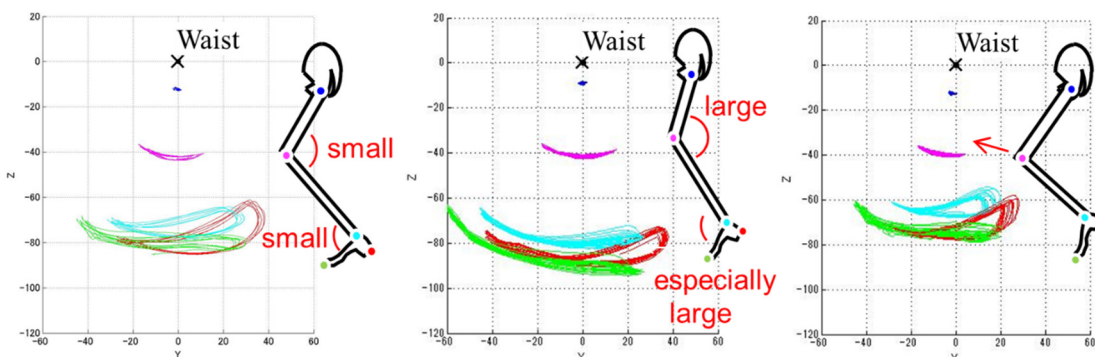


図2 歩行診断マップ

上記のシステムを用いた計測により計 275 例の高齢者の歩行データを収集できたことで、歩行状態の詳細な分析が可能となった。本システムでは、自己組織化マップ (SOM) とクラスター解析の手法を組み合わせることで歩行特徴量を分析することで、高齢者の歩容のタイプを分類して歩き方の特徴を分類したり、個人ごとの差異を明確化したりすることができる。分析した結果は、「歩行診断マップ」として可視化して残すことができ、それに当てはめることで新規の対象者の歩行状態を簡単に診断することもできるようになっている。図2は今回多くのデータを用いて新たに構築した歩行診断マップで、各領域は歩き方のタイプ (以後、歩行タイプ) を表している。今回の研究で計測データ数が大幅に増えたことで分類の精度が大きく向上し、歩行状態の把握や診断がしやすくなった。A*タイプは「若年者に最も近い歩行」で、足を前後に大きく動かし、膝や足関節をよく曲げ伸ばして歩いている群で転倒リスクが低い群である (図3a)。B*タイプ、C*タイプ、D*タイプは、いずれもすり足歩行をしている群で、B*は「底屈すり足歩行 (高速)」 (図3b)、C*は「すり足歩行 (低速)」、D*は「すり足歩行 (高速)」と名付けた。いずれも歩行中にあまり膝関節が曲がっておらず足先が地面からあまり上がっていない群であるが、中でも B*タイプは足が底屈していて地面とのクリアランスが群平均で 0.7cm と極端に小さいことがわかった。躓きによる転倒を引き起こしやすいため注意が必要なタイプである。また、E*は「膝の引き上げ歩行 (弱)」 (図3c)、F*は「膝の引き上げ歩行 (強)」で、脚 (膝関節位置) が体の後方まで行かない歩き方をしている群である。体に近いところから脚を振り出す必要があり、地面に摺らないように膝を上方に引き上げるようにして足を前方に送り出している。中でも E*タイプは足の引き上げが弱く、思ったように足が上がらないと躓きや転倒につながる歩き方である。実際に、歩行診断後1年間の転倒を調査したところ、転倒は B*タイプと E*タイプに集中する結果となった。

この結果を受けて、Tinetti 歩行評価や転倒スコアなどの他の指標との比較も行い、複数の指標を併用する必要性を確認した。その結果については後述する。



(a) A*若年者に最も近い歩行 (b) B*底屈すり足歩行 (高速) (c) E*膝の引き上げ歩行 (弱)

図3 代表的な歩容タイプの関節の運動軌跡

(2) スマートフォンと連携して歩行支援を行える自動バランス機能付きロボット杖の開発

これまでに開発してきたロボット杖とスマートフォンとを連携させることで、個人の歩行状態や好みに合わせて杖の特性をカスタマイズできる機能や、杖の突き方や歩行状態をリアルタイムにモニタリングして使用者に知らせる機能などを実現した。図4に、開発したロボット杖の

様子を示す。ロボット杖に内蔵したマイコンには Bluetooth が搭載されているため、外部の機器と連携させることが可能である。また、多くのスマートフォンには慣性センサに加えてGPSなども搭載されているため、杖に内蔵されたセンサの情報とスマートフォンに内蔵のセンサの情報を統合して利用することで、安全支援や活動の記録、見守りなど多くの応用展開が可能になる。

今回の研究期間では、将来の応用展開を見据えたスマートフォンアプリを開発し、ロボット杖のバランス制御の調整機能や歩行モニタリング、ユーザーへの情報提示などの機能を実現した。また、ロボット杖のバランス制御技術を歩行器に応用することにも取り組んで効果を確認した。

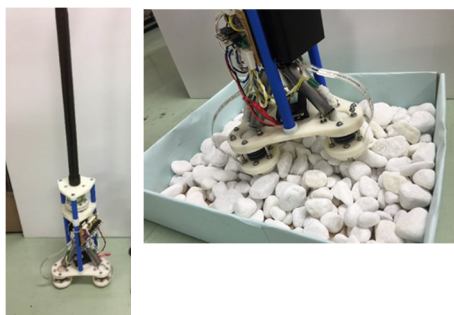


図4 バランス制御機能付ロボット杖

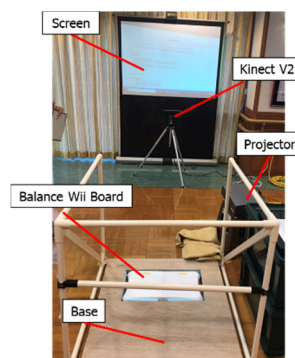


図5 歩行訓練支援システム（プロトタイプ）

(3) 施設設置型の歩行訓練補助システムの開発

第1段階では、歩行車を改造して自由に歩き回ることができるタイプ（プロジェクタを用いて周囲に情報が提示される）の歩行訓練補助システムを開発したが、非拘束で簡易的に計測可能で、施設に設置して気軽に利用できることを考慮して、最終的に図5のような第2段階のプロトタイプ（施設に恒常的に設置して使用するタイプ）に変更して開発を行った。Microsoft社のKinect V2と任天堂のWii Balance Boardを自作のアプリケーションによって連携させることで、体の動きや荷重バランスをリアルタイムに計測しながら、各種の運動や訓練を行うことが可能となる。計測した情報は、プロジェクタやテレビモニタを用いて可視化してユーザーに提示することができるため、自分自身の状態をリアルタイムに把握しながら運動を行うことができるのが特徴である。アプリケーション内のプログラム次第で、体重移動や片足立ちなどのバランス訓練や歩行タイプ別の足上げ訓練を行ったり、歩行状態のチェックを行ったりすることができる。自分自身の状態をその場でチェックすることにより様々な気づき生まれ、転倒予防意識の向上やモチベーションアップを期待することができる。

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

前述のように、今回の研究によって計測数が大幅に増加したため、診断の精度が向上し歩行特徴の分類も明確化された。そこで、歩行計測と同時に実施したTinetti歩行評価や転倒予防自己効力感尺度、転送スコアの調査結果との関連についても詳細に検討を行った。その結果、Tinetti歩行評価や転倒予防自己効力感尺度で高得点であった群にも、調査後1年間で多くの転倒が発生しており、これらの指標では転倒リスクを正しく評価・スクリーニングできていないことが確認された。開発した歩行計測・診断システムで取得した歩行タイプや各歩行特徴の分布を確認すると、Tinetti歩行評価、転倒予防自己効力感尺度ともに様々な点数帯に底屈型やすり足型の歩行をしている方が散らばっており、歩き方の特徴の異なる対象者を画一的な指標で評価してしまっている点が問題になっていることがわかった。転倒スコアについては、直近の転倒歴や躓きやすさの自己申告が点数に含まれているため、転倒リスクの評価としては他よりも的中率が高く、転倒スコア高群（転倒リスク高）の50%がその後転倒していた。しかし、様々な歩行タイプが広く分布して他の点数帯にも転倒が多く発生していることや、最初の転倒を起こす前に転倒リスクを評価するという目的で考えれば改善が必要であることがわかった。しかし、これらの指標は生活環境や習慣なども項目に含まれるため評価にはとても重要であり、歩行計測・診断システムの結果と併用して判断することが重要であることが示唆された。詳細については、第59回日本生体医工学会（引用文献①）やIMPACT（引用文献④）にて発表した他、今後の論文で報告させて頂く予定である。

(2) スマートフォンと連携して歩行支援を行える自動バランス機能付きロボット杖の開発

前述のように、スマートフォンとの連携によりロボット杖の機能向上に取り組んだ。実現した機能は、①杖の傾きおよびバランス制御のカスタマイズ機能、②ロボット杖のセンサとスマートフォンのセンサの連動による歩行状態計測機能、③安定歩行（杖のバランス状態）のモニタリングおよびユーザーへの提示機能の三つである。図6は、Android用に開発したアプリケーションの画面の例である。これは開発者用の詳細モニタの画面例であるが、表示を切り替えれば、傾き制御やバランス制御の強さや範囲を自由に設定することができるようになっている。また、歩行状態の計測機能では、杖を突いていない方の足の接地・離地タイミングをスマートフォンで計測

して、ロボット杖に内蔵のセンサの情報と統合して判定し、ロボット杖をどのタイミングで、どのくらいの力で突いているかなどを調べることが可能になっている。さらに、杖を地面に突いて安定な状態になるとスマートフォンからピッと音が出てユーザーに知らせる安全機能も搭載している。ロボット杖の詳細は、引用文献②③の論文の中で報告している。

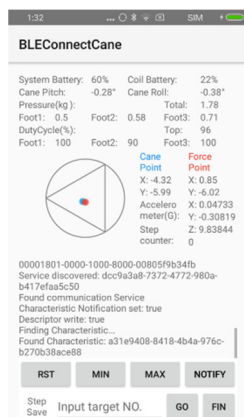


図6 ロボット杖用アプリの画面例

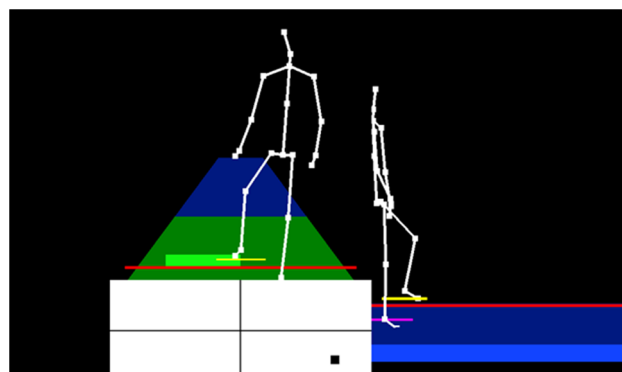


図7 仮想障害物またぎ動作時の画面提示の例

(3) 施設設置型の歩行訓練補助システムの開発

開発した歩行訓練補助システムのプロトタイプを福祉施設に通所する高齢者に使っていたが、使用感や効果を確認した。実験では、歩行中（Wii balance board 上での足踏み動作中）の脚の動きや荷重バランスの計測のほか、仮想障害物のまたぎ動作の計測、Wii balance board への乗り降りや体重移動など、日常訓練の延長として様々な動作を計測した。画面上には、それぞれの運動に合わせて歩行状態やバランス状態を提示し、自分自身の状態を常に把握できるようにした。図7は仮想障害物のまたぎ動作時の提示情報の例で、画面中央にはKinectで捉えた全身の動き（後方視点、側方視点）を、画面下には荷重中心の変化を提示している。荷重の移動から使用者の歩行を判断して、あたかも実際に歩いているかのように仮想の床（と障害物）が奥から手前に向かって流れてくるようになっている。

使用者からのアンケート調査の結果、「表示の内容を理解して楽しく運動できた」という意見が多く、また、「自分が思っていたよりも足が上がっていないことに気が付いた」などの何らかの新たな気づきがあったという意見も多く聞かれた。計測結果の統計分析からは、各歩行タイプともに障害物またぎによって足が上がっている様子や、体重移動やバランスのとり方に大きな差異があることなど様々な知見が得られ、このような訓練補助システムを通常の活動に導入することの意義が見いだされた。今後は、長期の使用による効果の確認や歩行タイプ別の訓練プログラムや見守りプログラムの考案に取り組むたいと考えている。

<引用文献>

- ① 伊藤 友孝, 白井 智貴, 渡邊 瑛亜, 鈴木 みずえ, 谷 重樹, 高齢者の歩行診断と施設設置型歩行トレーニング装置の開発, 第59回日本生体医工学会, 2020, OS-1-5-3.
- ② 兼子 翔輔, 賀 禎哲, 伊藤 友孝, 高齢者の不整地での歩行を支援するロボット杖の開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 3, 2019, 57-66.
- ③ 伊藤 友孝, 兼子 翔輔, 賀 禎哲, 安定な歩行を支援するロボット杖の開発—特性評価とスマートフォンとの連携機能の開発—, 地域ケアリング, Vol. 21, No. 11, 2019, 52-57.
- ④ Tomotaka Ito, Robotics for safe and comfortable lives, IMPACT ADVANCING TECHNOLOGY, SCIENCE IMPACT LTD, 2019, 64-66.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 兼子翔輔, 賀 憚哲, 伊藤友孝	4. 巻 37-3
2. 論文標題 高齢者の不整地での歩行を支援するロボット杖の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 57-66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.37.253	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 伊藤 友孝, 兼子 翔輔, 賀 憚哲	4. 巻 21-11
2. 論文標題 安定な歩行を支援するロボット杖の開発 - 特性評価とスマートフォンとの連携機能の開発 -	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地域ケアリング	6. 最初と最後の頁 52-57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 石井直樹, 伊藤友孝
2. 発表標題 バランス制御機能付き不整地対応歩行器の開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兼子翔輔, 賀 憚哲, 伊藤友孝
2. 発表標題 高齢者支援用ロボット杖のためのスマートフォンとの連携機能の開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤友孝, 奥野彰太, 白井智貴, 鈴木みずえ, 谷 重喜
2. 発表標題 転倒予防のための高齢者の歩行診断と歩行訓練システムの開発
3. 学会等名 第57回日本生体医工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤友孝
2. 発表標題 高齢者の歩行解析と不整地での歩行を支援するロボット杖の開発
3. 学会等名 日本転倒予防学会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兼子翔輔, 伊藤友孝
2. 発表標題 Development of robotic cane for assisting elderly people and walking support by integration of smartphone
3. 学会等名 第23回静岡健康・長寿学術フォーラム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shota Okuno, Tomotaka Ito, Mizue Suzuki, Shigeki Tani
2. 発表標題 Gait Diagnosis for Elderly People to Prevent Fall and Development of Training Assist Tool using Augmented Reality
3. 学会等名 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shota Okuno, Tomotaka Ito
2. 発表標題 Development of gait diagnosis and training assist tool for elderly people to prevent fall
3. 学会等名 第22回静岡健康・長寿学術フォーラム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤友孝, 兼子翔輔, 賀 憚哲
2. 発表標題 歩行を補助するロボット杖の開発と評価
3. 学会等名 第58回日本生体医工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤友孝, 白井智貴, 渡邊瑛亜, 鈴木みずえ, 谷 重樹
2. 発表標題 高齢者の歩行診断と施設設置型歩行トレーニング装置の開発
3. 学会等名 第58回日本生体医工学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>【研究成果の掲載】 Tomotaka Ito, Robotics for safe and comfortable lives, IMPACT ADVANCING TECHNOLOGY, SCIENCE IMPACT LTD, 2019, 64-66.</p> <p>【研究成果の報道】 お年寄りに安心を”ロボット杖”, SBSテレビブアイニュース新作アプリコーナー, 2017年.</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	谷 重喜 (Tani Shigeki) (80217116)	浜松医科大学・医学部・教授 (13802)	
連携研究者	鈴木 みずえ (Suzuki Mizue) (40283361)	浜松医科大学・医学部・教授 (13802)	