

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：54701
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2017～2021
 課題番号：17K01606
 研究課題名(和文)「転倒覚」を誘発するヒヤリ・ハット対応AR(拡張現実)方式松葉杖歩行訓練環境

 研究課題名(英文)Crutch Walk Training System for Induction of Sensation to be Falling Using AR Technology considering Near Miss Accidents

 研究代表者
 津田 尚明(Tsuda, Naoaki)

 和歌山工業高等専門学校・知能機械工学科・准教授

 研究者番号：40409793
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、松葉杖歩行初心者のための訓練装置を開発した。松葉杖を使い始める段階で使用方法のノウハウを習得するための訓練システムである。これは主に転倒覚提示装置(FSD)とヘッドマウントディスプレイ(HMD)から成る。FSDは松葉杖に付け松葉杖のバランスを意図的に崩し「転倒しそうになるヒヤリ・ハット感覚(転倒覚)」を提示する装置である。HMDは訓練中の患者に装着してもらい提示された仮想障害物への対処法を訓練するものである。実験の結果、システムを用いて訓練した結果、身体バランスの指標である身体加速度の変化を抑制しやすくなり、対処力が向上したと推察された。

研究成果の学術的意義や社会的意義
 急に下肢を負傷し治癒までの間の歩行に松葉杖を使用する、いわば松葉杖歩行の初心者のための訓練装置の開発を目指した。なぜなら、松葉杖の正しい使用方法を知らないまま試行錯誤的に使用すると、使い方に誤った癖が付いてしまったり、転倒など二次的な事故の原因となりうることが問題とされるからである。開発したシステムを用いて被験者に訓練してもらった結果、早く松葉杖歩行に慣れる傾向を確認した。このことより、本研究で提案したAR(拡張現実)技術を用いた訓練方法の意義と可能性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, a training system for inexperienced patients of crutch walks were developed. With the developed system, such patients were expected to acquire an expertise in crutch walks. The system consists of FSD (Falling Sensation Device) and HMD (Head Mounted Display); FSD was embedded into the crutch, and it was expected to present a sense to be falling. Since this perturbed the normal crutch walking motion, the patients were required to keep the body balance. The crutch user also wore a HMD while a walk training. When a virtual obstacle, which resembles a rolling ball, was presented on HMD during a walk training, the user could see the obstacle as if it appeared in his/her path. Experiments for evaluation of the developed system were conducted. The participants were expected to land the uninjured leg as soon as possible, ceasing to walk and standing still. The results showed the possibility of contributing to the crutch walk trainings of the developed training system.

研究分野：福祉・介護用ロボット

キーワード：松葉杖歩行訓練器 転倒覚 身体加速度 リハビリテーション 福祉工学

1. 研究開始当初の背景

急な怪我で一時的に松葉杖を使う患者は松葉杖に関する十分な知識と経験が無いことが多い。その場合、治癒までの期間、試行錯誤的な方法で松葉杖を使って過ごしがちである。このとき松葉杖の使い方によって不適切な癖が付くと身体バランスを崩しやすく、そうなる二次的な怪我の原因となり得るため、使い始めの段階で少しでも矯正すれば転倒リスクを減少できると考えられる (Disabled Living Foundation, Choosing Walking Equipment, 2013)。

これまで申請者は、科研費 (23700680, 26750236) の補助を受けて松葉杖歩行の計測・訓練装置を開発してきた。最初に、松葉杖歩行者の身体バランスは身体加速度と相関があり、その身体加速度の変化傾向は大腿の振れ幅の変化傾向と相関がある、すなわち、大腿の動作傾向が分かれば身体バランスを推定できる (大腿が大きく振れる時、加速度も大きくなる) ことを実験的に明らかにした (図1) (Tsuda ら, MIPE2012)。続いて、家庭用ゲーム機のモーションセンサ (Kinect) とロボット掃除機 (Roomba) を使った松葉杖歩行の簡易計測システム「見守り・付き添い型ロボット」を開発した (Tsuda ら, TAT2016) (図2)。これは Kinect で患者の大腿の動作を計測しつつ Roomba の移動機構で患者に付き添って走行し、歩行方法のアドバイスをパソコンのモニタにリアルタイムに表示するロボットである。3次元動作計測装置など専用のセンサで計測するほど正確ではないものの、(平坦で障害物のない理想的な環境であれば) 歩行の安定性の評価指標となる身体バランスを実用上問題の無い精度で推定し、評価できた。

その後、実用化の観点から検討した結果、訓練装置としての効果をより高めるには、障害物や階段があるなど実際の松葉杖使用者が転倒の危険を感じる状況での訓練が求められると考えた。そこで本研究では、あえて転倒しやすい松葉杖歩行動作を繰り返し体験する訓練を提案した。それが、AR (拡張現実) 空間での訓練である。AR 空間では、実際には安全な状況に居るにもかかわらずあたかも危険な動作を実体験するような、リアリティのある訓練が実現できると考えたからである。

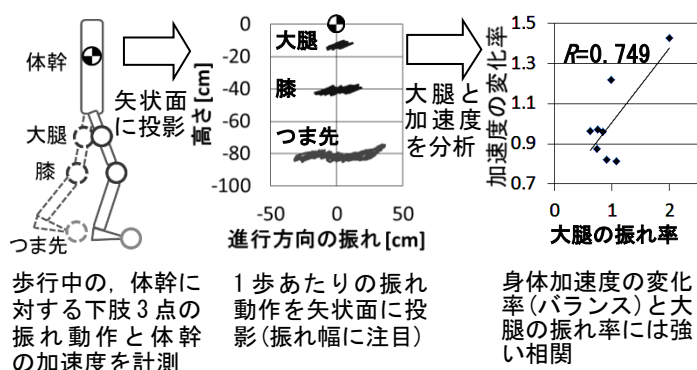


図1 松葉杖歩行患者の身体加速度と大腿の動作



図2 見守り・付き添い型ロボット

2. 研究の目的

本申請では、新たに、身体のバランスを崩して転倒しそうになるヒヤリ・ハットする感覚 (これを「転倒覚」と呼ぶ) を提示できる訓練システムを提案・開発した。システムを構成する1つはFSD (Falling Sensation Display) である。これは松葉杖に取り付けて杖のバランスを制御するもので、杖のバランスを崩すことで結果として使用者に「転倒覚」を感じさせる。現実的なヒヤリ・ハット感覚を誘発する本申請の核となる新技術 (装置) である。もう1つは、市販のHMD (Head Mounted Display) で仮想的な障害物を視覚提示する機能である。これらを連携させて使用することで、リアリティのある危険を体験できる訓練環境を構築する。

3. 研究の方法

3.1 FSDの開発 (フライホイール型)

本研究で最初に提案したFSDの概念図を図3に示す。装置の内部にギアを介してモータで駆動される錘 (フライホイール) があり、これを駆動することで装置に反力を発生させ、松葉杖のバランスを崩すことを目指した。

まず、開発する装置の構成部品、すなわち松葉杖とFSD、モータなどの質量や大きさといったシミュレーションに必要なパラメータを定義し、全体の質量や慣性モーメントを算出した。そして、実際に松葉杖に外力が加わった状況を想定して、松葉杖の転倒運動をシミュレーションした。

この段階では、実際の松葉杖を使った検証実験も行った。検証実験では、松葉杖を直立させ、錘を使って水平方向にステップ状の力で引っ張って松葉杖が転倒する様子をジャイロセンサを使って計測し、先のシミュレーション実験の結果と比較した。その結果、シミュレーション実験と簡易的な実機実験の結果が同じ傾向であることがわかり、導出した松葉杖の動力学モデルが装置の動特性を表している、その後の設計開発に有用であることが確認できた。

続いて、それまでに作成した動力学モデルを元に FSD の各パラメータの最適値をシミュレーションで探求し、それらを用いて FSD の実機を試作した。しかし、被験者を募って予備実験したところ、装置が動作することは確認できたが、アンケート調査の結果、必ずしもすべての被験者が十分な「転倒覚」を感じることができなかった。理論的に導出した最適値と実用的な観点での最適値に違いがあることが原因であると考えられた。この方式の FSD のまま提示する慣性力を大きくするためにはフライホイールの重量を大きくする必要があるが、FSD の重量を大きくしすぎると通常の松葉杖の歩行に支障をきたすようになると考えられるため不適切であると判断した。

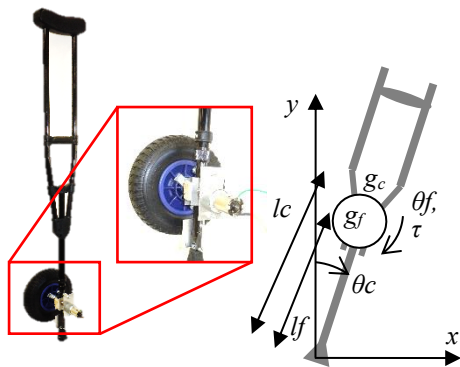


図 3 FSD (フライホイール型)

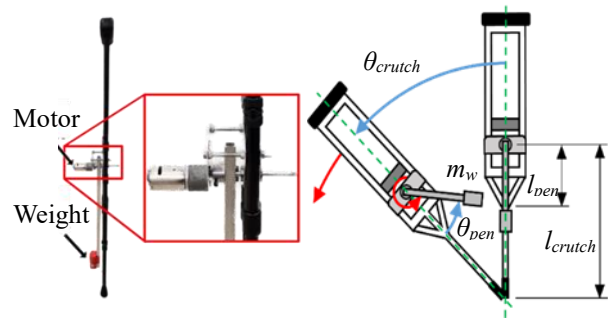


図 4 FSD (振り子型)

3.2 FSD の開発 (振り子型)

上述の問題点を解決するため、フライホイール型から振り子型に再考・設計し直した。概念図を図 4 に示す。これはモータによって振り子状の錘を振り上げることで反力を生成し、また重心を移動させることにより、松葉杖使用患者のバランスを崩し、転倒覚を与えようとするものである。

14 名の健康男性被験者 (平均年齢 20.4 ± 0.4 S. D. 歳, 平均身長 169.7 ± 4.8 S. D. (cm), 平均体重 61.7 ± 12 S. D. (kg)) の協力を得て、効果を検証する実験を行った。実験では、FSD を取り付けられた松葉杖を使用して、左足を健側肢、右足を患側肢とし、歩行路に記された 120 (cm) 間隔の目印を杖先で踏むように 5 歩分歩行してもらった。その間 2 歩目~4 歩目の途中に、被験者に伴走する実験者が FSD を駆動させる。駆動タイミングは杖先が地面から浮いている間とし、被験者は FSD 駆動後も 5 歩目まで歩行を続ける。実験の様子を図 5 に示す。このとき、被験者に取り付けた反射マーカの座標をモーションキャプチャシステムで計測及び記録した。FSD 駆動前と FSD 駆動後のモーションキャプチャシステムによる計測部位の変化を比較すると、44 回の歩行実験の内 38 回の結果に、何らかの変化がみられた。結果の例を図 6 に示す。個人差があったが、この場合は 4 歩目 (7 秒付近) に杖先の高さ (図 6 (a)), 肩の高さ (同図 (b)) に変化が現れた。すなわち、FSD が被験者の杖や身体バランスに影響を与えたことを確認した。

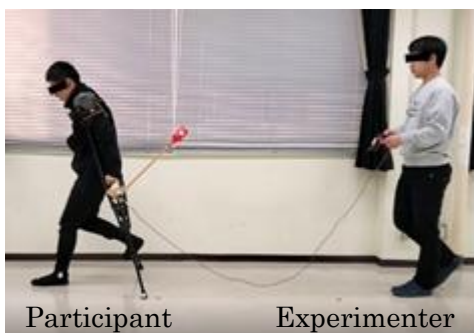
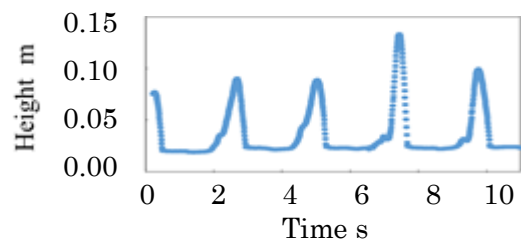
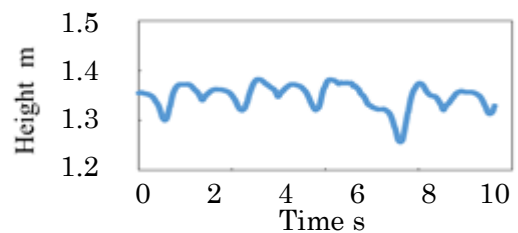


図 5 振り子型 FSD の検証実験



(a) Height of the tip of the crutch



(b) Height of the shoulder of a participant

図 6 振り子型 FSD の検証実験結果

3.3 HMD の導入

本研究で提案した松葉杖歩行訓練システムでは、患者は、前述の FSD を組み込んだ松葉杖を使いながら HMD を装着し松葉杖歩行を行う。HMD が歩行路面に置かれた AR マーカを認識すると、進路を横切るボールを想定した仮想的な障害物が HMD 上に提示され、患者は障害物がなくなるまで停止することが求められる。シースルー型の HMD を用いると、実際の景色とコンピュータグラフィクスで生成された画像を重ねて提示できるため、提示される情報を見ながら通常の松葉杖歩行と同じ方法で訓練できる。また、この方法では仮想的な障害物を使用するため、万が一障害物が患者と接触する状況になっても歩行動作に直接影響を与えないために安全であると考えた。本研究では HMD として MOVERIO BT-350 (EPSON 社製) を用いた。この HMD は加速度センサを内蔵し、歩行中の患者の頭部の動作も計測する。同時に、モーションキャプチャシステム (NaturalPoint 社製 OptiTrack) と腰部に取り付けた加速度センサ (ATR-Promotions 社製 WAA-010) で身体動作も計測した。

実験では、被験者に、松葉杖を用いて 5.0 m を 5 歩で歩行してもらった。歩行路面には 1.0 m おきに杖の着地点の目安をマークしておき、被験者にはその付近に松葉杖を接地するよう意識させた。また障害物と見立てた仮想の球体 (ボールを想定) が提示されると即座に安定した状態で立ち止まるよう指示した。実験環境を図 7 に示す。AR マーカと HMD 間の水平距離が 1.5 m になると、AR マーカの上を横切るように HMD 上に仮想の球体を提示した。歩行速度がばらつかないように、メトロノームを用いて 30 BPM (2 秒で 1 歩) のペースを提示しながら、歩行開始地点の違いごとに 5 回、頭部と体幹の加速度および歩行動作を計測した。

9 人の被験者 (A~I) の訓練 1 回目と 5 回目の障害物が提示されてから体幹部の加速度が一定になるまでの時間を図 8 に示す。F, G, H を除く 6 人が、障害物が提示されてから安定して停止するまでの時間が減少した。被験者 B, D, G に関しては遊脚期の中期や後期で障害物が提示されたが、B, D はその場合でも停止するまでの時間が減少した。また、減少時間には有意差が認められた (検定統計量 $t=2.26$, 有意水準 5%)。これより提案したシステムを用いて訓練を行うことで、遊脚期初期に加えて遊脚期後期でも、障害物が提示されてからより短時間で安定して停止できるようになり、対応力が向上したと考えられる。

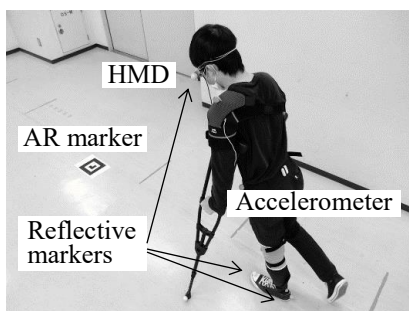


図 7 HMD を用いた歩行訓練

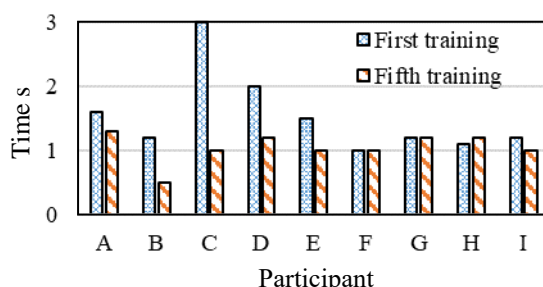


図 8 HMD を用いた歩行訓練結果

4. 研究成果

本研究では、急に下肢を負傷し治癒までの間の歩行に松葉杖を使用する、いわば松葉杖歩行の初心者のための訓練装置の開発を目指した。松葉杖の正しい使用方法を知らないまま試行錯誤的に使用すると使い方に誤った癖が付いてしまったり、転倒など二次的な事故の原因となりうると考えたからである。そこで、そのような危険を避けるための訓練、言うなれば、松葉杖を使い始める段階で使用方法のノウハウを習得するための訓練システムの開発を目指した。

本研究で開発した訓練システムは、主に転倒覚提示装置 (FSD) とヘッドマウントディスプレイ (HMD) から成る。FSD は松葉杖に取り付け松葉杖のバランスを意図的に崩し「転倒しそうなヒヤリ・ハット感覚 (転倒覚)」を提示する装置であった。HMD は患者が訓練時に装着し、そこに仮想の障害物を提示し、患者はその仮想障害物への対処を繰り返すことで、実際に進路に現れた現実の障害物にも対応できるようになると期待した。双方の技術を用いて AR (拡張現実) 的な訓練システムを目指した。

FSD については、当初の計画どおり開発したフライホイール型の FSD は、シミュレーションでは効果を確認したものの、試作機では提示される転倒覚が小さく、実験ではその効果を体感することが難しかった。そこでこれを振り子型に改良した。その結果、被験者の歩行動作に影響を及ぼす大きさの転倒覚を提示できるようになった。

HMD については、進路に転がってくるボールを想定した仮想障害物を HMD に提示する機能を開発し、被験者の歩行を計測する実験を行った。被験者が訓練に慣れて仮想障害物の提示を予想できる状態であっても、それに対処する訓練を繰り返した結果、身体バランスの指標である身体加速度の変化を抑制しやすくなり、対処力が向上したと推察された。

以上の結果から、当初の目的を達成したと考える。なお、本研究で行った被験者の協力を得た実験に際しては、「和歌山工業高等専門学校 人を対象とする研究倫理委員会」の承認を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 5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 Tsuda Naoaki, Miyamoto Seiya, Kado Yukiya, Uemura Sojiro, Nomura Yoshihiko, Kato Norihiko	4. 巻 26
2. 論文標題 Design of a pendulum-type crutch-walk training device for presenting sensation to be falling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 195 ~ 201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10015-020-00667-7	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 -
1. 著者名 Sojiro Uemura, Yukiya Kado, Seiya Miyamoto, Naoaki Tsuda, Norihiko Kato, Yoshihiko Nomura	4. 巻 1
2. 論文標題 Design of pendulum-type falling sensation device for crutch walk training	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the twenty-fifth international symposium on artificial life and robotics (AROB 25th 2020)	6. 最初と最後の頁 1105-1108
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 -
1. 著者名 Takuya Ehiro, Naoaki Tsuda, Norihiko Kato, Yoshihiko Nomura	4. 巻 1
2. 論文標題 AR training for obstacle avoidance of crutch walk	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the twenty-fifth international symposium on artificial life and robotics (AROB 25th 2020)	6. 最初と最後の頁 1109-1112
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 -
1. 著者名 Tsuda Naoaki, Ehiro Takuya, Nomura Yoshihiko, Kato Norihiko	4. 巻 33
2. 論文標題 Training to Improve the Landing of an Uninjured Leg in Crutch Walk Using AR Technology to Present an Obstacle	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1096 ~ 1103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2021.p1096	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 津田尚明, 多羅尾進, 藤原康宣	4. 巻 23(9)
2. 論文標題 松葉杖歩行訓練へのAR(拡張現実)技術の導入	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地域ケアリング	6. 最初と最後の頁 44,45
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 無
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 -

1. 著者名 津田 尚明, 多羅尾進	4. 巻 47(5)
2. 論文標題 ICTを用いた松葉杖歩行訓練システム	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Medical Science Digest	6. 最初と最後の頁 49,51
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 無
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 -

1. 著者名 Rio Sugiyama, Naoaki Tsuda, Norihiko Kato, Yoshihiko Nomura	4. 巻 1
2. 論文標題 Lumbar Posture Correction by Vibratory / Auditory Stimulation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 2019 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT2019)	6. 最初と最後の頁 ID:86
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 -

1. 著者名 Sugiyama Rio, Tsuda Naoaki, Kato Norihiko, Nomura Yoshihiko	4. 巻 1
2. 論文標題 Modeling of Crutch Walk Training System with Falling Sensation Device	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 IEEE International Conference on Computational Approach in Smart Systems Design and Applications (ICASSDA2018)	6. 最初と最後の頁 電子版のため無し
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICASSDA.2018.8477623	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Tsuda Naoaki, Taro Susumu, Nomura Yoshihiko, Kato Norihiko	4. 巻 1
2. 論文標題 Attending and Observing Robot for Crutch Users	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 HRI'18 Companion: Conference on ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI'18)	6. 最初と最後の頁 259,260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3173386.3176968	査読の有無 無
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6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 網野 正太郎, 中林 保智, 津田 尚明, 野村 由司彦, 加藤 典彦
2. 発表標題 身体動作矯正のための振り子型力覚提示装置
3. 学会等名 日本機械学会IIP2022 情報・知能・精密機器部門 (IIP部門) 講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永廣 拓也, 津田 尚明, 野村 由司彦, 加藤 典彦
2. 発表標題 松葉杖歩行の遊脚期に障害物をAR提示する歩行訓練システム
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2021講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永廣拓也, 津田尚明, 野村由司彦, 加藤典彦
2. 発表標題 仮想障害物をAR提示する松葉杖歩行訓練システム
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2020講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 津田尚明, 森川亜美, 野村由司彦, 加藤典彦
2. 発表標題 圧覚提示を用いた身体動作教示
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2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉山僚彦, 津田尚明
2. 発表標題 色彩変化を用いた手軽な松葉杖歩行訓練システムの提案
3. 学会等名 第163回ヒューマンインタフェース学会研究会「ヒューマンインタフェース・ステップアップキャンプ2019」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉山僚彦, 津田尚明, 野村由司彦, 加藤典彦
2. 発表標題 松葉杖歩行訓練時の「転倒覚」提示に向けた身体加速度の評価
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2018)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

和歌山工業高等専門学校知能機械工学科津田研究室
<https://www.wakayama-nct.ac.jp/gakka/mecha/tsuda/>

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
研究 分 担 者	多羅尾 進 (Tarao Susumu) (80300515)	東京工業高等専門学校・機械工学科・教授 (52601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関