

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22240068

研究課題名(和文)高齢者・障害者転倒予防用感覚刺激型立位・歩行支援システム開発

研究課題名(英文) A study of new assistive device of standing balance and gait with sensory stimulation for the elderly and the disabled persons

研究代表者

田中 敏明 (Tanaka, Toshiaki)

東京大学・先端科学技術研究センター・特任教授

研究者番号：40248670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,200,000円、(間接経費) 8,760,000円

研究成果の概要(和文)：高齢者のバランス能力低下は、筋力などの運動機能の衰えだけでなく、感覚機能の衰えによる姿勢制御への影響が指摘されている。本研究は、立位バランスに重要な立位時の高齢者の足趾・足底感覚を新型感覚検査機器で評価し、その評価に基づきバランス能力を改善するための最適な立位・歩行時の重心移動を足底へ振動感覚刺激で呈示する方法を確立し、加えて、転倒の危険を回避する注意喚起可能な感覚刺激内蔵型靴の開発研究を実施する。結果として、高齢者の姿勢の動揺を回復するうえで靴内振動刺激は特に、前後方向の動揺に効果を期待できる結果となった。

研究成果の概要(英文)：One major cause of falls among the elderly is reduced balance ability associated with aging, which has been shown to affect not only the decline in strength and other types of motor function, but also postural control through declining sensory function. We developed a new device for evaluating tactile sensation in the toes and soles of elderly adults while standing. We analyzed dynamic standing balance in the elderly and the young groups for using a movable platform. Moreover, based on these evaluations, we developed a method for applying vibratory sense stimulation to the soles to indicate to the user how to shift the center of gravity to an optimal position while standing or walking. The present results indicated that the vibratory stimulation inside the shoes was an effective technique for assisting elderly individuals in correcting postural instability, particularly forward/backward body sway.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：高齢者・障がい者 立位・歩行支援 転倒予防 感覚刺激 福祉工学

1 . 研究開始当初の背景

高齢者の転倒による外傷・骨折は日常生活活動を著しく低下させることから保健・医療・福祉行政において大きな問題となっている。高齢者の転倒の原因として、加齢に伴うバランス能力の低下や障害が大きな因子となっている。ヒトのバランス保持には足趾・足底と床との接触部位から得られる身体重心の位置の変化についての継続的な体性感覚系からの情報が重要である。しかしながら、現状においては、運動と感覚の両機能からのバランストレーニングアプローチは確立しておらず、体性感覚刺激を利用したバランス支援機器の開発研究は皆無である。

2 . 研究の目的

そこで本研究は、従来の触圧覚感覚検査に加え既存にない立位荷重時の高齢者の足趾・足底感覚閾値の変化を評価し、その評価に基づきバランス能力を改善するための最適な立位・歩行時重心移動軌跡を足底へ振動感覚刺激を介して呈示する方法の研究を実施し、加えて、転倒の危険を回避する注意喚起可能な新型振動感覚刺激内蔵型転倒防止靴の開発研究を実施する。

3 . 研究の方法

方法 1) 振動装置による足底感覚評価および動的バランス能力評価のための床振動装置の製作。

1 - 1 振動装置による新型足底感覚検査機器は、小型扁平型振動モータを床面上に複数個配置することにより、足底の任意の部位にコンピュータ制御により振動触覚刺激を負荷することができる。振動子は片足あたり 9 個を使用し個々の振動子による刺激は独立に制御可能とした。振動子を足底母趾、第一～五中足骨頭、踵部位に計 9 ヶ所配置し、各振動子の振動数は約 100Hz、1 回の振動刺激の継続時間を 0.5sec とした。被験者は立位および座位において、足底部配置の振動子によるランダム刺激を知覚できるか否かの二件法によりその正答率に関し統計処理を行った。被験者は健常若年者 7 名 (平均年齢 21.3 歳)、高齢者 5 名 (平均年齢 66.2 歳) とした。

1 - 2 床振動刺激装置は構成としてサーボモータ式可動式台および外乱床振動刺激操作盤であり、仕様は 1 軸方向刺激、床可動範囲最大 500mm、最大推力 1000N 程度、最大速度は 2m/sec とし製作した。

方法 2) 並進床外乱刺激および感覚攪乱条件における高齢者の動的姿勢制御能力

本実験では、高齢者の動的姿勢制御に関して、視覚および体性感覚を攪乱させた時の特徴的パラメータを得ることにより、高齢者の転倒予防に関する機器開発のデータとする。

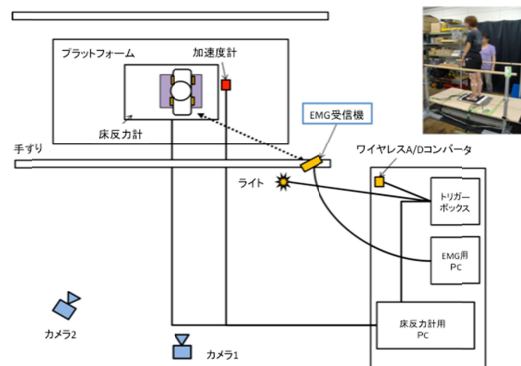


図 1 実験環境

2 - 1 被験者

高齢者 4 名 (69.5 ± 4.5 歳 , すべて男性) および健常若年者 6 名 (21.8 ± 1.6 歳 , 男性 4 名女性 2 名) であった。

2 - 2 実験機材

電動プラットフォーム (以下プラットフォーム) を用いて、前後及び左右方向の並進外乱刺激を被験者に加えた。並進外乱強度は、1.9 秒間で 0.18m の移動とした。

2 - 3 手順

被験者には腕組みをさせ、プラットフォーム上にて足部を肩幅に開いて直立位をとらせた。数回の練習を行わせた後、外乱刺激方向をランダムに呈示した。感覚攪乱には、通常条件 (開眼 : マットなし)、マット条件 (開眼 : マットあり)、ゴーグル条件 (ゴーグル着用 : マットなし)、マット + ゴーグル条件 (ゴーグル着用 : マットあり) の 4 条件を設定した。ゴーグルは市販のものを用い、表面に半透明のフィルムを貼付して視界を攪乱させた。マット硬度は、JISK 7312 におけるゴム C7 相当であった。

2 - 4 データ収集および分析

図 1 に実験機器構成を示した。重心動揺軌跡を算出するため、床反力計 (株式会社共和電業製) をプラットフォーム上に設置した。サンプリング周波数を 1000Hz とし、解析時に 100Hz に変換した。無拘束にて筋活動を評価するために、多用途テレメータ (NEC Corporation , JPN) を使用し計測した。対象の筋は右前脛骨筋、右腓腹筋内側頭、右大腿直筋、右大腿二頭筋、両中殿筋、腹直筋、脊柱起立筋群とした。筋電データは、各筋の等尺性最大筋力発揮時の筋電図振幅により正規化した。関節角度変化算出のため、ビデオ動作解析装置を使用した。なお、床反力計、多用途テレメータ、ビデオ解析装置をすべて同期させて計測を行った。

方法 3) 足裏振動刺激装置製作

足裏の複数の箇所に配置した圧力センサ



図2 振動モジュール

値をモニタし、重心の動揺により荷重点が移動し、センサ値が特に大きくなった部位を振動モータでフィードバック刺激することを目的とする、足裏振動刺激装置を開発した。

3-1 装置の概要

本装置は、振動モータ（FM34F、東京パーツ工業(株)）と圧力センサ（PS-70KCM2、(株)共和電業）を組み込んだ図2に示す振動モジュールと、圧力センサからの信号の増幅、表示、および外部への制御信号を出力する変換器（計装用コンディショナ WGA-670B、(株)共和電業）さらに変換器からの制御信号を受け上記モータを回転する駆動回路を内蔵したコントロールボックスから構成される。

振動モジュールは床面、あるいは靴やサンダルなどの履物内の、図3に示す足裏の母趾（1、5）第一中足骨頭（2、6）、第五中足骨頭（3、7）、踵骨下（4、8）に4箇所、左右で計8箇所に配置する。身体の動揺や重心位置の移動などによって、センサ毎の変換器に設定した圧力の上限值を超えると、該当箇所の振動モータが回転し足裏に振動刺激を与える。

方法4) 並進床外乱時の立位保持に関して、足底面に対する振動刺激が動的姿勢制御に与える影響の検証

4-1 被験者

被験者は重篤な疾患・既往歴のない生活自立高齢者6名（69.5±4.5歳：すべて男性）および健康若年者5名（21.8±1.6歳：男性3名女性2名）であった。

4-2 手順

プラットフォームを用いて、前後及び左右方向の並進外乱刺激を被験者に加えた。外乱強度は、1.9秒間で0.18mの移動とした。数回の練習を行わせた後、刺激方向をランダムにして外乱を与えた。通常条件および視覚と体性感覚を攪乱させた攪乱条件を設定した。感覚攪乱には、足底感覚攪乱用のマットおよび視覚攪乱用ゴーグルを使用した。図4に感覚攪乱条件での実験状況を示した。

振動刺激に関して、母指、母趾球、第5中足骨頭、踵の足底面に振動子を配置し（図2、図3）各振動子に体重の10-40%荷重されると駆動するように設定した。外乱方向で4条件、振動ありなし2条件、感覚攪乱ありなし2条件の計16条件を2回ずつ（計32試行）実施した。被験者の転倒に留意するため、プ

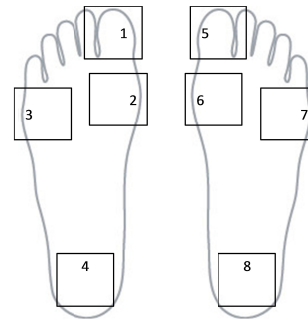


図3 振動モジュールの配置

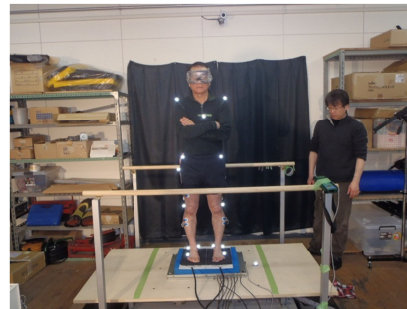


図4 プラットフォーム:感覚攪乱条件

ラットフォーム上に手すりを設置するとともに、近傍にスタッフ2名を配置した。

4-3 計測機器

実験2-4と同様とした。

4-4 解析項目

床反力値を用いて足圧中心(COP)の前後左右各成分の移動距離を求め、COP 復元時間とCOP 最大値の2つのパラメータを算出した。筋電データは、各筋の等尺性最大筋力発揮時の筋電図振幅により正規化し、筋活動量および筋潜時を算出した。ビデオ動作解析システムを用いて、体幹、股関節、膝関節、足関節の可動域変化量を矢状面、前額面それぞれで算出した。床反力計、筋電計、ビデオ動作解析装置をすべて同期させて計測を行った。また、振動の有無、2群（若年者と高齢者）を比較に関して統計分析を実施した。

4. 研究成果

成果1)

1-1 結果として、高齢者内および若年者内では踵の振動覚が立位時、座位時ともに他の部位に比べ感度が低下した。また、若年者に比べ高齢者は全ての部位で感覚が立位、座位ともに低下していた。また、2群とも足底の感覚は2点刺激よりも1点刺激の感度が高いこと、高齢になるとその感度が低下し、特に踵が顕著に低下する傾向を示した。これらの結果をもとに、特に高齢者に振動刺激で情報を呈示する場合、足底への振動刺激情報を伝えるには1点刺激が有効であること、また母趾や母趾球、小趾球など、足底の前部に刺激を入力するのが良いという結果を得た。

1-2 仕様内容に基づき床振動刺激装置（プラットフォーム）を製作した。本プラッ

トフォームを用いて、前後及び左右方向の並進外乱刺激を被験者に加えた。その結果、ステップを踏まない程度で立位を保持可能であることを確認した。前後左右への外乱刺激状況から、被験者の安全を期するためにプラットフォーム上に転倒防止用の柵を設置することとした。

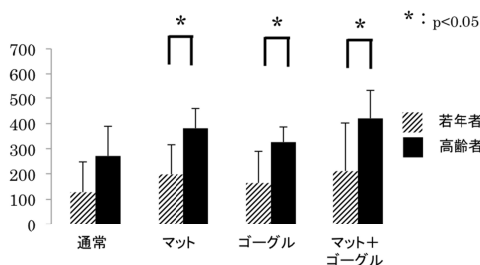


図5 復元時間：後方外乱

成果2)

2-1 重心動揺

COP 総軌跡長は全4方向、4条件で条件間および年齢間による有意差は見られなかった。同様に、COP 潜時も全4方向、4条件で条件間および年齢間による有意差は見られなかった。これは、高齢者が外乱対応に遅れないことを示している。図5は後方外乱終了からCOP反転までの時間を例として示す。前方移動時のマット条件とゴーグル条件、後方外乱時のマット、ゴーグル、マット・ゴーグルの3条件、右方外乱時のゴーグル、マット・ゴーグルの2条件、左方外乱時の全条件で高齢者は若年者より有意に長い結果となった。

2-2 筋活動および体幹・下肢関節角度変化

筋活動、筋潜時も条件間および年齢間による有意差は見られなかった。通常条件での筋活動に比べ、マット・ゴーグル条件での筋活動において高齢者の筋活動が若年者に比べ大となる傾向を示した。特に、高齢者は上下方向を含む姿勢の動揺については、膝関節筋群の活動が顕著となった。関節角度変化においては、両群に共通して、前方および後方外乱時は、マットおよびマット・ゴーグル条件において足関節と膝関節の角度変化量が大きくなる傾向であった。

以上の結果から、高齢者群は外乱停止後から直立位へ戻るまでの時間(復元時間)が特に感覚攪乱時に若年者と比較して延長していることが明らかとなった。復元時間が感覚攪乱時の外乱応答の特徴的パラメータであり、外乱を用いたバランス訓練の1つの有用な評価指標となり得る可能性がある。筋活動分析から、高齢者は上下方向を含めた姿勢動揺に対して膝関節筋群を用いたことが観察されており、足関節トルク不足への代償動作であることが推測された。これらの知見は、高齢者の動的姿勢制御の特性を示すもので

あり、本件の装置開発に有益なデータとなった。

成果3)

3-1 試作品による検討

機能試作として振動モジュールを市販品のサンダルに組み付けた。試作機を被験者に着用してもらい動作を確認した。その結果、足裏の荷重感覚と各圧力センサの計測値は、それぞれの部位において一致する傾向が得られたとともに、変換器の上限値を超えた場合、振動モータによる刺激を感じられることを確認した。ただし、部位間に着目すると、特に第五中足骨頭では他の部位に比べて荷重を検出しにくく、また振動感覚も自覚しにくいことがわかった。この点については、振動モジュール内における圧力センサの配置を荷重点直下にレイアウトすることで解決できると思われる。

以上から、足裏の4箇所配置した圧力センサにより、姿勢変化や身体動揺による荷重点の移動をモニタし、圧力値が所定の上限値を超えたときに、振動モータでその部位をフィードバック刺激することを目的する足裏振動刺激装置を開発した。本装置を市販品のサンダルと組み合わせ、動作を確認した結果、概ね所望のセンサ値が出力されるとともに、有効な振動刺激が発生することを確認した。

成果4)

4-1 足圧中心軌跡(COP)

COP 復元時間について、若年者では前後外乱時の左右成分に振動あり条件で有意な短縮が見られた(図6)。高齢者では、前方外乱時に同様の結果が得られた。前後左右の各方向最大変位は、振動ありなしおよび年齢差での有意差は見られなかった。

4-2 筋活動

筋活動量に関して、振動条件比較では、若年者高齢者ともに有意差は見られなかった。年齢間比較から、高齢者は前後外乱時に大腿直筋を有意に大きく使用している結果が得られた。筋潜時は、振動条件、年齢条件とも有意な差は認められなかった。

4-3 角度変化

振動条件による有意な差異は見られなかったが、振動ありの方が全般的に角度変化量が大きい傾向がみられた。年齢間比較において前後外乱の場合、若年者は足関節の変化量が大きく、高齢者は膝や股関節の変化量が大きかった。左右外乱では、若年者は体幹、股関節、足関節に同程度の角度変化が生じるが、高齢者は股関節、足関節が主要となり体幹の動作が小さい傾向であった。

以上から、高齢者の姿勢の動揺を回復するうえで靴内振動刺激は特に、前後方向の動揺に効果を期待できる結果となった。

しかしながら、下肢関節の運動分析から、足底のみの振動刺激だけでなく体幹への振動刺激なども含め今後検討する必要もある。

本件では、足底を不安定にするなかで視覚・聴覚遮断攪乱する実験が多くなったため転倒の危険が大であることから本研究では若年者および高齢者のみとなった。今後は本件データを元に障害者の立位・歩行支援へと展開したい。

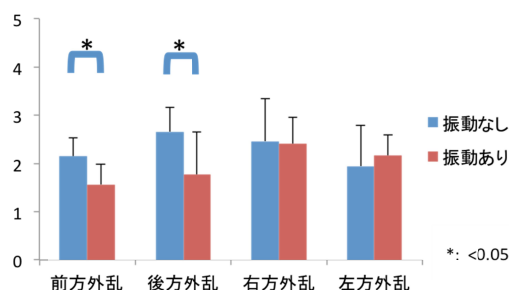


図6 若年者のCOP復元時間 (sec)
外乱：垂直方向

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 8 件)

1. S Shirogane, T Tanaka, T Izumi, Y Maeda, Y Oyama, N Yoshida, S Ino, T Ifukube. A Feasibility Study of an Integrated System Using a Force Plate and a Plantar Vibrotactile Stimulator for Fostering Postural Control in the Elderly. *Physical & Occupational Therapy in Geriatrics*, Vol. 28, No. 1, Pages 22-32, 2010.
<http://informahealthcare.com/journal/pog>
2. Y Maeda, T Tanaka, T Miyasaka, K Shimizu. A Preliminary Study of Static and Dynamic Standing Balance and Risk of Falling in an Independent Elderly Population with a Particular Focus on the Limit of Stability Test. *Journal of Physical Therapy Science*. 23: 803-806, 2011.
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jpts/>
3. T Tanaka, Clinical Application for Assistive Engineering -- Mixed Reality (MR) Rehabilitation. *J. Med. Biol. Eng.*, 31(4):277-282, 2011.
<http://jmbe.bme.ncku.edu.tw/index.php/bme/index>
4. T Miyasaka, M Shoji, T Tanaka, Designed to Assist Continuous Communication in Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS) Patients. *J. Med. Biol. Eng.*, 31(4):265-271, 2011.
<http://jmbe.bme.ncku.edu.tw/index.php/bme/index>
5. Y Maeda, T Tanaka, Y Nakajima, K Shimizu. Analysis of Postural Adjustment Responses to Perturbation Stimulus by Surface Tilts in the Feet-together Position. *J. Med. Biol. Eng.*, 31(4):301-305, 2011.
<http://jmbe.bme.ncku.edu.tw/index.php/bme/index>
6. T Tanaka, A Kudo, S Sugihara, T Izumi, Y Maeda, N Kato, T Miyasaka, M. K. Holden. A study of upper extremity training for patients with stroke using a virtual environment system as a *Journal of Physical Therapy Science*. 25(5) p 575-580 2013.
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jpts/>
7. Y Maeda, T Tanaka, Y Nakajima, T Miyasaka, T Izumi, N Kato. Dynamic postural adjustments in stance in response to translational perturbation in the presence of visual and somatosensory disturbance. *J. Med. Biol. Eng.* (in press). doi: 10.5405/jmbe.1239
8. Y Maeda, T Tanaka, Y Nakajima, T Miyasaka, T Izumi, N Kato. Age-related changes in dynamic postural control ability in the presence of sensory perturbation. (査読付) *J. Med. Biol. Eng.* (in press) doi: 10.5405/jmbe.1707

[学会発表](計 12 件)

9. T Tanaka, S Shirogane, Y Maeda, S Sugihara, T Miyasaka, S Kido, T Izumi. Effectiveness of a new combined system, using a force plate and vibratory stimulation device for balance training in patients with stroke. Proceedings of 1th International Conference on Applied Bionics and Biomechanics ICABB-2010, Venezia, Italy., 2010.
10. T Miyasaka, M Shoji, T Tanaka. Long-term Clinical Evaluation of an Eye Movement Input Device Designed in Amyotrophic Lateral Sclerosis Patients. Proceedings of 1th International Conference on Applied Bionics and Biomechanics ICABB-2010,

- Venezia, Italy, 2010.
11. T Tanaka, Y Maeda, S Sugihara, T Miyasaka, S Kido, T Izumi: Effect of a new assessment and training of unilateral spatial neglect in patients with stroke by using a three-dimensional head mounted display system (HMD). 16th International Congress of the World Confederation for Physical Therapy. Amsterdam, Holland, 2011.
 12. S Kido, T Miyasaka, T Tanaka, Y Suzuki, T Araki, Y sunaga, K Takayanagi. Effects of the Tonic Vibration Reflex on Maximal Voluntary Muscle Contraction Force. 16th International Congress of the World Confederation for Physical Therapy. Amsterdam, Holland, 2011.
 13. Y Maeda, T Tanaka, T Izumi, Y Nakajima, K Shimizu, Evaluation of dynamic postural adjustment ability for standing and walking Support, 51st Annual Conference of Japanese Society for Medical and Biological Engineering. Fukuoka, 論文番号 P3-03-3, pp256-257, 福岡市, 2012
 14. 中島 康博, 吉成 哲, 東藤 正浩, 原田 証英, 但野 茂. 多点表面筋電計を用いた前腕内筋活動分布の計測, Measurement of Muscle Activity Distribution in Forearm Using a Surface Electromyography with Multi-Electrodes. 日本機械学会 第 25 回バイオエンジニアリング講演会、発表番号 3F04、つくば市, 2013.
 15. Y Nakajima, S Yoshinari, M Todoh, M Harada, S Tadano. EMG Tomography System with Multi Surface Electrodes in Forearm. ORS 2013 Annual Meeting, San Antonio, USA, 2013.
 16. S Sugihara, T Tanaka, T Miyasaka, T Izumi and K Shimizu. Assessment of Visual Space Recognition in Patients with Visual Field Defects using Head Mounted Display (HMD) System: Case Study with Severe Visual Field Defect. 35th Annual International Conference of the IEEE EMBS. 論文番号 SuA12.6, p6929-6932, 大阪府, 2013.
 17. S Kido, T Tanaka, T Miyasaka, S Shirogane, H Maruoka, K Takayanagi. Effects of vibratory stimulation of the lower parts of the thorax on vital capacity. the 2013 WCPT-AWP & ACPT Congre. 論文番号 00513(-P244) ,Tsichung, Taiwan, 2013.
 18. T Tanaka, T Izumi, S Sugihara, T Miyasaka, N Kato, Y Nakajima. Development of a reminder wheelchair system with multisensory stimulation to support disabled Person. the 2013 WCPT-AWP & ACPT Congress, 論文番号 00195 (I-P009), Tsichung, Taiwan, 2013.
 19. T Tanaka, S Sugihara, T Izumi , T Miyasaka , N Kato , Y Maeda , Y Nakajima, M.K.Holden. A study of upper extremity training for patients with stroke using a virtual reality technology. the 2013 WCPT-AWP & ACPT Congress. 論文番号 00196
 20. 田中敏明: 医工学的視点に立脚した福祉支援機器開発における理学療法の役割、第 53 回近畿理学療法学会大会教育講演、2013 年、京都市
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
田中 敏明 (TANAKA TOSHIAKI)
 東京大学・先端科学技術研究センター・特任教授
 研究者番号: 40248670
 - (2) 研究分担者
武田 秀勝 (TAKEDA HIDEKATSU)
 北星学園大学・社会福祉学部・教授
 研究者番号: 10048134
 - (3) 研究分担者
中島 康博 (NAKAJIMA YASUHIRO)
 地方独立行政法人北海道立総合研究機構・産業技術研究本部工業試験場・研究員主査
 研究者番号: 10469710
 - (4) 研究分担者
和田 親宗 (WADA CHIKAMUNE)
 九州工業大学・生命体工学研究科・准教授
 研究者番号: 50281837
 - (5) 研究分担者
敦賀 健志 (TSURUGA TAKESHI)
 北海道科学大学・保健医療学部・准教授
 研究者番号: 60337011
 - (6) 研究分担者
三谷 篤史 (MITANI ATSUSHI)
 札幌市立大学・デザイン学部・講師
 研究者番号: 70388148
 - (7) 研究分担者
泉 隆 (IZUMI TAKASHI)
 東海大学熊本校舎・基盤工学部医療福祉工学科・教授
 研究者番号: 80193374