

令和 5 年 2 月 22 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03951

研究課題名(和文) 姿勢を矯正しつつ歩容改善するための歩行訓練器開発とその臨床評価

研究課題名(英文) Development of walking training robot to improve gait while correcting posture

研究代表者

王 碩玉 (Wang, Shuoyu)

高知工科大学・システム工学群・教授

研究者番号：90250951

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：高齢者の歩行訓練では、歩行距離(1日何歩以上歩く)など量的指導が主流である。しかし、歩行には、量と質の両面がある。歩行の質(歩幅距離や速度、床反力など)は直接に歩容へ反映する。歩容が悪くなると、転倒リスクが増える。本研究では、高齢者の歩容改善を大目的として、歩行の質を向上する歩行訓練器を開発した。本歩行訓練器は安全性も確保されており、高齢者は安心感を持って歩容を改善できるので、転倒の予防に極めて有効です。最後に臨床試験によりその有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高齢者の歩行訓練では、量的指導が主流である。しかし、歩行には、量と質の両面がある。歩行の質(歩幅距離や速度、床反力など)は直接に歩容へ反映する。歩容が悪くなると、転倒リスクが増える。本研究では、高齢者の歩容改善を大目的として、歩行の質を向上する歩行訓練器を開発した。本歩行訓練器は安全性も確保されており、高齢者は安心感を持って歩容を改善できるので、転倒の予防に極めて有効です。最後に臨床試験によりその有効性を検証した。本研究で得られている知見は、リハビリテーション医学および福祉ロボットとの二分野に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：In walking training for the elderly, quantitative instruction such as walking distance (the minimum number of steps to take in one day) is the mainstream. However, walking has both quantity and quality. The quality of walking (step distance, speed, floor reaction force, etc.) is directly reflected in the gait. Poor gait increases the risk of falling. In this study, with the aim of improving the gait of elderly people, we developed a walking training machine that corrects the posture during walking within a possible range thus improves walking quality. The walking training machine is safe so that elderly people can improve their gait with a sense of security, which is extremely effective in preventing falling. Finally, the effectiveness of the machine has been verified by clinical trials.

研究分野：知能機械学・機械システム

キーワード：姿勢矯正 歩容改善 全方向歩行 訓練器 安全性確保 転倒予防 全方向移動機構 低振動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

歩行は、健康づくりで最も一般的で手軽、有効な手段である。厚生労働省の健康日本21 (第二次、H24年)では、7000歩/1日を目標として推奨されている。しかし、転倒防止や口コモティブシンドローム (locomotive syndrome, 運動器症候群) 予防の観点から、歩行の量だけでなく、歩行の質も同様に重要である。一方、歩行の質の指導は、医療の現場ではほとんど行われていなかった。その理由は、医療現場で容易に実践できる、歩行の質に関する定量的解析法や適切な改善法が無いことであった。

研究者分担者 (石田、榎) は、これまで20年間に渡り、高知県香北町・室戸市で、387人の高齢者を対象として、体幹姿勢の評価と歩行調査を行ってきた。具体的には図1に示すように、高齢者の体幹姿勢のアライメントを、群:正常、群:胸部円背、群:腰部円背、群:平背、群:腰部前彎に分類し、検討した。群は正常な体幹姿勢を呈したのに対して、群や群は、有意に歩幅距離や歩行速度が劣っていた。また、群と群では、円背が強いほど歩行時の歩幅や歩行速度が低下していた。群と群では、立位後屈の可動性がある人ほど、歩幅が広く歩行速度が速いという事が明らかになった。さらに、「胸を張って背筋を伸ばし、前を向いて歩いてください」という体幹姿勢の指導を行うことの有効性が示唆された。

研究代表者 (王) と研究分担者 (石田) は、平成9年、前歩き・後歩き・横歩き・斜め歩き・旋回・回転など、人間が本来持っている複雑で複合的な歩行動作の訓練ができる、全方向移動型歩行訓練機を世界で初めて開発し、合計68人の高齢者を対象とする臨床試験によりその有効性を示した。しかし、肘をアームレストに掛け、腰をやや曲がった姿勢で歩行訓練を行うため、床反力鉛直成分の2峰性の改善が見られなかった。

2. 研究の目的

本研究では、上記の「体幹を矯正できれば、歩容が改善する」という結果に注目し、吊り具を用いて体幹姿勢の自己矯正が十分行えない ~ 群の高齢者を対象とする、体幹姿勢を矯正しつつ歩行訓練ができる歩行訓練器を開発する。また、全方向移動技術を用いて歩行に必要な筋力を満遍なく鍛えることができることが特徴である。歩行の質を改善するという視点から歩行訓練器を開発する研究の例は、国内外でまだ見当たらなかった。

3. 研究の方法

前述の研究目的を踏まえ、以下の計画・方法で研究を遂行した。

物を取り扱う産業用ロボットと違って、人間は制御系に含まれる。歩行意図推定、乗り心地計測、運動生成を加えたトータルシステム (人 + 機械系) の構成法を開発した。

自主的歩行訓練を実現するため、ウェアラブル・モーションセンサーを利用して、特別な操作を必要とせずに歩行意図を推定する手法を開発した。

オムニホイール、吊り具を用いて新型歩行訓練器を製作し、運動制御実験を行った。従来型の歩行器は、前方への歩行訓練しかできない。本歩行訓練器は、全方向の歩行訓練が可能であり、さらに、歩行時の体幹姿勢を正しく矯正する。人は加齢により体幹姿勢が変化し、歩行機能を失ってゆく。本歩行訓練器は正しい姿勢で全方向に向って歩行筋力を万遍なく訓練するので、バランス機能の賦活化も可能であり、結果として歩容の改善ができる。

運動実験により安全性を確認したうえで、高齢者を対象として、歩幅・速度・2峰性を含む歩容の改善試験を行った。

4. 研究成果

開発した体幹姿勢を矯正しつつ歩行訓練ができる歩行訓練器の写真を図1(a)、概略図を図1(b)に示す。

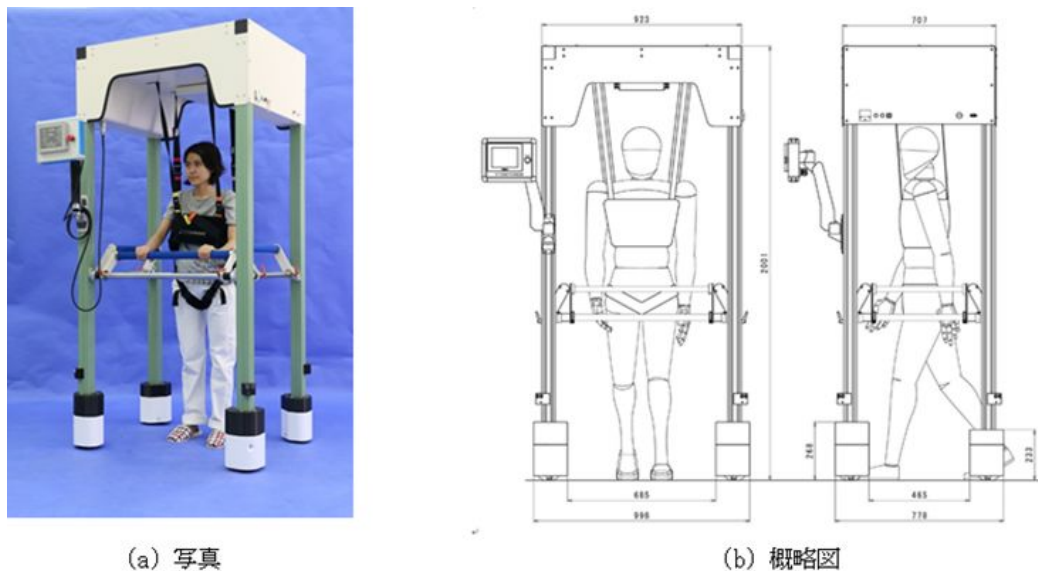


図1 体幹姿勢を矯正しつつ歩行訓練ができる歩行訓練器

4自由度を持つアクティブな構造の吊り上げ機構を上部ボックスには設置して、要訓練者の姿勢矯正を実現した。ま、動力伝達機構を筐体内に組み込んだオムユニットを考案し、訓練器の四輪として、全方向移動機能を実現した。ロボットの四隅の柱に4個の超音波センサーを搭載して、周囲の障害物を検知し、衝突事故を避けることができた。吊りベルト1本ごとにロードセルを搭載して、使用者の免荷状態をモニタすることができた。機体四柱の開きサイズに関しては、幅680mm以内の車いすに搭乗した状態で機内に乗り入れることができた。前方と左右には手すりを設置して、高齢者の歩行訓練における支えになる。歩行訓練ロボットの操作は、タッチパネル、無線コントローラ、およびパソコン制御プログラム構築によって実現することができた。

図1に示すように、吊り上げ機構における4本の吊りベルトを、使用者に装着するスリングに連結して、免荷による立位保持が可能であり、さらに歩行中の体幹姿勢を矯正できた。これにより、足関節、膝関節、股関節に掛かる負荷を左右別および前後別に低減でき、使用者の体幹を矢状面と前頭面において任意の姿勢に調整し、バランスを取ることができた。また、立ち上り動作の訓練もできた。全方向移動機能により、病院や施設での個室や廊下やエレベータや広間等の様々場所で歩行訓練を行うことができた。

体重を免荷するための吊り上げ機構は、重力と反対方向に向かって体を吊り上げて体重を調整するから、単純な1自由度の吊り上げ機構を用いて実現できた。しかし、歩行中の姿勢矯正は、要訓練者の体幹を矢状面と前頭面において任意の姿勢に調整し、バランスを取ることであるので、その足関節、膝関節、股関節に掛かる負荷を左右別および前後別に低減する必要がある。したがって、姿勢を矯正するための吊り上げ機構は、免荷用の吊り具と違って、4つの自由度を持つアクティブな機構を考案した。

本研究では、歩行訓練における患者には、機械振動をできるだけ感じさせないために、全方向車輪としてオムニホイール構造を採用することとした。さらに、大な足回りのスペース

を与えて、患者が安定でスムーズに歩行訓練を行えるために、オムニホイール、モーター、動力伝達機構を筐体内に組み込んだオムユニットとして一体化して、歩行訓練ロボットの全方向移動機構を考案した。

要訓練者にスリングを装着させて、吊り上げ機構における4本の吊りベルトはそれぞれ独立して上下移動を制御できることを確認できた。図2に示すように矢状面における安定性が欠ける要訓練者に対し、前又は後側のベルトの引き上げを制御することで、要訓練者の体幹を矢状面において任意の姿勢に調整し、バランスを取ることを確認できた。また、図3に示すように前頭面内における安定性が欠ける要訓練者に対し、左又は右側のベルトの引き上げを制御することで、要訓練者の体幹を前頭面において任意の姿勢に調整し、バランスを取ることを確認できた。



図2 矢状面における安定性が欠ける要訓練者の姿勢矯正



図3 前頭面における安定性が欠ける要訓練者の姿勢矯正

高知大学附属病院リハビリテーション部では、姿勢を矯正しつつ歩容改善歩行訓練器の有用性を評価するために、評価試験を行った。ただし、評価試験の前では、高知工科大学の倫理委員会では歩行訓練器の安全性とデータ保存法と、高知大学の医学部倫理委員会では試験内容全般について審査を受け承認を得られた。また、被験対象者に十分な説明を行い、同意書にサインをしてもらった。

具体的には、50歳代・60歳代の健常な壮年期症例と70歳代の健常高齢症例に対して、開発した歩行訓練器を用いて、吊り上げた状態で歩行訓練を行ない、歩行訓練器の有用性を検証した(図4)。

評価方法は、移動能力として、10mの歩行時間と歩数調査を行って、UP&GOテストを評価した。歩行能力として、シート式下肢加重計(ウォークWay MW-1000)で歩行解析を行って、Step &Strideの距離と時間、および歩隔距離を評価した。バランス能力として、開眼単脚

直立時間(左右それぞれ:最長 60 秒間)と、重心動揺計(アニマ社 GS-7)を用いて、開眼・閉眼の外周面積と単位面積軌跡長を評価した。これらの評価は、介入訓練全体の前後に評価を行った。また姿勢の評価には、図 5 に示すように脊柱計測分析器(スパイナルマウス)を用いて、胸椎・腰椎の Alignment を測定した。訓練開始前には、自然立位での脊柱 Alignment の評価と、吊り上げ機構における 4 本ベルトをそれぞれ独立して用い、対象者が気持ちのいい程度に吊り上げた状態で、脊柱 Alignment を評価した。そして全ての訓練終了後に、自然立位での脊柱の Alignment の評価を行った。



図 4 訓練歩行の様子



図 5 胸椎・腰椎の Alignment の測定

< 結果と考察 >

13 例中 1 名が脱落した。その 1 名を除いた 12 名は全ての訓練を完遂し、訓練前後の評価が行えた。今回の吊り上げ機構によって胸椎の後彎を維持しつつ、腰椎の前彎を作り出せていたことであった。通常の上方向への牽引によって、単に脊椎がまっすぐになる(すなわち胸椎の後彎と腰椎の前彎が共に減少する)はずであるが、訓練前の牽引評価では、12 例の胸椎の平均後彎角は、訓練前 39.2 度で、牽引時には 30.9 度になり、牽引により有意($P=0.0215$)に牽引され、腰椎では訓練前 - 8.5 度(前彎)が、牽引時には、-21.1 度に有意($P=0.0005$)に前彎がついていた。そして 8 週の訓練後には、胸椎の後彎に関して有意差はなかったが、36.5 度になっていた。それに対して、腰椎は 8 週の訓練後には - 17.3 度になり、訓練前後の比較では、得られた腰椎の前彎が有意($P=0.0251$)に維持できていた。

これまでの知見では、胸椎の後彎が増強したり、腰椎の前彎が低下したりして、後彎になると、歩行の質(歩幅や歩行スピード、垂直床反力)が低下することが分かっている。本研究で開発した歩行訓練器は、理想的な alignment に牽引できていることが検証できた。そして 8 週間の訓練後には、地面に対し、どれくらいまっすぐに体幹が立っているかを評価する指標である「補正」傾斜(地面に対する体幹の角度)が、訓練前は 5.1 度、訓練後 3.8 度に、有意($P=0.0464$)に改善していた。

運動機能の向上としては、UP&GO テストで、7.99 秒が 7.19 秒に有意($P=0.0007$)に改善し、椅子から立ち上がって、3 m 歩いて、回転運動をし、再び 3 m 歩いて、座る動作の俊敏性は向上していた。バランス機能では、開眼単脚直立時間(左)は、47.42 秒が 58.01 秒に改善傾向($P=0.0553$)を示したが、その他の評価では有意な改善はなかった。しかし 70 歳代では、5 例全例に、重心動揺計の評価では、開眼もしくは閉眼で、外周面積の減少、単位面積軌跡長の延長に、何らかの改善が認められた。すなわち、70 歳以上の高齢者には、バランス機能改善にも意義があるように思われた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hongbin Chang, Ping Sun, Shuoyu Wang	4. 巻 48
2. 論文標題 Output tracking control for an omnidirectional rehabilitative training walker with incomplete measurements and random parameters	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Systems Science	6. 最初と最後の頁 2509-2521
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 該当する

1. 著者名 Hongbin Chang, Ping Sun, Shuoyu Wang	4. 巻 90
2. 論文標題 A robust adaptive tracking control method for a rehabilitative walker using random parameters	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Control	6. 最初と最後の頁 1446-1456
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 該当する

1. 著者名 Ping Sun and Shuoyu Wang	4. 巻 19
2. 論文標題 Redundant input safety tracking for omnidirectional rehabilitative training walker with control constraints	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Asian Journal of Control	6. 最初と最後の頁 116-130
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 該当する

1. 著者名 Yina Wang and Shuoyu Wang	4. 巻 87
2. 論文標題 A new directional-intent recognition method for walking training using an omnidirectional robot	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Intelligent and Robotic Systems	6. 最初と最後の頁 231-246
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 該当する

1. 著者名 Yina Wang, Shuoyu Wang, Kenji Ishida, Yo Kobayashi, Masakatsu G Fujie and Takeshi Ando	4. 巻 31
2. 論文標題 High path tracking control of an intelligent walking-support robot under time-varying frictions and unknown parameters	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 739-752
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 該当する

1. 著者名 Ping Sun and Shuoyu Wang	4. 巻 14
2. 論文標題 Guaranteed Cost Non-fragile Tracking Control for Omnidirectional Rehabilitative Training Walker with Velocity Constraints,	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 International Journal of Control, Automation and Systems	6. 最初と最後の頁 1340-1351
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 該当する

1. 著者名 Hongbin Chang, Ping Sun and Shuoyu Wang	4. 巻 10
2. 論文標題 Output Feedback Tracking Control for Omnidirectional Rehabilitative Training Walker with Random Parameters	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 ICIC Express Letters	6. 最初と最後の頁 1225-1232
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 該当する

1. 著者名 Ping Sun and Shuoyu Wang	4. 巻 19
2. 論文標題 Redundant input safety tracking for omnidirectional rehabilitative training walker with control constraints	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Asian Journal of Control	6. 最初と最後の頁 116-130
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 該当する

1. 著者名 Yina Wang, and Shuoyu Wang	4. 巻 7
2. 論文標題 Motion Controller Design for a Walking Support Robot Utilizing Acceleration and Speed Information of Desired Trajectory	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 ICIC Express Letters, Part B: Applications (ICIC-ELB)	6. 最初と最後の頁 271-277
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Bo Shen, Shuoyu Wang	4. 巻 10
2. 論文標題 The Vacuuming Assistance Method for Lower Limb handicapped by ILSR	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 ICIC Express Letters	6. 最初と最後の頁 2513-2520
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 Yina Wang, and Shuoyu Wang	4. 巻 7
2. 論文標題 Motion Controller Design for a Walking Support Robot Utilizing Acceleration and Speed Information of Desired Trajectory	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 ICIC Express Letters, Part B	6. 最初と最後の頁 271-277
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11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Hongbin Chang, Shuoyu Wang, Ping Sun
2. 発表標題 Fault Diagnosis and Control of a Cushion Robot Considering Actuator Degradation
3. 学会等名 The 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hongbin Chang, Shuoyu Wang, Ping Sun, and Bo Shen
2. 発表標題 Tracking Control for Omnidirectional Rehabilitative Training Walker with Center of Gravity Shift and Fault Input
3. 学会等名 The Twelfth International Conference on Innovative Computing, Information and Control, 12th ICICIC (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yina Wang, Junyou Yang, and Shuoyu Wang
2. 発表標題 Path Tracking Control of an Indoor Transportation Robot Utilizing Future Information of the Desired Trajectory
3. 学会等名 The Twelfth International Conference on Innovative Computing, Information and Control, 12th ICICIC (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hongbin Chang, Shuoyu Wang
2. 発表標題 Adaptive Control for an Omnidirectional Rehabilitative Training Walker with Center of Gravity Shifts and Unknown Visual Servo Parameters
3. 学会等名 The 10th ICME International Conference on Complex Medical Engineering (CME 2016), pp.37, Tochigi, August, 2016. (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 森陽介, 王碩玉, 瀋博
2. 発表標題 デジタル加速度制御による無方向性四輪車の走行制御
3. 学会等名 第29回バイオメディカル・ファジィ・システム学会年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 王 義娜, 王 碩玉, 石田 健司, 小林 洋, 藤江 正克, 安藤 健
2. 発表標題 歩行支援機の制御パラメータの最適化システムの開発
3. 学会等名 第34回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 瀋博, 王碩玉
2. 発表標題 下肢障がい者の自立生活支援ロボットの開発
3. 学会等名 第34回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 福本勇樹, 王碩玉, 王義娜, 榎勇人
2. 発表標題 歩行動作における脚部表面筋電位の特徴抽出
3. 学会等名 第29 回バイオメディカル・ファジィ・システム学会年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 藤川知寿, 王碩玉, 瀋博
2. 発表標題 コンパクトなオムニホイールの開発
3. 学会等名 第29回バイオメディカル・ファジィ・システム学会年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 宮島彰利, 王碩玉, 王義娜, 榎勇人
2. 発表標題 歩行訓練における座位状態と立位状態との類似性について
3. 学会等名 日本機械学会中国四国学生会第47回学生員卒業研究発表講演会論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hongbin Chang, Shuoyu Wang
2. 発表標題 Adaptive Control for an Omnidirectional Rehabilitative Training Walker with Center of Gravity Shifts and Unknown Visual Servo Parameters
3. 学会等名 International Conference on Innovative Computing, Information and Control (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

高知工科大学 知能ロボティクス研究室 http://www.lab.kochi-tech.ac.jp/robotics/index.htm 高知工科大学 https://www.kochi-tech.ac.jp/
--

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	向殿 政男 (mukaidono masao) (00061987)	明治大学・理工学部・名誉教授 (32682)	

6. 研究組織（つづき）

	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	石田 健司 (ishida kenji) (10274367)	高知大学・教育研究部医療学系臨床医学部門・客員教授 (16401)	
研究分担者	細田 里南 (hosoda rina) (10626138)	高知大学・医学部附属病院・理学療法士 (16401)	
研究分担者	藤江 正克 (fujie masakatsu) (20339716)	早稲田大学・理工学術院・名誉教授 (32689)	
研究分担者	永野 靖典 (nagano yasunori) (30380372)	高知大学・教育研究部医療学系臨床医学部門・助教 (16401)	
研究分担者	榎 勇人 (enoki youto) (40598538)	徳島文理大学・保健福祉学部・教授 (36102)	
研究分担者	井上 喜雄 (inoue yoshio) (50299369)	高知工科大学・総合研究所・名誉教授 (26402)	

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
---------	---------