

令和 5 年 5 月 23 日現在

機関番号：51401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12749

研究課題名(和文)回復期における上肢片麻痺患者のためのリハビリロボットの開発とリハビリ効果

研究課題名(英文) Development of Rehabilitation Robot for Upper Limb Paresis in Recovery Period and Rehabilitation Effects

研究代表者

木澤 悟 (KIZAWA, SATORU)

秋田工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：90234202

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：施設等の机上で利用可能な上肢用卓上型リハビリロボットを開発した。本システムは、リハビリテーションに対するモチベーションを持続可能にするためにVRシステムとARシステムを組み込んだ。さらに、モーションキャプチャー機能を付随させることで、リハビリ効果の評価となる運動学的変数および動力学的変数を導出することができた。

本研究は、健康被験者に対して開発したVR技術やAR技術を組み合わせたリハビリプログラムと従来型のモニタ画面を見ながらのリハビリプログラムについて、映像酔いやモチベーション維持について比較評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果の学術的意義は、リハビリのモチベーションを高めるためにモニタをVRゴーグルに置換え、高価な3次元動作分析装置の機能の代わりに安価なVive Trackerセンサと開発ソフトウェアで機能を代替し、さらにこの機能を利用することで上肢の各関節運動をトラッキングすることができ、狭小な場所でも人間の運動解析を可能にしリハビリ効果を評価出来るようにしたことである。

社会的意義は、開発したリハビリシステムは病院外の療養施設や自宅の机上で可能なため、急性期以降の長期リハビリに対応し、医療費削減及び理学療法士、作業療法士の負担低減に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：Aggressive rehabilitation of the paralyzed limb is necessary for functional recovery from upper limb paralysis after stroke. In particular, the amount of training is very important, and rehabilitation using robots is effective. We have developed a desktop rehabilitation robot for upper limb paresis after Stroke that can be used on a desk. This system includes a VR system and an AR system to make motivation for rehabilitation sustainable. Furthermore, by adding a motion capture function, we were able to derive kinematics variables and kinetics variables that evaluate rehabilitation effects.

In this study, we compared and evaluated visual sickness and motivation maintenance between a rehabilitation program that combines VR technology and his AR technology developed for healthy subjects and a rehabilitation program while watching a conventional monitor screen.

研究分野：制御工学

キーワード：バイオメカニクス リハビリテーション ロボット 福祉工学

### 1. 研究開始当初の背景

近年、脳卒中片麻痺に対する上肢リハビリのためにロボット利用の有効性が多数報告されているが、多くは中枢神経の可塑性に起因する理由で急性期(数週間以内)にリハビリロボットを使った方法である。一方、回復期(治療後3ヶ月~6ヶ月)、維持期(治療後6ヶ月以降)の長い期間に渡りリハビリロボットを利用した効果の有効性は明らかにされていない。その原因は、大学病院等で導入されている麻痺側上肢を強制訓練させるロボット療法(図1)は、大型で据付け型であり施設の制約、高コスト、長期運用制限のため、一斉に多くの片麻痺患者のリハビリに対応することが困難なことにある。また、医療費の問題から脳卒中による片麻痺は150日、高次脳機能障害を伴う重篤な脳血管障害でも180日までしか入院保険が適用されないことも要因にある。2017年度に厚労省は、脳卒中の発症から維持期の経過と提供されるべき医療のイメージ(図2)を検討した。維持期を過ぎれば身体機能の回復の伸びは期待できないが、回復期では身体機能は高まる傾向にあり、施設等を利用して積極的なリハビリを促している。したがって、運動機能の回復が見込まれる回復期のリハビリは重要であり、病院外の施設等でも利用可能な上肢用リハビリロボットシステムを開発して、継続的なリハビリを行いながら、回復期のリハビリが上肢の運動機能をどの程度改善できるのか、リハビリ効果を数値的に明確にする必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、脳卒中片麻痺患者の上肢における急性期以降のリハビリを病院以外の施設や在宅でも可能にするために、VRゴーグルを装着しVR(仮想現実)を用いた卓上型のリハビリロボットを開発することである。そして、理学療法士、作業療法士の負担軽減を図ると共に、急性期以降におけるリハビリ効果を定量的に評価するシステムを構築する。これにより、簡便に卓上で上肢の麻痺側を積極的に訓練できる環境を提供する。一般的にリハビリロボットは前面にあるモニタ上の目標軌跡を見ながら行う。このとき、リハビリ効果を定量的に評価するためには、上肢の手、肘、肩、体幹の位置情報が必要であり、一般的にはViconという3次元動作分析装置を利用するが、高価なうえ天井等に据付けるシステムであるため、狭小な施設等では利用不可能である。そこで本研究では、ロボットのグリップハンド下に、6軸力覚センサを組み込み、手に掛かる力を観測する。これは、機械インピーダンス制御が目的であり、ソフトウェア的に仮想的な質量、仮想的な粘性を生み出すことにより、ロボットに慣性力、粘性力を与えて、速度に比例した負荷抵抗を与えることが可能となり、この技術により患者の筋力に合わせたリハビリを実現させることができる。さらに、力覚センサ情報と提案する上肢の3リンクモデルを用いて逆動力学解析から上肢の関節モーメント、関節パワー等の動力学的変数を導き出す。これにより、上肢のリハビリ効果を定量的に評価することが可能となる。

### 3. 研究方法

#### (1) 開発した卓上型リハビリロボット

開発したリハビリロボットの外観を図1に示す。本ロボットは本体上部に取り付けられたグリップを把持して使用する。ロボットはオムニホイールにより平面内を3自由度で移動でき、使用者が把持したグリップ下部に取り付けた力覚センサの情報をもとにインピーダンス制御による運動を行う。これにより、任意の物理抵抗(質量、粘性、弾性)を使用者に与えることができる。ロボットのハードウェア構成を図2に示す。グリップの下部に設置された力覚センサの出力値はRaspberry Pi ZeroのBluetooth通信により制御用PCに送信される。制御用PCでは力覚センサの値を基に設定された物理インピーダンス(質量、粘性、弾性)に基づいたロボットの運動ベクトルが計算される。運動ベクトルはオムニホイールの回転速度に変換され、モータ電流値としてロボットのRaspberry Pi Zeroへ送られてDCモータを駆動させる。なお、4つのオムニホイールは2個ずつ平行に向かい合わせ、90度角度を変えて配置することで平面内の3自由度移動を実現させている。



Fig.1 Rehabilitation robot

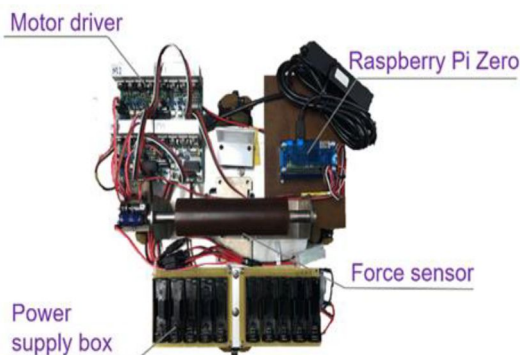


Fig.2 Hardware configuration

## (2) VRを使用したリハビリ訓練システム

本システムは、ヘッドマウントディスプレイ HTC 社製 VIVE Pro を用いて VR 環境を提示する。ロボットの位置情報取得には HTC VIVE Tracker2018 (以下トラッカー) と、同じく HTC BaseStation2.0 を用いた。トラッカーをロボットに取り付けることにより、ロボットの位置を正確にトラッキングすることができ、現実空間の動きと VR 空間での動きを同期させている。リハビリ訓練は HMD で提示される VR 空間において、指示された方向にロボットを動かすことを行う。ゲーム内の UI 操作は VIVE 付属のコントローラを用いた。VR アプリケーションの開発プラットフォームには Unity を用いた。リハビリ訓練の様子と訓練メニューの一例を図 3 に示す。訓練用アプリケーションは計 7 種のゲームメニューで構成されており、様々な方向にリーチングを行う基礎訓練メニューやゲーム性のある訓練メニューとなっている。

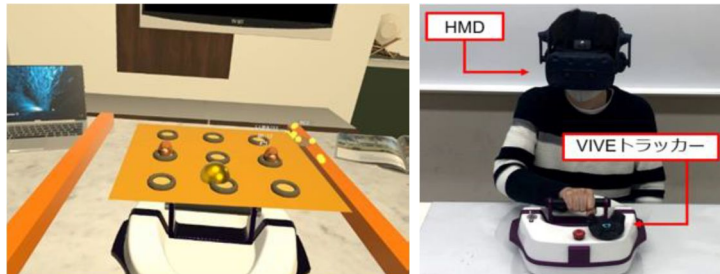


Fig.3 Rehabilitation and Training menu (VR)

## (3) ARを使用したリハビリ訓練システム

AR を用いたリハビリ訓練システムにはマイクロソフト社が開発した HoloLens2 を用いた。これは透過型ディスプレイ越しに見る現実空間に CG が配置されたような映像を提供できる。HoloLens2 用に開発したゲーム映像とロボットの追従プログラムには PTC 社製 AR 開発用のライブラリの Vuforia を用いた。リハビリ訓練の様子と訓練メニューの一例を図 4 に示す。図 4 のようにロボットに位置検出用の AR マーカーを取り付け、HoloLens2 に内蔵されているカメラでロボットの位置をトラッキングする。AR のゲームの開発も VR 同様に Unity 環境で行った。UI やゲームの種類が異なる部分があるものの、VR 用に開発されたものと同様の訓練ができるような内容、構成となっている。

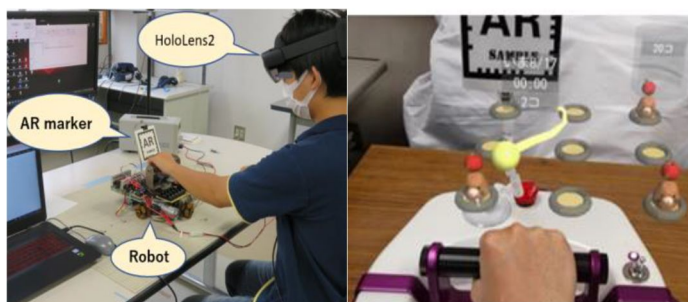


Fig.4 Rehabilitation and Training menu (AR)

## (4) モニタを使用したリハビリテーションシステム

モニタを用いたリハビリ訓練の様子を図 5 に示す。ここでは目の前に置かれたモニタ画面を見ながら指示された方向にロボットを動かすことで訓練した。モニタには VR 用に Unity で開発したゲームを表示させ、VR を使用したリハビリテーションシステムと同様にトラッカーと BaseStation 2.0 を用いることで手元の動きとモニタ画面での動きを同期させた。映し出されるゲーム映像は安全に、訓練しやすいように実験的に決定した。

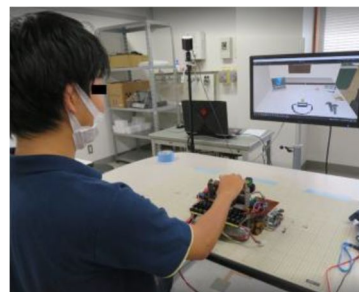


Fig.5 Rehabilitation using a monitor

## 4. 研究成果

### (1) 実験方法

VR 技術や AR 技術を用いたリハビリ訓練には有害事象の 1 つとして映像酔いが挙げられている。映像酔いの評価には、主観的評価指標として広く用いられている SSQ を用いて発生率とその重症度を評価した。SSQ は映像酔いに関する 16 の主観的評価項目からなり、幅広く用いられている。参加者は訓練後、評価項目の症状についてまったくない、大いにある等、4 つの選択肢から 1 つ選んで回答し、回答に応じた得点に、吐き気、眼球運動、失見当識毎の 3 つの重みを掛け、合計値や各下位指標の計算値で分析する。またモチベーションの維持については The System Usability Scale (以後 SUS) と The User Satisfaction Evaluation Questionnaire (以後 USEQ) を用いて評価した。SUS は使いやすいや色んな機能が上手くまとまっている等のシステムの有用性に関する評価指標である。USEQ はリハビリに役立つなどのバーチャル空間のリハビリテーションにおける有用性の評価指標である。

評価実験には 20 代 9 名、30 代 4 名、40 代 2 名、50 代 2 名、60 代 1 名の計 18 名とした。体調を崩している人はいなかった。なお、この実験は秋田工業高等専門学校の倫理審査を経ている。

参加者は VIVE Pro を装着しての実験 (以下 VR の実験)、HoloLens2 を装着しての実験 (以下 AR の実験)、モニタを見ながらの実験 (以下モニタの実験) の計 3 回行った。VR、AR、モニタを用いた実験の順番はランダムとした。また、前の訓練の影響を受けないように、訓練と訓練の間は 24 時間以上空けて実施した。実験の手順を以下に示す。まず実験の説明をした上で同意を頂き、SSQ と年齢、性別、慎重、体重 VR 技術や AR 技術の使用経験、乗り物酔いの経験について回

答して頂いた。次に VIVE Pro, Hololens2, モニタどれか任意の機材を使って全てのゲームが終了するまでの約 10 分間ハビリ訓練を行い、訓練終了直後 SSQ, SUS, USEQ の 3 つのアンケートに回答して頂いた。実験から 24 時間経ったら再度 SSQ アンケートに回答して頂き 1 回目の実験が終了する。訓練と訓練の間は 24 時間以上空けながら 2 回目, 3 回目も同様に行った。

## (2) 実験結果

酔いの発生を問う2択質問では、VRの実験後のみ1名酔いを感じると回答した。その他の方は実験後、24時間後ともに酔いを感じていると答えたものはいなかった。次に酔いの重症度についてSUSの結果を図6, 図7, 図8に示す。各グラフは左から合計スコア, 吐き気, 眼球運動, 失見当識のスコアを示す。また, 青色のグラフが訓練前のSSQスコア, オレンジ色のグラフが訓練後のSSQスコア, 灰色のグラフが24時間後のSSQスコアである。スコアが高いほど酔いが生じていることになる。VRの実験では, 実験前に対して実験後のスコアが上昇したのに対し, ARとモニタでは実験後のSSQスコアは減少した。それぞれの実験前後のSSQスコアにおいて対応のある2群間で行うウィルコクソンの符号順位和検定を行ったところ, 有意差は見られなかった。

次に, 酔いが生じていたVRの実験について乗り物酔いを時々または, 頻繁に起こすと回答した5名とその他の方13名の2郡で分けて結果をまとめたところ, 乗り物酔いすると答えた方の実験前後の平均のSSQ差が13.1だったのに対し, 乗り物酔いしないと答えた方の実験前後の平均のSSQ差は0.9であった。乗り物酔いすると答えた方の実験前後のSSQ差の方が大きかった。実験前後で酔いのSSQ差を取り, 差に関して2群間でMann-WhitneyのU検定を行ったところ, P値は0.0231となり, 有意水準5%以内となったことから乗り物酔いしやすい方はVR酔いの症状を引き起こしやすいという結果が示された。ARを使った訓練, モニタを使った訓練では有意差は見られなかった。

モチベーション維持に関しては, ARのシステムはVRやモニタのシステムに比べ満足度が低いことが示された。ここから一般的にVRを用いた訓練はモニタ画面を見ながら行う訓練よりもモチベーション維持が成されるが, ARを用いた訓練では同様には言えないことが示された。一方で, ARの使用経験がある方のARを使用したりハビリ訓練システムに対する満足度が高くなったことから使い慣れが関係していることが示唆される結果となった。

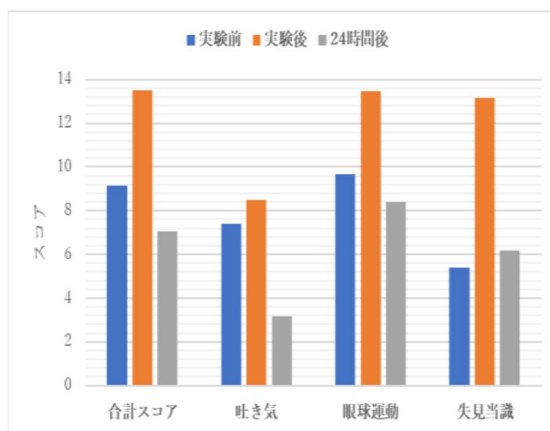


Fig.6 VR SSQ score

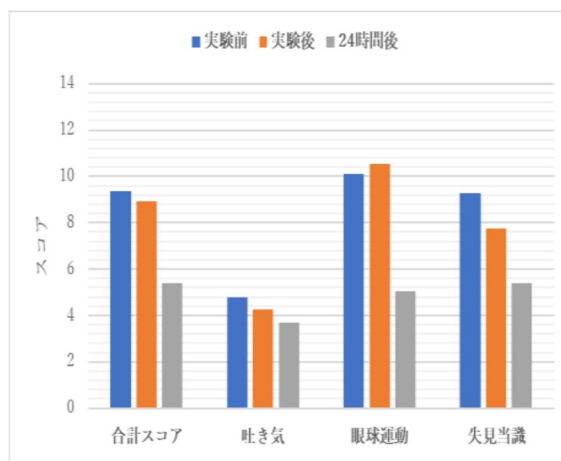


Fig.7 AR SSQ score

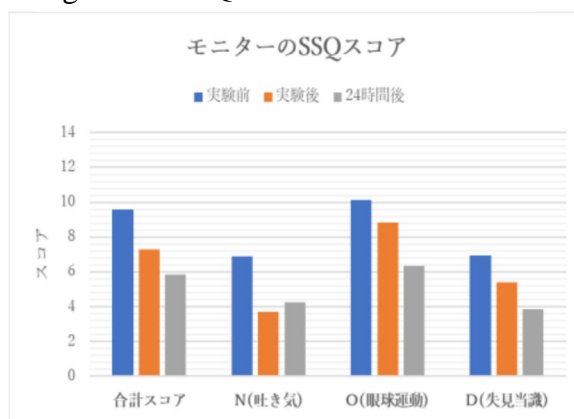


Fig.8 monitorSSQ score

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Wakabayashi Rena, Saito Kimio, Matsunaga Toshiki, Chida Satoaki, Kagami Kai, Iwami Takehiro, Kizawa Satoru, Terata Yuki, Ogasawara Masumi, Shimada Yoichi, Miyakoshi Naohisa	4. 巻 11
2. 論文標題 Examination of the Effect of Rehabili-Mouse, a Desktop Rehabilitation Robot for Upper Limb Paresis after Stroke	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Open Journal of Orthopedics	6. 最初と最後の頁 371 ~ 382
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4236/ojo.2021.1112035	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 齊藤 亜由子, 奈良 雄斗, 木澤 悟	4. 巻 69(4)
2. 論文標題 歩行計測における大腿マーカ前方貼付の膝関節角度への影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本工学教育協会	6. 最初と最後の頁 40 ~ 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 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 齊藤 亜由子, 木澤 悟, 小林 義和, 宮脇 和人	4. 巻 87
2. 論文標題 スノーボードターンにおける視線と作用力に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00407	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 Ayuko SAITO, Satoru KIZAWA, Yoshikazu KOBAYASHI, Kazuto MIYAWAKI	4. 巻 15
2. 論文標題 Evaluation of visual-motor coordination as a ball is caught	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanical Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jbse.20-00302	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 Saito Ayuko, Kizawa Satoru, Kobayashi Yoshikazu, Miyawaki Kazuto	4. 巻 7
2. 論文標題 Pose estimation by extended Kalman filter using noise covariance matrices based on sensor output	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40648-020-00185-y	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 Ayuko SAITO, Yoshikazu KOBAYASHI, Satoru KIZAWA, Kazuto MIYAWAKI	4. 巻 22
2. 論文標題 Estimation of Lower Limb Joint Angles Using Motion Sensors During Walking and Running	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本福祉工学会誌	6. 最初と最後の頁 24-30
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 齊藤 亜由子, 細谷 拓冬, 小林 義和, 木澤 悟	4. 巻 11
2. 論文標題 OpenSimを用いた筋張力推定におけるReserve actuatorの影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 科学・技術研究	6. 最初と最後の頁 117-123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11425/sst.11.117	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12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 齊藤 亜由子, 森地 振一郎, 齋 夏生, 八木 勇紀, 木澤 悟
2. 発表標題 痙性麻痺に起因する歩行障害の運動学的 評価に関する研究
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 細谷拓冬, 齊藤亜由子, 小林義和, 木澤悟
2. 発表標題 筋張力推定のための最適化計算における仮想アクチュエータの影響
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 後藤 健太郎、佐藤 颯、齊藤亜由子、木澤 悟
2. 発表標題 地磁気センサ補正における計測環境の影響
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ayuko SAITO, Shinichiro Morichi, Satoru KIZAWA
2. 発表標題 Knee joint angle estimation by sequential correction of gyroscope bias
3. 学会等名 33rd 2022 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 巖見武裕, 櫻井隆弘(秋田大), 木澤悟(秋田高専), 齊藤公男(秋田大), 島田洋一(県立医療療育センター), 宮腰尚久(秋田大)
2. 発表標題 AR・VR技術を用いた上肢リハビリテーションロボットの開発と評価
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2022 in Sapporo
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤亮介, 巖見武裕, 若林玲奈, 斉藤公男, 千田聡明, 木澤悟, 寺田裕樹, 島田洋一
2. 発表標題 VR及びAR技術を用いた上肢リハビリロボットシステムの開発
3. 学会等名 第48回日本臨床バイオメカニクス学会講演会, 018-6
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奈良 雄斗(秋田高専), 齊藤 亜由子(工学院大), 木澤悟(秋田高専), 秋田高専, 小林 義和, 宮脇 和人
2. 発表標題 Plug-in Gait マーカ貼付位置の違いによる計測精度への影響
3. 学会等名 2020 年度 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yu Amagasaki, Shigeo Yamashita, Shinichiro Morichi, Hisashi Kawashima, Gaku Yamanaka, Satoru Kizawa, Ayuko Saito
2. 発表標題 Development of infants suits for motion measurement
3. 学会等名 19th International Symposium on Advanced Technology
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yutaka Tanzawa, Satoru Kizawa, Ayuko Saito
2. 発表標題 Construction of a Kalman filter for real time motion measurement
3. 学会等名 19th International Symposium on Advanced Technology
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Tatsuro Sato, Shigeo Yamashita, Shinichiro Morichi, Hisashi Kawashima, Gaku Yamanaka, Satoru Kizawa, Ayuko Saito
2. 発表標題 A study on motion measurement for early screening for neurological disease
3. 学会等名 19th International Symposium on Advanced Technology
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奈良雄斗, 齊藤亜由子, 木澤悟
2. 発表標題 Plug-in Gaitマーカ貼付位置の違いによる計測精度への影響
3. 学会等名 令和2年東北地区高等専門学校専攻科 産学連携シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三浦 雅弘(秋田大), 巖見 武裕, 只野 孝明, 木澤 悟(秋田高専), 寺田 裕樹(秋田県立大), 千田 聡明(秋田大病院), 島田 洋一(秋田大)
2. 発表標題 卓上型上肢リハビリロボットシステムの開発
3. 学会等名 2020年度 日本機械学会年次大会, J241 医工学テクノロジーによる医療福祉機器開発
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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