

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700591

研究課題名(和文) 院内の安全な自立移動を目指したDMD患者の操作能力抽出と移動システムの開発

研究課題名(英文) Development of Input Device for Electric Wheelchair Considering Physical Functions of Persons with Severe Duchenne Muscular Dystrophy for improvement of the quality of life inside the House

研究代表者

小竹 元基 (Shino, Motoki)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10345085

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：各DMD患者の能動的に動かそうとする能動的に動かせる指先の力、可動域を考慮することにより、指先の小さな力、小さな動きで操作可能な入力装置が実現できることを示した。次に、電動車いすの操作を実現するため、上肢モデルを用いた指先の力の入れやすい方向を可操作力楕円体として導出する手法を提案し、入力装置の操作位置を一意的に決定することを可能にした。最終的には、上記の成果より、院内でDMD患者が移動可能な電動車いす操作システムを開発し、その操作システムの方策が妥当であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Persons with severe Duchenne Muscular Dystrophy (DMD) cannot operate electric wheelchairs because they lack muscular power and are affected by deformation of the hands. To address this difficulty, first we determined the requirements of input device based on the survey of daily living of the persons with DMD and then we developed new input devices for an electric wheelchair which considers the characteristics of the hands function of persons with DMD. These devices were based on quantitative evaluation of the hand functions which consists of fingertip force and range of motion of fingers for persons with DMD. A new input device was developed, considering hand function, posture, and hand shape of the persons with DMD. Thus, the devices can be operated using slight force and movement of the fingers to move an electric wheelchair for person with DMD. Furthermore, we achieved that the persons with DMD can move inside the house by using electric wheelchair with the proposed input device.

研究分野：複合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：インターフェイス 操作能力 デュシェンヌ型筋ジストロフィ 電動車いす 可操作力 可操作域

1. 研究開始当初の背景

デュシャンヌ型筋ジストロフィー (DMD) は進行性の筋力低下や関節拘縮を示す遺伝性の疾患であり、根本的な治療法がない。DMD 患者の多くは 10 代前半に歩行不能となり電動車いすの利用を始めるが、上肢の機能低下が進行すると標準的な入力装置であるジョイスティックの利用が困難となる。現在では残存機能や要望に合わせてジョイスティックのパネやスティック長を変更する、身体を支える支持部を追加するなどの適合作業により対応し、多くの DMD 患者の電動車いす継続利用を実現している。しかし適合作業は市販の入力装置をベースとして行うため、変形や筋力低下が著しいと対応が難しく、また残存機能評価や入力装置の調整は定性的に行われる部分があり、適合作業の可否や出来具合は作業者の知識・経験に依存するといった課題がある。

近年は運動解析や 3D モデリング技術が進歩し計測やものづくりの利便性が向上している。そこで本研究では運動解析や 3D モデリング等の技術を利用して DMD 患者の身体機能や使いやすさを定量的に評価し、対象者にとって使いやすい電動車いすの入力装置を開発することを目的とする。

2. 研究の目的

DMD 患者の身体機能や使いやすさを定量的に評価し、使いやすい電動車いすの入力装置を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 入力装置の要求機能の決定

複数の DMD 患者を対象に、年齢、性別、病歴、症状、上肢機能障害度、電動車いすの利用状況、呼吸器の利用状況、病院での生活等に関してインタビューを行う。また日常生活における入力装置 (TV リモコン、ナースコール、マウス等) の利用の様子、作業療法の様子等の観察を行う。これらの調査から得られた知見と電動車いすの入力装置であるという点を考慮し、入力装置の要求機能を定める。

(2) 操作能力の評価に基づく入力装置の開発

対象者の身体機能の定量評価を行い、その結果に基づいて要求機能を満たす入力装置の開発を行う。以下に開発の流れを記す。

① 作姿勢と支持具の決定

DMD 患者は姿勢により発揮できる力や動きが変化するため、入力装置開発に関わる全ての評価を同姿勢で行う必要がある。そのため、入力装置の入力時の操作姿勢を定める。

まずは座位を定めるためシーティングを行う。次に上肢の肢位を定め、それに合わせた入力装置の固定方法を検討する。上肢の肢位は、対象者、OT と相談し負担が無く動きやすいようにする。この様に定めることで電動車いすの利用時間を伸ばす。また無理な姿勢を取ることによる変形を予防出来る。入力装

置の固定は、電動車いすへ固定する方法と、身体へ固定 (把持など) する方法の 2 種類に大別できる。基本的には安定性が高い電動車いすへの固定を優先する。

② 操作能力の評価

対象者の操作能力の評価を行う。DMD 患者が入力装置を操作する時、手指だけでなく手首や肘、身体の内ねりなど様々な身体機能を駆使する。そのため本研究では、操作能力として個々の筋力や可動域を評価するのではなく、動作の結果として入力装置に加えることの出来る力 (操作力) と可動域 (操作域) を評価する。

操作能力の評価は、評価時に設定する座標系に基づいて行う。入力装置を電動車いすに固定する場合は、電動車いす上に固定座標系を設定する。入力装置を把持する場合は身体に付随した座標系を設定する。座標系の原点は弛緩状態における身体と入力装置の接触部とする。任意の位置で操作力を評価するため、ユニバーサルアームの先端に取り付けた 3 軸力覚センサを用いる。操作力として瞬間的に発揮できる最大力と、無理をせずに 10 秒間発揮できる持続力の 2 種類の力を評価する。その際、対象者の操作域を評価するため、モーションキャプチャを用いる。各軸方向に取りうる最大範囲の動きを 5 回ゆくりと繰り返えさせ、入力装置と身体との接触部の可動域を計測する。

③ センサの決定

操作能力の評価結果に基づき、対象者の操作能力で操作できる様に入力装置のセンサの仕様を定める。

④ 入力可能範囲の評価

対象者が開発した入力装置で電動車いす操作に必要な入力を行えるか評価するため、入力可能範囲を計測する。スクリーン上に入力の最大値に対応する円とマーカを準備し、マーカを入力装置により操作する課題を行うことで入力可能範囲を取得する。マーカの位置 (r, θ) は、ジョイスティックの (倒れ角, 方向) に対応する。

⑤ 走行評価

開発した入力装置を用いて電動車いすの運転が可能であるか検証するため、実車を用いて試走行を行う。緊急停止ボタンを設けるなど安全性には十分配慮する。

(3) 入力装置のセッティングの検討

標準的なジョイスティックはアームレストの先端に固定されており、“電動車いすの前進方向”、“ジョイスティックの前進操作方向”、“前腕の肘から手先方向 (前腕方向)” が一致している。しかし、本研究の対象者は、上半身、上腕の動きをコントロールすることが難しく、“前腕方向”が“前進方向”と一致していない。このような場合に“ジョイスティックの前進操作方向”をどの方向に定めると操作しやすさが向上するのか、検討する。

図 1 に示すように電動車いすのオペレータ

モデルを、環境を知覚・認識・判断し、操作することで電動車いすが動作すると考え、操作しやすさには感覚的なものと身体的なもの2種類があると仮定する。感覚的な操作のしやすさは操作が直感的で分かりやすい時、例えば操作方向と進行方向が一致している時に感じる。また身体的な操作しやすさは身体の構造的に操作しやすい時、例えば操作方向と力を入れやすい方向が一致している時に感じる。本研究ではこの仮定のもとで、以下の2つの仮説を立てる。

仮説1：感覚的な操作のしづらさは、慣れにより克服出来る。

仮説2：操作力楕円体の長軸方向に前進操作方向を定めると、身体的な操作しやすさが向上する。

これらの仮説が成り立つと、身体的な操作のしやすさを優先し、入力装置の前進操作方向を操作力楕円体の長軸方向にセッティングすると良いと言える。これらの仮説を検証する。

① 仮説1の検証

健常者を対象とし、図2に示すように感覚的に操作しづらい方向と、感覚的に操作しやすい方向に入力装置をセッティングして同様の課題を行い、セッティングによるスコアの違いと、時間経過によるスコアの変化を比較する。健常者を対象とした理由は、健常者とDMD患者は認知機能に差がなく、また健常者は身体的な使いにくさの影響を受けづらく、感覚的な使いづらさのみを抽出出来ると考えたからである。課題は図3に示すように、画面上でマークを操作し、ランダムに表示されるターゲットマークに出来るだけ早く重ねるといふものであり、その際の反応時間も記録する。ターゲットマークの出現位置は0度から45度刻みで8方向、入力力の最大値に対応させる。ターゲットマークは各方向に10回ずつ計80回表示される。対象者の姿勢は、スクリーンに対して正面向きに座り、肘をつき、手先を左斜め前45度方向に出すように統一する。

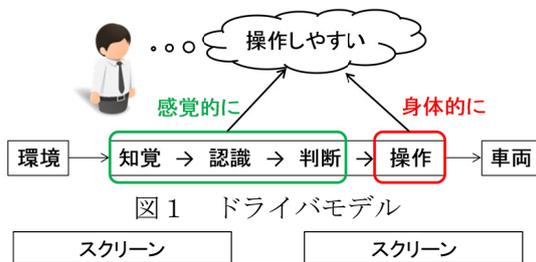


図1 ドライバモデル

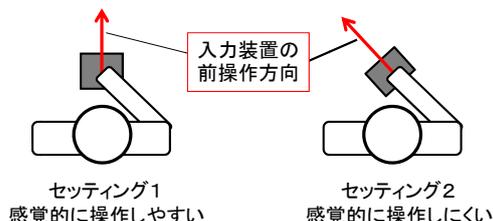


図2 入力装置のセッティング

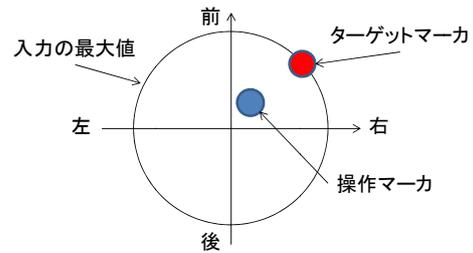


図3 課題の様子

② 仮説2の検証

電動車いすの操作で一番長時間行うのは前進操作であるため、前進操作方向に長時間反力を受け続けることになる。そのため前進操作方向に力を入れやすいことが、身体的な操作しやすさを向上する上で重要であると考える。力の入れやすさを求めるため操作力楕円体を導入する。操作力楕円体はマンピュレータに力を入れやすい方向を可視化したものであり、楕円体の半径の長さとの力へのやすさが対応する。

仮説2を検証するためDMD患者を対象とし、異なる入力装置のセッティングで同じ課題を行い、課題のスコアと操作しやすさの主観評価から仮説2を検証する。図4に示すように、y軸上をサイン波(周期4秒)で移動するターゲットマークを追従するという課題である。入力装置のセッティングは、A.操作力楕円体の長軸方向、B.前進方向の2方向とし、A→B→B→Aの順に1分ずつ課題を行う。操作力楕円体は、実験時に対象者の姿勢(関節角度)を計測し、その場で導出する。

操作力楕円体の計算方法を記す。右上肢を図5に示す、8関節リンクモデルとして扱う。両肩の中心に1自由度を設けたのは、右肩が左肩よりも上の位置にある対象者の姿勢を再現するためである。また手首から先をリンクとして扱ったのは、操作域計測の時に手首の運動により操作域を発揮していたからである。関節角度 $\theta_1 \sim \theta_8$ はROM測定法に準じ、図6の様に設定する。リンク長は両肩中心と肩間の長さを l_0 、肩と肘間の長さを l_1 、肘と手首間の長さを l_2 、手首と操作部の長さを l_3 とする。

座標系、変換行列はDH記法に基づいて設定する。操作力楕円体を求めるには、ヤコビアンを求める必要がある。本研究では入力装置を操作する時は手首の動きを利用しているため、 $\theta_6, \theta_7, \theta_8$ を変数として扱い、他のパラメータは定数として扱う。また、xy平面上における入力装置のセッティング角度を議論するため、可操作力性楕円体をxy平面に投影する。この時ヤコビ行列は、

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_6} & \frac{\partial x}{\partial \theta_7} & \frac{\partial x}{\partial \theta_8} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_6} & \frac{\partial y}{\partial \theta_7} & \frac{\partial y}{\partial \theta_8} \end{pmatrix}$$

と表現できる．ヤコビ行列を特異値分解することで，可操作性楕円体の主軸を求めることが出来る．

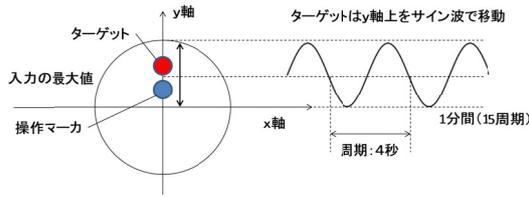


図4 ターゲットマーカの動き

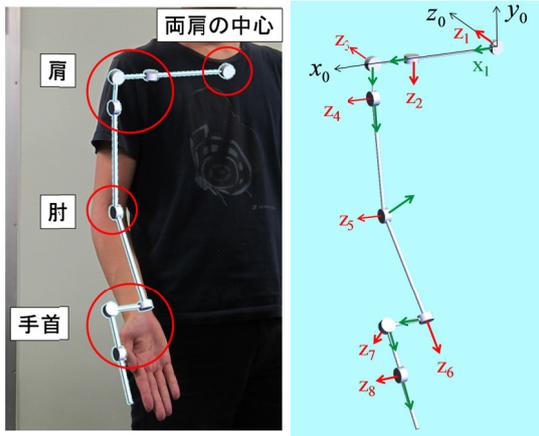


図5 右上肢のリンクモデルと座標系

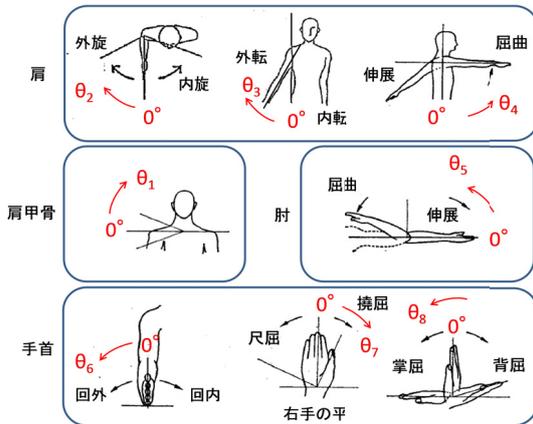


図6 関節角度の取り方

4. 研究成果

(1) 入力装置の要求機能

調査結果 (N=9) のまとめを記す．

1. 全身の筋力や可動域が低下しており，全てのADLに介助が必要であった．
2. 手指機能が残存する傾向があり，入力装置を工夫することでPCやTVの操作を行うことが出来ていた．
3. 筋力低下，可動域の制限，入力装置の操作姿勢，変形など様々な点において個人差が有り，重度である程その差が顕著であった．
これらの結果と電動車いすの入力装置であるということを考慮し，入力装置の要求機能を以下のように定めた．

- 電動車いすの進行方向と速度を意図通りに制御出来る
- 筋力や可動域が低下していても無理をせずに操作出来る
- 変形していても操作出来る
- 無理のない姿勢で操作出来る

(2) 操作能力の評価に基づく入力装置開発

1名のDMD患者を対象に入力装置開発を行い，要求機能を満たす入力装置を開発することが出来た．対象は20歳のDMDの男性で上肢機能障害度は10である．以下に詳細を記す．

① 作姿勢と支持具の決定

対象者は電動車いすに座位を取ることが出来た．図7(左)に電動車いす運転中の姿勢を，図7(右)に無理のない姿勢を示す．ジョイスティック操作時は右腕を外旋する必要があり対象者の負担となっている．そこで今回は図7(右)に近い肢位で操作できるように，サポートテーブル上に入力装置を固定することにした．また図8に示すように前腕下に高さ10cmの三角柱型の支持具を設けることで，手先を浮かせて手首の動きを使えるようにした．



図7 操作姿勢(左)，楽な姿勢(右)



図8 サポートテーブルと支持具

② 作能力の評価

対象者の操作能力の評価を行った．座標軸は図9に示すように，前腕の方向とy軸を一致させた．操作能力の測定結果を図10に示す．対象者はxyの正負方向に持続力として0.5N以上の力，xy正負方向に1.5cm以上の操作域を持つことが分かった．

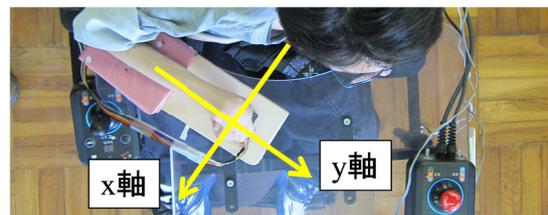


図9 座標系

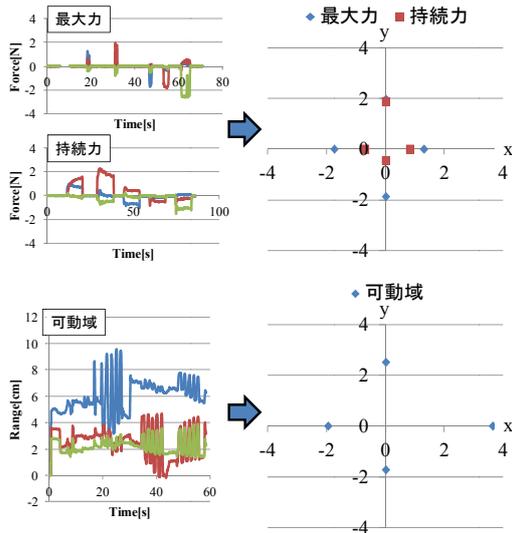


図 10 操作能力の定量評価結果

③ ジョイスティックの仕様決定

操作能力の定量評価結果に基づき、

- 操作に必要な力：0.5N
- 操作に必要な動き：3cm

と定め、これを満たすようにジョイスティックの選択とスティックの設計を行った。小型ジョイスティック (RXJXK122000D) に、直径 8mm、長さ 30mm となるようにスティックを設計した。小型ジョイスティックの方向作動力は $6 \pm 4 [N \cdot mm]$ であるため、スティック長が 30mm であれば 0.35N 以下の力で操作可能である。またジョイスティックは片側 30 度まで傾くため、スティック長が 30mm であれば 3cm の可動域があれば操作可能である。またスティックの直径は紙粘土で数通りの直径を試し、対象者が使いやすいと感じる直径とした。

④ 入力可能範囲の評価

支持具とジョイスティックを組み合わせ、入力装置を製作した。対象者の入力可能範囲を評価した結果、図 11 に示すような軌跡を描くことが出来たため、対象者はこの入力装置を用いて、前後左右に電動車いすの操作に必要な入力が可能であると分かった。

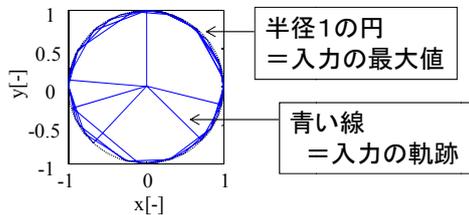


図 11 入力可能範囲

⑤ 実走行評価

図 12 に製作した入力装置を用いて電動車いすを運転している様子を示す。前進、左折だけでなく、日常的に利用しているジョイスティックでは出来ない後進と右折も出来た。また楽な姿勢で操作できることから、ジョイスティックが軽くて操作しやすい、などの感想が得られた。



図 12 走行練習の様子

(3) 入力装置のセッティングの検討

① 仮説 1 検証実験の結果

健常者 4 名に対して実験を行った。各被験者の課題の前半 40 試行と後半 40 試行の反応時間の平均値を図 13 に示す。4 名とも両方向で前半よりも後半の方が、反応時間が短くなった。C、D は斜め方向のスコアの伸びが大きく、後半には正面方向との反応時間の差がほとんど無くなった。A ははじめから方向によるスコアの差がでなかった。B は両方向のスコアが伸びている段階であり、いずれも慣れる前に課題が終わってしまったと思われる。

この結果から、感覚的な操作しづらさは慣れることで克服できる、という仮説 1 が真である可能性が高いと考える。

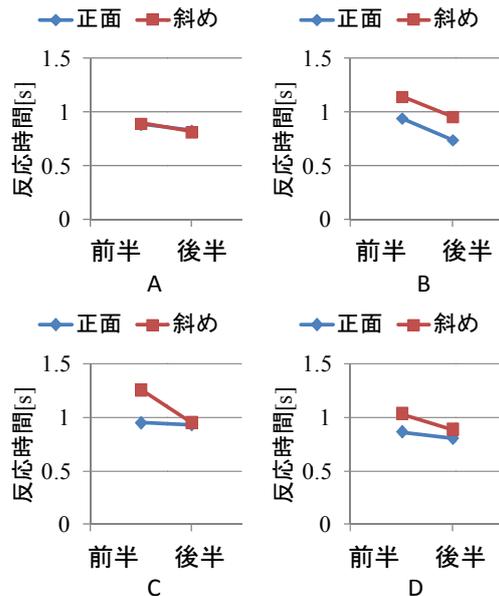


図 13 各対象者により反応時間の傾向

② 仮説 2 の検証実験の結果

表 1 に測定した対象者の関節角度、及びリンク長のパラメータを示す。操作力楕円体を計算した所、図 14 に示すように長軸が正面から反時計回りに 31 度の方向となった。

図 15 に課題の結果を示す。正面方向よりも操作力楕円体の長軸方向にジョイスティックの前進操作方向をセッティングした方がターゲットとの距離差が小さい (追従精度が高い) という結果が見られた。

また対象者に行ったインタビューでは、正面よりも操作力方向の方が操作しやすい、という感想を得られた。

この実験結果からは操作力楕円体の長軸方向が最適なセッティングであるということはできなかったが、正面方向よりも身体的に操作しやすい方向が存在することが明らかになった。

l_0		l_1		l_2		l_3	
18		25		23		8	
θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_{16}	θ_7	θ_8
45	-10	0	25	130	-30	0	85

表1 対象者の身体パラメータ

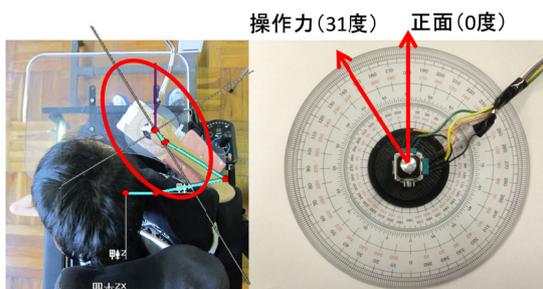


図14 操作力楕円体の長軸方向

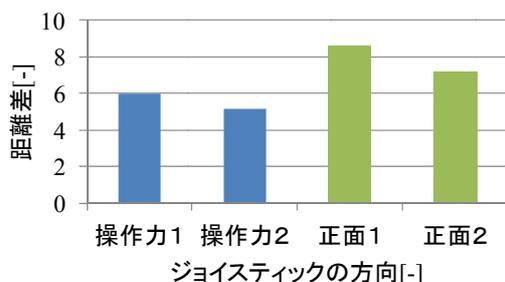


図15 課題結果

5. まとめ

本研究ではDMD患者の身体機能を定量的に評価し、入力装置の開発を行った。また入力装置の使いやすいセッティングについて検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- DMD患者の手指機能を定量的に評価することで、DMD患者にとって電動車いすを操作可能な入力装置を開発することが出来る。
- DMD患者にとって身体的に使いやすいと感じるジョイスティックのセッティングが存在し、その方向は可操作力楕円体から導くことが出来る。

6. 主な発表論文等

[学会発表] (計 2 件)

- ① 小竹元基, 山本裕喜, 井上剛信、重度DMD患者の手指特性を考慮した電動車いす入力装置の一提案、生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会2013講演予稿集, CD-ROM, GS2-2-1, 2013
- ② Yuki Yamamoto, Motoki Shino, Takashi Mikata, Takenobu Inoue, Development of

Input Device of Electric Wheelchair Considering the Characteristic of the Hand Function of Person with Severe Duchenne Muscular Dystrophy, Association for the Advancement of Assistive Technology in Europe, Proceeding of USB, 2013

[その他]

ホームページ等

<http://www.sl.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小竹 元基 (SHINO, Motoki)

東京大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10345085