

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

A Suggestion of the Input Device of Electric Wheelchair Considering the Characteristics of the Person with Severe Duchenne Muscular Dystrophy

○ 小竹元基 (東京大) 山本裕喜 (東京大) 井上剛伸 (国リハ)

吉田葉子 (下志津病院) 三方崇嗣 (下志津病院)

Motoki SHINO, The University of Tokyo

Yuki YAMAMOTO, The University of Tokyo

Takenobu INOUE, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities

Yoko YOSHIDA, Shimoshizu National Hospital

Takashi MIKATA, Shimoshizu National Hospital

Abstract: Persons with the severe Duchenne muscular dystrophy (DMD) cannot operate the electric wheelchairs because of lack of muscular power and deformation of hand. To deal with this difficulty, the authors developed two new input devices. These devices were developed based on the quantitative evaluation of the hand function of persons with severe DMD. Thus these devices can be operated by slight force and movement of their fingers. Furthermore the shape of these devices is determined by considering the shape of the hands of persons with severe DMD.

Key Words: Duchenne Muscular Dystrophy, Electric Wheelchair, Input Device, Welfare Engineering

1. はじめに

電動車いすは自立した移動を支援するための重要な福祉機器であるが、上肢の筋力不足や座位保持の困難により、既存の電動車いすの操作が困難である重度障害者も少なくない。症状の進行に伴い電動車いすの利用が困難になる疾患の1つに、デュシャンヌ型筋ジストロフィー症 (DMD) がある。進行性の筋力低下や関節可動域の制限を示す遺伝性の疾患であり、根本的な治療法は存在しない。DMD 患者の多くは電動車いすを利用するが、症状の進行に伴い上肢に機能障害が現れると、ジョイスティック等の標準的な入力装置の利用が困難になる。

この問題に対して、現在ではジョイスティック (以下 J/S) の適合作業が行われている⁽¹⁾。J/S の適合作業とは、患者の残存機能の程度や要望に合わせて J/S の形状やバネを変更したり、支持部を追加したりする作業のことである。J/S の適合作業により、多くの DMD 患者が電動車いすの操作を続けることが出来ているが、一方で J/S の適合作業が難しく、電動車いすの操作が困難な重度 DMD 患者がいるのも事実である。そのような人々が電動車いすを操作できるようにするため、本稿では重度 DMD 患者の手指機能を考慮した電動車いすの入力装置を開発することを目的とし、2名の DMD 患者を対象に、その特性を考慮した電動車いすインターフェイスの開発、及びその評価を行った。

2. 本研究の位置づけ

障害により電動車いすの操作が困難である人々を支援するため、その人達の持つ残存機能を利用した入力装置の研究が行われている。DMD 患者は手指機能が残りやすいと言われており、実際に日常生活で手指によりテレビのリモコンなどを操作している様子も見られたため、本研究では DMD 患者の残存機能として手指機能に着目した。

筋ジストロフィー患者の手指機能に着目した入力装置の研究、開発として、J/S の適合作業、力覚入力装置の開発⁽²⁾が挙げられる。J/S の適合作業では患者の能力評価や入力装置の設計が作業者の知識、経験に基づいて行われる。そ

のため作業者の知識、経験が不足している場合、患者の能力が残存していても J/S の適合作業が難しくなる。本研究では定性的な測定や設計による難しさをなくすため、患者の能力を定量的に把握し入力装置の開発を行った。

力覚入力装置の開発では、ベッカー型筋ジストロフィー (BMD) 患者を対象とした入力装置の開発を行い、BMD 患者に対しては有効であると明らかにした。しかし、BMD よりも進行が早く手指変形も現れる重度 DMD 患者では、入力装置の形状が手の形状に合わず扱うことが出来なかった。そのため重度の DMD 患者を対象とする場合は、対象者の手の形状まで考慮する必要があると考える。

以上を踏まえ、本研究では重度 DMD 患者でも操作可能な入力装置を提案するため、指の力や動き、手指の形状を定量的に把握し入力装置の開発を行う。入力装置の開発プロセスを図 1 に示す。

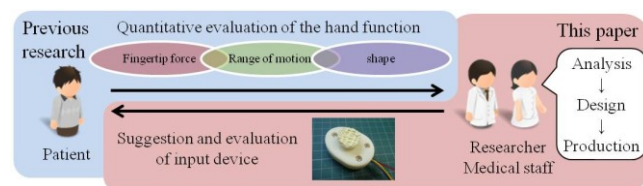


Fig. 1 The process of developing the input device

3. 先行研究⁽³⁾の概説

先行研究では、認知機能の低下が見られず、上肢ステージの異なる 5 名の DMD 患者の手指機能の測定を行った。5 名の DMD 患者の年齢、上肢ステージ、電動車いすの使用履歴を表 1 に示す。また変形が見られた D, E の手の写真を図 2 に示す。

対象者の指先力 (瞬間力、持続力)、指先の可動域を定量的に評価するため、図 3 に示すように関節座標系を定義し、力センサ、モーションキャプチャを用いて測定を行った。本研究では、指先の持続力と可動域のデータを利用する。指先の持続力は、関節座標系の各軸の正負方向に一定時間発揮することの出来る力の平均値とした。また指先の可動

域は、関節座標系の各軸方向に動かすことの出来る範囲とした。母指、示指の持続力、可動域の測定結果をまとめたものを図4に示す。横軸が母指、示指の可動域、縦軸が持続力を示し、対象者ごとに関節座標系の各軸方向の値を示す。ただし持続力は各軸の正負方向で2つずつあるが、力の許容範囲を見るため大きさが小さい方を採用した。大まかな傾向として上肢ステージが高くなるほど、持続力が低下していることが分かる。特に持続力の低下が大きい対象者D、Eに着目すると、母指のほうが示指よりも、持続力、可動域が残存している傾向が見られる。

Table 1 Detail of the subjects

ID	Age	Stage	Experience of operating the electric wheelchair
A	29	7	Using
B	26	7	Using
C	24	8	Used until 12 years old
D	25	11	Used until 16 years old
E	28	12	Used until 19 years old



(a) Subject D (b) Subject E

Fig. 2 The hand of each subject

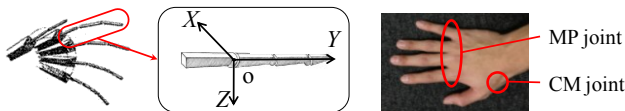


Fig. 3 Dynamic link model of hand and joint coordinate system

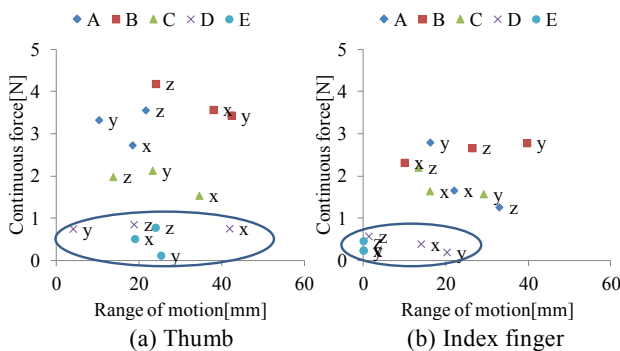


Fig. 4 The relationship between continuous force and range of motion

4. 対象者

先行研究で対象とした5名のDMD患者のうち、指先の持続力の低下が特に大きく、図2の様に手指の変形が見られたD、Eの2名を対象とした。これは症状が重度の患者の方が入力装置の開発が難しく、そのような対象者に入力装置を提案することが出来れば他の3名にも同様の手法により入力装置を提案できる可能性が高い、と考えたからである。

5. 入力装置の開発

DMD患者の身体的特徴、日常生活の観察から入力装置の要求機能を定め、その要求機能を満たすように、入力装置の形状、入力方法の設計を行う。

5-1 入力装置の要求機能

電動車いすの入力装置の要求機能を定める。前提として、本研究では手指の残存機能を利用する。DMD患者は症状の進行に伴い、指先の力や動きが衰退するため、対象者の持つ手指の力、動きで入力装置を操作できる必要がある。また、症状が進行すると手の変形が見られる患者も多い。本研究の対象者であるD、Eも、図2に示すように手の変形が見られた。そのため、手の変形している患者でも入力装置を操作出来るように変形を考慮する必要がある。また重度DMD患者は上肢の筋力低下や可動域の制限が現れるため、操作をする際に手を移動できる範囲が限られる。そのため患者が任意の位置で入力装置を操作できる必要がある。また電動車いすを操作するためには、J/Sの様に電動車いすの速度と方向を制御できることが望ましい。

以上のことから、本研究で開発する入力装置の要求機能を以下のように定めた。

- (1) 患者の持つ手指の力、動きで操作可能であること
- (2) 手の変形していても操作可能であること
- (3) 任意の位置で操作可能であること
- (4) 電動車いすの方向制御、速度制御が可能であること

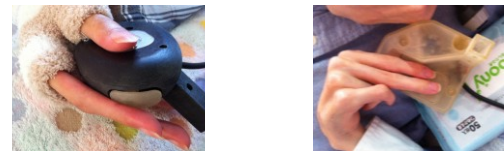
5-2 入力装置の形状

要求機能の(2)、(3)を満たすようにするため、入力装置の形状を対象者の手指形状、姿勢を考慮して設計する。

対象者Dは母指のCM関節、四指のMP関節の動きが残存しており、手の平と母指の間に25mm程度の高さの空間がある。そこでその空間に収まる様な卵型形状を提案した。対象者Eは四指のMP関節が屈曲位で拘縮しており、母指と示指、中指の間の隙間が狭い。そこで母指と示指、中指の間に挟みこめる様な薄い紙型形状を提案した。試作した入力装置のモックを対象者が把持している様子を図5に示す。試作したモックの形状に対して対象者D、E、及びOTから以下の様な意見を頂いた。

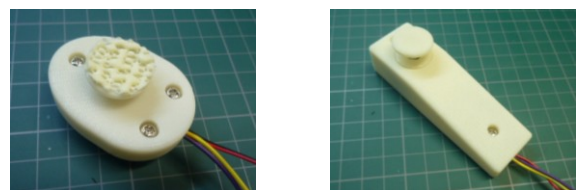
- ・ 卵型は把持しやすいが、操作することを考えると大きく、手に対する入力装置の角度や位置調整がづらい。
- ・ 紙型は把持しづらく安定しない

これらの意見を考慮し入力装置の形状の再設計を行った。対象者Dのための入力装置は、把持だけでなく操作もしやすいように、図6に示すように概形は変えずに小型化したものを提案した。対象者Eのための入力装置は、手の中に挟み込むよりも手で体に押し付けて固定する方が安定する考え、左手、右手でお腹に押し付けて固定出来るように棒形のものを提案した。



(a) Egg-shaped for subject D (b) Sheet-shaped for subject E

Fig. 5 The state of gripping the input device



(a) Input device for subject D (b) Input device for subject E

Fig. 6 The shape of the input devices

5-3 入力方法

要求機能(1), (4)を満たすように入力装置の入力方法の検討を行う。入力には、図4の指先の持続力、可動域の測定結果から、他の指よりも能力の良い母指を利用する。

電動車いすの方向を制御するには、電動車いすの前後方向と回転方向の2自由度を制御する必要がある。人間の指は大きく分けて、伸屈方向と、内外転方向の2自由度の動きや力を持つため、それらを電動車いすの制御に対応させることを考える。関節座標系のx軸方向は指の内外転方向と、y軸、z軸方向は伸屈方向と対応する。

まず母指の指先の可動域に着目する。母指と座標系の関係を図7に、指先の初期位置からの変位(可動域)をx-y平面、x-z平面に投影したグラフを図8に示す。グラフから分かるように、対象者Dはx、z軸の正負方向に10mm以上の可動域を持つ。また対象者Eは、x、y軸の正負方向に10mm以上の可動域を持つ。

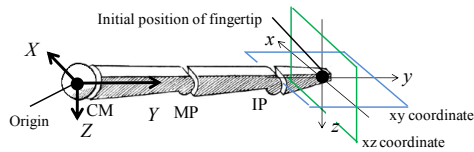


Fig. 7 Relationship between thumb and joint coordinate system

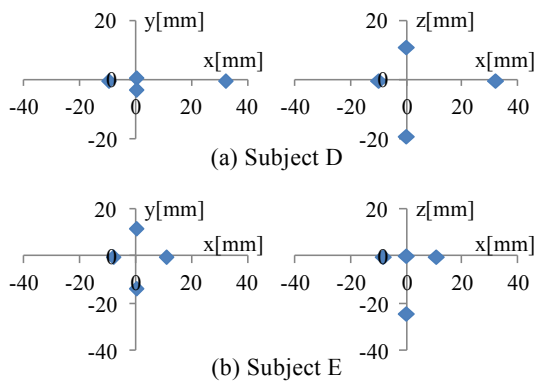


Fig. 8 The range of motion of thumb

次に母指の持続力に着目する。母指の初期位置における持続力をx-y平面、x-z平面に投影したグラフを図9に示す。対象者Dは、3軸方向に、0.7N以上の持続力を発揮した。対象者Eはx方向に0.5N以上を、y軸正方向には0.3N程度、負方向には0.2N程度を、z軸正方向には0.8N程度の持続力を発揮した。この様に各軸方向に発生可能な持続力は異なり、y軸正方向とz軸正方向の持続力を利用することで、伸屈方向に0.3N程度の力なら許容出来ると考えた。

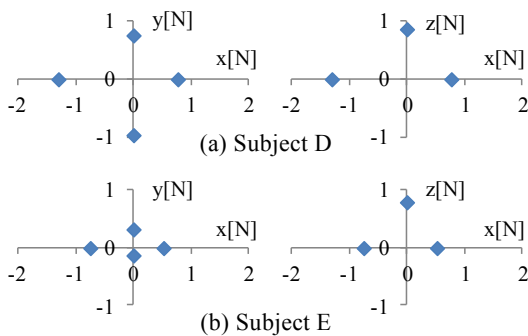


Fig. 9 The continuous force of thumb

以上をまとめると、以下の仕様を満たす入力方法であれば各対象者が入力装置の操作が可能であると考えられる。

- ・ 対象者D：可動域が10mm以内、反力が0.7N以下
- ・ 対象者E：可動域が10mm以内、反力が0.3N以下

この仕様を満たす入力方法の検討を行い、アルプス電気製のマイクロジョイスティック(RXJXK122000D)に20mmの長さを持つ皿型の操作部を装着した。

6. 入力装置の評価

6-1 評価実験の内容

開発した入力装置の有用性を評価するため、以下に示す2種類の課題とインタビューを行った。

I：入力可能範囲の習得課題

入力可能範囲を測定するための課題である。図10(a)に示すように、PCの画面に円と青色の操作マーカを表示し、対象者には操作マーカにより円をなぞるように指示を出した。操作マーカの位置座標はジョイスティックの中立点を原点とする極座標系で設定することで、ジョイスティックを傾けると、傾けた方向に、傾けた角度に比例して移動し、またジョイスティックが中立点に戻ると、操作マーカは原点に戻る仕様になっている。画面上に表示した円は入力者の最大値に対応する。操作マーカの位置座標を記録した。

II：目標追従課題

電動車いすの入力装置としての有用性を評価するため、PCの画面上に表示された操作マーカを、目標マーカに重なるように操作するという課題を行った。操作マーカの位置座標は、課題Iと同様に定まる。目標マーカの動きを説明する。電動車いすの入力装置としての評価を行うため、表2に示すように目標マーカの動きを電動車いすの操作に必要な入力と対応させ7種類用意した。課題1~4では、一定速度で電動車いすを前進、後退、左右回転させることを想定し、入力を一定値で維持する能力を評価するため、目標マーカが前後左右の4方向に10秒間留まるように設定した。課題5、6は、電動車いすの進行速度、回転速度を調整することを想定し、入力の大きさを調節する能力を評価するため、目標マーカがx軸、y軸上を規則的に20秒間移動するものとした。課題7は電動車いすで旋回する操作を想定し、入力方向を調節する能力を評価するため、目標マーカが半円状を20秒間、規則的に移動するものとした。

全ての課題は対象者の任意のタイミングで開始することが出来るように、マーカが重なった際に測定を開始する設定とした。マーカの動きがわからないことによる影響を排除するため、事前にマーカの動きを対象者に見せた。この課題では追従性を評価するため、操作マーカ、目標マーカの位置座標を記録した。

Table 2 Detail of the tasks

Task	Target position (x,y)	time t[s]	Movement of electric wheelchair corresponding
1	(R, 0)	10	Turn right
2	(0, -R)	10	Move back
3	(-R, 0)	10	Turn left
4	(0, R)	10	Move forward
5	(Rcos ω t, 0)	20	Adjust the direction
6	(0, Rcos ω t)	20	Adjust the velocity
7	(Rcos(90(1+cos ω t)), Rsin(90(1+cos ω t)))	20	Move without stopping

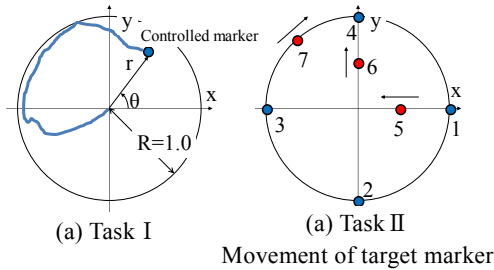


Fig. 10 Experiment of the tasks

6-2 実験結果

入力可能範囲の取得課題の結果を図 11 に示す. 対象者 D は全体的に入力が安定せず, 特に右半分は入力することが出来なかった. 対象者 E は概ね円を描くことが出来たが, 右下の一部は入力することが出来なかった.

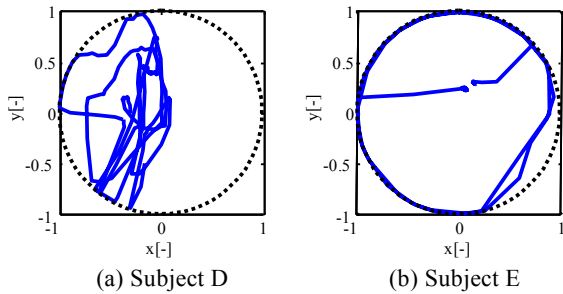


Fig. 11 Input range of each subject performed

目標追従課題の結果を表 3 に示す. 課題 1~6 は操作マーカーと目標マーカーの距離差の平均値を, 課題 7 に関しては目標マーカーと操作マーカーの角度差の平均値を記してある. 対象者 D の課題 1, 2, 5 は, 目標マーカーに到達することが出来ず, 測定不可能であったため空欄とした. 課題 7 の具体的な出力例を図 12 に示す. 対象者 D は入力が不安定であるが, 対象者 E は安定した入力により目標マーカーを追従できていることが分かる.

Table 3 Result of the tasks

ID	Task						
	1	2	3	4	5	6	7
D	—	—	0.00	0.00	—	0.39	43°
E	0.00	0.01	0.00	0.00	0.14	0.15	8°

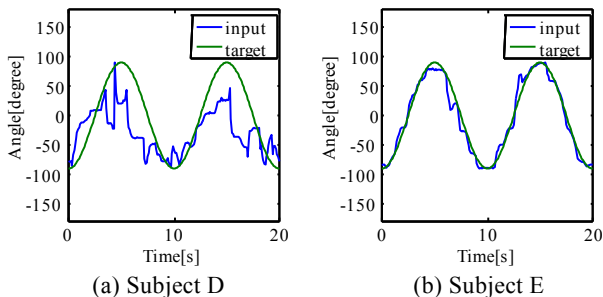


Fig. 12 The detail result of task 7

6-3 考察

対象者 D の入力可能範囲が限られた原因は, 操作に必要な力, あるいは可動域が不足していたことであると考えられる. 図 13 に実験中に記録した映像から, 無負荷で母指を x 軸方向に動かしている画像を切り抜き合成したものを示す. この図から, 対象者 D の母指は x 軸方向に 20mm 以上の可動域を有することが分かる. また 5-3 節で定めた様に入力装置の操作に必要な可動域は 10mm であるため, 対象

者は入力装置を操作するには十分な可動域を有していたと考えられる. 従って入力可能範囲が限られた原因は, 持続力が不足していたことだと考えられる.

対象者 E は概ね入力することが可能であり, 目標追従課題も小さな距離差, 角度差で課題をこなした. この結果は, 重度の DMD 患者に対して手指機能を定量的に把握し入力装置を開発することの有効性を示していると考えられる.

対象者が入力装置を操作している様子を図 14 に示す. 図 14 に示すように, 対象者 D は入力装置を把持し, 対象者 E は入力装置をお腹に押し当てて操作したのだが, 対象者 E は, 操作しやすいように入力装置を横向きにした. これは, 指の可動範囲に入力装置の操作面を合わせるために行なったことであると考えられる. 今後は対象者が入力装置を利用する際の操作する面と指先の姿勢まで考慮し, 指の可動範囲に入力装置の操作面が合うように形状設計することで, より操作しやすい入力装置が設計できると考えている.

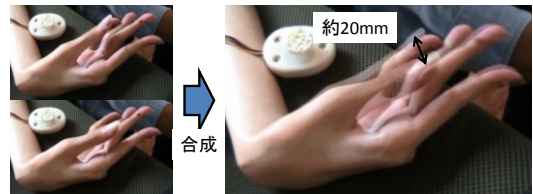


Fig. 13 Movement of thumb of subject D

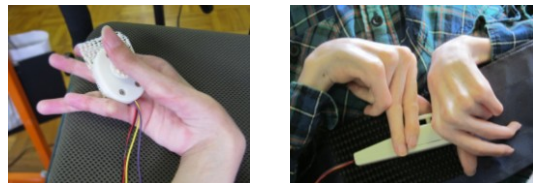


Fig. 14 The state of operating input device

7. まとめ

重度 DMD 患者の手指機能を考慮した電動車いすの入力装置を開発することを目的とし, 2 名の重度 DMD 患者を対象に, 手指機能, 手の形状を考慮した入力装置の開発を行った. その結果, 以下の知見を得た.

- (1) 重度 DMD 患者の電動車いすの入力装置に用いる残存機能として, 手指機能の有効性は高い.
- (2) 対象者の持つ指の力, 可動域により操作可能な入力方法を設計し, 患者の手指形状に合わせて入力装置の形状を設計することで, 重度 DMD 患者でも操作可能な入力装置を設計することが出来る可能性を示した.

また今後の課題として, 入力装置を扱う指先の姿勢まで考慮し, より操作しやすい入力装置の操作面を設計することを考えている.

謝辞

本研究にご協力して頂いた下志津病院の職員の方々, 対象者とそのご家族の方々に感謝の意を表します.

参考文献

- (1) PT・OT共同研究連絡協議会, 筋ジス患者の使いやすいスイッチ・コントローラの工夫, 2005.
- (2) 山川雄司, 小竹元基ら, 重度障害者を対象とした電動車いす力覚入力システムの開発, 福祉工学シンポジウム講演論文集, pp.39-42, 2006.
- (3) 沈眞用, 小竹元基ら, 電動車いす操作のための Duchenne型筋ジストロフィー者の上肢機能調査, WWLS2010.