

指先を対象とした家庭用リハビリテーションデバイスにおける 麻痺の回復度定量化に関する研究

Quantify motor function improvement of finger using device for home rehabilitation

○ 古館裕大（公立ほこだて未来大学大学院） 山本一希（公立ほこだて未来大学大学院）

千葉馨（函館市医師会病院） 石田裕二（北海道文教大学） 三上貞芳（公立ほこだて未来大学）

Yuta FURUDATE, Future University Hakodate
Kazuki YAMAMOTO, Future University Hakodate
Kaori CHIBA, Hakodate Medical Association Hospital
Yuji ISHIDA, Hokkaido Bnkyo University
Sadayoshi MIKAMI, Future University Hakodate

Abstract: Hemiplegia patients try to regain their motor function by rehabilitation during hospitalization. In particular, in finger rehabilitation, it after leaving hospital is quite important as same as rehabilitation during hospitalization because finger function is difficult to regain. However, rehabilitation at home has some problems: a huge cost of rehabilitation equipment and impossibility to be evaluated by therapist. These problems may cause delay of improvement or get worse. Thus, in this study, we report quantification system on simple and easy rehabilitation device for finger, we developed. Sequential pressure data (pressure signal) is measured by device with pressure sensor. We propose how to quantify finger improvement by calculating dissimilarity using pressure signal between healthy subject and patient.

Key Words: finger rehabilitation, occupational therapy, quantification, welfare robotics, Dynamic Time Warping

1. 背景

脳卒中や脳梗塞等の脳血管疾患を罹患すると、身体機能の低下等の様々な後遺症を残す。運動機能低下に関する最も代表的な後遺症は片麻痺である。片麻痺は身体の半側の運動機能が低下する後遺症である。片麻痺を患った患者は思い通りの動作が出来ず、生活の質 (Quality of Life, QOL) が低下する事が考えられる。片麻痺患者に対しては、QOLの向上を目的として、入院時に麻痺部位のリハビリテーション（以下、リハビリ）を行う。しかし、現代の医療制度ではリハビリ期間が決められており、麻痺部位の十分なリハビリが受けられないケースが存在する。特に手指の運動機能は回復しにくい為、退院後も継続したリハビリを必要とする。しかし、退院後における患者のみのリハビリは、医療スタッフが実施するリハビリを再現できない事や手指の麻痺がどの程度回復しているか（以下、指の分離度）の把握が困難な問題点が存在する。また、家庭用リハビリ機器自体が高価なため、患者が機器を手に入れる事ができず、リハビリを行う事が出来ない問題点も存在する。患者が退院後のリハビリを継続するためには、低コストなデバイスの提供と、入院時における評価と同様な尺度が必要となる。

本研究は、退院後の患者の指先リハビリを目的とした小型で安価なデバイスの実現にあたり、デバイスに搭載する指の分離度の定量手法の検討を行う。デバイスを用いて示指上下タスク（以下、示指タスク）中における各指の力を時系列で取得（以下、圧力信号）する。患者の圧力信号と健常者の圧力信号間で相違度（5章で説明）を算出し、定量化を行う手法を提案する。

2. 関連研究

2.1 デバイスのコストにおける問題点

リハビリ機器のコストの問題は、患者の麻痺の回復にも大きく影響する。Xingらの研究⁽¹⁾では、ウェアラブルなリ

ハビリ機器を提案している。空気圧アクチュエータを用い、患者の手指動作のアシストを行う。Kawasakiらの研究⁽²⁾では、患者の健側と麻痺側の両方を使ったリハビリ機器を提案している。麻痺側のリハビリを、健側でサポートさせる機構となっている。健側で麻痺側の動作の計測も行う。

両研究とも共通して、機構が複雑且つ大型であるためコスト面で患者の負担となる問題点が挙げられる。

2.2 麻痺の回復評価における問題点

Yushinらの研究⁽³⁾では、母指以外の全ての指の力を測定することにより、指の分離度の定量化を行っている。測定時におけるタスクは母指以外の指を使用し、1本の指を伸展させるタスク、示指から小指までの全ての指を伸展させるタスクを行う。各タスク、各指の伸展動作における力のピークを用いる事により、指の分離度の定量化手法を提案している。しかし、瞬時的な力のピークのみを用いた定量化となっているため、指の動作全体が考慮されていない問題点が存在する。

3. リハビリシステム

3.1 リハビリデバイスの機構

Fig.1に測定装置、Fig.2にデバイスに搭載されたセンサ図を示す。本研究は、指先を対象とした家庭用リハビリアシストデバイスにおける、デバイスに搭載する指標の検討を行う。従って、本研究で開発したデバイス⁽⁴⁾により測定を行う。本デバイスは、指を置く鍵盤を有し、サーボモータにより任意の1本の鍵盤を選択し、独立して持ち上げる事が出来る。手指の状態は、デバイスに搭載された圧力センサにより、母指が本体を押し付ける力、示指から小指までが鍵盤を押し下げる力を測定することができる。本デバイスは非装着型である事、フィルム型の圧力センサを用いる事から非常に簡便な装置となる。

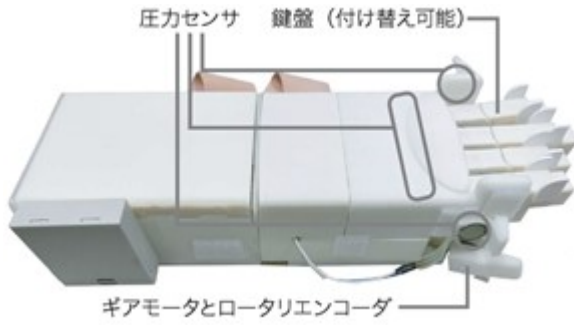


Fig.1 Measurement device

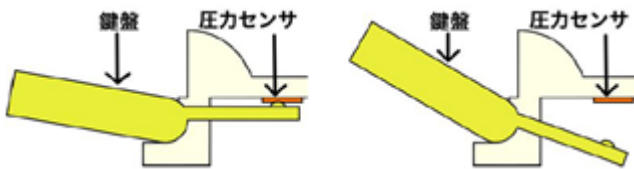


Fig.2 Figure of sensor placement

3.2 測定手順

本測定では、示指（以下、タスク指）と中指、薬指、小指（以下、非タスク指）の圧力を時系列で測定する。デバイスが測定を開始してから被験者は3秒後に示指を上げ、上げた高さを維持する。次に、示指の鍵盤の上昇により、示指を上げた角度を測定する。測定後は鍵盤が下降し、鍵盤が下降次第、示指を下げる。示指を下げた後3秒間待機する。本手順を1セットとする（以下、示指タスク）。本測定は、「リハビリ後の効果判定」を目的とするため、リハビリ手順中にデバイスから患者への介入は行わないものとする。従って、患者の純粋な手指の動作を評価することができる。

4. 圧力信号の分析

4.1 健常者における圧力信号の分析

Fig.3 に健常者における示指の圧力信号例を示す。健常者は麻痺を患っていないため、正常に指を動かすことができる。全ての健常者に渡って、多少の個人差はあるものの、同様の動作で示指タスクを遂行することが考えられる。従って、健常者間の圧力信号には類似性が見られる。

4.2 患者における圧力信号の分析

片麻痺の患者を評価する臨床的尺度の1つに、Brunnstrom Stage（以下、Brs）が存在する⁽⁵⁾。Table.1 にBrsの概要を示す。患者は片麻痺の状態、麻痺側の運動機能に応じてBrs. I からBrs. VIまでの6段階に分類される。ステージが上がれば上がるほど、指の分離が進んでいると評価できる。Fig.4 に健常者、Brs. III、Brs. V患者の圧力信号を示す。Fig.4 より、Brs が上がれば上がるほど、患者の圧力信号と健常者の圧力信号間の相違度が小さくなる事が分かる。以上より、本研究では「患者の指の分離が進むほど、患者と健常者の圧力信号間の相違性が小さくなる」仮定の下、示指タスク中のタスク指、非タスク指の圧力信号を定量化に用いるものとする。

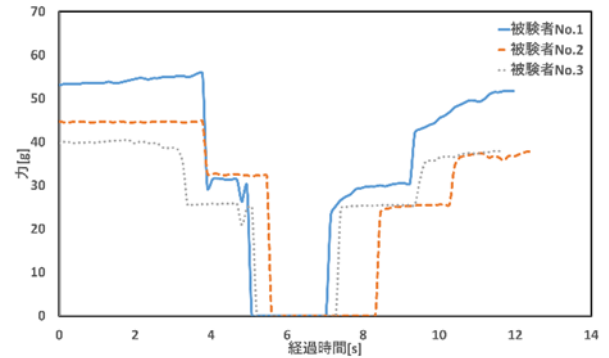


Fig.3 Healthy subject signals (index finger)

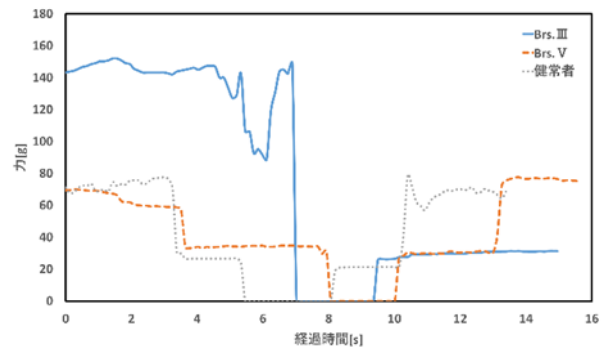


Fig.4 Signals of healthy subject and patient (index finger)

Table.1 Brunnstrom stage (finger)⁽⁵⁾

Brs	概要
Stage I	弛緩性
Stage II	指屈曲がわずかに可能か、ほとんど不可能
Stage III	指の集団屈曲が可能。随意的な指伸展は不可
Stage IV	指伸展は半ば随意的に、わずかに可能
Stage V	指の集団伸展が可能
Stage VI	随意的な指伸展が可能、指の分離運動も可能

5. 指の分離度の定量化における提案手法

5.1 提案手法 定量化システム

関連研究⁽³⁾では、手指の麻痺の定量化手法について、患者の動作全体を捉えきれない問題点を挙げた。本提案手法では、圧力信号を評価する事により、患者の時系列の動作全体を捉える。Fig.5 に、本研究で提案する定量化システムの概要を示す。本研究では示指タスク中における、示指（以下、タスク指）と中指、薬指、小指（以下、非タスク指）それぞれについてFig.5の定量化を行う。母指は、患者の麻痺の程度によっては正しく圧力信号が取得できないため、今回は定量化の対象外とした。

定量化を行う前に、初めに本定量化システムで使用する健常者テンプレート信号を選出する。健常者テンプレート信号は、データ収集を行った健常者群の圧力信号の内、全健常者を代表する圧力信号である。健常者テンプレート信号を選出し、DBに登録することで、全健常者における個人差を抑えた信号と入力信号を比較することができる。健常者テンプレート信号の選出は、全ての健常者群の圧力信号

間で網羅的に相違度を算出する。その後、任意の基準となる信号と全ての信号の相違度の平均を求める。全ての信号が基準信号となるように網羅的に相違度を算出し、相違度の平均値が小さい順に基準信号を5周期選出した。

デバイスは示指タスク中におけるタスク指の圧力信号と、3つの非タスク指の圧力信号を入力信号として測定する。入力信号は振幅の正規化（次節で説明）を行う。入力信号の正規化後、対応する指の健常者DBからテンプレート信号5周期を取り出す。相違度は、テンプレート信号5周期と入力信号1周期との間で算出する。

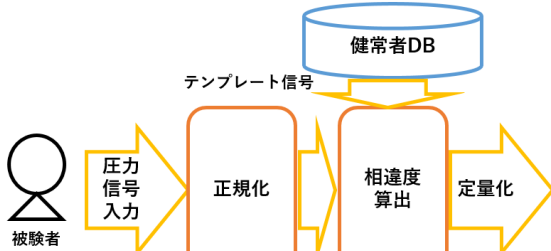


Fig.5 Quantification system

5.2 正規化

入力信号とテンプレート信号間で相違度を算出する前に、両信号とも振幅正規化を行う。本研究では、RMS 正規化、Peak to Peak 正規化（以下、PtoP 正規化）、最大値を1で正規化（以下、Nor1 正規化）の3種類の比較検討を行う。

5.3 指の分離度（相違度）算出法

信号の正規化後、入力信号と健常者テンプレート信号間の相違度を算出する。本研究では、2信号間の相違度を指の分離度とする。リハビリ効果判定時における、示指タスク遂行時間は、被験者ごとの違いや患者の回復度による違いが存在することが考えられる。このことから、被験者ごと、同一被験者であっても試行ごとに信号長さが異なる事が予想される。従って、入力信号と健常者テンプレート信号間の信号長さを許容した Dynamic Time Warping (以下、DTW) により算出する。DTW は振幅の差の累積が最も小さくなるように最短経路をたどる。最終的に算出した振幅の差の累積が、2信号間における相違度となる。

長さ m の入力信号を $X = \{x_i | i = 1..m\}$ と長さ n の健常者テンプレート信号を $Y = \{y_j | j = 1..n\}$ とした時、2信号間の相違度 $DTW(X, Y)$ は以下の式で計算される。

$$DTW(X, Y) = f(m, n)$$

$$f(i, j) = \min \begin{cases} f(i-1, j-1) + d(x_i, y_j) & GP = 0 \\ f(i-1, j) + d(x_i, y_j) + GP & GP = |y_j| \\ f(i, j-1) + d(x_i, y_j) + GP & GP = |x_i| \end{cases}$$

ここで $d(x_i, y_j)$ は2信号の時刻 i, j のそれぞれにおける振幅の Manhattan 距離である。GP は信号を非線形伸長した際のギャップペナルティである⁽⁶⁾。本研究では、信号長さによる相違度への影響を考慮して、最終的な相違度 D を以下の式で計算する

$$D = \frac{DTW(X, Y)}{m + n}$$

6. 実験と考察

6.1 データセット

Table.2 に本研究で行った実験のデータセットを示す。患者データは、滝川脳神経外科病院で延べ14名の片麻痺患者を対象として、開発したデバイスを用いて圧力信号を取得する実験を行った（2016年3月～6月）。健常者データは、公立ほこだて未来大学において同デバイスを用いて50名の健常者から圧力信号を取得した。

本研究では、Brs を指標として、被験者のグループ分類を行った。初めに健常者と患者の2つに分け、次に患者の中でも、随意的な指の伸展が可能なグループと不可能なグループに分類した。Brs. II 患者は弛緩により、指の随意運動が困難なため、今回は除外した。示指タスクは被験者1名当たり10回試行し、タスク指、非タスク指（中指、薬指、小指）ともに10周期の圧力信号を取得する。各グループに属する被験者の圧力信号を1つにまとめ、テンプレート信号及び入力信号として用いた。

6.2 評価

本研究では、健常者テンプレート選出と定量化の両方を行う。従って、交差検定（交差数5）により検証を行う。以下の手順で検証、評価を行う。

- 健常者グループに属する50人×10周期=500周期の圧力信号を5等分し、400周期を健常者テンプレート選出用信号とする。テンプレート選出用信号内で5周期のテンプレート信号を選出する。
- 健常者グループの信号群の内、残りの100周期と全ての患者グループの圧力信号を評価用信号とする。5周期のテンプレート信号と全ての評価用信号間で相違度を算出する。

全ての交差検証が終了した後、グループごとに各交差の相違度を1つにまとめ、相違度の平均値と標準偏差を算出した。最も指の分離が進んでいるのは健常者であり、患者についてはBrsが高ければ高いほど指の分離が進んでいる。平均相違度が小さければ小さいほど、指の分離が進んでいると評価できる。本研究では、相違度と指の分離の関係性が正しく示されているかを3種類の正規化ごとに評価した。

6.3 実験結果

Table.3 に本実験による定量化の結果、Fig.6 に RMS 正規化を行った定量化、Fig.7 に PtoP 正規化を行った定量化、Fig.8 に Nor1 正規化を行った定量化の図を示す。RMS 正規化と PtoP 正規化では、それぞれ小指、示指は正しい推移を示しているが、それ以外の指では正しい推移を示さない結果となった。Nor1 正規化では、全ての指に渡って、患者のステージが上がれば上がるほど、相違度の平均値が小さくなる（指の分離が進んでいる）結果となった。以上より、Nor1 正規化を用いた定量化では、患者の麻痺の状態と指の分離度を正しく定量化できている事が言える。

Table.2 Dataset

	グループ	年齢	被験者数
健常者	健常者	18歳～22歳	男女 50名
Brs. VI Brs. V Brs. IV	患者 (指伸展可)	62歳～86歳	女性1名 男女6名 男女4名
Brs. III	患者 (指伸展不可)	41歳, 55歳 (1名不明)	男女3名

Table.3 Experimental result

正規化	指	相違度		
		Brs.Ⅲ	Brs.Ⅳ～Ⅵ	健常者
RMS	示指	1.123 ± 0.323	1.428 ± 0.541	0.835 ± 0.483
		1.392 ± 0.884	1.939 ± 0.892	1.725 ± 1.020
	中指	1.043 ± 0.726	1.174 ± 0.804	1.220 ± 0.776
		1.201 ± 0.463	0.727 ± 0.587	0.707 ± 0.600
PtoP	示指	0.122 ± 0.020	0.103 ± 0.023	0.095 ± 0.020
		0.941 ± 0.873	0.553 ± 0.541	0.843 ± 1.994
	中指	2.196 ± 2.214	1.184 ± 1.502	1.746 ± 3.374
		1.345 ± 0.673	1.516 ± 1.722	1.903 ± 1.922
Nor1	示指	0.122 ± 0.020	0.103 ± 0.023	0.066 ± 0.020
		0.092 ± 0.057	0.086 ± 0.040	0.065 ± 0.027
	中指	0.094 ± 0.074	0.072 ± 0.049	0.057 ± 0.027
		0.082 ± 0.044	0.053 ± 0.035	0.050 ± 0.025

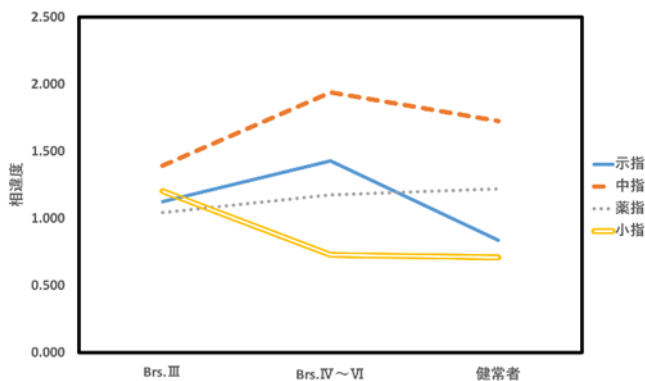


Fig.6 Quantification based on RMS normalization

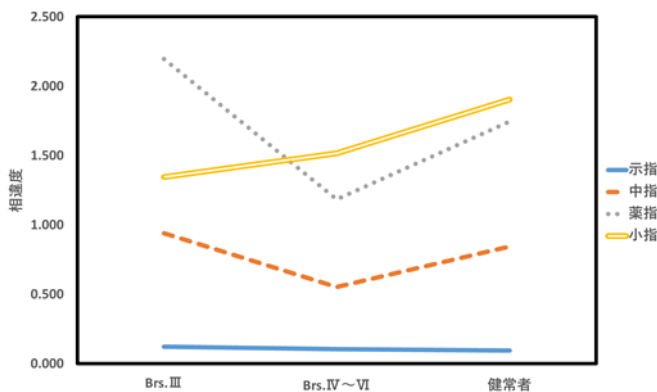


Fig.7 Quantification based on PtoP normalization

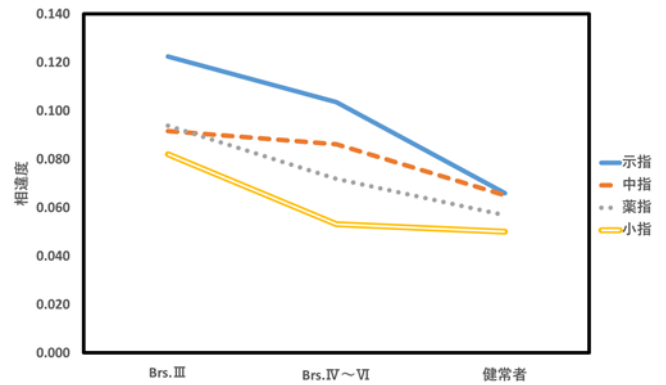


Fig.8 Quantification based on Nor1 normalization

7. 結論

本研究では，著者らが提案する指先を対象とした家庭用リハビリデバイスにおいて，麻痺の回復度を自動測定し提示することを目的として，圧力センサの時系列データ（圧力信号）を用いた定量化手法を検討した。

手指運動における麻痺の回復度合い（指の分離度）を，示指上げタスク中の患者の圧力信号と健常者の圧力信号間の相違度と考えて定量化を行う手法を提案した．患者の圧力信号は入力信号，健常者の圧力信号は入力信号もしくはテンプレート信号として定量化に用いた．圧力信号の振幅正規化として，RMS 正規化，PtoP 正規化，Nor1 正規化の3種類を用いた手法について比較検討を行った．入力信号（1周期）と健常者テンプレート信号（5周期）間の相違度はDTWを適用して算出した．被験者は健常者50名，患者14名（Brs.Ⅲ患者3名，Brs.Ⅳ患者4名，Brs.Ⅴ患者6名，Brs.Ⅵ患者1名）で実験を行った．最終的に，Nor1 正規化を用いた定量化では，全ての指に渡って，手指麻痺の状態と相違度が正しく対応して推移する結果となった．以上の事から，本研究で提案する，家庭用の簡便なリハビリ装置で患者の手指の回復度を定量化することができた。

謝辞

実験等に快くご協力いただきました，滝川脳神経外科病院・リハビリテーション科の皆様へ感謝いたします。

参考文献

- (1) Xing Kexin, et al, A wearable device for repetitive hand therapy, IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomechatronics, pp.919-923, 2008.
- (2) Kawasaki, Haruhisa, et al. Development of a hand motion assist rehabilitation therapy by patient self-motion control, 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, pp.234-240, 2007.
- (3) Kim Yushin, Woo-Sub Kim, and BumChul Yoon, The effect of stroke on motor selectivity for force control in single- and multi-finger force production tasks, NeuroRehabilitation, Vol.34, No.3, pp.429-435, 2014.
- (4) 山本一希，古館裕大ら，指の随意運動を対象とした作業療法リハビリを支援する簡便な家庭向けデバイス，ROBOMECH2016，2A2-03a1，2016
- (5) 岩崎テル子，小川恵子ら，標準作業療法学 専門分野作業療法学 第2版，医学書院，pp.341，2011.
- (6) 今野慎介，マルチバイオメトリクス導入による歩行動作特徴を考慮した個人認証法，公立はこだて未来大学博士論文，2016