

## 投稿

# バーチャルリアリティを応用した 手指リハビリテーション支援システムの研究

川崎晴久<sup>1)</sup>, 栄枝裕文<sup>2)</sup>, 岩村真事<sup>2)</sup>, 藤崎昌人<sup>2)</sup>, 木村宏樹<sup>1)</sup>, 西本 裕<sup>3)</sup>, 伊藤 聡<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

脳卒中や骨折などにより身体に障害を持つ人は年々増加している。身体に障害を受けた場合、失った機能を回復し自立した生活が行えるようにリハビリテーションが行われる。リハビリテーションは通常、セラピスト（療法士）の指導・補助のもとに行われる。しかし、患者数に対しセラピストの数は不

足しており、リハビリテーションを受ける時間は十分でなく、このため患者は失った機能を十分に回復できない。患者がより自立して生活するためには、指の操り動作や細かな動作ができるリハビリテーションが必要である。しかし、これまでに開発されているデバイスでは、患者の指を各指各関節について個別に動作補助をすることができず、手指の細かな動作の回復には不十分である。更に、手指のリハビリテーションでは指関節の可動域や速度など運動の回

## Study on Hand Rehabilitation Support System Applied Virtual Reality

Haruhisa KAWASAKI, Hirohumi SAKAEDA, Makoto IWAMURA, Masato SHINOZAKI, Hiroki KIMURA, Yutaka NISHIMOTO, Satoshi ITO

### Abstract :

This paper presents a hand rehabilitation support system for self-performing rehabilitation therapies. The developed system consists of hand exoskeleton device, which provides individual finger joint motion of disabled persons, and a self-motion control system joined with virtual reality (VR) technology. Most of disability caused by CVA (Cerebral Vascular Accident) or bone fracture are hemiplegia and impaired hand is only in one side. Based on the peculiarity of this disability, a self-motion control in which the impaired hand is driven by the healthy hand in the opposite side is adopted. In order to provide a pleasant and motivating training environment, VR environment displaying an enjoyable exercise is introduced. To verify the effectiveness of this system, the clinical trial was executed to one subject. Evaluation result of subject's functional recovery is also presented.

### Key words :

Hand rehabilitation, Self-motion control, Clinical test, Virtual reality

1) 岐阜大学工学部, Faculty of Engineering, Gifu University

2) 岐阜赤十字病院, Gifu Red Cross Hospital

3) 岐阜大学医学部, Gifu University School of Medicine

復具合を評価する必要がある。指関節角度の計測システムは研究・開発<sup>12)</sup>されているが、リハビリテーションを支援するデバイスにもその機能が必要である。

我々の研究グループでは、手指の細かな動作のリハビリテーションを患者自身で実施できるリハビリテーション支援システムを提案し、手指の細かな動作を補助するために、PIP関節の屈曲・伸展、MP関節の屈曲・伸展、内外転動作を各指に補助できるデバイスを開発<sup>3)</sup>した。実際のリハビリテーションの現場では、左右のうち片側が正常でもう一方のみに障害を持つ場合が多い。たとえば、脳卒中で見られる片麻痺はその典型であり、また、外傷による障害も両側が負傷する場合は少ない。本システムはそのような片麻痺の症状の患者を対象としている。

本論文は、患者が楽しくリハビリテーションを実施できるバーチャルリアリティを応用した手指リハビリ支援システムの機能と脳卒中患者1名に対しての臨床試験結果、及び今後の課題について述べる。

## 2. 手指リハビリテーション支援システム

### 2.1 システムの概念

リハビリテーションを必要とする患者は、例えば

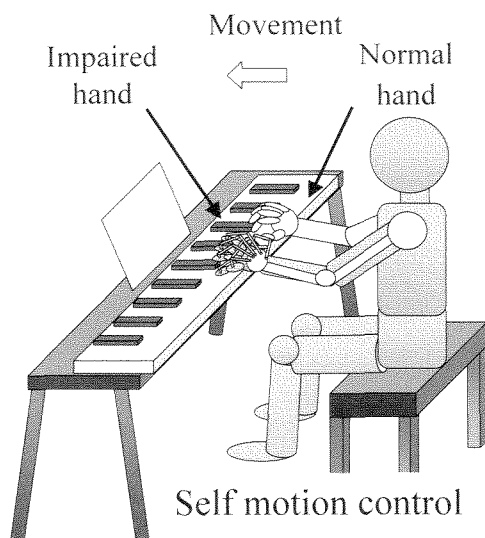


図1 セルフモーションコントロールの概念  
Fig.1 Concept of self-motion control

脳卒中では片麻痺というように、普通、片側にのみ機能障害を有しており、もう一方は正常である場合が多い。この特徴を利用し、患者の健側の動作をマスターとし、その動作をスレーブである患側運動の提示に用いる方法<sup>3)</sup>を採用（以下、セルフモーションコントロール<sup>1)</sup>と呼ぶ）した。セルフモーションコントロールの概念図を図1に示す。この手法には以下のような利点が考えられる。

- ・患者は自分がどのように患側を動かしているのかイメージしやすく、効果的な機能回復が望めること。
- ・1人でリハビリテーションを実施できること。
- ・患者の左右の手は、普通同一形状であることから、関節の可動域を越えた運動を提示する可能性が少ないこと。
- ・患者が痛いと感じたらその運動をやめることができ、安全であること。
- ・廃用性萎縮による筋力低下は、患側だけでなく健側にも現れ<sup>9)</sup>、この予防になること。

リハビリテーション中、患者の両側は左右対称の動作をすることになる。なお、肩・肘に対して患側の動作を健側で提示することで機能の回復が可能であることが報告<sup>6)</sup>されている。また、ミラー療法<sup>7)</sup>と呼ばれる手指リハビリでは、健側の手の動きをミラーを介して見ることで、あたかも患側の手が正常に動作するような感覚でリハビリテーションをすることにより、回復効果があると報告がある。本システムは、このミラー療法と類似の効果が期待できる。

### 2.2 デバイス設計

デバイスの設計方針として、

- (1) さまざまな患者の手のサイズに対応できること
- (2) 各指関節の補助運動において十分な可動域を確保できること
- (3) 安全であること
- (4) 装着が容易であること
- (5) 患者の指関節の計測機能があること

を掲げた。本デバイスは拇指では、MP 関節、CM 関節、指ではPIP、MP 関節の屈曲・伸展、内外転動作を補助することができる。設計方針の (1) (2) に対しては、人間の指とデバイスが閉リンク構造をもつ外骨格機構を採用し、指の2つの関節の動作を2つのDC サーボモータで補助する。各リンクの長さは、標準的日本人の指の長さに対応するように設定した。その詳細は文献<sup>9)</sup>を参照されたい。

安全性に対しては、リハビリテーションにおいてセラピストが指関節にかかるトルクを計測して許容最大トルクを定め、これに適するDC サーボモータを選定することで対応した。計測は、トルクゲージを患者の指と見立て、セラピストには女性や子供のような構造の弱い手指の患者に対し、これ以上力を入れると危険と感じる程度まで曲げるよう依頼し、計測値を患者に危害を与えない許容最大トルクに対応させた。

装着性に関しては、デバイスと指との固定にマジックテープを採用した。マジックテープは訓練中に剥がれることのないようにデバイスとの固定部分である指の背側の面積を大きくし、指の腹側は屈曲動作の妨げにならないよう5 mm 程度に薄く加工した。

指関節の計測機能は、モータ軸に直結したロータリーエンコーダの角度から、患者の指関節角度を計測することとした。

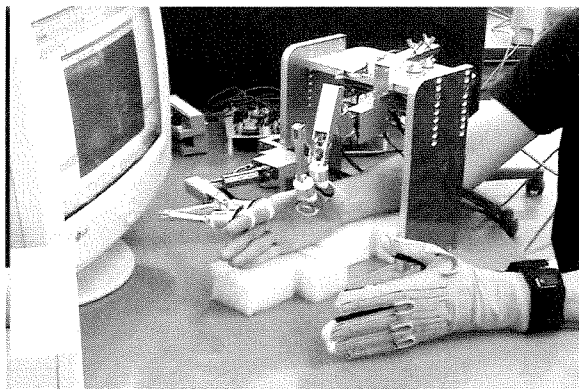


図2 システムの概観  
Fig.2 Overview of the system

## 2.3 システム構成

試作したシステム構成を図2に示す。健側指関節角度の計測には22関節角度を計測するデータグローブ (Cyber Glove, Immersion 社) を使用する。計測した指関節角度は制御PCに送られ、これらのデータより逆運動学問題を解くことで、デバイス各関節の目標角度が算出される。デバイスは、重力補償を含んだPD制御によりサンプリングタイム1 ms で制御される。

本デバイスは安全性のため出力トルクを弱くしているが、より安全性を高めるために患者用および監督者用の2個の非常停止スイッチを用意している。

## 3. VR を応用したシミュレーション

### 3.1 訓練メニュー

苦痛を伴うリハビリテーションを楽しく行えるよう、VR 技術を利用した訓練用シミュレーションを作成した。PC 上に表示されるVR空間の構築にはOpen GLを利用した。PC画面上には左右の手が表示され、それぞれ患者の患側、健側動作に追従する。健側動作は、健側に装着した指関節角度を計測するデータグローブで計測されたデータにより再現される。一方、患側動作はデバイスの関節角度から順運動学問題を解くことで得る。なお、システムの

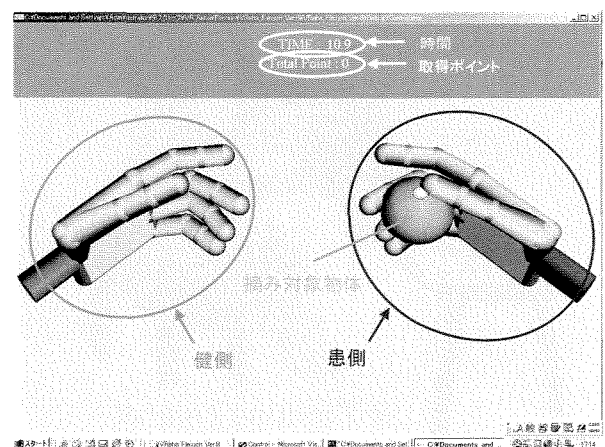
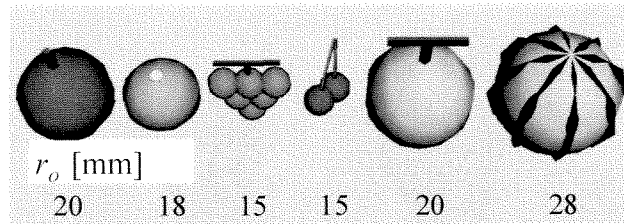
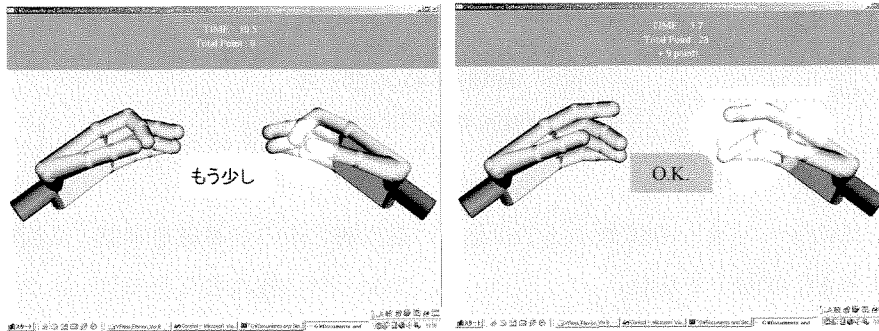


図3 つまみ動作の訓練シミュレーション  
Fig.3 Pinching training simulation



(1) 対象物体



(2) 画面表示

図4 対象物体と画面表示例

Fig.4 Object and examples of display

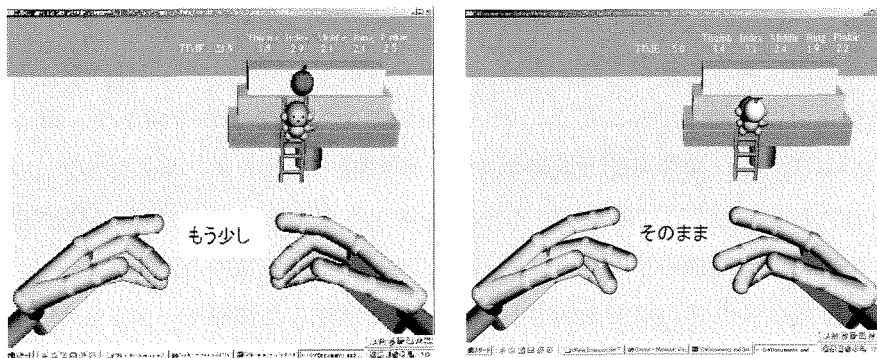


図5 伸展動作の訓練シミュレーション

Fig.5 Extension training simulation

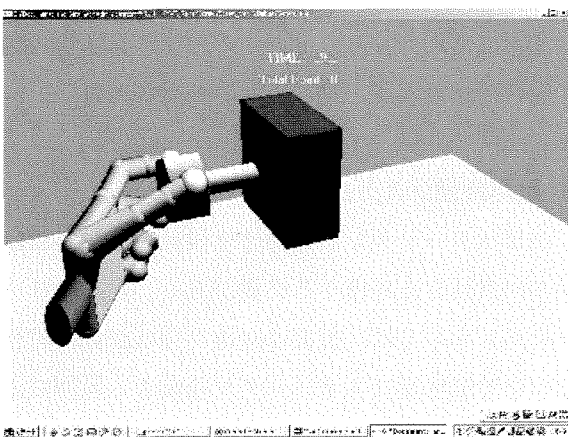


図6 ネジ回し動作の訓練シミュレーション

Fig.6 Turn screw training simulation

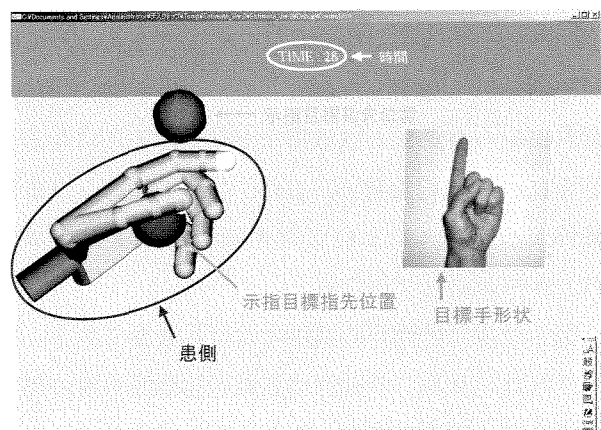


図7 動作評価システムの画面

Fig.7 Window of motion evaluation system

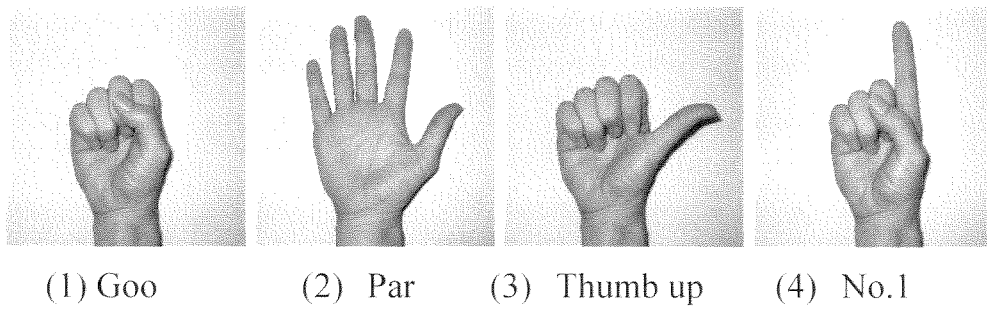


図8 評価用ハンドポーズ  
Fig.8 Hand pose for evaluation

小型化に向け、シミュレーションを描画する PC とデバイス制御する PC は同一とした。

訓練用プログラムとして、指の屈曲動作（つまみ動作）、指の伸展動作、ネジ回し動作のメニューを用意した。

図3に、指のつまみ動作の訓練における画面を示す。画面上には健側、患側動作に追従する手が表示され、患側につまむ対象である物体が表示される。患側に表示された物体を患側でつまむことで、ゲームクリアとなる。上部には、動作時間と取得ポイントが表示される。つまみ対象物体は図4(1)に示す6種類のフルーツがあり、訓練中ランダムに表示される。つまみ対象物体は半径  $R$  の球で近似されており、6種類のフルーツにはそれぞれつまみ判定球の直径  $r_c$  が定められている。訓練中、患側拇指、示指の指先間距離  $L_i$  が計算され、 $L_i < 2r_c$  の時、図4(2)に示すように画面上にコメント「もう少し」が表示され、つまみ対象物体は半透明となる。つまみ対象物体が半透明となることで、つまみ対象物体に隠れて見えなかった患側指先が見えるようになる。さらにつまみ幅を狭め、 $L_i < r_c$  のとすれば、つまみ動作が達成されたとしてコメント「OK」が表示され、ゲームクリアとなる。

図5は指伸展動作の訓練における画面である。表示された「サル」の動作は患側の指関節角度の和で与えられ、指を伸展/屈曲させると「サル」は梯子を上下する。梯子の上下幅は目標とする伸展角度と一致させている。この目標伸展角度は、現状におけ

る患側の指の可動域を考慮して設定する。「サル」がフルーツに触れることでゲームクリアとなる。

図6はネジ回し動作の訓練用プログラムである。ネジは1回転すると1ピッチ分並進し、23回転させるとゲームがクリアされる。ネジの回転角度  $\theta$  は次の動特性で動作するとしている。

$$I\ddot{\theta} = M_{thumb} + M_{index} + M_{hole}$$

ここで、 $I$  はネジの慣性モーメント、 $M_{thumb}$  は拇指の指先での摩擦モーメント、 $M_{index}$  は示指の指先での摩擦モーメント、 $M_{hole}$  はネジと穴の間の摩擦モーメントである。指先では、指先の物体への侵入量に比例した押し付け力が発生するとし、この押し付け力に比例した摩擦モーメントが生じるとした。ネジと穴の間の摩擦モーメントは、患者の状態に応じて一定の値を与えることとした。

以上のプログラムでは、患者のモチベーションを高めるため、ゲームクリア後にポイントが加算される。また、シミュレーション中の患側の指関節可動域、最大関節角速度、動作時間等が記録される。

### 3.2 動作評価システム

リハビリテーションの有効性を検証するためには患者の回復具合を評価する必要がある。従来のリハビリテーションでは、患者の回復具合の評価は関節可動域を計測するゴニオメータや達成する動作により行われている。本システムでは、デバイスの角度検出機能を用いて患者の指の関節角度が計測できるが、この計測ではデバイスが装着されるため、デバ

イスで動作補助されるとき関節角度となる。患者が指を能動的に動かすときの指の状態を計測するため、患側にデータグローブのみを装着して計測する動作評価システムを用意した。

本評価システムの画面の例を図7に示す。画面には目標手形状が表示され、患者は目標手形状と同じ姿勢になるように患側を動かす。用意した手形状は図8に示す「ゲー」「パー」「Thumb Up (拇指伸展, 示指屈曲)」「No.1 (拇指屈曲, 示指伸展)」である。特に「Thumb Up」と「No.1」では拇指と示指の屈曲と伸展の関係が逆になっており、このような運動の方向が逆になる動作ができるかどうかは脳卒中患者の回復具合を評価するうえで重要である。

手形状との一致の判別には指先位置を利用し、指先位置が目標指先位置を表す球内に入ったなら球が半透明になり、その状態をしばらく維持できれば、動作は達成されたとする。これを1セッションとし、その間の患者患側の能動的に動作可能な指の関節可動域、最大関節角速度、最大指先速度、最小目標-実際指先間距離、セッション達成時間が記録される。

#### 4. 臨床試験

##### 4.1 被験者と臨床試験方法

脳卒中により右半身に障害を有する60歳代の女性患者1名に対し、岐阜日赤病院で臨床試験を実施した。本治験は岐阜赤十字病院倫理委員会の承認を得た。また、被験者には事前にインフォームド・コンセントとして試験への参加について同意を得た。

試験開始時、患者は脳卒中発症後約3週間を経過していた。試験は従来のセラピストによるリハビリテーションとシステムを利用したリハビリテーションを併用して行った。セラピストによるリハビリテーション時間は20分、そのうち、手指のリハビリテーションは3分実施した。リハビリ支援システムを利用したリハビリテーション時間は患者に任せ、任意とした。この結果、患者は1回につき平均

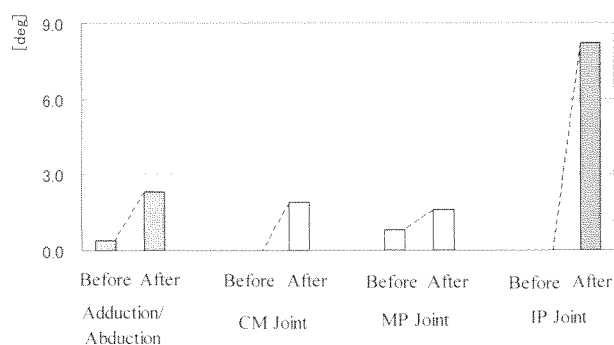


図9 拇指関節の動作範囲の変化

Fig.9 Change in movable range of Thumb joints

表1 指関節速度

Table 1 Angular velocity of finger joints

		[deg/s]	
Countdown of dates from initial		12	39
Thumb	Abduction / adduction	31	61
	CM	76	151
	MP	70	70
	PIP	0	136
Index finger	Abduction / adduction	17	23
	CM	77	154
	MP	71	139
	PIP	2.4	36

17分リハビリ支援システムを利用した。これは、セラピストによる手指のリハビリテーションの約5.5倍であり、システムを利用したリハビリテーションが患者のリハビリテーション時間の不足を解消することを示している。

リハビリ終了後、患者の関節可動域を前述の動作能力システムと従来から用いられているセラピストによるゴニオメータを使用した指関節可動範囲の計測も行った。試験は休診日を除いて毎日、約1ヵ月間行った。

##### 4.2 臨床試験結果

臨床試験開始当初、つまみ動作訓練において、当所設定の目標つまみ幅の対象物体をつまむことができなかつたため、目標つまみ幅を2倍、1.5倍、1.2倍と変更した。その結果、試験開始後23日を経

過した頃に、1.5 倍にした目標つまみ幅においてほぼすべての対象物をつまむことができ、25 日経過後に 1.2 倍、31 日経過後に 1.0 倍のすべての対象物をつまむことができた。臨床試験開始時と終了時における被験者の拇指の関節可動範囲の変化を図 9 に示す。他の指も同様に関節可動範囲が増大し、指機能の回復が確認できた。また、試験開始 12 日後と 39 日後における指関節角速度の測定結果を表 1 に示す。指関節の動作速度についても回復ができた。

なお、片麻痺の評価法として普及している Brunstrom stage は、試験開始時に I、3 日後に II、14 日後に III、25 日後に IV と回復が確認できた。回復の仕方は患者によりさまざまであるが、この改善は平均的な評価と比較すると若干改善が早いといえる。

#### 4.3 システムの評価

本システムがリハビリテーションにおいて有用であるかどうか、臨床試験結果や実際の体験を通して医療関係者に評価を受けた。その結果、次のコメントを得た。

- ・指が硬くなっていない脳卒中弛緩期のような患者に対して、本システムは有用である。
- ・より指が硬い患者に対しても動作を補助できるよう、デバイスを高出力化する必要がある。
- ・現在再現できているつまみ動作は鍵つまみのみである。対立つまみも再現できるようにすべきである。
- ・患者の回復の程度が予想よりも大きかった。
- ・手だけでなく、腕動作について 2 次的な回復が見られた。

また、臨床試験に参加した患者からは、次のコメントを得た。

- ・機器を利用したリハビリテーションはおもしろい。ただし、動作評価システムは嫌であった。
- ・システムを利用したリハビリテーション中、動かせない指がデバイスによる動作補助のおかげで動いて嬉しい。
- ・臨床試験後、システムを使用したおかげで指が少

し動くようになったと思っている。

- ・ゲームの中の物体はつまみやすく、簡単にしてほしい。
- ・今後、病院や自宅でこの機器が使用できるなら、使用したい。

本臨床試験では病院の事情により被験者が 1 名のみであるが、患者や担当医の話を総合すると、セルフモーションコントロールによる手指リハビリ支援システムが有効的に働いたと判断でき、今後の改善点も明らかとなった。

#### 4.4 今後の改善課題

リハビリテーション支援システムの改善課題を列挙する。

##### (1) デバイスの高出力化

安全のため、現在は低出力トルクのモータを選定したが、痙性の強い患者や拘縮が生じている患者に対して、デバイスの出力トルクを大きくする必要がある。ただし、安全対策が課題となる。

##### (2) 拇指の対立運動

現在のつまみ動作は拇指の指腹部が示指の側面に触れる鍵つまみである。拇指が他の指と対立できる新たな拇指機構が必要である。

##### (3) 達成感を感じる訓練

所定の動作が長く実現できないと、患者は不快感を強く感じる。これを回避するため、時間とともに目標レベルを変更し、達成感を感じられるようにする。

##### (4) 臨場感の向上

つまみ動作では、仮想物体をつまんでもその把持感覚はシステムの制約上患者に提示されない。このため、患者は動作が実現できたかどうか判定が困難である。効果音を鳴らすなどにより臨場感を高め、訓練意欲の湧く楽しいものにする。

##### (5) 動作評価システムの改善

患者の動作能力（関節角度、関節角速度等）を計測するため、患者にデータグローブを装着したが、この装着に時間を要した。非接触での計測が求めら

れる。

以上の改善を図り、あらためて本システムの効果の詳細な検証が今後の課題である。

## 5. まとめ

手指の細やかな動作のリハビリテーションを、患者が自身で楽しくリハビリテーションできるリハビリテーション支援システムを開発し、1例の臨床試験評価を行った。デバイスは指関節角度の計測器としても利用することができる。

リハビリテーションを飽きずに楽しく行えるよう、VR技術を利用したリハビリテーション訓練用プログラムを開発した。本システムの有効性を検証するために、1人の脳卒中患者に対し臨床試験を実施した。その結果、患者には機能の回復が確認され、その度合いはセラピストが予想したものより大きかった。セラピストと被験者のコメントから本システムの有用性が示唆された。

今後、5本指でリハビリテーションを可能とする手指リハビリテーション支援システムを開発し、多くの被験者に対し臨床試験を実施し、有効性の実証をめざす。

## 文献

- 1) K. L. Kilgore, et al., A Transducer for the Measurement of Finger joint Movements, IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, vol.6, no.4 (1998), pp.424-429.
- 2) G. J. Byers, et al., An Electromechanical Testing Device for Assessment of Hand Motor Function, IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, vol.6, no.1 (1998), pp.88-94.
- 3) 川崎晴久, 木村宏樹, 伊藤聡, 西本裕, 林浩之, 栄枝裕文, 手指リハビリテーション支援システムの研究 (第1報 概念と1例試験報告), 日本機械学会論文C編, 72巻720号, pp.228-233, 2006.
- 4) Haruhisa Kawasaki, Hiroki KIMURA, Satoshi ITO, Yutaka NISHIMOTO, Hiroyuki Hayashi, and Hirofumi Sakaed. Hand Rehabilitation Support System Based on Self-Motion Control, with a Clinical Case Report, CD-ROM Proc. of World Automation Congress (WAC) 2006, July 24-26, Budapest, 2006.
- 5) Satoshi Ueda, Rehabilitation, Blue Backs, Koudansya Co.,(1996) (in Japanese).
- 6) D. Jack, et al., Virtual Reality—Enhanced Stroke Rehabilitation, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol.9, no.3 (2001), pp.308-318.
- 7) E. L. Altschuler, et. al., Rehabilitation of Hemiparesis after stroke with a mirror, THE LANCET, Vol.353, June 12, (1999), pp.2035-2036.