指肢のリハビリテーションを目的としたパラレルメカニズム式 ウェアラブルハンドの基礎研究*

立 矢 宏^{*1}, 山 本 奨 悟^{*2}
吉 田 直 樹^{*2}, 宮 崎 祐 介^{*1}

Basic Study of Wearable Robot Hand using a Parallel Mechanism to Rehabilitate Fingers

Hiroshi TACHIYA^{*3}, Shogo YAMAMOTO,
Naoki YOSHIDA and Yusuke MIYAZAKI

^{*3} Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University,
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-1192 Japan

This study discusses a robot hand which can be mounted on the human hand to rehabilitate damaged fingers or to assist finger motion. Ordinary robot hands tend to be heavy and large, because they require to mount an actuator on each joint and to use many actuators. Thus, the robot hands are not appropriate to be mounted on the hand. This study notes that human hand grasping any objects composes parallel mechanism. As the parallel mechanisms can arrange the actuators on the base, their moving parts are simple and lightweight. Thus, we propose the wearable robot hand using parallel mechanism. The chains of the proposed mechanism are fixed to the tips of the fingers and the mechanism uses the grasped object by fingers as the output link. When human hand equipped with the proposed hand grasps an object, the proposed robot hand composes a parallel mechanism. Then, human fingers can be operated in a variety of motions. Furthermore, the restraint of the fingers by the wearable robot hand can be easily taken off by releasing the grasped object. Thus, human hand will be safe with respect to unexpected motion of the wearable robot hand.

Key Words: Parallel Mechanisms, Wearable Robot Hand, Rehabilitation, Machine Element, Mechanism, Medical and Welfare Assistance

1. 緒 言

脳神経系の障害や事故などの後遺症による人体の麻痺部や手術後の患部には筋肉および関節の機能の退化を防ぐ、また、回復させるためのリハビリテーション(以下、リハビリ)が必要となる。リハビリを行うためには、通常、作業療法士など専門家の補助を必要とする。したがって、患者自身の都合がよい時間・場所で訓練を行うことは難しく、継続的かつ集中的なリハビリの実施は困難である。

以上のことから著者らは、訓練者が他者の補助を必要とせずに手指のリハビリを行う方法として、ロボットハンドを訓練者の手指に装着し動作させ、手指の操り動作、屈伸を行わせることを検討した。しかし、従来のロボットハンドの多くはシリアル機構であり、各関節にアクチュエータを配置するため機構全体が大型・高重量となり、人間への装着には適していない。

そこで本論文では物体を把持した手指が、物体を出力節、指を連鎖、手のひらをベースとするパラレルメカニズムを形成していることに注目した。すなわち、人間の手指が物体を把持した状態で、同物体を出力節とするパラレルメカニズムを手指に装着し、その位置・姿勢を変化させれば、物体を把持している指にも操り動作時と同

様な屈伸を行わせることができる。さらに、パラレルメカニズムを用いたロボットハンドはアクチュエータを関節上の各関節に多数配置する必要がなく、全てベース上に配置できるため、可動部の小型化・軽量化が可能であり、手指への装着に適する。

本論文では以上で述べた装着型のロボットハンド、すなわち、パラレルメカニズム式ウェアラブルハンドについて、まず、機構の形式を提案する。次に、同機構の運動学解析方法を示すとともに、人間の指肢の寸法、機構の運動特性を考慮して機構寸法を決定する。さらに、ウェアラブルハンドを試作し動作を測定して、その有用性を示す。

2. 機構形式の決定

2.1 指のモデル ウェアラブルハンドを装着する人の指の構造について検討する。親指以外の4本の指は図1に示すように3つの関節で構成されている⁽¹⁾。各関節は指先側からDIP(Distal interphalangeal)関節、PIP(Proximal interphalangeal)関節、MP(Metacarpophalangeal)関節と呼ばれている。各関節の自由度は、手のひらと指の連結部分であるMP関節が2自由度、PIP関節、DIP関節がいずれも1自由度である。また、親指の関節は図1に記すように、指先側からIP(Interphalangeal)関節、MP関節、CM(Crmpometacarpal)関節と呼ばれる。CM関節は手のひらの内部に存在する関節である。親指の各関節の自由度は、IP関節、MP関節がそれぞれ1自由度、CM関節が2自由度である。

* 原稿受付 2006年7月20日。

^{*1} 正員、金沢大学大学院自然科学研究科(〒920-1192 金沢市角間)。

^{*2} 金沢大学大学院自然科学研究科。

E-mail: tachiya@t.kanazawa-u.ac.jp

Fig. 1 Model of the finger

Fig. 2 Model of hand-grasping

指による物体の把持を観察すれば、人差し指、中指、親指が、小指、薬指に比べて大きな変位および力を発生し、主にこれら3指を用いて物体を操ることが多い。そこで本論文では、人差し指、中指、親指（以下、指肢と記す。）を強制的に屈伸し、虫様筋、骨間筋などの指関節の屈曲・伸展に関する主要筋⁽¹⁾の回復補助および硬直防止、さらに、各指関節の硬直を防ぐリハビリを行うためのウェアラブルハンドを検討する。なお、以下、親指、人差し指、中指を第1指、第2指、第3指、各指肢における関節を手のひら側から、第1関節、第2関節、第3関節と記す。

2・2 機構の形式 指で円板状の物体を把持した手指の概略を図2に示す。図2中の $O_h - X_h Y_h Z_h$ は把持物体上面の法線方向を Z_h 軸とし、 X_h および Y_h 軸がなす平面が把持物体の上面と平行になるように設定した静止座標系である。物体把持時における手指の動作としては図2の状態から、把持物体を各軸方向に並進および回転させることが考えられる。これらの動作で指肢の屈伸量が特に必要な動きは Z_h 軸方向の並進、 $X_h Y_h$ 平面内における任意軸周りの回転である。そこで、本論文では、構造を単純とすること、アクチュエータを少数とすること、さらに、装着の対象とする指肢の数を考慮して、ウェアラブルハンドの機構形式を3つの連鎖からなる空間3自由度パラレルメカニズムとする。

対象とするウェアラブルハンドは、各指肢において把持時の角変位が大きい第1および第2関節の屈伸を目的とする。これらの関節の屈曲方向に注目すれば、各指肢に含まれる関節の回転軸はほぼ平行であり、指肢のみの運動は概ね平面内で行われる。各指肢にパラレルメカニズムの各連鎖を装着し対応させることとすれば、それぞれの連鎖も平面内で運動すればよい。そこで、本論文では空間3自由度パラレルメカニズムとして、図3に示す3つの同一構造の連鎖で構成される機構を用いる。各連鎖は2本の中間節からなり、ベースと中間節、中間節どうしを回転軸が平行な1自由度の回転対偶で連結し、中間節と出力節を3自由度の球対偶で連結する。各連鎖の運動は、1自由度の回転対偶の回転軸を法線方

Fig. 3 Model of the spatial 3 dof parallel mechanism

向とする平面内に拘束される。

図3において $L_{1,i} (i=1 \sim 3)$ および $L_{2,i} (i=1 \sim 3)$ は、それぞれ i 番目の連鎖におけるベース側および出力節側の中間節の長さを示す。 R_{out} 、 R_{in} は、出力節半径、ベース半径であり、各連鎖とベースを連結する対偶は半径が R_{in} である円周上に、また、各連鎖と出力節を連結する対偶は半径が R_{out} である円周上に配置される。

機構の位置・姿勢および対偶の位置を表すため、ベースに静止座標系 Σ_0 として $O-XYZ$ を、出力節に動座標系 Σ_p として $P-xyz$ をそれぞれ設定する。なお、 Σ_0 の原点は半径が R_{in} であるベースの中心点であり、 X 軸は原点 O から1番目の連鎖のベース上の対偶の方向、 Z 軸はベースから出力節に向かう法線方向とし、 Y 軸を X および Z 軸に対して右手直交座標系となるように設定する。また、機構の初期姿勢において点 P は Z 軸上にあるとし、 Σ_p と Σ_0 の各軸方向は同一とする。ベースにおける各連鎖の対偶の配置は、図3に示すように X 軸を基準とする角 ϕ_i によって表す。なお、本機構は通常のパラレルメカニズムと異なり、連鎖の配置は指肢の位置で決定され、必ずしも対称でない。

図3のパラレルメカニズムを用いたウェアラブルハンドの概略を図4に示す。各連鎖の出力節側の中間節がそれぞれの指肢の先端に連結され、ベースは手首に固定される。機構の出力節は実際には把持した物体となり、また、球対偶は指先と物体間の転がり接触を利用する。各連鎖は、ベース上の1自由度の回転対偶にアクチュエータを連結して駆動する。

なお、上述のように把持物体と機構は基本的には連結せず接触している状態であり、過度な負荷が加わる場合、接触が解消される。その結果、本機構では各連鎖の運動の拘束がなくなり、人間の手指への過大な負荷の作用、不自然な動作の強制を避けることができる。

3. 機構の位置・姿勢決め方法

Fig. 4 Outline of the wearable robot hand

Fig. 5 Specification of the posture

空間3自由度パラレルメカニズムのように自由度が6未満の空間機構では、位置・姿勢を表すために必要な一部の変数に拘束条件が課されるため、その解析は容易でなく数値解法が用いられる場合が多い⁽³⁾⁽⁴⁾。そこでまず、図3の機構の位置・姿勢の表現方法を定義し、同表現方法に基づいた逆運動学解析について述べる。

空間3自由度パラレルメカニズムの出力節の位置は、図3に示す静止座標系 Σ_0 における出力点Pの座標 (X, Y, Z) で、姿勢は出力節上の動座標系 Σ_p での角度 $(\theta_1, \theta_2, \theta_d)$ で表す。ここで、 θ_1 は図5に示すように xy 平面内に含まれる回転軸 ω の方向を表す x 軸からの角度であり、 θ_2 は同軸周りの回転角、 θ_d は z 軸周りの回転角である。なお、回転角変位は、まず、 θ_d を与え、次に θ_1 を指定し θ_2 を与える。

図3の機構の位置・姿勢決め時には、先述のように指肢を大きく屈伸させる出力節の運動として、 Z 軸方向の並進 ΔZ 、また、 xy 平面内に含まれる任意軸周りの回転角を表す θ_1, θ_2 を指定する。この結果、出力節には X, Y 軸方向および xy 平面の法線方向周りに幾何学的な拘束条件による従属的な変位を生じる。

以上を考慮して図3の機構の逆運動学解析を行う。パラレルメカニズムの逆運動学解析は目標とする位置・姿勢での出力節上の各対偶位置を求め、同対偶位置を満たすように各連鎖に接続された入力軸の変位を決定すればよい。なお、図3に示す出力節上の3つの対偶の Σ_p での初期位置 (x_i, y_i, z_i) ($i=1 \sim 3$)は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{out} \cos \varphi_i \\ R_{out} \sin \varphi_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

まず、機構に θ_1, θ_2 による姿勢変化および Z 軸方向の並進変位 ΔZ を与えたとして静止座標系 Σ_0 に対する出力節上の各対偶の位置を求める。ただし、上述のように機構の位置・姿勢決め時には以上の変位以外の方向に従属的な変位を生じる。従属変位である z 軸周りの回転角は上述の θ_d であり、また、 X, Y 方向の並進変位を $\Delta X_d, \Delta Y_d$ と記す。これら従属変位を用いれば、位置・姿勢変化後の各対偶の Σ_0 上での位置 (X'_i, Y'_i, Z'_i) ($i=1 \sim 3$)は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} X'_i \\ Y'_i \\ Z'_i \end{bmatrix} = E^{k\theta_d} E^{m\theta_2} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_d \\ \Delta Y_d \\ Z_0 + \Delta Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Z_0 は Σ_0 における点Pの初期位置、 $E^{m\theta_2}, E^{k\theta_d}$ はそれぞれ、 ω 軸周りの角変位 θ_2, z 軸周りの角変位 θ_d による回転行列であり次式で表される⁽⁵⁾。

$$E^{m\theta_2} = \begin{bmatrix} C_2 + C_1^2(1-C_2) & C_1S_1(1-C_2) & S_1S_2 \\ C_1S_1(1-C_2) & C_2 + S_1^2(1-C_2) & -C_1S_2 \\ -S_1S_2 & C_1S_2 & C_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$E^{k\theta_d} = \begin{bmatrix} C_d & -S_d & 0 \\ S_d & C_d & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

以上の式において $S_i = \sin \theta_i, C_i = \cos \theta_i$ ($i=1, 2$ および d)を示す。式(2)に位置・姿勢決めの値 $\theta_1, \theta_2, \Delta Z$ と、従属変位 $\theta_d, \Delta X_d, \Delta Y_d$ を与えれば各対偶位置が得られる。

従属変位は幾何学的な拘束条件などで決定され、図3の機構では以下のように求められる。図3の各連鎖の運動は、連鎖に含まれる1自由度の対偶の回転軸を法線方向とし、ベース上の対偶と Σ_0 の原点を結ぶ線分を含む平面内に拘束される。したがって、各連鎖に含まれる出力節上の対偶位置は次式の条件を満たす。

$$\begin{cases} Y'_1 + \Delta Y_d = \tan \varphi_1 (X'_1 + \Delta X_d) \\ Y'_2 + \Delta Y_d = \tan \varphi_2 (X'_2 + \Delta X_d) \\ Y'_3 + \Delta Y_d = \tan \varphi_3 (X'_3 + \Delta X_d) \end{cases} \quad (5)$$

式(2)より得られる (X'_i, Y'_i, Z'_i) ($i=1 \sim 3$)を式(5)に代入し整理すれば、従属変位 $\Delta X_d, \Delta Y_d$ および θ_d は、 $\theta_1, \theta_2, \Delta Z$ を変数として表すことができる。

したがって、ウェアラブルハンドの位置・姿勢決めは、まず、目標とする Z 軸方向の変位 ΔZ 、回転角 θ_1, θ_2 を与え、従属変位 $\Delta X_d, \Delta Y_d$ および θ_d を算出し、これら

とした男子の各指の寸法は、ほぼ表1に示す値であることを確認している。

4.1 設計変数

図 3 に示す空間 3 自由度平行

装着する手指部の寸法より値が決定される R_m , φ , $\Delta x_{f,i}$, $\Delta z_{f,i}$ について検討する. 本論文ではウェアラブルハンドの装着対象を成人男性とする. 一般的な成人男性の第 i 指の関節間の長さ $l_{j,i}$ ($j=1\sim3$, $i=1\sim3$) の平均値は表 1 に示すとおりであり⁽⁶⁾, これらの値を参考にする. また, 手首周りや指肢の配置角に関する寸法は年齢 21~22 歳である 5 人の成人男子で実測し求めた. 対象

4.3 運動伝達性による決定 図3に示す中間節 L_1 , L_2 の長さは手指の寸法に強く制限されず、さらに、ウェアラブルハンドの動作範囲等に大きく影響することから、機構の運動学的評価によって決定する。評価には著者らが先に用いた空間3自由度パラレルメカニズムの運動伝達性の評価量 TI^* を用いる⁹⁾。 TI^* は機構の圧力角に相当し、図3の各連鎖において長さが L_2 である中間節の長手方向に作用する力の方向と出力節上の対偶の速度の方向がなす角の余弦である。 TI^* の値が増加すれば、連鎖から出力節上の対偶に伝わる力の方向が同対偶の運動方向に近づき、運動の伝達が良好になるとともに、対偶に作用する力も抑制される。以上の TI^* を用いて種々の節長の組合せを検討するために、指部の節の全長 L 、節長比 k を次式で定義する。

$$k = L_2 / L_1 \dots\dots\dots (7)$$

出力節となる把持物体の動作範囲は、成人男子を対象とする円板を把持し操る動作を測定し、並進変位は図3に示すO-XYZ座標系でZ軸方向に90~140mmとした。回転変位は、それぞれの指部の運動が拘束されている平面の法線方向を回転軸 ω とし、各軸周りの回転角変位 θ_2 を-20~20°とした。回転軸 ω の方向 θ_1 は、各指部の配置角度が $\varphi=0^\circ$ 、 $\varphi=140^\circ$ 、 $\varphi=180^\circ$ である

Finger	1st	2nd	3rd
φ_i [deg]	0	140	180
l_{1i} [mm]	45	50	55
l_{2i} [mm]	40	30	35
l_{3i} [mm]	30	25	25
Δx_{fi} [mm]	-30	-10	-20
Δx_{ci} [mm]	30	50	50

Fig. 6 Design variables for the mechanism

ことから、これらに直交するように第1指と第3指では 90° 、第2指では 50° とした。

以上の可動範囲で半径が R_{out} の出力節の位置・姿勢を変化させ、 TI^* が0.5以上のである L と k の組合せを検討する。

本論文では半径 R_{out} を30～60mmの範囲で5mmずつ変化させた各出力節に対し、 L の値を50～200mmの範囲で10mmずつ変化させ、さらにそれぞれの L の値において k の値を0.5～1.5の範囲で0.1ずつ変化させて、以上の条件を満たす全節長、節長比の組合せを検討した。その結果、把持物体の半径が30～60mmの範囲において以上の条件を満たす全長 L と節長比 k の組合せは、 $L=160\text{mm}$ では $k=1.2\sim 1.4$ 、 $L=170\text{mm}$ では $k=1.3\sim 1.4$ 、 $L=180, 190\text{mm}$ では $k=1.4$ となった。以上の結果から、本論文ではハンドを小型化するため L を170mmとし、 L_1 を72mm、 L_2 を98mmとした。

5. 試作機の動作測定

5.1 試作機と動作の測定方法 試作したウェアラブルハンドを図7に示す。ハンドは図7に示すようにベースを机上等に固定し、ハンドのベース部に設けた孔に手指を通して手首と手のひらを固定する。ウェアラブルハンドの連鎖先端には図8(a)に示すように指肢の関節と同一方向に回転する指先装着部を設けた。同部に指先を固定し、さらに、その指先で物体を把持することでパラレルメカニズムを形成する。回転自由な装着部は、各指肢の屈伸動作時に、指肢先端部分の第3関節に過度な回転変位が生じることを抑制する。なお、指先は図8(a)に示すようにバンドを用いて装着部に固定する。

ウェアラブルハンドの動作は図3に示した静止座標系 Σ_0 および動座標系 Σ_p で表す。図7には把持物体である出力節上に設定される Σ_p を示した。初期状態において Σ_0 と Σ_p の各軸は平行とする。また、 Σ_p の原点 P は Z 軸上に位置し、初期状態での Σ_0 における点 P の Z 軸方向の座標値 Z_0 は120mmである。

出力節の変位は図9(a)に示すように第 i 指把持部付近の出力節上に計測点 P_i ($i=1\sim 3$)を、指肢の角度変化は図9(b)に示すように第2指の各関節上に計測点A～Dを設け、動作前後における計測点の位置を2台のビデオカメラで撮影し3次元画像解析装置で求める。なお、画像解析による変位測定の分解能は各軸方向に約0.4mmである。

5.2 機構の動作確認 提案するウェアラブルハンドの機構は、出力節と連鎖を3自由度の対偶で連結することを想定しているが、実際には出力節を把持している指先先端の運動で代用するため、同箇所にはすべりなどが発生しハンドの動作に影響すると予想される。そこで、まずウェアラブルハンドの機構としての動作を確認するため、

出力節と連鎖とを図8(b)に示す簡易的な3自由度対偶で連結し動作を測定した。なお、出力節の半径は40mmとした。

出力節を初期位置から Z 軸方向へ $\pm 10\text{mm}$ および $\pm 20\text{mm}$ 並進させ、図9(a)に示した計測点 P_2 の変位より出力節の変位を求めた。なお、出力節はほぼ平行に移動することを記録画像で確認した。表2に5回ずつ測定した平均値および標準偏差を示す。全体的に測定値は理論値より若干小さい。これは出力節と各連鎖との連結に用いた図8(b)に示す簡易的な対偶の遊びが原因である。

次に出力節の姿勢を図5に示した表現方法により θ_1 を零および 50° とし、 θ_1 の各値で θ_2 を -20 および 20° となるように回転動作を行わせ、 $P_1\sim P_3$ の移動量をそれぞれ3回ずつ測定した平均値を図10に示す。図10中の□は計測点の初期値、○は動作後の理論値、●は測定値である。いずれの結果も測定値は理論値に比べ小さく、距離で比較すれば測定値は理論値の約7割となっている。表2に示した並進変位の場合より誤差が大きくなったのは、傾斜にともない出力節そのものが対偶の遊びにより重力方向へ傾斜し、さらにその影響で回転軸にずれが生じたためである。

以上のように対偶の遊びにより位置・姿勢決め時に誤差は生じるが、全体的にはハンドは指定通りに動作することが確認された。

5.3 装着時の動作測定 手指にウェアラブルハンドを装着して動作を測定した。まず、5.2と同じく把持し

Fig. 7 Prototype

(a) Connection part of the finger

(b) 3 dof joint

Fig. 8 Connection of the finger and object

(a) Output link

(b) Finger

Fig. 9 Measured points

た出力節をZ軸方向へ±10mmおよび±20mm並進させるように動作させ、計測点P₂の移動量から出力節の変位を求めた。表2に5回ずつ行った測定結果の平均値および標準偏差を示す。前節で示した3自由度の簡易対偶で連結した場合に比べ、変位量はさらに減少しているが、その差は約2割程度であり、指先で対象物を把持した状態においても、ほぼ指定通りの並進動作が可能である。

次に、ウェアラブルハンドを手指に装着した状態で、前節と同じく θ_1 を零および50°とし、それぞれの値で θ_2 を-20および20°となるように回転動作を行わせた。各条件で3回ずつ測定したP₁～P₃の移動量の平均値を図10に■で示す。図10より並進変位の場合と同様に、3自由度の簡易対偶を用いた場合に比べて変位量は減少し、理論値の約6～7割となっている。この主な原因として、出力節と

なる把持物体を回転させる動作では、指先の接触位置を支点とし把持物体が回転するため、すべりが生じやすく回転軸にずれが生じ易いことがあげられる。また、測定時の観察より各指先装着部に設けた1自由度の回転変位により指先端が移動しなくとも出力節が回転し、結果として指先の変位が減少することも確認された。

次にウェアラブルハンド動作時における指肢の関節角変位を測定した。測定は図9(b)に示したように最も画像が記録しやすい第2指に注目し同指の各関節に計測点を設け、それぞれの計測点間を結ぶ直線の角度を画像解析装置により測定して関節の角変位量とした。

測定条件は表3に示すとおり半径が30, 40および50mmの円板を把持した状態において、それぞれ初期位置からZ軸正方向に40, 45および35mmの並進動作を指定し指肢を伸展させた。半径が40mmの円板を把持した場合における動作前後の指肢の様子を図11に示す。各条件における出力節の実際の変位量、さらに、第2指の第1(MP)および第2(PIP)関節の角変位を表3に示す。表3より、出力節の変位は先と同様に理論値の7～8割程度となっているが、第1関節には20～30°、第2関節に

Table 2 Displacement in z-axis (mm)

Specified.	3dof joint		Human hand	
	Measured.	Standard deviation	Measured.	Standard deviation
-20	-18.2	0.17	-15.5	0.51
-10	-9.1	0.35	-7.4	0.37
10	9.4	0.42	7.9	0.86
20	19.2	0.50	15.9	0.70

Fig.10 Measurement results of the displacement of the finger tips with respect to the rotational motion

□Initial value, ○Theory value, ■Measured value (with 3 dof pair), ●Measured value (with finger)

Table 3 Moveable angels of the index finger and z-displacement

R_{out} (mm)	Δz (mm)		MP angle (deg)	PIP angle (deg)
	Specified.	Measured.		
30	40	29.0	28.6	-51.7
40	45	37.5	21.2	-46.0
50	35	24.4	20.3	-32.4

は30～50°の角変位を生じており、指肢が強制的に動作させられていることが確認できる。

以上の結果より、提案したウェアラブルハンドにより指肢の操り動作を行わせられることが確認できた。しかし、主に出力節把持部分の予想外の動きにより位置・姿勢決め誤差が生じやすいことも確認された。ウェアラブルハンドを装着した手指を精度よく動作させるためには、把持部分の挙動の補正を考慮した制御方法を検討する必要がある。また、本ハンドを無理なく手指に装着しリハビリを行うために、より一層の小型・軽量化も必要であり、駆動トルクの最小化によるモータの低容量化、超小型モータの採用などの検討が望まれ、これらを今後の課題としたい。

6. 結 言

本論文で得られた結果を以下に示す。

- (1) 物体を把持した人の手指に装着することで指肢の運動訓練・動作補助を可能とする、空間3自由度パラレルメカニズムを利用したウェアラブルハンドを提案した。
- (2) 人間の手指の寸法および機構の運動特性を考慮したパラレルメカニズム式ウェアラブルハンドの設計法を検討し、実際に成人男子を対象としてハンドの寸法を決定した。

(a) Initial position ($Z=120\text{mm}$) (b) Last position ($\Delta Z=45\text{mm}$)
Fig.11 Motion of the fingers

- (3) 以上の結果に基づき試作したウェアラブルハンドを手指に装着して動作させ、指肢を屈曲、伸展できることを確認し、本ハンドのリハビリへの有用性を確認した。

謝 辞

本研究は金沢大学重点化研究の一部として行われた。また、本研究に助成頂いた澁谷学術文化スポーツ振興財団に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) J. Castaing and J. J. Santini [Translated by H. Ihara et al], *Anatomie Fonctionnelle de L' appareil Locomoteur*, (1986), pp.40-51., Kyodo Isho Shuppan Co., Ltd.
- (2) Y. Ueba, *Function and Anatomy of the Hand* (in Japanese), (1985), pp.40-51., Kinpodo, Inc.
- (3) Iwatsuki, N et al, Kinematic Analysis of a Spatial Parallel Manipulator with 3DOF, *Proceedings of the 2nd. Machine Design and Tribology Division Meeting in JSME*, No.02-12(2002-4), pp.139-142.
- (4) J. Wang and C. M. Gosselin, Kinematic Analysis and Singularity Loci of Spatial Four-Degree-of-Freedom Parallel Manipulators Using a Vector Formulation, *Transaction of the ASME, Journal of Mechanical Design*, (1998), Vol.120, pp.555-558.
- (5) John J. Craig, *Introduction to Robotics*, (1989), pp.45-53., Addison-Wesley
- (6) Alvin R. Tilley and Stephen B. Wilcox, *Measure of Man & Woman Rev Edition*, (2001), pp.41-42., John Wiley & Sons.
- (7) Tachiya, H. et al., A 6 DOF Hybrid Mechanism Composed of Different Parallel Mechanisms, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.64, No.627(1998), pp.4353-4360.