ヒトの把持力分布を模倣した 5 指なじみ機構を有する義手の開発*

神 川 康 久^{*1}, 前 野 隆 司^{*2}Underactuated Five-Finger Prosthetic Hand Inspired
by Grasping Force Distribution of HumansYasuhisa KAMIKAWA and Takashi MAENO^{*3}^{*3} Graduate School of System Design and Management, Keio University,
4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8526 Japan

Simple grippers with one or two degrees of freedom are commercially available prosthetic hands; these pinch type devices cannot grasp small cylinders and spheres because of their low degree of freedom. This paper presents the design and prototyping of underactuated five-finger prosthetic hand for grasping various objects in daily life. Underactuated mechanism enables the prosthetic hand to move fifteen compliant joints only by one ultrasonic motor. The innovative design of this prosthetic hand is the underactuated mechanism optimized to distribute grasping force like those of humans grasping various objects robustly. Because of human like force distribution, the prototype of prosthetic hand could grasp various objects in daily life and heavy object with the maximum ejection force of 50 N grater than other underactuated prosthetic hands.

Key Words: Medical and Welfare Assistance, Humanoid, Optimal Design, Mechanism, Human Engineering

1. はじめに

地雷, 交通事故および感染症などにより, 多くの人々が手に障害を負った生活を余儀なくされている。このような人々の社会復帰をうながすためには, 障害者が手で作業を行えるような義手を普及させる必要がある。このため, 義手の世界的な需要は大きい¹⁾。現在, 市販されているハンド型筋電義手は, ヒトと類似した外観を有し, 軽量かつ低価格である²⁾。しかしながら, 従来のハンド型筋電義手は自由度が 1 もしくは 2 であるため, 物体を掴む動作しかできず, 細い物体や複雑な形状の物体を安定して把持することは困難であった。そこで, 義手で把持できる物体の範囲を拡張するために, なじみ機構を有するハンドの研究が盛んに行われている³⁾⁻⁶⁾。なじみ機構とは, 物体と指骨部の接触を関節の力学的な拘束条件とし, 自由度の数よりも少ないアクチュエータにより様々な形状の物体を包み込み把持する機構である。また, ハンドが把持している物体に様々な方向から力やトルクが加わっても物体を把持し続けるには, 各指および各指骨部に加わる把持力を物体にバランスよく配分する必要がある。しかしながら, 従来のハンドは, 設計段階において把持力分布を考慮した設計がなされていないため, 把持対象物体に大きな外力が加わると把持を維持できない。

ハンドにおける把持力分布を決定するために, ヒトが把持動作を行う際の知見を用いることが有効である。

高野らは, ヒトが把持する物体の形状に応じて把持力分布を変化させて物体の形状に応じた安定な把持状態を作り出していることを明らかにした⁷⁾。このことから, ヒトの把持力分布制御機構を模倣してハンドの設計を行えば, 物体の形状に応じた安定な把持状態を再現できると考えられる。このため, 本研究では, ヒトが把持力を分布させるメカニズムを模倣した 5 指なじみ機構を有する義手の開発を行うことを目的とする。

2. 概念設計

2.1 設計仕様 1 章で述べたように, 義手に求められる条件として, ヒトと類似した外観, 軽さ, 低価格および高い把持機能が挙げられる。このため, 目標とするハンドの形状および質量に関する設計条件は以下の通りとする。

- ・ ヒトと類似した外観を有すること
- ・ ヒトの手と同等なサイズであること
- ・ 使用者が日常生活において違和感なく装着できるような質量の目安を 700 g とする

また, ハンドが把持する物体の形状および質量の目標値は日常生活において頻繁に使われる物を参考にして決定した。すなわち, 大きさは円柱を例にとると直径 20 mm から 80mm, 質量は 1kg とした。一般にヒト指が物体に触れた際に生じる静止摩擦係数は 0.5 以上であるため, ハンドが質量 1kg の物体を持ち上げるには 20 N 以上の

* 原稿受付 2008 年 3 月 21 日。

^{*1} 慶應義塾大学大学院理工学研究科(〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)。^{*2} 正員, 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科。

E-mail: maeno@sdm.keio.ac.jp

把持力が必要となる。以上の把持機能を実現するための設計仕様は以下の通りである。

- ・ 筋電による単純な信号でのハンド制御を想定し、1つのアクチュエータでハンドを運動させる
- ・ 様々な形状の物体を包み込むため、5指15自由度構造とする
- ・ 1kgの物体を把持するため、把持力を20N以上とする
- ・ 頑強な把持を可能とするためヒトと類似した把持力分布を5指に与える
- ・ 使用者にストレスを与えないため開閉動作時間を1秒以内とする

以上の設計仕様を実現するため、1つのアクチュエータによる5指15自由度運動に基づき、ヒトと類似した把持力分布を実現できるなじみ機構を提案する。

2.2 関節可動域および把持力分布の目標値 ヒトは把持する対象物の形状によって指に加える把持力分布を変化させる⁹⁾。例えば、円筒直径が30mm以下の場合には、手掌を巧みに用いるため、拇指による把持力が小さい。これに対し、直径が50mm以上の場合には、拇指による把持力を急激に増加させることによって安定した把持を実現している。このため、ハンドの把持力分布がヒトの場合と同様になるように物体を把持させれば、把持可能な物体の形状や質量の範囲が拡大すると考えられる。高野らの知見より求めた、各指の把持力が5指による把持力の合計の10%以上となるような関節可動域を表1に示す。これより、表1に示した関節角度の際の各フィンガの把持力分布 F_i の目標値 R_i を決定した。その結果を表2に示す。また、直径20mm、50mmおよび80mmの円柱を把持した際の各フィンガの把持力分布 f_i の目標値 r_i を決定した。その結果を表3に示す。以上では、把持力分布が表2、3に示した目標値となるようなハンドの諸量を設計する。

2.3 フィンガの設計 フィンガにヒトと同等の把持機能を持たせるために、5指全てが3関節および3指骨部を有する構造とする。フィンガの関節は、図1に示すような弾性関節とする。弾性関節には、指を開くためのバネの復元力の機能と回転機構を併せ持たせる。これより、回転軸を有する関節を搭載したフィンガと比較して簡単な構造となる。弾性関節はフィンガが外転するという問題があるため、従来のハンドにはほとんど用いられなかった⁹⁾。本研究では、フィンガの外転を防止するために、各指骨部の最外部にガイドを持たせる設計を行う。

また、フィンガが物体を包み込み把持し、各指骨部に把持力を分布させるために、図1に示した指骨部内蔵型なじみ機構を考案した。張力 T をワイヤに加えると、MP関節のみが運動し、基節骨が対象物と接触する。次に、物体が拘束条件となるため、軸1-1および軸1-2が回転を開始し、PIP関節のみが運動する。中節骨が対象物と接触すると、軸2-1および軸2-2が回転する結果、DIP関節が運動する。これらの結果、物体を包み込むような把持が実現される。なお、本機構では、軸の位置を変えることによって各指腹部に加わる把持力 F_1 、 F_2 、 F_3 の分布を変えられる。このため、

Fig. 1 Under-actuated finger with compliant joints

Table 1 Joint angles of fingers on high grasping force distribution

	DIP, IP(thumb) [degree]	PIP, MP(thumb) [degree]	MP, TM(thumb) [degree]
thumb	30-50	10-30	10-30
index	30-40	40-60	25-45
middle	35-65	40-90	30-90
ring	30-70	40-90	30-75
little	60-90	60-70	60-70

Table 2 Ideal force distribution among phalanxes on each finger

	ideal ration R_1	ideal ration R_2	ideal ration R_3
thumb	0.33	0.34	0.33
index	0.4	0.2	0.4
middle	0.3	0.15	0.55
ring	0.2	0.2	0.6
little	0.4	0.2	0.4

Table 3 Ideal force distribution among fingers on hand

	ideal ration r_{si} (d=20mm)	ideal ration r_{mi} (d=50mm)	ideal ration r_{li} (d=80mm)
thumb	0.12	0.14	0.34
index	0.12	0.3	0.2
middle	0.31	0.28	0.19
ring	0.22	0.19	0.18
little	0.24	0.08	0.08

Fig. 2 Link mechanism for 5 finger underactuation

軸の位置を最適化することにより、ヒトの把持力分布を模倣したフィンガの形状を設計する。

2.4 5 指リンク型なじみ機構 球体や円錐状の物体を包み込むように把持するためには、1つのアクチュエータにより5指を同時に動かすことの可能ななじみ機構が必要である。従来研究において、バネやプーリーを用いたなじみ機構が提案されてきたが、各指における把持力分布を変化させることができないという問題点があった^{9),10)}。このため、本研究では、ハンドが物体を5指により包み込み把持する際に、物体の大きさに応じて5指に加わる把持力分布を変えることのできる5指リンク型なじみ機構(図2)を提案する。まず、張力 T をワイヤに加えることにより、各指が屈曲を開始し、各指骨部が接触を開始する。次に、全ての指骨部が物体と接触した指の動きが止まる結果、リンクが回転し、他の指は物体を包み込むまで動き続ける。最終的には、球体や円錐状のような複雑形状の物体を5指により包み込む把持を行える。5指リンク型なじみ機構の特徴は、くの字型のリンク形状を変化させることにより、各フィンガに配分される張力 f ($f=T, I, M, R, L$) を変えられることである。このことを利用すれば、ヒトの把持力分布を模倣したハンドの設計を行うことが可能である。前述のように、大きい円柱を把持する際には5指の屈曲量が小さく、小さい円柱を把持する際には拇指を除く4指の屈曲量が多いことが知られている⁹⁾。このため、前者の場合には拇指に大きな把持力が分布し、後者の場合には拇指を除く

4指に把持力が分布するように5指リンクなじみ機構を設計する。

3. 詳細設計

3.1 指骨部内蔵型なじみ機構 本節では、フィンガに加わる把持力を計算する数学モデルを Matlab により構築し、把持力分布と目標値の誤差が小さくなる軸の位置を決定した。

3.1.1 数学モデルの構築 力のつりあいによる単純な数学モデルを構築することによりフィンガに加わる把持力 F_1 , F_2 および F_3 を計算した。なお、本研究では、問題を単純化するために以下のような仮定を置いた。

- ・ 弾性関節の変形を円弧に近似できる
- ・ 弾性関節の復元力がフィンガの把持力分布に及ぼす影響は十分に小さい
- ・ 把持力は常に各指腹部の midpoint に生じる

本数学モデルにおいては、図1に示した点 A、点 B および点 C が回転軸であると仮定してモーメントのつりあい式を求めた。点 A、点 B および点 C まわりのモーメントのつりあい式は

$$\begin{bmatrix} D_{F10} & D_{F20} & D_{F30} \\ 0 & D_{F21} & D_{F31} \\ 0 & 0 & D_{F32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} D_{T0} \\ D_{T1} \\ D_{T2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

と表せる。 D_{F1i} , D_{F2i} , D_{F3i} および D_{Ti} ($i=0,1,2$) はそれぞれ点 A, B, C まわりにおける F_1 , F_2 , F_3 および T のモーメントアームの長さである。式(1)より力 F_1 , F_2 および F_3 が求められる。

3.1.2 軸の位置の探索 3.1.1 節で構築した数学モデルを用いて、3指骨部に加わる把持力分布がヒトの場合の把持力分布と最も近くなるような軸の位置を探索した。本研究では、多峰性探索に優れた遺伝的アルゴリズムおよび局所探索に優れた非線形計画法を併用した。弾性関節の長さは全ての関節の可動域を満たすことが可能な最小の長さである 10 mm とし、各指骨部の寸法は各指関節の長さがヒトの指と同等になるように決定した。設計変数は軸 0, 軸 1-1, 軸 1-2, 軸 2-1, 軸 2-2 および軸 3 の位置である。探索範囲は軸が指関節の内部に納まることを考慮して決定した。また、目的関数は、

$$y = \sum_{i=1}^3 \left| \frac{F_i}{F_1 + F_2 + F_3} - R_i \right| + P \quad (2)$$

とした。 F_i は図1に示した各指における把持力の大きさ、 R_i は表2に示した各指骨部における把持力分布の目標値である。また、 P は F_i が負となる際にペナルテ

ィを加えるペナルティ関数である。目的関数(2)が最小となるような設計変数を探索した。

その結果、拇指以外の指では計算値 F_i と目標値 R_i の誤差が平均 10% 以内、拇指では 15% 以内に収まる軸の位置を求めた。得られた結果に基づいて、フィンガ設計を行う。なお、ハンドが物体を包み込んで把持するためには、可動域の大きい示指、中指、環指および小指の4指において、MP 関節、PIP 関節、DIP 関節の順に関節が運動するような設計を行う必要がある。このため、上記の順に関節が回転するように、弾性関節の幅および厚みを決定した。

3.2 5指リンクなじみ機構の詳細設計 本ハンドでは、リンクの形状を変えると5指に加わる張力が変化する結果、図2に示した把持力 f_i が変化する。このため、5指の把持力を計算する数学モデルを Matlab により構築し、ハンドの把持力分布がヒトの把持特性に近づくようなリンクの形状を探索した。

3.2.1 数学モデルの構築 力のつりあいに基づく数学モデルにより把持力 f_{θ} , f_{ϕ} , f_{ψ} , f_{χ} および f_L を計算した。図2に示した5指リンクなじみ機構のリンク1, リンク2, リンク3およびリンク4まわりの力およびモーメントのつりあいは、

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ d_{\theta} & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{\phi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{\psi} & d_{\chi} \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & d_{\theta} & -d_{\phi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & d_{\psi} & -d_{\chi} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{\theta} \\ f_{\phi} \\ f_{\psi} \\ f_{\chi} \\ f_L \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ T_2 \\ T_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

と表せる。 d_{θ} および d_{ϕ} は点 A1 まわりにおける f_{θ} および T_2 のモーメントアームである。同様に、 d_{ψ} および d_{χ} は点 A2 まわりにおける T_3 および T_4 の、 d_{ϕ} および d_{ψ} は点 A3 まわりにおける f_{ϕ} および f_{ψ} の、 d_{χ} および d_{ψ} は点 A4 まわりにおける f_{χ} および f_L のモーメントアームである。式(3)より各フィンガに配分される把持力 f_{θ} , f_{ϕ} , f_{ψ} , f_{χ} および f_L を求めることができる。

3.2.2 リンク形状の探索 式(1)に対し遺伝的アルゴリズムと非線形計画法を適用することによって、5指の把持力分布と目標値の誤差が小さくなるリンク形状を求めた。リンクの形状の探索範囲はリンクが手の甲の内部に納まることを考慮して決定した。目的関数は、

$$y = \sum_{i=1}^5 (|f_{s,i} - r_{s,i}| + |f_{m,i} - r_{m,i}| + |f_{l,i} - r_{l,i}|) \quad (4)$$

Fig. 3 Prototype of finger

Fig. 4 Prototype of prosthetic hand

である。 $f_{s,i}$, $f_{m,i}$ および $f_{l,i}$ は直径 20 mm, 50 mm, 80 mm の円柱を把持した際に加わる把持力, $r_{s,i}$, $r_{m,i}$ および $r_{l,i}$ は表3に示した直径 20 mm, 50 mm および 80 mm の円柱を把持した際の各指における把持力分布の目標値である。

目的関数(4)が最小となるような解を探索した結果、計算値 $f_{s,i}$, $f_{m,i}$, $f_{l,i}$ と目標値 $r_{s,i}$, $r_{m,i}$, $r_{l,i}$ の誤差が平均して 5% 以内に収まるリンクの形状が得られた。得られた結果に基づいて、5指リンクなじみ機構の設計を行うこととする。

3.3 アクチュエータの選定 直径 20 mm, 50 mm および 80 mm 程度の円柱を把持する際、ハンドを運動させる張力 T に対するハンド全体の把持力 F_{sum} の比率は、それぞれ 1.36, 0.71 および 0.53 という計算結果が得られた。また、本ハンドの指を完全に閉じるにはワイヤをアクチュエータにより 40 mm 引張る必要があることが求めた。以上より、直径 8 mm の回転軸にワイヤを取り付け、超音波モータ（新生工業，USR60）を用いてワイヤを引張ることとした⁽¹⁰⁾。なお、超音波モータは、駆動音の静かさおよび高保持トルク

による把持状態の無電力消費といった、筋電義手のために有効な特徴を有する。同モータの質量は 260 g であり、ハンドの仕様目標 700 g 以下と比べ、十分に軽量である。また、同モータは常用使用範囲内で回転数 120 rpm、トルク 0.5 N-m を出力可能であることから、本ハンドは 65 N 以上の把持力を出力可能である。以上より、本ハンドの目標である把持力 20N 以上、開閉動作 1 秒以内の仕様を実現可能である。

4. 製作

4.1 フィンガの製作 製作したフィンガの 1 例として中指を図 3 に示す。指骨部にはアルミ合金、指腹部にはヤング率 0.72 MPa、平均摩擦係数 1.11 のシリコンゴム、弾性関節にはヤング率 29.4 MPa のウレタンゴム、回転軸には直径 2 mm のステンレス軸、軸受けには内径 2 mm、外径 5 mm のボールベアリング、ワイヤには直径 0.9 mm のダイニーマロープを用いた。製作した示指、中指および環指は質量 60 g、小指は質量 45 g、拇指は質量 81 g である。

4.2 5指ハンドの製作 製作した5指ハンドを図 4 に示す。厚さ 2 mm のアルミ合金製の手掌プレートに各フィンガをねじ止めた。また、5 指リンクなじみ機構におけるリンクにはアルミ合金、ワイヤには直径 1.4 mm のベクトランロープ、ワイヤを誘導するプーリにはアクリル樹脂製プーリ、リンクを誘導するプレートには FRP 製プレートを用いた。アクチュエータには、ワイヤを直径 8 mm の回転軸に取り付けた超音波モータ（新生工業、USR60）を用いた。製作したロボットハンドの質量は 730 g である。

5. 評価

5.1 関節回転角度測定実験 ワイヤに荷重を加えた際の各関節における回転角度の測定を行った。2 本のアクリル棒をポテンショメータに取り付けた角度測定器具を製作し、各関節角度の測定を 3 回行った。

実験結果の一例として、中指におけるワイヤに加え

た荷重と各関節の回転角度の関係を図 5 に示す。図 5 より、MP 関節、PIP 関節、DIP 関節の順に関節が大きく回転していることがわかる。また、示指、環指および小指も中指と同様の順に関節が回転することを確認した。これより、23 節に示したような包み込む把持を実現できることを確認した。さらに、拇指が他の 4 指の運動を妨げないこと、1 秒以内に全ての指関節を開じることも確認した。

5.2 把持力分布測定実験 ハンドが物体を把持した際の把持力分布を測定し、実験値と目標値の比較を行った。把持対象物体は直径 20 mm、50 mm および 80 mm の円柱である。各指腹部に加わる圧力を測定するため、ニッタ製 FlexiForce ボタンセンサをフィンガの各指腹部に貼りつけ、ハンドに各物体を把持させた際の把持力分布を 10 回測定した。

実験結果の 1 例として、中指および拇指における把持力分布の測定結果を図 6 に示す。実験値と目標値の平均誤差は 18 % であった。図 6(a) より、目標としてい

Fig. 5 Relationship between joint angles and tendon force on middle finger

Fig. 6 Force distribution among phalanges on finger

Fig. 7 Force distribution among five fingers on prototype hand

たヒトの把持力分布と同様に、中指の F_3 に大きな把持力が生じていることがわかる。また、示指、環指および小指も中指と同様の傾向を示した。一方、図 6(b) に示したように、拇指では、フィングの第一中手骨が物体と接触しないため、 F_1 の把持力は極めて小さい。このため、 F_1 、 F_2 および F_3 に均等に把持力が分布しているヒトの把持力分布の傾向とは異なっている。しかし、 F_2 および F_3 に均等に把持力が分布しているという点では、ハンドが物体に加える力分布の傾向はヒトと同等であり、誤差は許容範囲内であると考えられる。また、物体形状を変えたときに5指に加わる把持力分布の測定結果を図 7 に示す。実験値と目標値の平均誤差は約 6% であり、十分小さいと考えられる。図

7 より、目標としていたヒトの把持力分布と同様に、直径 80 mm の大円柱を把持する際は拇指に大きな把持力が分布し、直径 20 mm の小円柱を把持する際は中指、環指および小指に大きな把持力が分布していることを確認した。以上より、本ハンドの把持力分布はヒトと同等の傾向を示すといえる。さらに、全ての円柱に関して、本ハンドが目標としていた把持力 20 N 以上を実現できることを確認した。

5.3 物体把持実験 本ハンドの義手としての性能を評価するため、物体把持実験を行った。把持対象物体の形状とサイズを表 4 に示す。代表的な日常生活用品の形状である円柱、角柱および球を把持対象物体として選択した。本ハンドは義手として用いるため、把持対象物体に様々な方向から力やトルクが加わる。そこで、本実験ではハンドが物体を把持した際のロバス

Table 4 Grasped objects on experiment

geometry	diameter/square length (mm)	material
cylinder	20,50,80,118	acrylic resin
rectangular	20,48,100	acrylic resin
sphere	65,98,118	acrylic resin

Fig. 8 Direction of applied force and torque

Fig. 10 Ejection torque of prototype at grasping experiment

Fig. 11 Grasping experiment for daily life

Fig. 9 Ejection force of prototype in grasping experiment

トさを評価するために、図 8(a)に示した水平方向および垂直方向からの力や図 8(b)に示した2方向からのトルクを物体に加え、ハンドに物体を把持させ続けることが可能な最大荷重および最大トルクをそれぞれ5回測定した。トルクはハンドの中心線から距離 100 mm の位置に加えた荷重に対しハンドが物体を把持し続けることが可能な最大荷重より計算した。

各物体に対する把持実験の結果を図 9 および図 10 に示す。図より、直径 20 mm の円柱を本ハンドに把持させた際、最大 50 N の荷重や 5 N・m のトルクが加わっても把持を維持可能であり、直径 50 mm から 80 mm の円柱を把持させた場合でも水平および垂直の両方向から 25 N 以上の荷重や 1 N・m 以上のトルクに対して物体を把持し続けられることがわかる。これより、従来のなじみ機構を有するハンドの中でも少数のアクチュエータで運動可能であり、把持のロバストさに関する評価実験がなされている RTR2³⁾や SPRING HAND⁴⁾と比較しても、本ハンドが物体をロバストに把持できるといえる。さらに、表 4 に示したどの物体を把持する際も、水平および垂直方向からの 10 N 以上の外力に対して物体の把持を維持できることがわかる。以上より、本ハンドは目標としていた形状および質量の物体をロバストに把持できることを確認できた。

さらに、ハンドが様々な日常生活用品を把持している写真を図 11 に示す。図 11 より、本ハンドは円柱、角柱および球といった基本的な形状の対象物のみならず、複雑な形状の日常生活用品も把持できることがわかる。さらに、1000 ml の水が入ったペットボトルや取手の付いた鍋を把持し、カップに水を注ぐといった日常生活で行われる動作が可能とも確認した。以上より、本ハンドが日常生活における把持に有効であることを確認した。

6. 結論

本研究では、簡単・軽量の構造を持ち、様々な形状および質量の物体を把持可能な義手の実現を目的とし、ヒトの把持力分布を模倣した5指なじみ機構を有するハンドを開発した。本ハンドの特徴を以下に示す。

- ・ 弾性関節の欠点である外転を防止する外装により、簡単な構造のフィンガを実現した
- ・ 1 つのアクチュエータ（超音波モータ）により 5 指 15 自由度を運動させ、ハンドの把持力を分布させることが可能な指骨部内蔵型なじみ機構および 5 指リンク型なじみ機構を実現した
- ・ 物体を包み込むため、フィンガ関節が MP 関節、PIP 関節、DIP 関節の順に回転する設計とした

- ・ 物体の形状に応じた安定な把持状態を作り出すため、ヒトと類似した把持力分布で物体を把持する設計とした
- ・ 従来のなじみ機構を有するハンドと比較しても物体をロバストに把持可能であり、様々な日常生活用品を把持可能であった

参考文献

- (1) JICA, http://www.jica.go.jp/jicapark/kokusai/0502/03_03.html
- (2) Jiro KAWAMURA, Nobuyoshi FUKUI, The Upper-limb Amputee -A Survey and Trend in Kinki Area of Japan-, The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine, vol.36, pp384-389, (1999)
- (3) M.C. Carrozza-t, E Vecchit, Experimental analysis of an innovative prosthetic hand with proprioceptive sensors, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation Taipei, Taiwan, September 14-19, pp2230-2235, (2003)
- (4) M.C. Carrozza, C. Suppo, The Spring Hand: Development of a Self-Adaptive Prosthesis for Restoring Natural Grasping, Kluwer Academic Publishers Autonomous Robots 16, pp145-141, (2004)
- (5) Wenzeng Zhang, Qiang Chen, Passive adaptive grasp multi-fingered humanoid robot hand with high under-actuated function, Proceedings on the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation New Orleans, LA -April, pp2216-2221, (2004)
- (6) Naoki Fukaya, Shigeki Toyama, Design of the TUAT/Karlsruhe Humanoid Hand, Proc. Of IROS2000, pp.13-19, (2000)
- (7) Maria Chiara Carrozza, Giovanni Cappiello, A Cosmetic Prosthetic Hand with Tendon Driven Under-Actuated Mechanism and Compliant Joints: Ongoing Research and Preliminary Results, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation Barcelona, Spain, April, pp2661-2666, (2005)
- (8) N. Dechev, W.L. Clegghorn, Thumb Design of an Experimental Prosthetic Hand, Proceedings of the 2nd International Symposium On Robotics and Automation, ISRA'2000 Monterrey, N.L. Mexico, pp7-12, (2000)
- (9) Tsuyoshi Takano, Hitoshi Yamamoto, Biomechanical Analysis of Grasp Motion Characteristics, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, vol. 62, No. 603, p4257-4263, (1996)
- (10) Sinseikogyo, <http://www.shinsei-motor.com/html/lineup.html>