

ハーネスを用いない能動義手の 手先具開閉機構の開発

平成 26 年度 卒業研究論文
北海道ハイテクノロジー専門学校
義肢装具士学科 7 期生

H10300019 高江 魁

H12300022 時吉 康太

H12300034 米村 心平

担当教員 小嶋 聡

目次

1-1 義手とは	1
1-2 義手の分類	1
1) 装飾用義手	1
2) 作業用義手	2
3) 能動義手	2
4) 体外力源義手	3
2-1 コントロールシステム	4
2-2 ハーネス	4
2-3 ハーネスの問題	4
3 機能解剖	5
3-1. 肘関節	5
3-1-a. 腕尺関節	6
3-1-b. 腕橈関節	6
3-1-c. 上橈尺関節	6
3-2. 肘の屈曲と伸展	6
3-3. 前腕部の回内外	7
3-4. 前腕切断長と回内外	8
4 先行研究	9
4-1 回内外式能動義手（一期生）	9
4-2 回内外式能動義手（三期生）	9
4-3 回内外式能動義手（六期生）	9
4-4 肘伸展式能動義手（妹尾ら，2013）	10
5 先行研究の問題	11
6 仮説	12
7 研究目的	13
8-1 方法	14
8-2 模擬義手の概要	14
8-2-a 模擬義手	14
8-2-b 肘屈曲伝達機構	14
8-2-c 切替機構	14
8-2-d 制御機構	15
8-2-e ソケット及び支柱	16
8-2-f 模擬義手の構造・各機構の取り付け	16

8-3 製作	16
8-3-a. 模擬義手	16
8-3-b. 肘屈曲伝達機構	17
8-3-c. 切替機構	19
8-3-d. 制御機構	23
8-3-e. 手先具	26
9 結果	28
10 考察	31
11 今後の展望	32
12 謝辞	33
参考文献	34

1-1.義手とは

義肢とは、「上肢又は下肢の全部又は一部に欠損のあるものに装着して、その欠損を補てんし、又はその欠損により失われた機能を代替するための器具機械」（義肢装具法第2条）を言い、義手とはその中でも上肢の欠損に用いられるものである。

古来、「人間の手は、表に現れた脳髓である」と表現され、人間の手の機能を代償するために、いろいろな工夫を凝らした義手が研究、開発されてきた。義手の歴史は、紀元前330年のエジプトのミイラにまでさかのぼることができる。以後、歴史の流れに沿ってその時代ごとの材料と技術を用いたいろいろな義手が開発・実用されてきたが、人間の手に代わる「万能の手」はまだ開発されるには至っていない。

現状では、入手できるいろいろな義手の部品を組み合わせることで可能な限り個々の上肢切断者のニーズに適した手の機能を再現することが課題となっている。

1-2.義手の分類

『身体障害者福祉法（現・障害者自立支援法）』では「補装具交付基準」において義手の機能的な側面を、手の複雑多彩な機能に対応する機能を持つ義手の呼称を表す「型式」としてとらえて現在に至っている。

1) 装飾用義手

外観の復元を第一義に考え、軽量化と見かけの良さを図った義手である。義手製作実態調査では、1987年では87.7%、1997年では86.7%と義手全体の約9割を占め、現在、上肢切断者に使用されている義手で最も多いのがこの型式である。一応各継手の動きは遊動式か手動式の継手を用いて確保されているが、積極的な機能は持っていない。

手先具としては、従来、木製皮革仕上げの精巧なハンドが好んで用いられていた。日本では人形師が装飾ハンドを製作し、人形浄瑠璃の人形の手のような指の関節が巧みに組み込まれたもので、木肌そのままに爪や皮膚のような細工が施された型と、柔らかい皮革を貼り付けて外観を整えた型とがあった。爪に仕掛けがあって指の関節角度を決めることができる木製装飾ハンドも見られ

た。

しかし、現在ではこのようなハンドは製作者がいなくなってしまったために製造されなくなっており、これに代わって合成樹脂製の装飾用手袋(cosmetic glove)が使用されている。内部に針金の芯を入れたり、綿やフォームラバー、スポンジなどを充填することで、手の形を保ち、押さえたり引っ掛けたりする機能を持たせる工夫が行われている。

装飾用手袋の素材は塩化ビニールが多く用いられているが、塩化ビニールの“汚れやすい”、“変色する”といった欠点に対して、シリコン樹脂製の装飾ハンドも製造されている。

2) 作業用義手

農業、山林作業や、工業関係の重作業にも適するように、機能を優先して頑丈に作った義手で、作業に応じて専用の手先具を交換して使用する義手である。外観のことは考慮せず、種々の作業に適するように工夫されている。使用者は少なく、製作実態調査でも 5.3% (1987)、4.1% (1997) であった。

日本において、作業用義手は、恩賜の義肢と称された十五年式陸軍制式義手をその源としており、当初の作業用義手は、皮革製のハーネスおよび皮革製のソケットを各継手と鉄製のパイプを一体化した作業用幹部に組み合わせ、遠位端のバヨネット式手継手によっていろいろな形の作業用手先具を交換して取り付ける構造であった。能動機能はないが、骨格構造の手先具交換式システム義手であるといってもよい。

手先具には、曲鉤、双嘴鉤、鎌持ち金具、鋏持ち金具、もの押さえ、もの挟みなどがある。

3) 能動義手

主として上肢帯および体幹の運動を、義手の制御のための力源に利用し、ケーブルを介して、専用の継手、手先具を操作する構造の義手の総称であり、一般に、体内力源を利用した義手を指す。

健側上肢帯や切断側の残存上肢帯あるいは体幹の動きをハーネスによって取り出し、コントロールケーブルを介して手先の能動フックの開閉、肘関節継手の屈伸運動とロック機構の開閉が随意に操作することができる。手先具の形状

は、当初、ハンド型のものが用いられていたが、材質や構造の問題から繊細な作業は極めて困難であった。現在では、鋭利な先端部と滑らかな平面に仕上げられた合わせ面を持った 2 本の曲鉤を組み合わせて、繊細な手指の動きの再現を可能とする能動フックが主流となっている。

4) 体外力源義手（電動義手）

先述の能動義手では手先具や継手の操作に体内力源を用いていたのに対し、電力や空気、炭酸ガスなどのガス圧力あるいは油圧力などを利用して手先具などを操作する型式の義手である。この中でも、現在は電力を用いた電動義手の研究開発が数多くされている。

電動義手とは、義手の継手および手先具の操作力源に小型電動機を用い、断端の筋電位または機械装置（スイッチなど）によって操作する義手である。その制御方式としては、機械的制御方式と、断端筋肉に発する筋電シグナルを用いて制御する筋電制御方式とがある。筋電制御を行う筋電義手は、その使用に十分な筋肉収縮力の存在が必要である点や、筋電分離等特別な訓練を必要とするといった使用者の制限要因があるが、最近では実用性が広がり、注目されている。

2-1.コントロールシステム

現在一般的に使用されている能動義手のコントロールシステムは、ケーブルシステムである。このシステムは、両側上肢帯の動きを主たる力源とし、その他に切断側の肩の動きと体幹の動きを力源に利用している。その動きによる両側上肢帯の広がりやハーネスでとらえ、その動きの幅に等しくワイヤーを牽引する。この動きが能動手先具および能動肘関節継手の操作源となる。

能動肘関節継手のロック制御ケーブルは、切断側の上腕部を伸展し肩を突き出すように動かすことによって牽引され、肘関節継手のロック固定・解除を行う。肩継手の場合は、上肢帯の動きや切断側の肩の動きが満足に利用できないため、ロック制御ケーブルを腰ベルトに掛けたり、時には環状のベルトを大腿部に掛けたりして、体幹の側屈等の動きによって牽引することになる。

現在使われているケーブルシステムには、前腕義手および手義手に用いられ、能動手先具の開閉制御だけを目的とする単式コントロールケーブルシステムと、上腕義手および肩義手に用いられ、能動手先具と肘関節継手の制御を行う複式コントロールケーブルシステムとがある。

2-2.ハーネス

ハーネス (harness) とは、束縛感または不快感をできるだけ少ない状態で義手を懸垂し、また、上肢帯および体幹の運動をケーブルの牽引力に変換するために肩や胸郭などにつける装置である。

ハーネスの目的は以下の3点である。

- ①義手を懸垂、支持し断端に固定する。
- ②義手を操作する力を体内の力源から最大限に取り出し、切断者の負担を最小限にとどめる。
- ③義手の着脱が容易に行える。

2-3.ハーネスの問題

能動義手の制御にハーネスを用いる場合、肩関節外転位や上肢挙上位といった肢位ではハーネスが弛んでしまい、緊張を伝えることができない。結果、そのような肢位での手先具の操作が不可能であるという問題が生じている。

また、装着者の感想として、思うように動かない、肩がこる、外観が悪い、重いといった問題点が挙げられている。

3.機能解剖

3-1.肘関節

肘関節は上腕と前腕との間に機能的連結を行う上肢の中間的関節である。この関節により、肩の関節を介して空間中に前腕を配置させ、機能的肢節である手が、体からどんな距離でもとれるようになっている。

肘関節は上腕骨下端と橈骨上端からなる腕橈関節、上腕骨下端と尺骨上端からなる腕尺関節、橈骨上端と尺骨上端からなる上橈尺関節の3つの関節からなる複関節である。

肘関節に固有の運動は、屈曲と伸展だけであり、主に腕尺関節が関係する。橈骨および尺骨遠位の下橈尺関節との共同作用で前腕の回外と回内の運動に関係する。

前腕回外位で肘関節を伸展すると、前腕は上腕に対してやや橈側に偏位している。これは生理的外反肘関節（肘関節角）といい、上腕と前腕は $160\sim 170^\circ$ の角度となっている。成人男性で約 170° 、女性や小児で約 160° と成人男性の方が偏位は小さい傾向にある。物を手に下げて運ぶときに明らかに観察されることから、運搬角とも呼ばれる。この生理的外反があることで、肘関節が屈曲したときに前腕部は上腕部よりも内側に位置する。この上腕部の長軸に対しての偏位は食物を口に運ぶのに都合がよいためといわれている。

以下に生理的外反（肘関節角）の図を示す（図1）。

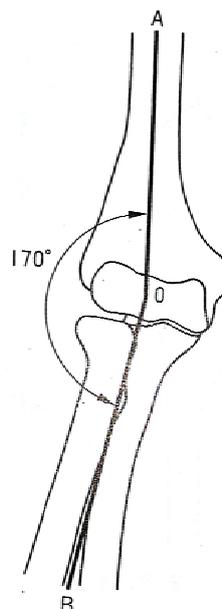


図1.生理的外反角

上腕骨長軸（A-O）と前腕長軸（B-O）のなす角は
 $160\sim 170^\circ$ となる

3-1-a.腕尺関節

上腕骨滑車と尺骨滑車切痕からなる蝶番関節で、屈曲と伸展を行う。

3-1-b.腕橈関節

上腕骨小頭と橈骨頭窩の間の球関節であるが、実際に起こる動きは屈曲と伸展である。前腕の回外および回内の運動では、軸旋運動が起こる。

3-1-c.上橈尺関節

橈骨頭の関節環状面と尺骨の橈骨切痕とで形成される車軸関節である。下橈尺関節とともに前腕の回内外の運動に関係する。

関節全体を包む間接包は、肘関節の屈曲や伸展が十分に行えるように、前面は比較的緩やかである。内外側は内転や外転の動きを抑えて、安定性を保持するように強固になっている。これを補うように、内側側副靭帯と外側側副靭帯の2つの靭帯がある。上橈尺関節には、尺骨の橈骨切痕前縁から橈骨頭を取り巻き、切痕後縁に付着する橈骨輪状靭帯がある。

3-2.肘関節の屈曲と伸展

肘関節の自動運動域は、 $0\sim 145^\circ$ である。女性や小児では、伸展時に約 10° の過伸展になることもある。伸展運動の制限因子は、肘関節頭が肘関節頭窩にはまり込む骨性制限、側副靭帯の緊張、屈筋群の抵抗である。屈曲運動の制限因子は、屈筋群収縮による屈側の軟部組織の量的増加である。

肘関節の屈曲に関与する筋は、上腕二頭筋、上腕筋、腕橈骨筋がある。補助動筋として、円回内筋、手関節屈筋群も関与する。

肘関節の伸展に作用するのは主に上腕三頭筋であり、補助動筋として肘関節筋、手関節伸筋群がある。

肘関節の屈曲と伸展を筋収縮力で比較すると、屈筋群は伸展筋群の1.5倍である。屈筋群のうち、上腕二頭筋と上腕筋は上腕骨と平衡に走行し、前腕骨への付着部は肘関節の近くにあり、僅かな筋短縮でも大きな可動域が得られるために、運動の速さに有利な筋として働く。上腕二頭筋は前腕回外の作用もあるため、肘関節屈曲は、回外位の際に最もよく働く。腕橈骨筋は前腕骨と平行に走行し、前腕骨への付着部は遠位端に近く、肘関節屈曲に関してはトルクの

発生に有利な筋として働く。負荷の少ない状態での肘関節屈曲では、上腕二頭筋と上腕筋が働いて、腕橈骨筋はほとんど活動していない。前腕に負荷をかけると、腕橈骨筋の積極的な活動が起こる。

肘関節屈曲・伸展の主要筋を以下に示す（図2）。

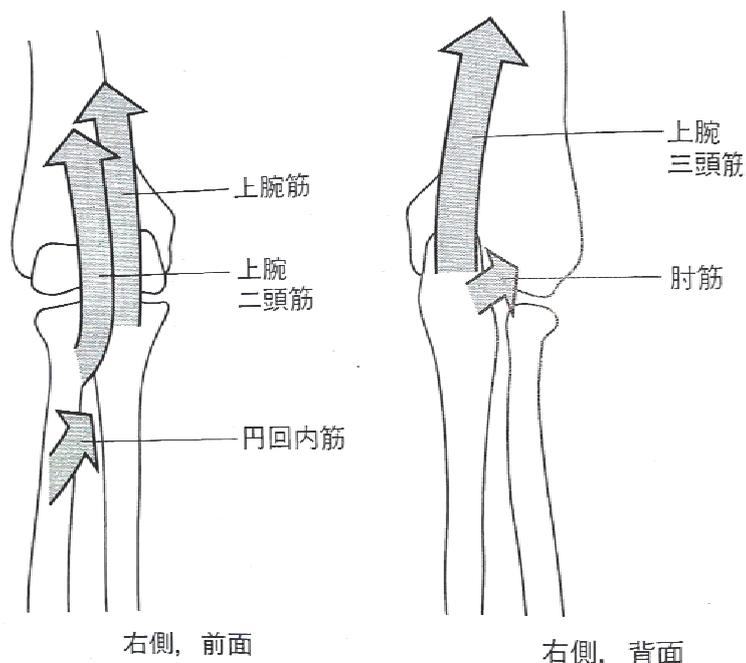


図2.肘関節の屈曲・伸展に作用する筋
左が屈曲、右が伸展に作用する

3-3.前腕部の回内外

肘関節 90° 屈曲位での回内外の運動域は、それぞれ 90° である。肘関節伸展位では、肩関節の回旋が伴うため、正確には測定できない。回外や回内の運動で、尺骨は回旋しない。回旋運動では、橈骨上端は輪状靭帯内を回り、下端は尺骨頭の周囲を回る。橈骨の長軸は常に上腕骨小頭の中央を通過する。この関係は関節の屈伸、疥癬に無関係で一定している。

前腕の回内に作用する筋は、方形回内筋、円回内筋である。補助動筋は、肘関節筋、腕橈骨筋、手関節屈筋群である。

前腕の回外に作用する筋は、回外筋であり、補助動筋は、上腕二頭筋、長母指外転筋、腕橈骨筋である。

腕橈骨筋は、前腕回外位では回内運動に、前腕回内位では回外運動に働く。

前腕切断により方形回内筋が失われた場合、上腕二頭筋の作用により断端は

回外位をとりやすくなる。

3-4.前腕切断長と回内外

前腕部の切断では、残存している前腕部の長さが回内外の機能に参与している（図3）。

極短断端（断端長 35%以下）では回内外は不可能であり、上腕二頭筋の張力により回外位をとる。

短断端（断端長 35～55%）では円回内筋が残存しているため、回内外範囲は 60° 以下である。

中断端（断端長 55～80%）では回内外範囲は $60\sim 100^{\circ}$ 程度である。

長断端（断端長 80%以上）および手関節離断では回内外範囲は 100° 以上であり、方形回内筋が残存している場合にはほぼ正常範囲の回内外が可能となる。

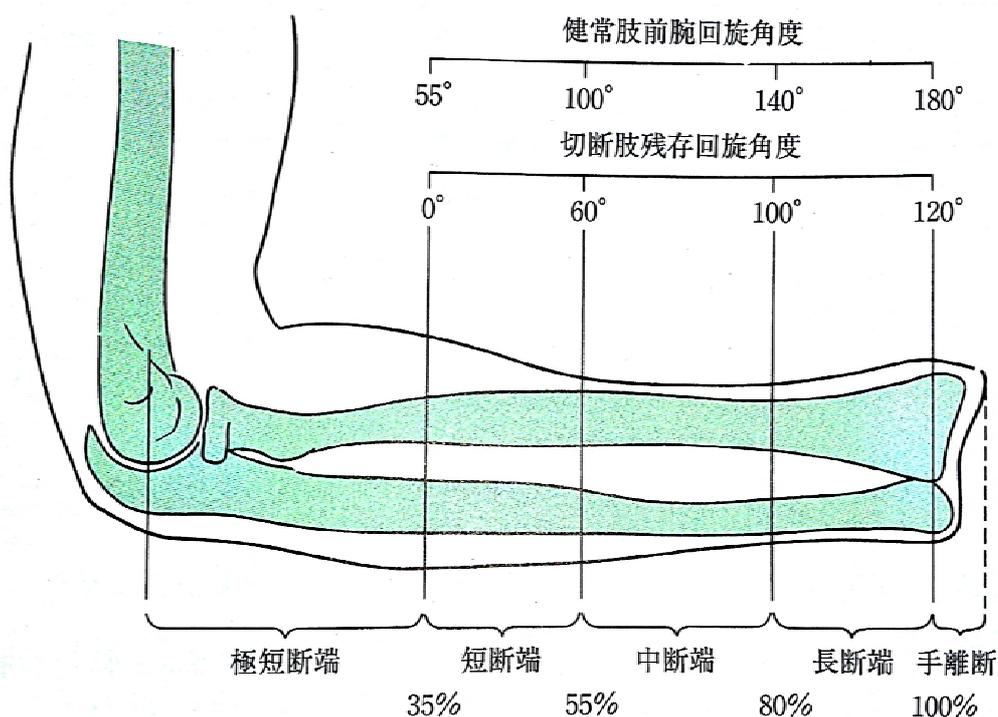


図3.前腕切断時の残存回内外角度

4.先行研究

現在使用されている、ハーネスを用いない能動義手として、筋電義手のような体外力源式のものもあるが、それらは体内力源のものとは比べ、非常に重く、価格も高価で使用者が限られることから、本研究では体内力源の能動義手の開発を目的とする。以下に、ハーネスを用いない体内力源式能動義手の研究例を挙げる。

4-1.回内外式能動義手（一期生）

一期生の卒業研究では、ハーネスを用いることによる手先具操作の制限の問題を解決するため、切断者の残存する回内外の運動機能に着目し、それを利用した体内力源義手の製作を試みた。

模擬義手により機構の検証を行った後、被験者が試作品を装着し評価を行った。その結果、装着には問題がなく、初期装着時に容易にフックの開閉ができた等、目的を達成できた項目もあったが、クリアランス不足による摩擦抵抗や、フックの向きによる効率の変化などの問題により、回内動作やフックの開閉に問題が生じてしまった。

4-2.回内外式能動義手（三期生）

一期生の研究を受けて、三期生では倍動機構、助動機構といったユニットを組み込むことで先行研究の問題を解決しようと試みた。

結果、フックの開きに関して、肘関節屈曲時は改善されたが、肘関節伸展時は悪化した。その原因は、断端末の動きにソケットが追随してしまい、回内角度が十分に得られなかったためと考えられた。また、ソケットの適合不良により垂直荷重に対する安定性を確保できず、金属部品を使用したことによって義手の重量増加もみられた。

4-3.回内外式能動義手（六期生）

六期生の研究では、三期生までの研究を踏まえ、材料の変更により軽量化を図り、さらに、機構の簡略化を試みた。かさ歯車を用いた巻き取り機構を製作し、効率の改善を図った。

結果、力源ゴムの力に対して、回内外の力が不足してしまい、また、歯車の

強度という問題も残った。

4-4.肘関節伸展式能動義手（妹尾ら、2013）

肘関節運動を力源とした能動義手制御システム（以下、肘関節システム）が過去にいくつか開発されていた（図4）。最近では、妹尾勝利らによって肘関節システム義手が開発され（図5）、これらの肘関節システムは、前腕部リテーナと上腕部リテーナの間の距離を肘関節の伸展運動によって伸ばすことによりケーブルを緊張させ手先具を操作するというものである。

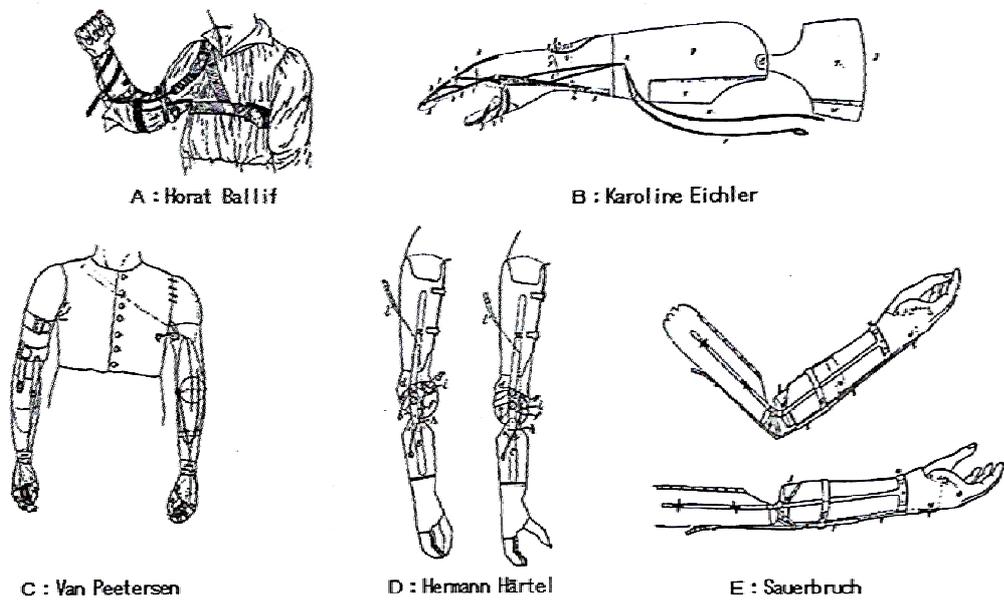


図4.過去の肘関節システム義手

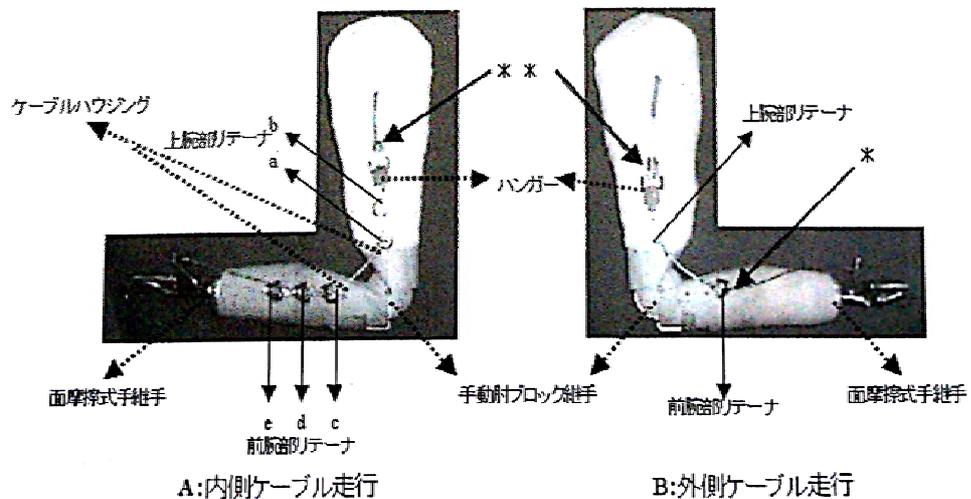


図5.妹尾らの開発した肘関節システム義手

6.仮説

先行研究の問題を解決し、使用者が快適に使用できる能動義手を開発するため、我々は次のような仮説を立てた。

- 1 ハーネスを用いないことで、肩関節 90 度以上外転位のような肢位でも制限を生じずに手先具の操作を行うことができる(一般的な能動義手の課題の解決)。
- 2 肘関節の関節運動を利用することで、手先具の操作に必要な大きな力源を確保することができる(課題 1 の解決)。
- 3 肘関節の関節運動によって得られた力を、一旦力源ゴムに蓄積させ、その力と前腕の回内外の力を合わせて手先具の操作を行うことで、肢位によらずに手先具の操作を行うことができる(課題 2 の解決)。
- 4 前腕の回内外によって機構の制御を行うことで、健側等による補助が不要となる(課題 3 の解決)。

7.研究目的

仮説を元に、我々は、義手側の関節運動のみで操作できる手先具開閉機構を開発することにした。

これにより、ハーネスが簡略され、肢位によらず、使用者が快適に扱うことのできる義手を実現することができる。

そして、この義手の実現によって、義手使用者の ADL が拡大し、QOL の向上につながると考える。

8-1.方法

目的を実現するために、我々は、“肘関節屈曲を力源とし、前腕の回内外によって手先具の開閉の制御を行う機構とその機構を取り付けた模擬義手”の製作を行った。

8-2.模擬義手の製作

8-2-a.模擬義手

仮説として立てた内容を踏まえ手先具の操作を行う機構を設計し、その機構を取り付けた模擬義手（以下試作機）を製作する。本研究では切断者ではなく、健常者が使用することで検証を行う。

手先具を操作するための機構は、肘関節屈曲動作を力源として利用する機構（以下：肘屈曲伝達機構）、前腕部の回外により力の伝達を行うケーブルを切り替える機構（以下：切替機構）、前腕部の回内によりケーブルから伝達される力を調整・手先具の制御を行う機構（以下：制御機構）の3つから成り立つ。

仮説の中で考えられた条件を満たし、ハーネスを用いずに肘関節の屈曲動作と前腕の回内外動作だけで手先具の動作を行うために、肘屈曲伝達機構、切替機構、制御機構を以下の通りに設計する。

8-2-b.肘屈曲伝達機構

肘屈曲伝達機構では、肘関節の屈曲運動をケーブルの張力に変換する機能を果たす機構である。

肘関節伸展状態から屈曲位になると、重ね合わされた二枚の円盤状のパーツが回転する。それぞれ上腕遠位部と前腕近位部に固定されている。これにより、円周に沿って配置されたケーブルが回転とともに巻き上げられる。これにより肘屈曲伝達機構遠位部でケーブルが前腕部近位に向かって引き寄せるように直線運動をし、張力をより遠位に伝達する。

8-2-c.切替機構

切替機構では、肘屈曲伝達機構からの張力の伝達及び保存を行う。前腕部が最大回外位をとった時、切替が生じる。

切替機構内の近位に位置するパーツが、肘屈曲伝達機構からの張力により一旦近位に引き寄せられる。この際、中間部にあるゴムが張力により伸張される。この時切替機構内の遠位のパーツは固定されている。

切替を行うと、先に近位のパーツが固定され、次いで遠位のパーツが開放される。これによりゴムの張力は、固定された近位のパーツを起始とする筋肉のように、遠位のパーツを引き寄せる張力を伝えることで、遠位に力を伝達する。

もう一度切替を行うと、前腕部は一旦最大回外位をとるため遠位のパーツは切替前の位置に戻り、その後切替が起こる。先の動作と逆に、先に遠位のパーツが固定され、次いで近位のパーツが開放される。

切替機構が作動し、近位側のパーツが固定されると、肘屈曲伝達機構につながるケーブルは伸展位の時より長い状態で固定されているため、ある程度の弛みを生じ肘関節に張力を生じない状態になる。これにより、肘関節はフリーになり、力源は切替機構内のゴムに委ねられ、前腕の回内外だけで手先具の制御を行う。この際、手先具の操作は肘関節・肩関節どちらの肢位にも依らず、頭上・背後でも肩外転位でも変わらず操作できる、と考えられる。

肘屈曲伝達機構からの張力により伸長されたゴムは、もう一度切替を行い近位側のパーツを開放するまで伸張は一定となるはずなので、切替を行うまで何度も手先具の開閉にゴムの張力を利用できることを想定している。

近位部のパーツは、固定される際無段階での変位ができることが望ましいが、現段階でそのような設計ができなかったため、本研究では相互にかみ合う爪の形状を用いて6段階の変位ができるものとして設計した。

8-2-d.制御機構

制御機構では、切替機構の動作及び手先具の制御を行う機構となる。

前腕部が最大回外位となったとき、回転運動により遠位に移動した円盤の腕が、機構内の溝付のパーツを回転させる。回転されたパーツが更に制御機構と切替機構を繋ぐ棒を押し出すことで、切替機構内の遠位・近位パーツを繋ぐ交差部を押し出し、パーツの固定・開放の切替を行う。

最大回外位から回内方向に運動することで、円盤状のパーツが回転しケーブルが巻き上げられ、ケーブルの引き込みをより大きくできる。力源はあくまで

も肘屈曲伝達機構から伝えられ切替機構内に保存しているゴムの張力であり、制御機構での操作はより精密な動作を行う為のものであるとする。

8-2-e.ソケット及び支柱

実際に使用する装着者としては、前腕切断中～長断端、前腕部回内外が可能、肘関節の屈伸運動が可能、として想定している。

今回製作する模擬義手は、それに合わせて前腕切断長断端程度までの長さにした健常者用のソケットを用いる。

手先具は、ソケットに金属支柱を取り付け、前腕部の長軸延長線上にリストメタル及び手先具が配置されるように取り付けた。

支柱の配置は、前腕部の回内外動作の邪魔にならないようにクリアランスを大きめに確保し前腕部の上下に配置した。

8-2-f.模擬義手の構造・各機構の取り付け

模擬義手は、ソケット及び支柱に、肘屈曲伝達機構・切替機構・制御機構の三つが備え付けられた状態で完成とする。

機構の取り付けに際し、肘屈曲伝達機構は円盤状のパーツの中心軸が肘関節の軸と同じになるように取り付け、制御機構は各円盤パーツの中心軸が前腕部回内外運動の軸と一致するようにする。力源機構の遠位から伸びるケーブルは、切替機構内のゴムを経て制御機構につながり、手先具へと至るが、このケーブルの走路は一直線上になるよう配置する。

8-3.製作

8-3-a.模擬義手

模擬義手は、健常者の右腕に装着し、前腕回内外により操作をできるものとするため、健常者の右前腕に装着できる義手とする。大まかな構造としては「前腕ソケット」「各機構」「手先具」で構成し、それぞれを金属支柱でつなげるものとする。

装着する健常者は 20 代男性、身長 178 cm、体重 82 kg である。

前腕ソケットは、ハーネスによる懸垂が必要としない顎上支持式のノースウェスタン式ソケットとして製作する。ノースウェスタン式の製作方法に則って

採型、修正した陽性モデルに軟性ポリエチレン(厚さ 3mm)を手絞りにて成形し、その前腕部を切り離す形とする。

ソケット及び各部品を固定する支柱は以下の図の通りである (図 7)。

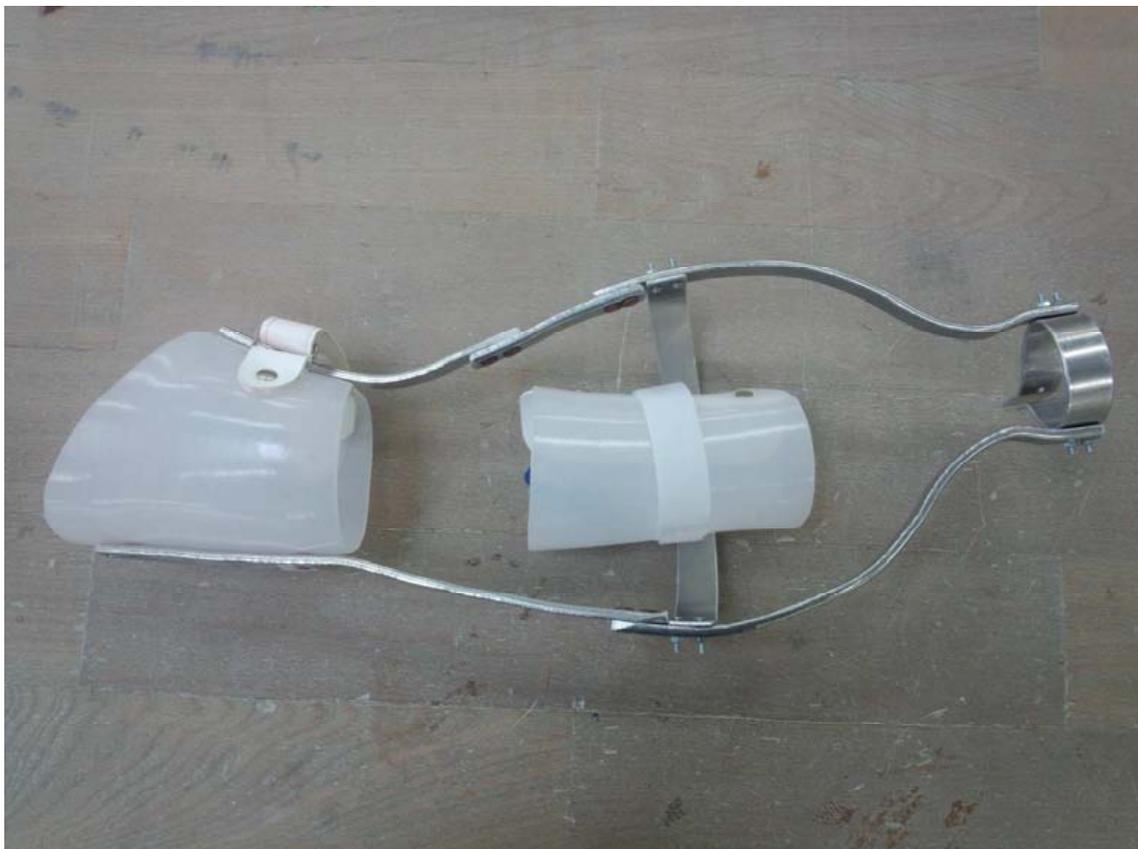


図 7.ソケット及び支柱

8-3-b.肘屈曲伝達機構

肘屈曲伝達機構を構成するパーツは、円形から幅 4cm・長さ 5cm の柄の伸びた板 2 つである。どちらもレストラ(厚さ 3 mm)で製作した。

柄の部分をそれぞれ上腕、前腕に向くように重ね合わせ、円形部分の周縁上にケーブルの走路が沿うようにケーブルハウジングを配置、リテーナおよびベースプレートで固定した。この時、肘関節の運動と円形部分の回転が一致するように、円形部分の中心を肘関節の関節軸と一致させる。

ケーブルは肘屈曲伝達機構の中心を固定の起始とし、周縁上のベースプレート、前腕部方向に伸びた柄に備え付けたベースプレートを経由して前腕方向に向かう。

また、上腕部に関しては、円板が肘関節の屈曲と連動して運動するように、上腕側の柄を上腕部と固定する。そのために、クラリーノとマジックテープにより、上腕周径に合わせたベルトを製作した。

製作した肘屈曲伝達機構の伸展時・屈曲時の写真を以下に示す（図 8、9）。

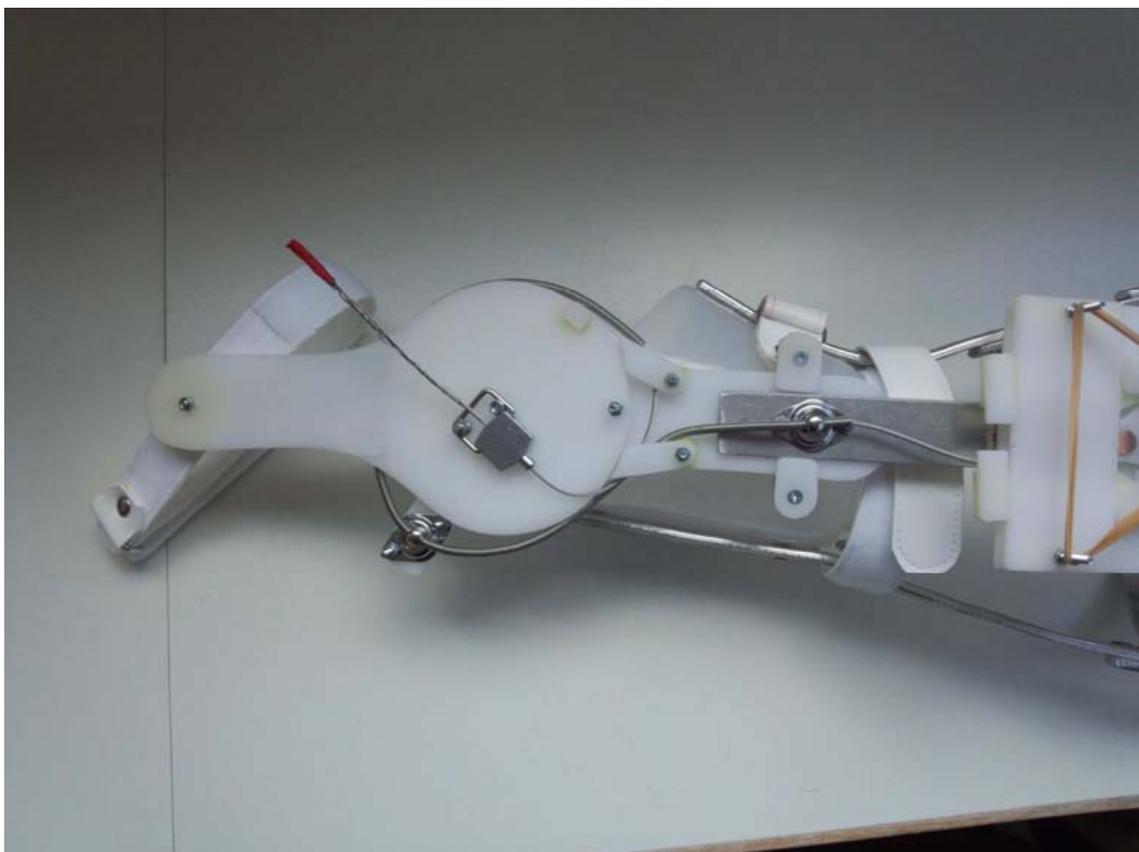


図 8.肘屈曲伝達機構（伸展時）

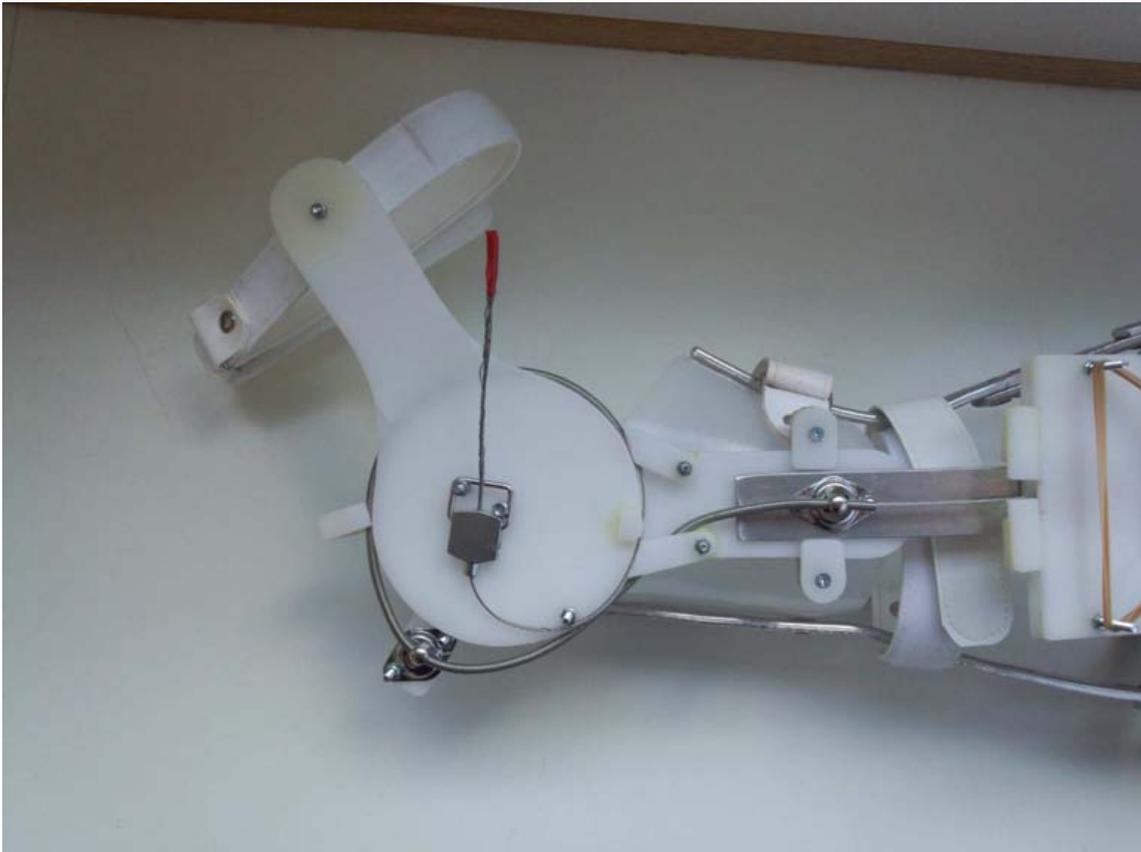


図 9.肘屈曲伝達機構（屈曲時）

張力が生じた際、ケーブルハウジングが 2 枚の円板間に潜り込む、又は周縁上から大きく逸れてしまうという問題が発生したため、2 枚の円板の間に半径が 3mm 程度小さい円板を 1 枚加え、周縁の断面が凹型になるようにし、ケーブルハウジングの安定化を試みた。加えて、ケーブルハウジング周囲を押さえ込むようにレストラ板で抱きかかえるようにして、予定した走路からの逸脱を抑えるよう試みた。この結果、ケーブルハウジングが内側に潜り込む問題も、円板周縁から大きく逸れる問題も解消された。

しかし、ケーブルハウジングの押さえ込み等の際、レストラ板同士の固定を DB ボンドで貼り合わせる形で行ったため、ケーブルハウジングの張力や外力に対する耐久性が不十分となった。

8-3-c.切替機構

切替機構は、平面状のレストラ板(厚さ 3mm)を土台とし、その上に肘関節側の張力伝達パーツ、手先具側の張力伝達パーツを配置した。

肘関節側の張力伝達パーツは 6 本の爪、手先具側の張力伝達パーツは肘関節側が窄まった形の曲線形状でワイヤーおよびゴムとの接続部を挟み込み固定する形状として製作した（図 10）。

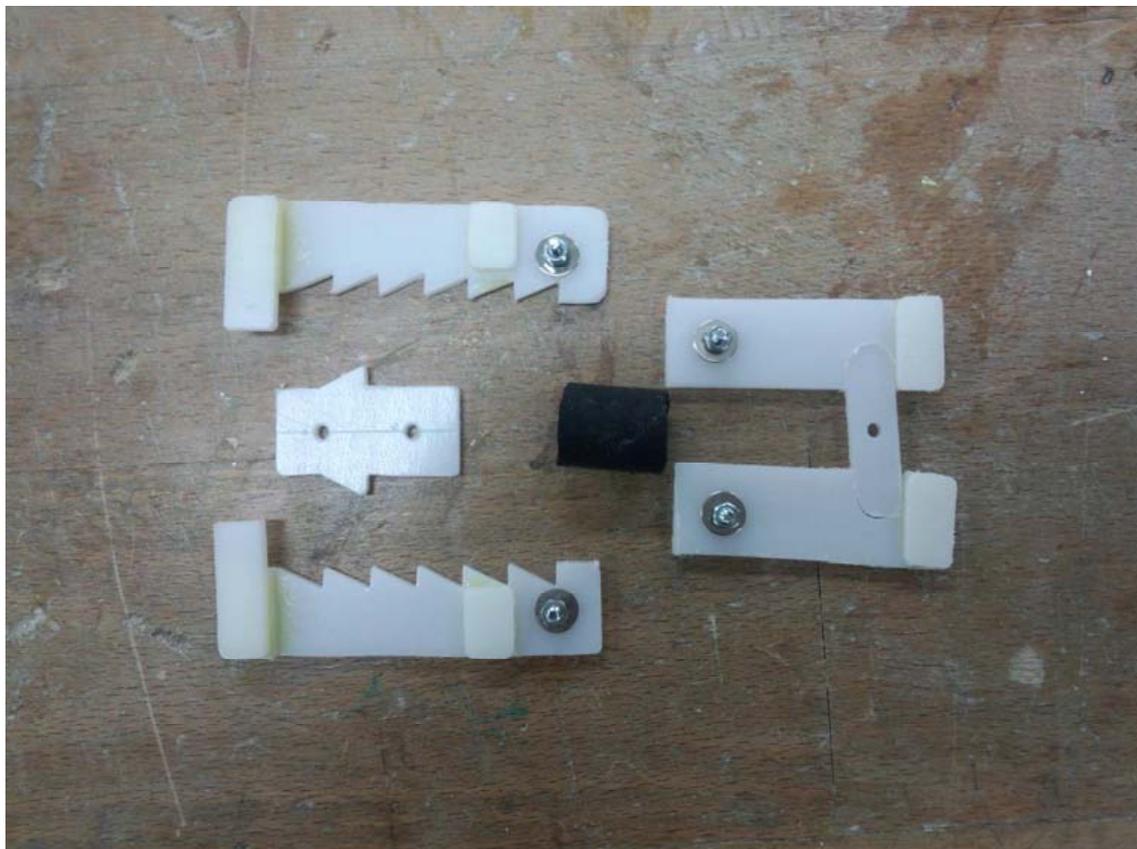


図 10.肘関節側・手先具側の肘関節張力伝達パーツ

それぞれのパーツはレストラ板(厚さ 3mm)で製作し、同じく平面状のレストラ板を用いて製作した蓋で覆い、その蓋と土台とで挟み込み、かつ蓋の縁に沿って一軸上の平面移動のみを行う構造として製作した。

肘関節側の張力伝達パーツおよび手先具側張力伝達パーツは、2 枚の金属板により互い違いに接続され、切替機構全体の中央付近に金属板の交差部がくるように配置した。

金属板はそれぞれのパーツにビス・ナットにより接続した。

交差した金属板同士が干渉しないよう片方の金属板接続の際、ワッシャを 2 枚余分に挟ませた状態で接続した。

これらのパーツの切替は、中央部で交差させた 2 枚の金属板が作る谷の部分を金属棒で押し込むことで実現させる。金属板の交差の肘関節側・手先具側の

谷にそれぞれ銅鉾が当たるように配置し、交差部を上から挟み込む形のコの字型になるよう固定し、制御機構に繋がる金属棒に取り付けた（図 11）。

切替機構内での動作時の写真を以下に示す（図 12）。

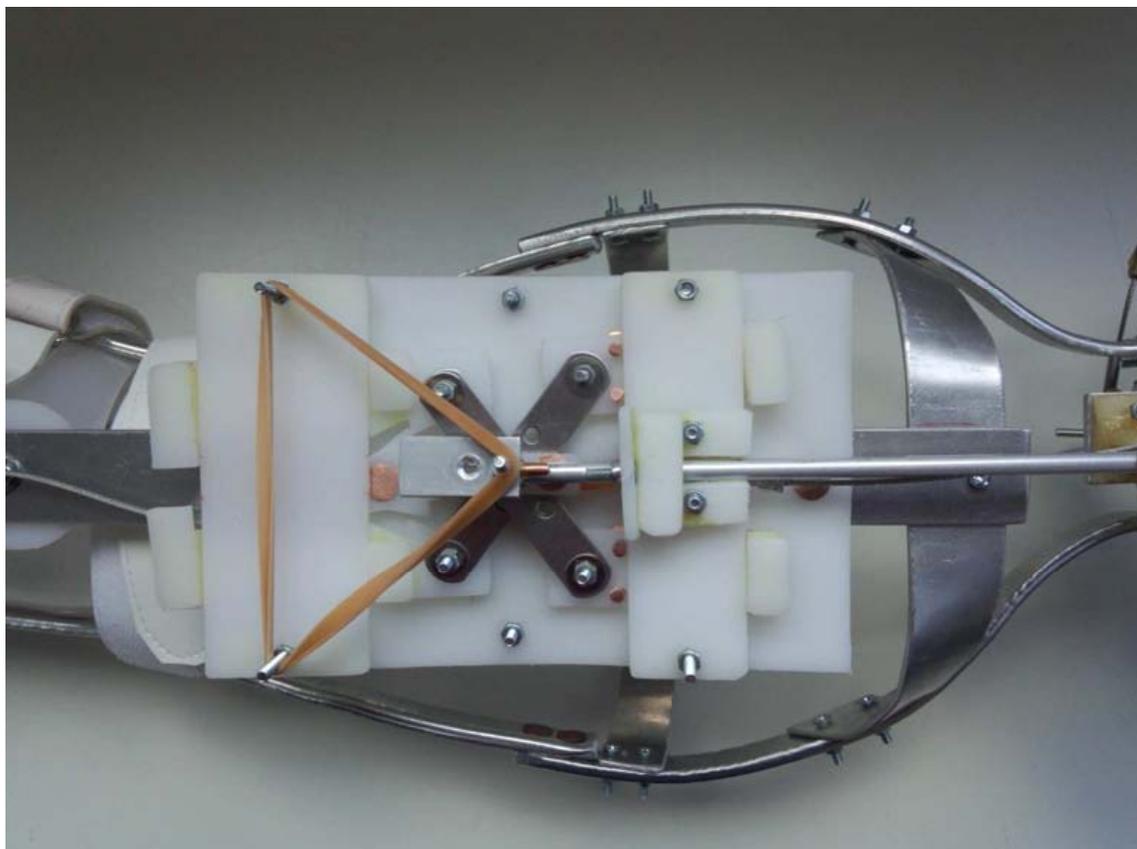


図 11.切替機構

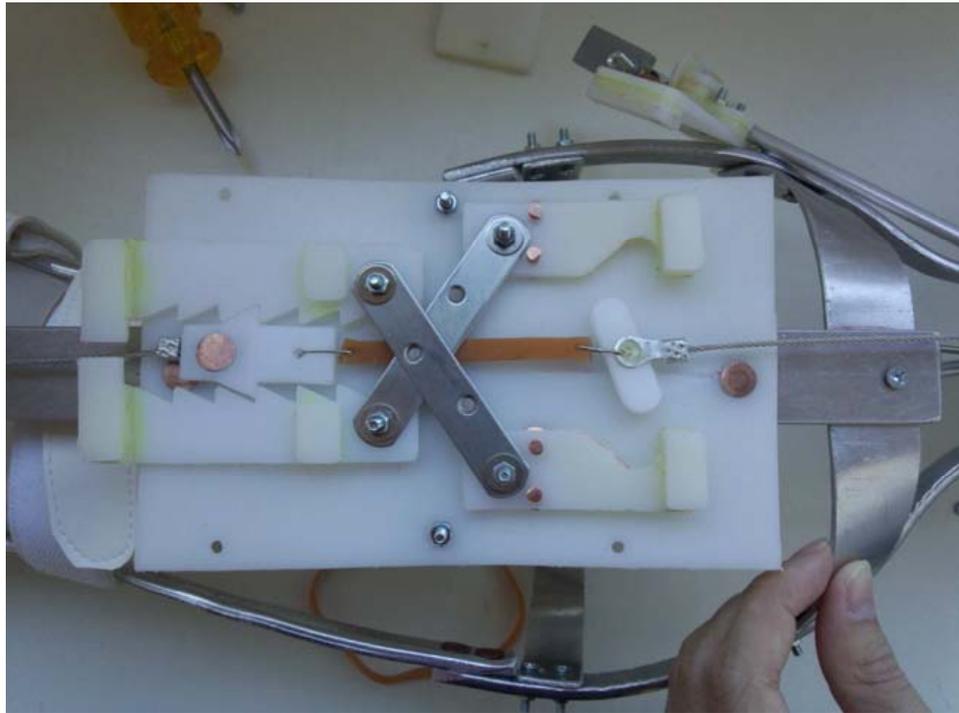
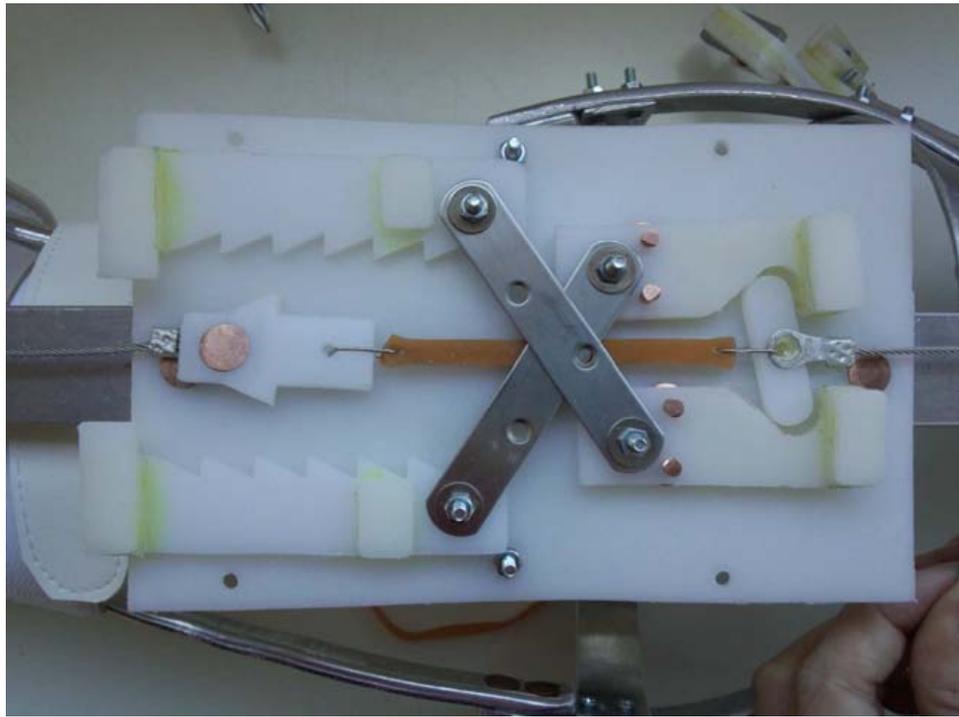


図 12.切替機構の動作
上：肘関節側から張力をゴムに伝える
下：ゴムの張力を手先具側へ伝える

当初、土台としたレストラ板をそのまま模擬義手の金属支柱に取り付けることでほかの機構と接続しようと考えていた。

しかし、各パーツを覆う蓋や金属棒配置のためのガイドなど、多くの部分を占めているレストラ板は完全な平面ではなく、全体にある程度反り返っていた。そのためそのままでの取り付けは歪みを残したままの接続となり、動作不良の原因となった。加えて、パーツ接続部の銅鋸、針金、ビスなどの部品が一部干渉してしまい、ひっかかりを起し動作が鈍くなってしまった。

レストラ板の歪みは、加熱後平面上で圧迫するなどして平坦化を試みたが、反り返りを完全に取り除くことはできなかった。そこで、最も大きく最も反り返っていた土台のレストラ板を、平面状の半月材に固定し、反り返りと反対に張力をかけるように土台の中央部で半月材により固定した。他のパーツに関しては、土台への固定を強固に行うことで歪みを軽減するものとした。

しかし、土台の歪み解消も十分ではなく、いずれのパーツも少しずつ歪んでいる状態での組み立てとなった。

パーツ同士の干渉にもレストラ板の歪みが影響していたが、これらに関してはレストラ板に削り込みを加える、ザグりを大きめにするなどして対応した。

これらにより、すべての問題が完全に解消されたわけではないが、動作に不具合を生じるほどではない状態にまで抑えることができた。

8-3-d.制御機構

制御機構は、外径 **5mm** のアルミパイプを軸とし、軸に固定し軸と連動して動くパーツと、軸との間に隙間があり連動はせず、連動するパーツの動きにより回転する **2** つのパーツとで構成している (図 13)。

アルミパイプ製の軸は、リストメタルの直径中心および手先具固定用のねじ穴を回転の軸とした。直径 **1 cm** のレストラ板(厚さ **3mm**)をパイプ先端に固定、加えて同じく直径 **4.5cm** のレストラ板をリストメタルにはまるように取り付けることで、リストメタルの中心を軸に回転し、なおかつ軸としてのぶれも軽減するものとした。

軸と連動せずに回転するパーツは、近位側、遠位側に **1** つずつ配置し、その間に連動するパーツが挟まれる位置関係とした。連動するパーツには、円周から幅 **1cm**、長さ **1cm** の柄が **1** 本付くように製作した。連動せずに回転するパー

ツには、直径 1cm のレストラ板(厚さ 3mm)が、それぞれ連動するパーツと同じ平面状に並ぶように取り付けた。直径 1cm のレストラ円板取り付けはいずれも DB ボンドによる貼り付けで行った。

連動するパーツの回転時に、直径 1cm のレストラ円板が 1cm の柄との引っ掛かりとなって軸の回転と同方向に回転するようになる。

回外時に回転する円板には、長さ 1cm、幅 1cm の柄を付け、そこに切替機構へ繋がる金属ワイヤーを接続した。接続されたワイヤーは、支柱の下方を通り、外側で切替機構の棒と接続させた。接続された棒は、切替機構上にゴムで繋ぎ、回外動作による棒の牽引が解かれるとゴムの張力により元の位置に戻る仕組みとした。このケーブルの走路は、樹脂により形状を固定したケーブルハウジングと、レストラ板を積層させて製作した足場を用い、張力が生じた際に引っ掛かりや抵抗が起こらないようにした。

回内時に回転する円板には、「コ」の形状に樹脂で固定したケーブルハウジングを直接取り付け、回内動作による円板の回転と共にケーブルの走路が延長され、その分ケーブルに回内動作分の張力が追加され、手先具操作の調整を行えるものとした(図 14)。

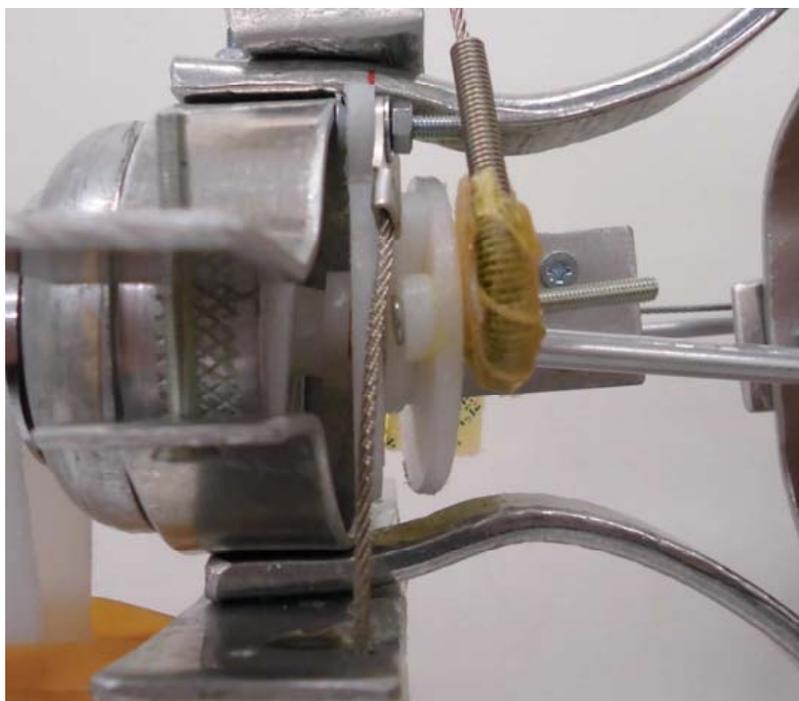


図 13.制御機構の写真

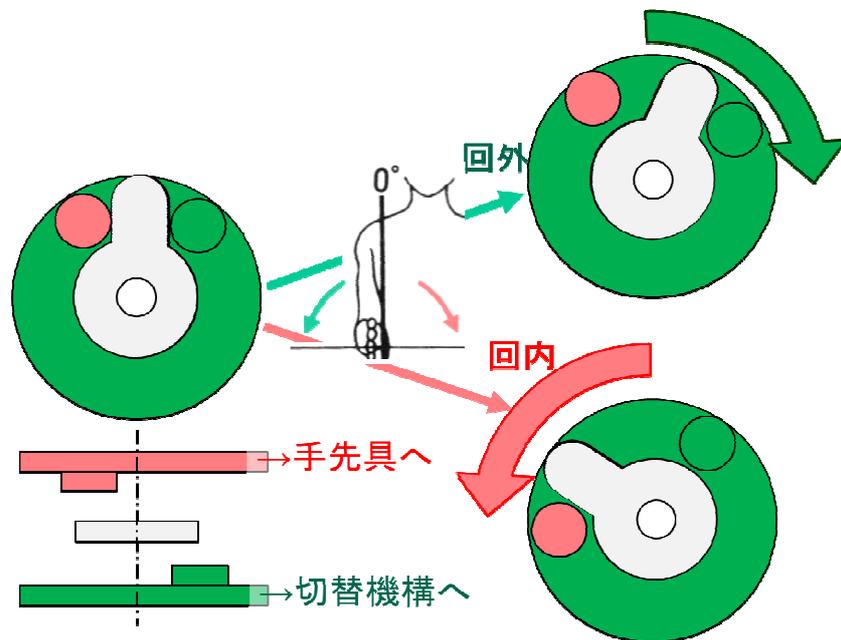


図 14.制御機構の動作

今回の製作では、レストラ板同士の接着にはほぼすべて DB ボンドを用いた。これは軽量化や部品点数の削減の目的もあって選択されたが、強度が十分であるかどうか不安が残ると考えられる。今回の動作確認では破損することは無かったが、回内外により繰り返し高い負荷が断続的に加えられることを考えると、レストラ板同士の接着などよりも、プラスチックか金属による一体成型として部品を製作した方が強度的にも部品点数の削減にも効果的であり、また部品同士を組み合わせた時の干渉・誤差なども小さくできると考えられる。これは制御機構を構成する円板に限らず、レストラ板積層やケーブルハウジングの樹脂固定で製作したケーブル走路に関しても言えることである。今回作成した試作機では、健常者の前腕があるため金属支柱を用い、その周囲を大回りしてケーブルの走路を形成するものとなったが、本来はこれらすべてを前腕義手の内部に収めるべきであり、走路を形成する部品、またそれらの固定・配置ももっと小容量にしなければならない。そのためにも、今回のようにレストラ板を切り出し、形状を調整しながら削り、それらを接着剤で貼り合わせ、ビス・ナットで固定する、という製作方法ではなく、より細密なサイズで、厳密な設計

の基で製作されなければならない、と考えた。

また、今回は標準的な前腕義手の部品を用いることを想定し製作したが、制御部・切替機構の接続に用いたワイヤーや回外解放時に位置復元を行うゴムなど、義手に用いたものと同じである必要のないパーツはいくつか有り、例えばワイヤーの代わりに化学繊維製ワイヤーや、ゴムの代わりにバネなど、様々な方法があると思われる。

8-3-e.手先具

今回製作した機構では、標準的な随意開き式手先具の力源ゴムに逆らって開大を行うには、張力不足であると予想した。そこで今回の製作では、随意開き式手先具の力源ゴムを取り外し、随意閉じ式に改造して用いることにした。

力源ゴムを無くし最大まで開大した状態に、レストラ板 2 枚でターミナルの接続部を固定し、手先具を挟み込む形とした。このレストラ板は手先具の付け根で折れ曲がり、付け根部分を支点にして梃のように動くようにした。これにより、ターミナル接続部の反対側をワイヤーで引き込むことでその反対側のターミナル接続部を持ち上げる動作を行い、それにより手先具のフックを閉じることができる。また、回内動作解放時にフックを開く動作を行う必要があるため、ターミナル接続部とリストメタル固定部との間をゴムで繋げることで、ゴム張力をフックの復元力としフックを開かせるようにした (図 15)。

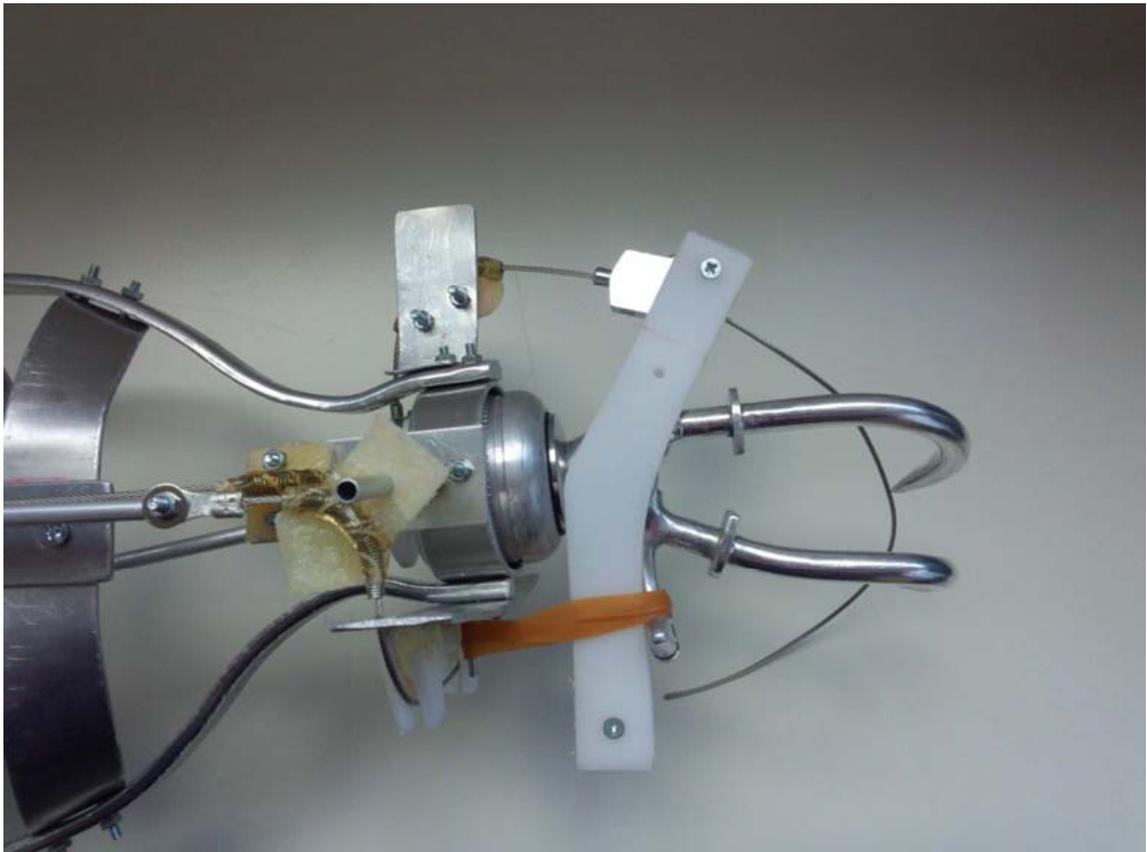


図 15.手先具と支柱への取り付け

元々想定していたものとして、肘関節屈曲無しの状態での切替機構内のゴムと、手先具の復元ゴムとの張力が釣り合い、そこに肘関節屈曲の力を加えていき手先具の開きを調整していく、という動作が望ましかった。しかし今回の製作では、ゴム張力の調整、あるいは別な力源機構・材料の選択が十分にできなかった。それらが不十分であったこともあり、今回の手先具の改造、調整が即席的なものになってしまった。

9.結果

肘関節屈曲を力源とし、前腕回内外で切替と手先具開閉調整を行う機構を製作し、模擬義手として組み立て、動作確認を行った結果、予定通りの動作を行うことができた。

結果として、機構を製作し実現することが出来た。製作した試作機全体の写真を以下に示す（図 16）。そして装着時の写真（図 17）、手先具操作時の写真（図 18）を以下に示す。

しかし今回の研究では、健常者への装着を想定した模擬義手の製作に留まり、機構の製作と動作確認で終わる形となってしまった。また、手先具の開閉操作に関して、定性的な確認で開く・閉じるとだけ判断した形となり、ケーブルの効率や開閉率などの定量的な測定には至らなかった。

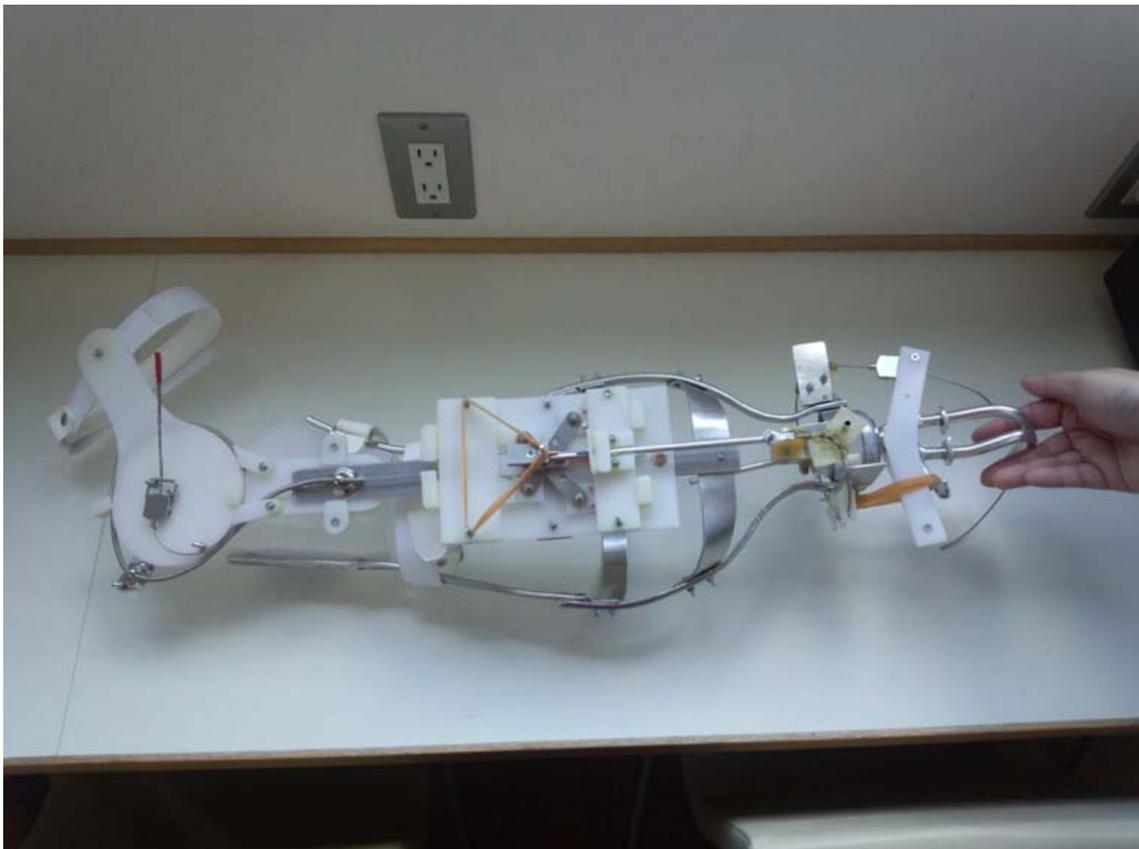


図 16.製作した試作機

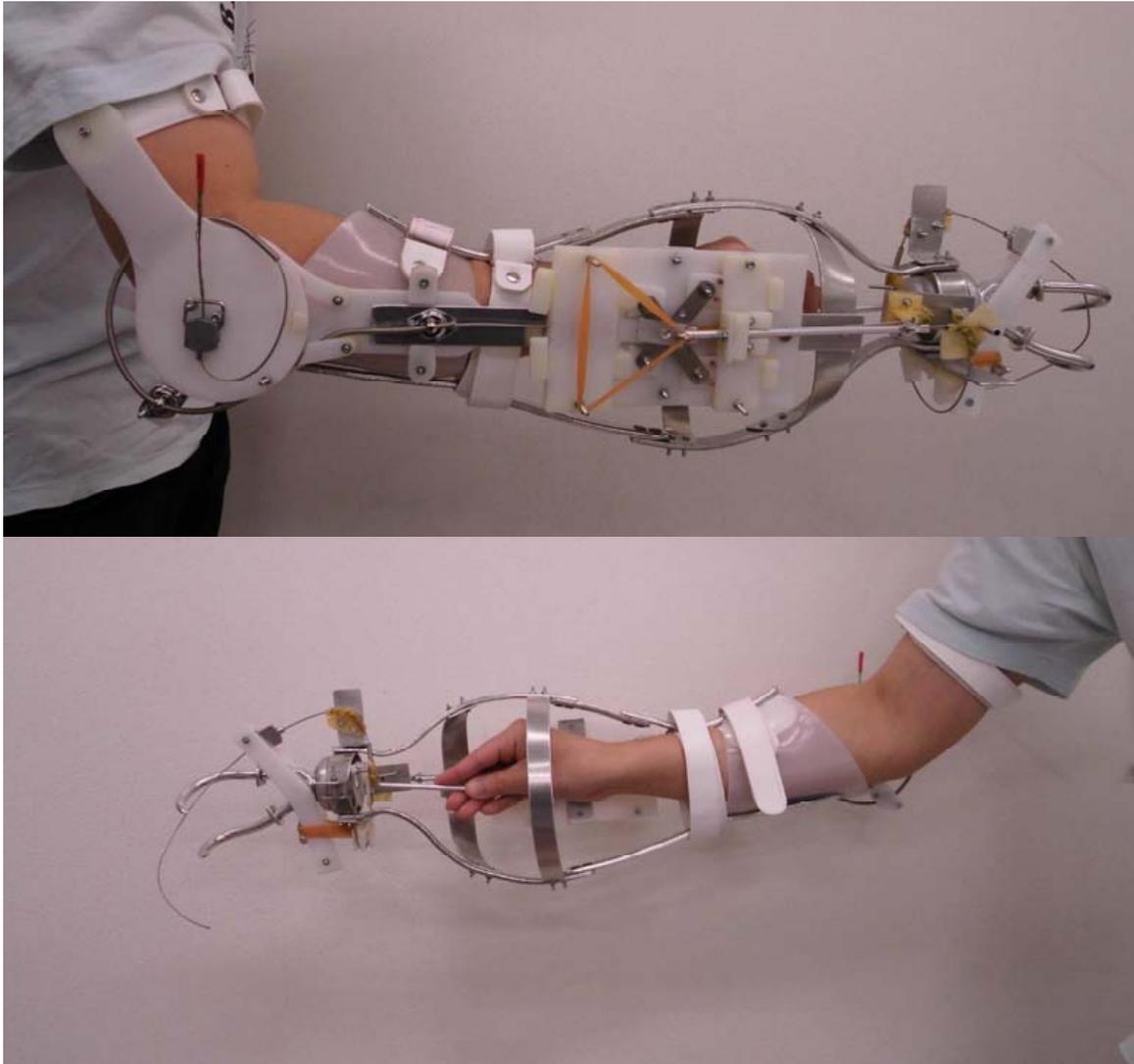


図 17.装着時の写真
健全者の右前腕に装着、手先具は開大状態

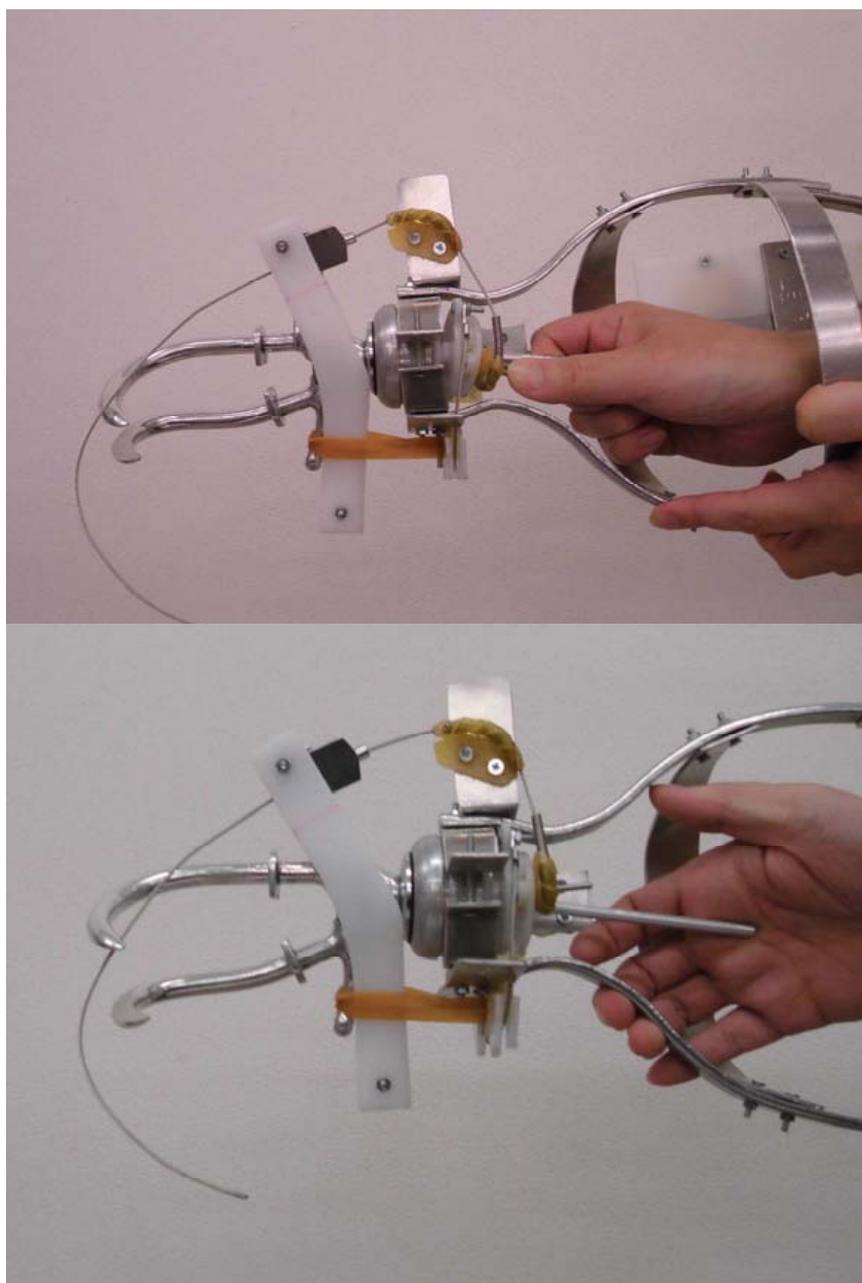


図 18.手先具操作時の写真

上：肘張力無し、前腕回内の代わりに
健全者の手で回内操作

下：肘張力最大、前腕回内の操作無し

10. 考察

肘関節屈曲によるゴム部へのエネルギー保存、前腕回内による手先具への張力伝達は、予知通り行うことができた。

しかし、前腕回外による切り替えでは、回外の力、機構の補助力が弱く、予定通りの動作ができなかった。

今回作成した試作機は、主に切替機構内に使用したゴムの張力によって手先具を閉じる仕組みだが、このゴムの張力は、通常手先具に使用されている力源ゴムの張力と比べて弱く、試作機では実用レベルでの把持が困難であった。

しかし、ただゴムを強くしただけだと、前腕回内外の力に対して強すぎ、制御機構での回外による機構の切り替えや回内による把持力の補助といった動きが困難になってしまうことが予想される。

11.今後の展望

本研究で製作した機構を組み込んだ義手を実現するためには、切替機構のゴムの張力の問題を解決する必要がある。

解決案として、本研究では1種類のゴムでしか動作確認を行うことができなかったため、今後はさまざまな張力のゴムを用意して動作確認、効率の検証を行っていく必要があると考える。同時に、切断者が実際に、肘関節の屈曲、前腕の回内・回外の運動にどれだけの力を発揮できるのかを計測しておく。これにより、回内外の力で機構の切り替えを行える範囲で、かつ、把持に十分な力を発揮できるゴムの張力を明確に定め、それに合わせて機構の調整を行う必要がある。

また、回内外の力を増すために、板ばねを用いて、ぜんまいのような機構を断端遠位部（模擬義手では前腕遠位部）のソケットに取り付けることで、回内運動に補助的な力を加えることで解決できると考えている。最終的な義手では、義手本体とは独立して、断端の回内外運動を許すために、2重ソケットにする予定であり、この機構を組み込むことは十分に可能であると考えている。

試作機は、製作段階において、部品の動き方や強度の問題等、設計時には予想していなかった問題が数多くあり、その都度対処しながら製作を進めていったため、無駄の多い仕上がりとなっている。また、機構の検証を最優先としたため、重量と加工しやすさという観点からプラスチック材料を自分たちで切り出し、機構がわかりやすいように、全体的に大きく設計して製作を行った。しかし、義手として完成させるためには、今回あまり考慮していなかった、機構の狭小化、軽量化、耐久性の向上は必須である。そのため、今後は機構の無駄をなくし、サイズを小さくできるよう再度設計し直し、部品の材料から固定方法まで再度見直していく必要がある。

これらの課題がすべて解決し、我々の開発した機構を組み込んだ義手が完成した暁には、現在使われているハーネスを用いたものよりも快適に扱うことのできる能動義手が実現する。この義手によって、上肢切断者たちのADLが拡大、QOLが向上し、より幸せな生活を送れるようになることを願う。

12.謝辞

本研究を進めるにあたって、様々な形で助言や手助けをしていただいた小嶋先生に、この場を借りてお礼申し上げます。

[参考文献]

妹尾勝利・小林隆司 「肘関節運動を力源とした前腕能動義手制御システムの開発（第1報）」 日本義肢装具学会誌 25(4) 216-220 (2009)

妹尾勝利・小林隆司・石原健・今川裕輔 「肘関節運動を力源とした前腕能動義手制御システムの開発（第2報）：体験用前腕能動義手における筋電図分析と酸素摂取量の検討」 日本義肢装具学会誌 26(4) 252-259 (2010)

妹尾勝利・小林隆司・石原健・今川裕輔 「肘関節運動を力源とした前腕能動義手制御システムの開発（第3報）：事例による肘関節システム義手の懸垂と手先具操作について」 日本義肢装具学会誌 27(3) 174-177 (2011)

妹尾勝利・石原健・富山弘基・今川裕輔・井上桂子・小野健一・藤田大介・吉村洋輔・小原謙一・黒住千春 「肘関節運動を力源とした前腕能動義手の紹介」 日本義肢装具学会誌 29(4) 266-269 (2013)

I.A.Kapandji 著・荻島/嶋田 訳.「カパンディ 関節の生理学 I 上肢」 医歯薬出版株式会社(1986)

中村隆一・齋藤宏・長崎浩 「基礎運動学 第6版 補訂」 医歯薬出版株式会社(2012)

澤村誠志 「切断と義肢」 医歯薬出版株式会社(2007)

日本義肢装具学会 監・澤村誠志 編 「義肢学 第2版」 医歯薬出版株式会社(2010)

池島弥生・上田真路・吉川章 「前腕回内外によるフックの開閉動作の一考察」 (北海道ハイテクノロジー専門学校義肢装具士学科第1期生)

市村尚毅・斉木拓磨・高橋友良・松枝悠 「前腕回内外によるフックの開閉動

作の一考察（継続研究）」（北海道ハイテクノロジー専門学校義肢装具士学科第3期生）

吉崎浩太・早川浩・鈴木克鷹・木村勇太 「前腕能動義手の手先具開閉機構の開発」（北海道ハイテクノロジー専門学校義肢装具士学科第6期生）