

把持の多様性と高い把持力を実現する

指を跨ぐワイヤ干渉駆動系を用いた五指型筋電義手の開発

Development of Five-finger Myoelectric Hand using Parallel Inference Driven Mechanism
which Realizes High Grip Force and Multiplicity of Grip Motion

○ 關達也 加藤龍 横井浩史 (電気通信大学)

Tatsuya SEKI, Ryu KATO and Hiroshi YOKOI, University of Electro-Communications

Abstract: Requirements of robot hands for five-finger myoelectric hands for use in daily life are as follows: 1) light weight and human size; 2) ability of grasping objects with various postures and high grip force. The compatibility of these requirements is a trade-off problem; we have not yet any ideal robot hands for five-finger myoelectric hands which satisfy both requirements enough. On the other hand, we have proposed the parallel inference driven mechanism that improves a grip force getting neither larger nor heavier by using redundant DoF during pinching motion, and confirmed availability with a two-finger test model. In this paper, we apply the mechanism to an actual five-finger myoelectric hand, and confirmed that it can make 7 kinds of hand motions which are necessary for activities of daily living (ADL). Moreover, a 40 percent improvement of grip force is achieved by three-finger and it enables pinch over 1kg objects.

Key Words: Multi-DoF Myoelectric Hand, Interference Driven Mechanism, Tendon-driven Robot Hand,

1. 諸言

上肢欠損による運動機能の損失を補うための義手が現在種々開発されている。特に筋電義手は、断端部の筋活動による筋電位を制御信号とすることで随意制御できる電動義手であり、従来の能動義手に比べて多種の運動機能を再建できるものとして開発が進められている。ここで、日常生活で支障なく使用できる筋電義手を実現するには次の要求を満たす必要がある。まず、欠損部と同程度の大きさおよび重量であり、次に日常生活動作が可能なる多自由度および把持力を持つことである。しかし、これらの要求は一般にトレードオフの関係にあり、大きさと重量を制限した場合、自由度と把持力の両立は極めて難しく、大きさおよび重量をとともに満たす種々のロボットハンド(1-6)のうち、自由度と把持力をとともに満たすものはまだ存在しない(Fig.1)。

我々は自由度と把持力の両立をめざし、ワイヤ腱駆動を用いた五指型多自由度ロボットハンド(6)の開発を行ってきた。これは5指がそれぞれ独立した自由度を持ち、かつ干渉駆動機構により大型化することなく、力が要求される関節の駆動力を高めている。しかしながら、把持力は55Nが限界であり、改良が必要である。また、指ごとに独立した駆動機構なので、精密把握のような一部の指が把握動作に寄与しない把握姿勢では自由度が冗長である。これはその指を駆動するアクチュエータの駆動力は把持力に寄与しておらず、さらなる把持力向上が必要なにもかかわらず非効率であった。これを解決するものとして、さらに我々は

パラレル式干渉駆動を提案した(7)。これは自由度の一部を制限することで、把握動作に寄与しない指を駆動するアクチュエータの牽引力を、動作に寄与する指に配分し、大型化や重量化することなく把持力向上を図るものである。既に2指型ロボットハンドにおいて把持力の向上を確認しているが、適用し筋電義手に応用した場合の要求される自由度の確保や把持力に関しては未検証であった。

以上の背景から、本研究ではまず、パラレル式干渉駆動構造を5指型多自由度ロボットハンドに実装する。さらに提案機構の有効性を検証するため、日常生活動作(ADL)に必要な動作姿勢への遷移と、大きな把持力が要求される握力把握・精密把握の2動作の評価を行う。

2. 高把持力と多自由度の両立を目指した筋電義手の開発

ADLを行うには、物体を握る Power grip, 物体を掴まむ Precision grip, 鍵などを持つ Lateral pinch, 靴の取手などを持つ Hook grip, ペンなどを持つ Tripod grip, 指さし動作の Finger-point, コミュニケーションツールの Gesturing の動作が必要となる(8)。これらの動作が行える義手を実現するには、各々の指に独立した運動自由度と物体を把持可能な把持力を両立した多自由度ロボットハンドが必要となる。

2-1 干渉駆動を用いた筋電義手の開発

我々が提案してきたワイヤ腱駆動による干渉駆動を用いたロボットハンド(6)は、指の関節を複数のアクチュエータの合力により駆動させることで、力を要求されるMP関節の駆動力を向上させている(Fig.2)。また、ワイヤで動力を伝達するので、駆動部と動力部を分離してロボットハンドの手先重量を軽量化しており、装着者への負担を軽減している。以上のような機構により、13の運動自由度を持ちながらも、筋電義手システム全体で人の前腕部とほぼ同程度の重量を実現している。現在実現されている最大把持力は約55Nである。これは、500ml ペットボトル飲料程度は問題なく把持可能な程度には大きい。しかし、成人の平均的な握力と比べると低く、例えば大きな靴のような物体の把持はできない。日常生活で支障なく利用できる筋電義手を実現するには、ロボットハンドの把持力向上が必須である。

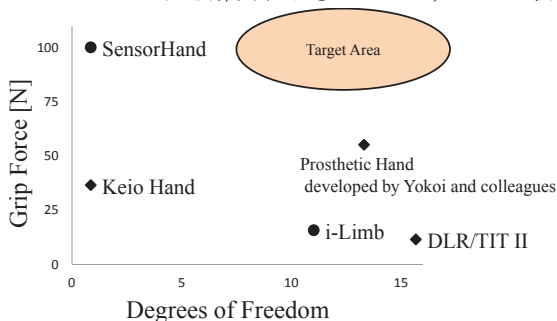


Fig.1 Degrees of freedom and grip force.

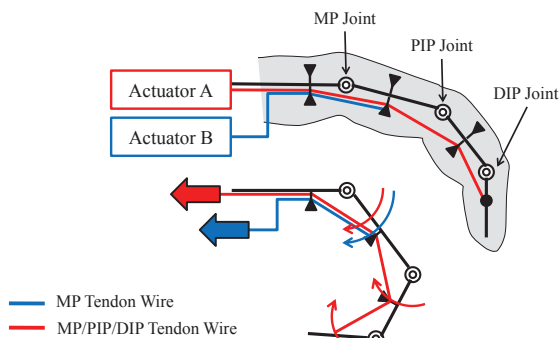


Fig.2 Finger mechanism using interference drive link. (Only flexion tendon wires)

2-2 冗長な自由度を生かす平行式干渉駆動の提案

ロボットハンドの把持力向上は、一般的にはアクチュエータの高出力化が必要となる。しかし、アクチュエータの高出力化は大幅な大型化および重量化を招くため、義手に適用することはできない。一方、多自由度を持つロボットハンドは関節あるいは指ごとに独立したアクチュエータを持つ。したがって Precision grip や Tripod grip などの一部の指のみを使う動作では、動作に寄与しない指を駆動するアクチュエータの牽引力が損失となる。この冗長なアクチュエータの駆動力を動作に使う指に配分して、動作に寄与する力を増加させることでアクチュエータの高出力化を行わずとも、把持力が向上すると考えられる(Fig.3)。

この考えに基づき、我々は既にワイヤ腱駆動を用いたロボットハンドのための平行式干渉駆動を提案している(Fig.4)(7)。従来機構では牽引力を伝達する Tendon Wire は独立してアクチュエータに接続されていた。一方で、平行式干渉駆動ではアクチュエータと関節の間に、隣り合う指の Tendon Wire を連結する Parallel Link Wire を新たに設け、牽引力の配分を行う機構である。各々の指の独立性は一部制限されるが、上肢欠損を代替する義手においては問題がない。ヒトの手では総指伸筋から延びる指背腱膜において腱が隣の指の腱と結束しており、指ごとに完全に独立した運動自由度を持っていない。したがって、指や関節の連動と非連動とを動作に応じて適切に切り替えることができれば機能が大きく損なわれることはない。また、この機構は隣り合う指との連結にギヤなどの機械的締結ではなく、ワイヤを用いている。ワイヤで2点間を連結すると、ワイヤに張力がかかるときのみ2点間で牽引力が伝達される。したがって、隣り合う指同士を連結している Parallel Link Wire の両端の結束点の距離が、実際の Parallel Link Wire の長さよりも短いときでは、Parallel Link Wire は弛み、牽引力は伝達されないため、各指は独立な自由度を持つ。一方で指姿勢の変化により両端の距離が Parallel Link Wire の長さと同じときにだけ駆動力を配分する。すなわち Parallel Link Wire の長さを調整することで、独立して動かすことのできる稼働範囲を調整できる。ADLに必要な自由度を実現しながらも、動作における冗長な自由度を利用して把持力向上を図ることで、義手としての機能を大きく損なうことなく、把持力の向上が実現できるのである。

3. 5 指型ロボットハンドへの実装

前節で述べた考えに基づき、平行式干渉駆動を適用したロボットハンドを制作した。指構造は Fig.2 に示すワイヤ牽引による干渉駆動機構を用いており、MP 関節のみを駆動させる MP Tendon Wire と 3 関節全てを駆動させる MP/DIP/PIP Tendon Wire の 2 種類の Tendon Wire をそれぞれ

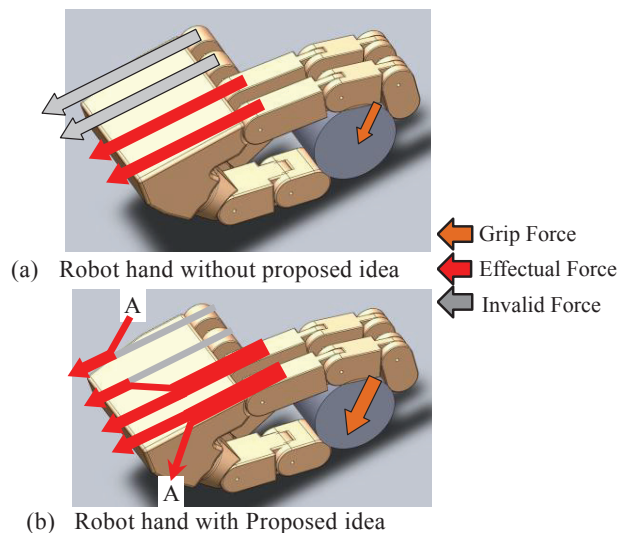


Fig.3 Taking tendon driving robot hand, outline of driving force on pinching with thumb, 2nd and 3rd fingers.

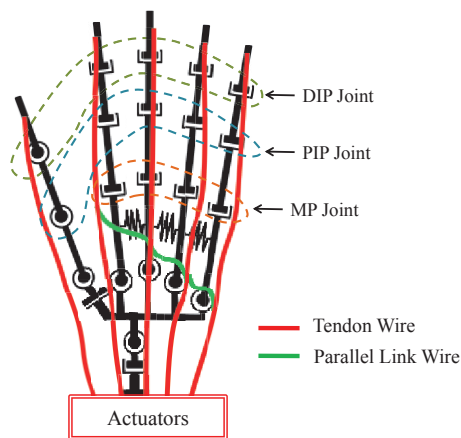


Fig.4 Outline of parallel inference driven mechanism.

伸展側、屈曲側に設けた。ロボットハンドを動かす Tendon Wire は、指の関節とアクチュエータに接続されており、Spring Tube により保護されている。Spring Tube は自由に曲げることができアクチュエータの自由な位置設定を可能としながらも、座屈しないのでアクチュエータとロボットハンドの距離を保ち、牽引力を各関節に伝達することができる。また、使用したアクチュエータを Fig.5 に示す。Servomotor に取り付けた Servo Horn の先端に Tendon Wire が接続されており、Servomotor が回転することで Tendon Wire を牽引する。モーメントアーム長は Servomotor の回転角度により変化し、最大で 220N の牽引力を持つ。

Fig.6 に 5 指型ロボットハンド実装した平行ワイヤ式干渉駆動の概略図を示す。ロボットハンドとアクチュエータの間に Parallel Link Unit(以降では単に Unit とする)を設けた。指は Tendon Wire の牽引により屈曲・伸展するため、後述する Parallel Link Wire の結束部が完全伸展・完全屈曲に必要な変位量だけ移動するため、Unit 内で Tendon Wire を露出させる必要があり、箱状としている。

Unit は内部の 1st layer(Fig.6 (a))と外部の 2nd layer(Fig.6(b)および(c))の 2 層構造となっている。1st layer は Unit 内部で平行化を実装しており、示指、中指、薬指、小指それぞれを屈曲させる Tendon Wire が並んでいる。その途中で Parallel Link Wire が結束してあり、隣り合う Tendon Wire と繋がっている。隣り合う指の姿勢差が存在すると Tendon Wire に変位差が生じる。この変位差が Parallel Link Wire の長さを超えると隣り合う指へと牽引力を配分

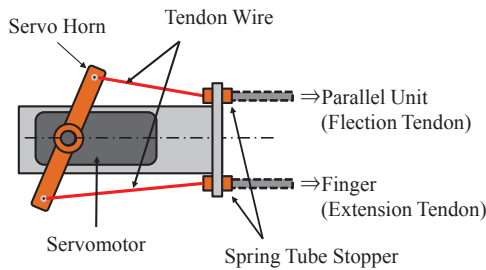


Fig.5 Outline of actuator for robot hand

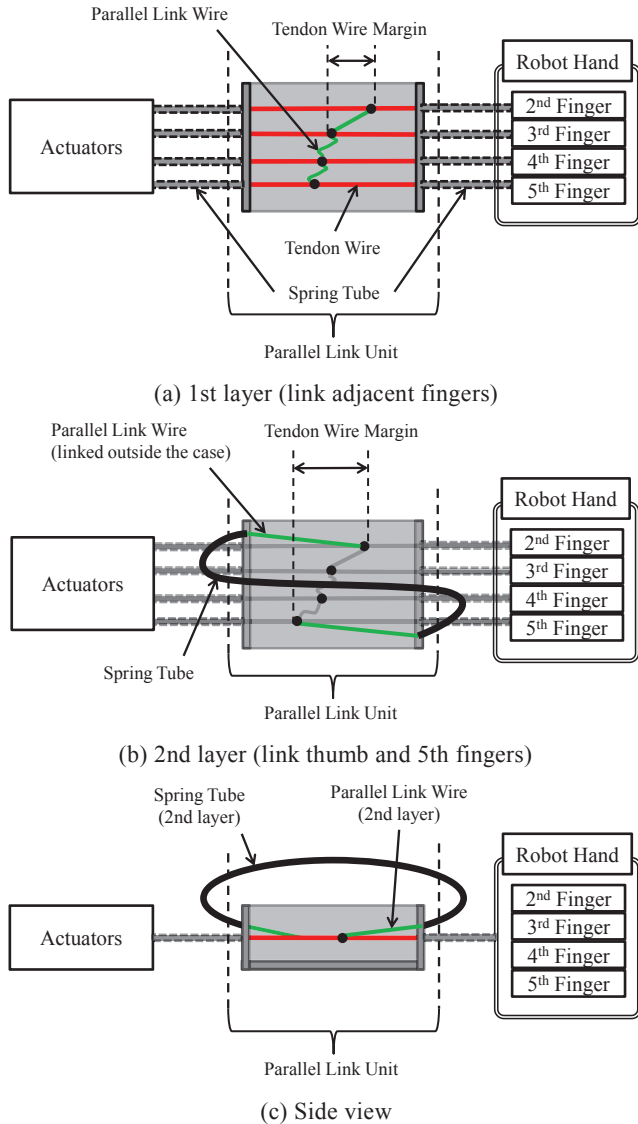


Fig.6 Outline of parallel wire mechanism

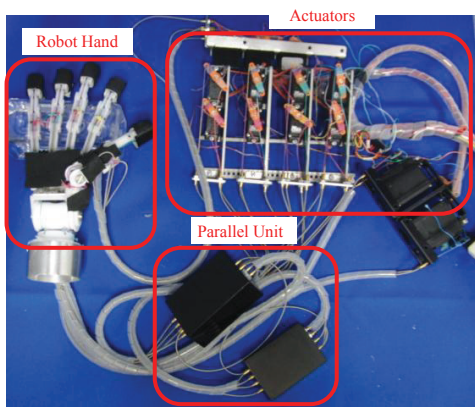


Fig.7 Appearance of new robot hand

Table 1 Grip object

| No. | Weight (g) | Height (mm) | Width (mm) | Depth (mm) |
|-----|------------|-------------|------------|------------|
| (a) | 150 | 50 | 45 | 26 |
| (b) | 200 | 50 | 60 | 26 |
| (c) | 250 | 50 | 75 | 26 |
| (d) | 300 | 100 | 45 | 26 |
| (e) | 1200 | 200 | 90 | 26 |

する. 次に 2nd layer では, Unit 外部を經由して示指と小指の Tendon Wire を接続する Parallel Link Wire を実装している. これはヒトの手の構造とは異なるが, 小指を用いずに薬指を用いる動作は ADL にはほとんど現れないので, 小指のアクチュエータの牽引力は薬指のみならず示指にも配分することで効率化が見込めるからである.

この 2 層構造の Unit により, 動作に寄与しない冗長な指が, 動作に寄与する指よりも大きく屈曲することで牽引力を配分し, 動作に寄与する指の駆動力を増加させる. なお, この Unit を, 指の MP 関節のみを屈曲させる MP Tendon Wire と, 3 関節すべてを屈曲させる MP/PIP/DIP Tendon Wire それぞれに実装した. また, Parallel Link Wire が牽引力を伝達するときの Tendon Wire の変位差(Tendon Wire Margin)は, つまみ動作で把持する物体の大きさを 50mm までと仮定した際, ロボットハンドの寸法をもとに行ったシミュレーションにより配分が有効になる変位差 (MP Tendon Wire : 5mm, MP/PIP/DIP Tendon Wire : 11mm)とした.

作成したロボットハンドの外観を Fig.7 に示す. Fig.7 下部に示す黒いケースが Parallel Link Unit であり, メンテナンス性を考慮し大きくなっているが, 内部は余剰スペースがほとんどで小型化は容易である. また, ロボットハンドの重量増は 100g 程度で大部分がケース重量である. これも含めたロボットハンドの全重量は約 1.3kg である.

4. 評価実験

前述のとおり, パラレル式干渉駆動を適用すると Parallel Link Wire の長さに応じて手の指姿勢に影響が出ることから, ADL に必要な動作の最終姿勢を実行できない可能性がある. そこで, ADL で必要となる 7 種の動作の最終姿勢を実現できるかを確認した. また, 高い把持力が必要となる握力把握と精密把握の 2 動作を評価した.

4-1 握力把握での把持力

開発したロボットハンドの最大把持力を確認するため, 最も力を出すことのできる姿勢である, 握力把握を行ったときの把持力を測定した. 直径 65 mm の円柱部材を握力把握させ, この把持物体を牽引し, 把持形態を維持できる最大荷重を計測した. 把持形態は握力把握と母指・示指・中指の 3 指で握力把握と同じ指姿勢での把持 2 種を計測し, 後者ではパラレル式干渉駆動の有無による比較した.

4-2 筋電義手への適用

さらに筋電義手へのパラレル式干渉駆動の有効性検証のため, 把持可能な最大重量と把持動作への影響を調べた. 上肢切断の被験者(30 代男性 1 名)の協力のもと, テーブル上の物体を把持し, 40cm 離れた場所に移動させる Pick and Place タスクを行った. 筋電位からの動作意図推定は加藤ら(6)の識別法を用い, 試行ごとに被験者の運動意図を安定して識別できることを確認しながら行った. また, 途中で落下した場合は全て失敗とし, 安定して移動できた場合のみを成功とした. 把持形態はパラレル式干渉駆動により差が

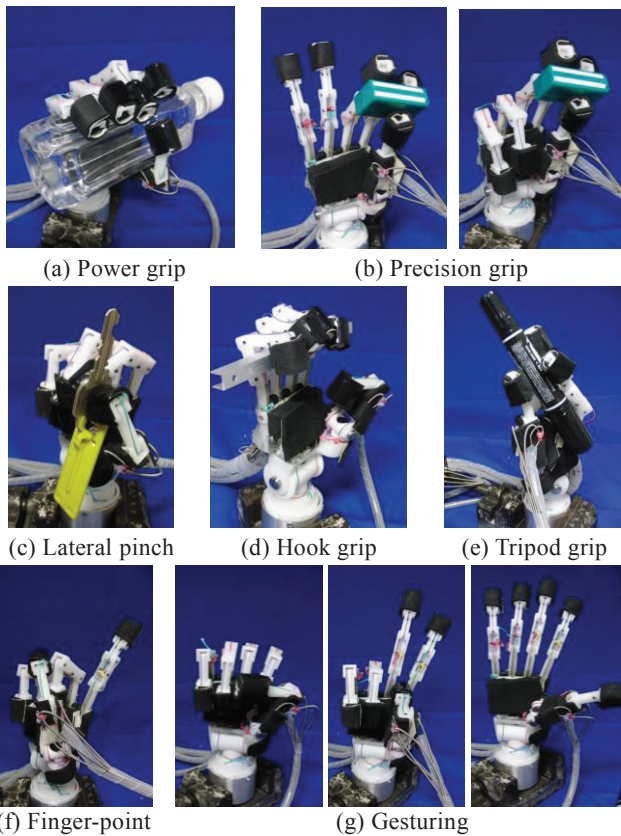


Fig.8 Hand motion of robot hand

Table 2 Grip force

| Grip Posture (Power Grip) | Grip Force (N) |
|------------------------------------|----------------|
| 5 fingers | 58.0 |
| 3 fingers | 31.7 |
| 3 fingers using proposed mechanism | 44.3 |

Table 3 Result of Pick and Place task

| No. | Conventional robot hand | | Robot hand using proposed mechanism | |
|-----|-------------------------|------|-------------------------------------|------|
| | Success | Miss | Success | Miss |
| (a) | 13 | 0 | 15 | 0 |
| (b) | 12 | 0 | 15 | 0 |
| (c) | 7 | 1 | 14 | 0 |
| (d) | 2 | 6 | 15 | 0 |
| (e) | - | - | 14 | 1 |

生じる、一部の指のみを用いる動作の例として、母指・示指・中指の3指による精密把握とし、30秒間の成功数を計数した。把持物体の形状パラメータをTable 1に示す。なお、把持物体を把持する部分は26mmの部分であり、重量が変化しても把持形態は一定である。

5. 実験結果・考察

本稿で開発したロボットハンドのADLに必要な7種の動作の最終姿勢をFig.8に示す。ジェスチャについては様々考えられるが、典型的な例としてじゃんけんの3形態を採用した。最終姿勢の全てにおいてパラレル式干渉駆動による制約の影響はない。なお、精密把握ではFig.8(b)で示すように、動作に寄与しない薬指と小指が伸展した状態(左)と屈曲した状態(右)の両方が考えられる。パラレル式干渉駆動により、伸展状態では動作に寄与する指としない指とが干渉して十分な把持力が発揮できないが、屈曲状態な

らば冗長なアクチュエータの駆動力が伝達されて高い把持力を発揮できる。すなわち、精密把握では薬指と小指を屈曲すればよい。また、指さしやじゃんけんの形態でも同様の理由により把持力が低下するが、これらは把持力を要求されない動作である。以上のことから、パラレル式干渉駆動による制約はADLを行うには支障がない。

5-1 各把持形態での把持力

把持力の計測結果をTable 2に示す。3指把握ではパラレル式干渉駆動により44.3Nの把持力が発揮できる。これはパラレル式干渉駆動を用いない場合と比べて約40%増加しており、提案機構の有効性が証明された。一方で5指把握と比べると約24%低く、Parallel Link Unitでの損失と考えられる。Parallel Link Wireの取り回し方法を改良することで牽引力配分の効率化が見込める。

5-2 筋電義手への適用

Pick and Placeタスクの結果をTable 3に示す。パラレル式干渉駆動を用いていない場合では250gの把持が限界だが、パラレル式干渉駆動を用いた場合では1kgを超えても安定して把持および移動させることができる。また、両者がともに把持可能な250g以下のタスクでも、成功数はパラレル式干渉駆動を用いたロボットハンドのほうが全て上回っている。これは把持可能な重量物体においても、十二分に高い把持力により安定して把持できることでタスク1回あたりの時間が短縮されていると考えられる。すなわち、高い把持力の実現により把持可能な重量の増加だけでなく、把持の安定性も向上している。

6. 結言と今後の展望

本研究では、把持動作の姿勢に応じて動作に寄与しないアクチュエータの駆動力を利用し、筋電義手の把持力を向上できるパラレル式干渉駆動を用いた5指型ロボットハンドの開発を行った。そして可能な手指の姿勢と把握タスクを評価することで、筋電義手適用の有効性を検証した。

今後の課題として、要求される運動機能と把持力に合わせたパラレル化の最適な組み合わせの決定や、Parallel Link Unitの小型化および軽量化などが挙げられる。

参考文献

- (1) Marco Controzzi, Marco Donati, and Maria Chiara Carrozza, "Bio-Inspired Mechanical Design of a Tendon-Driven Dexterous Prosthetic Hand," Proc. of 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS Buenos Aires, Argentina, Aug. 31-Sep. 4, 2010.
- (2) Ottobock Product Webpage, 2011, http://www.ottobock.com/cps/rde/xchg/ob_us_en/hs.xsl/6952.html
- (3) Touch Bionics I-Limb Hand User Manual, March 2010, <http://www.touchbionics.com/docLibrary/US%20iLIMB%20user%20manual%20mar%202010.pdf>
- (4) Y. Kamikawa, T. Maeno, "Underactuated Five-Finger Prosthetic Hand Inspired by Grasping Force Distribution of Humans," 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 717-722, Nice, France, Sept 22-26, 2008.
- (5) H. Liu, K. Wu, P. Meusel, N. Seitz, G. Hirzinger, M.H. Jin, Y.W. Liu, S.W. Fan, T. Lan, Z.P. Chen, "Multisensory Five-Fingered Dexterous Hand: The DLR/HIT Hand II," proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, pp. 3692-3697, Nice, France, Sept 22-26, 2008.
- (6) 加藤龍, 横井浩史, 筋電義手使用による運動機能再建と評価, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.8, pp.102-108
- (7) 關達也, 加藤龍, 横井浩史, 五指型筋電義手のためのワイヤ干渉駆動メカニズム -多指を跨ぐ二関節筋構造の提案-, 第28回日本ロボット学会学術講演会, IJ2-7, Sep. 2010.
- (8) C. Capriani, M. Controzzi, M.C. Carrozza, "Objectives, criteria and methods for the design of the SmartHand transradial prosthesis," Robotica 2010, vol. 28 pp. 919-927, 2010.