

トルクリミット機構を有する 多指多関節ユニバーサルロボットハンドシステムの開発

Development of Multi-Fingered Universal Robot Hand System with Torque Limiter Mechanism

福井 航^{*1}(学生員), 小林 太^{*1}, 小島 史男^{*1}(正員), 中本 裕之^{*2}
前田 正^{*3}, 今村 信昭^{*4}, 笹部 和宏^{*5}, 白沢 秀則^{*6}

Wataru FUKUI (Stu. Mem.), Futoshi KOBAYASHI, Fumio KOJIMA (Mem.)
Hirioyuki NAKAMOTO, Tadashi MAEDA, Nobuaki IMAMURA
Kazuhiro SASABE, Hidenori SHIRASAWA

A multi-fingered universal robot hand has been developed in order to construct the platform of humanoid hand study. We also have developed a small and five-fingered robot hand. The robot hand is designed to protect the small driving system from a large external force. This protection mechanism is small enough to be installed in the joint driving mechanism and adaptable enough to deal with various load. This paper describes basic and unique specifications of the robot hand, and the effectiveness is confirmed by fundamental experiments.

Keywords: multi-fingered robot hand, torque limiter mechanism, multi-axis force/torque sensor.

1 はじめに

今日、各種の産業用ロボットが実用化され、様々な生産現場で利用されている。このような産業用ロボットが実用化されている現場は大量少品種生産を目的としたライン生産方式に対応したものがほとんどである。しかし、嗜好の多様化に伴って少量多品種の生産が要求され、従来のような大量少品種なライン生産方式では対応しきれなくなってきたおり、セル生産方式が普及してきている。一方で、多くの産業用ロボットはライン生産方式に合わせて開発設計されており、セル生産方式で要求される一台で複数のタスクを実行することは困難である。この理由の一つとして、人の手作業を代替できる汎用かつ多機能なロボットハンドが未だ実現されていないことが挙げられる。今後、人の手のような汎用のロボットハンドを実現することが出来れば、現在人の手に頼るしかないセル生産方式の現場など、産業ロボットを適用できる作業領域が拡大すると考えられ、その利用効率も格段に高まるものと期待される。一方、エンドエフェクタを換装する自動ハンド交換装置の開発も行われているが、交換時の時間ロス

が問題になっており、ユニバーサルハンドに注目が集まっている。

人の手を模して、人の手と同様な機能を機械的に実現しようとするロボットハンドシステムの研究開発はこれまでに数多く行われている[1-5]。しかしながら、人の手と同様な機能を有するロボットハンドシステムの実現には至っていない。この問題の解決には、種々のセンサ情報を効率的に融合して器用な制御を実現するソフトウェアのみならず、駆動機構ならびに関節角、触覚および力覚などのセンサを限られた空間的制約のもとに配置した、バランスのよい多指・多関節の多自由度リンク機構を持つハードウェアを設計することが必要となる。また、上記ハードウェアの構造は非常に繊細なものになり、過大な負荷がかかった場合にハードウェアを保護できる機構が必要となる。このような関節の保護が可能なハンドとして、関節部にクラッチ機構を内蔵した Barrett Hand[4]や関節部にバネ要素を内蔵した TWENDY-ONE ハンド[5]などが研究・開発されている。

我々はこれまで、人の指と同じ構造を持ち、触覚と力覚を備えたユニバーサルロボットハンド I を試作し、ロボットハンドの機構、感覚情報処理および運動制御について様々な研究開発を行ってきた[6-8]。しかし、関節駆動機構の保護に関しては実現できておらず、実験中も過大な負荷がかからないように注意を払う必要

連絡先： 福井 航, 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1,
神戸大学大学院工学研究科情報知能学専攻
e-mail: wataru.fukui@kojimalab.com

^{*1} 神戸大学 ^{*2} 兵庫県工業技術センター ^{*3} 株式会社
前田精密製作所 ^{*4} 広島国際大学 ^{*5} 関西電力株式会
社 ^{*6} 近畿高エネルギー加工技術研究所

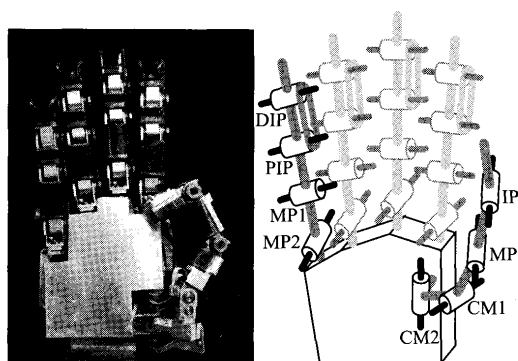


Fig. 1 Universal Robot Hand II.

があった。今回、これまでに得られた知見を基に、より小型で人の手に近いサイズの新たな研究プラットフォームとして、ユニバーサルロボットハンドⅡを開発する。また、ユニバーサルロボットハンドⅠでは実現できていなかった、過大な外力からの保護機構を内蔵する。

ユニバーサルロボットハンドⅡの指数は人の手と同様の5指とし、自由度および関節数は20関節16自由度とする。アクチュエータは一般に、指の中に内蔵するタイプとワイヤなどで外部から駆動するタイプがあるが、今後ロボットアームなどに搭載することを考慮し、ロボットハンド内で完結する内蔵型とする。また、各関節部にトルクリミット機構を内蔵する。このトルクリミット機構により、人指と同様に過剰な外力が作用すると関節駆動機構を機械的に滑らせることで、フレームで支持可能な姿勢で外力を支持する、もしくは外力を受け流すことが可能となる。これにより関節駆動機構の保護を実現する。ただし、滑りが発生した場合に実際の関節角度と認識している関節角度の間に差異が生じると考えられる。この問題は、滑りを検出した場合に関節角度の加算・減算を調整することでソフトウェア的に対応する。

2 ユニバーサルロボットハンドⅡ

2.1 基本仕様

本節では開発したユニバーサルロボットハンドⅡの寸法など、基本仕様について述べる。

ユニバーサルロボットハンドⅡの全体像と自由度の配置をFig. 1に示す。掌下端から中指上端までの高さは290 mm、手を開いたときの親指から小指までの大きさは416 mmである。本ロボットハンドは人の手より一回り大きいサイズであり、人の手作業を模倣させ

Table 1 Movable Range of each Joint.

Thumb(deg.)		Others(deg.)	
IP joint	0 - 110	DIP joint	0 - 95
MP joint	0 - 110	PIP joint	0 - 95
CM1 joint	0 - 110	MP1 joint	0 - 110
CM2 joint	0 - 110	MP2 joint	0 - 110

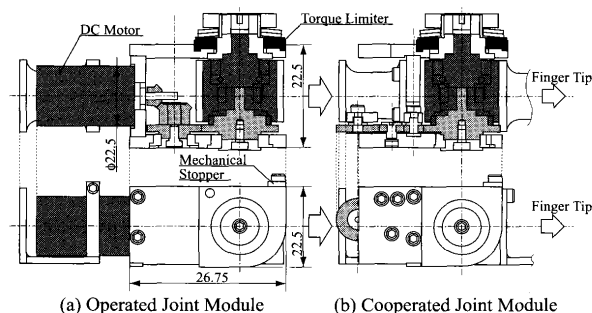


Fig. 2 Cross-section View and Side View.

るに十分なサイズである。親指は262 g、それ以外の指はそれぞれ250 gであった。台座を除いた重量は1323 gであった。自由度は、親指に4自由度(CM1関節、CM2関節、MP関節、IP関節)とそれ以外の指に3自由度(MP1関節、MP2関節、PIP関節)の合計16自由度を設定した。人のMP関節およびCM関節は球体関節であるが、球体関節を実装することは困難であるため、2自由度を直列に接続する仕様(MP1関節とMP2関節、CM1関節とCM2関節)とした。また、PIP関節とDIP関節は人の関節と同様に連動する仕様とした。これはGifu Hand[3]など、よく知られた5指ロボットハンドと同等の自由度・関節数である。

各関節の可動範囲をTable 1に示す。指を伸ばした状態を0 deg、曲げ方向を正とした。この可動範囲は人の手の可動範囲と同等、もしくは上回る仕様である[9]。

上記のような多自由度のロボットハンドは非常に複雑かつ繊細な機構になる。このようなロボットハンドの研究開発を行っていく場合、外力もしくは自身の動きで破損する恐れがあると考えられる。そこで、これら全20関節にはトルクリミット機構を内蔵する。本機構を内蔵することで、関節部に過剰なトルクが加わった場合、関節部を滑らせることでロボットハンドを保護することができる。トルクリミット機構に関しては3章で述べる。

関節部の断面図と側面図をFig. 2に示す。本ハンドではメンテナンスや設計の効率化を考え、各関節をモジュール化した。また、各自由度は同じ構造(Fig. 2(a))とし、これを直列に接続できるように設計した。

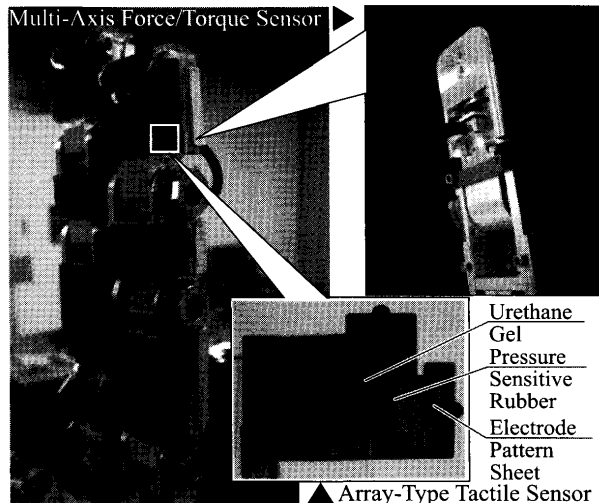


Fig. 3 Array-type Tactile Sensor and Multi-Axis Force/Torque Sensor.

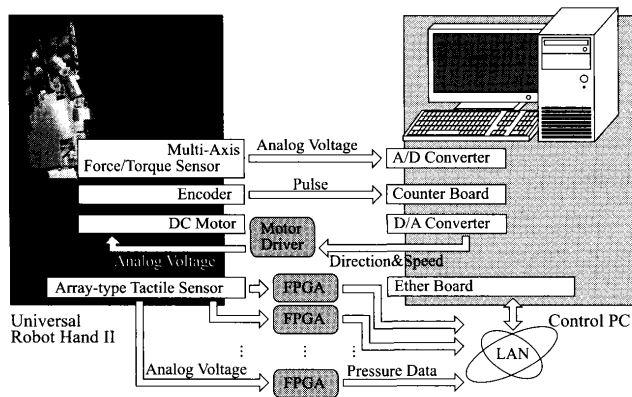


Fig. 4 Control System for Universal Robot Hand.

連動関節(Fig. 2(b))も同様に接続可能である。

センサは指腹面に分布型触覚センサを、各指先に 6 軸力覚センサを内蔵した。Fig. 3 右下に分布型触覚センサの実装の様子を示す。実装した触覚センサは電極パターンシート、感圧導電性ゴム、ウレタンゲルの三層構造をしており、接触による圧力分布を計測することができる[7]。また、Fig. 3 右上に 6 軸力覚センサ (BL AUTOTEC 社製) の実装の様子を示す。これによって指先にかかる力とトルクを計測することが出来る。

このロボットハンドを用いて、制御システムを構築した。制御システムの概要を Fig. 4 に示す[9]。

2.2 基本性能

ユニバーサルロボットハンド II の基本性能を検証するため、PD 制御を用いた実験を行った。各関節角度の目標角を 45 度としたステップ応答の結果を Fig. 5 に示す。グラフより人差し指の DIP&PIP 関節はそれ以外

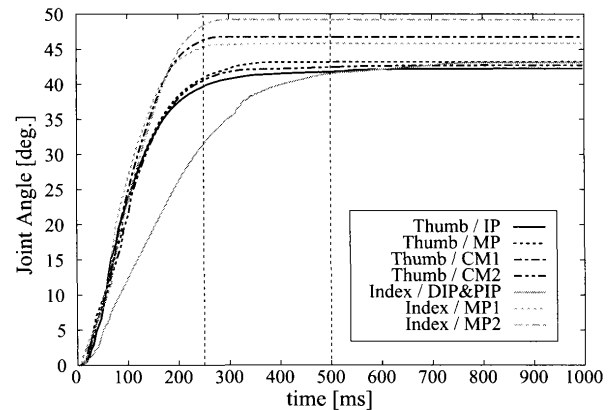


Fig. 5 Result of Step response Experiments.

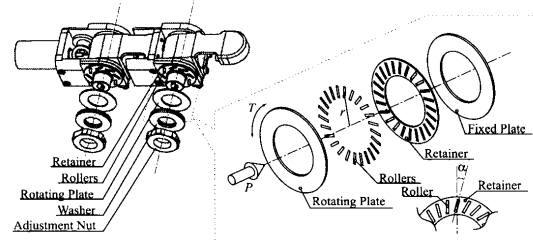


Fig. 6 Inner Structure of Finger Joint with Torque Limiter Mechanism.

の関節と比較して約半分の角速度で動作している。これは、この 2 関節が連動動作するため、負荷がほぼ二倍になっていることによる。これらの結果はユニバーサルロボットハンド I のステップ応答[6]より良好な関節速度である。従って、今後ロボットハンドに関する研究を行うに十分な性能を備えている。

3 トルクリミット機構

ユニバーサルロボットハンド II では関節機構にトルクリミット機構を内蔵した。これは設定した滑りトルクを超えると関節駆動機構が滑り始めるクラッチ機構である。

3.1 各関節への組み込み

トルクリミット機構の内部構造を Fig. 6 に示す。トルクリミット機構は固定プレートと回転プレート、両プレートに挟まれたローラおよびリテーナから構成される。ローラは図に示すように角度 α 傾けてリテーナで保持されている。滑りトルク T は調整ナットによる圧力 P とローラの取り付け半径 r 、傾斜角 α 、動摩擦係数 μ を用いて、

$$T = \mu r P \sin \alpha \quad (1)$$

と表すことが出来る[10]。この機構をユニバーサルロ

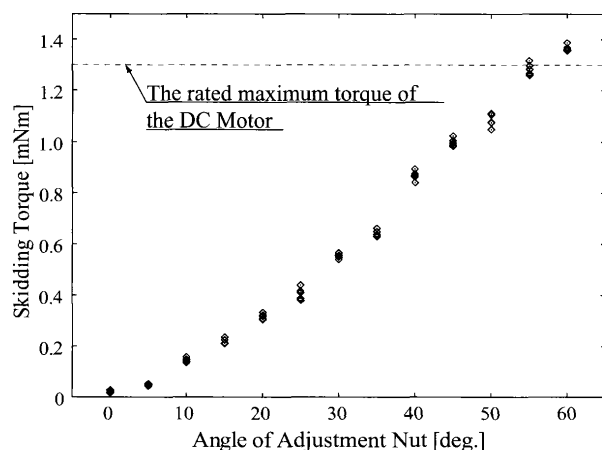
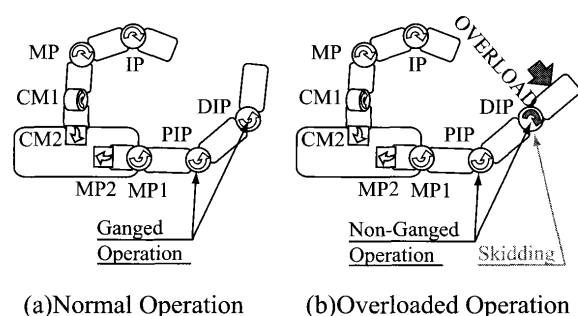


Fig. 7 Angle of Adjustment Nut vs Skidding Torque.



(a) Normal Operation (b) Overloaded Operation

Fig. 8 Overloaded Operation with Torque Limiter Mechanism.

ボットハンドⅡの被駆動連動関節である DIP 関節を含む全 20 関節に組み込んだ。

このトルクリミット機構について、調整ナットの締め角度を変更し、滑りトルクを各々 5 回ずつ計測した結果を Fig. 7 に示す。このグラフよりモータ出力全域に渡って滑りトルクは調整可能であると分かる。これにより、どんな小さな外力に対しても関節が滑るように設定することも、また滑らないよう振舞わせることも可能であることが確認できた。

3.2 効果・効用

本機構を組み込んだ指が稼動する様子を Fig. 8 に示す。ここでは PIP 関節とそれに連動する DIP 関節を例にとる。通常動作では(a)に示すように PIP 関節と DIP 関節は同一角度の伸屈運動をする。ここで末節に過剰な負荷が作用した場合を考える。このとき、外力によるトルクが設定した滑りトルクに達すると、減速器の各要素は一体となって外力を逃がす方向へ、メカニカルストップまで回転する。このようにフレームで支持できる姿勢まで自己変形することによってモータを保護するのみならず、メカ的に外力を支持することが出

来る。またメカニカルストップを外すことで外力を受け流すことも可能になる。

3.3 類似するロボットハンドとの比較

ユニバーサルロボットハンドⅡと同様に、関節にクラッチ機構を内蔵したロボットハンドとして、Barrett Hand[4]が挙げられる。Barrett Hand は外力に対しての機構的剛性は高い一方で、バックドライバビリティが無く、過剰な外力に対しては駆動機構の破損に至る場合も想定される。これに対し、ユニバーサルロボットハンドⅡは関節のトルク伝達機構そのものをトルクリミット機構で支持しており、対象物に対する作用力はモータのソフトウェア制御で行う必要があるが、過剰な外力が作用した際にはトルクリミットでリリースして関節駆動機構を保護することができる。また、過剰な接触力を対象物へ加えようとするこのトルクリミット機構を介してトルクをリリースすることができるので、一定の接触力を保持しつつ関節駆動機構ならびに対象物を保護することもできる。また、Fig. 8 に示した自己変形による外力保持も Barrett Hand にはない特徴となっている。

また、外力に対する柔軟性を持つロボットハンドとして、菅野らが開発した TWENDY-ONE ハンド[5]が挙げられる。TWENDY-ONE ハンドは関節部にゴムメタル製トーションバーとロータリディスクダンパを内蔵することで、小型・軽量の粘弾性関節機構を実現している。しかし、この機構は弾性調節機能を含んでいないため、位置決め精度を向上させようとする、アクチュエータサーボシステムによる制振制御によって低剛性な状態のまま振動を抑制する必要がある[11]。これに対し、ユニバーサルロボットハンドⅡに内蔵したトルクリミット機構は、外力によるトルクが設定した滑りトルクを超えるまでは弾性の無い関節機構として振る舞うことが出来るため、細やかな制御を施すことなく高い位置決め精度を実現することが期待できる。

3.4 関節角度の補正

駆動機構を保護したり、柔軟な把持を行ったりといった利点が多い一方で、トルクリミット機構が動作した場合、実際の関節角度と認識している関節角度に誤差が生じる。これは、エンコーダを内蔵したモータと関節駆動機構の出力軸の間に滑り機構があるためである。これを解決するためには関節駆動機構の出力軸自体にエンコーダなどの関節角度を計測するセンサを設

置するのが最良であるが、小型化を狙ったロボットハンドでは、それを実現することは Fig. 2 に示した部品レイアウトから考えて難しい。そこで、今回は式(2)によりソフトウェア的に関節角度を補正する。

$$\theta = \begin{cases} 0 & (\text{skidding,}) \\ \theta_i - \theta_{i-1} & (\text{otherwise.}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 θ は関節角度、 i は制御ステップである。関節が滑り、トルクリミット機構が動作しているときは、角度のカウントアップ（ダウン）を停止し、それ以外の場合は通常通りカウントアップ（ダウン）を行う。今回、滑りの判定は以下のようにモータ出力と指先力を用いた。

$$\begin{aligned} f &> F_{\text{threshold}} \\ t &> T_{\text{threshold}} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 f , $F_{\text{threshold}}$ は指先力とその閾値、 t , $T_{\text{threshold}}$ はモータ出力とその閾値である。これら閾値は事前に測定して設定しておくものとする。指先力が一定値 $F_{\text{threshold}}$ 以上、つまり指先に物体が接触しており、かつ、調整ナットの押し付け量に応じた $T_{\text{threshold}}$ を超える、つまり、トルクリミット機構を動作可能な出力であるときは関節が滑っていると判断し、その間の関節角度の加減算を停止する。ただし、本手法では複数の関節が同時に滑った場合、それを検出することはできない。意図的に滑らせる場合は滑りトルクの設定を調整し、同時に滑らないように設定しておく必要がある。それでもなお複数の関節が同時に滑るような場合は、過大な外力が加わったときであり、その都度ストップに十分当ててからカウンタの値をリセットすれば良い。

ユニバーサルロボットハンドIIは静止物体を把持するタスクを主眼に開発を行っており、本手法では対象物体が動くことを考慮していない。対象が動いた場合、単に加減算をキャンセルするだけでは、対象物体の動きに合わせて変化する関節角度に追従することができない。対象物体が動くタスクを与える場合は、滑りトルクの設定をモータの定格トルク以上に設定し、対象物体の動きに合わせて動かないように設定すれば、過大な外力から保護しつつ動作させることができる。

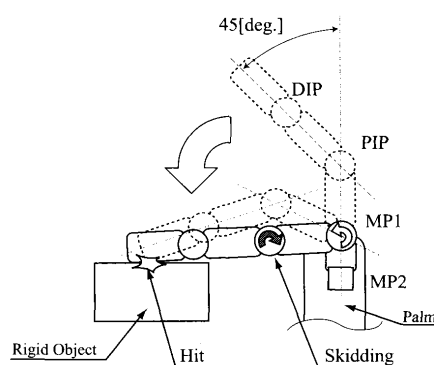


Fig. 9 Experiment about Impact Force.

4 実験

4.1 衝撃力軽減に関する実験

本節では実験によってトルクリミット機構による駆動系の保護を検証する。

Fig. 9 に示すように、MP1 関節を駆動させ指先を剛体に接触させる実験を行い、実験中の 6 軸力覚センサの値と MP1 関節の関節角度を計測した。このとき、DIP 関節と MP2 関節は駆動させず固定状態とした。また、PIP 関節は 45 度曲げた状態でトルクリミット機構が動作するように調整した。ここで、PIP 関節以外の関節のトルクリミット機構は動作させない。また、上記条件に対して、PIP 関節のトルクリミット機構が動作しないようにした条件でも同様の実験を行い、比較を行った。

実験結果を Fig. 10 に示す。破線がトルクリミット機構を動作させない場合、実線が動作させた場合の指先の力覚値の推移である。灰線はトルクリミット機構を動作させたときの MP1 関節のエンコーダ値の推移である。130 step で力覚値が大きく上昇していることから、指先が対象に接触したことが分かる。600 step で力覚値が大きく減少していることから、指先が対象から離れたことが分かる。グラフより、トルクリミット機構を動作させない場合に比べ、動作させた場合、接触時の衝撃力が低く抑えられている。その後、関節が滑っている間は指先力が低く抑えられ、330 step でストップに当たるに伴い、トルクリミット機構を動作させない場合と同じ指先力に収束している。トルクリミット機構が動作している間の指先力は最終的に収束する値以下に抑えられている。複数回同様の実験を行った結果、トルクリミ

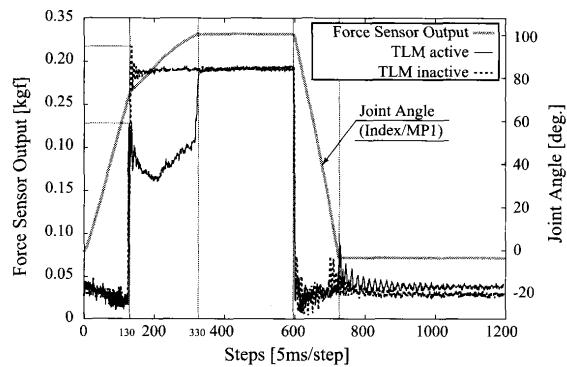


Fig. 10 Transition of Encoder contacted against Rigid Object.

ット機構を動作させなかった場合の力覚値ピークは 0.33 kgf, 動作させた場合の力覚値ピークは 0.20 kgf と, 約 40 % 軽減されることが分かった。以上より, 突発的な衝撃から指を保護することが可能である。なお, 700 step 近傍で力覚値に変化が見られるが, これは MP1 関節を伸ばしてストッパに当たった時の衝撃力である。

4.2 認識角度補正に関する実験

本節では 3.4 に示した関節角度の補正手法を実験によって確認する。

Fig. 11 に示すように, 0 deg. の位置から剛体を三回タッピングする実験を行った。なお, 制御は時間制御で行い, 実験風景を撮影した動画より静止画を切り出して実測したところ, 剛体は MP1 関節が 91 deg. の位置にあり, 指は 12.5 deg. の位置まで戻った後に再度タッピング動作を行っていた。

実験結果を Fig. 12 に示す。灰線は指先の力覚値, 破線が補正前, 実線が補正後の関節角度である。力覚値に大きな衝撃力が記録されているが, これはフレームで支持する姿勢を取った状態で物体に接触させたためトルクリミット機構による衝撃力の緩和が起らなかったからである。

補正後の関節角度について, タッピング時の角度差は一回目と二回目で 1.5 deg, 二回目と三回目で 0.5 deg. であった。指伸ばし位置の角度差は 1.5 deg. であった。複数回同様の実験を行ったが, 一回のタッピング作業 (トルクリミット機構動作) による補正誤差は最大 2 deg. であった。この誤差は累積するものの, 制御の要求精度に応じて適時ストッパに当ててから関節角度をリセットすることで十分実用に耐え

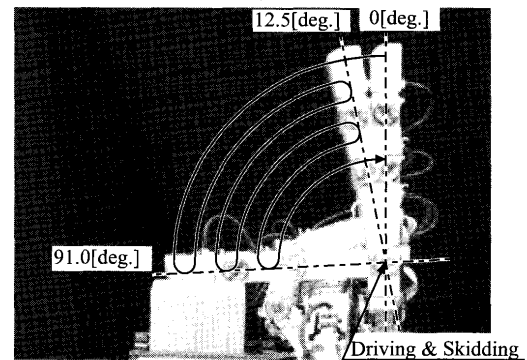


Fig. 11 Outline of Experiment about Mismatch between Joint Angle and Counted Pulse.

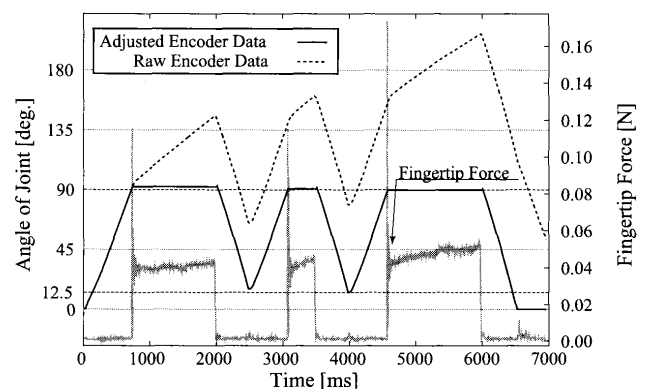


Fig. 12 Transition of Fingertip Force contacted against Rigid Object.

ると判断できる。この結果より, この補正方法は有効である。

5 おわりに

現在, 世界中で様々な多指ロボットハンドが研究開発されており, 我々もまたユニバーサルロボットハンド I を開発し, ロボットハンドの機構や感覚情報処理, 運動制御について研究を重ねてきた。しかし, ロボットハンドの機能が高度化するほど, その機構は複雑となり, 研究室実験レベルでも突発的な外力などによる変形・破壊に十分注意する必要がある。そこでユニバーサルロボットハンド II では関節機構にトルクリミット機構を内蔵することで, 設定以上のトルクが加わると関節機構が滑り, 外力による変形・破損を防ぐことを可能とした。また, 滑りが発生した場合に実際の関節角度と認識している関節角度の間に差異が生じる問題に関して, ソフトウェア的に対応可能であることを確認した。

今後は, このロボットハンドを用いて柔軟な把持制

御を実現していく。

(2010 年 10 月 18 日受付, 2011 年 4 月 22 日再受付,
2011 年 5 月 7 日再々受付)

参考文献

- [1] 吉川恒夫, 器用なメカニカルハンド, 日本ロボット学会誌, Vol. 18 No.6, pp. 763-766, 2000.
- [2] Chris S. Lovchik and Myron A. Diftler The Robonaut Hand : A Dexterous Robot Hand for Space, *Proc. of the 1999 IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 907-912, 1999.
- [3] Tetsuya Mouri, Haruhisa Kawasaki, Yutaka Nishimoto, Takaaki Aoki, Yasuhiko Ishigure and Makoto Tanahashi, Robot Hand Imitating Disabled Person for Education/Training of Rehabilitation, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 20 No. 2, 2008.
- [4] Peter K. Allen, Andrew T. Miller, Paul Y. Oh and Brian S. Leibowitz, Using Tactile and Visual Sensing with a Robotic Hand, *Proc. of the 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 677-681, 1997.
- [5] 岩田浩康, 林隆志, 塩澤裕樹, 木村謙大, 石井聡, 坂神啓介, 太田智道, 岩本国大, 菅野重樹, 手指手掌に受動柔軟性を備えた高巧緻多指ハンドの構造設計, ロボティクス・メカトロニクス講演会'08 論文集, 1A1-A01, 2008.
- [6] Hiroyuki Nakamoto, Futoshi Kobayashi, Nobuaki Imamura and Hidenori Shirasawa, Universal Robot Hand Equipped with Tactile and Joint Torque Sensors(Development and Experiments on Stiffness Control and Object Recognition), *Proc. of the 10th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, Vol. 2, pp. 347-352, 2006.
- [7] 中本裕之, 小林太, 今村信昭, 白沢秀則, 小島史男, ユニバーサルロボットハンドのための分布型圧力センサの開発, 日本機械学会論文集(C 編), 73 巻, 733 号, pp. 2561-2567, 2007.
- [8] 中本裕之, 小林太, 今村信昭, 白沢秀則, 小島史男, 連続 DP を用いたユニバーサルロボットハンドによる回転操作中物体の外周形状識別, 日本機械学会論文集(C 編), Vol. 74, No. 746, pp. 2521-2527, 2008.
- [9] Wataru Fukui, Futoshi Kobayashi, Fumio Kojima, Hiroyuki Nakamoto, Tadashi Maeda, Nobuaki Imamura, Kazuhiro Sasabe and Hidenori Shirasawa, Development of Multi-Fingered Universal Robot Hand with Torque Limiter Mechanism, *Proc. of the 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2225-2230, 2009.
- [10] Nobuaki Imamura, Yuya Nakamura, Seiji Yamaoka, Hidenori Shirasawa and Hiroyuki Nakamoto, Development of an Articulated Mechanical Hand with Enveloping Grasp Capability, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 19, No. 3, 2007.
- [11] 菅岩泰亮, 岩田浩康, 森裕貴, 菅野重樹, 小型・軽量な柔軟関節マニピュレータのための粘弾性機構設計, ロボティクス・メカトロニクス講演会'08 論文集, 2A1-G02, 2008.