解 説

器用な多指ロボットハンドの開発

Development of a Dexterous Multi-fingered Robot Hand

金 子 真* *広島大学工学部
Makoto Kaneko* *Hiroshima University

1. 華麗な動きを実現する必要条件

これまでに世界の主だった多指ロボットハンド（以下、ハンドと略記）を実際に見たり触れたりして、一つの経験則を学んだ。電源を入れて動かさなくても、ハンドを触ってみればある程度の動きが予想できる。華麗な動きをするハンドは、例外なくバックラッシュが小さい。バックラッシュとは、簡単に言ってしまうと、モータ出力軸と負荷軸の間に介在する機械的遊び（またはガタ）の総和である。バックラッシュが大きいシステムでは、アクチュエータの回転方向が逆転してもその動作がすぐに負荷軸に反映されない。したがって負荷軸側に設置された位置（または力）センサは、アクチュエータの動きを遅れて察知することになる。このようにバックラッシュは、制御ループ系の要素として見た場合、遅れ要素に相当する。遅れ要素はサーボ系にとって大敵である。バックラッシュを含んだ制御ループ系のゲインを大きくすると、系がたちまち不安定になるのは、位相が簡単に180度遅れてしまうためである。大きなバックラッシュを有する多自由度システムを制御技術でカバーして華麗な動きを実現したという例は、残念ながら聞いたことがない。ハンドに限らずバックラッシュレスは華麗な動きを実現するロボットを開発する上での必要条件と言っても過言ではない。

本解説では、科研重点領域研究「知能ロボット」において開発した3本指ハンドの設計思想について、バックラッシュ対策を中心にまとめてみたい。

2. Scale-Dependent Grasp を意識したハンド仕様

重点領域研究がスタートする半年前、ハンドに関する何か新しい研究をしてみたいということで、日々思いを巡らせた。そんな問題意識を持ちながら、テーブル上に置かれたいろいろな対象物を把握していたら、おもしろいことに気付いた。ヒトは幾何学的形状が同じであっても、対象物の大きさに応じて把握戦略を自然に切り替えている。言われてみれば、ごく当り前のことかも知れないが、少なくともこれまでのハンドの研究にはこのスケール効

果を意識した研究はなかった。そこでスケール依存型把握（Scale-Dependent Grasp）というキーワードを研究の中心に据える方向で研究計画を立て、スケールに応じた把握動作が実際に検証できるようなハンドの仕様固めをはじめた。ハンドはユニット化を大前提とした。ユニット化すると、必要に応じて、指本数、指配置が自由に変えられるし、制作コストも抑えることができる。指先レベルで広い動作空間を確保し、かつ対象物との干渉が避けられるように、指には平面3自由度を割り振ることにした。一方で、取り扱う対象物を柱状物体に限定することにより、指の横振りの自由度は基本バージョンからは割愛した。横振りの自由度は必要に応じてユニットを結合する際に付加することができる。

もう一つ重視した点は動作スピードである。ヒトの手の動きと同程度とは言わないまでも、テーブル上に置かれた円柱を2~3秒程度で包み込めることを目指した。目標としたハンドを感性工学的に表現すれば、“気持ちよいテンポで動くコンパクトサイズのハンド”といったところだろうか。以上の点を考慮して基本仕様をまとめてみた。

仕様1：各指は完全ユニット化。

仕様2：各指3関節、大きさはヒトの人指し指程度。

仕様3：各関節速度1 [rev/sec] 以上。

仕様4：各関節の角度とトルクがセンシング可能。

3. 設計上のポイント

3.1 ワイヤ駆動方式

通常、多関節ロボットの多くは、ロボットの関節にアクチュエータが直接埋め込まれるため、アクチュエータの減速器内に含まれるバックラッシュを小さくしておけばバックラッシュ対策としては十分である。ところが、小型でかつパワフルなハンドを設計しようとなると、アクチュエータは必然的に大きくなる。そのため、通常、アクチュエータは手首部や前腕部に固定され、そこからワイヤ（ベルト）や歯車列といった動力伝達系を介して各関節に動力が伝達される。この場合、アクチュエータの減速器内に含まれるバックラッシュのほかに、動力伝達系に介在するバックラッシュが足し合わされて系全体のバックラッシュが現われる。前者はハーモニックギア等を使用することで、無視できる程度に抑えられるものの、後者については設計手

原稿受付 1998年3月27日

キーワード：Multi-finger, Robot Hand, Hand Design, Grasping, Enveloping Grasp

*〒739-8527 広島市鏡山1-4-1

*Higashi-Hiroshima-shi, Hiroshima

図1 ワイヤ駆動方式

腕が要求される。歯車列を介して、動力を各関節に伝達する方法は、減速器を兼用できるという利点はあるものの、歯車ごとのバックラッシュが足し合わされ、伝達系全体のバックラッシュは無視できなくなることが予想される。ここではバックラッシュ対策を重視し、歯車列方式を候補からはずし、ワイヤ駆動方式に絞った。

3.2 蛇管の排除

動力伝達系をワイヤ駆動方式に限定したとしても、二通りの伝達方法が考えられる。一つは図1(a)のようにワイヤと蛇管を組み合わせる伝達系を構成する方法[1]で、もう一つは図1(b)のようにワイヤとプーリによって伝達系を構成する方法である。蛇管を使用する方法は途中経路が自由に選択できるという利点がある反面、張力に比例した等価バックラッシュが現われることが知られている[2]。一方、ワイヤ・プーリ方式は伝達経路の自由度は制限されてしまうものの、モータ出力軸から関節までのバックラッシュは極力抑えられる可能性を秘めている。ここではバックラッシュ除去という点を重視し、ワイヤ・プーリ駆動方式を動力伝達方式として採用することにした。

3.3 アクチュエータの選定と配置

正直なところモータの選定には迷いがあつた。小型モータではパワーがでない。つまり気持ちよいテンポで動くハンドが実現できない。かといって大パワーのモータではユニット全体が大きくなってしまふ。迷った末、アクチュエータとしては、ハーモニックドライブシステムズ社製のミニサーボアクチュエータ(Hi-T-Drive, RH-5)に決めた。このアクチュエータは小型DCサーボモータとハーモニック減速器(1:80)によって構成されている。このモータにひかれた理由は、小型であるということのほかにドライバがPWM方式ではなく、リニアアンプ方式を使用していたからである。一般にPWM方式はスイッチング回路を内蔵しているためノイズ源となりやすい。特にトルクセンサ系へのスパイク状のノイズに筆者も何度か悩まされた。リニアアンプ方式の採用はそのようなノイズ問題から完全に解放してくれる。ただ、このアクチュエータは非力(1.7[W])である。この点は指側の軽量化追求で補うことにした。

図2 ハンド詳細図

アクチュエータ出力軸の駆動プーリに固定されたワイヤは小さな従動プーリによって図2のように運動方向が90度曲げられるように構成されている。これはユニットをコンパクトに構成するために考案されたワイヤの取り回し方法で、こうしないとアクチュエータの長手方向が指の運動平面に直交し、全体が見苦しくなってしまう。

3.4 ワイヤ長は短く!

ワイヤを伝達要素として考えた場合、一般に伝達系の剛性が低下する。剛性が低下すると、プーリ部に存在する摩擦との組み合わせによって、蛇管を使った場合と同様に等価的なバックラッシュが発生してしまう。プーリ内にベアリングを使えば、回転摩擦は無視できると思われるかもしれないが、それは間違いである。ワイヤに大きな張力が作用した状態(ベアリングに大きな横加重が作用した状態)では、たとえベアリングを使用したとしても、意外に大きな回転摩擦が発生する。この等価的なバックラッシュを抑えるためには、可能な限り剛性の高いワイヤを使い、かつワイヤ長を極力短くするしかない。ワイヤ径を太くすると一般に剛性が上がる。ところが、各ワイヤには推奨最小回転半径という制限があり、ワイヤ径が大きくなるほどプーリの推奨最小回転半径も大きくなる。このため小型の指ユニットを想定した場合、使用するプーリ径から逆に最大ワイヤ径は自動的に決まってしまう。したがって、ワイヤ長を短くする工夫、これが唯一残された設計上の自由度となる。設計した指ユニットのワイヤ長は最大で18[cm]以内に抑えることができた。

3.5 張力調整機構

ワイヤ駆動系がうまく動作するためには系に適当な張力を付与する必要がある。この張力をアクチュエータ自身で発生させる方法[3][4]もあるが、これらは能動自由度よりも多くのアクチュエータ数を必要とする。ここでは、アクチュエータ数を減らす観点から、一つの関節に1個のアクチュエータが対応する方法を採用した。この場合、注意しなければならないことは、いくら初期張力をうまく調整してもワイヤは長時間使っていると必ず緩む。ワイヤが緩むごとにいちいちワイヤを締め直すのは労力が大変である。

通常、ワイヤ駆動系には張力調整機構が備わっている。本ハンドではアクチュエータ自身がボールねじでスライドし、ドライバ1本で張力が調整できるような構造に設計されている。

3.6 センサ系

ハンドには3種類のセンサが配備されている。指姿勢を測るため各モータにはインクリメンタルタイプのエンコーダが取り付けられている。エンコーダの原点合わせは、指を限界まで折り曲げたときにオンになるマイクロスイッチで行われる。また、各関節には図3のような張力差動型トルクセンサ[5]が取り付けられ、各関節回りに発生するトルクが計測できるようになっている。センサはT字型構造で柱の部分にひずみゲージが貼られている。ワイヤ張力のセンサ軸方向成分はセンサ出力には関与せず、センサ軸と直交する方向の張力成分の差がセンサに曲げモーメントを発生し、それがひずみゲージで測定される。このセンサは関節トルクとワイヤ両端にかかる張力差が比例することを

図3 トルクセンサ

図4 把握実験例

利用したもので、ワイヤ（またはタイミングベルト）駆動用としては最もシンプルかつ実用的なトルクセンサと云ってよい。

4. 把握実験例

図4は指先程度の直径を有する円柱に対する把握実験例を示したものである。この実験では2本の指で一度円柱の一方を持ち上げて対象物とテーブルの間にすき間を作り、3本目の指をすき間に入れ、さらに残りの2本も対象物の下に入れてから、一定トルク指令で対象物を包み込んでいる。この実験で使用したハンドはユニットの連結部に横振りの自由度が加えられ、全体で13自由度構成となっている。

5. あとがき

完成した指ユニットの指先を押してみても、バネ的な感覚はあってもバックラッシュが存在する感覚はまったくない。ということで、バックラッシュ除去と軽量コンパクト化を目指したハンドの設計はなんとか合格点が与えられるレベルに達したと考えている。なお、このハンドの実際の動きはIEEEのVideo Proceedings [6]に詳しく収録されている。

最後にハンドの詳細設計を担当していただいた今村信明氏（現神戸市立高専）、およびハンドの試作に御協力いただいた富士通（株）の内山隆氏、浅田和雄氏に心より感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] T. Okada: "Object-Handling System for Manual Industry," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, SMC9-2, pp.79-86, 1979.
- [2] 金子, 和田, 前川, 谷江: "ワイヤ駆動ロボットハンドの力サーボ系に関する考察(駆動系の伝達特性と力サーボ系)", 日本ロボット学会誌, vol.9, no.4, pp.437-444, 1991.
- [3] J.K. Salisbury, and J.J. Craig, "Articulated Hands (Force Control and Kinematics Issues)," Int. J. of Robotics Research, vol.1, no.1, pp.4-20, 1982.
- [4] S.C. Jacobsen et. al.: "Design of the Utah/MIT Dexterous Hand," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1520-1528, 1986.
- [5] M. Kaneko, K. Yokoi, and K. Tanie: "On a New Torque Sensor for Tendon Drive Fingers," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.6, no.4, pp.501-507, 1990.
- [6] M. Kaneko and T. Tsuji: "Realization of Enveloping Grasp," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Video Proceedings, 1997.

金子 真 (Makoto Kaneko)

1954年1月18日生。1981年東京大学工学系研究科博士課程卒業。工学博士。通産省工業技術院機械技術研究所、九州工業大学助教授を経て1994年より広島大学教授。アクティブセンシングや把握戦略の研究に興味を持つ。日本機械学会奨励賞（1993年）、日本ロボット学会論文賞（1994年）、計測自動制御学会論文賞（1996年）、フンボルト賞（1997年）を受賞。（日本ロボット学会正会員）