展 望

器用な手

Dexterous Hand

小 俣

透* *東京工業大学

Toru Omata* *Tokyo Institute of Technology

1. は じ め に

人間は手で物に触れてその特性を理解したり、物を器用に操作したり、あるいは道具を使ったり、様々な日常活動のために手を使っている。このような手をロボットとして実現したいという夢を持つ人は多く、これまでに活発にロボットハンドが研究されてきた。

しかしそう簡単には人間の手のようなロボットハンドはできない。それもそのはずで、人間の場合この小さな部分にすぐれた触覚があり、かつ指はときには体を支えられるほどのパワーを持っている。センサ、アクチュエータともに人間には到底及ばない。

それならば、人間の手の感覚器や機能に対するより深い分析が必要であるし、ロボットハンドを設計するのであれば、単なる形態的模倣ではなくより深いエンジニアリング的考察が必要である。このような流れの中から研究が進展してきたと言えるが、実用に結びつけるためには、さらに人間の手に学びつつ、センシングの向上、実現できる機能の明確化、高速で確実な動作の実現が必要である。

ここでは本特集号の解説記事を中心に、そのような項目について概観し展望を述べる。なお、この分野全般の展望は吉川氏による記事があるのでそちらを参照していただきたい[1]。

2. セ ン シ ン グ

器用な手を実現する一つの重要な要素は触覚を中心とした感覚系である。触覚センサの歴史は長く、接触による抵抗変化や静電容量変化など考えられるほとんどすべての物理量変化が接触検出の原理として使われてきた。その大部分は素子を平面状に並べるものであるが、面積をかせると配線が膨大になり、表面をソフトにするためにゴムをかぶせると感度が落ちるなどの問題点が多い。単体としての性能はよくても、実際にロボットに装着して使われることま

でが配慮されていなかった。最近になってロボットに装着することをより考慮する傾向が強くなってきた。配線を減らすこと、もともとソフトな皮膚をつくることが要求される。触覚に関する詳細は本号[2][7]に解説されている。またソフトな皮膚のための触覚については文献[4]に解説されている。

特筆すべきことは、触覚の研究が共振、振動、材料力学といった既存分野を含めた学際的な領域として進展していることである。例えば配線を減らすキーとなる考えは共振である。線を多くするのではなく、線に流す周波数を変えることにより多くの情報を伝達するのである。接触によるスイッチのOn-OffによりLC回路の共振周波数が変化することを利用して、共振周波数から接触位置を計測する先駆的なセンサが山田らにより開発された[5]。篠田らはLC回路素子を皮膚に埋め込み共振周波数が接触により変化することを用いたセンサを開発している[2]。また皮膚に空洞をつくり、共振する超音波の周波数により応力を計測するセンサを提案している[3]。

材料力学が駆使されている例としては、皮膚内部で計測された応力情報から表面に加わる力分布を逆推定できるかという根本的な問題について、Fearingにより平面かつ垂直応力の場合について解析された[6]。最近、一般化された関係が固有値解析により導かれている[3]。また人間の触覚については応力が集中するところに感覚器が配置されていると解析されている[7]。既存の分野もきちんと勉強しないと最先端のことは研究できないことを痛感する。

触覚が実用されるためにはまだ強度や磨耗等克服すべき課題も多いと思われるが、このように最近かなり進展してきたと言える。

触覚技術はほかに大きな応用が期待されている。遠くにある物をあたかも手元にある物のように触ってみたいという要求は医用応用などに多くあり、人間の指先に触覚情報を提示する方法が研究されている。これができれば大市場であろうが、現在までのところ米国の方が研究者が多いように思われる。

人間の指先力を測ることができれば、作業の理解や遠隔

原稿受付 2000年7月10日

キーワード: Hand, Dexterous Manipulation, Grasping, Tactile Sensor

*〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259

*Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa

操作に役立つ。できるだけ手の動作を邪魔せず測ることが望ましい。そのユニークな試みとして爪の血流状態から指先力を推定するネイルセンサーが考案されている [8]。

視覚の利用については対象物の位置姿勢同定があげられる。特に高速視覚システムは注目に値する [9]。もうひとつの利用方法として観察による人間の手の動作理解がある [10]。

3. 実現する機能

多指ハンドのような複雑な機構を導入するのであれば、それに期待することはそれに見合った機能が実現されることである。機能として、大別して器用に操作することと確実に把持することがある。

器用な操作には、人間の手を参考にして、すべり、転がり、持ち替えなどをを用いた様々な方式が多くの人により考えられている [11]。このうち触覚情報を用いた把持・操りに関しては前川氏より解説されている [12]。全般的に実験的検証はまだ多くないが、これは優れたセンサとハンドがないことが一因であろう。センサと関節数を含めて、何が備わればどのような器用な操作がしかも確実に実行可能になるか明確にすることが課題と思われる。

確実に把持する方法として接触を増やすことが有効であり、接触点の多いパワーグラスプあるいは包み込み把持という把持形態が研究されている。その特徴は関節トルクが一定でも外力に対抗できることである。関節トルクに影響を与えない把持力が存在するからである。これについては金子氏により解説されている [13]。

さて、残念ながらパワーグラスプでは誤解も見受けられるので、ここで簡単に触れておこう。パワーグラスプでは関節トルクを与えても把持力は一意に決まらない。これは関節トルクに影響しない内力も存在するからであり、それを選ぶことはできない。不静定性を避ける一つの方法は接触部分にコンプライアンスを導入することである。しかし把持物体まで含めてコンプライアンスの値を正確に知るとは実際には難しい。また、関節トルクに影響しない内力はコンプライアンスを導入したものでは、噛み付き力という物理的意味を持つが、剛体解析では不静定性を数学的に表現したものであり何ら物理的意味を持たない。

やや細かい話になったが、パワーグラスプの本質にかかわる問題である。いずれにしても接触を増やすことは把持のロバスト性の向上に大きく貢献する。その接触状態に至る過程や、さらには複数の物体を操作することも考えられている [13]。

4. 高速化

いくら機能が豊富になっても動作が遅くては実用にはならない。ハンドの動作自体が高速であることが強く望まれ

るが、そのようなハンドの例として Barrett ハンドがあげられる [14]。3 本指ハンドであり関節数は全部で 8 であるが、それを四つのアクチュエータにより駆動する。関節数とアクチュエータ数を抑える代わりに高速化が達成されていると言える。またパワーグラスプを想定して設計されており物体を確実に把持する。ここでも接触を増やすことが有効に使われている。

センサやそのデータ処理が高速になれば、敏しょうに状況の変化に対応したり、ロバストに外乱に対応できるようになる。高速視覚システムを用いた高速ハンドシステムの開発が行われておりその成果が期待される [9]。

別の例として、把持力がリアルタイムに修正されれば外乱に対する把持のロバスト性が向上する。最適把持力計算は多指ハンドの研究としては最も古くから研究されてきた話題であり、数え切れないほどのアルゴリズムが提案されているが、それでもリアルタイムで動作するものは少ない。Buss らにより提案されたアルゴリズムは理論は難しいが、結果は平易であり高速であることが報告されている [15]。

5. 産業応用

現在までのところ多指ハンドの産業応用は乏しい。学の人と議論するとネガティブな意見が返ってくるが、産の人は意外にそうでもないことを私見ながら感じる。多品種少量生産の自動化は避けられない課題であり、それに対応するロボットハンドが必要であろう。付け替え型ハンドでは限界であり、現状を打破する方策を模索しているように思われる。近い将来そのような報告事例が現れることが期待される。付け替え型ハンドの数を減らす問題意識は文献 [16] にも見られる。

さて、人間の手の多機能さに惹かれて、それを追求しすぎてはいないか考え直す必要はあろう。いきなり多自由度高機能ハンドではなく、従来型よりもやや機能の高い程度が望まれているのではないと思われる。吉川氏による展望記事では実例をあげて示唆しており興味深い [1]。そもそも生産性の向上が目的であるから、遅い動作は受け入れられない。高速化のためにも、不必要に自由度を増やさないことが重要であろう。さきほどの Barrett ハンドはこのような一例である。実用のためには、機能を明確にして、確実に高速な動作を実現することがシビアに要求される。

6. 他のタイプのロボットとの関連

最後に脚ロボットや人間型ロボットとハンド研究との関連について考える。

最近注目を浴びている人間型ロボットも、移動して何か作業をすることが期待されているからそのためのハンドが開発されている [17]。

脚ロボットや人間型ロボットと多指ハンドとは機構的な

類似性が存在する．例えば1本が3自由度の4本指ハンドを手首で切ってテーブルに置けば，よく見かける4脚ロボットと同じ自由度配置になる．

Bicchiらは多指ハンドによるパワーグラスブだけでなく，リムを多数持つロボット一般に当てはまる理論として Defective系を研究している[18]．Defective系とは関節数が十分でない場合の一般の機構学であり，リムを多数持つロボットが環境や把持物体と多点で接触するとき共通のシステムとしての特徴を持つ．さらに多点接触する脚ロボットに現れる特異姿勢の解析[19]や，パワーグラスブ的な歩容[13]にも機構的類似性は現れている．

もう一つの類似性は触覚という感覚の必要性である．人間型ロボットにおいては現在活発に研究されているところである[20][21]．ハンド全面で感じるのと全身で感じることはサイズの違いはあれ同一の課題である．

7. お わ り に

以上まとめると，人間の手により近いロボットハンドが実用化されるためには，人間の手に学びつつ，使えるセンサが開発されること，実現すべき機能が明確化されること，その高速かつ確実な実行が可能になることが必要である．また，脳の活動レベルや遺伝子レベルでの技能解明の研究が行われている[22]．ロボティクスへの寄与を大いに期待したい．

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] 篠田裕之：“器用な手の皮膚と触覚”，日本ロボット学会誌，vol.18，no.6，pp.767-771，2000．
- [3] H. Shinoda, N. Morimoto and S. Ando: “Tactile Sensing Using Tensor Cell,” IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.825-830, 1995.
- [4] 山田陽滋：“ロボットの粘弾性被覆”，日本ロボット学会誌，vol.17，no.6，pp.770-773，1999．
- [5] Y. Yamada, K. Shin, N. Tsuchida and M. Komai: “A Tactile Sensor System for Revolute Joints of Manipulators,” IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.891-896, IROS'90.
- [6] R.S. Fearing and J.M. Hollerbach: “Basic Solid Mechanics for Tactile Sensing,” The International Journal of Robotics Research, vol.4, no.3, pp.40-54, 1985.
- [7] 前野隆司：“ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能”，日本ロボット学会誌，vol.18，no.6，pp.772-775，2000．
- [8] S. Mascaro, K.W. Chang and H.H. Asada: “Photo-

- Plethysmograph Nail Sensors for Measuring Finger Forces without Haptic Obstruction: Modeling and Experimentation,” Proc. of the 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.962-967, 1999.
- [9] 並木，金子，石川，“感覚運動統合理論に基づく「手と脳」の工学的実現”，日本ロボット学会誌，vol.18，no.6，pp.805-806，2000．
- [10] 池内克史：“人間の把持行動観察によるロボットの把持戦略の生成”，日本ロボット学会誌，vol.18，no.6，pp.792-797，2000．
- [11] 小俣透：“グラスピングの新展開”，第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.909-112，1997．
- [12] 前川仁：“触覚情報を利用した多指ハンドによる把握・操り”，日本ロボット学会誌，vol.18，no.6，pp.776-781，2000．
- [13] 金子真：“包み込み把握”，日本ロボット学会誌，vol.18，no.6，pp.782-785，2000．
- [14] W.T. Townsent: “Description of a Dexterous Robotic Grasper,” 日本ロボット学会誌，vol.18，no.6，pp.798-801，2000．
- [15] M. Buss, L. Faybusovich and J.B. Moore: “Recursive Algorithms for Real-Time Grasping Force Optimization,” Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.682-687, Apr. 1997.
- [16] 齋藤史倫，永田和之：“ポータブルマニピュレーションシステムの研究—単駆動力可換ハンドシステムの提案”，第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.937-938，1999．
- [17] 吉野龍太郎：“人間型ロボットのハンド”，日本ロボット学会誌，vol.18，no.6，pp.802-804，2000．
- [18] A. Bicchi, C. Melchiorri, and D. Balluchi: “On the Mobility and Manipulability of General Multiple Limb Robots,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.11, no.2, pp.215-228, 1995.
- [19] 小俣：“姿勢遷移できるマルチリムロボットの特異姿勢解析”，ロボティクス・メカトロニクス講演会99，CD-ROM 予稿集，2P1-44-078，1999．
- [20] 陰山竜介，加賀美聡，稲葉雅幸，井上博允：“導電性ゲルを用いたロボット用柔軟触覚センサの開発と応用”，第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.873-874，1998．
- [21] 岩田浩康，森田寿郎，萱場慎二，蔭梁中，菅野重樹：“人間・ロボット接触適応制御のための表皮カバーの設計”，第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.961-962，1998．
- [22] 入来篤史：“道具を使う手と脳の働き”，日本ロボット学会誌，vol.18，no.6，pp.786-791，2000．

小俣 透 (Toru Omata)

1959年生まれ．1981年東京工業大学制御工学科卒業，1983年同修士課程修了，1986年同博士課程修了，同年通産省工業技術院電子技術総合研究所入所．1994年4月より東京工業大学大学院総合理工学研究科精密機械システム専攻助教授，1997年11月より1998年3月まで米国カリフォルニア州立大学バークレー校客員研究員，1998年4月より9月までドイツミュンヘン工科大学客員研究員，工学博士．知能ロボット，多指ハンド，脚ロボットの研究に従事，計測自動制御学会，IEEEの会員．1992年，1993年計測自動制御学会論文賞，1997年日本ロボット学会論文賞，第5回ロボティクスシンポジウム最優秀論文賞受賞．（日本ロボット学会正会員）