展 望

テレロボティクスフロンティア

Telerobotics Frontier

横小路 泰 義* *神戸大学大学院工学研究科

Yasuyoshi Yokokohji* *Graduate School of Engineering, Kobe University

1. テレロボット研究者の抱く理想とテレロボットの現実

「広がるテレロボティクス」と題する本特集号の中で、テレロボティクスの最前線と今後広がっていくテレロボティクスの将来を展望させていただく機会をいただいた。まずは現状のテレロボットで筆者が特に印象に残っているものをいくつか紹介することから始めたい。同様の紹介は文献[1]ですで行ったが、掲載からそれなりの年月が経過していることもあり、今回は多少異なった切り口で紹介したいと思う。

まずは、文献[1]でも紹介した機械式マスタ・スレーブマニピュレータ(図1)である。アルゴンヌ研究所で1950年代に開発された機械式マスタ・スレーブマニピュレータと基本的に同じものを今でも製造販売するCRL社が米国ミネアポリス市の郊外にあるが、ここを訪ねたのはもう20年も前になる。力の反力は非常にcrispであり、機械式でも機構と伝達系をうまく設計し、かつ精度よく作られていないとあのような操作感は実現できまい。ましてや、この機械式の操作性を越えるバイラテラル制御系の実現はかなり難しいのではないかと感じた。筆者の中では今でもこの機械式の操作感がバイラテラル制御の目指す理想である。

バイラテラル制御のマスタ・スレーブ方式を採用した重量物ハンドリングロボットのバイマスタ(図2、コマツが開発し、現在株式会社タガミ・イーエクスが製造・販売)も文献[1]で紹介したが、こちらも実物を試す機会を得た。バイマスタの操縦席には、力フィードバックの大きさを0, 1, 2, 3と4段階に変えられるダイヤルがついているのだが、メーカーの担当者のお話では慣れた操縦者だと作業によってはダイヤルは0、すなわち力フィードバックを完全に切ってしまうとのことであった。理由は力フィードバックに抗してマスタアームを操作し続けると腕が疲れてしまうからであるらしい。確かに、通常の建設機械でも作業機にどの程度の力が加わっているのかは、接触時の音や車体に伝わる振動、ポンプ負荷音などから類推できるので、マスタア-

図1 機械式マスタ・スレーブアーム Model 8

図2 バイマスタ

ムからの力フィードバックは必要ないときもあるのであろう。直接作業と同じような直観的な作業をするにはバイラテラル制御は必須と考えていた筆者には、少々考えさせられる話であったことを今でも覚えている。

バイラテラルではない遠隔操縦システムとして成功している典型例は、内視鏡手術ロボット da Vinci であろう。1997年に登場して以来、現物を見ることはあってもなかなか操縦できる機会には恵まれず、それが実現したのは2011年にサンフランシスコで開催されたIROSの企業展示会場であった。両眼立体視の映像内でまさに自分の手のように操れる操作感には舌を巻いたが、これもユニラテラル制御である。メーカーのエンジニアにバイラテラル制御化の可能性を尋ねると、滅菌しなければならないエンドエフェクタ部に力センサを配置するのは難しいとのことで、力を加えれば変形する臓器を扱う限りにおいては、ユニラテラルでも十分に作業が可能なのであろう。

次に紹介したいテレロボットは、本特集号でも解説記事となっている双腕型の作業機である日立建機のアスタコおよびアスタコ・ネオである。詳細は、石井氏による解説記事に譲るが、筆者が実際に操縦させていただいて特に関心し

原 2012年6月1日

キーワード: Telerobotics, Teleoperation, Bilateral Control

〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1

*Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo

(a) コントロールルーム (b) 核融合炉内のスレーブ

図3 JETのリモートハンドリングロボット (CCFE)

ているのは、操縦は通常の建機と同じく各軸ごとに速度指令を与える方式であるものの、操縦レバーを工夫することで、擬似的に手先制御の感覚で極めて直観的に左右の作業フロントを操作できる点である。この方式は4軸からさらに多軸化すると難しくはなると思うが、各軸制御は(同構造型マスタによる位置指令以外は)直観性に欠けるので手先制御は必須と考えていた筆者の意表を突くものであった。

最後に紹介したいのは、英国の核融合研究センターであるCCFE (Culham Centre Fusion Energy)にある核融合実験炉JET (Joint European Torus)のリモートメンテナンス用ロボットシステムである(図3) [2]。最近筆者は現地を見学する機会を得たが、それまでは恥ずかしながらJETのリモートメンテナンス技術に関してはほとんど知らなかった。メーカーで当該分野の開発のご経験をお持ちの芝浦工業大学教授の松日楽氏からお聞きしたことであるが、JETは1998年には炉内の完全リモートメンテナンス化を達成しており、それ以前からの研究開発実績の長さから、原子力メンテナンスの技術者にとってはリモートメンテナンス技術の原点と目されているとのことである。

使用されている双腕型のマスタ・スレーブアームはMascot IVと呼ばれ、元を辿ればアルゴンヌ研究所で開発されたサーボマニピュレータであるモデルE3を参考にイタリアで1958年に開発されたMascotから進化したもののようである。見学时に操縦できなかったのが大変残念であったが、アームはバイラテラル制御(おそらく対称型)されており、核融合炉内部のタイルなどは精度の厳しいはめ合い作業を必要とするので、力フィードバックは大変有効とのことであった。溶接作業、ボルト締結作業などを含む様々な作業を双腕マニピュレータで行うために周辺装置にも実現場で

の作業経験から考え出された工夫が随所に施され、システム全体として大変堅実で完成度が高いという印象を持った。

以上、誌面を割いて幾つかのテレロボットを紹介したが、その真意を次章で述べたい。

2. インプット志向からアウトプット志向へ

2011年12月に京都大学で開催された第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会の触覚・力覚に関するセッションのキーノートスピーチとして、東北大学の昆陽雅司氏から“インプットからアウトプットを生み出す触覚呈示技術へ”と題する大変興味深い講演をいただいた[3]。同氏は力触覚(ハプティクス)に関する興味深い研究をされているが、この講演の趣旨は、「これまで触覚呈示技術に関する研究はいかにリアルな触覚を呈示できるかという人間へのインプット方向に力点が置かれすぎてきたのではないか。それとは逆にそのような呈示によって人間の運動機能をいかに支援するかというアウトプット方向の視点も重要なのではないか」というものであった。リアルな触覚呈示を追及するのは、当然それによって人間に何かしらのパフォーマンスの向上が見込めるからなのであるが、本当にどこまでリアルさを追求すればよいかは、その呈示技術が使われる目的に依存するはずである。場合によっては、振動などの疑似的な力覚呈示でも十分に目的を達成できる場合もありうるのである。

これはまさに目から鱗のご指摘であり、遠隔操縦システムにもまったく同様のことがいえるであろう。遠隔操縦システムでは、これまで‘直観性’、‘機構透明性†’が必要であると言われてきたが、実際どこまで透明であれば十分なのかという議論は正直あまりなかったように思う。その一方で、実用に供しているテレロボットの中には、バイラテラル制御ですらないものもあることは、前章で紹介したとおりである。アウトプット志向で考えるならば、最初に紹介した機械式マスタ・スレーブ相当の透明性が必要な作業もあれば、そこまでの透明性は必要ないものもあるであろうし、むしろ透明性がかえって悪影響を与える可能性さえ考えられるのである††。また操縦者の疲労の問題や視覚など他のモダリティとの関係など、人間に関する多面的な問題を考慮しなければならないであろう。daVinciやJETのリモートメンテナンスの例を見ても、テレロボットは操作系と視覚系などの他の感覚系をも統合したシステム(そこには操縦者たる人間も含まれる)あるいはロボット単体だけでなくそれを支える周辺装置を含むトータルなシステムとしてとらえる必要があることに改めて気づかされる。

3. 有用なシステム構築を支える理論

前章の指摘に対しては、「何を当たり前のことを言っているのか」とのお叱りをいただくかもしれないが、少なくとも

†操縦者と遠隔環境との間に介在するマスタ・スレーブ、およびそれらの制御則からなるダイナミクスが存在が操縦者や環境から見かけ上なくなる(透明になる)程度を表す指標。Transparencyの訳。機構透明であるほうが、直接操作に近づくので望ましいとされる。

††仮に、十分なパワーを持った大型スレーブロボットアームが機構透明になって、人間が自分の腕のように軽々と振り回せる場合を想像してほしい。物理法則には逆らえないので、環境に接触したときには大きな衝撃力を生むであろう。

も筆者自身は今後テレロボットの研究を進めるにおいて心に留めておくべきことであると思っている。ただしこの指摘は、システムが発揮できるパフォーマンスだけを重視し、理論的側面を軽視しているわけではないことに注意されたい。むしろ逆に、有用なシステム構築を支える理論こそ重要なのである。苦労を重ねて経験的にうまく動くシステムがあったとしても、理論的裏付けがなければ応用も効かず、別の場面でまた同じような苦労をしてしまうことになりかねない。例えば、バイラテラル制御の理論面では受動性の考え方が広く受け入れられているが、実システムでバイラテラル制御といえは対称型が多いのは、力センサが必要ないという理由もあるが、安定に動作することも一つの理由であると考えられる。実際、対称型は理論面でも受動性が保証されているのである。

別の例として、移動ロボットを遠隔操作するときに俯瞰映像が有効であるとされているが、その理論的裏付けのようなものは考えられないものだろうか。おそらく人間の認知論的な考察が必要と思うが、理由が明らかになれば、俯瞰映像はどのような場合（例えば移動ロボットに乗り込んで操縦する場合も？）に有効なのか、遠隔操縦において俯瞰映像がなくても操縦しやすくする手立てはないのか、などの疑問にも答えられるのではなかろうか。

また最近筆者は、機構透明性を含む上位概念として、遠隔操縦システムを手慣れた道具として、言い換えれば自分の体の一部として使える「一体感」といったような指標が考えられないかと思っている。機構透明は一体感の特殊ケースに過ぎず、一体感が得られれば十分なパフォーマンスが発揮できるのではないか、一体感を損なう要因は何か（例えば時間遅れ？）、といったようなことを考えている[†]。

4. 広がるテレロボティクス

テレロボティクス技術はもともと極限作業に用いられてきたが、その本質はロボティクス技術を用いての人間の動作のマッピングであり、テレロボットでしかできない作業、もしくはテレロボットが最良な作業はもちろんのこと、遠くのものを見たい、触りたい、動かしたい、という人間の自己拡張願望からくる欲求を満たすべく、テレロボティクスの適用分野は今後広がっていくであろう。今回の特集の解説でも極限作業の範疇に入るものが多いが、中にはリハビリ（山海氏の解説）やコミュニケーション（梶本氏や妻木氏の解説）など新たな分野へのテレロボティクスの展開も垣間見られる。

米国ワシントン大学の Blake Hannaford は、内視鏡手術ロボット Raven の経験を踏まえて Raven II を開発し、これを研究用プラットフォームとして米国内の医療ロボッ

ト研究者に提供しようとしている [4] [5]。製品化されている da Vinci は非常に高価であり、また何よりも技術的には Closed なので研究用プラットフォームとしては使いにくい。実際、Raven II には研究者からの引き合いが多くあると聞く。これはさながらオープンソースの OS と商用 OS との対決のようであるが、オープン化することで多くの叡智が結集され、今後どのように発展するのか注目していきたい。かつて、PUMA がマニピュレーション研究用のプラットフォームとなり（日本では一時、PA-10 がその役割を果たした）、ハプティクスの分野では PHANTOM というハプティックデバイスがハプティクス研究者層の拡大に貢献したように、テレロボティクスにおいてもある分野の研究を広げるには適当な研究用プラットフォームが必要となろう。

5. お わ り に

いささかまとまりのない展望記事となってしまったが、本稿では出口を見据えた理論研究、その理論に支えられた有用なシステム構築の大切さを述べた。

最後になるが、テレロボティクスといえば、福島原発事故後の対応について触れないわけにはいかないであろう。本特集号では浅間氏による解説があるのでご参照いただきたい。40 年にかかるといわれる廃炉に向けて、様々な遠隔操縦技術、テレロボティクス技術が今後開発されていくであろうが、国内外の叡智を結集して是非とも理論的な裏付けに基づいた構築をしていかなければならない。それが次世代、次々世代に技術を伝えるうえで重要であろう。

参 考 文 献

- [1] 横小路：“テレロボティクス”，日本ロボット学会誌，vol.16, no.7, pp.906-909, 1998.
- [2] T. Raimondi: “The JET Experience with Remote Handling Equipment and Future Prospects,” Fusion Engineering and Design, vol.11, issues 1-2, pp.197-208, 1989.
- [3] 昆陽：“インプットからアウトプットを生み出す触覚呈示技術へ”，第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集，pp.1514-1515, 2011.
- [4] <http://www.economist.com/node/21548489?fsrc=scn/tw/te/rfd/pe>
- [5] <http://r2db.tumblr.com/>
- [6] 入来：道具を使うサル。神経心理学コレクション，医学書院，2004.
- [7] <http://edge.org/response-detail/1345/what-is-your-dangerous-idea>

横小路泰義 (Yasuyoshi Yokokohji)

1988 年京都大学大学院博士課程中途退学。同年に京都大学工学部オートメーション研究施設助手。1992 年機械工学教室助教授。2007 年機械理工学専攻准教授を経て 2009 年より神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻教授。博士（工学）。遠隔操縦システム、ハプティックインタフェース、ロボットハンド等の研究に従事。システム制御情報学会、計測自動制御学会、日本機械学会、IEEE などの会員。（日本ロボット学会正会員）

[†]文献 [6] [7] などが参考になるかもしれない。