

## VR とロボティクス - アールキューブ構想 -

柳田 康幸, 舘 暉

要旨 ロボティクスは, バーチャルリアリティという言葉が出現する以前から, テレイグジスタンスなどを通して VR とは密接に関連する分野である. アールキューブは, このテレイグジスタンス技術とネットワーク技術を融合させ, ネットワークを通して世界中に存在するロボットをあたかも自分がロボットに成り代わったかのような臨場感を有して制御し行動することを目指す構想である. 本稿では, VR の立場から見たアールキューブの技術的背景および現在進められている研究開発, 中でもヒューマノイドロボティクスプロジェクト(HRP)における遠隔制御用コックピットと, インターネット経由で遠隔ロボットを操作するソフトウェア体系である RCML (R-Cubed Manipulation Language)をピックアップして解説し, 将来の課題と展望について述べる.

### 1. はじめに

ロボティクスは, バーチャルリアリティという言葉が登場する以前からテレイグジスタンス<sup>1)</sup>, テレプレゼンス<sup>2)</sup>などを通して VR とは密接に関連しており, 近年視覚や聴覚の提示だけでなくさらに触覚・力感覚提示の研究が盛んになるにつれ, ますます関連が深まっている. 本稿で紹介するアールキューブ<sup>3)</sup>は実時間遠隔制御ロボット技術のことであり, Real-time Remote Robotics の頭文字を取って R<sup>3</sup> (R-Cubed)と表している.

アールキューブは, テレイグジスタンス技術とネットワーク技術を高度に融合させることにより, 世界中に存在するロボットを, ネットワークを通してあたかも自分がロボットに成り代わったかのような臨場感を有して制御し行動することを目指す構想である. ロボティクス自体が機械技術, 計測制御技術, 情報処理技術を包含する総合技術であるが, アールキューブではさらに VR 的な感覚提示や実時間通信といった要素が加わる. 本稿では, それらの中でも VR の立場から見たアールキューブの技術的背景および現在進められている研究開発, 将来への課題と展望について解説する.

### 2. アールキューブのコンセプト

アールキューブの技術的な核の一つであるテレイグジスタンス(遠隔臨場感制御)は, 人間が物理的に存在する時間や場所以外の環境に存在する自分の分身を通じて, その環境に臨場感を持って存在し, 行動するという概念である. 「テレイグジスト」する先の空間は, 実際に存在する遠隔地であったり(ロボットを利用), コンピュータが創製したバーチャルな環境(狭義のバーチャルリアリティ)であったりしうる<sup>4)</sup>が, 人間が臨場感を有してそれらの空間を体験し行動するという意味では本質的に等価である.

アールキューブは, このテレイグジスタンス技術と

ネットワーク技術との融合により, 自宅やオフィス, あるいは公共施設などから様々な場所に存在するロボットを自分の分身として自在に制御することを可能にし, 時間的・空間的な制約から人間を解放しようという壮大な構想である. 情報ネットワークとコンピュータの中で閉じていた従来の情報の流通形態から一歩踏み出し, ロボットを端末として利用することにより実世界との相互作用を行えるようにする試みであるとも言える.

アールキューブが描く将来像については既刊の文献<sup>3,4,5)</sup>に詳しく描かれている. 「アールキューブストーリー」<sup>3)</sup>には, 脳機能障害を発生した老人が「アールキューブ登山」でヒマラヤの高山へ登りながらハビリを行う様子, リアルに生地の風合いを触覚で感じながら外国でショッピングを楽しむ様子, 危険な災害現場へ空輸されたロボットを通して救助活動を行う様子などが描かれている. こうした構想の例はほんの数年前までならば SF の話であるとして一笑に付されたかもしれない. しかし, 本田技術研究所<sup>6)</sup>やソニー, 早稲田大学や東京大学などによるヒューマノイドロボットの開発と技術の蓄積, 次世代インターネットへ向けた高速ネットワークインフラの整備など, 必要な技術の種は着実に育ってきており, あながち絵空事とも言えない環境が整いつつある.

### 3. ヒューマノイド用遠隔制御コックピット

こうした中, 産業技術応用研究開発制度のプロジェクト「人間共存・協調型ロボットシステムの研究開発」(略称 HRP: ヒューマノイド・ロボティクス・プロジェクト)<sup>7)</sup>が平成 10 年度に開始され, 進行している. このプロジェクトでは前期 2 年間で研究のインフラとしてのプラットフォームを開発し, 後期 3 年間で各種応用研究開発が行われる.

前期2年間では、3種類のプラットフォームが開発された。すなわち、本田技術研究所のP3をベースにした人間型ロボット(ロボットプラットフォーム)、これを遠隔臨場制御するコックピット(遠隔制御プラットフォーム)、および人間型ロボットの高度な制御技術を研究するためのシミュレータ(仮想プラットフォーム)である。ここでは、これらのうちVRインタフェースと最も関連の深い遠隔制御プラットフォームについて紹介する。

遠隔制御プラットフォーム開発では、規模に応じて3種類の操作システムが開発された。最も大規模なものは「スーパーコックピット」と呼ばれ、包囲型スクリーンと作業用HMD、両腕のフォースフィードバック付きマスターム、およびロボットの歩行による移動感を提示する体感シートにより構成される。広視野視覚提示を行う包囲型スクリーン<sup>8)</sup>は3×3のマトリクス状に配置され、視野角は合計で水平150度、垂直117度を有する。これらのスクリーンに背面から映像を投射し、各面を立体視対応とするためにそれぞれ2台、合計18台のプロジェクタ(解像度1024×768)を使用している。このような多面構成にしたのは、広視野の確保と解像度を両立させるためであり、本装置の能力としては換算視力0.3強となる。仮に単一のスクリーンで構成すると、現在利用可能な最も高精細のデバイスをもってしても半分以下の解像度となる。ロボット自体の動特性が向上し人間の頭部・体幹運動に実時間で追従した視点移動が行えるようになれば、運動視差による奥行き手がかりが有効になり、まさにガラス張りのコックピットから操作している感覚が得られるようになる。

視覚提示系としては、包囲型スクリーンの他に作業を遂行するためのHMDを有する。これは、多面包囲型スクリーン構成が視野角の確保に有利であり、周辺視野の影響が強い移動感を提示する場合に適しているのに対して、手を使った作業などにおいて要求される正確な立体空間提示を行う場合、人間がHMDを装着し、ロボット頭部にステレオカメラを装備して頭部運動に追従させれば人間の動作に対応した正確な立体環境提示が可能になるためである。包囲型スクリーンを利用して頭部運動に追従した立体視覚提示を行う方式に関しては筆者らのグループも研究開発を進めており<sup>9)</sup>、人間の頭部運動に対して安定性の高い視覚提示環境を用いて正確な実写立体画像の提示が可能になっている。

力感覚および運動感覚提示部<sup>10)</sup>は、直接的にロボテ

イクス技術が関与する。ロボットの腕と手による操作を行うためのマスタームは、両腕の構成で、各々7自由度、フォースフィードバック機能を有する。移動感を提示するための体感シートは、スーパーコックピットで導入された初めての試みである。ロボットが歩行動作を行うとロボット搭載カメラから得られる画像は揺れる。操作者がただそれを座って観察したのでは、酔いなどの悪影響が生じる可能性がある。そこで、ロボットの歩行に起因する腰の運動に対して操作者が着座するシートを連動させることにより、移動感を表現するとともに画像の揺れによる影響を低減する効果を持つ。実際には、操作者はシートに着座しているというよりは、ほぼ立った状態でシートに腰を当てている状態であり、この方がより自然な感触が得られている。今回の実験的な試みとして、腰部の運動に関してはロボット側がマスタ、操作者側がスレーブという構成になっており、歩行中にはあたかもロボットに肩車されているような状態となる。

HRPプロジェクトは、後期3年間として応用研究のフェーズに入ったところであり、各種アプリケーションへの展開や一層の技術開発が進行している。

#### 4. RCML

上記のスーパーコックピットを用いた人間型ロボット制御はアールキューブ構想に沿った開発の中ではハイエンド側を構成するものであるが、一方で誰もがインターネットを通して簡単に遠隔ロボット操作が行えることを目指してエントリーレベルのシステムの開発も行われている。知能ロボットを高レベルのコマンドで制御する場合は、ユーザとロボットの間でやりとりされる情報が少なく済むので、既に広く普及しているWorld Wide Webの仕組みなどを利用すればインターネット上の様々なロボットを制御することが可能である<sup>11)</sup>。一方、テレグジスタンス型の動作レベルでの制御が要求される場合には制御情報の連続的なやりとりなどが必要となるため、高レベルコマンドでの制御とは異なる解が求められる。従来、遠隔ロボットの動作レベルでの制御にはシステムごとにまちまちな通信手段が使われており、ネットワーク上に存在する様々なロボットをユーザが統一的な手段で制御することは困難であった。そこで、こうした動作レベルでの制御における通信方法を体系化し、専用システムを導入しなくても簡単にできるようにできれば、という要求が存在する。

このような背景をふまえ、筆者らのグループでは

RCML (R-Cubed Manipulation Language) <sup>12,13)</sup>というシステムを開発している。RCML は特定のロボットの操作コマンド体系ではなく、むしろそのロボットの操作を行うにはどのような情報を送る必要があるか、またそのロボットから得られる情報はどのようなものを記述する言語である。例えば、ロボットには何自由度のアームがあり、そのジオメトリ（リンクの長さや関節構成）はどのようにになっている、そのステータス情報としてどのような値が利用できる、またカメラがどのような自由度構成の台に載っていて画像情報をどのような手段で利用できるか、といった情報である。これにより、ネットワークユーザは制御するロボットごとに専用の制御用言語やソフトウェアを用意する必要はなく、ロボットサイトからダウンロードされる記述ファイルの中身を見て通信を行うという仕組みになっている。

RCML は、当初 VR 世界へのアクセスとシームレスな操作環境を提供することを優先して設計されたため、最初のバージョン(1.0) <sup>14)</sup>は VRML97 の拡張形式として設計された。この方針により、既存技術を有効に利用できるとともに、ロボットのカメラから得られる画像だけでなく、VR 環境を自由な視点から俯瞰しつつ操作を行うことが可能となった。

その一方で、様々な実装上の問題も生じてきた。例えば、RCML 独自の情報記述が VRML97 の拡張性（PROTO タグ）に依存しているため十分な記述が行えない、三次元空間モデルとロボット制御のための情報記述が混在しており分離できない、といった問題である。そこで改めて設計を見直し、RCML2.0<sup>15)</sup>では XML ベースの設計とした。

RCML システムでは、遠隔ロボットサーバとユーザのクライアントソフトウェアが通信する際に RCTP (R-Cubed Transfer Protocol) というプロトコルを使用する。RCTP はアプリケーション層のプロトコルであり、ロボットサーバとブラウザソフトウェアとの間でやりとりされる情報の手順と形式を規定する。ロボットとの間でやりとりされる様々な種類の情報のうち、RCTP では主に制御情報の形式を規定しており、動画や音声は既存のプロトコルに任せている。これは、ロボットを遠隔制御する際に標準化が行われていない部分のプロトコルを補強するものである。制御情報は、一回でやりとりされるデータ量が比較的少なくその代わり頻度の高い通信が行われるため、RCTP はなるべくオーバーヘッドが少なくなるように設計されている。

## 5. アールキューブを取り巻く課題

アールキューブの実現までには、当然のことながら数々の解決すべき問題が待ちかまえている。例えば、人間社会にロボットがとけ込むために、安全技術は極めて重要である。人や周囲のものを傷つけないための柔らかい機構や制御技術などの開発は今後ますます重要になってくるであろう。

ロボットが人間の生活する空間に存在するようになった場合の、社会的影響についても配慮する必要がある。ロボットが身近に存在するようになった場合、人間はそれをどのように受け止めればよいのだろうか。これについては、ソニーの AIBO など、ペットロボットの存在が先行ケーススタディとなりうる。しかし、ヒューマノイドが人間の生活環境に進出した場合には、人型であるが故にそれとはまた違った関係が生まれる可能性がある。

ロボットの形態に関して言えば、人間の生活環境を改造せずに移動や作業を行うためには人間と同じディメンジョン・スケールである必要があると言われており、これはヒューマノイドの存在意義として一理ある。その一方で、人間の「作業」を実現するためには必ずしも人間の形をしている必要はなく、ヒューマノイドという高価な選択肢を選ぶよりは機能ごとに分化した機械を智能化・相互接続し全体を有機的に結合するというアプローチも提案されており、これもまた尤もな主張である。筆者はここでどちらが正しいかということ論じる意図はない。両者はヒューマノイドという究極の汎用機械を使うか、あるいはそれぞれの作業に特化した「道具」を使うかという選択であり、むしろ相互に発展しつつそれぞれが適用される局面において最適解を設計すべき問題であると考えられる。VR においてもこうした議論はそのまま成立するものであり、完全な汎用化・バーチャル化を指向するか、あるいは実物の使用を基本にして付加情報を載せていくかという議論は、これから先技術の成熟とともに様々な局面で行われるべきことである。

ロボットの知能に関しても十分な議論が必要である。それが技術者の夢であるのは認めるとしても、人間と同じ、あるいは人間を凌駕するような知能を有する（鉄腕アトムのような）完全自律型のロボットは、本当に人間にとって必要なものだろうか。誤解のないように言っておくと、筆者は自律型知能ロボットを否定したいのではない。それどころか、ロボットの知能はアールキューブにおいて必要不可欠な要素である。例えば、人間が四六時中ロボットを制御している訳にはいかな

いことは明白であり，人間に制御されていない間口ロボットが自律的に動くことができないようではアールキューブは実現できない．むしろ問題なのは，機械知能の向かう方向である．すなわち，人間の仕事を代行する便利な存在を安易に求めるのではなく，主体はあくまで人間であり知能機械は我々をサポートする存在としての方向を追求すべきではないだろうか．中でも，人間が見落とす危険がある，あるいは人間の苦手な領域に関してロボットの知能がそれを検出し制御すること（安全知能）は極めて重要であると考えられる．古くから SF の世界でも言われてきたことだが，人間の制御が及ばない主体が人間に対して危害を及ぼすという事態が生じた場合，誰が責任をとるのか．新しい技術は例外なく両刃の剣であるから，必要以上に警戒したり悲観したりするのは無意味だが，それをどう使うかはあくまで人間次第である．

責任の所在に関して言えば，誰がロボットを操作しているのかがわかるようにすることも必要である．ロボットが匿名性のための道具として使われたならば，容易に負の側面が顔を出す．インターネットの場合を例にとると，その黎明期には限られた研究者同士のコミュニティであったがゆえに「実名を名乗るのがマナー」という性善説に基づいているが，その前提が成り立たない一般社会への爆発的普及に伴い悪意の人間が匿名性を利用する問題が生じていることは周知の通りである．アールキューブではロボットが物理空間への作用を及ぼすので，こうした構造を引きずったままではより深刻な事態を生じる可能性も否定できない．アールキューブが実現した際の社会的制度をどのようにするかを論じるのは社会科学の仕事であるが，技術者もこうしたことに無関心でいることは許容されないであろう．技術面での可能性として，筆者らのグループではロボットに操作者の映像を重ねて投影表示する相互レイグジスタンスの方法を提案し<sup>16,17)</sup>，研究開発を進めている．

情報通信に関しても，インターネットもしくはそれに相当する全世界規模の通信ネットワークにおいてロボット制御に適した実時間通信の仕組みを実現することは大切な要素である．通信の速度を話題にする場合，帯域(何 bit/s)については従来からしばしば言及されていたが，遅延について論じられるようになったのはごく最近のことである．動作レベルでのロボット制御では，関節角などの比較的小さなデータが頻繁かつ双方向に送受信され，人間も含めて全体としてループを構成するため，一方通行のビデオ配信などとは遅延に対

する要求も異なるはずである．この意味で，アールキューブが要求するネットワーク形態は，回線の共有・有効利用を指向するインターネットよりも従来の電話型の延長線に近いかもしれない．しかし，インターネット型への通信比重の変化はもはや止められない流れであり，そうした中で実時間性要求の厳しい双方向通信をうまく共存できる形で取り込んでいくことが重要となる．ロボティクスや VR のフィールドから，次世代ネットワークを流れる情報コンテンツとしての実時間動作というものの存在をアピールしていく必要があるだろう．

## 7. おわりに

アールキューブは現代の人間を時間や空間の制約から解放する試みであり，視覚・聴覚を伝達する従来のネットワーク通信の枠を超えて，ロボティクス技術との融合により行動の伝達が可能になりつつある．アールキューブでは，人間とは似て非なる情報主体としてのロボットを創造することを目指すのではなく，あくまで人間が使用し人間を補助するツールとしてロボットを捉えている．本稿で述べたようにアールキューブの実現までには数々の課題が存在するが，それらを一步步解決して，空想・仮想ではなくまさにバーチャル(本質的に等価)な現実にしていきたいものである．

- 1) 舘, 阿部: テレイグジスタンスの研究 第 1 報 - 視覚ディスプレイの設計 -, 第 21 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 167-168 (1982)
- 2) Hightower, J. D., Spain, E. H. and Bowles, R. W.: Telepresence: a hybrid approach to high performance robots, Proc. ICAR '87, 563-573, (1987)
- 3) 通産省アールキューブ研究会: アールキューブ, 日刊工業新聞社 (1996)
- 4) 舘: バーチャルリアリティとロボティクス, 日本ロボット学会誌, 15(4), 512-515 (1997)
- 5) Tachi, S.: Real-time remote robotics -toward networked telexistence, IEEE computer graphics and applications, 18(6), 6-9 (1998)
- 6) 広瀬, 竹中, 五味, 小澤: 人間型ロボット, 日本ロボット学会誌, 15(7), 983-985 (1997)
- 7) URL <http://www.mstc.or.jp/hrp/>
- 8) Nishiyama, T., Hoshino, H., Suzuki, K., Nakajima, R., Sawada, K. and Tachi, S.: Development of surrounded audio-visual display sys-

- tem for humanoid robot control, Proceedings of ICAT '99, 60-67 (1999)
- 9) 柳田, 前田, 舘: 固定スクリーン型視覚提示装置を用いたテレグジスタンス視覚系の構築手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 4(3), 539-547 (1999)
  - 10) Hasunuma, H., Kagaya, H., Takatori, M., Fujimori, J., Mifune, F., Shikoda, S., Kobayashi, M., Itoko, T., Tachi, S.: Development of teleoperation master system with a kinesthetic sensation of presence, Proceedings of ICAT '99, 53-59 (1999)
  - 11) 原: インターネットを利用した遠隔操作システム, 日本ロボット学会誌, 17(4), 477-480 (1999)
  - 12) 柳田, 川上, 舘: RCML: アールキューブ操作言語の開発(第 1 報), 日本バーチャルリアリティ学会第 2 回大会論文集, 348-349 (1999)
  - 13) URL <http://www.rcml.org/>
  - 14) 鄧, 関口, 川上, 柳田, 奴久妻, 舘: RCML: アールキューブ操作言語の開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 6(2), 881-890 (2000)
  - 15) Sekiguchi, D., Teng, W-C., Kawakami, N., Yanagida, Y., Tachi, S.: "Development of R-cubed manipulation language—the design of RCML 2.0 system," Proceedings of the ICAT 2000, 44-51 (2000)
  - 16) 稲見, 川上, 関口, 柳田, 前田, 舘: テレグジスタンスの研究(第 29 報) - オブジェクト指向型ディスプレイとしての遠隔ロボット -, 第 9 回「人工現実感」研究会予稿集, 35-38 (1999)
  - 17) Tachi, S.: Toward the next generation teleexistence, Proceedings of ISMCR '99, 173-178 (1999)

柳田康幸

1990 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年同大学先端科学技術研究センター助手。1997 年同大学大学院工学系研究科助手, 現在に至る。博士(工学)。テレグジスタンス, バーチャルリアリティ, ヒューマンインタフェースなどの研究に従事。日本音響学会, 計測自動制御学会, 日本ロボット学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマンインタフェース学会の会員。