

トレイグジスタンスとアールキューブ

舘 障

1 はじめに

トレイグジスタンス(telexistence)とは、人間が従来の時空の制約から開放され、時間と空間ないしはそれらの両者を隔てた遠隔環境に等価的に存在することを目指す概念である。一方、バーチャルリアリティ(virtual reality: VR)とは、人間が現在実際に存在している環境以外の等価環境(virtual environment)を、あたかもそれが現実の環境のような感覚を持って体験し、かつその等価環境で行動することを可能とする新しい技術であって、トレイグジスタンスを別の観点から言い表わしており、その意味で両者は本質的には同一概念のエイリアスである。トレイグジスタンスを大別すると、ロボットを媒体として、人間が実際に存在しているのとは別の実世界へのトレイグジスタンスと、コンピュータ等の生成した実際に存在しないが、極めて現実感溢れる等価世界へのトレイグジスタンスとに分かれる。前者は、等価空間が伝達された実空間の場合であり、後者では等価空間がコンピュータの構築した虚空間となっている。さらに、コンピュータの生成した等価空間を介して実空間を制御することも可能であり、等価空間介在型遠隔臨場制御と呼ばれている¹⁾。

さて、このトレイグジスタンスは、1980年に通産省機械技術研究所から生まれ育った我が国独自の技術であり、1983年から1991年の8年間にわたって推進された大型プロジェクト「極限作業ロボット」の研究開発計画に於ける一つの大きな柱の役割を担った。現在では、その工学的実現可能性が理論的にも、また実際のハードウェアシステムによる実験からも実証され、基本システムの設計法が明確になっている。さらに、その研究成果は海洋作業の実証機にも組込まれ実用に近づいている。しかし、その使用範囲は特別な通信回線を施した極めて限定された場所にとどまっており、従って使用者も限定されていて、不特定の多数の人が自由に公衆ネットワークを利用

してトレイグジスタンスしあえる状況にはなかった。

一方、現在のインターネットは不特定多数の一般の人が公衆ネットワークを介して自由に情報を交換しあえるが、ロボットを自在に制御して自分の行動や行為を伝えることはできない。従って、新しい技術の研究開発を推進することにより、次世代のインターネットなどを利用して自由にトレイグジスタンスしあえる一歩進んだ社会の技術基盤を整えることが緊要となっている。

アールキューブはそのような状況を鑑み1995年に通産省と東京大学を中心として構築された構想であり、来るべきネットワーク社会に於いて、人間の行動や所作もネットワークを介して自由に伝えあい、誰でもがどこへでも自由自在にトレイグジスタンスしあえる社会を目指したビジョンである。アールキューブでは、ロボティクスとバーチャルリアリティがネットワーク技術で統合される。

本年より、そのアールキューブ構想実現の第一段階になうべく、通産省の応用産業技術プロジェクトとして、人間協調・共存型ロボットの研究開発が開始される。この解説では、ネットワークを介して自由にトレイグジスタンスしあうための研究開発について、歴史的な経緯も含め概観する。

2 歴史的考察

そもそもバーチャルリアリティという言葉が使われ始めたのは米国のVPL社がデータグローブやアイフォンなどの製品を市販し始めた1989年からであり、ゲームへの応用とあいまって一般に知られるようになった。しかし、バーチャルリアリティの考えの起源は1968年にサザランドが提案した頭部搭載型ディスプレイの研究にまで遡り、コンピュータグラフィクスに源流を持つジェネリックテクノロジーの一つである²⁾。その後我が国からは1980年にトレイグジスタンス、米国からは1983年にテレプレゼンスの概念が提唱されそれぞれ通産省の大型プロジェクト「極限作業ロボット」とNASAの宇宙開発プロジェクトに関連して発展した。一方、芸術の分野に於いても1983年にアーティフィシャルリアリティの考え方が提唱されている。これらは、一言でいうならば、従来人間が機械に自らを合せるという人間側の負担を前提にして成り立っていたマンマシーンインタフェースの形態を脱却して、逆に機械の方から人間へ無限に歩み寄りいわゆるサイバネティックインタフェースの究極としてバー

筆者紹介



たちすむ

1973年、東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、工学博士。同年、東京大学助手。1975年通産省機械技術研究所研究員。その後主任研究官、遠隔制御課長、バイオロボティクス課長。1979年から1980年、マサチューセッツ工科大学客員研究員。1989年、東京大学助教授を経て、1992年、東京大学教授に就任。現在、同大工学部計数工学科教授。IEEE/EMBS学会賞、通産産業大臣賞などを受賞。国際計測連合学会(IMEKO)ロボティクス会議議長、重点領域「人工現実感」領域代表、日本バーチャルリアリティ学会会長などを務める。

チャルリアリティが模索されていると解釈できる。因みにサザランドの研究目標の一つが究極のディスプレイであったことは極めて示唆的である。

さて1990年3月に米国のサンタバーバラで工学、生理学、心理学、哲学、芸術など今までは全く別の分野であると思われていた多くの分野に於いて旧くからこの種の研究を行っていた専門家がMITの呼びかけで一堂に介した。3日間に渡るそれぞれの分野における研究者たちの長年にわたる研究成果の発表と白熱した討論の中、一見異なるように見えるそれぞれの研究が実は同一の目標を目指しており、今後それらを学問的な新しい分野として形成していくことが緊要でありかつ有効であるとの認識が生まれたのである。この時をバーチャルリアリティのビッグバンと呼ぶことがあるのはこのような経緯によるのである。

実用的見地からみると、近年コンピュータやセンサなどの技術が急速に進展し、また人間科学の進展による人間感覚などの知見の蓄積が進み、いままでは非現実的な夢と思われていたバーチャルリアリティの方法論が急速に現実味を増してきている点が挙げられる。そこでいままでは、独立に発祥し進展してきた多くの分野がバーチャルリアリティを注目しこれを21世紀へのキーテクノロジーとして認識し始め、それにともない、各分野に関連する企業に置いてもバーチャルリアリティの研究開発が精力的に繰広げられるようになったのである。

しかも、単にこれらの分野で共通の概念が育ってきただけではなく、バーチャルリアリティはそもそも共通となりうる基礎技術を内包しており、一つの分野で開発された技術が他の分野でもそのまま利用できるのも、それらをまとめて一つの技術体系として研究開発することが重要かつ緊要となっている。従って内外の学界でもこのバーチャルリアリティを重要な研究分野として認識し盛んに研究が進められ始めている。

一方、テレグジスタンスの歴史はテレオペレータに溯る。従来のテレオペレータでは、人から機械に向かう制御系が強調されているが、機械から人への感覚フィードバックは、対称型や力帰還型で力の情報をオペレータに伝える程度であり、人がその場で作業をしているような臨場感を持ちながら作業をすることはできなかった。機械からオペレータへの感覚フィードバックを臨場感の高いものとするための研究が1980年の初めに日本と米国で独立に生れ近年世界的に盛んになった。これが、前述のテレグジスタンスの概念であり、特に構造化されていない環境(unstructured environment)でロボットを利用する第3世代のロボットに有効である。最初の学会報告は、1982年に計測自動制御学会で行われ、関連特許は1980年に出願されている。図1にテレグジスタンスロボットによる作業風景を示す。

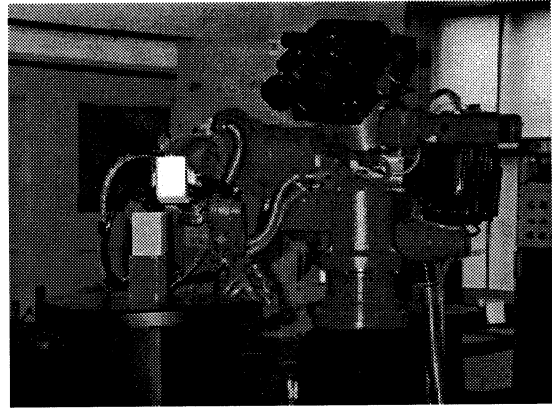


図1 テレグジスタンスロボット作業実験風景

3 「アールキューブ」構想

アールキューブはネットワーク環境を利用したパーソナルなテレグジスタンス社会をめざした研究開発構想とそのための基礎研究と位置づけられる。Real-time Remote Robotics (実時間遠隔制御ロボット技術)の頭文字をとって表記して、これをアールキューブと呼んでいる¹⁾。情報のみが行き交う現在のネットワークを進化させて、ロボットを自在に用いることにより作業の伴うものとする試みともいえる。図2と図3に構想のイメージを示す。このような図はつい最近までは、いかにもSF的であると思われがちであったが、本田技研工業により二足歩行ロボットが発表された現在²⁾、ある種の現実味を俄かにおびてきており、SF的と一笑に伏すわけにはいかない状況になっている。事実、テレグジスタンスを始めとして必要なテクノロジーの原形は、まなこを凝らしてよく見れば、今でもすぐそこにあるのであり、あとは夢を実現するためのプロジェクトを起すか起さないかの問題であるとも言える。

このアールキューブが実現されれば、例えば、現在の家庭のパソコンがVR入出力付のVRパソコンになり、それを用いてB-ISDN等のネットワークを介して世界中の

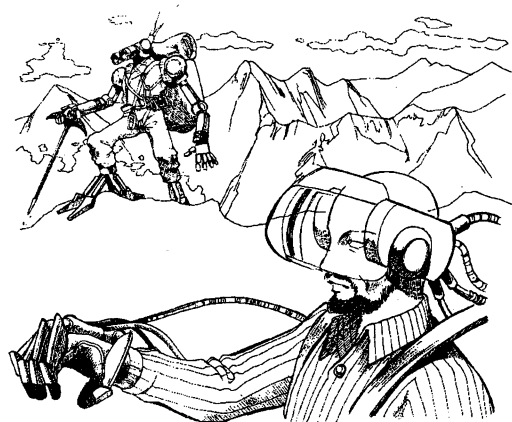


図2 アールキューブ登山のイメージ

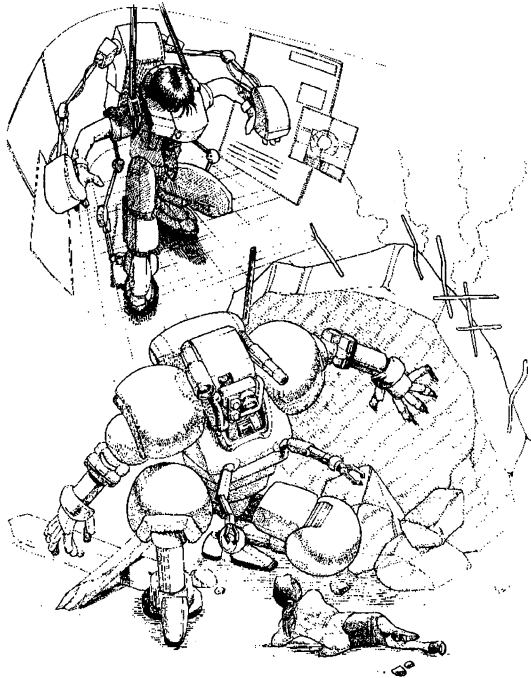


図3 アールキューブによる災害救助のイメージ

サイトにテレグジスタンスすることが可能となる(図4)。家庭内のパソコンにはパーソナルロボットがあたかもコンピュータの端末機器のように接続され、コンピュータの指令で制御されたり、テレグジスタンスモードでは使用者の目となり耳となって環境を認識し、使用者の意のままに分身のように行動する。

家庭だけではなく、オフィスや工場、病院、学校、図書館、美術館、公園、競技場、アミューズメントパークなどあらゆるところに、テレグジスタンスロボットが配置されており、人は家庭からでもオフィスからでも、あるいは公衆電話のような公衆アールキューブサイトから世界中のアールキューブロボットを自分の分身として利用できる。これを用いれば例えば、病院に永く入院して外にでられない子供たちやお年寄りが、ほかの子

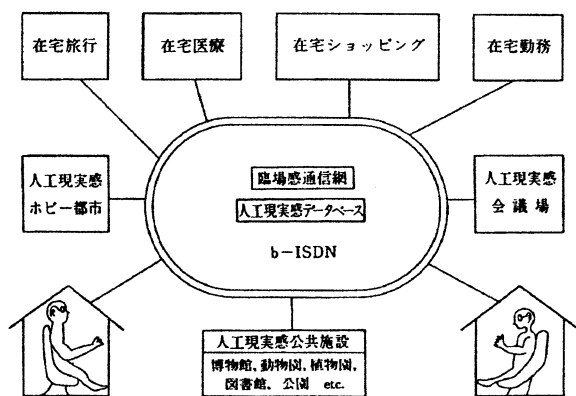


図4 バーチャルリアリティによるネットワーク構成

供たちと一緒に遊んだり、自分の家族の住む家に戻ったりすることが、等価的に可能となるのである。スペースシャトルのアールキューブロボットにテレグジストすれば、所謂「宇宙からみた地球の平和」を宇宙飛行士でなくとも体感できるというわけである。

しかし、このような理想的なシステムを実現するためには解決しなければならない多くの技術課題があることは明白である。まず、人間がいかにして臨場感を得て、通常の生活をおくると同一の感覚でアールキューブロボットを使いこなせるかという問題であり、人間の意図を非拘束かつ適格に反映できるよう、生理学や心理学的な知見に裏内されたVRインタフェースを模索し実現しなければならない。通信の問題も重要である。リアルタイム性を保証した大容量・超高速の通信に加え、いかにして人間がもつ異種の感覚間の同期を保証するのか、多数の使用者の協調作業をいかにして可能とするかなどVR固有の問題が含まれる。

アールキューブロボットのハードウェアとソフトウェアの構成の諸問題もある。家庭内に適したロボットと各種作業に適したロボットという形で多くの種類のロボットが作られるであろう。それはちょうど自動車とのアナロジーで捉えられよう。というのは高速道路を走るビークルが自動車であるように情報ハイウェイを行き交うビークルはアールキューブであるからである。家庭用のパーソナルロボットは自転車を運転するように無免許で利用でき、災害救助用の大型ロボットは特殊免許、通常の利用は普通免許といった運用形態が可能となる。

そしてここで最も重要となる技術が安全知能である。いままでややもすればロボットや機械の知能は人間の高度の大局的な判断や思考を置き換えようとして失敗してきた。しかし、アールキューブにおいてはロボットの知能は人間の最高級の判断や意思を置き換える必要はない。むしろ、それこそが人間の最も重要な部分であり、人間はその部分こそ自分で行いたいのである。そして自動車を運転するようにアールキューブロボットを操縦する。しかし、自動車とは異なりアールキューブロボットは知能も有して人間が見逃した危険を回避するのである。これが安全知能である。安全知能の原則はアシモフのロボット3原則と同一である。すなわち、人に決して危害を加えてはならない、危険を看過することで人間に危害を与えてもいけない、危険を与えない範囲で人間の命令に従い、そして、前記の2項に反しない限りロボット自らの安全を守らなければならない。つまり、人間が自らの責任と判断でアールキューブロボットをテレグジスタンスで操りながら、人間の見逃した危険をロボットの側でも二重にチェックする安全知能は今後のロボット技術に於けるキーテクノロジーの一つとなろう。

4 アールキューブ操作言語

「アールキューブ」構想実現の重要な要素の一つは、ネットワークロボティクスであり、その中でもロボットの標準的な制御言語は不可欠である。現在WWW上での3次元グラフィクスのISO標準となっている記述言語は1993年にMark Pesceにより考案されたバーチャルリアリティモデリング言語VRMLである。VRMLは1.0では3次元シーンを記述するのみであったが、2.0では動きの記述が可能となり、さらに、3.0で共有3次元環境の記述が可能となろうとしているが¹⁹⁾、現在のVRMLにおいては実世界の対象は扱っておらず、これでロボットを制御することはできない。一方、遠隔ロボットをインターネットやISDN回線を用いて制御する事例は、南カリフォルニア大学や東京大学、電子技術総合研究所などに見られるが、そのための標準の言語やプロトコルの開発には至っておらず、現在のところHTMLやVRMLを用いるような手軽さで利用することはできない。

そのような中、ネットワークを介してロボットを人間が利用するためのロボット制御および人間への感覚情報提示に関する環境記述、運動制御、情報提示のための標準言語「アールキューブ操作言語(RCML:R-Cube Manipulation Language)」の開発が通産省の国際標準創造型研究開発の一環として行われている¹⁰⁾。すなわち、WWWブラウザの利用を念頭に置き、インターネットでデファクト標準であるHTML及びインターネット上の3次元空間記述言語のVRMLをベースとし、それをロボットのネットワーク通信制御と情報提示にまで拡張し、デファクト標準のみならずISO等の国際標準を目指すという研究開発である。

この研究開発ではネットワーク上に配置された人間型ロボットなどの動作機構を、WWWのブラウザ上からホームページをアクセスするのと同様の手軽さでアクセスするソフトウェアが開発されている。すなわち、動作

機構側においては、ロボットをコンピュータにインタフェースを介して接続し、開発するRCMLで動作を記述し、そのサイトをホームページに登録する。ネットワーク上の使用者は、そのホームページに登録されたアイコンを指示することで遠隔リアルタイムロボット操作ブラウザを起動させ、遠隔地にあるロボットをRCTP(R-Cube Transfer Protocol)を用いて操作することができるというわけである(図5)。

例えば、使用者はデータグローブやマウス等の入力デバイスを用いて動きを指示し、遠隔地にあるロボットや移動カメラを操作し、見たい遠隔環境の映像を臨場的に得ることができる。また、アールキューブ操作ブラウザを介して、移動、物体操作等の作業指示を行なうことによりロボットを操作し、遠隔の実環境内を自由に移動し、さまざまな作業を的確に行なわせることができると期待されている。図6に実装例を示す。

5 人間協調・共存型ロボット研究開発(ヒューマノイドロボティクス計画:HRP)

工業技術院の先導研究「フレンドリネットワークロボティクス」の研究が1996年4月から1998年3月まで行われ¹¹⁾、それを通して、「アールキューブ」で代表される新しいネットワーク社会の構想を世に問いながらそれを実現するための基礎的な研究が緊要であることが明白となった。前述の如く「アールキューブ」構想実現の重要な要素は、ネットワークロボティクスと人間型ロボット(ヒューマノイド)である。そこで1998年の4月から、特に後者のヒューマノイドに焦点を当てた研究開発プロジェクトが工業技術院の応用産業技術研究開発プログラムとして開始される運びとなった¹²⁾。それが、「人間協調・共存型ロボット研究開発」通称ヒューマノイドロボティクス計画(HRP)である。

HRPでは、プラットフォームという考えが基礎となっ

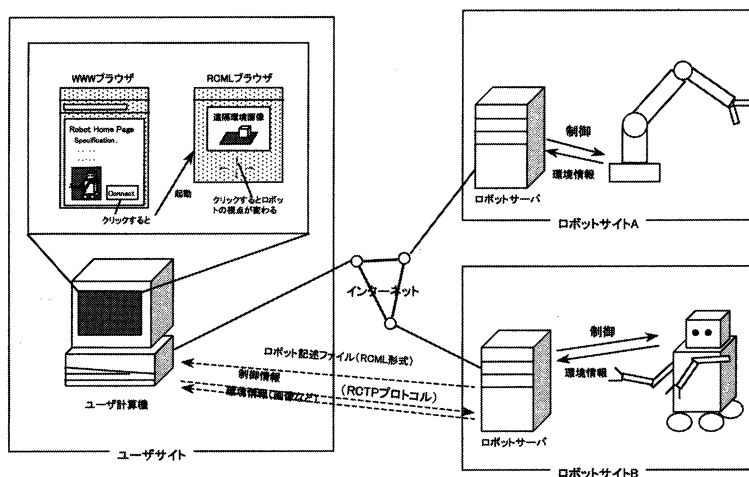


図5 RCML実現イメージ

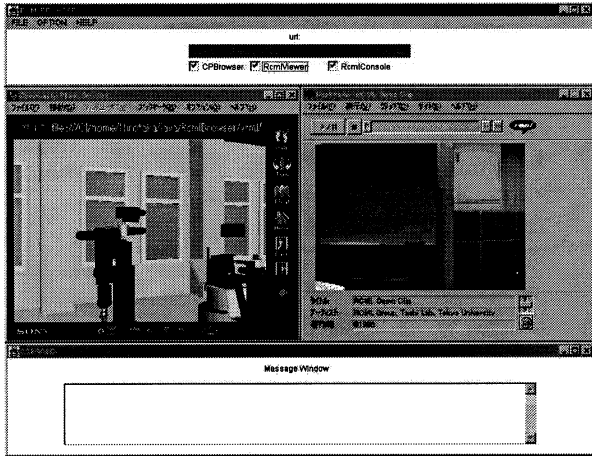


図6 RCMLの実装例

ている。すなわち、研究開発の前段階の2年間で後半3年間の応用システムに用いるプラットフォームを構成することから研究開発を始めるという新しい方式である。勿論このプラットフォームは後半で開発する応用システムのためのプラットフォームであるだけではなく、広く人間協調・共存ロボティクスに於けるプラットフォームとしても利用できるものを目指すことは言うまでもない。

プラットフォームとして、人間型ロボットと、ネットワークロボティクスで用いる遠隔操作プラットフォームを構成する。前者のイメージ図を図7に示し、後者のイメージ図を図8に示す。ただし、これは開発例であり、最終的な仕様は秋ごろまでに決定される。

後者の遠隔操作プラットフォームは、遠隔臨場制御コックピットの原形を構成するものであり、人間型ロボットにテレグジスタンスして自分の分身のように制御することに加えて、無人の自動車をその運転席にいる

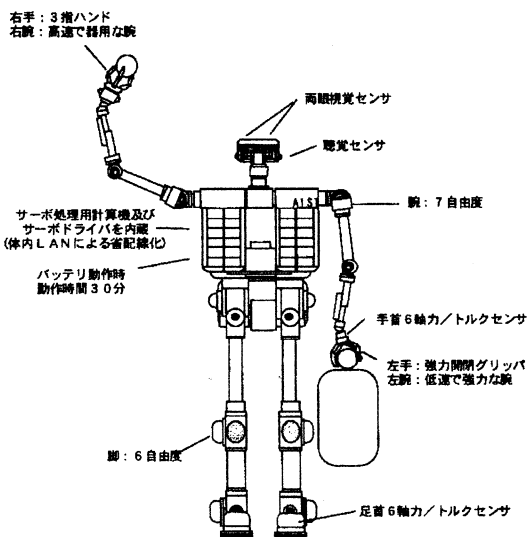


図7 人間型ロボットの仕様例

ような感覚を有して制御するような非人間型のロボットにも対応できる制御コックピットである。さらに、その有する通信制御機能によって、WEBを介して種々のオフィスやsiteあるいは公共施設などにアクセスしてRCMLなどの制御言語やRCTPなどの制御通信プロトコルを用いてパソコンレベルでのパーソナルロボットや機器の制御を行うことも目指している。これらを通じて、アールキューブ構想の基礎が確立されることが期待されている。

6 おわりに

バーチャルリアリティが現実の本質を再現した人工環境を生成するものである限り、ロボティクス特にテレグジスタンスとは表裏一体をなすものとなる。バーチャルリアリティは、アミューズメントの分野での利用が先行したが、医療にみられるように次第に本来の目的である実問題への適用が志向され始めている。そのような中、ネットワークとロボティクスを融合させ真の意味での人間中心のテレグジスタンス社会を目指すアールキューブ構想が策定されている。そのアールキューブの要ともいべき「人間型ロボット」の研究開発が通産省の産業科学技術プロジェクトとして模索されており、その実現がおおいに期待される場所である。

また、その過程のなかでRCMLに代表されるようなWEBを利用したロボットの制御の標準化も進み、ネットワークを介してテレグジスタンスを自由に行える社会が21世紀以降次第に実現されて行くと考えられる。

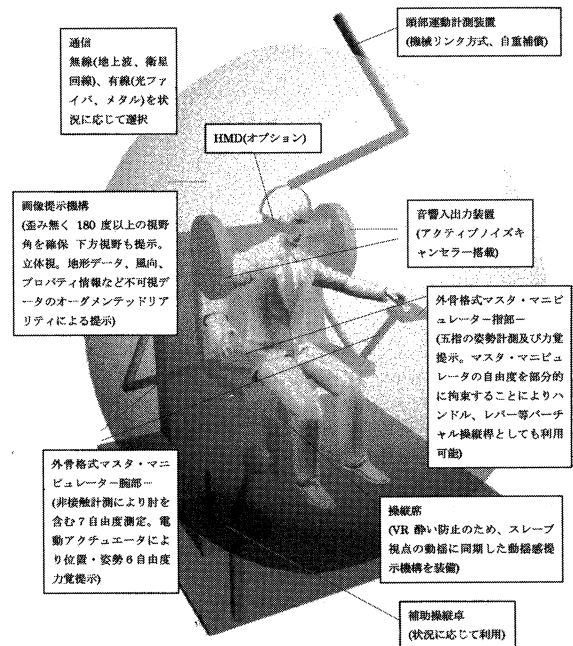


図8 遠隔臨場制御コックピットの仕様例

参考文献

- [1] 館すすむ：人工現実感、日刊工業新聞社、(1992)。
 [2] 館すすむ、広瀬通孝編著：バーチャル・テック・ラボ、工業調査会、(1992)。
 [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] 日本ロボット学会誌、vol.15, no.1, 表紙写真、1997。
 [5] K.Matuda, R.Lea and Y.Honda: "Virtual Society: Multi-use Interactive Shared Space on WWW," Proceedings of the 6th International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence (ICAT'96), pp.83-95, Makuhari, Japan, 1996.
 [6] 新エネルギー・産業技術総合開発機構、日本規格協会：国際標準創世型研究開発平成9年度報告書、(1998)。
 [7] 新エネルギー・産業技術総合開発機構、製造科学技術センター：フレンドリネットワークロボティクス、平成9年度先導研究報告書、NEDO-PR-9706、(1998)。
 [8] <http://www.nedo.go.jp/>

Java を利用した並列分散処理環境における CAE

吉村 忍

トマッシュ・コヴァルチック

1 はじめに

計算力学の発達には目覚ましいものがあり、これまでに汎用解析コードやプレ処理システム、可視化ツールなどの様々なCAEシステムが開発されてきた。これらは人工物の設計・運用において欠かせないツールとして大いに利用されている。一方、現代的な重要構造機器、たとえば原子力構造機器^[1]や電子デバイス、マイクロマシン^[2]などにおいては、その構造設計技術は依然として発展途上にある。その特徴であり解決すべき課題として次の3点が挙げられる。

- (a) 複数の物理現象が連成しながら関与するので、設計作業において連成現象^[3]を考慮する必要がある。しかし、そのための手段が未熟であり、現実の設計において十分に考慮されているとは言い難い。
 (b) 設計作業において確度の高い詳細な評価を行うためには、CPU負荷の高い計算力学解析を繰り返す行

必要がある。しかし、要素分割などのプレ処理の自動化や各解析プロセス間のデータ通信の自動化などがネックとなり、現実にはなかなか難しい。

- (c) 設計変数が多様である。また、最適化、満足化といった設計目標も複合的、非線形、不連続であり、多峰性もある。すなわち、本質的に悪構造(ill-posed)の設計問題となり、数値計画法などの最適化アルゴリズムのみでは不十分である。特に、マイクロマシンのように設計経験の乏しい新人工物の設計においては、設計要求も確定されたものではなく、設計要求と設計解を同時進行的に求めることが必要となる^[4,5]。このため、様々な先験情報をもとにill-posedの問題をwell-posedの問題に変更して解くことも難しい。

第1の課題を解決するには、問題毎に専用の連成解析コードを開発すると考えるのが最も標準的であろう。これは、ある種の強い連成系の場合、必須の作業である。しかし、現実の連成現象のうちかなりの部分は、多様な単機能解析コードを普通の境界条件項や荷重項を介して連携して用いることで解決できるものである。ただし、これまでそうした連携は人手に頼る必要があり、それが設計における連成現象の考慮を困難にする一因である。

第2の課題を解決するには、計算の高速化技術の中でも、並列処理の利用が最も近道である。設計解析において要求されるのは、設計変数の多数の組み合わせについて目的関数や感度係数を評価することである。このため、一つの大規模問題を並列処理する問題^[6-8]と異なり、並列処理単位は明確であり(すなわち設計変数の各組に対する目的関数や感度係数の評価)、しかも通信されるものはわずかに設計変数、目的関数や感度係数の解析結果のみであるので、並列処理の粒度が大きくなる。この

筆者紹介



よしむら しのぶ

1987年3月東京大学大学院原子力工学専門課程博士課程修了。工学博士。1987年4月より同大学原子力工学科講師、助教授、1992年6月より同大学人工物工学研究センター助教授を経て、1995年6月より同大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻助教授。大規模計算力学システム、知的シミュレーション、構健全性・安全性に関する研究・教育に従事。



とまっしゅ・こばるちっく

1995年6月ワルシャワ工科大学大学院構造工学専攻修士課程修了。1995年10月より東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻博士課程在席中。マイクロマシンのためのCAEシステムや複合領域を考慮した最適化手法の研究に従事。