

情報処理 4

VOL.46 NO.4 通巻 482 号 別刷



社団
法人

情報処理学会

Information Processing Society of Japan

<http://www.ipsj.or.jp>

情報科学技術戦略コア

武市 正人	東京大学情報理工学系研究科	takeichi@mist.i.u-tokyo.ac.jp
平木 敬	東京大学情報理工学系研究科	hiraki@is.s.u-tokyo.ac.jp
下山 勲	東京大学情報理工学系研究科	isao@i.u-tokyo.ac.jp
坂井 修一	東京大学情報理工学系研究科	sakai@mtl.t.u-tokyo.ac.jp
杉原 厚吉	東京大学情報理工学系研究科	sugihara@mist.i.u-tokyo.ac.jp
佐藤 知正	東京大学情報理工学系研究科	tomo@ics.t.u-tokyo.ac.jp

情報科学技術戦略コアが目指すもの

情報科学技術は、計算システム中心の学問体系から発したが、いまや科学技術のほとんどすべての分野から私たちの日常生活に至る基礎を形作る学問分野として発展を遂げつつある。その変化に伴い、情報学に関する研究教育拠点には情報科学から機械工学までを含む幅広い分野(コンピュータ科学、数理情報学、システム情報学、電子情報学、知能機械情報学、精密機械工学など)を融合して、未来の実世界に密着した21世紀の情報科学技術分野を確立することが求められる。

21世紀COE「情報科学技術戦略コア」は、東京大学大学院情報理工学系および関連専攻の総力を結集した研究教育拠点であり、このような情報科学技術分野を創造することを目的としている。「情報科学技術戦略コア」の実施にあたっての中心的課題は、情報理工学系研究科および関連専攻で実施されている多くの研究教育に、領域融合的要素、横方向の連携を積極的に導入することにより、新たなレベルで実現する研究拠点を構築することである。この課題を実現するため、情報理工学系研究科5専攻と、工学系研究科精密機械工学専攻における研究アクティビティを3個の方向性に整理してサブプロジェクトを編成した。各研究サブグループ内は、専攻の壁をまったく取り払い、研究内部融合により一層の研究教育の発展を目的として拠点形成を実施した。図-1に拠点の構成を示す。

この情報科学技術戦略コアにおいて、過去2年半の活

動で最も重要なポイントは、拠点における研究教育全般を統括し、戦略的方向性を策定する戦略コアヘッドクォータと、3個のサブプロジェクト、すなわち①実世界情報システムプロジェクト、②大域ディペンダブル情報基盤プロジェクト、③超ロバスト計算原理プロジェクトの3つの融合プロジェクトによる新しい拠点体制が、拠点形成開始後2年間で確立したことである。この、融合し、連携する研究科のあり方は、専攻・講座に縦割りになっていた旧来の研究教育体制を大きく活性化している。

ただし、この成果は研究体制・教育体制にかかわるものであり、目に見えて成果を示せるものではない。本稿では、その融合し、連携する体制を説明するとともに、その結果生まれた著しい成果を示す。

情報科学技術戦略コアの運営

「情報科学技術戦略コア」が2年間で確立した体制では、(A)戦略コアヘッドクォータによるトップダウンな拠点運営、(B)教育面での、知識の体系化と人材養成のための教育還流機能を実現するために、ポスドク・博士課程学生レベルの若手人材を流動還流研究員の任用と各融合プロジェクトにおいて最先端研究の経験を積み重ね、そこで得た知識と知恵を体系・システム化して、大学院低学年および学部教育に反映する自己産出構造、(C)戦略コアヘッドクォータにより密に連携する3個のサブプロジェクトの実施を実現した。

大域ディペンダブル情報基盤プロジェクトでは、グ

ループ単位・研究室単位のシミュレータ、基本ソフトウェア・ミドルウェア、実験的なアプリケーション、ネットワーク実験装置などの集まりである超ディペンダブルテストベッドの開発に向けて、改良・最適化・実用化などを行っている。

超ロバスト計算原理プロジェクトでは、従来のロバスト計算技術を分野横断的な汎用技術として体系化するための課題について検討し、対象の構造一貫性に基づくロバスト計算原理、不確か性のモデル化によるロバスト計算原理、アモルファス結合によるロバスト計算原理の3つに基づいて、計算原理の体系的開発を進めている。

特に、実世界情報システムでは、

1) 人間型ロボットのダイナミック動作、2) 落ちてくるボールを指先で瞬時につまむ捕球タスク、3) 全周囲型VRディスプレイの開発、などの顕著な成果をあげるとともに、擬人化音声対話エージェント開発キットの無償配布を開始するなど、学会以外への情報発信を行った。超ロバスト計算原理においては、1) 離散最適化問題を効率よくかつロバストに解くアルゴリズムの背景にある本質的構造を、離散凸の概念にまとめ、各種離散最適化手法を統一的にとらえる学問体系としての離散凸解析の構築、2) 異常性の前兆検出法の構築、3) 視覚復号型秘密分散法による理論的に保証された安全性、情報セキュリティ確保を実現した。ディペンダブル情報基盤においては、1) ディペンダビリティ向上のためのアーキテクチャ技術とソフトウェア基本技術として、超ディペンダブルCPUを実現するとともに、インターネット等に接続されているサーバコンピュータへの侵入を防ぐための基本技術を開発し、2) WWWからの知的情報抽出・共有技術、時空間MRF技術に基づく高精度画像トラッキング技術、3次元キャラクターに衣服を着せ付けの実現、3) 世界最高速の長距離インターネットデータ転送を実現した。これら特記される成果は、COEプロジェクトによる分野間の有機的結合により生まれたものである。

若手研究者の育成では、常時30名程度の関連博士課程学生を研究補助員(RA)として雇用し研究開発に専念させた。その結果、選抜された優秀な学生は国際会議・論文誌などで顕著な成果発表を行う成果を得た。

上記平成15年までのCOE拠点形成において、研究拠点形成費は主に若手研究者の雇用・補助と全体を連携す

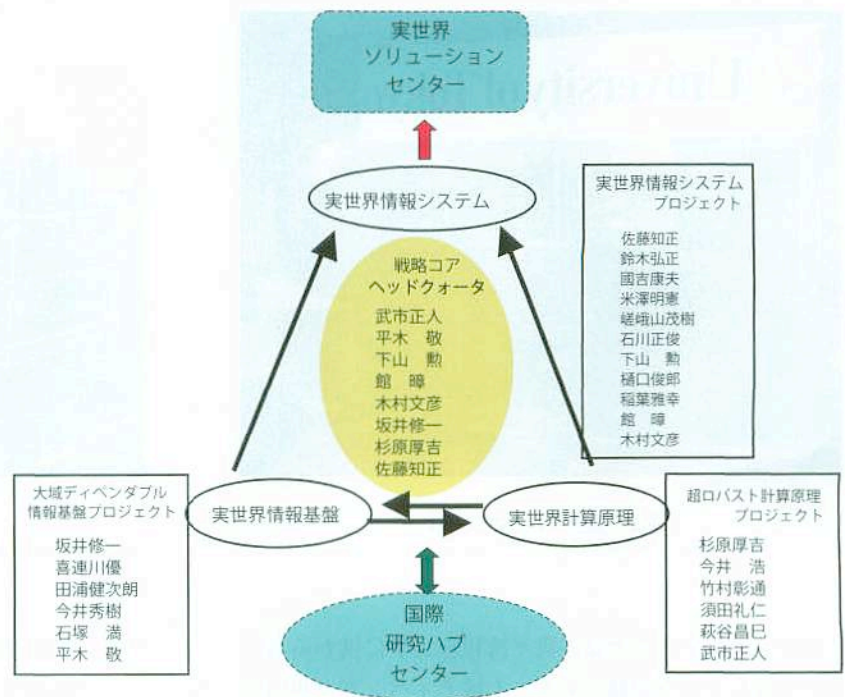


図-1 情報科学技術戦略コアの組織

るための経費として用いられ、研究にかかわる費用は各事業推進担当者が得た科研費および競争的外部研究資金により賄われた。この方式は研究拠点形成費の額からみて、やむを得ないものであったが、一方、科研費および競争的外部研究資金の使用効率を、相互の密な連携により高める効果が得られた。特に、共通的に使用する研究設備の活用や、研究科・専攻を横断的に組織しての研究遂行により、大学における活力のある研究体制が実現した。

本拠点の研究実施状況と研究成果は、常に最新状況を本COEのWebページからインターネットを用いて国内外に発信するとともに、11回開催した国際会議・ワークショップに国内外の著名研究者が参加することにより、実質的な情報の発信を行った。今後は、国際的なCOEネットワーク形成を目的とする国際研究ハブセンターは、国外への情報発信と連携を目的とし、平成17年以降に設置を実現する予定である。

大域ディペンダブル情報基盤融合プロジェクト

「大域ディペンダブル情報基盤」プロジェクトでは、社会が真に依存できる大域のかつ個別的な情報インフラを実現するためのシステム技術および応用技術の研究開発を行っている。ユビキタス系とサーバ系の両方を含む大域分散情報環境において真の意味のディペンダビリティを実現し、現代社会に本当に役立つ大域知能・メデイ

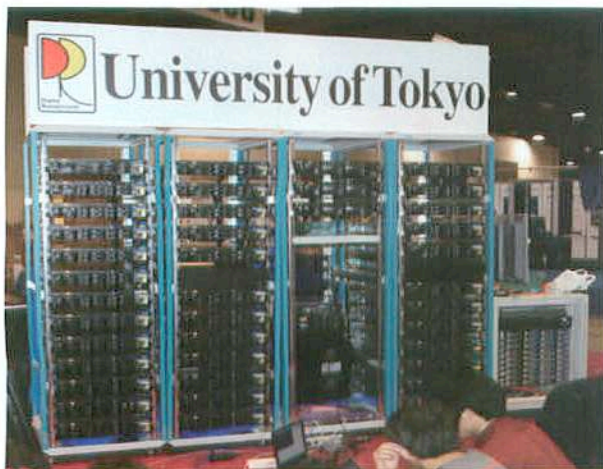


図-2 データレゼボワール



図-3 Phoenixテストベッド

ア環境を実現することは、我々情報理工学に携わる者にとって最も重要な急務である。大域ディペンダブル情報基盤の確立によって、電子政府、防災ネット、遠隔教育、遠隔医療などが可能となる。

「大域ディペンダブル情報基盤」プロジェクトは、次の3点を目標とする。

- ①オープン性、透過性、自動適応性の3つを満足するディペンダビリティ技術の開発
- ②チップアーキテクチャからネットワーク、応用までの要素技術の展開と全体システムとしての統合的・汎用的なディペンダビリティの実現
- ③新世代の大域知能技術、大域メディア技術、ヒューマンインタフェース技術の確立

この目標のもと、本プロジェクトは次の3つのグループが研究開発を行っている。

(1) ディペンダブルアーキテクチャグループ

アーキテクチャレベル（超ディペンダブルからシステムプログラムレベルまで種々の方法を総合して、機械的な意味で壊れない、エラーを発生しないだけでなく、ユーザからの操作やアプリケーションを含めたディペンダブルなシステムを探索する。昨年度よりサーバ向けディペンダブルCPU、エンドユーザ向けディペンダブルCPUの研究開発を行ってきたが、今年度はこれらを軸としつつ、高信頼HPCクラスタの研究、超高速IDS（侵入検知システム）向けネットワークプロセッサが加わった。これにより、総合的な並列分散システムをめざしたディペンダブルアーキテクチャへと大きな展開を見せている。

(2) ディペンダブルシステムグループ

ディペンダビリティを達成するためのネットワーク技術、基盤ソフトウェア技術を中心に研究を行う。研究テーマには、ユビキタスネットワーク、ネットワークセキュリティの基盤技術、ヒューマンクリプトに基づく暗号系、

セキュアなプログラミング言語、セキュアな計算システム、高性能ストレージ・コンピューティングなどが含まれる。

(3) 大域知能・メディアグループ

新世代意味処理技術やマルチメディア技術によって、ネットワーク上の情報を結集して人類の抱えている難問の解決や、新たな知である大域知能の創造の実現を目指して研究を行う。言語メディア技術の研究、画像メディア技術の研究、ヒューマンインタフェース技術の研究の3つの分野があり、それぞれに基礎研究と実用に向けたプロトタイプシステムの開発が行われている。

プロジェクト中盤となって、各グループとも顕著な成果があがっているが、ここではディペンダブルシステムグループの2つの成果について紹介する。

1つは、超遠距離・超拘束ネットワークによるデータ共有システム「データレゼボワール」(図-2)の研究開発であり、TCP通信におけるレイヤー間協調最適化技術により31,248kmのインターネット（単一TCP通信）で7.21Gbpsの転送速度（世界記録）を達成した。これにより国際会議Supercomputingにおいて、2002年から2004年の3年連続で、Bandwidth Challenge Awardを受賞するとともに、米国Internet2からLand Speed Recordとして認定された¹⁾。データレゼボワールは、実用システムとして、東京大学と複数の研究所間で運用されている。

もう1つは、並列分散処理のためのミドルウェアPhoenixの研究開発である。Phoenix²⁾は、ネットワークをまたがった数千台規模以上の性質の異なるコンピュータをつなぎ、全体として統一的に並列計算を実行するためのミドルウェアであり、実際に1,000台規模のPCクラスタ群を用いて、複雑問題の解決を行っている(図-3)。Phoenixは、動的な資源選択（スケジューラ）、高負荷ノードからの移動（マイグレーション）、動的な

資源の追加、削除・遅延に強いアルゴリズム・システム、故障ノードの回避などの機能を持つ大域ディベンダブルミドルウェアとなっている。

超ロバスト計算原理プロジェクト

実世界情報処理において、計算はさまざまな外乱にさらされる。そのような外乱をできるだけ避け、万一外乱が生じても安定して動作するロバスト計算手法を、分野横断的な計算原理へと統合し、それを実世界情報処理へ応用することが、本プロジェクトの目的である。以下には、その中の代表的な2つの研究活動を紹介する。

連続と離散の融合によるロバスト計算

連続世界における知見と離散世界における知見の間を行き来することによって、ロバストな計算体系の拡大をはかるとともに、新しいロバスト計算技術を構築することを目指している。

この方向の代表的研究活動の1つが、離散凸解析の体系化とその応用である。連続世界における最適化計算では、凸性が重要な役割を演じている。実際、探索領域と目的関数が共に凸性を持つならば、現在地からより良い方向へ移動することによって最適化が達成される。すなわち、局所的改良を続けさえすれば、大域的な最適点に到達できることが保証されている。

一方、離散世界における最適化は一般に難しい。組合せ爆発を起こさないという意味で効率のよいアルゴリズムも種々の場面で開発されてきてはいたが、それらは個別の計算技術であり、離散世界を横断的に眺めることのできる体系からはほど遠いものであった。

その中で、効率のよい最適化アルゴリズムの背景にマトロイド性や劣モジュラー性などの共通の構造が潜むことが次第に認識されるようになった。そして、その流れの中から、連続世界の凸性に対応する離散世界での性質、すなわち離散凸性の構造が解明されてきている。この離散最適化研究の世界的潮流の1つの頂点に立っているのが、我々の研究グループである。

特に、連続世界から離散世界へ移るとき、値の離散性だけでなく方向の離散性も重要であるという認識と、それから生まれる2種類の離散凸性を基礎として、離散凸関数のクラスの階層を構築するとともに、連続世界で重要な共役性と双対性が離散の世界でもいろいろな形で成立することを明らかにしてきた³⁾。

また、これらの理論構造に立脚して、ネットワークの最小費用流問題を劣モジュラー流問題へ一般化し、それを解くアルゴリズムも構成した。さらに、最近では数理経済学などへの応用も展開している。

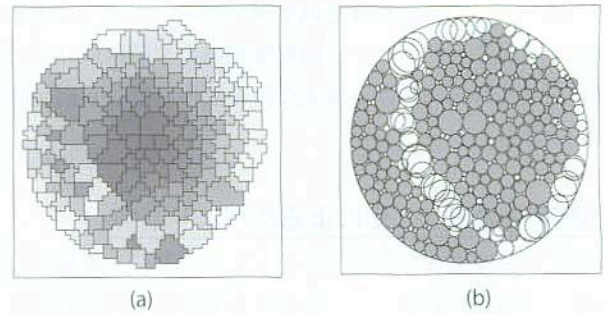


図4 デジタル画像近似を利用した円ポロノイ図の計算

これらの研究活動の評価の例として、岩田覚らは、劣モジュラー関数最小化アルゴリズムの業績⁴⁾によりFulkerson賞を受賞し、室田一雄は離散凸解析の体系化の業績により井上學術賞を受賞している。

幾何アルゴリズムの分野でも、連続と離散の融合による新しいロバスト計算技術を構築した。幾何アルゴリズムは、一般に位相構造の判定を多く含み、数値誤差によってこの判定を誤ると、矛盾が生じてアルゴリズムが破綻するという脆弱性を持っている。

この困難を克服するために、数値計算より位相構造の一貫性を優先することによって矛盾の発生を防ぐ方法を「位相優先法」と名づけて世界に先駆けて提唱し、その体系化を図ってきている。

しかし、この位相優先法は、計算対象の位相的性質を利用してロバスト性を確保しようとするものであるため、問題ごとに対象の性質を検証しなければならず、初心者には使いにくい技術であった。

この困難を克服するために、幾何構造のデジタル画像近似を利用した新しい位相優先法を開発しつつある。これは、今までボトルネックとなっていた個別の問題ごとの位相的性質に頼るのをやめて、まず問題をデジタル画像の形式で近似的に解き、その離散構造から得られる位相を解の位相構造の近似とみなして、位相優先法を用いる方法である。多くの幾何問題に対して、デジタル画像近似は比較的容易に得られるため、これによって問題ごとの個別の位相抽象の煩わしさを取り除くことができ、位相優先法を使いやすい技術へと進化させることができた。

図-4に示すのは、デジタル画像近似を利用した幾何計算の例である。これは、円形の容器の中に互いに重ならないように置かれた多数の円板を動かすシミュレーション計算の一場面である。円板が移動して他の円板にぶつかって止まる位置の候補をできるだけ小数に絞るために、円板の間の隙間の構造を認識したい。このために、まず、与えられた円板の配置に対して、その円ポロ

ノイ図のデジタル画像近似を同図の (a) のように求め、次に、それから円ポロノイ図の位相構造を読み取り、それによって隙間に置ける極大な円を求めた結果が同図の (b) である。

不確実性のモデル化によるロバスト計算

現実のさまざまな現象をモデル化の際に、現象のどの部分を確定的に扱い、どの部分を非確定的に扱うかという切り分けが重要である。しかし、その切り分けは自明なものではない。たとえば時系列解析1つをとりあげても、統計学で扱う時系列モデルのほかにもカオスに代表される非線形システムに基づいた解析を用いることもできる。

このように、モデルにおける確定的な部分と非確定的な部分の切り分け、さらに非確定的な部分の扱いのバリエーションを考慮すれば、現象のモデル化においてさまざまなアプローチが可能であり、ロバスト性の観点、すなわち与えられた現象へのモデルの安定的な適合と予測の観点から、多くの方法論を統一的に比較し優れたモデルを選び出す指針を与えることが重要である。

このような目標に沿った研究成果の1つは、確率場の理論の応用である。近年になって、空間的な拡がりを持ったデータ解析が重要となってきている。空間データ解析の基礎理論となるのは、時系列解析の添字を多次元に拡張した確率場の理論である。確率場の理論は、確率論と幾何学の境界領域にあり、双方の道具を駆使して新たな展開が得られている。

ガウス確率場の理論においては、最近になって「オイラー標数法」や「チューブ法」などの方法が急速に発展しており、我々の研究グループおよびその共同研究者によって多くの成果が得られている。特に2003年秋にはこのグループによって完全に一般的な設定のもとでオイラー標数法の近似の精度を保証する結果が得られ、永年の懸案であったオイラー標数法の正当化が与えられたことは重要な結果である。

揺動散逸原理に基づく時系列解析の分野では、揺動散逸定理の連続時間への拡張などの理論的成果とともに、実際の時系列データの定常性・異常性・因果性・決定性を検証する手法を開発している。そしてこれらの手法を地球科学・治水工学・医学・金融工学等の広い応用分野への応用を進めている。これまで、非平衡統計物理学における揺動散逸定理の数学的構造を調べ、退化した弱定常過程に対するKM20-ランジュヴァン方程式論を建設し、Masani and Wiener以来未解決であった強定常過程に対する非線形予測問題を解決した。さらに、揺動散逸定理を時系列解析の指導原理として、時系列の定常性・異常性・因果性・決定性を検証するいくつかのテスト手

法を提案し、これらのテストを実行する統合化システムを開発し、このシステムをさまざまな分野の問題に適用している。

実世界情報システムプロジェクト

実世界情報システムプロジェクトでは、人間を中心とする情報システムの実現を通じ、実世界情報学を展開することをねらっている。具体的には、人間、ヒューマノイド、エージェント、ユビキタスアプライアンスが共棲する実世界情報学環境を構築し、ロボティクス、バーチャルリアリティ、音声音響処理、センサ・アクチュエータ技術などの融合的 [S. S.] 研究を推進している。

実世界情報システムプロジェクトでは、人とインタラクションする知的存在が、情報世界の中ではエージェントとして人に寄り添い、実空間ではヒューマノイドロボットやセンサ・アクチュエータを備えたユビキタスアプライアンスとして、バーチャルリアリティの世界ではアバターとしてシームレスにつながり、人間と共棲する環境とそこでの新しい人間とシステムのインタラクションの実現による解明を目指している。

このような知的環境構築の社会的な意義は、来たるべきユビキタス社会での人間活動のプロトタイプを示すことにあり、また科学的な意味は、実世界情報システムと人間との関係の分析を通して人間の認識と行動のモデルを得ることにある。このプロジェクトの特徴は、人との新しいインタラクションに関する情報科学技術を、人への情報サービスのみでなく動きを伴う物理サービスも対象とした、人とシステムの新しいインタラクション機能の研究を通して追及している点にある。

本プロジェクトでは、図-5に示すような知的環境を実現する⁵⁾。ここでは、日常動作を認識する情報エージェントが人を見守っていて、自然な対話ができるバーチャルリアリティ (VR) システムが人に働きかけ、複雑な作業をこなせるヒューマノイドロボットが人に歩み寄ってきて、さらに将来の情報家電としてのユビキタスアプライアンスが人に手を差し伸べる環境が実現される。本プロジェクトでは、このような環境の構築と高度化と並行して、この環境における人間とシステムの相互作用を明らかにすることをその目的としており、これらの研究を通じて実世界情報学の展開をはかる。

実世界情報システムプロジェクトにおいては、実世界の物理的な接触を伴う情報技術において新しい技術開発が求められている。特に、人間と直接身体接触を伴うことになるヒューマノイド型ロボットにおいては、人へ危害を加えないように柔軟性を備えたロボット構成技術が不可欠となる。ヒューマノイドは世界において日本が突



図-5 実世界情報システム環境のイメージ

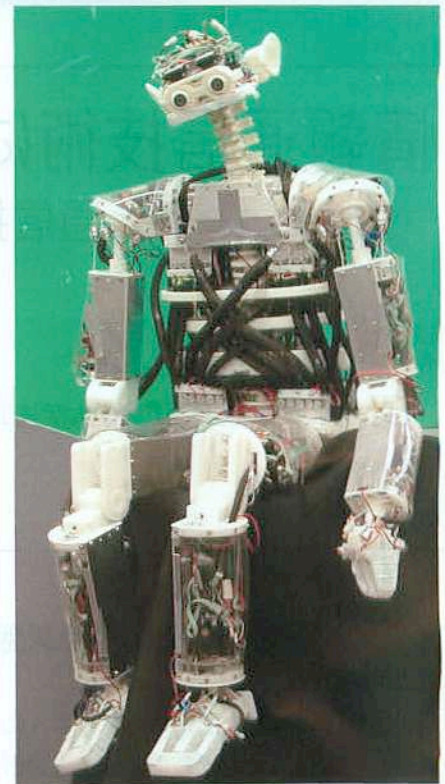


図-6 背骨を持つヒューマノイド

出した情報技術の成果として開発がなされているものであり、二足歩行し、走り、動作することが一般化してきている。視覚や聴覚機能を持って状況理解をふまえた動作が可能となるように、運動機能へシステム統合化されつつあり、高次の認識判断は高次ソフトウェアに対する高度な情報技術が不可欠となるものである。

現在の一般のヒューマノイドは、通常の機械のように剛性の高い構造物が情報技術によって環境に適応して柔軟に動くことができている。しかし、将来は機械のように剛性の高い身体構造部品だけでなく、動物が持つような柔軟性のある身体構造を持たせることで、人との接触時の安全性や動きのしなやかさを高めることが求められている。図-6は、脊椎を持ち筋肉型アクチュエータによって人間に似た身体構造を持つ等身大ヒューマノイドである⁶⁾。アクチュエータの数が100近く、視聴覚、筋張力、触覚、姿勢センサなどの感覚動作系要素数の数が数百以上で、それらをローカルに信号処理し、動作制御するために小型マイクロプロセッサが数十個体内に組み込まれ、それらが身体外部のブレイン用プロセッサと接続して、全身の柔軟な運動制御が可能となっているものである。このような複雑な身体構造であっても、実物に即した身体モデリングとそのシミュレーション技術は実世界情報システムプロジェクトの中核的情報技術の独壇場となっており、ヒューマノイドメーカー、公的研究機関への技術移転がなされているものとなっている。

さらなる融合・連携をめざして

情報科学技術戦略コアが発足して2年半が経過した。本稿では3つの融合プロジェクトによる研究成果を中心

に活動を述べた。これらの成果は、それぞれが世界のトップレベルのものであるが、COEとしての重要性はこれらが、互いに融合するプロジェクトの結果として得られた点にある。今後の2年間で分野間の連携・融合をさらに促進し、情報科学技術分野として一体感のある拠点を構築することが私たちの課題である。

参考文献

- 1) Kamezawa, H., Nakamura, M., Tamatsukuri, J., Aoshima, N., Inaba, M., Hiraki, K., Shitami, J., Jinzaki, A., Kurusu, R., Sakamoto, M. and Ikuta, Y.: Inter-Layer Coordination for Parallel TCP Streams on Long Fat Pipe Networks, Proc. SC2004, Pittsburgh, 2004. <http://www.sc-conference.org/sc2004/schedule/pdfs/pap254.pdf> Also, see <http://lsr.internet2.edu/>
- 2) Taura, K., Kaneda, K., Endo, T. and Yonezawa, A.: Phoenix: A Parallel Programming Model for Accommodating Dynamically Joining/Leaving Resources, ACM SIGPLAN Symposium on Principles and Practice of Parallel Programming (PPoPP) (2003).
- 3) Murota, K.: Discrete Convex Analysis, SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, Vol.10, SIAM, Philadelphia (2003).
- 4) Iwata, S., Fleischer, L. and Fujishige, S.: A Combinatorial Strongly Polynomial Algorithm for Minimizing Submodular Functions, Journal of the ACM, 48 (2001), pp.761-777.
- 5) Mori, T., Shimosaka, M., Harada, T. and Sato, T.: Recognition of Actions in Daily Life and Its Performance Adjustment Based on Support Vector Learning, International Journal of Humanoid Robotics, Vol.1, No.4 pp.565-583 (2004).
- 6) Inaba, M., Mizuuchi, I., Tajima, R., Yoshikai, T., Sato, D., Nagashima, K. and Inoue, H.: Building Spined Muscle-Tendon Humanoid, Robotics Research: The Tenth International Symposium, pp.113-130, Springer Verlag (2003).

(平成17年3月1日受付)