北野共生システムプロジェクトの研究成果

目次

1. 理論システムバイオロジーの提唱・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2

2. システムバイオロジー基盤ソフトウエアの開発・・・・・・・・・・・・・ 4

3. 線虫発生系譜自動解析システムの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7

4. 生物におけるロバストネス理論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9

5. ロボットデザインと OpenPINO・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ １１

6. ヒューマノイド認知・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ １３

7. 小型高性能ヒューマノイド morph の開発・・・・・・・・・・・・・・・ １７

1. システムバイオロジーの提唱

システムバイオロジーという新たな分野を提唱し、一連の研究、普及活動を行い、この分野の立ち上げに大きな貢献をした。

研究成果の概要

システム・バイオロジーとは、システムレベルでの生命の理解を目指す生物学の一分野である。我々が理解しようとしているいろいろな生命現象は、遺伝子や代謝ネットワークのダイナミクス、細胞内のいろいろな構造、細胞間のシグナル伝達などによって成り立っている。この巨大で複雑な遺伝子の発現制御、代謝反応、信号伝達のネットワークと細胞構造などを「システムとして理解する」事がこれからの生物学の中心的課題である。この「システムとして理解する」ことは、以下の 4 段階の理解が必要になるということである。

システム構造同定：まず、システムの構造を網羅的かつ体系的に特定することが重要な課題になる。この構造は、遺伝子・代謝ネットワークだけではなく細胞内構造や染色体の核内での構造も含まれる。実験データからネットワークの構造と主要なパラメータの推定が最大の問題である。データとしては、一般的な分子生物学での実験データや、最近可能となった DNA Chip やマイクロアレイからの発現プロファイルや RT-PCR のデータなどが基盤となるが、より高精度な手法の開発も重要である。

システム分析：完全に解明はできていなくとも、ある程度、解明されたネットワークに対して、その動特性の理解を行う。ここで対象となるシステムの動的システムとしての特徴が、定量的、定性的に理解される。

システム制御：その次の段階では、与えられたネットワークの制御および、望む状態へ導くための操作手法の設計手法の確立が重要になる。これは、異常な状態にある細胞を、一連の操作によって、正常な状態に誘導することなどが含まれる。

システム設計：さらに、究極的には、望む機能を有する遺伝子ネットワークの設計・改変手法の確立が望まれるであろう。

成果の展開可能なシーズ、用途等

各個人の遺伝的個性や細胞の代謝状態のダイナミクスを考慮し、シミュレーションに基づく高度な個別医療や予防医療への展開（個人の疾病リスクのより精密な見積もりや予防、より適切な健康管理、治療効果の向上、副作用の少ない治療などの実現など）

特許出願

なし

論文、報告書等

1) Kitano, H. Perspectives on systems biology. New Generation Computing Journal. 18(2000) 199-216, Ohmsha, Ltd. and Springer-Verlag, 99-216, 2000.
2) Kitano, H. Systems Biology: A Brief Overview. Science. 295, 1662-1664, 2002.
3) Doyle, J.; Csete, M. Reverse Engineering of Biological Complexity. Science. 295, 1664-1669, 2002.
4) Kitano, H. Looking beyond the details: a rise in system-oriented approaches in genetics and molecular biology. Current Genetics, 41, 1-10, 2002.
5) Kitano, H. Computational systems biology. Nature. 420, 206-210, 2002.
6) 北野宏明. システム・バイオロジー概論. 人工知能学会誌. 15, 11-20, 2000.
7) Kitano, H. "Life sciences need systems approach." The Nikkei Weekly, Nov. 6, 2000, Editorial & Opinion.
8) Kitano, H. ed. Foundations of Systems Biology. The MIT Press, 2001.
9) Kitano, H. "Systems Biology: Toward System-level Understanding of Biological Systems." Foundations of Systems Biology, Kitano, H. ed., MIT Press, 2001, 1-36.
10) 北野宏明; et al. システムバイオロジーの展開. 北野宏明 ed., シュプリンガー・フェアラーク東京, June 2001.
11) 北野宏明. "システムバイオロジー概論." システムバイオロジーの展開, 北野宏明 ed., シュプリンガー・フェアラーク東京, June 2001, 3-21.
12) 北野宏明. システムバイオロジー. 秀潤社, July 2001.

〔研究者名〕北野 宏明、John Doyle

2.　システムバイオロジー基盤ソフトウエアの開発

システムバイオロジーの研究に必要な一連のソフトウエア基盤（SBW）、モデル表現標準言語（SBML）などの開発を行った。SBML は、この分野での事実上の標準となり、多くのソフトウエアで既に採用されている。SBW は、複数の GUI、数値計算エンジン、解析モジュールを有機的に連動させる枠組みであり、現在、急速にその価値が認められ、対応ソフトウエアが増えている。（図１）

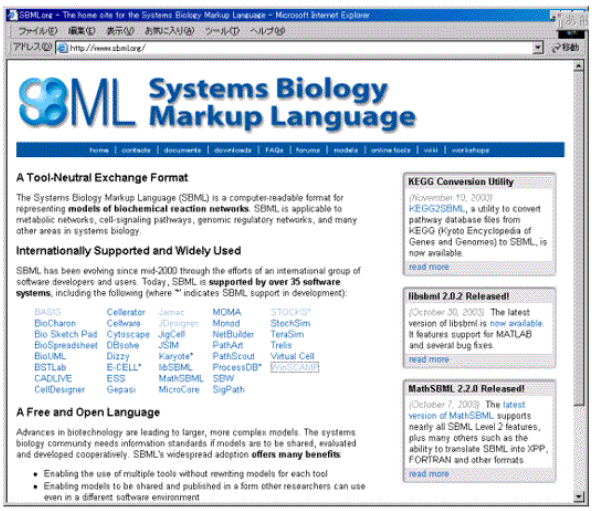

図１　Systems Biology Markup Language の website

研究成果の概要

システムバイオロジーのソフトウェア的基盤については以下のようなシステムが必要であると考えられる。

①データ収集・データベース・システム

実験データを収集し、データベース化し、この統合環境で利用できるように整備するシステム

②遺伝子回路推定システム

発現プロファイルなど実験データから、遺伝子回路を推定するシステム

③パラメーター推定システム

実験データから、遺伝子回路のパラメーターを推定するシステム

④シミュレーター

モデルの挙動をシミュレーションするシステム

⑤挙動解析システム

シミュレーションと連動し挙動の解析を行うシステム

⑥実験計画立案システム

遺伝子回路の推定結果などから、実験計画の示唆を行うシステム

さらに、これらのソフトウェア群でデータやモデル定義を相互に利用可能にするために、標準モデル表現系が必要である。従来までは、各々の研究グループが独自のソフトウェアを開発していたため、モデル記述がばらばらであり、再利用や流通、さらには研究結果の検証が困難であった。また、幅広い解析ニーズに応えることができるソフトウェアを一つのグループが開発することも現実的ではない。そのため、モデル表現の国際標準としての Systems Biology Markup Language(SBML）、さらには基盤ソフトウェア・プラットフォームとしての Systems Biology Workbench(SBW）の開発が、国際共同プロジェクトとして行われている(http://www.sbml.org/)。

成果の展開可能なシーズ、用途等

各個人の遺伝的個性や細胞の代謝状態のダイナミクスを考慮し、シミュレーションに基づく高度な個別医療や予防医療への展開（個人の疾病リスクのより精密な見積もりや予防、より適切な健康管理、治療効果の向上、副作用の少ない治療などの実現など）

特許出願

1) 特願平 11-160672(1999/06/08)遺伝子の制御因子の結合部位構造推定方法及びその装置
2) 特願平 11-174426(1999/06/21)遺伝子制御・代謝ネットワーク推定装置
3) 特願平 11-372936(1999/12/28) ネットワーク推定方法
4) 特願 2002-542065(2003/04/08)遺伝子ネットワーク推定方法
5) 特願 2001-388414(2001/12/20)代謝回路情報処理方法、代謝回路情報処理装置、プログラム、および、記録媒体
6) 特願 2002-024317(2002/01/31)生体分子回路設計方法、生体分子回路設計装置、プログラム、および記録媒体

論文、報告書等

1) Kitano, H. Standards for modeling. Nature Biotechnology. 20, 337, 2002.
2) Hucka, M.; Finney, A.; Sauro, H.M.; Bolouri, H.; Doyle, J.C.; Kitano, H. et al. The systems biology markup language (SBML): a medium for representation and exchange of biochemical network models. Bioinformatics. 19, 524-531, 2003.
3) Funahashi, A.; Morohashi, M.; Kitano, H.; Tanimura, N. CellDesigner: a process diagram editor for gene-regulatory and biochemical networks. BioSilico. 1, 159-162, 2003.
4) Sauro, H.; Hucka, M.; Finny, A.; Wellock, C.; Bolouri, H.; Doyle, J.; Kitano, H. Next Generation Simulation Tools: The Systems Biology Workbench and BioSPICE Integration. Omics. 7, 355-372, 2003.
5) 舟橋啓; 諸橋峰雄; Hucka, M.; Finney, A.; Sauro, H.; Bolouri, H.; Doyle, J.; 北野宏明. システムバイオロジーにおけるソウトウェア基盤. Nature. 423, Insight, 48-57, 2003.
6) Hucka, M.; Finney, A.; Sauro, H.; Bolouri, H.; Doyle, J.; Kitano, H. The ERATO Systems Biology Workbench:Architectural Evolution. ICSB2001, Caltech, Nov. 4-7, 2001.
7) Finney, A.; Hucka, M.; Sauro, H.; Bolouri, H.; Doyle, J.; Kitano, H. The Systems Biology Markup Language (SBML): A Standard for the Exchange of Biochemical Network Models. ICSB2001, Caltech, Nov. 4-7, 2001.
8) Funahashi, A.; Kitano, H. CellDesigner: Biochemical network editor. SBML/SBW Forum, USA, May 11, 2003.
9) Funahashi, A.; Kitano, H. Current implementation of CellDesigner and KEGG to SBML converter. First SBML Hackathon, Virginia, USA, July 28-Aug. 1, 2003.

10) Hucka, M.; Finney, A.; Sauro, H.; Bolouri, H.; Doyle, J.; Kitano, H. "The ERATO Systems Biology Workbench: An Integrated Environment for Multiscale and Multitheoretic Simulations in Systems Biology." Foundations of Systems Biology, Kitano, H. ed., MIT Press, 2001, 125-143.
11) 諸橋峰雄; Hucka, M.; Sauro, H.; Finney, A.; Bolouri, H.; Doyle, J.; 北野宏明. "システムバイオロジーワークベンチ." システムバイオロジーの展開, 北野宏明 ed., シュプリンガー・フェアラーク東京, June 2001, 25-36.
12) 諸橋峰雄. "SBML と SBW: ソフトウェアの統合と標準化". Computer Today, 108, 2002, 8-13.
13) 舟橋啓. "ソフトウェアの統合と標準化の基盤, SBML と SBW." 蛋白質 核酸 酵素, 48, 2003, 810-816.
14) Kyoda, K.; Kitano, H. Simulation of genetic interaction for Drosophila leg formation. Pacific Symposium on Biocomputing '99. Hawaii, 77-89, 1999.
15) Kyoda, K.; Muraki, M.; Kitano, H. Construction of a generalized simulator for multi-cellular organisms and its application to SMAD signal transduction. Pacific Symposium on Biocomputing. 317-328, 2000.
16) Kyoda, K.; Morohashi, M.; Onami, S.; Kitano, H. A gene network inference method from continuous-value gene expression data of wild-type and mutants. Genome Informatics 2000. University Academy Press, 196-204, 2000.
17) Morohashi, M.; Kitano, H. Identifying gene regulatory network from time series expression data by in silico sampling and screening. Advance in Artificial Life. Springer-Verlag, 477-486, 1999.

〔研究者名〕北野 宏明、宮野 悟、舟橋 啓、諸橋 峰雄、京田 耕司、John Doyle、Mike Hucka、Andrew Finney、 Herbert Sauro

3.　線虫発生系譜自動解析システムの開発

線虫の発生過程での各細胞の分裂や位置情報を自動的に認識し、データ化するシステムを開発した。従来、膨大な時間がかかっていた作業が、自動化され数時間で可能となった。また、定量性・網羅性が高まり、表現形の見逃しが無くなると共に、その有意な違いが統計的に確定できるようになった。発生生物学の方法論に、大きなパラダイムの変化を与えることが期待される。本研究は、JST BIRD 大浪プロジェクトに引き継がれている。（図２）

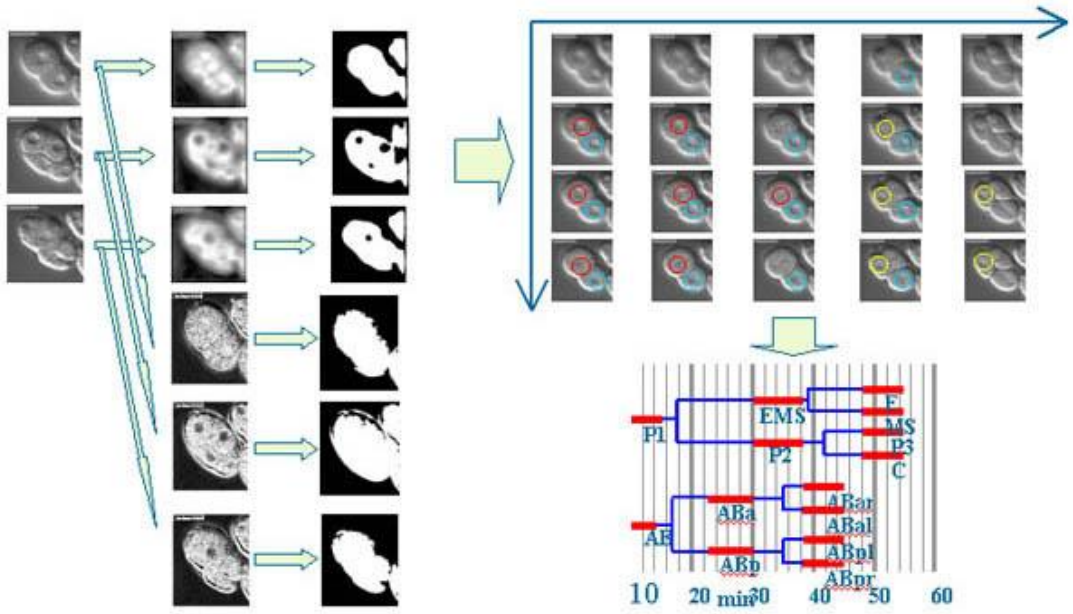

図２　線虫の細胞系譜自動生成

研究成果の概要

細胞系譜とは、受精卵からの細胞分裂のパターンを樹形図状に記述したものである。線虫では 1983 年に受精卵から成虫までの全細胞系譜が同定されて以来、野生型－突然変異型間の細胞系譜比較による遺伝子機能解明などに利用されてきた。1983 年当時は、細胞系譜の計測は顕微鏡観察のスケッチによる記録という原始的な手法で、1993 年発表の四次元顕微鏡撮影装置、1997 年発表の細胞系譜作成支援 GUI ツールにより細胞系譜計測はいまだに労力のかかる作業である。

これに対し、本研究では、受精卵から約 25 細胞期までの細胞系譜の自動計測が可能な装置の開発に成功した。装置はノマルスキー型微分干渉顕微鏡による四次元顕微鏡撮影を用いて線虫の細胞系譜を計測する。つぎに、画像群に含まれる個々の画像ごとに、画像中に存在する細胞核の領域を自動認識する。細胞核の画像的特徴を利用して受精卵から約 25 細胞期までの細胞核を 100%認識する。最後に、上記ステップで認識された細胞核の領域の座標情報をもとに、細胞系譜を作成する。各時点ごとに個々の核の重心座標を計算し、これらの重心座標の時間推移、分裂の情報を細胞系譜テキストデータとして出力する。

成果の展開可能なシーズ、用途等

医学、創薬（発生異常を誘発する薬剤のスクリーニング、突然変異により奇形を誘発する遺伝子のスクリーニングおよびその基礎研究、再生医学分野で重要な遺伝子のスクリーニングおよびその基礎研究)、食品、農学（有用多細胞動植物における有用遺伝子のスクリーニングおよびその基礎研究）

特許出願

1）特願 2000-81526(2000/04/27）細胞系譜自動抽出システム
2）特願 2000-128457(2000/04/27）細胞系譜抽出方法
3）特願 2000-367632(2000/12/01）エントロピーフィルタ及び該フィルタを用いた領域抽出法
4）特願 2002-547108(2000/12/01）核領域認識法および細胞系譜作成法

論文、報告書等

1) Yasuda, T.; Bannai, H.; Ohnami, S.; Miyano, S.; Kitano, H. Toward automatic construction of cell-lineage of C. elegans from nomarski DIC microscope images. Genome Informatics 1999. University Academy Press, 144-154, 1999.
2) Onami, S.; Hamahashi, S.; Nagasaki, M.; Miyano, S.; Kitano, H. "Automatic acquisition of cell lineage through 4D microscopy and analysis of early C. elegans embryogenesis." Foundations of Systems Biology, Kitano, H. ed., MIT Press, 2001, 39-55.
3）大浪修一; 濱橋秀互; 北野宏明. "線虫の細胞系譜の自動計測." システムバイオロジーの展開, 北野宏明 ed., シュプリンガー・フェアラーク東京, June 2001, 97-105.
4）大浪修一; 濱橋秀互; 長﨑正朗; 宮野悟; 北野宏明. "線虫 C. elegans 初期胚のコンピューター解析". 遺伝子医学, 2001, 529-533.
5）大浪修一; 北野宏明. "線虫 C. elegans 初期胚発生メカニズム解明に向けてのシステムバイオロジー戦略." 医学のあゆみ, 医歯薬出版, 2001, 835-840.
6）大浪修一. "線虫 C. elegans の胚発生シミュレーションへの挑戦." Computer Today, 108, 2002, 14-19.

〔研究者名〕北野 宏明、大浪 修一、濱橋 秀互

4. 生物におけるロバストネス理論

細胞周期、概日周期、大腸菌の化学走性、酵母のフェロモン応答などを取り上げ、生物の持つロバストネスの理論解析を行った。その結果、ロバストネスを実現しているいくつかの原理的構造が特定されるとともに、ロバストネスなシステムを意図的に脆弱にしたりする制御アプローチへと発展した。これらの成果を基盤に、生物学的ロバストネスの理論の研究が発展的に継続している。

研究成果の概要

システムバイオロジーの研究では、細胞などの生命システムがどのようにその機能を実現しているのか、進化させてきたのか、さらにそれらのシステムのロバストネスがどのように達成されているかが重要な問題となる。多くの場合、生体のダイナミックな反応の背後にあるのはロバストネスであり、これは、①環境変化に対する適応(adaptation)、②パラメータ非依存生(parameter insensitivity)、③内部損傷に対する段階的機能低下(graceful degradation)という現象としてあらわれる。それらを実現させる機構は大別して、①システム制御（フィードバックやフィードフォワード)、②冗長性、③モジュール構造、④構造的安定性などを使って実現している。すでに、いくつかの先進的研究が実際の生命システムでの解析をおこなっている。環境適応については、大腸菌の化学走性の研究、パラメータ非依存性に関してはショウジョウバエの初期発生の安定性、さらには、細胞周期やサーカディアンリズムの安定性、λファージの遺伝子スイッチの構造安定性など、多くの研究が行われている。 また、ガンや糖尿病などの疾病をロバストネスの観点から理論的に解析した。

成果の展開可能なシーズ、用途等

特許出願

論文、報告書等

1) Kitano, H, Tumour Tactics, Nature, 426(6963): 125, 2003

2) Kitano, H., Cancer as robust systems, Nature Reviews Cancer, 2004.

3) Ueda, H.; Hagiwara, M.; Kitano, H. Robust Oscillations within the Interlocked Feedback Model of Drosophila Circadian Rhythm. Journal of Theoretical Biology. 210, 401-406, 2001.

4) Kubota, Y.; Bower, J. Transient and versus Asymptotic Dynamics of CaM Kinase II: possible roles of phosphatase. Journal of Computational Neuroscience, 2001.

5) Morohashi, M.; Winn, A.; Borisuk, M.; Bolouri, H.; Doyle, J.; Kitano H. Robustness as a Measure of Plausibility in Models of Biochemical Networks. Journal of Theoretical Biology. 216, 19-30, 2002.

6) Yi, Tau-Mui.; Kitano, H.; Simon, M. A quantitative characterization of the yeast

heterotrimeric G protein cycle. Proc. Natl. Acad. Sci. 100, 10764-10769, 2003.
7) Kurata, H.; Taira, K. Complexity in Regulation Generates Robustness in Bacterial Molecular Networks. The proceedings of the First International Conference on Systems Biology 2000, 167-172.
8) Kurata, H.; El-Samad, H.; Yi, T.-M.; Khammash, M.; Doyle, J. C. Feedback regulation of the heat shock response in E. coli. Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, 2001, 837-842.
9) El-Samad, H.; Khammash, M.; Kurata, H.; Yi, T.-M.; Doyle, J. C. Robustness Analysis of the heat shock response in E. coli. Proceedings of the American Control Conference, Anchorage, AK, 2002, pp. 1742-1747.

〔研究者名〕北野 宏明、Mark Borisuk、Tau-Mu Yi、広井 賀子、諸橋 峰雄

5. ロボットデザインと OpenPINO

ロボットの商業的成功のためには、技術的基盤が広く普及し多様なアイデアが出されることと、消費者やクライアントに受け入れられるデザインの確立が重要である。しかし、従来これらの課題は、ほとんど注意が払われてこなかった。そこで、工業製品としてのロボットデザインの研究や、簡単なヒューマノイドの技術情報のオープンソース化など、商業化を推進する活動を行った。この結果、ベネチア芸術祭やニューヨーク近代美術館で招待展示されるなど、ロボットデザインという分野が生み出され、認知された。また、公開された技術情報は、多くの企業、研究者、教育機関で活用されている。また、プロジェクトからのスピンアウトのベンチャー企業も 2 社誕生した。(図３)

図３　ヒューマノイドロボット PINO

研究成果の概要

ヒューマノイド・ロボット PINO の基本機構は、極めて短期間に開発する事に成功し、2000 年 6 月に完成した。二足歩行実験は、モーターが脆弱な状態での簡単な歩行は実現したが、スムーズな歩行にはさらに高価かつ強力なモーターに置き換えることが必要であり、現在これに関わる改造を行っている。また、トルクに制約のあるモーターで歩行を可能とする理論の研究、さらに、進化的に歩行パターンを学習する研究を開始した。これらの方法と従来型の三種類の歩行方式の優位性評価を行い、我々の方式が、エネルギー効率的に優位であるという結果を得た。

PINO を中心とし、本プロジェクトで生み出された二足歩行ロボットの技術の産業化・技術移転を行う会社、株式会社 ZMP が、2001 年 1 月 30 日に設立された。また、PINO の技術情報を Open PINO として 11 月 22 日から GNU GPL ライセンスで公開した。これは、ヒューマノイド・ロボットの LINUX プロジェクトを目指した動きである。

成果の展開可能なシーズ、用途等

人型であることのメリットが生かせる用途、主に人間の環境下での人間との協働を必要とする用途（すでに製品化されているものではエンターテインメントロボットやコミュニケーションロボットなど）や対人作業用途（案内ロボットなど）

特許出願

1）意願平 11-35607(1999/12/22）人間協働用ロボット
2）意願 2000-22180(2000/08/10）人間共働用ロボット
3）特願 2002-129276(2002/4/30）二足歩行ロボットの設計方法および二足歩行ロボット

論文、報告書等

1) Yamasaki, F.; Endo, K.; Asada, M.; Kitano, H. Control Design Principle of a Low-Cost Humanoid System Using a Genetic Algorithm. Advanced Robotics, 2003.

2) Yamasaki, F.; Matsui, T.; Miyashita, T.; Kitano, H. PINO the humanoid: a basic architecture. The 4th International Workshop on RoboCup-2000, Melbourne, Aug. 2000.

3) Yamasaki, F.; Matsui, T.; Miyashita, T.; Kitano, H. PINO the humanoid walk. 1st IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robot (Humanoid-2000), Cambridge, Sep. 2000.

4) Yamasaki, F.; Endo, K.; Asada, M.; Kitano, H. A Control Method for Humanoid Biped Walking with Limited Torque. The RoboCup 2001 International Symposium, Seattle, Aug. 2001.

5) Yamasaki, F.; Kitano, H.; Asaka, M. A Control Method for Humanoid Walking with Torso Using Dynamics. 4th International Conference on Climbing and Walking Robots, Karlsruhe, Germany, Sep. 24-26, 2001.

6) Endo, K.; Yamasaki, F.; Maeno, T.; Kitano, H. Co-evolution of Morphology and Controller for Biped Humanoid Robot. The RoboCup 2002 International Symposium, Fukuoka, June 24-25, 2002.

7) Endo, K.; Yamasaki, F.; Maeno, T.; Kitano, H. Generation of Optimal Biped Walking for Humanoid Robot by Co-evolving Morphology and Controller. The Seventh Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, National Center of Science, Tokyo, Aug. 18-22, 2002.

8) Endo, K.; Yamasaki, F.; Maeno, T.; Kitano, H. Co-Evolution of Morphology and Controller for Bi-ped Humanoid Robot -Consideration of characteristic of servomotors-. IROS2002, Lausanne, Sep. 30-Oct. 4, 2002.

9) Endo, K.; Maeno, T.; Kitano, H. Co-evolution of the Morphology and Walking Pattern of Biped Humanoid Robot using Evolutionary Computation -Designing the real robot-. ICRA2003, Taiwan, Sep. 14-19, 2003.

10) 松井龍哉; 北野宏明. "ロボットデザインの夜明け－科学者とデザイナーが新分野を切り開く." 日経デザイン. 151, 2000, 56-63.

11) 松井龍哉. "SIG"のデザインと国際ロボットデザイン委員会." ロボコンマガジン. 9, 2000.

〔研究者名〕松井 龍哉、北野 宏明、山崎 文敬、遠藤 謙

6. ヒューマノイド認知

音環境の理解、視覚・聴覚・運動の融合処理にもとづく複数音源の分離と複数話者同時発話認識を、自ら移動するロボット上で行う技術を開発した。また、これらの機能を、未知の音響特性を有する部屋で実現する手法の基礎技術を確立した。（図４）

研究成果の概要

図４　ヒューマノイドロボット SIG

ロボットが人間のパートナーとして知的なソーシャルインタラクションを行うためには、単なるアクチュエータ制御だけではなく、視覚や聴覚といったセンサ情報の処理を適切に行い、ロバストな知覚や認識を行う必要がある。例えば、声のする方向を向いたり、特定の人物に注意を向けるためには、捉えた画像や音響信号から顔や声を抽出、同定して名前や位置を認識することが必要である。また、追跡中に注意を向けていた人物が､後ろを向いてしまったり、物陰に隠れたり、他の人物と交差したりするような場合にも、継続して追跡を行えるように複数のセンサ情報を統合してロバストな状況把握を行うことが必要である｡さらに、同時に複数の人を判別するためには、複数の顔を識別したり、複数の声やノイズが混在している状況下でも、カクテルパーティ効果として知られるように特定の音源に注意を向け続ける能力も求められる。視覚、聴覚、およびこれらを統合した処理は、ソーシャルインタラクションを行うための最低限必要な機能といえる。

ロボットでは、視覚処理、および視覚とモータ制御を統合する処理は、アクティブビジョンやビジュアルサーボに代表されるように盛んに研究が行われている分野である。加えて、一般的なロボット聴覚を実現するためアクティブオーディションが提案されているが、本プロジェクトでは、複数の聴覚的な手がかりを統合し、実時間・実環境で複数音源を定位できるロバストなアクティブオーディションを実現した。さらに、アクティブオーディションに複数顔同時認識とステレオビジョンによる視覚処理を統合することによって、聴覚の曖昧性を解消するだけではなく、視覚の視野の狭さ、オクルージョンも解決できるロバストな実時間複数人物追跡システムをヒューマノイド SIG 上に実現した。

成果の展開可能なシーズ、用途等

1）災害救助、介護、セキュリティ、エンターテインメント用のロボット

特許出願

1）特願平 11-165182(1999/06/11)音源同定装置及びその同定方法

2) 特願平 11-341240(1999/11/30)ロボット聴覚装置
3) 特願 2000-22677(2000/01/31)ロボット聴覚システム<ロボットにおけるアクティブオーディション用聴覚システム>
4) 特願 2000-22678(2000/01/31)ロボット聴覚装置<ロボットにおける内部ノイズキャンセリング手法>
5) 特願 2000-22679(2000/01/31)ロボット聴覚装置<ロボット聴覚装置における内部マイクの可動機構>
6) 特願 2000-173915(2000/06/09)ロボット聴覚装置及びロボット聴覚システム
7) 特願 2001-067846(2001/03/09)ロボット視聴覚システム
8) 特願 2001-067847(2001/03/09)ロボット視聴覚システム
9) 特願 2001-067848(2001/03/09)ロボット視聴覚システム
10) 特願 2001-067849(2001/03/09)ロボット視聴覚システム
11) 特願 2001-107696(2001/04/05)鳴き声による音声ガイドシステム
12) 特願 2002-56670(2002/03/01)ロボット視聴覚システム
13) 特願 2002-365764(2002/12/17)ロボット視聴覚システム

論文、報告書等

1) Nakadai, K.; Hidai, K.; Okuno, H.G.; Mizoguchi, H.; Kitano, H. Real-Time Auditory and Visual Multiple-speaker Tracking For Human-robot Interaction. Journal of Robotics and Mechatronics. 14, 479-489, 2002.
2) 中臺一博; 奥乃博; 北野宏明. ヒューマノイドにおける聴覚機能の課題とアクティブオーディションによる音源定位. 人工知能学会論文誌, Vol.18 No.2, 2003.
3) 中臺一博; 日台健一; 奥乃博; 溝口博; 北野宏明. ヒューマノイドを対象にした視聴覚統合による実時間人物追跡:アクティブオーディションと顔認識の統合. 日本ロボット学会誌 Vol.21 No.6, 2003
4) Nakagawa, Y.; Okuno, H.G.; Kitano, H. Using vision to improve sound source separation. 16th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'99), Orlando, July 1999, 768-775.
5) Kitano, H.; Okuno, H.G.; Nakadai, K.; Fermin, I.; Sabishch, T.; Nakagawa, Y.; Matsui, T. Designing a humanoid head for RoboCup challenge. The 4th International Autonomous Agent 2000, Barcelona, July 2000.
6) Nakadai, K.; Lourens, T.; Okuno, H.G.; Kitano, H. Active audition for humanoid. 7th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2000), Austin, Aug. 2000, 832-839.
7) Nakadai, K.; Lourens, T.; Okuno, H.G.; Kitano, H. Humanoid active audition. 1st IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robot (Humanoid-2000), Cambridge, Sep. 2000.

8) Lourens, T.; Kitano, H. Selective attention by integration of vision and audition. 1st IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robot (Humanoid-2000), Cambridge, Sep. 2000.
9) Nakadai, K.; Matsui, T.; Okuno, H.G.; Kitano, H. Active audition system and humanoid exterior design. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000), Takamatsu, Nov. 2000, 1453-1461.
10) Lourens, T.; Nakadai, K.; Okuno, H.G.; Kitano, H. A Computational Model of Monkey Grating Cells for Oriented Repetitive Alternating Patterns. 9th European Symposium on Artificial Neural Networks(ESANN2001), Bruges, Apr. 2001.
11) Nakadai, K.; Hidai, K.; Mizoguchi, H.; Okuno, H.G.; Kitano, H. Real-Time Auditory and Visual Multiple-Object Tracking for Humanoids. International Joint Conference on Artificial Intelligence(IJCAI), Seattle, Aug. 2001.
12) Lourens, T.; Okuno, H.G.; Kitano, H. Automatic Graph Extraction from Color Images. 11th International Conference on Image Analysis and Processing(ICIAP2001), Palermo, Italy, Sep. 26-28, 2001.
13) Nakadai, K.; Okuno, H.G.; Kitano, H. Epipolar Geometry Based Sound Localization and Extraction for Humanoid Audition. IROS 2001, Hawaii, Oct. 29-Nov. 4, 2001.
14) Okuno, H.G.; Nakadai, K.; Kitano, H. Human-Robot Interaction Through Real-Time Auditory and Visual Multiple-Talker Tracking. IROS 2001, Hawaii, Oct. 29-Nov. 4, 2001.
15) Nakadai, K.; Hidai. K.; Okuno, H.; Kitano, H. Real-Time Active Human Tracking by Hierarchical Integration of Audition and Vision. Humanoids2001, Waseda Univ., Nov 22-24, 2001.
16) Nakadai, K.; Hidai, K.; Okuno, H.G.; Kitano, H. Real-Time Speaker Localization and Speech Separation by Audio-Visual Integration. ICRA2002, Washington D.C., May 11-15, 2002.
17) Okuno, H.G.; Nakadai, K.; Kitano, H. Social Interaction of Humanoid Robot Based on Audio-Visual Tracking. IEA/AIE-2002, Cairns, June 17-20, 2002.
18) Nakadai, K.; Okuno, H.G.; Kitano, H. Exploiting Auditory Fovea in Humanoid-Human Interaction. AAAI 2002, Edmonton, Canada, July 28-Aug. 1, 2002.
19) Okuno, H.G.; Nakadai, K.; Kitano, H. Realizing Audio-Visually triggered ELIZA-like non-verbal Behavior. PRICAI2002, Tokyo, Aug. 18-22, 2002.
20) Okuno, H.G.; Nakadai, K.; Kitano, H. Real-time Sound Source Localization and Separation for Robot Audition. ICSLP2002, Denver, USA, Sep. 16-20, 2002.
21) Nakadai, K.; Okuno, H.G.; Kitano, H. Auditory Fovea Based Speech Enhancement and Its Application to Human-Robot Dialog System. ICSLP2002, Denver, Sep. 16-20, 2002.
22) Nakadai, K.; Okuno, H.G.; Kitano, H. Auditory Fovea Based Speech Separation and Its Application to Dialog System. IROS2002, Lausanne, Sep. 30-Oct. 4, 2002.

23) Okuno, H.G.; Nakadai, K.; Kitano, H. Design and Implementation of Personality of Humanoids in Human Humanoid Non-verbal Interaction. The 16th International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence & Expert Systems (IEA/AIE2003), Loughborough, UK, June 23-26, 2003.
24) Okuno, H.G.; Nakadai, K.; Kitano, H. Realizing Personality in Audio-Visually Triggered Non-verbal Behaviors. ICRA2003, Taiwan, Sep. 14-19, 2003.
25) Nakadai, K.; O kuno, H.G.; Kitano, H. Robot Recognizes Three Simultaneous Speech. ICRA2003, Taiwan, Sep. 14-19, 2003.
26) Nakadai, K.; Okuno, H.G.; Hidai, K.; Kitano, H. Active Audition Based Humanoid Audition System and Its Evaluation: Localization, Separation and Recognition of Simultaneous Speech. IEEE International Conference on Humanoid Robots (Humanoids-2003), Karlsruhe, Munich, Germany, Oct. 1-3, 2003.
27) Nakadai, K.; Matsuura, D.; Okuno, H.G.; Kitano, H. Applying Scattering Theory to Robot Audition System: Robust Sound Source Localization and Extraction. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-2003), Las Vegas, Oct 27-31, 2003.

〔研究者名〕北野 宏明、奥乃 博、中臺 一博、Tino Lourens、Iris Fermin、日台 健一、中川 友紀子

7. 小型高性能ヒューマノイド morph の開発

ロボットに必要なデバイスや基礎技術の開発を目的に、デバイスメーカー、半導体メーカーなどと共同で、小型ヒューマノイド morph を開発した。morph は、全身に 120 以上のセンサーを埋め込むとともに、高性能 CPU ネットワークを基盤に、全身協調運動を行う二足歩行ヒト型ロボットである。共同開発されたデバイス群は既に市場で販売され、この分野の発展に貢献している。（図５）

研究成果の概要

morph は、2001 年 4 月より開発を開始し、10 月の時点で、第一世代の morph1 および第二世代の morph2 が完成した。morph2 の全長は、340mm であり、小型化が達成されている。バッテリ、制御用メインＣＰＵ等の重量の大きい機器はすべて胴体上部に配置し、高重心化を図りつつ、全質量の軽量化を行った。その結果、質量 2kg のボディにバッテリを含む全制御系を登載することに成功した。morph は、腹部の 2 軸を含む全 26 の自由度を持つ。この腹部 2 軸を含む全関節の稼動範囲が広いことも morph の特徴の一つである。例えば、腰部 yaw 軸は 180deg 以上の可動範囲を持つ。このように広い可動範囲を有することで、morph は機構的に多彩な動作を取ることができる。脚部が移動に使用されるという一つの目的のために構成されているのと対照的に、ヒューマノイドの腕部は実験・使用目的に応じ自由度、関節トルクおよびサイズなど、異なる仕様の腕が換装できる必要がある。morph では、ボディモジュールシステムを採用し、四肢および胴体上半身部分がネジ 1 本で容易に交換できる機構を導入した。

図５　ヒューマノイドロボット morph

morph3 は、morph2 と同様、可動範囲の広い関節と、38cm の身長のボディに 138 のセンサーを配し、13 の CPU を体内ネットワークでつないで協調動作を行う分散制御システムとなっている。各関節の柔らかさを運動に応じて調整できる機構を取り入れ、受身動作から高速の起き上がり動作のような柔・剛両動作の制御を実現している。

成果の展開可能なシーズ、用途等

人型であることのメリットが生かせる用途、主に人間の環境下での人間との協働を必要とする用途（すでに製品化されているものではエンターテインメントロボットやコミュニケーションロボットなど）や対人作業用途（案内ロボットなど）

特許出願

1）特願 2001-173262(2001/06/07)二脚歩行式移動装置及びその歩行制御装置並びに歩行

制御方法
2) 特願 2001-173263(2001/06/07)二脚歩行式人型ロボット
3) 特願 2001-293881(2001/09/26)二脚歩行式人型ロボット
4) 特願 2001-386693(2001/12/19)二脚歩行式移動装置及びその歩行制御装置及び歩行制御方法
5) 特願 2001-353500(2001/11/19)二脚歩行式移動装置およびその歩行制御装置並びに歩行制御方法
6) 特願 2001-353501(2001/11/19)二脚歩行式人型ロボット
7) 特願 2001-353502(2001/11/19)二脚歩行式人型ロボット
8) 特願 2002-40838(2002/2/18)二脚歩行式移動装置
9) 特願 2002-40837(2002/2/18)二脚歩行式移動装置及びその歩行制御装置
10) 特願 2002-40839(2002/2/18)二脚歩行式人型ロボット
11) 特願 2002-172107(2002/6/12)二脚歩行式人型ロボット及びその手先収納機構
12) 特願 2002-172108(2002/6/12)ロボット及びそのスイッチ装置
13) 特願 2002-172109(2002/6/12)歩行式移動装置及びその歩行制御装置及び歩行制御方法
14) 特願 2002-172110(2002/6/12)歩行式ロボット
15) 意願 2002-15822(2002/6/12)ロボット（胸部部分意匠）
16) 意願 2002-15821(2002/6/12)ロボット（手部部分意匠）
17) 意願 2002-158202002/6/12 ロボット
18) 特願 2002-358416(2002/12/10)歩行式移動装置及びその歩行制御装置及び歩行制御方法
19) 特願 2002-358414(2002/12/10)歩行式移動装置並びにその動作制御装置及び動作制御方法
20) 特願 2002-358415(2002/12/10)歩行式移動装置並びにその動作制御装置及び動作制御方法
21) 特願 2002-257286(2002/9/30)二脚歩行式移動装置及びその足部構造

論文、報告書等

1) Furuta, T.; Okumura, Y.; Tawara, T.; Kitano, H. morph: A Small-size Humanoid Platform for Behavior Coordination Research. Humanoids2001, Waseda Univ., Nov 22-24, 2001.
2)Uehara, K.; Tawara, T.; Ohtsu, N.; Hoshi, H.; Okumura, Y.; Shimizu, M.; Furuta, T.; Ishigure, T.; Koike, Y.; Kitano, H.; Mizusawa, J. POF optical LAN system for a humanoid robot. 11th Plastic Optical Fibers Conference 2002, Tokyo, Sep. 18-20, 2002.
3) Furuta, T.; Okumura, Y.; Tawara, T.; Shimizu, M. Kitano, H. morph: A Compact-Size Humanoid Capable of Acrobatic Behavior. 5th International Conference on Climbing and Walking Robots, Paris, Sep. 25-27, 2002.
4) Okumura, Y.; Shimizu, M.; Furuta, T.; Tawara, T.; Kitano, H. Development of Intelligent Networked Devices and Control System for Controlling Whole Body Motion of Compact Humanoids. 5th International Conference on Climbing and Walking Robots, Paris, Sep.

25-27, 2002.
5) Tawara, T.; Furuta, T.; Shimizu, M.; Okumura, Y.; Kitano, H. Mapping of the System Software for a Compact Humanoid Robot. 5th International Conference on Climbing and Walking Robots, Paris, Sep. 25-27, 2002.
6) 古田貴之. "小型ヒューマノイド morph －全身運動制御系研究の為のプラットフォーム－". ロボット, 日本ロボット工業会, 2001, 44-50.
7) 古田貴之. "小型ヒューマノイド morph：RoboCup ヒューマノイドチャレンジに参戦するためのロボットシステム構築手法". 日本ロボット学会誌, 20, 2002, 49-50.

〔研究者名〕古田 貴之、清水 正晴、奥村 悠、田原 哲雄、遠藤 謙