

「相互作用と賢さ」研究領域 領域活動・評価報告書
—平成 17年度終了研究課題—

研究総括 原島 文雄

1. 研究領域の概要

本領域は、人間の知力と行動力を最大限に発揮させる人工生命体と呼ぶべきシステムを構築しようとするものです。人間と機械が相互作用としての物理的関係と情報交換によって、さらに賢くなる人工の空間形成に関して研究するものです。

例えば、情報の感知と命令の集積・融合化、スマートアクチュエータ、インタフェースなど構成要素のほか、知能ロボット、学習機能、微小機械、人工現実感、メカトロニクス、新システムの設計や構築に向けての研究などを含みます。

2. 研究課題・研究者名

別紙一覧表参照

3. 選考方針

- 1) 選考は「相互作用と賢さ」領域に設けたアドバイザー8名と研究総括で行う。
- 2) 選考方法は、書類選考、面接選考および総合選考とする。
 - ・書類選考において、1提案につき3名のアドバイザーに査読評価を依頼する。
 - ・選考委員の所属機関と応募者の所属機関が異なるように配慮する。
 - ・面接選考では、可能な限り多くの研究提案を直接聴取し、質疑応答する。
- 3) 選考の基本的な考え方は次の通り。
 - ①「相互作用と賢さ」のテーマに明快に適合していること。
 - ②従来にない独創的なアイデアが含まれていること。
 - ③独立した研究者であり、本研究に専念できる立場であること。
 - ④本研究が、他のプロジェクトのサブセットであるものは、除外する。
 - ⑤過去の業績は尊重するが、その中に独創的なものがあることをチェックすること。
 - ⑥年齢は30歳代を中心、若しくは博士号取得後10年以内(応募時現在)とし、次世代の研究者と新しい研究分野の育成を目的とすることに十分留意すること。
 - ⑦現在、本機構あるいは同種の組織の主要メンバーになっていないこと。
 - ⑧テーマの設定が、予算と年限の範囲で実行できること。
 - ⑨社会にインパクトを与える新しい技術分野を創出する可能性のあるテーマを優先する。

4. 選考の経緯

1応募課題につき担当選考アドバイザー3名が書類審査し、書類選考会議において面接選考の対象者を選定した。続いて、面接選考および総合選考により、採用候補者を選定した。

選 考	書類選考	面接選考	採用者数
対象者数	50 人	12 人	7 人

5. 研究実施期間

平成 14 年 11 月～平成 18 年 3 月

6. 領域の活動状況

領域会議: 11 回

研究総括(または技術参事)の研究実施場所訪問: 研究開始に際し全研究者を訪問した。その後、実施場所を移った際に新実験場所を訪問、および適宜研究者を訪問し、研究環境の整備や研究進捗状況の確認、組織の責任者への協力依頼を行った。

7. 評価の手続き

研究総括が個人研究者からの報告・自己評価を基に領域アドバイザーの協力を得て行った。また、一般公開の研究報告会において産官学の参加者から研究成果に対する意見、評価を受け、それらを参考にした。

(評価の流れ)

平成 17 年 12 月	研究報告書および自己評価提出
平成 18 年 1 月	研究報告会をホテルフロラシオン青山で開催
平成 18 年 2 月	研究総括による評価
平成 18 年 3 月	研究期間終了

8. 評価項目

- (1) 外部発表(論文、口頭発表など)、特許、研究を通じての新たな知見の取得などの研究成果
- (2) 得られた研究成果の科学技術への貢献

9. 研究結果

第三期生は以下の7名であったが、それぞれが独自の研究を活発に展開し、下記の成果を得た。

今井 倫太は、将来ロボットが公共の場で活動する際のコミュニケーション原理を確立することを目指して研究を進めた。この目標を達成するために、人間をロボットとのコミュニケーションへと引き込むための要因の発見および、人間とロボットの出会いを円滑にする手法を実現することが本研究の目的である。本研究では、物体に対して人間が持つ感覚を利用する演出手法を考案し、関連性理論に基づくコミュニケーションモデルを具体化したことは、大きな成果であり、高く評価できる。さらに、被験者実験によってモデルの効果を実際に検証し、その有効性を確かめることができたことも評価に値する。

工藤 卓は、賢くなる生体ユニットである培養神経回路と電子デバイスである電極と増幅器・制御コンピューターが相互作用しながら情報を創発する系を構築し、応用システムとしても研究対象としても魅力的な情報体を実現しようとすることを目標に研究を進めた。多点電極皿上に於いて分散培養された神経回路網のネットワークの特性を解析することにより、培養系に於いて、自発的活動時空間パターンはダイナミックに変動する機能的細胞集成体の存在を示唆していること、自律的に構成された回路網がランダムではなく、スケール・フリーネットワークの特徴を持っていることを発見したことは大きな成果であり、高く評価できる。さらにこの結果をふまえ、環境と相互作用する媒体として小型ロボットを接続して継続的に解析できる系を構築したことも評価できる。

久保田 直行は、人間との相互関係を形成するためのロボットの構造化学習の方法論の確立を目指して研究を進めた。本研究では、2種類のパートナーロボットを開発し、コミュニケーションを支えるためのパートナーロボットの知覚システムを開発するとともに、模倣学習に基づく行為システムと人間や環境とのインタラクションを評価するための価値システムを統合した構造化学習の方法論を提案したことは、大きな成果であり、高く評価できる。さらに、小学校での英会話教育への適用事例では、子供がロボットに身の回りのものを見せながら覚えさせ、ロボットは子供に英語を教えることによる双方向的な学習の効果を示したことも評価できる。この成果により、学会賞（2003 年度1件）を受賞している。

砂田 茂は、防災・環境モニタリングを行うため、短時間で高高度まで上昇し、上空からの映像、上空大気の取得を可能にする、ロータ直径が約35cm、重量が約450gの小型回転翼機を開発した。機体の姿勢安定に必要な太陽センサの原理を応用した小型・軽量の姿勢角センサの考案、上空の大気採取を取得するための大気採取器の考案、屋外飛行の開発機の位置を知ることに必要な光による新たな位置制御方法の考案を採り入れるなど、高い独創力を発揮した。さらに、本開発機体を目標位置に向かって自律飛行させ、地上での風速が2-3m/s 程度であれば、位置制御が可能であることを確認できたことは、大きな成果であり、高く評価できる。3件の国内特許出願がある。

友納 正裕は、ロボットが環境を物体単位に認識して、3次元の空間構造を記した環境地図を構築することを目的として研究を進めた。このための実現技術として、大域スキャンマッチング方式、画像特徴量から認識と3次元位置姿勢推定を行う物体認識方式、形状情報と認識特徴を統合した物体モデル構成方式、画像列からの密な物体形状復元方式など、独創性、有用性の高い要素技術を開発したことは大きな成果である。さらに、これらの技術を統合して、レーザスキャナと

単眼カメラを用いて3次元物体地図を構築することに成功したことも大きな成果であり、高く評価できる。この成果により、3件の学会賞(2003 年度1件、2004 年度2件)を受賞し、また6件の国内特許出願がある。

長谷川 修は、人の赤ちゃんが知識を持たない状態から徐々に知的に発達するように、視覚や聴覚を介した人との相互作用を通じ、視覚的概念や言語を複合的に学習して発達するロボットを世界で初めて構築したことは、大きな成果であり、高く評価できる。このロボットの学習機能には、独自に研究開発した「自己増殖型ニューラルネットワーク」を用いた「持続的発達学習メカニズム」を導入している。いずれも先駆性、独創性に優れた技術である。さらに実験の結果、対話による教示・育成を通じ、ロボットに人間の2歳児程度の知能を持たせることに成功したことも評価に値する。この成果により、学会賞(2004 年度1件)を受賞している。

平田 泰久は、安全性と操作性という観点から歩行支援システムの高機能化を実現する研究開発を行った。ボディフォースセンサを用いることにより安全かつ直感的な操作性を実現するセンサシステムの設計概念を提案するとともに、利用者それぞれの障害に適応することにより操作性が向上し、かつリハビリテーションにも応用が期待できる全方向移動型歩行支援システムのための運動制御系の提案により、モータを利用したアクティブ型歩行支援システムを、さらには、ブレーキを適切に制御し人間の障害や歩行機の使用状態、環境の情報等に基づいて適切な支援を実現する運動制御手法を構築することにより、ブレーキのみを利用したパッシブ型歩行支援システムを開発したことは、大きな成果であり、高く評価できる。この成果により、8件の学会賞(2004 年度5件、2005 年度3件)を受賞し、また2件の国内特許出願がある。

これら第三期生は、50名の応募者から大変な難関を経て選ばれた7名であり、いずれも優秀な研究者であった。本プロジェクト採用後に、1名の助教授昇任者があったこと、4名が国内の学会賞を受賞したこと、および8件の国内出願があることから明らかなごとく、国際的にも高い研究レベルを保っている。

10. 評価者

研究総括 原島 文雄 東京電機大学 学長
(東京都立科学技術大学 学長)

領域アドバイザー氏名

石島 辰太郎 首都大学東京システムデザイン学部 学部長
(東京都立科学技術大学 教授)

井上 恵太 (株)コンボン研究所 顧問
(同研究所 副所長)

井深 丹 タマティエルオー(株) 代表取締役社長
(株)横河総合研究所 社長)

河内 啓二 東京大学大学院工学研究科 教授
(同大学先端科学技術研究センター 教授)

小菅 一弘 東北大学大学院工学研究科 教授
(同上)

谷江 和雄 首都大学東京システムデザイン学部 教授
(工業技術院機会技術研究所ロボット工学部 部長)

福田 敏男 名古屋大学大学院工学研究科 教授
(同大学先端技術共同センター 教授)

油田 信一 筑波大学 理事・副学長
(同大学機能工学系 教授)

＊ 所属は平成 18 年 2 月末現在のもの。()は当領域発足時の所属

(参考)

(1) 外部発表件数

	国 内	国 際	計
論 文	27	27	54
口 頭	153	122	275
その他	6	3	9
合 計	186	152	338

(2) 特許出願件数

国 内	国 際	計
10	0	10

(3) 受賞: 13件

○久保田 直行:

- ① 国際シンポジウム, ISCIII 2003 [Recognition Award, SOFT] 「Computational Intelligence in Robotics」(2003 年 5 月)

○友納 正裕

- ① 計測自動制御学会システムインテグレーション部門 [部門奨励賞] 「ループ制約と幾何学的な事前知識を用いた移動ロボットの自己位置推定とマップ構築」(2003 年 12 月)

- ② 第 9 回ロボティクスシンポジア [最優秀論文賞]「スキャンマッチングによる移動ロボットのマップ構築と大域的自己位置推定」(2004 年 3 月)
- ③ 第 5 回計測自動制御学会 SI 部門講演会 [ベストセッション講演賞]「複数仮説追跡を用いた単眼カメラによる移動ロボットの 3 次元自己位置推定とマップ構築」(2004 年 12 月)

○長谷川 修

- ①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(SI2004) [ベストセッション講演賞]「Unsupervised Learning of Dynamic Patterns for Recognition and Generation」(2004年12月)

○平田 泰久

- ① ROBIO2004 [Best Paper in Robotics Award]「From Human to Pushing Leader Robot: Leading a Decentralized Multirobot System for Object Handling」(2004 年 8 月)
- ② SI2004 [SI2004 ベストセッション講演賞]「Variable Center of Rotation Control for Walking Support System Based on Environment Information」(2004 年 12 月)
- ③ SI2004 [SI2004 ベストセッション講演賞]「RoBE を用いたモバイルマニピュレータの実時間自己衝突回避制御」(2004 年 12 月)
- ④ SI2004 [SI2004 ベストセッション講演賞]「立ち上がり動作支援システムの動力学解析」(2004 年 12 月)
- ⑤ 青葉工学会 [青葉工学会研究奨励賞]「パッシブ型歩行支援システムに関する研究」(2004 年 12 月)
- ⑥ 日本機械学会 [日本機械学会賞(論文)]「仮想 3-D キャスタ特性を有した複数の移動マニピュレータと人間との協調による物体のハンドリング」(2005 年 4 月)
- ⑦ ロボティクス・メカトロニクス講演会 2004 [ROBOMECH 表彰]「Cagingを用いた物体の搬送のための複数ロボットのフォーメーション制御の提案」(2005 年 6 月)
- ⑧ 日本ロボット学会 [日本ロボット学会論文賞]「キャスタ特性を有した複数の人間協調型移動ロボット(DR Helper)と人間との協調による単一物体の搬送」(2005 年 9 月,)

別紙

「相互作用と賢さ」領域 研究課題名および研究者氏名

研究者氏名 (参加形態)	研究課題名 (研究実施場所)	現職 (応募時所属)	研究費 (百万円)
今井 倫太 (兼任)	認識と演出の相互作用に基づくコミュニケーションロボットの実現 (慶應義塾大学)	慶應義塾大学理工学部 助教授 (同上 助手)	37
工藤 卓 (兼任)	賢くなる2次元神経回路網によるパターン認識 (産業技術総合研究所)	産業技術総合研究所セルエンジニアリング研究部門 研究員 (同研究所人間系特別研究体研究員)	41
久保田直行 (兼任)	人間とロボットの相互関係形成のための構造化学習 (首都大学東京)	首都大学東京システムデザイン学部 准教授 (福井大学工学部 助教授)	43
砂田 茂 (兼任)	環境・防災モニタリング用小型2重反転回転翼機の開発 (大阪府立大学)	大阪府立大学大学院工学研究科 助教授 (同上)	41
友納 正裕 (専任)	環境とのインタラクションによる空間構造の獲得 (筑波大学)	科学技術振興機構 さきがけ研究者	20
長谷川 修 (兼任)	学習によるシーン理解の研究 (東京工業大学)	東京工業大学像情報工学研究施設 助教授 (同上)	33
平田 泰久 (兼任)	人間・環境適応型知的歩行支援システム (東北大学)	東北大学大学院工学研究科 助手 (同上)	38

研究課題別評価

1 研究課題名： 認識と演出の相互作用に基づくコミュニケーションロボットの実現

2 研究者氏名： 今井 倫太

3 研究の狙い

本研究の目標は、将来ロボットが公共の場で活動する際のコミュニケーション原理を確立することにある。この目標を達成するために、人間をロボットとのコミュニケーションへと引き込むための要因の発見および、人間とロボットの出会いを円滑にする手法を実現することを本研究の目的とする。

人間とロボットのコミュニケーションを実現する際に問題となるのは、人間、特に大人が、ロボットが話かける内容に対して真剣に受け答えしないことである。多くの大人は、ロボットの動きや反応の仕方を観察するのみである。真剣にコミュニケーションが行われている状況では、コミュニケーションの参加者がお互いに相手が何を意図して発話したのかを、相手の発話内容から推測している必要がある。本研究の解決すべき問題点は、ロボットの発話の意図を人間に推測させるように仕向け、ロボットからの発話に対して人間を真剣に應對させることである。

本研究は、実世界の状態や物体に対して人間が感じる感覚を利用する形でロボットのコミュニケーションを演出し、ロボットの発話の意図を人間が推測するように仕向ける。演出は、次の二つのステップで構成されている。ステップ1:実世界の状態に人間の注意を向ける、または、物体と相互作用するように人間を促す。ステップ2: ステップ1の演出が成功したときに人間が感じる感覚を言葉で表現し、人間に話かける。この二つのステップを用いてロボットが持つ感覚を人間に推測させ、ロボットとのコミュニケーションへと人間を徐々に引き込んで行く。本研究では、演出の効果を被験者実験により調べ、人間を引き込む要因を明らかにする。さらに、物体や環境に取り付けられたセンサネットワークを用いて、自律的に演出を決定するコミュニケーションロボットを実現する。

4 研究成果

本研究の成果は、被験者実験による演出の効果の検証および、センサネットワークによる自律的な演出選択の手法に関するものである。以下に成果毎に説明する。

4. 1 被験者実験による演出の効果の検証

演出のステップが人間に与える効果について、ロボットの意図を人間が推測するかどうかといった観点より検証を行った。実験の説明の前に、この効果で起こる現象について認知モデルで説明

する。図 1.に演出によるコミュニケーションモデルを示す。図では、人間(図1左)とロボット(右)、物体(下)が示されている。人間は、物体に対して物体の種類、形状、色など様々な属性を認識する(図中の人間の中にある Object)。一方で、物体が食べ物であったら味、花であったら色と香りといった形で、物体と相互作用(食べる、飲む、嗅ぐ、見る)した際にある感覚を感じる(図中の人間の中にある feeling)。実世界の

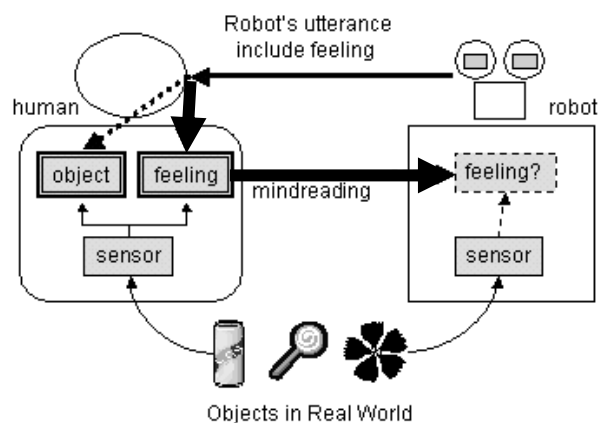


図 1.演出を用いたコミュニケーションモデル

状況への注目や、物体との相互作用を促すのが演出のステップ1である。ステップ2では、感覚を表現した発話(感覚的発話と以降呼ぶ)をロボットが行う(図中のロボットから人間へ伸びる矢印)。この発話は、実世界の状況や物体に対して人間が感じている感覚を表現しているので、感じている感覚を基にして発話の解釈が行われる(図中の人間の頭から feeling へ伸びる矢印)。さらに、人間は、この結びつ

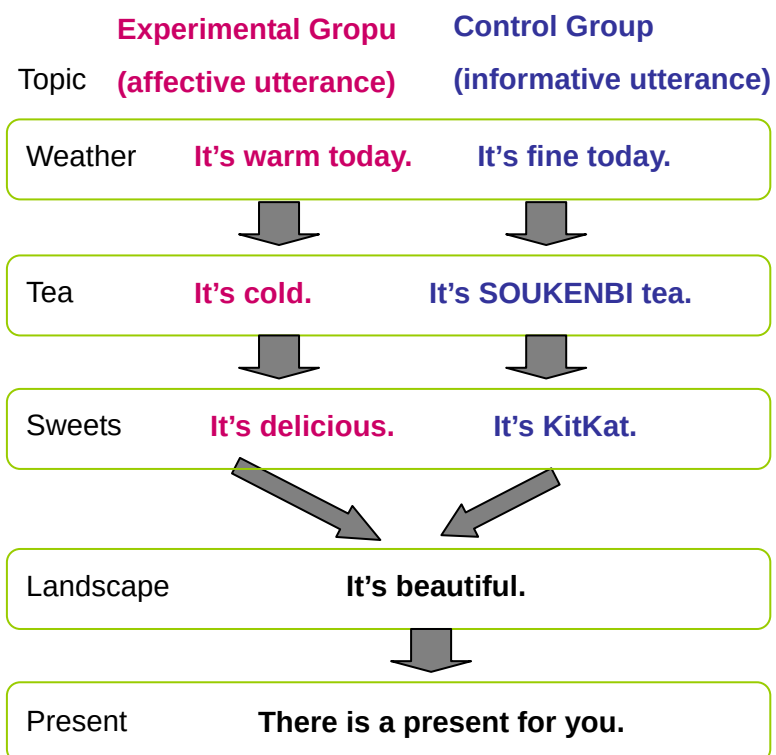


図 2.実験でロボットが用いた発話

けと同時に、人間と同様の感覚をロボットも持つと推測するようになる。演出でこの推測を人間に繰り返させることにより、ロボットの発話の意図を推測するように人間を徐々に仕向ける。以上の認知プロセスが、演出で狙っている効果である。

被験者実験では、演出の効果を検証するために、ステップ 2 に関する違いの対象実験を行った。比較対象では、ロボットが、感覚を表現した発話の代わりに、情報を伝える発話(情動的発話と以降呼ぶ)を行う。具体的には、食べ物の名称や、物体に関する解説を行う。情動的発話には、ロボ

ットの意図を人間に推測させる効果が無いと考えられる。図1の人間の頭から object に伸びている点線矢印が示す通り、情動的発話は、物体の属性と結びつくので、ロボットの感覚を推測する過程が働かないと考えられる。

実験では、感覚的発話を与えられる被験者(実験群)と、情動的発話を与えられる被験者(対象群)の二つの群に男女の被験者 21 を分けた。図 2 に、実験でロボットが発話した内容を示す。また、図 3 に実験環境を示す。発話内容には、天気とお茶、お菓子、景色、お土産の話題があり、天気からお菓子までは実験群と対象群で異なる発話を被験者に与えた。お菓子とお茶、お土産は、実際に実験環境に用意されている(図3中の☆印)。窓は、図3の window の位置である。また、景色とお土産に関しては、群の違いに関わらず共通の発話を与えた。そして、感覚的発話の効果が現れると思われる最後の三つのトピック(お菓子、景色、お土産)に注目して人間の行動を観察した。

この実験で検証する仮説は、以下の物である。

被験者は、ロボットから感覚的発話を与えられるとロボットの意図を推測するようになり、ロボットの発話を真剣に受け止めるようになる。

この仮説から、お菓子・景色・お土産のトピックで予測できる人間の行動は次の通りである。

1) 実験群は、感覚的発話を与えられ続けているので、お菓子を食べたいといったロボットの

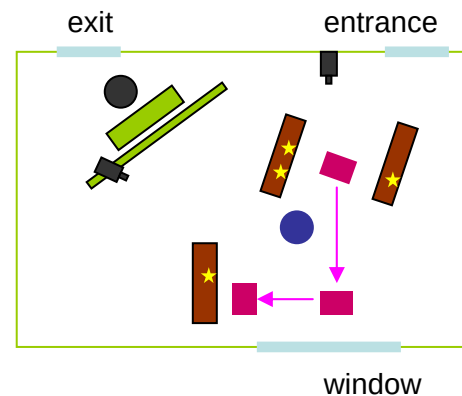


図3.実験環境

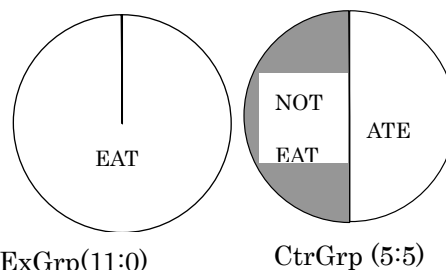


図 4.お菓子を食べた被験者の数

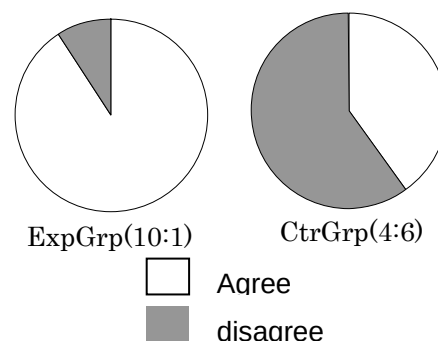


図 5. 景色の発話に同意した被験者の数

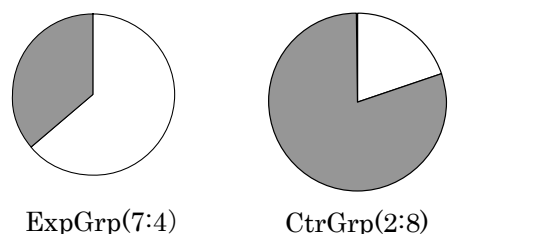


図 6. お土産を持って帰った被験者の数

意図を読んでお菓子を食べるが、対象群は食べない。

2) 実験群は、感覚的発話を与えられ続けているので、ロボットの景色に関する発話を真剣に受け止め同意するが、対象群は同意しない。

3) 実験群は、感覚的発話を与えられ続けているので、ロボットからお土産を本気で貰い、お土産を持って部屋から退出する。一方、対象群は、お土産を部屋に置いて退出する。

図4から6に実験結果を示す。実験結果は、どれも1)から3)の予測を支持するものであり、二つの群の間に有意差があることが確認された。また、お土産を持って帰った被験者から得られたアンケートによると、お土産を持って帰った理由は、「おみやげだから。」、「せっかくロボットがくれたから。」とロボットの意図を真剣に受け止めていることを示すものであった。一方、持って帰らなかった被験者は、「実験だから。」「次の実験で使うと思ったから。」と実験を意識しており、ロボットとのコミュニケーションを真剣に捉えていないことが分かった。

以上の実験より、実世界の状態や物体に対して人間が持つ感覚を利用してロボットが感覚的発話を行うと、人間をロボットとのコミュニケーションへと引き込めることが明らかになった。



図7.実験シーン:上段左から右へ、お菓子を食べる実験群の被験者、お菓子を食べない対象群の被験者、ロボットに同意する実験群の被験者。下段左から右へ、ロボットに同意しない対象群の被験者、お土産を持ってかえる実験群の被験者、お土産を置いて帰る対象群の被験者。

図7に実験における被験者の行動を示す。実験シーンからも、実験群の被験者は、ロボットの発話を真剣に捉え行動していることが見てとれる。一方、対象群の被験者は、ロボットの発話を無視した行動を行っていることが分かる。

4. 2 センサネットワークを用いた自律的演出選択

被験者実験で検証したコミュニケーションモデルをベースに、ロボットとのコミュニケーションへと人間を引き込む自律的演出選択機構を構築した。図 8 に自律的演出選択機構のシステム構成を示す。自律的演出選択機構は、無線センサタグが付与された物体の動きに応じて、ロボットの演出行動を選択する。演出の選択は、システム内の Action module planner で行われる。

自律的演出選択機構の特徴は、センサ情報を解釈するために Context-Chain と呼ばれるモジュールを持つことである。前節の被験者実験で説明した通り、演出では、実世界のある状態やある物体に人間を注目させたり、注目対象に関する感覚について言及したりと、文脈を作りながら人間とコミュニケーションする。文脈が動的に作られ変更されていくので、システムは、文脈に合わせてセンサ情報の解釈を適宜変更する必要がある。Context-Chain は、Action module planner で選ばれた演出を元にセンサ情報に最適な解釈を与える。さらに、この解釈は、Action module での行動選択に用いられ、演出と認識の相互作用が実現されている。

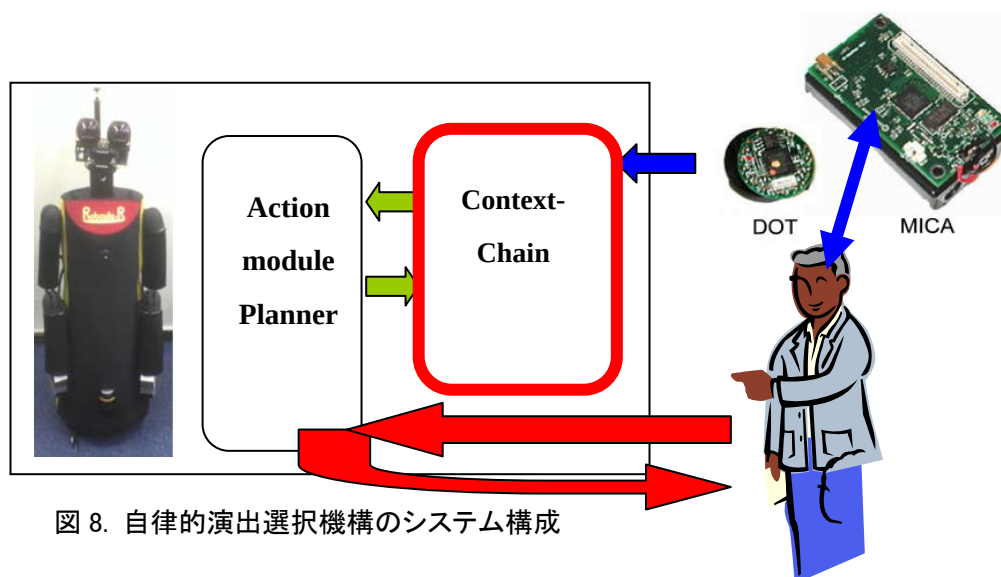


図 8. 自律的演出選択機構のシステム構成



図 9 無線センサノードを付与した物体。左から、加速度センサと光センサが付いたコップ。加速度センサと曲げセンサが付いた本。人体センサの付いた写真立て。

5 自己評価

当初の研究目標は、関連性理論に基づく形で考案したコミュニケーションモデルの具体化と検証、そして実際のロボット上にこのモデルを実装することであった。本研究では、物体に対して人間が持つ感覚を利用する演出手法を考案し、関連性理論に基づくコミュニケーションモデルを具体化したといえる。さらに、被験者実験によってモデルの効果を実際に検証し、その有効性を確かめることができた。

また、自律的演出選択機構は、センサネットワークを駆使する形でコミュニケーションモデルをロボット上に実装した物である。さらに、物体に付与する形で構成されるセンサネットワークは、通常のセンサネットワークで問題にならなかった、物体の情報とセンサ情報に関する取り扱いという新たな研究の発展に繋がった。本研究は、当初の目標を達成し、さらに、新たな研究成果となりうる課題を見いだすことができたと言える。

6 研究総括の見解

本研究の目標は、将来ロボットが公共の場で活動する際のコミュニケーション原理を確立することにある。この目標を達成するために、人間をロボットとのコミュニケーションへと引き込むための要因の発見および、人間とロボットの出会いを円滑にする手法を実現することが本研究の目的である。本研究では、物体に対して人間が持つ感覚を利用する演出手法を考案し、関連性理論に基づくコミュニケーションモデルを具体化したことは、大きな成果であり、高く評価できる。さらに、被験者実験によってモデルの効果を実際に検証し、その有効性を確かめることができたことも評価に値する。

今後の展望として、演出によるコミュニケーションとタスクベースのコミュニケーションの融合および実世界の物体の扱いに特化したセンサネットワークの実現に向け研究を進められたい。

7 主な論文等

論文

1. 川島 英之、遠山 元道、今井 倫太、安西 祐一郎 “リモートメモリを用いたセンサデータストリームの永続化” 情報処理学会論文誌: データベース, Vol.44, No.SIG12(TOD19), pp.98-109, 2003.9
2. 川島 英之、今井 倫太、遠山 元道、安西 祐一郎 “センサデータベースシステム KRAFT の設計と実装” 情報処理学会論文誌: データベース, Vol.45, No.14, pp.39-53, 2004.1
3. 向井 淳、今井 倫太、安西 祐一郎 “観測指向モデルによるロボットの自発的な行動基準の生成” 知能と情報(日本知能情報ファジイ学会誌), Vol.17, No.3, pp.314-324, 2005.6

国際会議発表論文

1. M. Imai, M Narumi, ``Generating Common Quality of Sense by Directed Interaction,” 12th IEEE Workshop Robot and Human Interactive Communication (Ro-MAN2003), pp.199–204, (2003–10, Millbrae)
2. M Narumi, M. Imai, ``Human-Centric Approach for Human-Robot Interaction,” The 8th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence (PRICAI2004), pp.993–994, (2004–8).
3. M. Imai, M Narumi, ``Robot Behavior for encouraging immersion in interaction,” Complex Systems Intelligence and Modern Technological Applications (CSIMTA04), pp.425–430, (2004–9, Cherbourg).
4. M. Imai, M. Narumi “Immersion in Interaction Based on Physical World Object” The 2005 International Conference on Active Medial Technology (AMT2005), pp.523–528, 2005.5
5. M. Imai, H. Osawa, M. Narumi “Designing Human-Robot Interaction via Physical World Objects” IEEE Workshop on Advanced Robotics and Its Social Impacts (ARSO’05), CDROM, 2005.6

国内会議発表論文

1. 鳴海真里子、今井倫太 “演出を用いた実世界情報の顕在化の研究” 第 17 回人工知能学会全国大会, CD-ROM 版 1D1-01, 2003.6
2. 鳴海真里子、今井倫太 “演出を用いたヒューマン・ロボット・インタラクション” 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2003 (JAWS2003) 講演論文集, pp.438–445, 2003.10
3. 鳴海真里子、今井倫太 “共感に基づく人間とロボットのインタラクション” 日本認知科学会第 21 回大会, pp.12–13, 2004.7
4. 今井倫太、鳴海真里子 “ロボットとのコミュニケーションへの没入を実現するコミュニケーション技術” 情報処理学会研究報告、CVIM-146, Vol.8, pp.17–22, 2004.11
5. 大澤博隆、向井淳、今井倫太 “SOBAR:コミュニケーションロボットによる環境センサ情報への制約” 人工知能学会第 19 回全国大会論文集, 2005.6

総説・解説

1. 今井 倫太 “コミュニケーションロボットの実現に向けて”, KAST Report, Vol.15 , No. 2, pp.10–17, 2003.
2. 今井倫太、安西祐一郎 “人間とロボットのインタラクション”, 学術月報、第 57 巻、9 号、2004 年 9 月号, pp.798–805, 2004.
3. 今井 倫太” 生活支援型ロボットの最近の技術動向”, 情報通信 Bulletin, No. 026, pp.1–5, 2005.

特許出願

1. 今井 倫太” コミュニケーションロボットシステム”，特願 2005-052308, 2005

招待講演

1. 人間とロボットのコミュニケーションの実現に向けて，相模原市立博物館日曜講演会 2004
2. ロボットが変わる一力から心へー，第13回 慶應義塾大学理工学部 市民講座にて講演, 2004
3. コミュニケーションロボットの現状と課題，川崎市テクのトランスファー, 2005

研究課題別評価

1. 研究課題名： 賢くなる 2 次元神経回路網によるパターン認識

2. 研究者氏名： 工藤 卓

3. 研究の狙い：

本研究は賢くなる生体ユニットである培養神経回路と電子デバイスである電極と増幅器・制御コンピューターが相互作用しながら情報を創発する系を構築し、応用システムとしても研究対象としても魅力的な情報体を実現しようとするのが目標である。目的としては、分散神経回路網の情報処理能力を評価し、様々な情報処理モデルを解析できるプラットフォームを確立すること、実用化の可能性を検討することである。具体的な本研究の大項目は大きく分けて2点ある。一つは、パターンディテクタとして、生体神経細胞が既存システムと相互作用して情報処理する系を構築し、その挙動解析を行う。二点目は、培養神経回路網の機能・作動に関与する分子の挙動とネットワークのダイナミックな挙動を関連づけて解析する系として本系を用い、解析結果を応用して神経回路網制御技術を確立することである。まず、準備段階として既に予備的な結果が得られている神経活動の2次元多点長期記録系の確立と、常時刺激条件による神経回路網入出力解析法の確立を目指す。さらに電流入力パターンの記録と識別の過程を解析し、これを応用した培養環境フィードバック法による神経回路網の自己組織化を実現する。これらを総合してパターンディテクタとしての神経回路網の機能評価を行う。第2点に関しては、機能分子の空間分布と情報処理過程のマッチングを解析し、機能分子の投与による培養神経回路網の制御技術を開発する。これらの結果を踏まえて培養神経細胞自身のパターン認識によるシステム制御装置への応用を検討する。最終年度では神経回路網自身に培養条件を調節させる系を構築することを試みる。解決すべき問題点としては第一に培養神経回路網が果たしてどれだけ情報処理機能を有するか不明であることである。この点に関して神経細胞の機能的結合の様式を詳細に解析して考察する。また、神経回路網に対する適切な刺激・入力の方法を確立することが制御と言う観点からも問題点としてあげられるが、これについては溶液条件、機能蛋白質分子の投与、電気刺激パターンについて詳細な検討と解析を行う。

4. 研究成果：

4-1. 分散培養神経回路網のネットワーク構造

分散培養神経回路網は従来ランダムで“でたらめ”な系だと言われていた。そこで、まずこの系が情報処理に適した構造をとっているのかを検討した。分散培養された2次元神経回路網が機能的にどのようなネットワーク構造をとっているか解析するために Connection Map Analysis を開発した。Connection Map Analysis は、それぞれのユニット信号(単一神経細胞由来の活動電位)間で相互相関関数を計算し、その分布形状から神経同士の機能的結合の強度を計算する。

アルゴリズムは、まず、すべてのニューロンのペアについて相互相関関数を計算し、相互相関

関数に明確なピークがあるか見積もるパラメータとして connectivity index を以下の定義に基づいて計算する(図1)。

$$Connectivity = A_{peak} \times \left(0.01 \times \frac{A_{peak}}{A_{total}} + \frac{1}{\Delta t + 1} + \frac{1}{Kurtosis} \right)$$

次に Connectivity index の統計値を計算し、平均値+標準偏差以上の Connectivity 特徴量を持つペアを機能的結合と判定し、線を引く。この手法により、記録された全ニューロン間の全組み合わせについて機能的な結合性の有無を推測することができる。分析した結果を図2に示す。

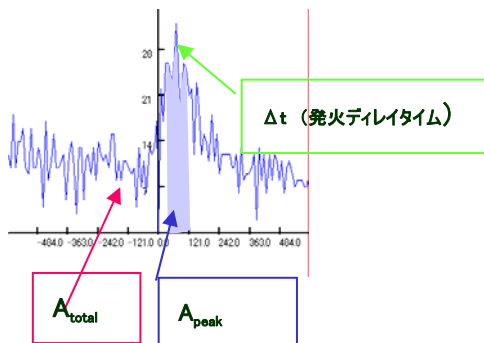


図1 相互相関関数とパラメータ

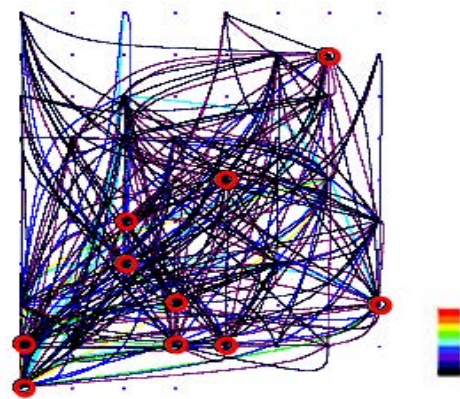


図2 Connection Map の例。カラーマップが上位のラインほど、ロバストな機能的結合を示す。赤○は入力リンク数が 10 以上のハブ的な神経細胞を表す

個々の点が 1 ユニット信号に相当し、その間

に引かれた線分が結合性を表す。結合強度が強い(より正確に同期しており、活頻度が多い)ほどカラースケールの上位の色で描画されている。これは一様に培養した神経細胞から得られた記録であるが、培養後20日前後でも、神経回路網が自己組織化により、情報が集中する集合ポイント(ハブニューロン)と沢山のニューロンに情報を出力する出力ポイントなどが出現していることが見て取れ、興味深い。さらに、神経細胞に入力するリンクの数からヒストグラムを作ると、その分布はガウシアン分布ではなく、むしろべき乗分布に近い形状を示した。このことは、神経細胞自身により自律的に再形成された回路網がスケールフリー性を有したネットワークを形成していたことを示しており、分散培養神経回路網がランダムではなく、自己組織化により情報処理に適した形を作っていたことを示している。

4-2. 分散培養神経回路網による情報処理

一時的(20 分間)に培養神経回路網系全体を Mg^{2+} 除去条件におき、神経活動を活発化することでシナプス増強を誘導し、この結果神経回路網を構成する神経細胞の機能的結合状態がダイナミックに変更されることを見いだした。 Mg^{2+} -free によるシナプス増強前後における神経細胞間の機能的結合性の変化を同時にマッピングして描画したグラフが図3である。左側が Mg^{2+} -free 条件前、右側が Mg^{2+} -free 条件後である。一つの電極から複数のユニット記録が得られているので、各ユニット信号を表す小四角は電極の位置とは完全に対応してはいないが、相対的位置関係はほ

ば維持されている。シナプス増強後、新たに出現したユニット信号(同期活動に關与する神経細胞)、および消失したものがあり、機能的な結合性が大幅に変化していることが示されている。

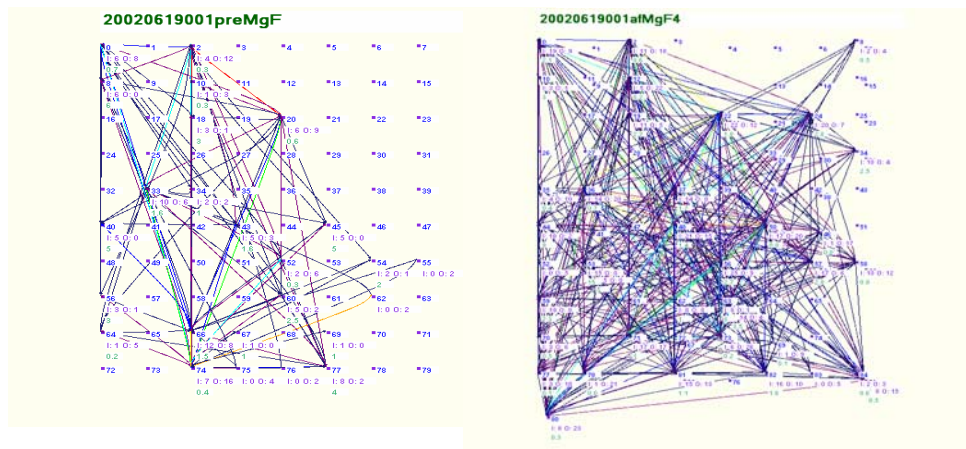


図 3 20分間の一時的な Mg^{2+} -free 条件によるシナプス伝達効率増強を、分散培養系内の様々なシナプスで誘導した結果おこった Connection Map の変化。左パネルが増強誘導前、右パネルが 増強誘導後。機能的結合の数が増大し、新たなハブの神経細胞が出現している。

さらに、自発的活動電位の一時的な活性化によらず、複数の部位からの局所的な定電流刺激を同時に印加することによって、神経回路網の情報処理パターンを調節する手法を探索した。通常の培養によりランダムに形成された神経回路網に於いても、所定の電極からのテストパルス刺激によって誘起される神経回路網の空間的活動パターンが複数パターン保持されていることを確認した(図 4 右)。さらに、それぞれこの二つのパターンを想起した入力を行った電極について、同時に高頻度刺激を印可したところ、この二つの保持パターンのうち一方が明確に変化することが確認された(図4)。つまり、この神経回路網に保持されている2パターンの神経活動について、

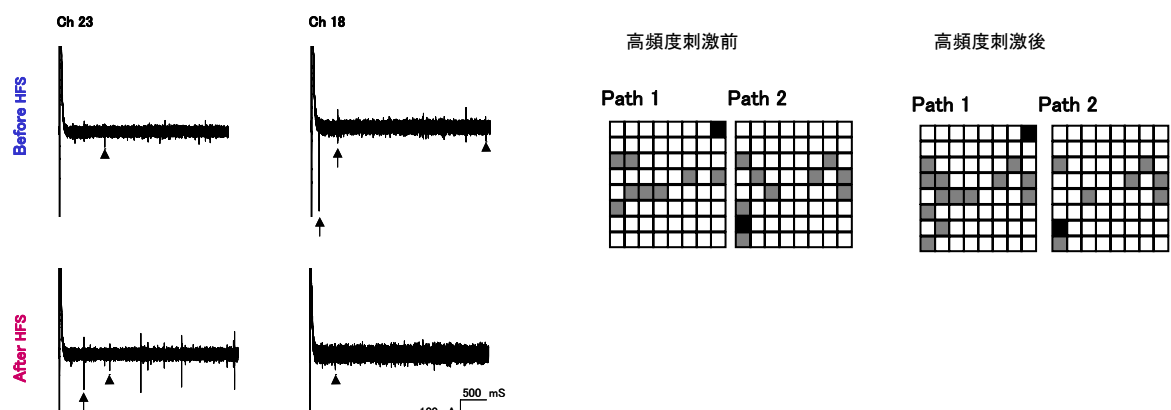


図 4 左パネル:2電極の高頻度同時刺激による誘導活動電位の変化。↑が誘導活動電位、▲が自発性活動電位。ch23では新たに活動電位が刺激によって誘導されるように変化し、ch18では逆にそれまで刺激によって誘導されていた活動電位が消滅している。左パネル:同じ神経回路網から作成した誘導活動電位のマップ。刺激電極(■)を切り替えた場合に、対応して誘導活動電位を検出できた部位(灰四角)が示されている。Path1とPath2の刺激点を同時に高頻度で刺激した後、各刺激点への刺激で誘導される活動電位パターンが変化している。高頻度刺激後は、Path1の刺激で高頻度刺激前のPath1とPath2をタdごうしたようなパターンが想起されている。

これらのパターンの同時励起を行うことで、パターンの融合が誘導されたということである。入力によって引き起こされる神経活動パターンが、その入力によって一つのパターンが想起されている状態に対応していると考え、この現象は、パターンの同時想起によってある入力から想起されるパターンと別の入力によって想起されるパターンを融合し、想起パターンの関連づけが行われたと考えることが出来る。この結果は人工的に再構築された生体神経回路網においてパターン保持・想起・融合の操作が実際に可能であったことを証するものとして非常に興味深い結果であるといえる。これらの電氣的刺激を組み合わせることで、神経回路網をあるモードでの定常状態で安定させるための技術が確立できる。このような生体神経回路網の正規化は、神経回路網の動的制御のみならず、薬物アッセイの指標系として神経回路網を活用するには大いに有効であると考えられる。

4-3. 環境と相互作用して情報処理をする神経回路網

培養9日～10日目から、自発的活動を検出してこれに対して論理演算を加えたフィードバック刺激を入力する系を構築した。最初の実験では、2カ所の電極からの電位検出を元に、1箇所にて定電流刺激を行った。2カ所から同時に10ms以内(AND)に同期した信号を検出した場合に刺激を印加する様に設定した。この実験スキームを“2-detection and 1-stimulation scheme”とする。この条件では、刺激により、神経回路網の活動が励起され、この活動によって2電極で検出される同期活動がトリガされ、これによりフィードバック刺激が引き起こされる、と言うように、繰り返しの刺激が印加される。ある時間経過後、回路網の内部状態の変化によって同期活動がずれると、この繰り返しの刺激は中断される。重要なポイントは、神経回路網に入力されるこのバースト状の刺激の周波数と刺激の長さは、全て神経回路網の内部状態によって制御されるということである。このスキームで培養10日目にフィードバック刺激を開始した結果、培養11日目にして既に明確な活動の変化を引き起こした。図5にその例を示す。

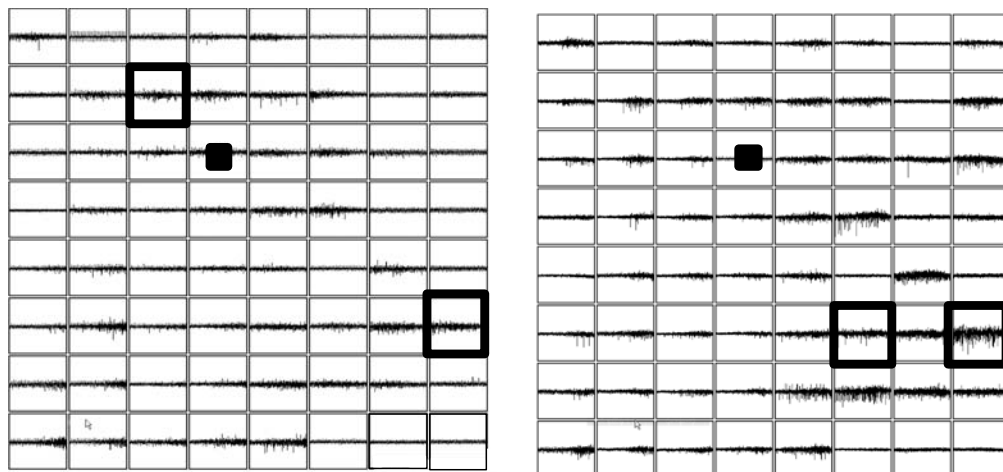


図5 フィードバック刺激による自発的活動電位パターンの変化。太枠は活動電位検出電極、■は刺激電極を示す。左パネルがフィードバック刺激前、右パネルが24時間のフィードバック刺激の後の記録である。24時間のフィードバック刺激の後、検出電極を右パネルのように変更してさらにフィードバック刺激実験を行った。

太枠が神経電気活動検出部位、■が刺激電流を印可した部位である。左のパネルがフィードバック

ク刺激前、右がフィードバック刺激を一日印加した後の実際の生体神経回路網の電気活動記録である。いずれもフィードバック刺激を停止した、自発的活動の記録である。活動パターンが明確に変わり全体的に活性が低下した。刺激電極付近でのみ活性の低下が起こっているのではなく、刺激部位から遠い部位に於いても活性の低下は起こっており、単なる神経細胞の慣化や失調ではなく、回路性の性質を反映したものであると考えられる。神経活動の活性化の低下と共に、機能的な結合が減少し、コネクションが集中するハブ的な神経細胞も減少した。さらに、電位を検出する電極のうち一カ所を別電極へ変更(右パネルの太枠)して設定した。この場合、はじめの条件より初期状態での同期活動頻度が少なくなるように電極を選定した。この設定条件で1日のフィードバック刺激を行った結果、システム全体の活動が回復し、機能的結合の数が増大する変化が起こった。これらの結果は、環境と相互作用することで、神経回路網自身がその機能的結合性を変化させて情報の流れを更新できることを示唆している。

4-4. 環境と相互作用して賢くなる神経回路網—ロボットを媒体として

以上までに述べた研究成果から分散培養神経回路網の自発的活動時空間パターンはダイナミックに変動する機能的細胞集成体の存在を示唆していること、培養系に於いて自律的に構成された神経回路網がランダムネットワークではなく、スケール・フリーネットワークの特徴を持っているようにみえることが明らかになった。言い換えれば培養神経回路網がランダムな系ではなく、情報処理に適した機能的構造を自律的に獲得しうる系だと言うことである。さらに、培養神経回路網が、シナプス伝達効率を調整することや、適切な同期的刺激入力によってその機能的結合を変更し、シンボル操作の原型のような情報処理を行いうことが示された。また、リアルタイム・フィードバック刺激を入力しながら培養を行った結果、外界との相互作用によって、生体神経回路網がある一定の対応を保つために機能的に再編されることを示す予備的な結果を得た。これらはいずれも、人工的な環境下に再構築された分散培養神経回路網が、自己組織化過程によって再編され、ある種の情報処理を行うことが十分可能な系となっていることを示している。

培養神経回路網は、生体に於ける脳とは異なり、遺伝的に規定された入力も出力も持たない系である。体から切り離された脳だけが存在している訳で、培養神経回路網の活動は0入力状態である。この再構成された生体神経回路網に、環境と相互作用する媒体を与えたならば、外界を反映した何らかの機能構造が新たに出現するのではないかという仮説を我々は提唱している。いわば、脳のための神経回路網に体を付与することによって知性の原型のようなものが観察できないかと言うことである。以上をふまえて、環境と相互作用する媒体としてセンサ(入力)とアクチュエータ(出力)を備えた小型ロボットを接続して継続的に解析できる系を構築した。このような系は、世界的にもいくつか立ち上がってきているが、我々は、入力と出力を予め固定して特定のルールでフィードバックをかけることで、系の活動状況がある平衡状態へ収束するか検討していること、進化的に組み込まれた回路をプログラムで代替しようとする点で先進的である。接続する小型ロボットにはKhepera IIを採用した。Khepera IIは8個の近接赤外線センサとタイヤの回転角を計測するインクリメンタル・エンコーダを感覚系として備え、2個の独立制御可能なアクチュエータを備えている。シリアル通信を使ってホストコンピュータからASCIIコマンド制御することができ、これをカプセル化し

た LabView の VI が付属している。他方、細胞外電位多点計測システムの A/D 変換ボードが National Instrument 社製であり、LabView が制御プログラムの標準開発言語として使用できることから、制御プログラムは LabView を用いて開発した。LabView を用いて、生体神経回路網の活動から Khepera II を制御するプログラムを構築した。本プログラムは 3 つのモジュールからなる。第一のモジュールは、64 点の神経活動を常時モニターして、規定の閾値以上の電圧振幅を持つ信号を検出する。第一段階の試作としては、単純に任意に選んだ 2 つの神経電極から予め設定したタイムウィンドウ内の活動電位を検出し、そのスパイク数をカウントするものを構成した。第 2 のモジュールは第一のモジュールから渡されたパラメータを元に Khepera II のアクチュエータを制御する。第 3 のモジュールは Khepera II のセンサ値を監視し、刺激パルス数を設定して刺激信号をアンプに入力する。負荷を分散するため、モジュールの 1, 3 と 2 はそれぞれ 2 台のパソコン上で稼働させ、Data Socket により通信させることで連携している。本システムによって、Khepera II ロボットを神経活動を反映した動きで制御することに成功した。今後はこの系をさらに発展させ、学習などの高次脳情報処理と神経回路電気活動の時空間パターンとの関連性を実験的、理論的に研究可能とする神経物理工学プラットフォームとして確立していきたいと考えている。

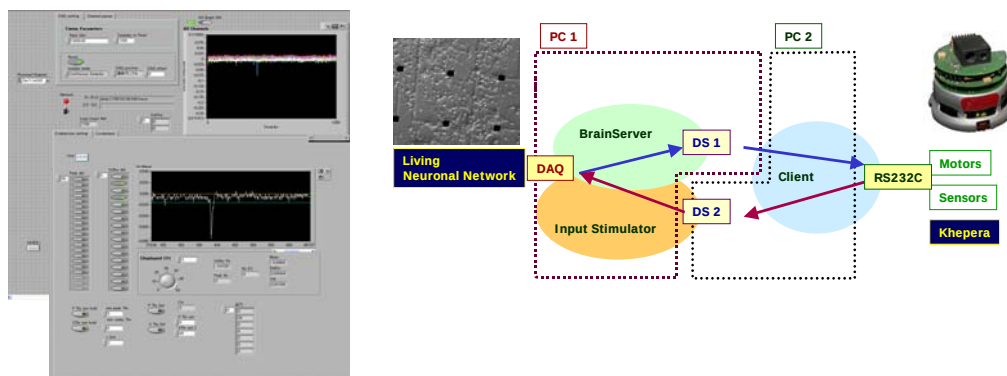


図 6 右パネル: 神経回路網—ロボットインターフェイスプログラムの中核ソフトウェア、BrainServer のフロントパネル。LabView にて開発。右パネル: 神経回路網—ロボットインターフェイスプログラムの概略図。システムは 2 台のパソコンに分散し、DataSocket プロトコルで通信することで情報をやりとりする。

5. 自己評価:

当初の主要な目標である「培養神経回路とコンピューターが相互作用しながら情報を創発する系を構築し、応用システムとしても研究対象としても魅力的な情報体を実現しようとする」という点についてはほぼ実現できたと自負している。特に、人工環境下に分散培養された神経回路網が情報処理に適したネットワーク形態を自律的に構築していることを見だし、情報処理を担うユニットとしての神経回路網の潜在的機能を明らかにした点は興味深い成果であると考えている。また、神経回路網がフィードバック刺激装置等、外界を反映した入力を返す系と相互作用して情報処理の流れを変更するということ、さらにフィードバック刺激を的確に設定することで、神経回路網の活動をある程度「規格化」することの十分な可能性と有望な手法を見いだしたことも当初の目的にかなった研究成果である。また、神経回路網が入力刺激に応じた活動を発現すること、複数の

入力によって発現する活動パターンが連合的入力によって関連づけられることは、神経回路網がある程度のパターンの学習・識別機能を有することを示唆する結果であると考えている。

機能分子の空間分布と情報処理過程のマッチング解析に関しては、神経回路網の培養密度の高さと物理的ネットワークの複雑性、局所的刺激の難易性から当初想定していた効果が得られたとは言えない。これらに関しては刺激システム自体のブラッシュアップとさらなる開発、培養系の簡素化など課題が残っている。機能分子の投与による培養神経回路網の制御技術に関しては、脳由来神経栄養因子(BDNF)の急性効果を確認し、この分子による制御の可能性を確認できた。しかし、局所的投与の手法など、未だ解決すべきポイントは残る。神経回路網自らが培養条件を制御する系については、うまく系が安定した結果が得られていない。これには進化的陶太というファクターを新たに考え、この部分までプログラムとして作り込んで、神経回路網の活動と生存の制御との間に価値判断のプロセスを組み込む必要があるように思われる。その部分を明確化する必要性もあり、小型ロボットと相互作用する系を構築した。生体神経回路網が外界と相互作用する系としては、神経回路網への入出力が電氣的活動に集約できるという点でむしろこちらの方が明確な系であると思われる。特に、先行的な研究と比べて、進化的に決定された部分をプログラムで作り込むという点で大きく進んでいる。本系は、学習などの高次脳情報処理と神経回路電気活動の時空間パターンとの関連性を実験的、理論的に研究可能とする神経物理工学プラットフォームとして非常に有効な系となると考えており、本研究テーマで得られた、当初の目的より発展した大きな成果の一つであると考えている。

6. 研究総括の見解:

本研究の目標は、賢くなる生体ユニットである培養神経回路と電子デバイスである電極と増幅器・制御コンピューターが相互作用しながら情報を創発する系を構築し、応用システムとしても研究対象としても魅力的な情報体を実現しようとするところにある。本研究において、多点電極皿上に於いて分散培養された神経回路網のネットワークの特性を解析することにより、培養系に於いて、自発的活動時空間パターンはダイナミックに変動する機能的細胞集成体の存在を示唆していること、および自律的に構成された回路網がランダムではなく、スケール・フリーネットワークの特徴を持っていることを発見したことは大きな成果であり、高く評価できる。さらにこの結果をふまえ、環境と相互作用する媒体として小型ロボットを接続して継続的に解析できる系を構築したことも評価できる。

今後の展望として、神経回路網を制御する技術を確立して、最終的には神経回路網自身が自らの生育条件を制御する人工生命体を目指すことを期待します。

7. 主な論文等:

論文

1. Suguru N. Kudoh and Takahisa Taguchi “Operation of spatiotemporal patterns stored in living neuronal networks cultured on a microelectrode array” Journal of Advanced Computational Intelligence & Intelligent Informatics (JACII3), (2003) 8(2):100–107

2. 工藤 卓、田口 隆久 “外界と相互作用する生体神経回路網” 計測自動制御学会論文集 Revised
3. Suguru N. Kudoh and Takahisa Taguchi “Synaptic potentiation updates self-organized functional assemblies in cultured living neuronal networks”. J. Neural Eng. Submitted.
4. 工藤 卓、田口 隆久 “再構成生体神経回路網における知覚と知性の探求” 日本知能情報ファジィ学会論文集 Submitted.
5. T. Taguchi and S.N. Kudoh, “Network dynamics of cultured hippocampal neurons in a multi-electrode array” . Progress in biomedical optics and imaging. proceedings of SPIE, 5651 5(34) pp.243-253, 2005

国際会議発表論文

1. Suguru N. Kudoh, Takahisa Taguchi and Syunsuke Yuba, “The modification of functional connectivity changes spatio-temporal patterns of spike activities in dissociated neuronal networks”. Neuroscience 2004, the Society for Neuroscience 34th Annual Meeting, Sandi ego, 2004.10.27
2. Suguru N. Kudoh, Takahisa Taguchi, Syunsuke Yuba, “Synaptic enhancement induced dynamical change of functional connections between neurons in living neuronal networks.” 2004 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, Kitakyushu, 2004.12.1
3. Suguru N. Kudoh and Takahisa Taguchi, “Robotic brain: interaction and intelligence in living neuronal networks connected to moving robot.” SICE Annual Conference 2005, Okayama, 2005.8.9
4. Suguru N. Kudoh and Takahisa Taguchi, “Synaptic potentiation modulates self-organized functional assemblies in cultured living neuronal networks.” Neuroscience 2005, the Society for Neuroscience 35th Annual Meeting, Washington D.C., 2005.11.16.
5. Suguru N. Kudoh and Takahisa Taguchi, “Interaction and intelligence in living neuronal networks interfaced with moving robot”. SPIE International Symposium of MEMS 2005, Brisbane, 2005.12.14

国内会議発表論文

1. 工藤 卓、田口隆久、“分散神経回路網における自己組織化ネットワークのダイナミクス”、第28回大会日本神経科学 Neuroscience2005、横浜、2005.7.27
2. 工藤 卓、田口隆久、“再構成神経回路網と小型ロボットとの相互作用～神経物理工学プラットフォームの確立を目指して”、第20回生体・生理工学シンポジウム(BPES2005)、東京、2005.9.6
3. 工藤 卓、田口隆久、“ロボットと相互作用する生態神経回路網～神経物理工学プラットフォームの確立を目指して”、第21回ファジィシステムシンポジウム、東京、2005.9.8

4. 工藤 卓、“情報工学融合分野のための神経科学概論”、第11回 相互作用と賢さ 合同研究会、名古屋、2005.11.4
5. 工藤 卓、“ロボットと生体神経回路網：環境と相互作用する分散培養神経ネットワーク”、日本知能情報ファジィ学会 第17回 ファジィ・コンピューティング研究部会 ワークショップ、第2回 脳と知覚研究会 ワークショップ（協催）、芦原、2005.11.20

著書、総説・解説

1. 田口隆久、工藤 卓、『ナノバイオ辞典』『神経細胞』（株）テクノシステム、出版中

招待講演

1. 工藤 卓、田口隆久、“分散培養神経回路網における自己組織化された機能的ネットワーク”、生理学研究所セミナー、岡崎 生理学研究所、2004.2.24
2. 工藤 卓、田口隆久、“培養生体神経回路網における神経細胞機能的結合の形成と調整”、北海道大学 工学部、札幌、2004.8.5
3. 工藤 卓、田口隆久、“外界と相互作用する生体神経回路網～神経物理工学プラットフォームの確立を目指して”、北海道大学 工学部、札幌、2005.9.15
4. 工藤 卓、田口隆久、“相互作用によって自己組織化される培養神経回路網－生物の部品にロボットの体を与える試み－”、理研フォーラム、名古屋 理化学研究所、2005.11.29

研究課題別評価

1. 研究課題名: 人間とロボットの相互関係形成のための構造化学習

2. 研究者氏名: 久保田直行

3. 研究の狙い:

人間に優しいロボットの従来研究は、ある特定の行動学習や知識の抽出、音声対話や感情表現に基づく円滑なコミュニケーションを目指したものが多く、人間とロボットのコミュニケーション形態の形成や学習に関する議論は、ほとんど行われていない。また、人間とロボットとの相互関係形成の議論は、「慣れ」や「愛着」に関する議論だけでなく、「信頼性」への議論へと発展し、ロボットとの相互関係は、はき慣れたシューズや乗り慣れた自転車や自動車のように使用者の期待を裏切らない道具へと進化させうる。相互関係は、単に故障率や精度等の問題でなく、人間と人間のように実際に「関わる」ことにより相互適応するプロセスの中に構築される関係であり、相互関係形成を相互学習の枠組みから議論する必要がある。

本研究では、人間との相互関係を形成するためのロボットの構造化学習の方法論の確立を目指す。具体的には、人間とロボットとのコミュニケーション形態の形成プロセスの解析や人間からロボットへの教示方法の形成プロセスの解析に基づき、人間とロボットとの相互関係形成の議論を通して、人間がロボットをパートナーとしてより賢く共存できる方法論を構築することである。人間との相互作用の中から人間とロボットの相互関係形成を議論するためには、大きくわけて、以下の三つの観点から研究を進める。まず、コミュニケーションに必要なロボットの知覚システムに関する研究である。人間は、他者の発話内容や身振り・手振りに基づき、見ている環境から必要な情報を探索しながら、円滑なコミュニケーションを進める。したがって、人間のように環境を介したコミュニケーションを支えるための知覚システムを構築する。次に、ロボットの人間とのコミュニケーションと教示に関する基礎研究である。ロボットの学習において、成功や失敗に関する教示は、最低限、必要不可欠であるが、その教示の仕方そのものが形成される過程を例に、人間とロボットのコミュニケーションを可能にするロボットの学習機構や模倣学習のための方法論を構築する。さらに、行動学習時に人間との接触の構造や状況に関する価値関数を学習させることにより、未来のコミュニケーションにおいて、獲得済み行動を再現するための方法論を提案する。最後は、人間とロボットの相互関係形成を実現するための全体としての構造化学習の方法論に関する研究である。

4. 研究成果:

4.1 パートナーロボットの開発

本研究では、パートナーロボットとして、人型ロボット Hubot とパソコン型ロボット MOBiMac を開発した(図1)。人型ロボットを用いた研究では、身振り・手振りを行うことによる人間のような表現に基づくコミュニケーションを用いた相互関係の形成に関する議論を行うことを目的とする。一方、パソコン型ロボットを用いた研究では、特に注意の方向である「向き」に限定したコミュニケーションを用いた相互関係の形成に関する議論を行うことを目的とし、さらには、コンピュータをロボットに置き換えた場合の人間とコミュニケーションスタイルに関する研究を行う。

4.2 自然なコミュニケーションのための知覚システム

人間は、他者の視線や指差し動作、ジェスチャー等にしがたい、環境内から必要な情報を抽出している。特に、このような能力を実現する知覚システムは、環境内から全ての情報を抽出しようとするのではなく、他者との経時的なコミュニケーションにしがたい、必要とする情報を探索している。具体的には、環境が持つダイナミクスと人間とのコミュニケーションのダイナミクスにしがたい、知覚した情報に基づき、次に必要とされる情報を抽出するための知覚モジュールが選択される。本研究では、このような知覚モジュール選択機構を実現するために、スパイキングニューラルネットワーク(SNN)を用いる。SNN は、時空間的パターンを学習することができ、知覚モジュールに対応し

たニューロンが発火した場合、情報抽出を行うようにサンプリング間隔の制御を発火パタンに埋め込む。各ニューロンへの入力、他のニューロンからの発火情報や各種センサの計測値が入力される。図2にSNNを用いた画像処理の様子を示す。左上が原画像、中上が差分中抽出、右上が顔認識、左下が物体認識、中下が腕姿勢認識、右下がジェスチャー認識となっている。まず、差分抽出に基づき、注視領域を生成した後、各種画像処理知覚モジュールが選択される。画像処理知覚モジュール選択に用いられたSNNの発火履歴を図3に示す。実験結果から、ロボットは、適宜、コミュニケーションに必要な画像処理知覚モジュールを選択している様子がわかる。このように人間との円滑なコミュニケーションを実現するためには、その場に適切な知覚を行う能力が必要である。次に、ジェスチャー認識は、時間的な手の動きを抽出することを目的とし、ここでは、サイクリックジェスチャー認識の結果を図4に示す。この例では、8の字に動かした手の動きを抽出することができている。このように人間の手の動きを抽出し、そのときの状況や行動を学習することにより、未来におけるコミュニケーションにおいて、学習済み行動を再現することが可能になる。



図1 人型ロボット Hubot とパソコン型ロボット MOBiMac

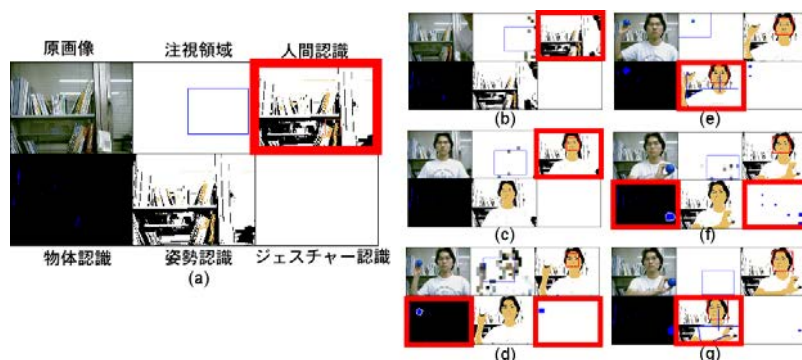


図2 SNNを用いたサンプリング間隔制御と画像処理

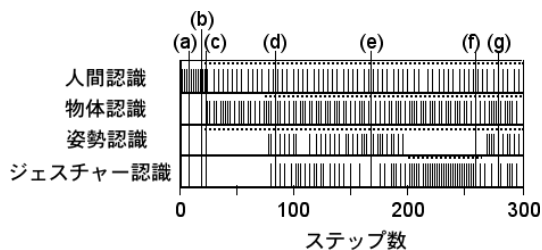


図3 画像処理知覚モジュール選択のためのSNN発火履歴



図4 ジェスチャー認識

4. 3 人間に優しい行動のための学習

人間に優しい行動の学習を実現するために、本研究では、(1)評価を与えずに、人間とロボットの試行錯誤的な接触から構造的なパタンを探り合う学習方法、(2)人間の評価に基づき人間にとって怖くない動作パタンを試行錯誤的に学習させる方法、(3)人間の動作パタンを模倣させる方

法を提案した。

まず、(1)では、異なる人間の接触パタンのダイナミクスを、知覚-行為循環に基づく予測情報を用いて、複数の異なるニューラルネットワークにより分散的に学習する手法を提案し、人間によるロボットのナビゲーションに適用した(図5)。ここでは、事前に人間には、ロボットの動作パターンが教えられていないため、人間は、ロボットの動作パターンを探索するために様々な接触を試みる。図6に学習の最初と最後の試行結果のロボットの軌道を示す。人間の接触のパターンは全くのランダムではなく、何らかの構造を持ち、ロボットはこの接触パターンを学習するとともに、人間に理解しやすい動作パターンを生成する。その結果、最初は、互いの反応の予測が困難だったため、うまく誘導できていないが、学習が進むにつれ、滑らかに誘導することができた(図6)。この互いの探索的、かつ、試行錯誤的な動作パターンをファジィ推論ルールで記述し、進化的計算を用いて生成し、人間がナビゲートしやすい動作パターンを学習できることを示した。ここで、重要なことは、ロボットの学習において、成功や失敗に関する教示は、最低限、必要であるが、この教示の仕方そのものが、相互作用を通して形成された点である。ロボットは、ランダムなセンサ入力を学習することが困難であり、人間がランダムな接触を試みるとき、ロボットは学習しない、すなわち、失敗という教示を表現できることを学習した。以上のことから、相互関係を形成するためには、互いに構造的な接触をし、互いに反応が予測可能であることが重要であることを示した。



図5 相互適応に基づくナビゲーション実験でのインタラクション

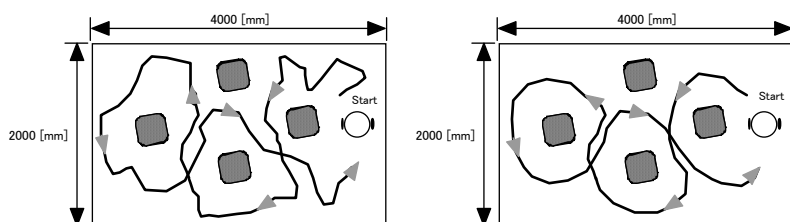
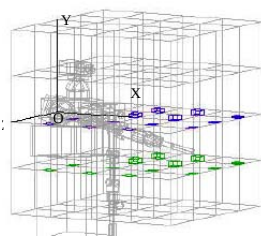


図6 相互適応に基づくナビゲーション実験におけるロボットの軌道の変化

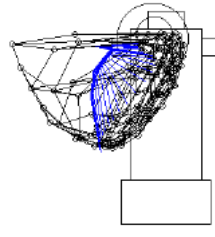
次に、(2)の適用例として、手渡し動作の学習を行った(図7)。ここでは、被験者に10段階の評価値入力を行ってもらった。具体的には、ロボットが行動(軌道)を提示しながら、人間の評価を3次元モデリングし、人間の評価の高い空間を通るような軌道を対話型遺伝的アルゴリズムを用いて生成した。また、自己組織化マップ(SOM)を用いて手渡し動作の目標点の分類学習を行うことにより、人間とのインタラクションで用いられる領域やタスクを分類した。また、階層型ニューラルネットワークを用いて軌道学習を行うことにより、人間に優しい軌道を学習できることを示した。



(a) 手渡し動作



(b) 3次元評価モデリング



(c) SOMを用いた軌道学習

図7 人間に優しい軌道生成

ここでは、最小限の評価入力だけで、人間の評価構造の3次元モデリング、タスクの分類、軌道学習を同時に行うことができ、互いの学習状況にあわせて調整し合いながら学習を同時に行う構造化学習の有効性を示した。

最後に、(3)では、人間の手振りにしたが、模倣学習を行う手法を提案した。模倣学習は、観測した動作パターンをロボットの身体的特徴にあわせて解釈して再現される。ここでは、4.2 で示したジェスチャー認識手法を用いて手の動きを抽出・分類し、ロボットが人間の手振り・身振りを学習する。図8に模倣学習の一例を示す。この結果では、人間の簡単な手振りのパターンを学習し、それを再現することができた。



図8 模倣学習の様子

以上のように、提案手法では、人間と触れ合うことから、様々な行動パターンを学習し、これらの獲得した行動を人間とのコミュニケーションにおいて再現できるため、互いの行動を予測し、期待を裏切らないパートナーになりうるために必要な基本的な行動学習能力があることを示した。

4. 4 経験に基づくコミュニケーションのための価値関数

人間の行動は、多くの場合、環境条件に制約される。例えば、子供にとって、リビングルームに置いてあるボールと子供部屋に置いてあるボールの遊び方は異なる。これは、相互作用の仕方が取り巻く環境条件に大きく左右されることを意味し、コミュニケーションの仕方も置かれている環境にあわせて変化し、身振り・手振りや発話内容の解釈も変化する。すなわち、行動学習を行う際に、その行動がどのような場所で、どのような状況で行われたかということを学習する必要がある。ここでは、価値関数を用いたマップビルディングを行う。この生成されたマップを参照することにより、経験に基づく未来のコミュニケーションがより円滑に行われる。研究室内にバッテリーステーションとボールを置いて、マップビルディングを行った一例を図9に示し、情報抽出の様子を図10に示す。人間とインタラクションをしながら、マップを更新するとともに、インタラクションの際の会話や認識した物体を関連づけるため、場所情報に基づく過去の経験を活かしたコミュニケーションが未来に実現されうる。

4. 5 小学校での英会話教育

本研究では、人間と相互作用しながらロボットが認知発達するため、適用事例の一つとして、小学校の教育現場にロボットを導入し、人間との相互関係形成のプロセスを議論した(図11)。近年、小学生のコミュニケーション能力の低下が問題視されている。その原因の一つとして、コンピュータゲームやテレビの視聴時間が長く、人と触れ合う時間が少なくなっていることがあげられている。子供のロボットとの触れあい方は、人や動物との触れあい方とは異なり、ロボットの仕組みを知ろうと色々なことを試みる。実際、ロボットが英語を話し出すと、ネイティブの先生とは英語であまり話そうとしない子供が、片言の英語で積極的にロボットと英語で会話しようと試みていた(図12)。一般にパソコンを用いた英会話教育では、画面上の2次元の世界に没入しがちになり、マウスとキーボードの操作だけで表情をほとんど見せないが、ロボットを用いた英会話教育では、身振り・手振りをとれないながら、遊び、楽しんでいた。さらに、子供が見せた積み木やボールを用いて、ロボットがリアクションするため、生きた英会話教育が実践できる。このように動きを伴うロボットを用いた教育では、子供のコミュニケーション能力の低下を抑制しつつ、生きた英会話を教えることができるため、語学教育に効果的に適用できると考えられる。次に、このロボットは、人間が見せたモノを記憶したり、インタラクションのパターンを学習できるため、子供がロボットに身近なモノを教える一方で、ロボットは、子供に英会話を教える、双方向の学習(相互学習)が実践でき、さら

に教育効果が高まる可能性がある。

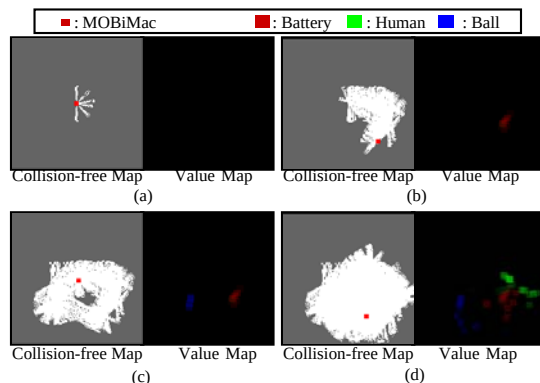


図9 マップビルディングの一例

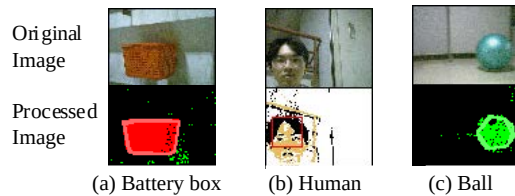


図10 マップビルディングにおける情報抽出



図11 小学校でのコミュニケーション



図12 ロボットを用いた英会話教育

5. 自己評価:

本研究では、2種類のパートナーロボットを開発し、自然なコミュニケーションを実現するために、様々な観点から相互関係形成に必要な構造化学習の方法論を提案した。当初の最終目標は、人間とロボットの相互関係の形成プロセスに関する議論を行うことであり、基礎実験を行った結果、互いに予測可能な接触と反応の関係を学習しあうことが重要であることを示した。しかしながら、人間のような自然なコミュニケーションを実現するために行った人型ロボットを用いた研究では、限られた時間の中で、当初の最終目標である人間とロボットの相互関係の形成には至らなかった。その原因は、人間との自然なコミュニケーションに必要な指示語理解や身振り手振りに基づく環境情報抽出のための知覚システムが不完全であったためであり、現在、これらの知覚システムの改良を行っている。一方、研究成果の適用事例として、小学校教育におけるロボットに関する議論を行った。コンピュータを用いた教育に代わりロボットを用いた場合、子供のコミュニケーション能力の低下を抑制しつつ、自主的かつ積極的な学習が行える可能性を示すとともに、ロボットと人間の双方向的な学習(相互学習)の有効性を示し、今後の効果的な教育ロボティクスの可能性を示した。以上、まとめると、3年間の研究成果として、様々な観点から人間とロボットのコミュニケーションに関する議論ができ、今後の発展的な研究に繋げるための方向性が固まったと思われる。

今後の展望として、人間との自然な関わりの中からロボットが認知発達するために必要な理論を体系化し、人に優しいパートナーロボットの学習のための方法論を確立していきたい。さらに、学校で子供を危険から守る能力を併せ持つ教育現場での総合的なロボットを開発する予定であり、「子供の認知発達の仕組みを解明し」、「子供の能力を引き出し」、「子供を危険から守る」ための教育現場の基盤構築と発展に貢献することが期待できる。

6. 研究総括の見解:

本研究は、人間との相互関係を形成するためのロボットの構造化学習の方法論の確立を目指す。本研究では、2種類のパートナーロボットを開発し、コミュニケーションを支えるためのパートナーロボットの知覚システムを開発するとともに、模倣学習に基づく行為システムと人間や環境とのインタラクションを評価するための価値システムを統合した構造化学習の方法論を提案したことは、大きな成果であり、高く評価できる。さらに、小学校での英会話教育への適用事例では、子供がロ

ボットに身の回りのものを見せながら覚えさせ、ロボットは子供に英語を教えることによる双方向的な学習の効果を示したことも評価できる。

今後の展望として、人間との自然な関わりの中からロボットが認知発達するために必要な理論を体系化し、人に優しいパートナーロボットの学習のための方法論を確立されたい。

7. 主な論文等:

論文

1. 久保田直行, 三原正雅, 小島史男, 福田敏男, “疑似生態系のための共進化型ロボットの行動獲得”, 日本知能情報ファジィ学会誌, 15巻, 1号, pp.88-97, 2003.
2. Kubota, N., Hisajima, D., Kojima, F., and Fukuda, T., “Fuzzy and Neural Computing for Communication of a Partner Robot”, J. of Multi-Valued Logic and Soft Computing, Vol.9, pp.221-239, 2003.
3. Naoyuki Kubota, Yosuke Urushizaki, “Communication Interface for Human-Robot Partnership”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.16, No.5, pp.526-534, 2004.
4. Naoyuki Kubota, “Computational Intelligence for structured Learning of A Partner Robot Based on Imitation”, Information Sciences, No.171, pp.403-429, 2005.
5. Naoyuki Kubota, Yusuke Nojima, Fumio Kojima and Toshio Fukuda, “Multiple fuzzy state-value functions for human evaluation through interactive trajectory planning of a partner robot”, Soft Computing, 2005.

国際会議発表論文

1. Naoyuki Kubota, Yusuke Nojima, Fumio Kojima, “Imitative Behavior Generation for A Vision-Based Partner Robot”, Proc. (CD-ROM) of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2004), pp.3080-3085, Sendai, Japan, September 28 – October 2, 2004
2. Naoyuki Kubota, Kyotaro Tomoda, “Behavior Coordination of A Partner Robot based on Imitation”, Proc. of 2nd International Conference on Autonomous Robots and Agents, pp. 164-169, Palmerston North, New Zealand, December 13-15, 2004
3. Naoyuki Kubota, Kenichiro Nishida, “Fuzzy Computing for Communication of A Partner Robot Based on Imitation”, Proc. of 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (CD-ROM), pp. 4391-4396, Barcelona, Spain, April 18-22, 2005
4. Naoyuki Kubota, Kenichiro Nishida, “Human Recognition of A Partner Robot Based on Relevance Theory and Neuro-Fuzzy Computing”, Proc. (CD-ROM) of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2812-2817, Edmonton, Alberta, Canada, August 2-6, 2005
5. Naoyuki Kubota, Toshiyuki Shimizu, Minoru Abe, “Joint Attention of A Partner Robot Based on Computational Intelligence”, Proc. (CD-ROM) of 2nd International Symposium on Computational Intelligence and Intelligent Informatics (ISCIII 05), pp.196-201, Les Côtes De Carthage, Gammarth Tunisia, October 14-16, 2005

国内会議発表論文

1. 久保田直行, 能島裕介, 小島史男, “パートナーロボットの見まね学習のための知覚システム”, 第20回ファジィシステムシンポジウム, pp.398-403, 2004.6.2-3
2. 久保田直行, 西田謙一郎, “ニューラルネットワークを用いたパートナーロボットのコミュニケーション”, 第14回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集, pp.117-122, 2004.10.9.
3. 久保田直行, 清水俊之, “パートナーロボットの人間検出のための視知覚”, 第21回ファジィシステムシンポジウム 講演論文集, 8D2-2, 2005.9.8.
4. 久保田直行, 清水俊之, “模倣に基づく行動モデル生成と学習”, 日本応用数理学会 2005年度年会 講演予稿集, pp.48-49, 2005.9.23.

5. 久保田直行, 小嶋宏幸, “ロボットとのコミュニケーションによる英会話教育”, 2005年度学術講演会発表論文予稿集(CD-ROM), 11月18日 B-③, 2005.11.18.

著書

1. Fukuda, T. and Kubota, N., “Intelligent Learning Robotic Systems Using Computational Intelligence (Computational Intelligence: The Experts Speak, Edited by Fogel, D.B. and Robinson, C.J.)”, IEEE Press, pp.121-138, 2003.
2. 久保田直行, “知覚-行為循環によるパートナーロボットとのコミュニケーション(パターン・記号統合 基礎と応用-ペットロボットのペットらしさを求めて, 古橋, 萩原編)”, 丸善株式会社, pp. 158-171, 2004.
3. Toshio Fukuda and Naoyuki Kubota, “6.43.38 Robotics,” in Control Systems, Robotics and Automation, edited by H. Unbehauen, in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK, [http://www.eolss.net]
4. Naoyuki Kubota and Toshio Fukuda, “6.43.38.4 Intelligent Robots,” in Control Systems, Robotics and Automation, edited by H. Unbehauen, in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK, [http://www.eolss.net]
5. Naoyuki Kubota, Masayuki Kanemaki, “Search of Steady-State Genetic Algorithm for Vision-based Mobile Robots”, Recent Advances in Simulated Evolution and Learning (Kay Chen Tan, Meng Hiot Lim, Xin Yao, and Lipo Wang edited), World Scientific, pp. 729-746, 2004.

総説・解説

1. Fukuda, T. and Kubota, N., “(Tutorial) Computational Intelligence for Robotic Systems”, Proceedings (CD-ROM) of the 2003 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FuzzIEEE2003), p.1495, 2003-5.
2. Naoyuki Kubota, “(Tutorial) Learning and Evolution for Intelligent Robots”, Proc. (CD-ROM) of The 5th International Conference on Simulated Evolution And Learning (SEAL 04), BEXCO, Busan, Korea, October 26-29, 2004.
3. 久保田直行, “(解説)進化的ロボティクスと適応”;システム制御情報学会, システム/制御/情報, Vol.47, No.12, pp. 565-570, 2003.
4. 久保田直行, “(解説)知能ロボットの行動学習”;システム制御情報学会, システム/制御/情報, Vol.48, No.2, pp. 51-56, 2004.
5. 久保田直行, “(解説)システムインテグレーションとインテリジェントシステム”, 計測と制御, Vol.44, No.5, pp. 339-344, 2005.

招待講演

1. 久保田直行, (特別講演)鉄腕アトムとパートナー, 「未来を描くロボットの知-アトム生誕を記念して-」, 2003.4.7
2. 久保田直行, (招待講演)パートナーロボットのためのソフトコンピューティング, シンポジウム「最近のソフトコンピューティング技術の進展」, 早稲田大学, 2003. 6. 7
3. Naoyuki Kubota, (Plenary Speech) 「Structured Learning for Partner Robots」, Proc. of 2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems Vol.1 pp.9-14, Budapest, Hungary, Jul.25-29, 2004
4. 久保田直行, (特別講演)「パートナーロボットの構造化学習」, KES 国際会議日本支部主催第2回講演会講演論文集, pp.9-16, 2004.7.17
5. 久保田直行, (招待講演)「ロボットを通して, 人の心や行動を考える」, 東京都千代田区立九段小学校, 2005.10.28
6. 久保田直行, (特別講演)「人の暮らしを明るく支えるパートナーロボット」, 第9回いたばし産業

見本市, 板橋区立東板橋体育館, 2005.11.17-19

受賞

1. Recognition Award, SOFT (国際シンポジウム, ISCIII 2003), (論文題目) Computational Intelligence in Robotics, 2003-5.

研究課題別評価

1. 研究課題名： 環境・防災モニタリング用小型2重反転回転翼機の開発

2. 研究者氏名： 砂田 茂

3. 研究の狙い：

我が国は、大規模地震が多発する地域にあるが、備えによって地震による被害を小さく抑えることは可能である。現在、地震発生直後の数時間は情報収集が行えず、情報空白期間があるとされているが、この情報空白期間を埋めること(防災モニタリング)が、地震被害を最小に抑えるため重要である。また、2005年春に京都議定書が発効される等、環境問題は深刻化しており、上空大気の分析、上空からの産業廃棄物や植生の調査等、環境モニタリングの必要性が高まっている。本研究では、これら防災・環境モニタリングのための小型回転翼機の開発を行う。

回転翼機が1kgを超えると、そのロータは直径が1mを超えるカーボン製のものとなり、人に衝突した際に人命にかかわる損傷を負わせることになる。そこで、本研究では総重量が100–200g程度で、ロータ直径が20–30cm程度の回転翼機を開発する。この程度の重量であれば、発泡スチロール製のロータでの飛行が可能となり、人体衝突時に人体に重大な損傷を与えることはない。

上記のサイズの回転翼機を開発するためには解決すべき2つの問題点がある。1番目は、一般に航空機が小型・軽量化すると風に流されてしまい、目標位置に向かう飛行が困難になることである。2番目は、上記サイズの回転翼機に搭載可能な程、小型・軽量化されたセンサ、コンピュータの性能が大変低いことである。

1番目の問題をクリアするために、従来の回転翼機を相似のまま小さくするのではなく、風に対抗できる機体コンフィギュレーションを提案し、風の中で姿勢を安定に保ち、位置制御が可能であることを実証する。2番目の問題をクリアするためには、既存のセンサ、マイコンの組み合わせと制御プログラムの工夫とによって、一応の姿勢安定、位置制御を可能にし、それ以上の姿勢安定は機体コンフィギュレーションの工夫によって実現する。

4. 研究成果：

4. 1 開発機体及びその飛行

ロータ直径が約35cm、重量が約450gの小型回転翼機(図1)を開発した(特願2005–238767)。開発機に搭載された機器を表1にまとめる。本開発機の特徴は、以下の通りである。

(1)機体の位置制御:機体の現在位置はGPSで測定し、プログラムされた目標位置に向かって機首を向ける。機体の向く方位の制御はジャイロ、方位計による。次に、機体後部の小型プロペラで機体、すなわちメインロータ(2重反転回転翼)を前傾させ、推力の前向き成分を大きくする。また、機体を前傾させるに当たっては、下段ロータへのサイクリックピッチ入力による下段ロータの

前傾も合わせて行われる。(2)機体の高度制御:上、下段モータの回転数制御で行う。なお、高度計は気圧センサ(MPX4115A:Free Scale製)を用い、独自に製作したものである。(3)位置・高度・姿勢制御のため、2つのマイコンによって、全てのセンサからの信号を処理し、上・下段ロータ用の各モータ、下段ロータ用の2つのサーボモータ、小型プロペラ用モータを制御する。(4)機体重心より下方に、ダクトを装着する。このダクトは機体の抵抗を増加させ、機体が風に流されるのを助長するが、姿勢安定に貢献する。機体の姿勢安定は、ダクト、上段ロータと連結するスタビライザ・バー、及びジャイロによる。(5)上空からの映像撮影のためには小型カメラが、大気採取のためには独自に製作した空気採取器が搭載される。

図2に、本開発機体が目標位置に向かって自律飛行する様子を示す。機体を大きく前傾させていることが分かる。また、GPSによって測定された、飛行中の機体の位置を図3に示す。本飛行中、約20mの高度を飛行した。地上での風速は2-3m/sであり、この高度での風速は、この値以上と推測される。地上での風速が2-3m/s程度であれば、位置制御が可能であることが確認された。

図4に、オンボードカメラで撮影された、高度約40mからの地上の様子(動画の1画面)を示す。本オンボードカメラは動画が撮影可能で、100m程度まで離れた受信機へ画像を送信可能である。本カメラで撮影される画像は20万画素程度であるが、山林内の産業廃棄物の投棄や植生を上空からモニタリングするためには、200万程度の画素の画像が必要とされる。そこで、200万画素の画像を撮影可能なデジタルカメラ(Cheez! Fox2、NHJリミテッド製)にインターバルタイマー機能を付加した。重量は30gで本開発機に搭載可能である。本カメラを開発機に搭載すれば、200万画素の画像(静止画)が撮影可能となる。図5に本カメラで撮影した静止画像を示す。ただし、映像は無線送信できないので、機体が着陸後、画像を見ることになる。



図1 開発した機体



図2 飛行の様子

表1 搭載機器

搭載機器	搭載個数	製品名	メーカー
バッテリー	1	HORNET 11.1V 340mAh	Fox Corporation
メインロータ用モータ	2	B20-26S	Hacker
小型プロペラ用モータ	1	3Z3AA	キーエンス
メインロータ用 スピードコントローラ	2	PHONIX-10TM	Castle Creations
小型プロペラ用 スピードコントローラ	1	Speed 10	クラフトルーム
サーボモータ	2	ATOM54	ヨシオカモデル ファクトリ
受信機	1	R-4PII/H	GWS
マイコン	2	H8/3664	日立
方位計	1	RDCM-802	Geosensory
レイトジャイロ	3	PG-03	GWS
GPS	1	GH-80	古野電気
高度計	1	MPX4115A*	Free Scale
カメラ	1	(動画)MX-1 (静止画)** Cheez! Foxz2	RF System Lab. NHJリミテッド

* 高度計に使用した気圧計。* * インターバルタイマー機能を付加したものを使用する。

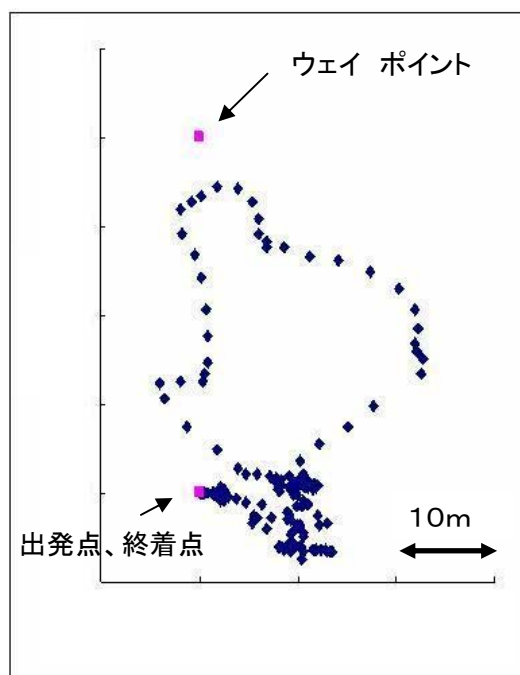


図3 飛行の軌跡



図4 上空から撮影した地上の映像(動画)

図5 上空から撮影した地上の映像(静止画)

4. 2 GPS によらない誘導方法の開発

上で述べた様に、屋外飛行において開発機の位置は GPS で測定される。重量の点から単体 GPS の搭載に限定され(単独測位)、大型航空機のようにディファレンシャル GPS によって高精度の位置測定を行うことはできない。単独測位の場合、数mの誤差が含まれる可能性があるが、空間を大きく移動しない飛行の場合に、その誤差は重大なエラーとなりうる。そこで、光による新たな位置制御方法(特許出願:2004-181653)を提案し、その可能性を実証した。その方法は以下の通りである。

赤外線受光素子(TPS614、東芝製)をダクト下面に複数装着し、飛行する機体に地面からの赤外線照射する。赤外線受光素子の受光情報から、地面の赤外線源に対する機体の水平面内相対位置を決定する。また、高度は超音波測距センサ(USセンサ2、ベストテクノロジー製)で測定される。全ての赤外線受光素子が赤外線を受光し、さらに機体が一定高度を保つ様、マイコンからサーボモータ、モータに信号を出力する。こうすることにより、赤外線源を移動させることで、機体の位置を任意に移動させることが可能になった。なお、太陽光下でも本システムが可能となる様、38kHzの搬送波を出力できる赤外線源を製作した。本システムを利用し、赤外線源を上部に設置した車を追従する自動飛行を実現した(図6)。さらに、図7の様に地面に赤外線源を配置し、それらを順番にON、OFFすることによる機体の誘導にも成功した。このシステムを利用すれば、赤外線源を配置した空間内で、回転翼機を極めて容易に誘導することができる。



図6 光による機体の誘導(1)

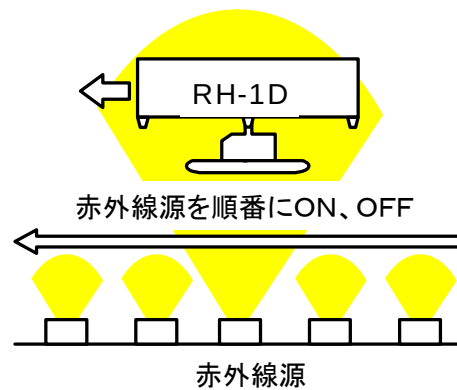


図7 光による機体の誘導(2)

4. 3 姿勢角センサの開発

現在までの機体の姿勢安定は、3つのレートジャイロ(姿勢角速度)を用いた制御、及びダクトによって増加するピッチ(ロール)ダンピングによって行っている。すなわち、姿勢角そのものによる姿勢制御を行っていない。しかし、姿勢角を用いた姿勢制御の方が高精度の姿勢制御を実現できる可能性が高い。しかし、本開発機のような小型・軽量の回転翼機に搭載可能な姿勢角センサは存在しない。そこで、太陽センサの原理を応用した、小型・軽量の姿勢角センサを開発した。図8に開発した姿勢角センサを示す。本センサの総重量は約5gである。本センサによる飛行は、これからの課題である。

また、本開発機に大気採取器を搭載することで、上空の大気を取得することが可能となる。取得した大気は地上で成分分析される。図9に製作した大気採取器(特願2005-110137)を示す。本大気採取器は、60ccのシリンジとシリンジの口を開閉するためのサーボモータとからなり、重量は約30gである。機体搭載時、シリンジ内を真空にしておき上空ではサーボモータによってシリンジの口を開くだけで、大気をシリンジ内に取り込むことができる。シリンジが大気で満たされた後、シリンジはサーボモータで閉口される。

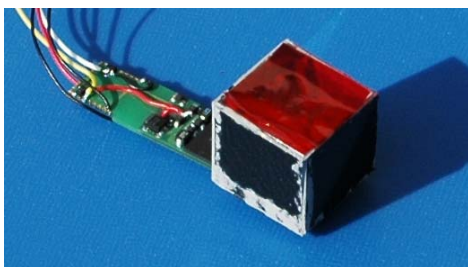


図8 開発した姿勢角センサ

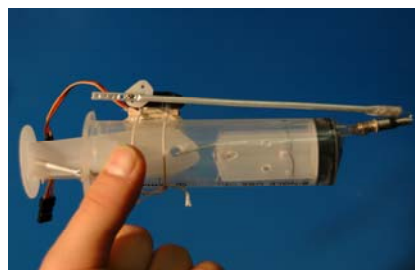


図9 製作した大気採取器

5. 自己評価:

総重量が約450g、ロータ直径が約35cmの回転翼機を開発し、地上の風速が3m/s程度以下であれば、目標位置に向かった自律飛行が可能であることを確認した。当初の目標、「総重量が100-200g、ロータ直径が20-30cm」のサイズで上記の飛行を実現することはできなかった。しかし、回転翼機の墜落時に危険であるのは、高速で回転するロータが人体に衝突することである。本開発機のロータは1kgの回転翼機のロータの様なカーボン製でなく、人体に衝突した際に容易に破壊する発泡スチロール製とすることができた。目標の重量を実現した場合に比べ、5割程度回転数が早いものの、人体衝突時の安全性は確保できたと言える。

また現在の飛行時間は約9分であるが、飛行時間を延ばすことで用途が広がる可能性がある。安全性の確保の点から、現在よりも重量を増加させることは不可能である。そこで、飛行時間を延ばすためには、搭載機器の軽量化が必要であるが、例えば50gの軽量化で、飛行時間を約1分延ばすことが可能である。また、リチウムポリマバッテリーの性能の向上は目覚ましいものがあり、バッテリーの性能向上によっても飛行時間が増加していくことが予想される。

6. 研究総括の見解:

防災・環境モニタリングを行うため、短時間で高高度まで上昇し、上空からの映像、上空大気の取得を可能にする、ロータ直径が約35cm、重量が約450gの小型回転翼機を開発した。機体の姿勢安定に必要な太陽センサの原理を応用した小型・軽量の姿勢角センサの考案、上空の大気採取を取得するための大気採取器の考案、および屋外飛行の開発機の位置を知ることに必要な光による新たな位置制御方法の考案を採り入れるなど、高い独創力を発揮した。さらに、本開発機体为目标位置に向かって自律飛行させ、地上での風速が2-3m/s程度であれば、位置制御が可能であることを確認できたことは、大きな成果であり、高く評価できる。

今後、都市空間上空や人間が近づくことができない危険な空間での情報システムの実現に向け、研究を進展するよう期待する。

7. 主な論文等:

論文

- 1.A.Matsue, W.Hirosue, H.Tokutake and S.Sunada. "Navigations of a small and lightweight helicopter". Transactions of the Japan society for aeronautical and space sciences, Vol.48, No.161, 177-179,2005.
2. S.Sunada, K.Tanaka, and K.Kawashima. "Maximization of thrust-torque ratio of a coaxial rotor". Journal of aircraft, Vol42,No.2, 570-572,2005.
3. S.Sunada and K.Kawachi, "Effects of Reynolds number on characteristics of fixed and rotary wings". Journal of aircraft, Vol.41,No.1,189-192,2004.
4. S.Sunada, A.Ohkura, A.Matsue and K.Kawachi, "Characteristics of rotary wings in hovering mode at an ultra-low Reynolds number". Transactions of the Japan society for aeronautical and space sciences, Vol.47, No.155,59-65,2004.

5. 砂田茂、広末渡、川島健太：“小型2重反転回転翼機のベル式スタビライザ・バーに関する研究”、日本航空宇宙学会論文集、Vol.52、No.610、494-498、2004.

国際会議発表論文

1. S.Sunada, H.Tokutake, A.Ohkura, A.Matue and W.Hirosue, “Developing a Small, Lightweight Helicopter as a Tool Used in Everyday Life”. The 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, Chicago, September, 2004.
2. H.Tokutake, S.Sunada, S.Shirayama, A.Matsue and W.Hirosue, “Development of A Flying Visual Sensor”. Joint 2nd International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 5th International Symposium on Advanced Intelligent Systems. Yokohama, September, 2004.

国内会議発表論文、

1. 砂田茂、得竹浩、松江淳、広末渡：“環境モニタリング用小型2重反転回転翼機”、第37回日本航空宇宙学会年会、東京、2005
2. 伊東秀晃、角野宏紀、菊池厚志、畠山雄基、得竹浩、砂田茂：“小型2重反転回転翼機の屋外飛行”、日本航空宇宙学会第43回飛行機シンポジウム、名古屋、2005
3. 角野宏紀、菊池厚志、得竹浩、砂田茂：“ホバリングする小形2重反転回転翼機のフラッピング運動について”、日本航空宇宙学会第43回飛行機シンポジウム、名古屋、2005
4. 砂田茂、得竹浩、藤永仁：“低レイノルズ数での翼性能”、日本航空宇宙学会第37回流体力学講演会、千葉、2005
5. 伊東秀晃、角野宏紀、得竹浩、砂田茂：“小型2重反転回転翼機の飛行制御”、第22回誘導制御シンポジウム、大阪、2005

総説・解説

1. 砂田茂、得竹浩：“小型2重反転回転翼機の開発”、日本航空宇宙学会誌、2005年12月号、348-350

特許出願

1. 砂田茂、得竹浩、松江淳、広末渡：浮遊体の誘導装置および方法 [2004.6.18出願] (特願2004-181653)
2. 砂田茂、得竹浩、菊池厚志、松江淳、広末渡：大気採取装置及びその採取方法 [2005.4.6出願] (特願2005-110137)
3. 砂田茂、得竹浩、伊東秀晃、角野宏紀：小型回転翼機 (特願2005-238767)

研究課題別評価

1 研究課題名： 環境とのインタラクションによる空間構造の獲得

2 研究者氏名： 友納 正裕

3 研究の狙い：

(1) 背景と目的

近年、人間の生活環境で活動するロボットへの期待が高まっている。このようなロボットが実現されれば、人間を支援する様々な応用が生み出され、産業や社会の発展に大きく貢献すると期待される。ロボットが環境内を自律的に移動して人間を支援する作業を行うには、その環境の構造を記した地図が不可欠である。地図作成には多大な工数がかかるため、ロボット自身に地図を構築させる研究が盛んに行われている。従来の研究は、ロボットが安全に移動できる領域を記すことが主目的であり、個々の物体まで識別できるような構造化された地図を構築する研究は行われていない。しかし、物体の操作・運搬を伴う作業をする場合には、ロボットが個々の物体を認識して、その位置姿勢を知る必要がある。多くの場合、対象物体の置き場所も机や棚など別の物体であるので、これらの物体も認識できる必要がある。ロボットがこのような作業を自律的に行うには、物体単位に構造化された環境地図(物体マップと呼ぶ)をもつことが望ましい。

本研究は、ロボットが環境内の物体を認識して、3次元物体マップを構築することを目的とする。本研究期間においては、対象環境をオフィスや家庭などの屋内とし、家具などの比較的大きな物体から構成された物体マップの構築を目標とする。

(2) 解決すべき問題点

物体マップ構築における課題は大きく3つある。1つは環境の探索である。物体マップを構築するには、ロボットは環境内を移動して物体のセンシングデータ(カメラ画像)を集める必要がある。このとき、未知環境の中で安全に移動しつつ、物体がありそうな領域を見つけてうまく画像に撮影することが課題となる。次に、画像に写った物体を認識して、その3次元位置姿勢を推定することが物体マップ構築に不可欠な課題である。さらに、物体認識を行うには、ロボットが物体のモデルをもつ必要があるが、この物体モデルをどう作るかも大きな課題の1つである。物体モデルは、物体マップの構成部品としても重要である。

(3) 問題解決へのアプローチ

これらの問題を解決するために、レーザレンジファインダによる地図構築技術と単眼カメラを用いたロボットビジョン技術を統合したアプローチをとる。まず、レーザレンジファインダにより迅速に2次元地図を構築しながら環境探索を行い、この2次元地図を利用して物体を撮影する。物体モデルはあらかじめ作成しておくが、このモデルは3次元の密な形状情報をもつとともに、認識用の特徴も有する。この物体モデルを用いて画像から物体を認識し、その3次元位置姿勢を推定する。得られた物体の位置姿勢に基づいて物体モデルを3次元空間に配置することで、物体マップを構築する。

4 研究成果

4.1 概要

物体マップは、ロボットが自律的に構築する3次元環境地図であり、3次元物体モデルを空間中に配置した構造をもつ。前節で述べたように、物体マップを構築するには、環境探索、物体認識、物体モデル作成の3つの課題がある。本研究では、レーザレンジファインダと単眼カメラを用いて、これらの課題に次のように対処して、物体マップを構築する。

(1) 環境探索

対象とする環境では、ロボットにとって物体の種類(物体モデル)だけが既知であり、それ以外は未知である。このため、未知環境を安全に走行しつつ、物体マップに必要なセンサデータをくまなく集めることが必要である。このために、レーザレンジファインダを用いたロボストで迅速な2次元地図構築方式を開発した。(4.2節)

(2) 物体認識

収集したセンサデータから物体モデルを用いて物体を認識し、その3次元位置姿勢を推定することが必要である。実環境で多様な物体をロボストに認識できる必要がある。このために、画像特徴によるロボストな認識手法を3次元物体モデルに適用する方式を開発した。(4.3節)

(3) 物体モデル作成

物体モデルを手で作成すると、多大な工数がかかるうえ、複雑な形状の物体に対処できない。ロボット自身が物体モデルを作成できることが望ましい。このために、カメラで撮影した画像列から物体形状を復元して密な3次元モデルを生成する方式を開発した。(4.4節)

4.2 レーザレンジファインダによる環境探索

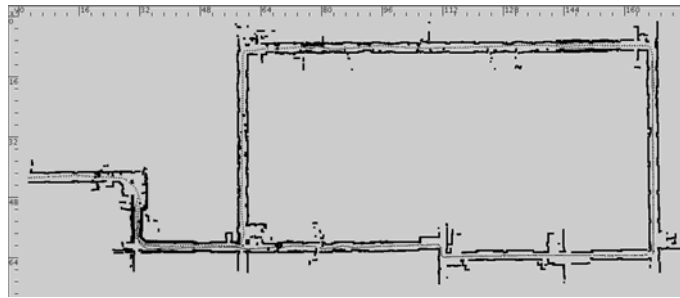
ロボットが未知環境を安全に走行するには、周辺の地図をその場で作成する必要がある。このためには、広範囲の領域を迅速かつ精度よくセンシングできるレーザレンジファインダ(LRF)が有用である。本研究項目では、LRFを用いて、ロボットが走行しながら2次元地図を構築する技術を開発した。

LRFのデータ(スキャンと呼ぶ)は、ロボットから周囲の物体までの距離を点列で表したものである。1つのスキャンで、たとえば、距離8m、方位 -90° 度 $\sim 90^{\circ}$ 度の範囲をセンシングできる。このスキャンをロボットの走行に合わせて次々とつなぎ合わせていくことで、環境全体の2次元地図をリアルタイムで作成することができる。このつなぎ合わせの技術はスキャンマッチングと呼ばれる。本研究では、従来にない特長をもつ新しいスキャンマッチング方式を開発した。本方式は、並進・回転に不変な特徴量を用いてマッチングを行うことで、従来方式では困難だった複雑な形状のスキャンを地図全域で大域的にマッチングすることを可能にした。これにより、ロボットの自己位置推定や2次元地図構築をよりロボストに行うことが可能になった。

このスキャンマッチング方式を用いて作成した2次元地図を図1に示す。(a)は実験室、(b)は全長400mの廊下である。実験室のような複雑な形状の環境も、廊下のような大規模な環境もうまく2次元地図が作成できている。



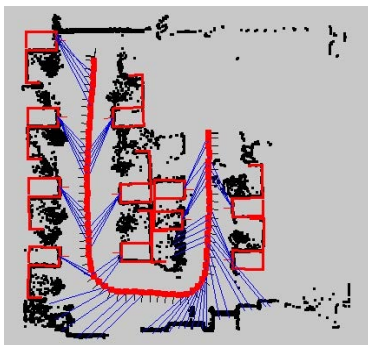
(a) 実験室



(b) 廊下

図1 スキャンマッチングによる2次元地図構築の例

次に、この2次元地図を用いて、カメラ画像の撮影領域を求める。まず、物体テンプレートを地図にマッチングして、主要物体の候補を検出する。物体テンプレートにはカメラ注視点が設定されており、それに基づいて自動的にカメラ視線が生成される。物体テンプレートがマッチングしない領域には、スキャン点の存在箇所に定期的にカメラ視線を張る。このようにして設定したカメラ視線の位置に着くと、ロボットはパンチルトカメラをカメラ視線の方向に向けて画像を撮影する。図2に実験例を示す。(a)はスキャンマッチングで得た地図にカメラ視線を設定した結果であり、赤い太線がロボット経路、赤い図形が物体テンプレート、青い線がカメラ視線である。(b)は、生成したカメラ視線にしたがって、ロボットが画像を撮影している様子である。



(a) カメラ視線の生成



(b) ロボットが画像を撮影する様子

図2 2次元地図を用いたカメラ画像の撮影

4. 3 物体認識

前節のようにして撮影した画像から物体を認識する。多様な物体を認識するには、画像特徴量を用いたアピランススペースの物体認識手法が有効である。しかし、この場合、2つの問題がある。1つは、机など多くの家具はテクスチャが少なく、また、単色であることが多いため、従来使われていた画像特徴点を十分に抽出しにくいことである。もう1つの問題は、アピランススペースの認識は画像同士のマッチングによるため、得られる結果は2次元であり、物体マップに用いるような3次元の位置姿勢推定はできないことである。本研究では、これらの問題に対処する物体認識方式を開発した。第1の問題に対しては、画像エッジ点を用いることでテクスチャの少ない物体でも十

分な量の特徴点を確保し、安定に認識できるようにした。第2の問題に対しては、画像特徴点を物体形状モデルの3次元点とリンクさせて、画像レベルの認識結果を物体形状モデルに渡し、物体の3次元位置姿勢を推定できるようにした。

図3に実験例を示す。(a)は画像特徴点とリンクされた3次元エッジモデルである。(b)は入力画像であり、これを多数のモデル画像が登録されている画像データベースに対してマッチングを行った。(c)は、画像認識結果から(a)の3次元エッジモデルの位置姿勢を推定して、画像に重ね合わせた結果である。画像と物体モデルが一致しているのがわかる。図4に他の認識例を示す。



図3 机の認識例

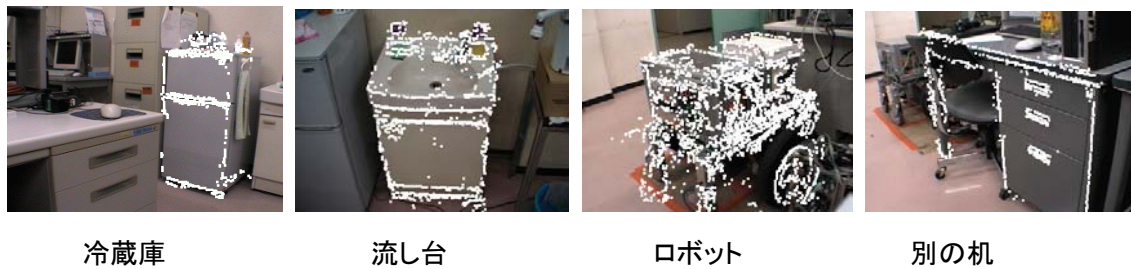


図4 他の物体の認識例

4. 4 物体モデル構築

物体モデルには、物体認識用の特徴としての役割と、物体マップの構成要素としての役割がある。前者は4. 3節で述べたようにエッジ点で構成されたモデルであるが、後者は面情報を含んだ密な形状が必要である。このようなモデルを手で作成するのは、多大な工数がかかるうえ、複雑な形状の物体には対処できないという問題がある。そこで、単眼カメラで撮影した画像列からステレオ視の原理を用いて3次元の物体形状を復元するアプローチをとる。まず、カメラ運動と疎な物体形状を Structure-from-motion 技術を用いて推定し、次に、画像間で各エッジ点の対応づけを行って、エッジ線分まで含めた形状復元を行う。さらに、エッジ線分から3次元平面を復元し、面を構成する各点に画像から抽出した色を付加することで、面や色を含んだ密な形状モデルを構築する。これにより、認識用の3次元エッジモデルと、物体マップ用の面情報モデルを作成する。なお、モデル構築時に対象物体を画像から切り出す作業は、人間が GUI ツールを用いて行う。

図5および図6に実験例を示す。図6は30枚の画像列から生成した机のモデルであり、(a)は入力画像の一部、(b)は生成した3次元エッジモデル、(c)は面情報モデルである。図6は、種々の物体に対してモデルを生成した例である。撮影した画像の視点が限られているため、物体の前半分

だけのモデルが多いが、ロボットが行動するための地図には、この程度のモデルでも役に立つ。



図5 物体モデルの構築例

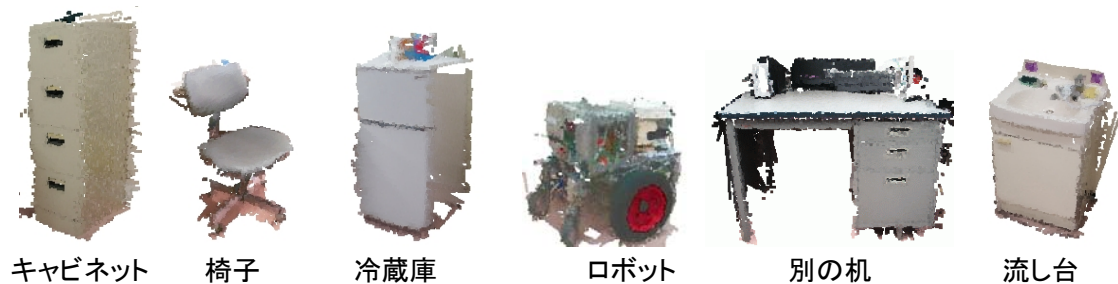


図6 作成した物体モデルの例

4. 5 物体マップの構築

上記技術を統合して、物体マップを構築する。まず、LRF により2次元地図を作りながらロボットを走行させる。この時、ロボットの走行軌跡も得られる。その2次元地図から図2のようにカメラ視線を生成し、得られた走行軌跡に沿ってロボットをもう一度走らせて画像を撮影する。その各画像に対して物体認識を行い、物体が見つかった場合は、物体の推定位置姿勢とロボットの位置姿勢に基づいて物体モデルを配置して物体マップを構成する。図7に実験に使用したロボットと、生成された物体マップを示す。



図7 3次元物体マップ構築の例

5 自己評価

環境形状が個々の物体に分割された地図をロボット自身が構築する研究は例がなく、本研究で実現した物体マップ構築は、きわめて先進的な成果と考える。構築した物体マップはロボット自身が利用するが、マップ内の物体モデルを用いて環境内の物体を認識できるので、従来の環境地図よりも実環境とマップの対応づけを緊密に行える。これにより、物体の操作・運搬などの作業が効率よく行えるようになると期待される。

また、大域スキャンマッチング方式、画像特徴量から認識と3次元位置姿勢推定を行う物体認識方式、形状情報と認識特徴を統合した物体モデル構成方式、画像列からの密な物体形状復元方式など、有用性の高い要素技術を開発したことも大きな成果である。それぞれまだ改良の余地はあるが、一次試作として価値は大きく、今後も磨きをかけて完成度を高めていきたい。

一方、残された課題も多い。現在のシステムでは、物体モデル作成、物体認識の成否判定、ロボット走行制御などに人間が介在する部分が残し、完全に自律ではない。物体モデル作成の完全自動化は本質的に困難であるが、それ以外については、各システムの完成度を高めることでかなり対処することが可能であり、今後も改良を続けたい。

また、研究当初に立てた副目標の中には実現できないものもあった。前述の環境探索、物体認識、物体モデル作成の他に、マニピュレータによる物体操作への応用、および、記号と物体の対応づけ、という副目標を掲げたが、3年の研究期間内には実現できなかった。マニピュレータへの応用は、本研究の有用性を示す重要な事例となるので、今後、機会を見て実現したい。記号と物体の対応づけは、ロボットに一種の言語能力を付与し、その知能を高度化するためのきわめて重要な研究テーマであると考えている。本研究の次の段階として取り組んでいきたい。

6 研究総括の見解

本研究は、ロボットが環境を物体単位に認識して、3次元の空間構造を記した環境地図を構築することを目的とする。このための実現技術として、大域スキャンマッチング方式、画像特徴量から認識と3次元位置姿勢推定を行う物体認識方式、形状情報と認識特徴を統合した物体モデル構成方式、画像列からの密な物体形状復元方式など、独創性、有用性の高い要素技術を開発したことは大きな成果である。さらに、これらの技術を統合して、レーザスキャナと単眼カメラを用いて3次元物体地図を構築することに成功したことも大きな成果であり、高く評価できる。

将来的には、物体に関するさまざまな知識を付加することで、ロボットの動作を飛躍的に高度化する基盤になると期待される。

7 主な論文等

論文

1. 友納正裕：“ユークリッド変換に不変な特徴量を用いた2次元大域スキャンマッチング方式”、日本ロボット学会誌、(投稿中)。
2. 友納正裕：“エッジ情報を利用した単眼カメラ画像列からの密な3次元物体モデルの構築”、日本ロボット学会誌、(投稿予定)。

3. 友納正裕: “形状情報と認識特徴を統合した物体モデルによる3次元物体認識”、日本ロボット学会誌、(投稿予定)。
4. 友納正裕: “レーザレンジファインダと単眼カメラを用いた3次元物体マップの構築”、日本ロボット学会誌、(投稿予定)。
5. 友納正裕: “スキャンマッチングによる大域自己位置推定機能を備えたロバストな2次元マップ構築”、日本ロボット学会誌、(投稿予定)。

国際会議発表論文

1. M. Tomono: “Planning a Path for Finding Targets under Spatial Uncertainties using a Weighted Voronoi Graph and Visibility Measure”, Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2003), pp. 124–129, 2003.
2. M. Tomono: “A Scan Matching Method using Euclidean Invariant Signature for Global Localization and Map Building”, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2004), pp. 866–871, 2004.
3. M. Tomono: “Building an Object Map for Mobile Robots using LRF Scan Matching and Vision-based Object Recognition”, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2004), pp.3765–3770, 2004.
4. M. Tomono: “Robust Robot Localization and Map Building using a Global Scan Matching Method”, Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2004), pp. 1059–1064, 2004.
5. M. Tomono: “3-D Localization and Mapping Using a Single Camera Based on Structure-from-Motion with Automatic Baseline Selection”, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2005), pp. 3353–3358, 2005.

国内会議発表論文

1. 友納正裕: “移動ロボットによる目標物体探索のための経路計画”、日本ロボット学会 第21回学術講演会予稿集, 2003.
2. 友納正裕: “スキャンマッチングによる移動ロボットのマップ構築と大域的自己位置推定”、第9回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 32–37, 2004.
3. 友納正裕: “大域スキャンマッチングと複数仮説追跡を用いたロバストな自己位置推定”、日本ロボット学会 第22回学術講演会予稿集, 2004.
4. 友納正裕: “基線長選択機能を備えた形状復元に基づく単眼カメラ画像列からの3次元マップの構築”、第10回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 159–164, 2005.
5. 友納正裕: “画像列からの密な物体モデル生成のためのエッジの3次元復元”、日本ロボット学会 第23回学術講演会予稿集, 2005.

総説・解説

1. 友納正裕、油田信一: “移動探査ロボットによる環境地図の生成”、日本機械学会誌、Vol. 106, No. 1019, pp. 53–56, 2003.

特許出願

1. 友納正裕: 移動ロボット用地図作成システム [2003.3.14 出願](特許公開 2004–276168)
2. 友納正裕: 移動ロボット用経路計画システム [2003.7.11 出願](特許公開 2005–032196)
3. 友納正裕: 線図形マッチング方法 [2003.12.12 出願](特許出願 2003–414498)

4. 友納正裕：カメラ運動及び物体形状の復元システム[2005.3.11 出願](特許出願 2005-069118)
5. 友納正裕：3次元物体認識システム [出願中]
6. 友納正裕：3次元形状モデル生成システム [出願中]

受賞

1. 計測自動制御学会システムインテグレーション部門 [部門奨励賞]「ループ制約と幾何学的な事前知識を用いた移動ロボットの自己位置推定とマップ構築」(2003 年 12 月)
2. 第 9 回ロボティクスシンポジウム [最優秀論文賞]「スキャンマッチングによる移動ロボットのマップ構築と大域的自己位置推定」(2004 年 3 月)
3. 第 5 回計測自動制御学会 SI 部門講演会 [ベストセッション講演賞]「複数仮説追跡を用いた単眼カメラによる移動ロボットの 3 次元自己位置推定とマップ構築」(2004 年 12 月)

研究課題別評価

1. 研究課題名： 学習によるシーン理解の研究

2. 研究者氏名： 長谷川修

3. 研究の狙い：

近年、視覚、聴覚、発話、表情やジェスチャの表出、といった機能を兼ね備えた、マルチモーダル対話インタフェースの研究開発が盛んである。こうしたインタフェースはヒューマノイドロボットなどに実装され、人と対話しながら実環境で人と豊かに共存する人工システムの実現が目指されている。

しかし、これまでに実現された対話インタフェースを知能情報処理の観点から眺めると、対話機能は概ねシナリオの決まった限定的なものであり、予め想定された(組み込まれた)範囲内では有効に機能するが、その範囲を超えると破綻してしまう。すなわち人間のように環境や他者との相互作用を通じて新奇な経験を蓄積・学習し、徐々に環境に適応したり、成長・発達して新たな言語能力や身体運動能力を身につけるといったことは実現されていない。

このように従来の対話インタフェースの機能が限定的である主要な要因のひとつに、従来のパターン認識技術の枠組みが「固く」、柔軟性に欠ける点がある。一般に既存のパターン認識の枠組みでは、まず学習用のパターンが用意され、「学習過程」としてそれらのパターンを精度良く識別できるよう学習器のパラメータが調整(学習)される。次いでパラメータの調整が完了すると、学習器は「認識過程」に移行し、学習用パターンに類似するパターンが識別・認識されるようになる。すなわち従来のパターン認識の枠組みには「学習過程」と「認識過程」の区別があり、これらは完全に分離していて学習過程が終了するまで認識を行うことはできない。このため通常学習後の学習器に新奇なパターンを追加的に学習させようとする、既に学習したパターンも含めて全ての学習過程をやり直さなければならない。また学習用のパターンにノイズが混入していると、学習そのものがうまく行かないこともある。

こうした問題は、システムを実環境に置いたときに必要となる、システムが実環境で出会うノイズで膨大なパターン情報(視覚や聴覚など)から本質的な情報を取り出し、それらを経験や知識として追加的に蓄積・学習してゆくといった機能の実現を考える上で大きな障害となる。そしてそれ故に、従来のパターン認識技術を用いた対話インタフェースは、設計時に想定された範囲内においては比較的良く機能するが、想定された範囲を超えると破綻してしまうこととなる。本研究ではこの問題の本質的な解決を図る。

4. 研究成果：

本研究では上記の問題の解決のため、まず独自の「自己増殖型ニューラルネットワーク」を提

案するとともに、これをコア技術として利用する「持続的発達学習メカニズム」を提案・実現した。さらには、このメカニズムを用いた持続的学習・成長・発達型のマルチモーダル対話インタフェースをヒューマノイドロボット上に実装した。

本研究で提案する自己増殖型ニューラルネットワークは、“Growing Neural Gas” と呼ばれる競合学習の一手法に独自の改良を加えたもので、

1. 刺激が加わると刺激量に応じて適応的にニューロンが増減し刺激の分布を近似
 2. 刺激に混入するノイズを無視し刺激の本質的な(密度の高い)部分のみを追加的に抽出可能
 3. 刺激の本質的な(密度の高い)部分が何個あったか(刺激に含まれるクラスタ数)を出力可能
- といった世界的に見ても他に類を見ない顕著な特長を持つ。

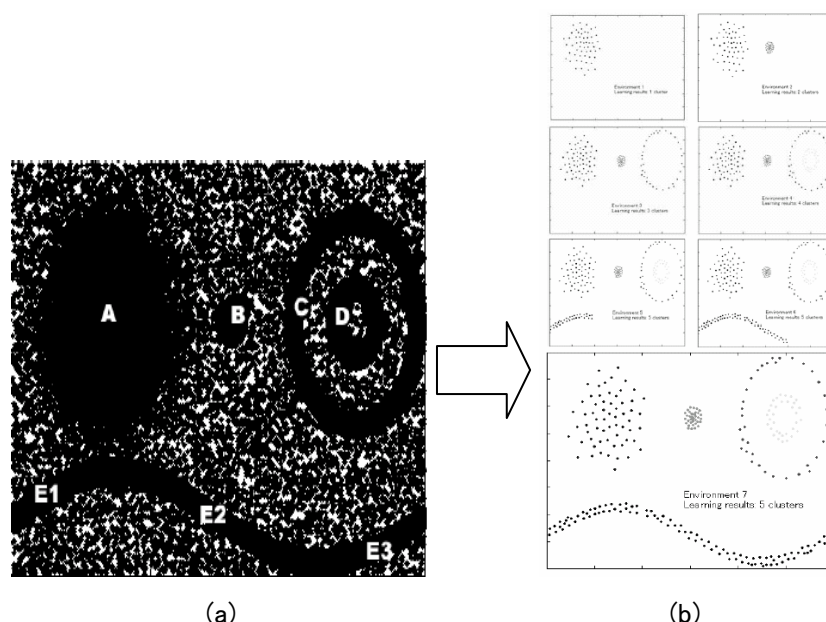


図1:(a)システムへの入力データ(10%のノイズを含んでいる), (b)処理結果(ノイズを無視し、(a)に含まれる本質的な領域のみを追加的に抽出している。)

図1に、筆者らの自己増殖型ニューラルネットワークを、2次元のノイズが混入したデータに適用した結果を示す。提案するネットワークは高次元のデータに対しても機能するが、ここでは図示を可能とするため、2次元のデータを用いた。図1(a)は非線形な入力データの全容であり、ランダムに10%のノイズを混入してある。このデータを図中のA,B,C,D,E1,E2,E3の順に、追加的にニューラルネットに与えた。図1(b)は処理結果である。図1(b)の左上より右下に向けて、A, B, C, D, E1, E2, E3のデータが順に与えられたときのニューロンの増殖の様子を示している。図示されるように、ランダムノイズが混入しながら追加的に与えられたデータに対し、ノイズを除去しながらデータの本質的な(密度の高い)部分だけにニューロンが反応(増殖)し、それらの部分を抽出している。

ここで、抽出された領域はクラスタリングされており、処理の最終段階((b)の最下段)において

は、システムは入力データには5つのクラスタ(密度の高い部分)があったと出力している。この手法は、実データを用いたいくつかの実験、具体的には複数人の顔画像の追加学習やベクトル量子化の問題などにも適用し、有効性を確認している。こうした高度に柔軟な追加学習を可能とした手法は、世界的に見ても他に例がない。この成果は、ニューラルネットワーク研究分野における代表的な国際学術誌 Neural Networks 誌に採録された。

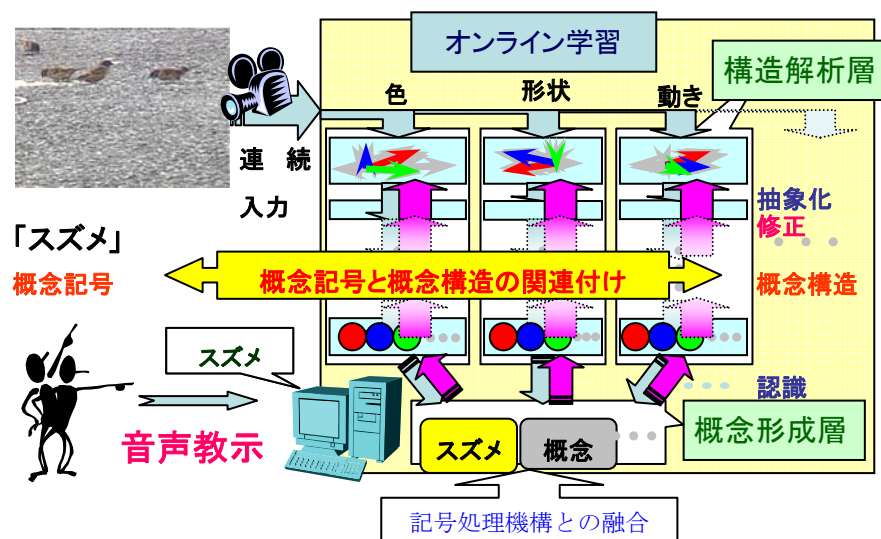


図2: 持続的発達学習メカニズムの概要(「スズメ」の概念の形成例)

図2に、上記の自己増殖型ニューラルネットワークをコア技術として利用する「持続的発達学習メカニズム」の概要を示す。ここでは実環境から視覚(色、形状、動き)のパターン情報を恒常的に入力するとともに、自己増殖型ニューラルネットワークを階層的に用いて自己組織的に入力パターン情報の集約的概念シンボル化を進める(構造解析層)。獲得した概念シンボルは、人間との相互作用(準教師あり学習による教示)に基づき言語情報(音声パターンをシンボル化した情報)と結合する(概念形成層)。ここで獲得された概念シンボルに誤りがあると人間からの教示をトップダウン情報として構造解析層を修正する。以上の過程は全て並列に稼動し、獲得した色や形、物の名前、動きなどの概念は直ちに認識に利用できる。すなわちこの学習メカニズムには従来のパターン認識手法に見られる「学習過程」「認識過程」の区別がなく、新奇な情報を恒常的・追加的に学習しながら同時に認識も行うことができる。また入力パターンの表現層とネットワークで繋がった概念シンボルに言語による記号情報を付与することで、人工知能における本質的課題である「記号接地問題」の解決を図ることができる。さらにはパターンから自己組織的に獲得した概念シンボルをシンボルベースの推論機構等と結合することで、パターン処理と記号処理の融合を図ることも可能である。

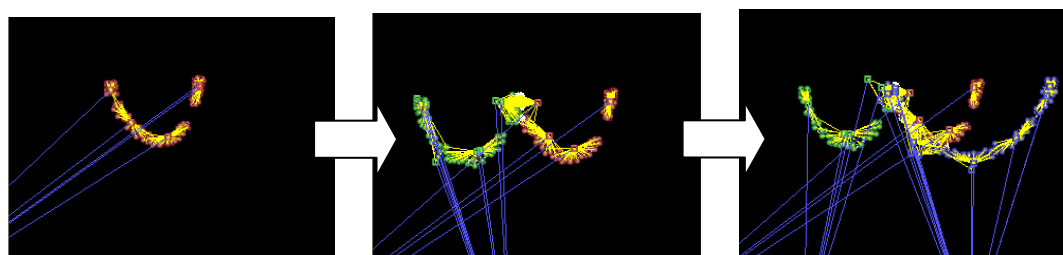
本研究の関連研究には、Growing Neural Gas (GNG) や Growing Neural Gas with Utility (GNG-U) などの研究があるが、これらはいずれも増殖するノード数に制約(上限)があるほか、ノ

イズに対する耐性がない。また入力データに含まれるクラスタの数を出力することもできない。一般的なクラスタリング手法としてはk-means法やEM法があるが、これらは算出するクラスタの数を予め決めておかねばならない。教師無しのクラスタリング手法としてはSOM(自己組織化マップ)があるが、SOMは事前にマップのサイズを決めておく必要がある。提案手法ではそうした必要がない。

知能情報処理・マルチモーダル対話インタフェースの観点からは、これまでに、ノイズな実環境中で環境や人間と相互作用しながらオンラインで持続的・追加的に知識や身体運動機能を獲得し、成長・発達するシステムを実現した事例は世界的に見ても存在しない。

以下では、筆者らの自己増殖型NNを時系列データの学習に用いた事例を示す。まず自己増殖型NNを接続したカメラに対して2つの物体を見せ、それらの間で「近づける」「遠ざける」「またぐ」の動きを複数回ずつ順に提示した。自己増殖型NNには2つの物体間の「動き」の軌跡が時系列に入力されるようにした。その結果、入力された動きの軌跡に沿ってニューロンが増殖し、「近づける」「遠ざける」「またぐ」の代表的(平均的)な軌跡が自己組織的・追加的に学習された。図3に学習した3つの動きの軌跡を示す。

ここで強調したい点は、自己増殖型NNでは入力される時系列データの長さに応じて適応的に獲得される軌跡の長さが調節されている点である。具体的には、図3(c)で最後に獲得された「またぐ」は軌道の長さが「近づける」よりも長かったため、自己増殖型NNはより多くの状態数で軌跡を表現した。こうした時系列データの長さに応じた適応的な状態数の決定は、一般に隠れマルコフモデル(HMM)では困難である。今後は、上記の自己増殖型NNの機能をベースに、追加学習が可能で、かつ状態数を自律的・適応的に調節・決定することのできる新たな時系列データの学習・認識メカニズムを確立し、その優位性をHMMと比較して示すことが目標である。



(a)「遠ざける」を学習

(b)「近づける」を追加学習

(c)「またぐ」を追加学習

図3: ANGを用いた時系列データ(動き)の追加学習に関する予備実験結果

図4に、提案する「持続的発達学習メカニズム」をヒューマノイドロボットに実装した例を示す。ここでは図3に示した「動き」の概念の獲得機能を利用し、その対話的学習・認識・生成を実現した。具体的には、まずロボットの前に2つの物体を置き、「近づける」と発話しながら双方を近づける動きを複数回見せる。するとロボットは、この教示データから「近づける」という言葉の「意味」に対応した動き(軌跡)を学習した。学習後は、ロボットは「近づける」と命令されると様々な位置関係に置

かれた2つの物体を近づける動きを生成することができた。こうした一連の学習・認識・生成は、「遠ざける」「またぐ」の動きに対しても同様に(追加的に)行うことができた。こうした、提示と発話による教示(やって見せつつ言って聞かせる)を通じた学習・認識・生成の研究は、今後さらに重要度が増すと考えられる。

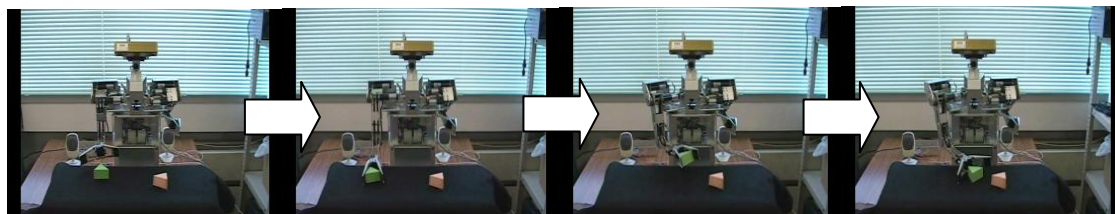


図4：自己増殖型NNにより学習した「動き」の概念を用いたロボットの制御(近づける)

この他、72種類の物体を順にロボットに見せ(ここでは「動き」は含めていない)、その色・形・名称をオンラインで対話的に追加学習させることを可能としたシステムを実現し、その内容を電子情報通信学会のPRMU研究会で発表して大きな反響を得た。この論文の内容は、一部を拡充して英訳し、IEEE の論文誌(SMC)に投稿中である。

さらに本研究では、上記の研究を統合的に発展させ、視聴覚情報を相補的に用いた文法の獲得も行った。具体的には、例えばロボットに「赤色ーリンゴー黄色ーレモンー右ー置く」といった発話を聞かせると同時に、その様子を実演してみせる。ロボットは見せられた状況(視覚情報)を自らの内部(メンタルモデル)に取り込むとともに、言語で発話された内容と見せられた状況とを内部的に関連付けながら発話を解析し、そこに含まれる文法構造を徐々に獲得する。ただし赤色、リンゴ、黄色、レモン、置く、といった単語(名詞・形容詞・動詞)の意味は予め個別に学習(グラウンディング)させる。この研究のポイントは、従来研究に見られるように多くの文章のセットを予め人間が用意してバッチ的に学習させるのではなく、逐次的に与えられる少ない文章からでも視覚情報を援用して対話的に文法の獲得を可能とした点にある。なおここでは日本語で教える例を示したが、日本語に限らず、英語等の他言語からでも文法の獲得が可能である。

総じて本研究では、乳幼児が養育者や環境とのマルチモーダルな相互作用から単語のグラウンディング、文法の獲得、文章の理解・生成などへと発達するのと同じように、持続的・段階的に発達する機械学習メカニズム(持続的発達学習メカニズム)のプロトタイプを構築・実現した。

5. 自己評価:

本研究では、人工システムを実環境に置いたときに必要となる、システムが実環境で出会うノイズで膨大なパターン情報(視覚や聴覚など)から本質的な情報を取り出し、それらを経験や知識として追加的に蓄積・学習してゆくといった機能を、独自の自己増殖型ニューラルネットを提案・導入することにより実現した。これにより、乳幼児が養育者や環境とのマルチモーダルな相互作用から単語のグラウンディング、文法の獲得、文章の理解・生成などへと発達するのと同じように、

持続的・段階的に発達する機械学習メカニズムのプロトタイプを世界で初めて構築した。今後こうした研究の重要性は広く理解され、本研究の持つ意義や先駆性、独創性も認知されるようになると思う。

本研究に関連して発表した論文は、2005 年 12 月現在、採録済みもしくは発表済みのものだけで、論文誌論文 15 件（うち国際 10 件、国内 5 件）、国際会議論文 24 件、国内会議論文 20 件になる。本研究では、学術的に積極的に発表することを目標の一つに掲げたが、その目標はある程度達成できたと思う。

6. 研究総括の見解：

人の赤ちゃんが知識を持たない状態から徐々に知的に発達するように、視覚や聴覚を介した人との相互作用を通じ、視覚的概念や言語を複合的に学習して発達するロボットを世界で初めて構築したことは、大きな成果であり、高く評価できる。このロボットの学習機能には、独自に研究開発した「自己増殖型ニューラルネットワーク」を用いた「持続的発達学習メカニズム」を導入している。いずれも先駆性、独創性に優れた技術である。さらに実験の結果、対話による教示・育成を通じて、ロボットに人間の2歳児程度の知能を持たせることに成功したことも評価に値する。

今後、自己増殖型ニューラルネットワーク（Adaptive Neural Gas : ANG）の機能をさらに充実させるとともに、ANG が Self Organizing Map (SOM)、Adaptive Resonance Theory (ART)、Expectation Maximization (EM) 法などと並び称される標準的な機械学習手法の一つとなるよう努力されたい。

7. 主な論文等：

論文

1. Shen Furao and Osamu Hasegawa, "An Incremental Network for On-line Unsupervised Classification and Topology Learning", Neural Networks, (2005) in press
2. Shen Furao and Osamu Hasegawa, "An Adaptive Incremental LBG for Vector Quantization", Neural Networks (2005) in press
3. 豊田 崇弘, 長谷川 修, "高次局所自己相関特徴の拡張", 画像電子学会誌, Vol.34, No.4, pp.390-397 (2005)
4. Shen Furao, Osamu Hasegawa : "A fast no search fractal image coding method", Signal Processing: Image Communication, vol.19, pp.393-404, (2004)
5. 長谷川修、金出武雄: "一般道路映像中の移動物体の識別・色の推定と特定対象の検出", 情報処理学会論文誌、Vol.44, No.7, pp.1795-1807, (2003)

国際会議発表論文

1. Shen Furao and Osamu Hasegawa : "An On-line Learning Mechanism for Unsupervised Classification and Topology Representation", IEEE International Conference on Computer

- Vision and Pattern Recognition (CVPR05), San Diego, pp.651-656, (2005)
2. Aram Kawewong and Osamu Hasegawa, "3D Texture Classification by Using Pre-testing Stage and Reliability Table", IEEE Proc. International Conference on Image Processing (ICIP05), (2005) accepted
 3. Shen Furao, Osamu Hasegawa : "An Incremental k-means Clustering Algorithm with Adaptive Distance Measure", International Conference on Neural Information Processing, (ICONIP2005), (accepted)
 4. Takahiro Toyoda and Osamu Hasegawa : "Texture Classification Using Extended Higher Order Local Autocorrelation Features", The 4th international workshop on texture analysis and synthesis (Texture2005), pp.131-136 (2005)
 5. Shen Furao, Osamu Hasegawa : "A Self-organized Growing Network for On-line Unsupervised Learning", IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN2004), CD-ROM ISBN 0-7803-8360-5, Vol.1, pp.11-16 (2004)

国内会議発表論文

1. 小島量、長谷川修: "ヒューマノイドロボット上の自己増殖型ニューラルネットワークを用いた視聴覚情報からの能動的・追加的概念獲得", 信学技報 PRMU2005-57, pp.35-40, (2005-9)
2. Shogo Okada and Osamu Hasegawa : "Unsupervised Learning of Dynamic Patterns for Recognition and Generation", 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, (2004)
3. Shen Furao and Osamu Hasegawa : "A self-controlled incremental method for vector quantization", 電子情報通信学会 PRMU 研究会, PRMU2004-65, pp.93-100 / 情報処理学会 CVIM 研究会, 2004-CVIM-145, 93-100 (2004)
4. 神谷祐樹、申富饒、長谷川修: "実世界パターン情報の非停止型学習・認識手法の提案", 第 18 回人工知能学会全国大会, CD-ROM 2H1-03, (2004)
5. 豊田崇弘、長谷川修: "局所自己相関マスクの拡張とその応用に関する一考察", 第 10 回画像センシングシンポジウム (SSII04), pp.307-310, (2004)

解説・総説

長谷川修: シーン理解のためのパターン認識、O plus E, Vol.25, No.10, pp.1130-1136 (2003)

招待講演

北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科セミナー(平成17年9月13日)

受賞

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(SI2004) ベストセッション講演賞: 対象論文 Shogo Okada and Osamu Hasegawa : “Unsupervised Learning of Dynamic Patterns for Recognition and Generation”

研究課題別評価

1 研究課題名： 人間・環境適応型知的歩行支援システム

2 研究者氏名： 平田 泰久

3 研究の狙い：

現在、急速に進んでいる少子高齢化において、高齢者に対する労働人口の減少は避けることができず、高齢者のための様々な福祉介護システムの開発が求められている。このような福祉介護の分野では、人間とシステムとの力学的な相互作用に基づく支援が必要不可欠である。このようなシステムは、人間と直接的な接触を前提としているためその安全性の確保が重要となるとともに、専門知識のない利用者が直感的かつ容易に操作できる高い操作性の実現が期待される。本研究では特に、高齢者や障害者が自律した生活を送るために最も重要な機能の一つである歩行の支援に注目し、高い安全性と操作性を実現する歩行支援システムの研究開発を行った。本システムは、人間とシステムもしくはシステムと環境とが相互作用を行うことにより、人間や環境の情報に基づいた運動を生成し、利用者それぞれの障害に適応した高い操作性と高い安全性を提供するシステムの実現を目指している。本研究では特に駆動力が異なる2つのタイプの歩行支援システムに注目し研究開発を行った。

3.1 アクティブ型歩行支援システム

アクティブ型歩行支援システムでは、従来のロボットシステムに多く用いられるサーボモータをその駆動力として利用し、センサ情報に基づいてサーボモータを適切に制御することにより、高い操作性と安全性の確保を実現する。本研究では、利用者の障害に適応し高い操作性を実現するために全方向移動機構を利用した歩行支援システムを開発した。また、高い安全性を実現するために、ボディフォースセンサと呼ぶ力覚センサシステムを提案し、直感的かつ安全に歩行支援システムを操作することが可能なインタフェースの研究開発を行った。特にアクティブ型の歩行支援システムでは、全方向移動ベースとそれに取り付けられたサーボモータを利用することにより、システムに様々な運動特性を持たせることが可能となり、知的歩行支援システムで実現できる機能や性能の可能性を検証した。

3.2 パッシブ型歩行支援システム

サーボモータを用いたアクティブ型の歩行支援システムでは、非常に多機能かつ高性能な歩行支援システムを実現することができる。しかし、サーボモータの誤動作等に基づく安全性の問題は、ボディフォースセンサを用いただけでは完全に解決できるものではなく、法律等の整備も必要となることから、このような歩行支援システムがなかなか実用化されない大きな原因のひとつとなっている。そこで、本研究では、より実用的な観点から歩行支援システムに必要な駆動力の見直しを行い、サーボモータを一切使わず、ブレーキのみによってシステムの運動を制御するパッシブ型の歩行支援システムの研究開発を行った。このようなシステムは、能動的な運動を生成することではなく、利用者の加える力を駆動力として用い、その操作力をブレーキを用いて適切に制限することにより歩行支援システムに様々な機能を持たせるものである。本研究では、このようなパッシブロボティクスと呼ばれる技術に基づき、全く新しい観点からの歩行支援システムの研究開発を通して、パッシブシステムにおいて実現できる支援機能の可能性について検証を行った。

4 研究成果：

4.1 アクティブ型歩行支援システムの研究開発

本研究では、図1に示すようなアクティブ型歩行支援システムにおいて高い安全性と操作性を実現することを目指し、ボディフォースセンサを用いた力覚情報に基づく人間・システム協調制御技術の構築および全方向移動ベースを利用した人間適応型運動制御技術の研究開発を行った。

4.1.1 ボディフォースセンサ

従来、歩行支援システムを含め人間との力学的な相互作用を前提としたシステムの研究は多く行われているが、これらのシステムの多くは、システムの一部にセンサを取り付け、そのセン

サが検出した力情報を主に利用してシステムの運動制御を行っていた。そのため、人間や障害物がセンサ部以外に接触した場合、その情報を検出するためには超音波センサ等の別のセンサが必要となり、安全対策が大掛かりなものとなっていた。また、利用者が接触できる部分が限られるため、システムの直感的な操作が難しくなり、その操作に熟練を要し、高齢者や障害者が使う歩行支援システム等ではその使用が困難となる場合がある。

そこで、本研究では、ボディフォースセンサという概念に基づきシステムを設計することにより、人間や環境に適応し、利用者にとって最適な操作性や高い安全性を有するシステムを提案する。ボディフォースセンサとは、図2に示すように力覚センサをシステムの駆動系とボディ(歩行支援システムではサポートフレームやカバー)との間に搭載することにより実現したセンサシステムであり、これによりシステムのボディ全体に加わる力・モーメントを検出できるものである。このセンサシステムを利用し、かつ加わる力に対してシステムが受動的な運動を生成するような制御系を設計すれば、人間はあたかもアクチュエータの搭載していない受動的な機器を操っているかのように、システムの操作を行うことができる。これにより、高齢者や障害者であっても、直感的かつ容易にシステムを操ることができるようになる。また、環境との接触も同様に検出することができることから、安全対策も容易に行うことができる。

4.1.2 全方向移動ベースを用いた歩行支援システム

知的歩行支援システムにおいて利用者の障害に適応し高い操作性を提供する技術の開発は必要不可欠である。従来開発されてきた歩行支援システムでは、その移動を実現するための車輪の種類や配置が限定されており、非ホロノミック拘束を有した移動ベースを用いたものがほとんどである。しかし、このようなシステムは直進性の安定性は増すが、移動ベース自体の運動特性を大きく変化させることはできないため、利用者の様々な障害に適応した歩行の支援に用いることは困難な場合がある。また、狭い場所での運動や歩行支援システムを利用しながらの複雑な作業を行うことを考慮すると、その操作性は必ずしも良いものではない。そこで、本研究では、このような問題を考慮し、様々な障害を有した高齢者や障害者が、あらゆる環境で快適にかつ適切にシステムを利用することが可能な歩行支援システムの研究開発を目指し、図3に示すような移動ベースに全方向移動車輪を用い、システムの運動特性を自由に変化させることが可能なシステムを実現した。

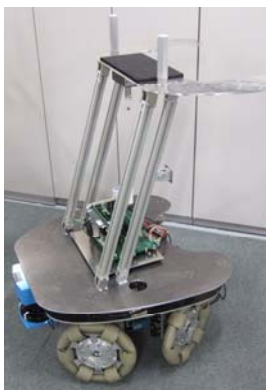


図1 アクティブ型歩行支援機

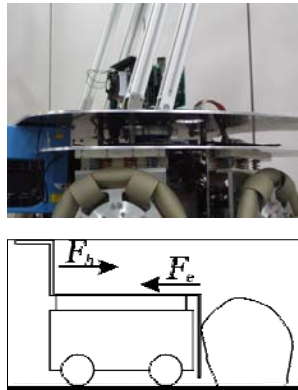


図2 ボディフォースセンサ



図3 全方向移動ベース

4.1.3 人間適応型運動制御技術

通常、アクチュエータを搭載した歩行支援システムでは、システムにある代表点を設定し、その点回りに仮想的な運動モデルを構築し、そのモデルに基づいてシステムの運動を生成する。従来提案されてきた歩行支援システムの多くは、このモデルの制御パラメータを変化させることにより、運動特性を変化させ、利用者に適した操作性を提供してきた。しかし、システムの運動特性は、モデルの制御パラメータの変更だけでなく、その運動モデルを設計する代表点の位置に大きく依存する。通常の歩行支援システムは非ホロノミックな拘束を有しているものが多く、利用者の様々な障害に基づいてその代表点を任意の位置に変化させることはできず、実現できる運動特性にも限界がある。そこで、本研究では、全方向移動ベースを用いることによって、機構的特性に影響され

ることなく、任意の位置に代表点を変化させ、その点において制御系を設計することにより、多くの人間の障害や癖等に適応し、高い操作性を提供する人間適応型運動制御系を開発した。

人間適応型運動制御技術の有効性を確認するために、利用者が歩行支援機を操作し、床面に示されたある軌道に沿わせる実験を行った。この実験では高齢者等の障害を模擬する観点から、システムの操作を難しくするため片手により歩行支援システムを操作した。このとき、図4に示されるような利用者の障害を予め学習し、代表点を利用者の状態に適応させリアルタイムに変化させる制御系を用いた場合と、従来のように代表点を固定した場合とでの比較実験を行った。その時の結果を図5、図6に示す。これにより、利用者に適応し運動特性を変化させた場合には、ほぼ目標の軌道に沿って運動することができ、その操作性が向上できていることがわかる。

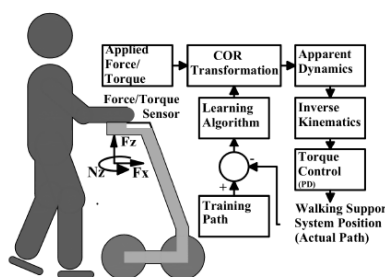


図4 人間適応型運動制御

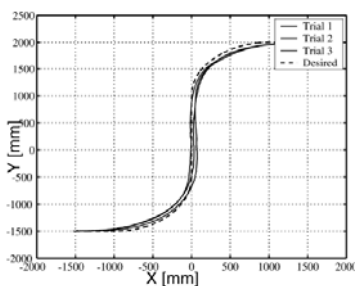


図5 実験結果（人間適応型）

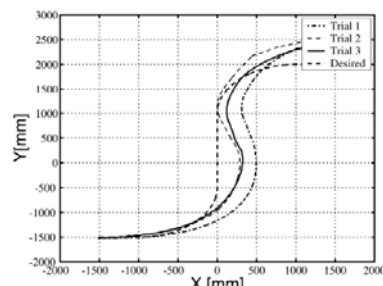


図6 実験結果（従来制御系）

4.1.4 マニピュレータを利用した軽作業実行システム

歩行支援システムを使用するためには、通常、腕等の上半身で自身の体重をサポートしたり、バランスを取ったりするため、上半身の運動が拘束される場合が多い。そのため利用者の簡単な作業の補助を行うために、図7に示すような歩行支援システムにマニピュレータを搭載したプロトタイプシステムを構築した。また、図8に示すようなタッチパネルを利用したマン・マシンインタフェースを開発することにより、マニピュレータの簡易な操作を実現し、物体のハンドリングに代表される軽作業を実現した。



図7 マニピュレータ搭載型歩行支援システム



図8 タッチパネル型インタフェース

4.2 パッシブ型歩行支援システムの開発

4.2.1 パッシプロボティクス

従来のロボティクスでは、モータなどのアクチュエータを能動的に駆動することでロボットの運動制御を行ってきた。これにより高機能で多機能かつ高性能なロボットシステムを実現することが可能となる。しかし、人がそのようなシステムを扱うことを考慮する場合、モータの誤動作等による安全対策が重要な問題となる。また、通常よく利用されるモータは高回転・低トルクという特性を持つため、実際のロボットにはギア等の減速機を用いなければならない。また、センサやサーボアンプ、制御装置等を搭載する必要もあることからその構造が複雑化し、重量増につながるといった問題もある。また、モータを駆動するためのバッテリーの容量不足によるロボットの稼働時間の短さも解決すべき問題のひとつである。

これに対し、アクチュエータによる駆動力を用いずにシステムに加わる外力のみを制御すること

によって、結果的にシステムの運動を制御するパッシプロボティクスという概念が提案されている。そこで、本研究ではこの概念に基づき、モータ等のアクチュエータを用いることなく、基本的には人の力によってのみ駆動されるパッシブな歩行支援システムをベースに、歩行支援システムの車輪に取り付けられたブレーキをロボットの制御技術を用いて制御し、多機能な歩行支援システムを実現することを考える。

パッシプロボティクスの概念を歩行支援システムに適応すると、駆動力が基本的に人の操作力に依存するため、システムが例え誤動作しても人の意図に反して駆動するようなことはない。また、シンプルで軽量かつ、少量のバッテリー容量でも、長時間の稼動が可能になるといった利点もある。パッシプロボティクスの概念は、システムとの力学的相互作用に基づく人間支援という問題において、今後、非常に重要な技術となると考える。

4.2.2 RT Walker

図9に本研究において開発した歩行支援システムのプロトタイプを示す。本システムは、フレーム、制御装置、従属輪であるキャスタ、そして対向二輪型に配置したブレーキ付固定輪から構成される。ブレーキにはパウダブレーキを使用した。パウダブレーキは電流に関して比例したブレーキトルクを出力するため、連続的なトルク制御が可能となる。ブレーキによって発生したブレーキトルクは直接車軸に伝達されるようになっている。このブレーキをロボット技術(RT)を利用して適切に制御することにより、歩行支援システムに様々な機能を実現するため、本システムを RT Walker と呼ぶ。RT Walker には過剰な性能を有したパウダブレーキを用いているが、その消費電力はブレーキ 1 台当り 10[W]程度であり、通常の DC モータと比較しても小さいことがわかる。また、現在の RT Walker の重量は約 35[kg]程であるが、これはプロトタイプのためであり、ブレーキや制御装置の小型化、フレームの軽量化等を行うことにより、大幅な軽量化が実現できると考える。また、このプロトタイプの技術を応用し、図10に示すような全方向移動型のパッシブ歩行支援システムも開発した。

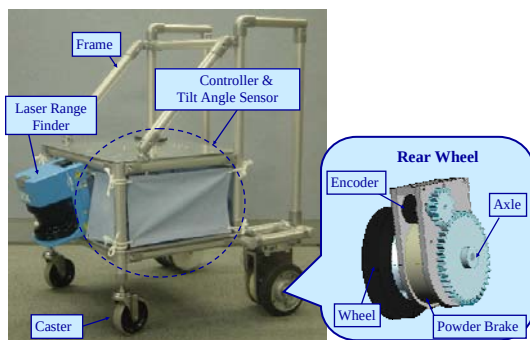


図9 パッシブ型歩行支援機 RT Walker



図10 全方向移動型パッシブ歩行支援機

4.2.3 人間適応型運動制御アルゴリズム

人間適応型運動制御系としては、図11、図12に示すように歩行支援システムの運動特性を任意に変化させる制御系を提案した。これにより、アクティブ型歩行支援システムの研究開発で構築された技術を拡張することにより、利用者の障害等に適応することや、リハビリテーションの観点から歩行支援システムにある程度の負荷を与えることなどが実現できた。また、図13に示すように利用者の状態を推定する手法を構築し、図14に示すようにリアルタイムに変化するその状態に応じて適切に歩行支援システムに実現された機能を切り替える手法を開発した。これにより、歩行支援システムの使用時において最も危険であるといわれる転倒の防止を実現する機能を持たせることも可能とした。

4.2.4 環境適応型運動制御アルゴリズム

環境適応型運動制御アルゴリズムとしては、環境認識センサから得られる情報を基に、図15に示すように障害物や段差の回避を実現する機能や利用者がある目的地まで誘導するナビゲーション機能を開発した。また、坂道等での歩行支援システムの利用を考慮し、重力の影響で歩行支援システムが利用者の意図に反して運動してしまうことを防止する、重力補償制御系を提案した。こ

れにより、利用者はあらゆる環境で、あたかも平地で歩行支援システムを利用しているような感覚を持つことができる(図16)。これらの機能を統合することにより一般的かつ複雑な環境においても、図17に示すように、歩行支援システムを安全に使用することが可能となる。

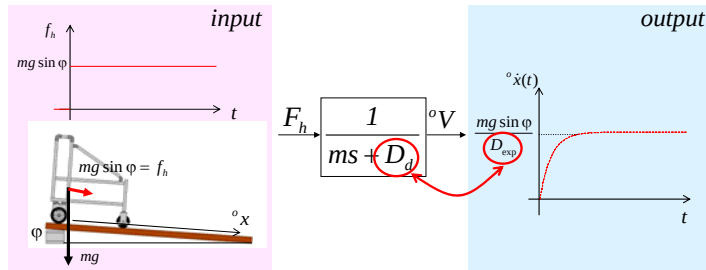


図11 運動特性可変制御の検証実験

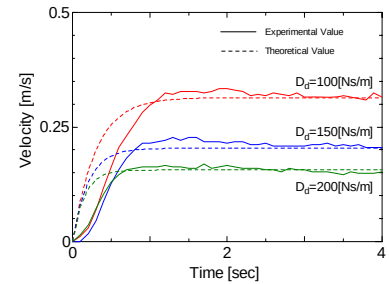


図12 実験結果(理論値との比較)

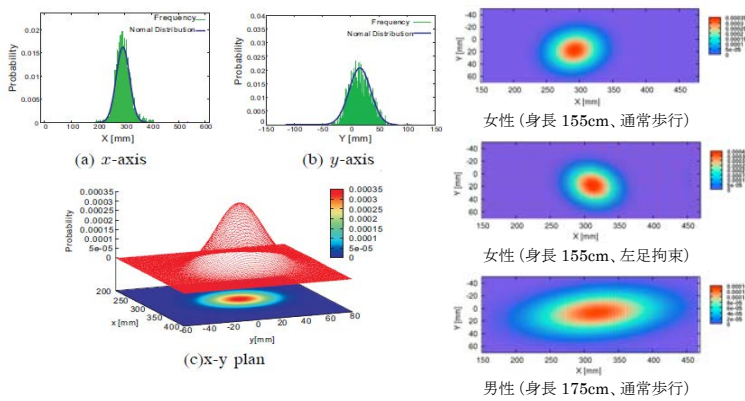


図13 システムと利用者の相対距離分布
(2次元正規分布に従う)

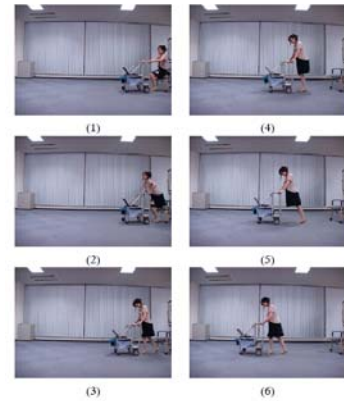


図14 利用状態による機能切り換え
(立位支援、歩行支援、転倒防止)

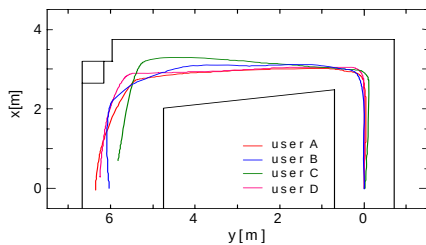


図15 障害物回避実験結果

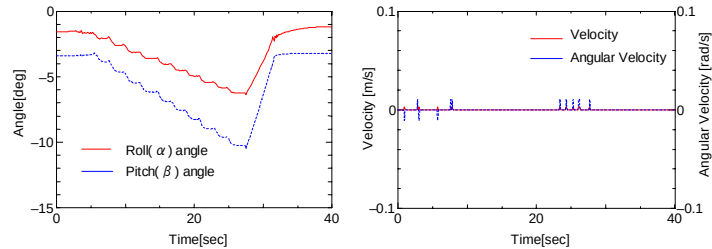


図16 重力補償実験結果



図17 実際の環境でのパッシブ型歩行支援システムの利用 (アイマスク着用)

5 自己評価:

本研究では、安全性と操作性という観点から歩行支援システムの高機能化を実現する研究開発を行った。特にモータを利用したアクティブ型システムにおいてはボディフォースセンサを用いることにより安全かつ直感的な操作性を実現するセンサシステム設計概念を提案するとともに、利用者それぞれの障害に適応することにより操作性が向上し、かつリハビリテーションにも応用が期待できる全方向移動型歩行支援システムのための運動制御系を提案した。このような技術は、人間との接触を前提とした多くの力学的相互作用型人間支援システムに適用可能な基盤技術であり、その発展に大きく貢献するものと考ええる。

また、ブレーキのみを利用して人間の歩行を支援するパッシブ型歩行支援システムの開発を行うとともに、そのブレーキを適切に制御し人間の障害や歩行機の使用状態、環境の情報等に基づいて適切な支援を実現する運動制御手法を構築した。このようなシステムは、自ら駆動力を持つことがないため、本質的に安全なシステムであり、かつモータを利用しなくとも多くの機能を持たせることができる。このようなパッシブロボティクスの基盤技術の研究開発を通して新しい研究領域を開拓することができたと考えている。そして、このような技術は近い将来に実際に社会で使われる人間支援技術の一つになりえると考ええる。

本研究では、特にマニピュレータを用いた作業実行システムの実現において、必ずしも研究計画どおりの成果を挙げることができなかったが、アクティブ型システムのための基盤技術の開発や、研究計画段階ではほとんど考慮していなかったパッシブ型システムを大きく発展させることができ、非常に中身の濃い研究開発ができたと考えている。今後は今回研究開発してきた基盤技術をさらに発展させ、歩行支援システムの研究のみならず、多くの人間支援システムの研究開発に取り組み、よりディペンダブルかつ実用的なシステムの研究開発を行っていきたいと考えている。

6 研究総括の見解:

本研究では、安全性と操作性という観点から歩行支援システムの高機能化を実現する研究開発を行った。ボディフォースセンサを用いることにより安全かつ直感的な操作性を実現するセンサシステムの設計概念を提案するとともに、利用者それぞれの障害に適応することにより操作性が向上し、かつリハビリテーションにも応用が期待できる全方向移動型歩行支援システムのための運動制御系の提案により、モータを利用したアクティブ型歩行支援システムを、さらには、ブレーキを適切に制御し人間の障害や歩行機の使用状態、環境の情報等に基づいて適切な支援を実現する運動制御手法を構築することにより、ブレーキのみを利用したパッシブ型歩行支援システムを開発したことは、大きな成果であり、高く評価できる。

今後は今回研究開発してきた基盤技術をさらに発展させ、歩行支援システムの研究のみならず、多くの人間支援システムの研究開発に取り組み、よりディペンダブルかつ実用的なシステムの研究開発を行っていくことを期待する。

7 主な論文等:

論文

1. 平田泰久, 小菅一弘, 浅間一, 嘉悦早人, 川端邦明, “キャスト特性を有した複数の人間協調型移動ロボット(DR Helper)と人間との協調による単一物体の搬送”, [日本ロボット学会誌, 21(7), (2003), 80-88]
2. 平田泰久, 小菅一弘, 浅間一, 嘉悦早人, 川端邦明, “人間と複数の移動ロボットによる大型物体のハンドリング”, [日本機械学会論文集(C編), 70(691), (2004), 151-157]
3. Yasuhisa Hirata, Youhei Kume, Zhi-Dong Wang, Kazuhiro Kosuge, “Handling of a Single

Object by Multiple Mobile Manipulators in Cooperation with Human Based on Virtual 3-D Caster Dynamics”, [JSME International Journal, (掲載決定)]

4. 平田泰久, 原麻美, 小菅一弘, “パッシブロボティクス概念に基づいた知的歩行支援機の開発”, [日本ロボット学会誌, (掲載決定)]
5. Oscar Chuy Jr., Yasuhisa Hirata, Kazuhiro Kosuge, “A New Control Approach for a Robotic Walking Support System in Adapting User Characteristic”, [IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics, (掲載決定)]

国際会議発表論文

1. Yasuhisa Hirata, Takahiro Baba, Kazuhiro Kosuge, “Motion Control of Omni-directional Type Walking Support System “Walking Helper””, [Proceedings of The 12th International IEEE Workshop on Robot and Human Interactive Communication,(2003),85-90]
2. Yasuhisa Hirata, Asami Hara, Kazuhiro Kosuge, “Passive-type Intelligent Walking Support System “RT Walker””, [Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,(2004),3871-3876]
3. Yasuhisa Hirata, Asami Hara, Kazuhiro Kosuge, “Motion Control of Passive-type Walking Support System based on Environment Information”, [Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation,(2005),2932-2937]
4. Yasuhisa Hirata, Asami Muraki, Kazuhiro Kosuge, “Motion Control of Passive-type Intelligent Walker Based on Caster-like Dynamics”, [Proceedings of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics,(2005),477-481]
5. Oscar Chuy Jr., Yasuhisa Hirata, Kazuhiro Kosuge, “Augmented Variable Center of Rotation in Controlling a Robotic Walker to Adapt User Characteristics”, [Proceedings of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,(2005),2806-2811]

国内会議発表論文

1. 平田泰久, 馬場貴大, 小菅一弘, “回転中心可変型歩行支援システムの人間適応制御”, [日本ロボット学会学術講演会, (2003), 2H11]
2. 原麻美, 平田泰久, 小菅一弘, “ブレーキを利用した運動特性可変型歩行支援機の制御”, [日本ロボット学会学術講演会, (2003), 2H25]
3. Oscar Chuy, 平田泰久, 小菅一弘, “Variable Admittance Control of Walking Helper Based on Human Characteristics”, [SI2003 学術講演会, (2003), 227-228]
4. 平田泰久, 原麻美, 小菅一弘, “パッシブロボティクスに基づいた歩行支援システム “RTWalker”, [ロボティクスシンポジウム予稿集, (2004), 248-253]
5. 平田泰久, 原麻美, 小菅一弘, “パッシブ型歩行支援機による障害物・段差回避制御”, [ロボット学会学術講演会, (2004), 1I36]

著書

1. Kazuhiro Kosuge, Yasuhisa Hirata, “Coordinated Motion Control of Multiple Manipulators”, [Robotics and Automation Handbook,(2005)]
2. 平田泰久, 王志東, 小菅一弘, “複数ロボットの協調制御, 制御系のためのシミュレーション, 非線形制御”, [新版ロボット工学ハンドブック, コロナ社,(2005)]

総説・解説

1. 平田泰久, “人間支援ロボットシステム -ロボットヘルパー-”, [病院設備,45(1),(2003),57-64]

特許出願

1. 直動アクチュエータユニット 2003 年 4 月 24 日出願(特願 2003-119930)
2. パワーアシスト型移動台車 2003 年 5 月 22 日出願(特願 2003-145485)
3. パッシブ型移動台車 2003 年 9 月 8 日出願(特願 2003-315912)
4. Translator Actuator Unit 2004 年 4 月 23 日出願(ASAIN0143)
5. 人体モデルに基づく装着型支援システム 2004 年 9 月 16 日出願(特願 2004-264978)
6. 人間状態推定に基づく知的移動台車システムの運動制御 出願中

招待講演

1. Yasuhisa Hirata, “Robot Technologies for Human-Robot Cooperation Systems in Ubiquitous Age”, [Proceedings of 2003 International Symposium on Microelectronics,(2003),560-565]
2. 平田泰久, “人とロボットの相互作用に基づく人間・ロボット協調システム -ロボットパートナーの開発-”, [SI2003 学術講演会, (2003), 157-158]

受賞

1. Best Paper in Robotics Award(2004 年 8 月 ROBIO2004)[From Human to Pushing Leader Robot: Leading a Decentralized Multirobot System for Object Handling]
2. SI2004 ベストセッション講演賞(2004 年 12 月, SI2004) [Variable Center of Rotation Control for Walking Support System Based on Environment Information]
3. SI2004 ベストセッション講演賞(2004 年 12 月, SI2004) [RoBE を用いたモバイルマニピュレータの実時間自己衝突回避制御]
4. SI2004 ベストセッション講演賞(2004 年 12 月, SI2004) [立ち上がり動作支援システムの動力学解析]
5. 青葉工学会振興会研究奨励賞 (2004 年 12 月, 青葉工学会)[パッシブ型歩行支援システムに関する研究]
6. 日本機械学会賞(論文) (2005 年 4 月, 日本機械学会)[仮想 3-D キャスタ特性を有した複数の移動マニピュレータと人間との協調による物体のハンドリング]
7. ROBOMECH 表彰 (2005 年 6 月, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2004)[Caging を用いた物体の搬送のための複数ロボットのフォーメーション制御の提案]
8. 日本ロボット学会論文賞 (2005 年 9 月, 日本ロボット学会)[キャスタ特性を有した複数の

人間協調型移動ロボット（DR Helper）と人間との協調による単一物体の搬送]

新聞・雑誌・テレビ

1. 歩行支援システムに関する研究(テレビ サイエンスチャンネル)(2004)
2. パッシブ型歩行支援システムに関する研究(テレビ ミヤギテレビ)(2004)
3. 高齢者の坂道歩行支援(新聞 日経産業新聞)(2005)

展示会

1. 産業交流展（2004）
2. さきがけライブ(2005)
3. 東北電力「でんき屋台村」（2005）
4. 東北大学 先端技術交流会(2005)
5. ROBOTREX (2005)