

「相互作用と賢さ」研究領域 領域活動・評価報告書

平成 16 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。
 - 「相互作用と賢さ」のテーマに明快に適合していること。
 - 従来にない独創的なアイデアが含まれていること。
 - 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。
 - 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。
 - 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。
 - 年齢は35歳以下、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。
 - 現在、本事業団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。
 - テーマの設定が、予算と年限の範囲で実行できること。
 - 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

一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
対象者数	67名	19名	7名

5. 研究実施期間

平成 13 年 12 月～平成 17 年 3 月

6. 領域の活動状況

領域会議：7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 1 月	研究報告会を東京国際フォーラムで開催
平成 17 年 2 月	研究報告書および自己評価提出
平成 17 年 3 月	研究総括による評価
平成 17 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

第二期生は以下の 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。

石島 秋彦は、現在のナノ計測システムに比べ、高時間、空間分解能を有する新世代ナノ計測システムを開発し、ナノメートルレベルで生体分子の運動を正確に計測することを目的として研究を進めた。その結果、新しい光学系の開発において従来の計測法に比べて飛躍的に分解能の向上が見込まれることを示唆できたこと、さらに生体分子の運動メカニズムの解明において新しいキメラ菌体を用いることにより、従来計測できなかった回転中の素過程を初めて明らかにすることができたことは、大きな成果であり、高く評価できる。この成果は学会の話題となり、国内外から数多くの招待講演を受けた。

小林 宏は、人間行動を補助するマッスルスーツの開発の研究では、「動けない人を動けるようにする」ことを目的に、(基本的に非金属の)「マッスルスーツ」の概念を提案した。

本研究で開発したウェアラブルロボット:マッスルスーツは、基本的には非金属で構成し、空気圧で駆動する人工筋を使用した軽量で実用的な筋力補助装置であり、国内外を問わず他に類をみない活気的な装置である。服のように着るだけで動作の補助が可能となり、着用者はある程度内部で動けるため、体格差や動作に伴う関節中心位置変化を吸収でき、さらに、上肢の全 7 動作(屈曲、伸転、外転、内転、外旋、内旋、肘曲げ)を着用により実現したことは著しい業績であり、高く評価できる。この成果を、学会、新聞、雑誌、テレビ、展示会等を通して積極的な広報活動を展開し、世の中にアピールした。この成果により、3 件の学会賞(2002 年度 3 件)を受賞している。

柴田 崇徳は、人とロボットの共生と学習に関する研究では、短期的な相互作用における主観評価実験や、長期間の相互作用の実験等により人の慣れと飽きについて研究し、相互作用を継続させるための人とロボットの共生型学習法の研究開発を行なった。犬や猫のようにあまり身近ではないため、かえって違和感なく人から受け入れられやすいアザラシ型のロボット「パロ」を開発し、このロボットを「ロボット・セラピー」に応用し、デイサービスセンター、介護老人保健施設、特別養護老人ホームなどの高齢者向け福祉施設や、病院の小児病棟などにおいて実験を行い、

ロボット・セラピーの効果を科学的データによって検証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、平成 13 年パロが世界で最もセラピー効果があるロボットとしてギネス世界記録に認定されると共に、平成 15 年社団法人日本青年会議所・人間力大賞グランプリ、平成 15 年社団法人日本青年会議所・内閣総理大臣奨励賞、平成 16 年国際青年会議所・第 59 回世界大会 The Outstanding Young Person (TOYP) of the World など数々の国内および国際的な賞を受賞している。

高崎 正也は、弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの開発の研究では、超音波振動の一種である弾性表面波の機械振動を利用した皮膚感覚提示方法を提案し、その原理に基づいて皮膚感覚ディスプレイを試作すると共に、多数の被験者に体験してもらう評価試験も行った。従来の圧電材料を使用する方法はサイズ・形状とも制限があったが、それに代え、ガラスのような非圧電材料表面に弾性表面波を励振して利用することを提案し、皮膚感覚ディスプレイを実現したことは、大きな成果であり、高く評価できる。

塚越 秀行は、思い通りに身体を動かさないひとにとって、いかにして運動機能を活性化させ、日常生活の自立を図るかは重要な問題であるとの認識から、人体へ適応化するウェアラブル・フルードパワーの開発の研究では、人体に装着して関節動作を支援できる、装着型流体制御システム：ウェアラブル・フルードパワーの開発を目標とした。その実現のため、人間の各関節動作に適合した(1) 全く新しい身体装着型流体アクチュエータを考案、(2) 駆動機構を提案すると同時に、それらと装着者との意思伝達手段の役を担う(3) インターフェース、および(4) 大容量携帯圧力源を考案し、その有効性を実験的に検証した成果は高く評価できる。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 2 件の国内特許出願がある。

土佐 尚子は、いままで定量化できなかった個人の主観・感性・情緒・民族性・物語性といった文化の本質をコンピューティングできる可能性を見いだすと共に、「カルチャラルコンピューティング」の概念を提示し、これを具体化する例として、禅と山水画が作り上げた独特のコミュニケーション空間とイメージ技法をコンピュータに取り入れた ZENetic Computer を開発したことは、大きな成果であり、高く評価できる。また、笑いや気分の非言語情報を「ボケ」「ツッコミ」という対話型で、インタラクションをする漫才に着目し、「インタラクティブ漫才」システムを構築したことも評価に値する。この研究成果を、MIT 博物館メインギャラリー(ボストン)の展示会(2003.10.24 11.3)、高台寺北書院(京都)の展示会(2004.5.10 6.6)等に出品するなど積極的に普及活動を展開した。この成果により、2 件の学会賞(2002 年度 1 件、2004 年度 1 件)を受賞している。

村田 剛志は、Web におけるコミュニティの発見の研究においては、膨大な Web 情報を有効活用するために、Web におけるコミュニティを発見するシステムの構築を目標とした。興味を共有する Web ページ集合(Web コミュニティ)の発見と、同じ興味を持つユーザ集合(ユーザコミュニティ)の発見、さらに両コミュニティ間の相互作用の解明の 3 つについて、手法の考案および実装を行なった。ハイパーリンクやページ閲覧によって構成されるグラフ構造に注目することによって、両コミュニティを発見することができたことは、大きな成果であり、高く評価できる。また、両者の相互作用の解明については非常に大きな研究テーマであるが、視覚化システムを通じて今後の解明に向けた糸口を見出すことができたことも評価に値する。この成果により学会賞(2004 年度)を受賞している。

これら第二期生は、67 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、5 名が国内外の学会賞を受賞したこと、および 2 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(五十音順)

石島 辰太郎 東京都立科学技術大学 学長
(同大学 教授)

井上 恵太 (株)コンポン研究所 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
(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 (独)産業技術総合研究所評価部 首席評価役
(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 名古屋大学先端技術共同センター 教授
(同上)

油田 信一 筑波大学 理事・副学長
(筑波大学機能工学系 教授)

*所属は平成 17 年 3 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	5	10	15
口頭	79	58	137
その他	36	1	37
合計	120	69	189

(2)特許出願件数

国内	国際	計
2	0	2

(3)受賞: 17件

小林 宏:

ヒューマンインタフェース学会 [ヒューマンインタフェースシンポジウム 2002 優秀プレゼンテーション賞]「マッスルスーツの開発ーマスタースレーブ式動作実験」(2002年9月)

ICCAS(International Conference on Contror, Automation and Systems)

[Best Paper Award] Human Robot Interaction via Wearable Robot(2002年10月)

計測自動制御学会 第3回システムインテグレーション部門講演会

[SIS2002ベストセッション賞]「食事支援ロボットの開発」(2002年12月)

柴田 崇徳:

ギネス世界記録(Guinness World Records) [世界一(World Record)「柴田崇徳が設計したパロは、世界で最もセラピー効果があるロボット(PARO, designed by Dr Takanori Shibata is the world's therapeutic robot)」(2001年2月)

スウェーデン国立科学技術博物館 [Robot Exhibition Award]「ロボット展示会大賞」(2003年6月)

社団法人日本青年会議所 [人間力大賞グランプリ]「最も「人間力」あふれる光り輝く傑出した若者」(2003年7月)

社団法人日本青年会議所 [人間力大賞]「「人間力」あふれる光り輝く傑出した若者」(2003年7月)

社団法人日本青年会議所 [内閣総理大臣奨励賞]「日本国の発展に貢献」(2003年7月)

社団法人日本青年会議所 [TOYP 倶楽部会長特別賞]「地域社会への貢献」(2003年7月)

国際会議(米国電子電気技術者協会主催) [IEEE TExCRA2004 Awards 最優秀賞]「"Ubiquitous Surface Tactile Sensor," SE-2」(2004年11月)

国際青年会議所主催、第59回 JCI 世界大会 [The Outstanding Young Person (TOYP) of the World]「科学・技術の発展」(2004年11月)

塚越 秀行:

計測自動制御学会 [2003年度学術奨励賞 技術奨励賞]「跳躍・回転移動体の開発-第4報:回転移動時の踏破能力の向上-」(2004年2月)

日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 [JSME ROBOMECH 2003 ベストプレゼンテーション賞]「肩・肘の複関節動作を支援する簡易着脱式 Tail-arm の開発」(2004年6月)

日本機械学会 機械力学・計測制御部門 [2004 年度 オーディエンス賞] 「身体への簡易着脱式棒状アクチュエータ:Tail-arm の動作特性」(2004 年 9 月)

土佐 尚子:

The 6th World Multi-conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2002) and The 8th International conference on Information Systems, Analysis and Synthesis (ISAS 2002) Organizing Committees [SCI 2002 Best Paper Award] 「Interactive Comedy: Laugh as Next Intelligent System」(2002 年 7 月)

ユネスコ [International Competition for the digitalization of the intangible heritage 2nd Prize] 「ZENetic Computer」(2004 年 10 月)

村田 剛志:

人工知能学会 [全国大会優秀論文賞] 「Web コミュニティにおけるコアメンバーの発見」(2002 年 5 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)
石島 秋彦 (兼任)	新世代ナノ計測の開発と生体分子への応用 (名古屋大学)	名古屋大学大学院工学研究科 助教授 (同上)	37
小林 宏 (兼任)	人間行動を補助するマッスルスーツの開発 (東京理科大学)	東京理科大学工学部 助教授 (同上)	52
柴田 崇徳 (兼任)	人とロボットの共生と学習に関する研究 (産業技術総合研究所)	産業技術総合研究所知能システム 研究部門 主任研究員 (同上)	65
高崎 正也 (兼任)	弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの開発 (埼玉大学)	埼玉大学工学部 助手 (同上)	40
塚越 秀行 (兼任)	人体へ適応化するウェアラブルフレイドパワーの開発 (東京工業大学)	東京工業大学大学院理工学研究科 助教授 (同上 助手)	45
土佐 尚子 (兼任)	無意識情報から生成される物語り技法 ((財)イメージ情報科学研究所)	(財)イメージ情報科学研究所 京都研究所長 (ATRメディア情報科学研究所 客員研究員)	52
村田 剛志 (兼任)	Web におけるコミュニティの発見 (国立情報学研究所)	国立情報学研究所知能システム研 究系 助教授 (同所情報学基礎研究系 助教授)	38

研究課題別評価

1 研究課題名: 新世代ナノ計測の開発と生体分子への応用

2 研究者氏名: 石島 秋彦

3 研究の狙い:

現在のナノ計測システムに比べ、高時間、空間分解能を有する新世代ナノ計測システムを開発し、ナノメートルレベルで生体分子の運動を正確に計測することを目的とする。これらの計測系を開発することにより、運動タンパク質以外の生体分子にもその研究分野を広げ、生体分子のエネルギー変換機構の解明を目指す。

近年、開発されてきたナノマニピュレーション技術(ナノメートルオーダーの物体を直接捕捉し、操作する技術)は、ナノスケールの生体分子の運動を1分子レベルで計測できるようになってきて、生命科学の研究に大きな影響を与えてきた。しかし、まだこの計測システム自体が不完全なシステムであり、さらにまだ十分とはいえない分解能のため、これらの研究から得られた結果が歪曲されて理解されている。筋収縮を司るミオシン分子の発生する変位の大きさにおいて運動を正確に計測することは、生体内でのエネルギー変換メカニズムを明らかにする上でも非常に重要な課題である。これまでに様々な研究者が様々な手法を用いてミオシン1分子の発生する変位を求めてきた。しかし、これらの結果は必ずしも一致しない。その原因として考えられるのが、測定系に含まれる不確かな成分がミオシンの変位をゆがめているからである。さらに真の運動変換メカニズムを明らかにするためには、現在の分解能(位置などの情報をどの程度精度よく計測できるかの指標)では不十分であり、1nm以下、 10^4s^{-1} 以上の分解能が必要である。

測定系に含まれる不確かな成分とは、トラップビーズの回転拡散運動、接着分子の弾性、アクチンフィラメントのたわみ成分の弾性要素などでの計測系の非線形弾性要素であると考えられる。これらの要素を排除し、正確に計測するためには、プローブの小型化、新しい計測系を開発が必要である。現在ナノ計測に用いられている計測用のビーズの大きさは1マイクロメートルであり、計測対象である生体分子に比べて非常に大きく、生体分子の速い運動(サブミリ秒)を計測することができない。そこで、プローブを小型化できれば、時間分解能(位置などの情報をどの程度の時間間隔で計測できるかの指標)は向上し、非線形弾性要素の影響を小さくすることが可能である。さらに、プローブ自体のゆらぎ成分を高周波に広げることとなり、実質的なゆらぎ成分を小さくすることが可能となり、空間分解能(位置などの情報をどの程度の位置制度で計測できるかの指標)も向上する。しかし、小さいプローブを使用すると、その位置を高いS/Nで計測することが困難になる。現時点での可能性が高い計測システムはレーザー斜光照明法とバックフォーカル計測システムである。レーザー斜光照明法とは、直接光ではなく、散乱光を用い、ビーズの散乱光をフォトダイオードに投影する。バックフォーカル計測システムとは、ビーズの結像を使用するのではなく、フォーリ工像を用いる。今までの基礎研究から、これらの計測システムを用いれば、0.2マイクロメートル程度の小さなビーズでもS/Nよくビーズの変位を計測することが可能であることがわかっている。しかし、まだレーザーを用いることによる低周波のノイズ成分の上昇、コヒーレンス性(光などの位相がどの程度そろっているかの指標)の低減の必要性など克服しなければならない課題が存在する。

4 研究成果:

4.1 バクテリアべん毛モーターの回転機構の解明

4.1.1 バクテリアべん毛モーターのトルク・回転速度関係の解明

バクテリアは菌体表面のらせん状のべん毛繊維をスクリューのように回転させることにより、推進力を得て溶液中を遊泳する。その回転方向を逆転することで泳ぐ方向の転換を行い、より良い環境へ向かっていく能力も兼備している。細胞膜にはべん毛を回転させる役割を持つモータータンパク質が埋め込まれており、そこから細胞質内に流入するイオンのエネルギーからモーターの回転力(トルク)を生み出している、生物界でも数少ない回転運動器官である。

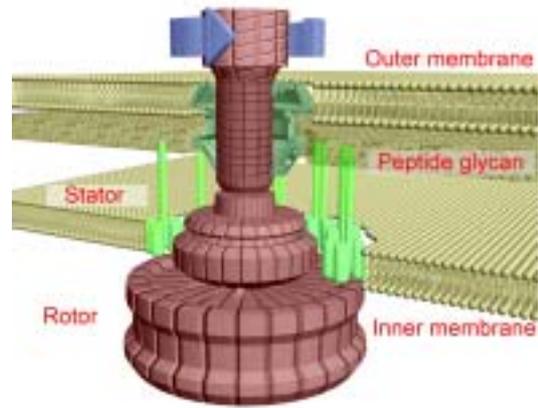


図1 バクテリアべん毛モーター

バクテリアべん毛モーターの回転における外液ナトリウム濃度と回転速度との関係を計測した(図1)。その結果、回転速度はナトリウム濃度に依存し、約100mMで最大回転速度に達した。さらに、フィラメントに固定したビーズの径に依存し、ビーズ径が大きくなり、粘性抵抗が増えるに従い最大回転速度は減少した。この粘性抵抗と回転速度から発生トルクを見積もることができる。図2に回転速度と発生トルクとの関係を示す。そして発生トルクの回転速度依存性を明らかにした。さらに簡単な4状態モデルで再現することができた。これらの結果をまとめ、10月に学術雑誌に投稿した。

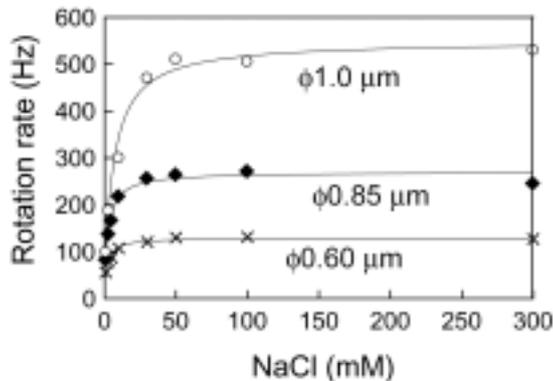


図2 NaCl濃度と回転速度との関係

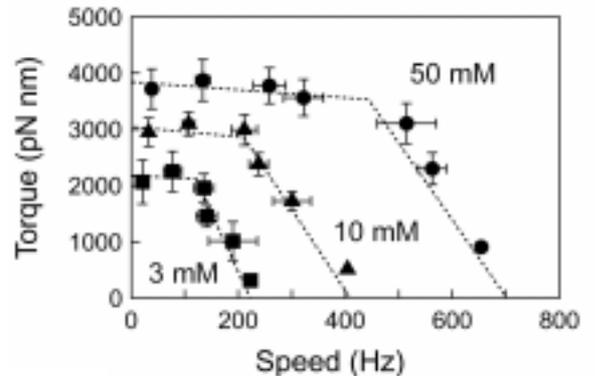


図3 回転速度と発生トルクとの関係

さらに、リチウムイオンによるトルク - 回転速度関係を計測した。その結果を図1に示す。図からも明らかなようにリチウムイオンにおいてもトルク - 回転速度関係はナトリウムの場合と同様に低回転域ではトルクが一定となり、高回転域に於いて減少することを見いだした。また、最大トルク、最大回転速度はナトリウムの場合に比べて、1/2、1/5という値を示した。この結果を以前にも用いた4状態モデルでの再現を試みたところ、イオンの結合定数を変化させる、という単純なパラメーター変化でナトリウム、リチウムの場合を説明することに成功した。

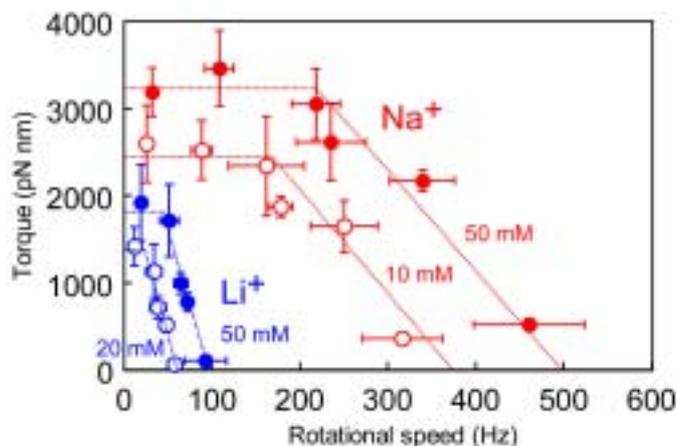


図4 ナトリウム、リチウムイオンにおけるトルク - 回転速度関係

4.1.2 キメラ菌体の構築、最適化

本問らによって構築されたナトリウム駆動型とプロトン駆動型のバクテリアべん毛モーターのキメラ菌体を用いて、回転計測系への最適化を図ることを行った。このキメラ菌体はローターはプロトン駆動型由来、ステーターはプロトン駆動型とナトリウム駆動型とのキメラタンパクというものを有し、ナトリウムイオンの流れによって回転発生することができる。菌体自体はプロトン駆動型である大腸菌を用いるため、安定した回転計測、タンパクの発現の制御、走化性(バクテリアなどの生物が化学物質により、引き寄せられたり、逆に避けていったりする行動)などの情報伝達との関連、など様々なメリットがある(図5)。

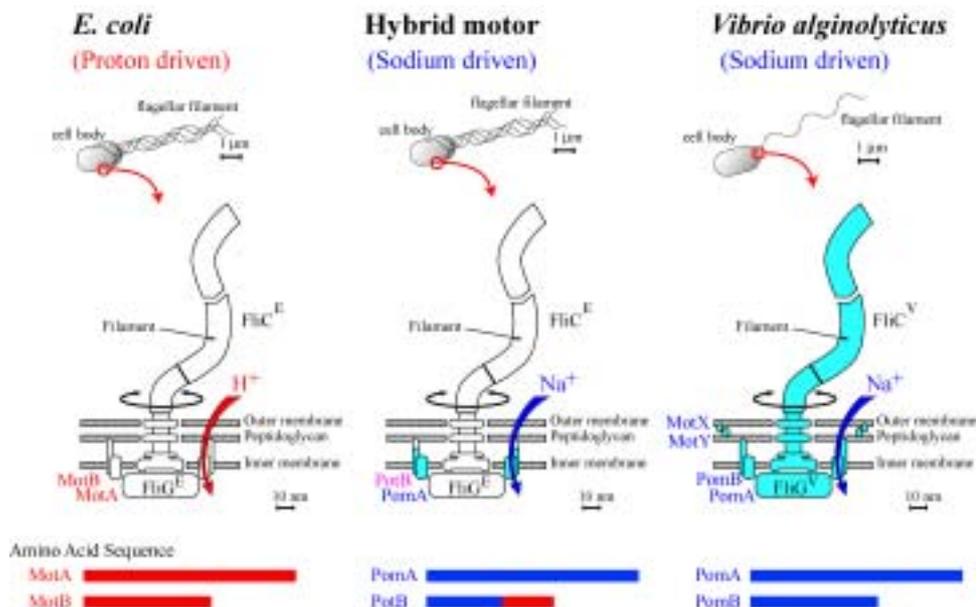
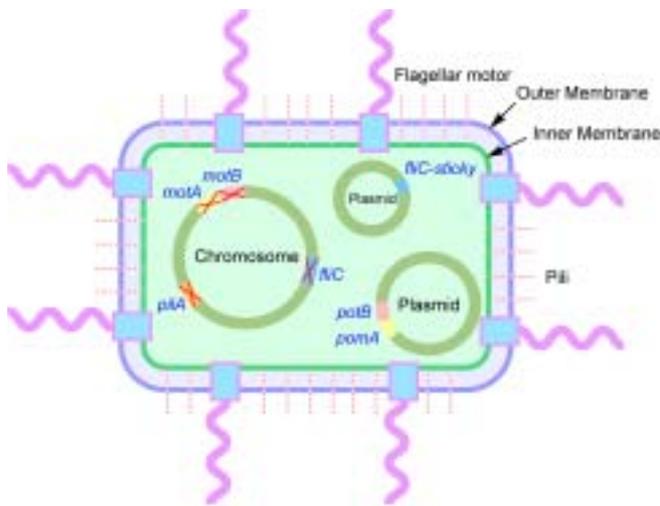
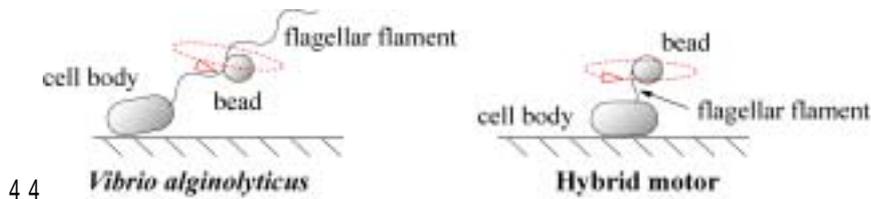


図5 キメラ菌体の構成。左側がプロトン駆動型である大腸菌、右側がナトリウム駆動型であるビブリオ菌、中央がキメラ菌体。ローターは大腸菌由来、ステーターは大腸菌とビブリオ菌のキメラ、ナトリウム駆動となる。



このようにして得られた新キメラ菌体のべん毛の回転はナトリウム依存性を示していることが確認できた。この新しく構築したキメラ菌体を用いて、まず回転の安定性を確認した。その結果を図6に示す。

図6 回転計測に適したキメラ菌体の構成。大腸菌由来の *motA*, *motB*, *pilA*, *fliC* 遺伝子をつぶし、新たに *fliC-sticky* 遺伝子を導入した。



4 4

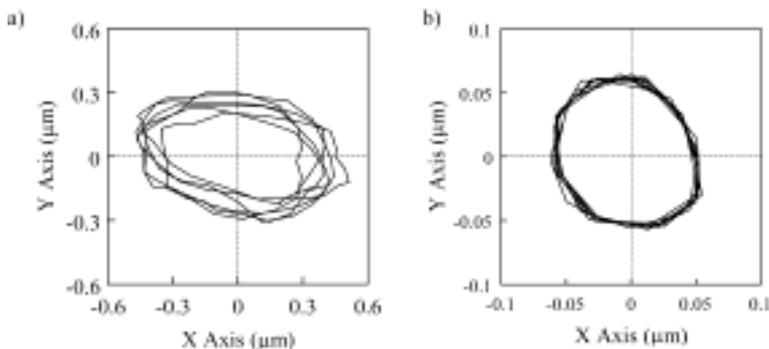


図7 ビブリオ菌を用いた計測結果(左)と新キメラ菌体を用いた計測結果(右)

図7からも明らかなように、ビブリオ菌を用いた結果に比べて、新キメラ菌体を用いた結果は、非常に安定していることがわかる。これは、ビブリオ菌は極毛のため、斜め、もしくは直立した菌体を用いてしか計測ができないのに対し、新キメラ菌体は側毛であるため、ガラス上に菌体がしっかりと固定されているため、安定した回転計測が可能になったものと思われる。

4.1.3 キメラ菌体を用いた回転ステップの計測

回転運動の素過程を計測するために、ステーターユニットの発現量を調節し、できるだけ少

ない発現量、たった一つのステーター、による回転計測を試みた。その結果、1回転中にステップ状の運動を計測することに成功した。1回転中のステップの様子を明らかにすることは、回転メカニズムを明らかにする上で非常に重要なことである。

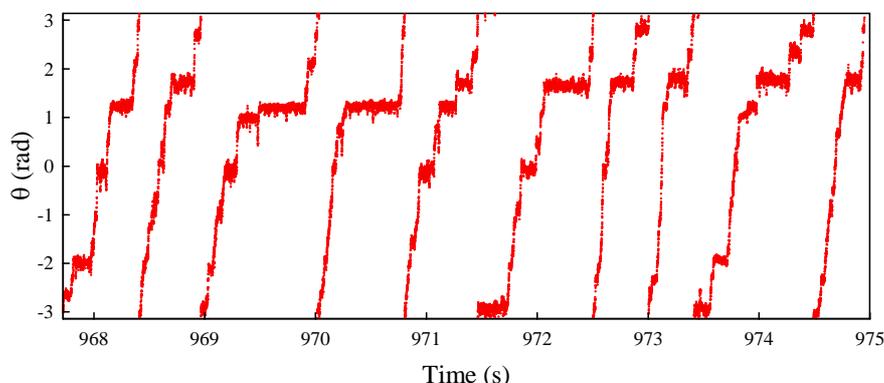


図8 1回転中のステップ状運動の様子

このステップ状の変位の大きさを明らかにするために、Pairwise Distance Distribution Function (PDDF)法を用いた。その結果、0.08、0.14(回転)という位置にピークが現れ、それぞれ1回転中に12.7ステップ/回転という値になる。さらに、ステップの様子を詳しく見てみると、微小なステップ状の変位を見ることができた。

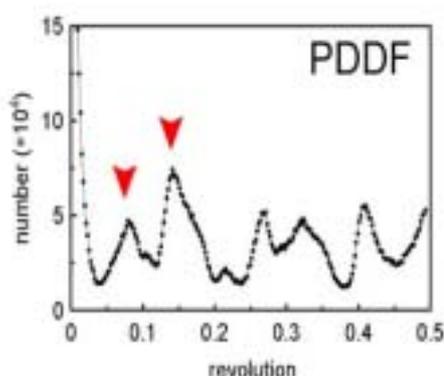


図9 Pairwise Distance Distribution Function (PDDF) 法による結果。

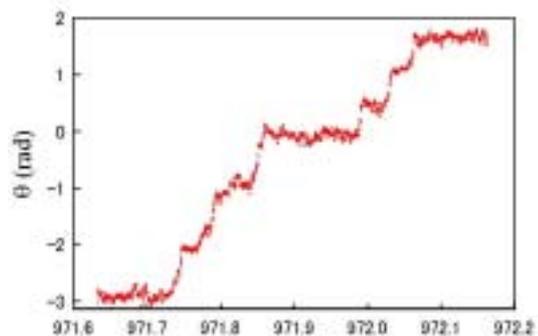


図10 微小ステップの様子

このステップの様子を上と同様の Pairwise Distance Distribution Function (PDDF)法を用いて解析した結果、0.03(回転)という位置にピークが現れ、1回転中に33ステップ/回転という値になる。この値は、ローター側の構造体であるC-ringの重合数とほぼ一致する。

今回の研究により、1回転中のステップを初めて計測することに成功した。このことは、いままで多数の研究者が計測を試みていた結果であり、非常に重要な結果である。しかしながら、まだステップの大きさ、発現時の条件、など不明な点が多々ある。従って、今後さらなる研究を遂行し、ステップ発現の条件を明らかにし、回転動作機構を明らかにしていく予定である。

4.2 バックフォーカル照明系の構築

光学顕微鏡を用いた生体分子の1分子計測においては、図11に示すような光学系を用いてナノメートルのオーダーで計測を行っている。生体分子を直接計測することは現状ではまだ不可能であるので、生体分子にプローブを固定し、そのプローブの運動を計測している。プローブの変位は4分割のフォトダイオード上にプローブの像を結像し、その作動出力から生体分子の運動を計測している。しかし、最初に述べたようにあまりにも生体分子自身、生体分子の運動の大きさとプローブの大きさが違うため、現状では、生体分子の運動を正確に計測できているとは言い難い。プローブの大きさをできる限り小さくすれば、より正確に生体分子の運動を計測できるが、現在用いられている計測手法、明視野、位相差(図11、左の二つ)では、プローブが小さくなるとフォトダイオードに投影される像自体の大きさ、光強度が小さくなり、その変位を正確に計測することが困難である。そこで、新しい計測手法、斜光照明、バックフォーカル計測システム(図11、右二つ)を新たに構築し、微小プローブの変位計測システムの構築を試みた。斜光照明法とは、明視野、位相差のようにプローブを透過する光の強度、位相情報などの直接光を用いるのではなく、斜めから照射したレーザーによる散乱光をフォトダイオードに投影するものである。また、バックフォーカル計測システムとは、プローブの結像像ではなく、フーリエ像をフォトダイオードに投影して、その変化を計測するものである。

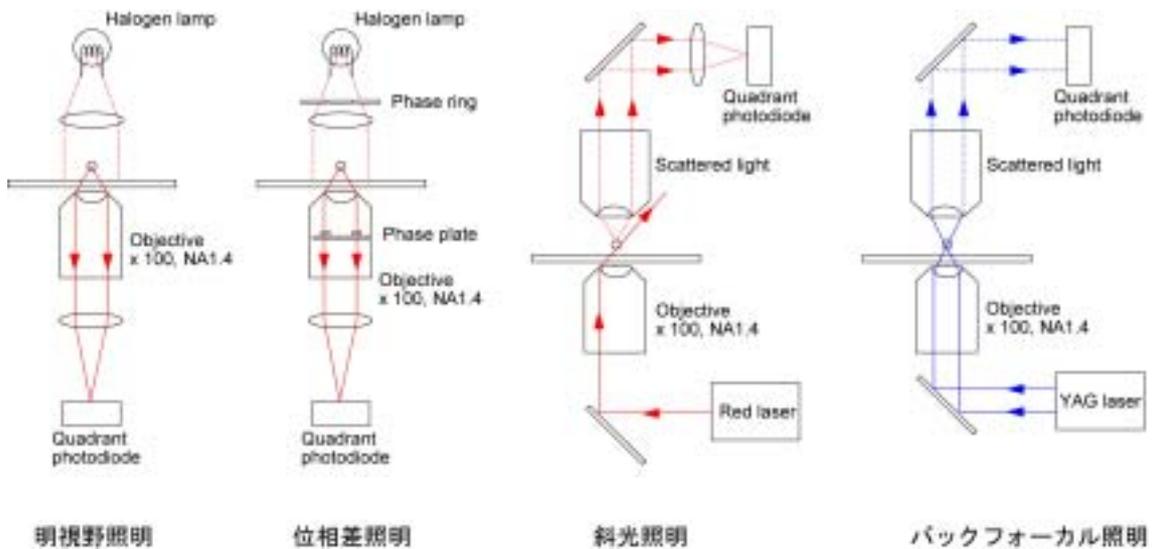


図11 さまざまなナノ計測システム

今回は、バックフォーカル計測システムを紹介する。この新しい照明系(図11)の構築、性能の評価を行った。図12にバックフォーカル像の連続写真を示す。直径1ミクロンのビーズを振幅400nmの正弦波で振動させたときの像である。このように、バックフォーカル像がプローブの運動を反映していることがわかる。

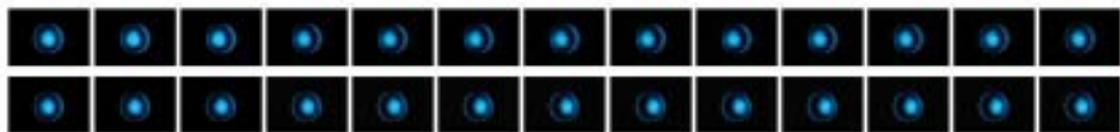


図12 バックフォーカル像の連続写真

新しく構築したバックフォーカル照明系において、従来の位相差像による照明系との比較を行った。図13に従来の位相差照明において直径が1ミクロン、0.5ミクロンのビーズを50Hzで振動させたときのフォトダイオードの出力の結果を示す。直径1ミクロンにおいては、ビーズの変位が1nmでも十分な出力を示しているが、直径0.5ミクロンのビーズでは2nmの変位でもうその変位を計測できていない。ビーズの径が0.3ミクロン以下であると計測に十分なシグナルを得ることができず、結果としてS/Nが悪くなり、実際の計測には適さない。

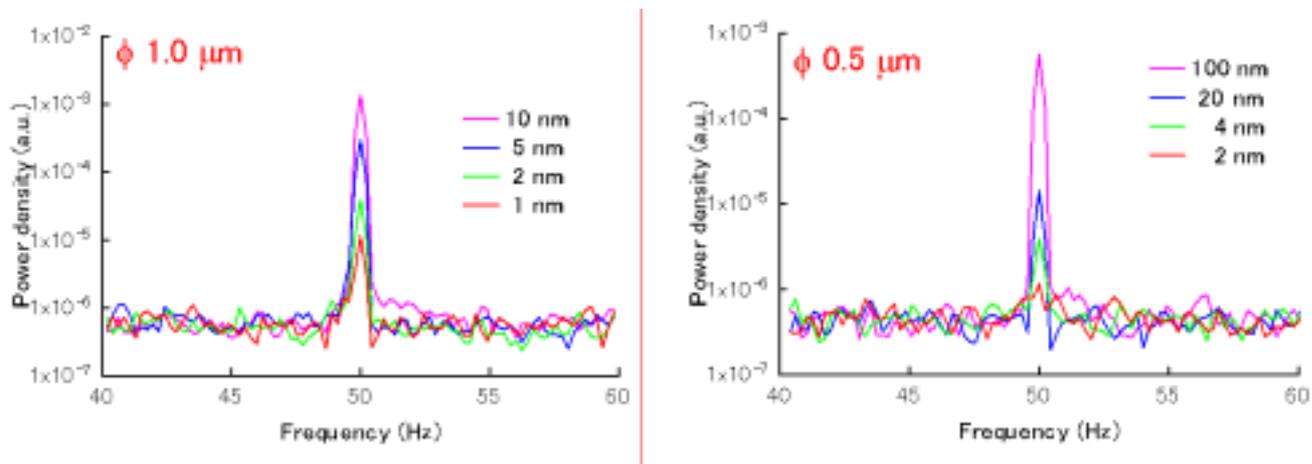


図13 位相差照明におけるビーズの大きさと出力との関係

そこで、バックフォーカル計測システムを用いて、どの程度の小さいビーズまで十分な感度を持ち得るかを評価した。図14にバックフォーカル計測システムにおいて直径が1ミクロン、0.2ミクロンのビーズを50Hzで振動させたときのフォトダイオードの出力の結果を示す。

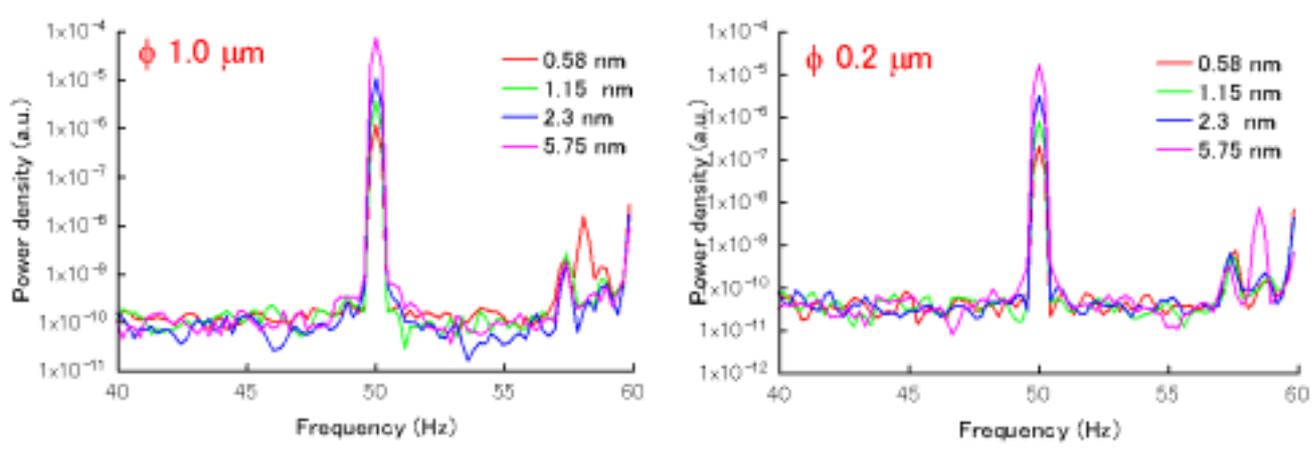


図14 位相差照明におけるビーズの大きさと出力との関係

図からも明らかなように、バックフォーカル計測システムでは直径0.2ミクロンのビーズにおいても、0.58nmという変位まで十分に感度があることがわかる。また、さまざまな問題点、レーザーによるスペクルノイズ、低周波のゆらぎ、光学系の最適化、などを解決していかなければなら

ないが、これらの新しい計測システムを構築していくことにより、生体分子の運動をより正確に計測可能なシステムを構築できるものと思われる。

5 自己評価:

これまでの研究において、新しい光学系の開発、生体分子の運動メカニズムの解明、という両面から研究を行ってきた。しかし、限られた時間、人員により、いずれの研究計画も当初の計画通りに完結できたとは言えない。しかし、生体分子の運動メカニズムの解明においては、新しいキメラ菌体を用いることにより、従来計測できていなかった回転中の素過程を初めて明らかにすることが可能となった。さらに新しい光学系の開発においては従来の計測手法に比べて飛躍的に分解能の向上が見込まれることを示唆できた。いずれもこの研究方針が正しいことを示しており、この研究方針をさらに突き進めていく自信となった。さらに、このような従来の研究システムを改善、改良していくという方針だけではなく、まったく新しいシステムを導入し、従来の研究システムとは全く違うシステムの構築も必要である。そのためにも、自分の研究フィールドだけではなく、異分野のフィールドにも積極的に参加し、新しい素材、ツールを探し出していくことが今後必要になると感じた。

6 研究総括の見解:

現在のナノ計測システムに比べ、高時間、空間分解能を有する新世代ナノ計測システムを開発し、ナノメートルレベルで生体分子の運動を正確に計測することを目的として研究を進めた。その結果、新しい光学系の開発において従来の計測法に比べて飛躍的に分解能の向上が見込まれることを示唆できたこと、さらに生体分子の運動メカニズムの解明において新しいキメラ菌体を用いることにより、従来計測できなかった回転中の素過程を初めて明らかにすることができたことは、大きな成果であり、高く評価できる。

今後は、さらに高時間、空間分解能を上げた計測システムの開発を目指すことにより、生命科学の研究分野の発展に貢献することが期待できる。

7 主な論文等:

発表論文

1. Ishii, Y., **Ishijima, A.** & Yanagida, T., *TRENDS in Biotechnology*, **19(6)**, 211-216, (2001): Single molecule nanomanipulation of biomolecules
2. Kitamura, K., **Ishijima, A.**, Tokunaga, M., & Yanagida, T., *JSAP International*, **4**, 4-9, (2001) : Single-Molecule Nanobiotechnology
3. **Ishijima, A.**, & Yanagida, T., *Trends in Biochemical Sciences*, **26 (7)**, 438-444, (2001): Single molecule nanobioscience
4. Ishii, Y., **Ishijima, A.** & Yanagida, T., *Results and Problems in Cell Differentiation*, **36**, 87-105, (2002): Coupling between chemical and mechanical events and conformation of single protein molecules
5. Kitamura, K., **Ishijima, A.**, Tokunaga, M. & Yanagida, T., *AAPPS Bulletin*, **11, (4)**, 2-8, (2002): Single-Molecule Nanobiotechnology
6. Yorimitsu T, Sowa Y, **Ishijima A**, Yakushi T, & Homma M, *J Mol Biol* Jul 5; **320(2)**, 403-13, (2002) : The Systematic Substitutions Around the Conserved Charged Residues of the Cytoplasmic Loop of Na(+)-driven Flagellar Motor Component PomA
7. Nomura, F., Honda, M., Takeda, S., Inaba, T., Takiguchi, K., Itoh, T.J., **Ishijima, A.**, Umeda, T. & Hotani, H., *Journal of biological physics*, **28 (2)**, 225-235, (2002): Morphological and topological transformation of membrane vesicles
8. Hotani, H., Nomura, F., Takeda, S., Inaba, T., Takiguchi, K., Itoh, T.J., **Ishijima, A.** & Umeda, T., *In*

New Approaches to Structural Mechanics, Shells and Biological Structures (H. Drew & S.o Pellegrino eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 435-446, (2002): Morphological and Topological Transformation of Liposomes

9. Sowa, Y., Hotta, H., Homma, M. & **Ishijima, A.**, *Journal of Molecular Biology*, **327/5**, 1043-1051, (2003): Torque speed Relationship of the Na⁺-driven Flagellar Motor of *Vibrio alginolyticus*
10. Kimura Y, Toyoshima N, Hirakawa N, Okamoto K. & **Ishijima A.** *J Mol Biol*, May 9, **328(4)**, 939-950, (2003): A Kinetic Mechanism for the Fast Movement of Chara Myosin
11. H. Hotani, T. Inaba, F. Nomura, S. Takeda, K. Takiguchi, T. J. Itoh, T. Umeda and **A. Ishijima**, Mechanical analyses of morphological and topological transformation of liposomes, *Biosystems*, Vol 71, Pages 93-100 , (September 2003)

国際会議発表論文

1. H. Hotani, T. Umeda, Y. Suezaki, F. Nomura, K. Takiguchi: Mathematical Analysis of Morphological and Topological Transformation of Membrane Vesicles, BIOMATHEMATICS and RELATED COMPUTATIONAL PROBLEMS(BIOCOMP2002), Hotel Baia, Vietri sul Mare, Italy, June 3-9 (on 7), 2002, Abstract pp 159, invited
2. Kimura, Y., Toyoshima, N., Hirakawa, N., Okamoto, K., **Ishijima, A.** & Higashi-Fujime, S., *BIOPHYS J*, **82 (1)**, 1999 Part 2 JAN (2002): Mechanical properties of Chara myosin
3. Hotani, H., Nomura, F., Honda, M., Takeda, S., Itoh, T. J., **Ishijima, A.** & Umeda, T., 4th International Conference Biological Physics(ICBP2001), Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, July 30-Aug, 3(on31), (2001),: Morphological and topological transformation of membrane vesicles
4. **Ishijima, A.**, Kimura, Y. & Higashi-Fujime, S., *Biophys J.*, **84(2)**, 117a, A, (2003): Kinetic Mechanism for the Fast Movement of Chara Myosin
5. Sowa, Y., Hotta, H., Homma, M. & **Ishijima, A.**, *Biophys J.*, **84(2)**, 572a, (2003): The Effect of Na⁺ on Torque-Speed Relationship of Na⁺-driven Flagellar Motor

国内会議発表論文

1. 石島秋彦、日本機械学会 関東支部 第7期 総会講演会(2000):光測定手法を用いた生体分子の1分子計測
2. 稲葉岳彦、本田誠、滝口金吾、宝谷紘一、石島秋彦: リポソームの膜突起形成に必要な力測定 : 日本生物物理学会 第39回日本生物物理学会年会 2001、2P157
3. 岡本圭一郎、木村祐史、平川昇、藤目杉江、石島秋彦: 光ピンセットを用いた車軸藻ミオシン1分子力学測定 - ATP濃度依存性についての考察 - : 日本生物物理学会 第39回日本生物物理学会年会 2001、3P135
4. 笠原秀明(名大院・工・応用物理): 細胞内輸送小胞の捕捉及び運動測定: 日本生物物理学会 第39回日本生物物理学会年会 2001、3P214
5. 高山治久、曾和義幸、本間道夫、石島秋彦: べん毛モーター回転におけるLi⁺とNa⁺濃度依存性の検討: 日本生物物理学会 第39回日本生物物理学会年会 2001、3P168
6. 曾和義幸、堀田博之、本間道夫、石島秋彦: Na⁺駆動型べん毛モーターの回転計測: 日本生物物理学会 第39回日本生物物理学会年会 2001、3P173

7. 平川昇、岡本圭一郎、石島秋彦、藤目杉江：車軸藻ミオシンの力 - 速度関係：日本生物物理学会 第 39 回日本生物物理学会年会 2001、3P137
8. 木村祐史、岡本圭一郎、藤目杉江、石島秋彦：車軸藻ミオシンの 1 分子力学：日本生物物理学会 第 39 回日本生物物理学会年会 2001、3P134
9. 稲葉岳彦、滝口金吾、宝谷紘一、石島秋彦：光ピンセットによる膜突起形成の力学的測定：日本生物物理学会 第 40 回日本生物物理学会年会 2002、1G1345
10. 曾和義幸、堀田博之、本間道夫、石島秋彦：Na⁺駆動型べん毛モーターのトルク-スピード関係における[Na⁺]の影響：日本生物物理学会 第 40 回日本生物物理学会年会 2002、3E1015
11. 稲葉岳彦、石島秋彦、滝口金吾、宝谷紘一：膜小胞における球状部と膜突起の共存条件：日本生物物理学会 第 41 回日本生物物理学会年会 2003、B345
12. 羽田成宏、石島秋彦：細胞内輸送小胞のマニピュレーション：日本生物物理学会 第 41 回日本生物物理学会年会 2003、B545
13. 加藤伸彦、石島秋彦、稲葉岳彦、滝口金吾、梅田民樹、宝谷紘一：膜小胞の力学的特性に対する脂質組成の影響：日本生物物理学会 第 41 回日本生物物理学会年会 2003、B597
14. 曾和義幸、薬師寿治、本間道夫、石島秋彦：大腸菌で機能する Na⁺駆動型モーターの回転計測：日本生物物理学会 第 41 回日本生物物理学会年会 2003、B434
15. 町山裕亮、白井啓介、石島秋彦：微小ビーズを用いた actomyosin の 1 分子力学計測 光ピンセット法における時間・空間分解能の向上：日本生物物理学会 第 41 回日本生物物理学会年会 2003、B476
16. 南野徹、曾和義幸、西條由見子、杉山滋、石島秋彦、大澤研二、難波啓一：サルモネラ菌の運動性に及ぼされるべん毛モーター蛋白質複合体 MotA/B のマルチコピー効果日本生物物理学会：第 41 回日本生物物理学会年会 2003、B506
17. 白井啓介、町山裕亮、石島秋彦：車軸藻ミオシンの 1 分子力学計測： - 運動活性の低下を防ぐために -：日本生物物理学会 第 41 回日本生物物理学会年会 2003、B482
18. 野瀬宏、町山裕亮、石島秋彦：車軸藻ミオシンの 1 分子力学測定 - プロセッシブ運動の検討 -：日本生物物理学会 第 42 回日本生物物理学会年会 2004、3P167
19. 曾和義幸、Alexander Rowe、薬師寿治、本間道夫、Richard Berry、石島秋彦：細菌べん毛モーター低速回転時のステップ検出：日本生物物理学会 第 42 回日本生物物理学会年会 2004、3P204
20. 清水彬生、曾和義幸、永井萌土、斎藤弥八、新井史人、石島秋彦：水溶液中でのカーボンナノチューブの可視化：日本生物物理学会 第 42 回日本生物物理学会年会 2004、3P303

総説・解説

1. 石島秋彦、マイクロマシン、617-620、2002：生体リニアモーター、回転モーターの運動メカニズム
2. 「図解 高分子新素材のすべて」、(株)工業調査会 (予定)

特許出願

1. 光学顕微鏡における位相リングスリット、平成13年12月28日
2. 粘度測定方法および測定装置、平成14年8月23日

招待講演

1. 8th Keihanna International Conference on Molecular Biophysics、(2002): The torque-speed relationship of the Na⁺-driven flagellar motor of *Vibrio alginolyticus*
2. The 30th NIPS International Symposium、Frontiers of Biological Electron Microscopy
- Proteins to Supramolecules -、Mar 12-15、2003、The torque-speed relationship of the Na⁺-driven flagellar motor of *Vibrio alginolyticus*
3. The 4th European Biophysics Congress、July 5-9、2003、Alicante、Mechanical force required for membrane protrusion formation
4. The 1st International Conference on Single-Molecule Bionanotechnology for Cell Membrane Biology、Aug 20-22、2003、The torque-speed relationship of the Na⁺-driven flagellar motor of *Vibrio alginolyticus*
5. The 8th Membrane Research Forum、Nov 23-26、2004、Single molecule measurements of Linear and Rotational bio-motor

受賞等

1. 応用物理論文賞 ((社)応用物理学会)
「ナノ領域の光の生物への応用 - 生体分子1個の化学反応と力学反応の同時計測 - 」

研究課題別評価

1 研究課題名: 人間行動を補助するマッスルスーツの開発

2 研究者氏名: 小林 宏

3 研究の狙い:

(1) 背景

超高齢化社会を間近に控え、労働力不足を補い、生活を支援し、医療福祉に寄与する技術としてロボット技術が注目を集めている。それに伴い、人間の生活環境内で動作できるロボットの開発が進んでいるが、「人間の動作を支援する技術」はほとんどない。

このような背景のもと、本研究では、「動けない人を動けるようにする」ことを目的に、(基本的に非金属の)「マッスルスーツ」の概念を提案した。これは、新しいロボット分野であるウェアラブルロボットの一つである。産業用ロボットは、人間がその作業領域に立ち入らないことが前提であった。時代が進み、アミューズメント、エンターテインメントロボットでは、触れることはできないがすぐ側でロボットを見ることができるようになり、最近のパーソナルロボットでは、人間の生活空間にロボットが入ってくるようになった。ウェアラブルロボットは、その名が示すように人間が装着するロボット技術で、人間との距離は0となり、時代の流れを考えると必然的に思える。ウェアラブルロボットは、装着している人間に情報を与えるだけでなく、機動力・駆動力・制動力を与えることができ、パーソナルロボットの問題点であった難しい判断や環境認識は装着している人間が行えば良いと言う意味で、それほど高度な知能を必要としない。この観点から、ウェアラブルロボットの実用化の可能性は高い。さらに、安全性は問題になるものの、人間の行動を直接補助できるため、超高齢化社会に有用な技術であると考えられる。

開発を進めたマッスルスーツは、日常生活での使用を考え、金属をほとんど使用しないため軽量で脱着が容易であり、着用により原理的にはあらゆる動きが可能となり、筋力の補助や反力の発生ができる。そのため、要介護者、動きが困難な身体障害者、肉体労働者、リハビリテーションなどに適用できる。特に、将来的には、動きが困難な要介護者/高齢者や身体障害者がマッスルスーツにより自分の意志で動けるようになり、自立を助ける肉体的・精神的補助が可能となるであろう。

(2) 目標

マッスルスーツにより、上肢の全動作を実現し、着用者が意のままに制御できるシステムの目処をつける。

(3) 解決すべき問題点

上肢の動作は全部で7動作(屈曲、伸転、外転、内転、外旋、内旋、肘曲げ)あり、それを全て実現するための構造、機構について、十分な検討が必要である。

また、着用者が意のままにマッスルスーツを制御するためには、マッスルスーツの姿勢の計測・計算、着用者の意志(動作方向指示)の伝達、意志通りに動かすための人工筋肉の制御、の3つの問題を解決する必要がある。

(4) 問題解決へのアプローチ

上肢全7動作実現のためには、マッスルスーツのコンセプトの修正が必要である。また、マッスルスーツの姿勢の計測・計算のためには、マッスルスーツへのセンサの埋め込みが必要、着用者の意志(動作方向指示)伝達のためには、着用者に適切なセンサを取り付けることが必要、また、意志通りにマッスルスーツを動かすための人工筋肉の制御には、非線形の入力 出力関係を結びつける神経回路網のような変換則が必要となる。

4 研究成果:

研究の開始時点では、研究期間中に、上肢の全動作を実現し、その上で着用者が意のままに制御できるマッスルスーツを実現する予定であった。しかしながら、人間の上肢の筋骨格構造は非常に複雑なため、マッスルスーツにより上肢の全動作を実現するところまでで研究期間を終えることになった。しかしながら、5. 自己評価の項で述べるように、様々な新たな研究へとつながったことは、この研究の最も意義のある成果であると考えている。以下、上肢の全動作を実現するまでの研究開発の流れを説明する。

4.1 マッスルスーツのコンセプト

物理的に人間を支援する介護福祉機器のほとんどは、現在のところ「介護者用」に開発され、金属フレームを用いている。結果としてこれらは、コスト、安全性、総重量、出力、人間との親和性の面から実用的な利用には限界があり、「要介護者」の立場や精神面の考慮はほとんどされておらず、要介護者の自立にはつながらない。

これに対してマッスルスーツは、アクチュエータとして安価・軽量で出力質量比が非常に大きい McKibben 型人工筋(後述)を用い、それを服に取り付けた構造となっている。図1に示すように、人工筋を加圧することで人工筋が収縮し、人工筋両端が引っ張られることで、着用者の対応部位が動くという仕組みになっている。基本的に服なので軽量であり、着用により要介護者自らが動けるようになるため、要介護者が生きる活力を生み出すという精神的なサポートにもつながり、介護者の肉体的な負担も軽減されると考えられる。また、反力を発生することも可能であり、リハビリテーションにも利用できる。さらに、肉体労働者などの姿勢保持や筋力補助にも利用できる。

4.2 マッスルスーツの構成

4.2.1 McKibben 型人工筋

McKibben 型人工筋は、同じ空気圧式のピストンシリンダに比べて駆動のための摩擦がほとんどなく、直線運動だけでなく形状を柔軟に変化させることが可能で、非常に軽量である。マッスルスーツでは、この柔軟性を有効に利用している。つまり、McKibben 型人工筋を人間の体表面に沿って配置している。

図2に、McKibben 型人工筋の構造と動作メカニズムを示す。ナイロン製の繊維コードを格子状に編んだスリーブでゴムチューブを覆い、スリーブの両端を固定する。チューブ内の圧力を上げるとチューブは半径方向に膨張し、このとき生じる円周方向の張力が繊維コードにより軸方向の強力な収縮力に変換される。例えば、直径 18mm、長さ 400mm の人工筋の重さは約 40g で、無負荷では 35%程度の収縮率、20kg の負荷でも 20%以上の収縮率が得られる。

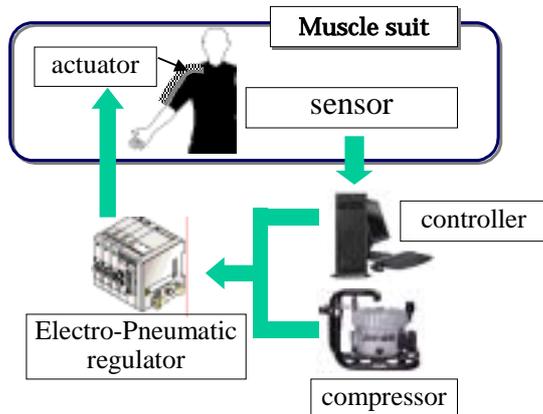


図3 マッスルスーツのシステム構成.

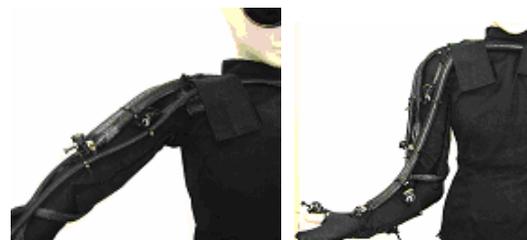


図4 人間サイズの人形を用いた動作実験例

4.2.2 マッスルスーツのシステム構成

マッスルスーツの基本的なシステム構成を図3に示す。図のように、マッスルスーツ、人工筋への空

気圧を調整する電空レギュレータ、コンプレッサ、制御装置、センサからなる。センサ部分を除き、制御装置からのパターン指令でマッスルスーツを動かすことが可能となる、

4.2.3 マッスルスーツプロトタイプによる動作実験

人間サイズの人形を用い、マッスルスーツにより人間を動作させることが可能であるか、問題点は何かを検証した。図4に、人形に服を着せ、そこに人工筋を取り付けて外転、及び肘曲げを行った例を示す。この図には、試行錯誤により、最も大きな回転角度が得られた場合を示してある。これより、例えば外転は、約40度程度しか実現できていないことが分かる。これは、単純に服に人工筋を取り付けて引っ張るというコンセプトの限界を示したものであり、次章以降でこの原因と解決方法を議論する。なお、本研究では、外転動作の実現をまず目指すことにする。外転は腕全体を持ち上げるために負荷が大きく、人間の場合、肩周辺の10種類以上の多くの筋肉と骨を様々に用いるため、腕の動きの中では最も難しいものといえる。

4.3 鎧構造マッスルスーツの提案

4.3.1 単純構造マッスルスーツの問題点

筋肉は骨に直接ついており、関節の軸中心近くが始点や終点となっているため、四肢の可動範囲は非常に広い。一方、マッスルスーツは、服の上に人工筋を取り付けるため、その取り付け位置は、筋肉と比べて必然的に関節の回転軸から遠い場所となり、広い可動範囲を確保するには限界がある。また、服に人工筋をとりつけるだけの単純構造のマッスルスーツでは服のズレやたるみが発生し、人工筋の収縮が十分に反映されない。そして、これを解消するには服の体への密着が必要となるが、この場合は着心地・脱着に問題が起きるというジレンマに陥る。さらに、単純構造のマッスルスーツでは、人間の骨や関節を支柱として利用するためそれらに負担がかかり、それらの強度が衰えた高齢者や身体障害者は使用できないという問題がある。

このように単純構造のマッスルスーツでは、

1. 服のズレやたるみによる可動範囲のロスがある。
2. 可動範囲に限界がある。
3. 体への密着が必要であり、着心地、脱着が問題となる。
4. 骨や関節に負担がかかる。

などの問題点が明らかとなった。

4.3.2 鎧構造マッスルスーツの提案

これらの問題点を解決するため、新たに鎧構造を提案する。基本的には、人間の各部分に対応した筒状の非金属構造物に人工筋を取り付け、それを動かすことで中に入っている人間を動かすというもので、非金属の鎧のようなものである(図5)。筒状の非金属構造物は、5mmの厚さのウレタンボードを布で覆う(ソフトフレームと呼ぶことにする)ことである程度の剛性を持たせており、軽量であるが、中の人間が動いても形状が保たれる。これにより、上記の問題点が次のように解決できる。

まず、ソフトフレームにより、服のようなズレやたるみが無くなることが挙げられる(問題点1)。これにより、人工筋の収縮が直接マッスルスーツに反映されるようになるため、鎧の構造、動作メカニズムを考えることで、人間の可動範囲をある程度満足させることが可能になるとと思われる(問題点2)。また、鎧構造マッスルスーツでは、着用者に密着させる必要がなく、脱着も容易となる(問題点3)。さらに、ソフトフレームが支柱となって着用者を動かすため、着用者の骨や関節に負担をかけず、ソフトフレームの面で着用者に力を加えるため、着用者に局所的な負荷がかからない(問題点4)。

4.3.3 鎧構造マッスルスーツの試作と外転の実現

本研究では、手先が頭部に届けばほぼ日常生活に問題がないと考え、ひとまず外転として90°

を目指す。これができれば、肘を曲げるにより手先が頭部に届くからである。

ところで、人間の筋肉は骨に直接とりついている。一方、マッスルスーツは、筋肉の上にある皮膚のさらに上にある構造物(マッスルスーツのフレーム)に人工筋肉を取り付ける。骨や関節に対し、人間の筋肉配置と同じように人工筋肉を配置することは不可能であり、骨や関節に対して筋肉と比べて遠い位置に人工筋肉を取り付けることになるため、必然的に人間の筋肉配置とは異なってくる。さらに人工筋肉間の干渉も考慮しなければならない。そのため、本研究ではひとまず、必要な動作が得られるように試行錯誤により人工筋の配置を決定した。この状態で1.9kgと皮のコートと同程度であり、十分服といえる重さであると考えられる。図6に示すように、人工筋 A、B、Cを順番にアクチュエートすることで、外転の実現に成功した。

鎧構造のマッスルスーツは、着用者に密着させる必要がないため、似たような体格の被験者に試着させてみた。その結果を図7に示す。被験者(Subject)番号に続く括弧内の数値は、順番に身長、胸囲、上腕の直径を示している。これより、被験者5人中4人は、外転が実現できていることが分かる。被験者Vに関しては、上腕の直径が大きいため、マッスルスーツのサイズが合わず、正しい動作が行われていないと推測される。しかしながら、この結果から、鎧構造のマッスルスーツは、ある程度の体格差を吸収することができ、既製の服のように S、M、L といったサイズを用意すれば、多くの人に適用できそうであることが示唆された。

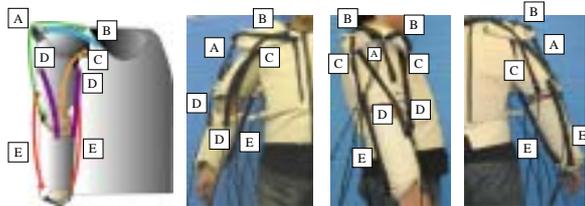


図5 鎧構造マッスルスーツ

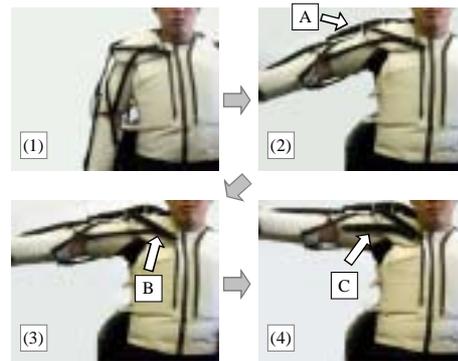


図6 外転の実現



図7 複数被験者への適用

4.3.4 鎧構造マッスルスーツの問題点

外転と同様にして他の動作を実現できないか検討したところ、上肢全7動作(屈曲、伸転、外転、内転、外旋、内旋、肘曲げ)のうち、外転と内転(腕の骨に沿った軸周りに回転)は実現できなかった。また、実現できたものも、その可動範囲は人間と比べて非常に小さかった。さらに、ソフトフレーム間は基本的に糸で縫いつけてあるだけのため、着用者の関節には依然として負担がかかる構造となっていた。そこで、金属の関節を使用することにした。完全非金属化は最終目標であるが、動作が全て実現できることがまず重要であると考え、金属の関節を用いて上肢の全動作の実現を目指すことにした。

4.4 金属関節を有する新構造マッスルスーツの開発と上肢7動作の実現

4.4.1 新構造の概要

着用者の骨、及び関節への負担を無くすため、本研究では金属関節とそれにより接合される塩化ビニール製の筒状フレームにより新しいマッスルスーツを構成することにした。図8に、開発した新構造マッスルスーツの概略図を示す。この状態で 3kg であり、必ずしも軽いとは言えないが、着用できるレベルであると思われる。塩化ビニールは FRP に置き換え、軽量化を図る予定である。各部の詳細は、以下の節で述べる。なお、このプロトタイプは、身長 170cm、体重 60kg 程度の平均的な成人男性用である。

日常生活での使用を考えると、マッスルスーツの脱着は容易でなければならない。本研究では、図9のように、両手を挙げて簡単に脱着できるようにした。

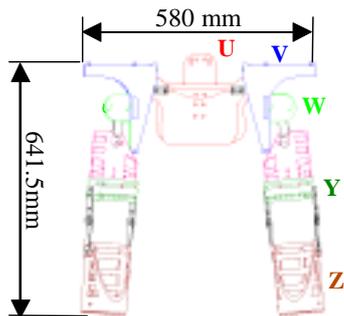


図8 金属関節を有する新構造マッスルスーツ

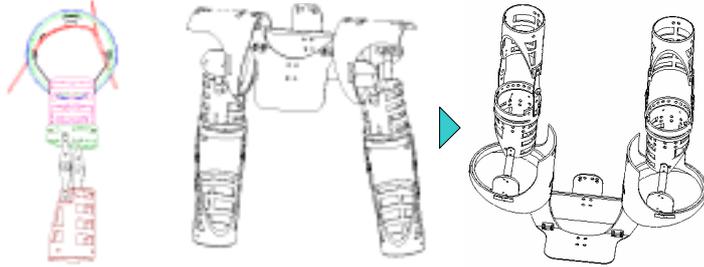


図9 脱着の方法

4.4.2 各部の詳細

図8に示すように、新構造マッスルスーツは6種類、12部品からなる。すなわち、U×1、V×2、W×2、X×2、Y×2、and Z×2、である。これらは、一部を除き基本的に塩化ビニール製であり、接続部、及び回転部のみ金属を使用している。それぞれの構造を順次説明する。

“U”は厚さ 3mm のジュラルミンでできている。これは試作が容易だったためであり、現在、RFPで制作中である。図10に示すように、前面が開くようになっている。これは、脱着を容易にするためである。また後頭部が盛り上がっているが、これは、アクチュエータ配置を容易にすると共に、腕を上引っ張り上げ易くするための工夫である。



図10 部位Uの構造

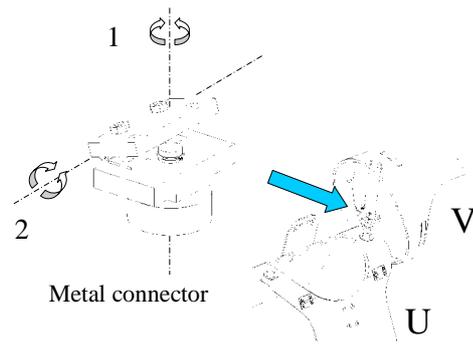


図12 部位VとUの接続方法

“V”と“W”は、図11に示すように、回転4を実現する軸と、それに続く2つの金属フレームが金属部分である。回転3は、“V”と“W”の接続部分に溝を掘り、滑らせて回転させることで実現する。図12に示すように、“U”と“V”は2自由度のコネクタにより接続し、回転1と2を実現する。肘曲げを行う回転6は、図13に示すように回転の1自由度を有する金属フレームを2つ用いて実現する。“Z”は、この金属フレームにより接続されている2つの塩化ビニール要素からなる。回転5は、回転3と同じように“W”と“Z”の接続部分に溝を掘り、滑らせて回転させることで実現する。

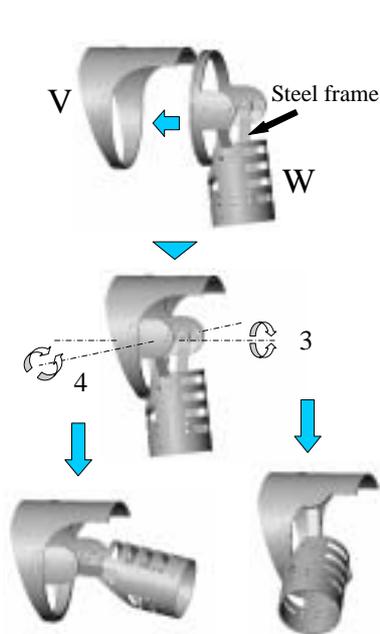


図11 部位VとWの構造

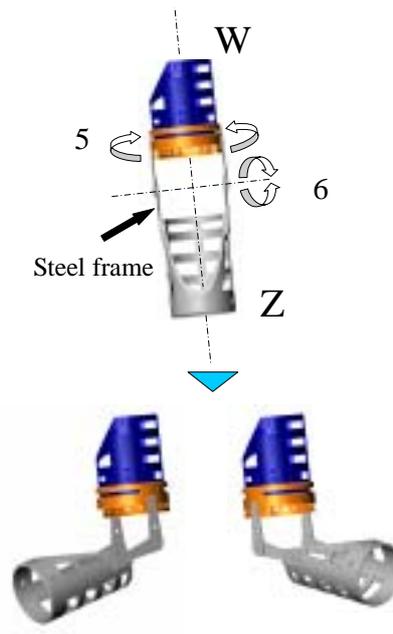
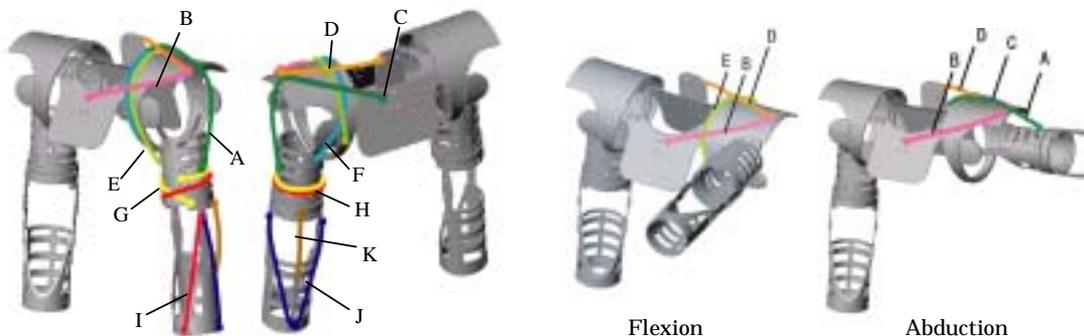


図13 部位WとZの構造

4.4.3 アクチュエータ配置

図14に McKibben 型人工筋の配置を示す。図に示すように、片腕で 11 本を使用している。この配置は、試行錯誤により経験的に決定したものである。上肢の 7 動作を実現するために使用するアクチュエータ番号を表1に、それぞれの長さを表2に示す。



- A: Abducting Brachial Armor
- B: Rotating Shoulder Armor 1
- C: Rotating Shoulder Armor 2
- D: Rotating Shoulder Armor 3
- E: Flexing Brachial Armor
- K: Extending Anconal Armor

- F: Extending Brachial Armor
- G: Inner Rotating Brachial Armor
- H: Outer Rotating Brachial Armor
- I: Flexing Anconal Armor 1
- J: Flexing Anconal Armor 2

図14 アクチュエータの配置と「肩の伸展」、「外転」の実現例

表1 各動作を実現するアクチュエータの組み合わせ

	Motion	Actuator
Shoulder Joint	Flexion	B, D, E
	Extension	C, D, F
	Abduction	A, B, C, D
	Adduction	B, D, E
	Inner rotation	G
	Outer rotation	H
Cubital Joint	Flexion	I, J

表2 各アクチュエータの長さ

Actuator	Length(mm)	Actuator	Length(mm)
A	460	G	320
B	320	H	320
C	320	I	200
D	210	J	200
E	560	K	350
F	600		



図15 上肢7動作の実現例

4.4.4 上肢7動作の実現

図15に、試作した新型マッスルスーツを実際に試着して実現した動作結果を示す。試着している被験者は、身長178cm、体重68kgの男子学生である。体格にもよるが、165cm～180cm程度の男性であれば、着用し、上肢7動作全てを実現できた。

5 自己評価:

マッスルスーツ着用により、上肢の全動作は実現できたものの、開発当初の目標であった、着用者が意のままに制御できるマッスルスーツの開発には至らなかった。これは、人間の上肢の筋

骨格構造が非常に複雑で、マッスルスーツの構造設計に思った以上に手間取ったからである。そのため、現在も引き続き、研究を推進している。一方で、学内の教員等と共同で、次に示す様々な新たな研究へと発展してゆく予定である。

- 上肢+腰用マッスルスーツの開発
- どこでも使えるアクティブ歩行器の開発
- ウェアラブル空調システムの開発
- 小型遠心圧縮機の開発の開発
- McKibben 人工筋肉の解析と開発
- 制御機器: 電空レギュレータの小型化

このように、開発が予定通りに進んだとは必ずしも言えないものの、マッスルスーツの要素技術、応用技術に関する新規研究へと発展していることは特筆すべきことである。「さきがけ」研究として、今後の展開、発展のための地盤固めができたものと考えている。また、7. に示すように、メディアなどを通じて学術関係だけでなく社会へ様々なアピールができたことも、大きな成果であると考えている。

6 研究総括の見解:

本研究では、「動けない人を動けるようにする」ことを目的に、(基本的に非金属の)「マッスルスーツ」の概念を提案した。

本研究で開発したウェアラブルロボット: マッスルスーツは、基本的には非金属で構成し、空気圧で駆動する人工筋を使用した軽量で実用的な筋力補助装置であり、国内外を問わず他に類をみない活気的な装置である。服のように着るだけで動作の補助が可能となり、着用者はある程度内部で動けるため、体格差や動作に伴う関節中心位置変化を吸収でき、さらに、上肢の全7動作(屈曲、伸転、外転、内転、外旋、内旋、肘曲げ)を着用により実現したことは著しい業績であり、高く評価できる。

マッスルスーツは、筋力の衰えた高齢者や身体障害者、リハビリテーション、肉体労働者の筋力補助や姿勢保持、スポーツにおけるフォーム矯正や筋力トレーニングなどに適用可能であり、関連する様々な新産業や新製品の創出が期待でき、産業・経済・社会に大きなインパクトを与えるものと考えられる。

7 主な論文等:

発表論文

1. Hiroshi Kobayashi, Taisuke Matushita, Yusuke Ishida And Kohki Kikuchi "New Robot Technology Concept Applicable to Human Physical Support - The Concept and Possibility of the Muscle Suit (Wearable Muscular Support Apparatus) - " Journal of Robotics and Mechatronics, vol.14 No.1, pp.46-53,(2002.2)
2. 小林宏: "着るロボット(Wearable robot)の有用性", 病院設備, vol.45 No.1(251号), pp.37-44, (2003-1)
3. 小林 宏: "柔らかいウェアラブルシステム: マッスルスーツの可能性 ", フルードパワーシステム, P112 ~ p116 (2003-09)
4. Hiroshi KOBAYASHI, Akitaka UCHIMURA, Yujiro ISHIDA, Taichi SHIIBA, Kazuaki HIRAMATSU, Makoto KONAMI, Taisuke MATSUSHITA, and Yutaka SATO: "Development of Muscle Suit for Upper Body - Realization of Abduction Motion - ", Advanced Robotics, vol.18 No.5, pp.497-513, (2004).
5. H.Kobayashi, Taichi Shiiban and Yujiro Ishida: "Realization of All 7 Motions for the Upper Limb by a Muscle Suit" Journal of Robotics and Mechatronics, vol.16 No.5, pp.504-512, (2004)

国際会議発表論文

1. H.Kobayashi, J.Aoki, H.Hosono, T.Matsushita, Y.Ishida, K.Kikuchi and M.Koseki: " Concept of Wear-type Muscular Support Apparatus (Muscle Suit)", Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.3236-3241, Washington,DC, (2002.5)
2. H.Kobayashi,and T.Shiiba: "Basic Study on Human Robot Interaction for Motion Support by Muscle Suit ", Proceedings of the 2002 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, pp.17-22, Berlin, Germany, Sept.25-27, (2002-09)
3. H.Kobayashi, Y.Ishida and T.Shiiba: "Human Robot Interaction via Wearable Robot ", Proceedings of the 2002 International Conference on Control, Automation and Systems, pp.534-539, Jeonbuk, Korea, Oct.16-19, 2002
4. H.Kobayashi : "Development on Wearable Robot for Human Power Support ", Proceedings of the 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Sevilla, Spain, Nov.5-8, 2002, SF007816
5. H. Kobayashi, A. Uchimura, and T. Shiiba: "Development on Muscle Suit - Realization of Abduction motion", Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003), pp.429-434, Kobe, Japan, July 23-24 (2003-07)
6. H. Kobayashi, A.Uchiumura ,and T. Shiiba: "Development of Muscle Suit for Upper Body", Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems Oct.27-31 Las Vegas, Nevada,U.S.A, pp.3624-3629,(2003-10)
7. H. Kobayashi, A.Uchiumura, and T. Shiiba: "Development of Muscle Suit for Upper Body - Realization of Abduction Motion", The Second International Conference on Computational Intelligence,Robotics and Autonomous Systems CIRAS 2003,PS01-1-03,Singapore, (2003-12)
8. H. Kobayashi,K. Hiramatsu:"Development of Muscle Suit for Upper Limb" The 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)Apr.27-May.2 The New Orleans,U.S.A, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.2480-2485,(2004-4)
9. H. Kobayashi, Y. Ishida, H. Suzuki:"Realization of All Motion for the Upper Limb by a Muscle Suit" RO-MAN 2004 13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication Sep.20-22 Kurasaki, Okayama, Japan, pp..631-pp..636,(2004-9)
10. H. Kobayashi: "Development of a Muscle Suit for Realizing All Motion of the Upper Limb" 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)Sep.28-Oct.2 Sendai, Japan, pp.1630-1635,(2004-10)

国内会議発表論文

1. 小林宏,石田 佑輔,松下 泰介,小関 光弘: "動けない人を動けるようにするマッスルスーツの開発 ", 電子情報通信学会技術研究報告 HCS2001-25, pp.55-61 (2001-08)
2. 小林 宏,石田 佑輔,松下 泰介,小関 光弘: "軽量安価なウェア型筋力補助スーツ(マッスルスーツ)の開発 ", 第6回「知能メカトロニクスワークショップ」, pp.59-64 (2001-08)
3. 小林,菊池,青木,細野,松下,石田,小関:"実用的で安価なウェア型筋力補助装置(マッスルスーツ)のコンセプトの実現可能性",第19回日本ロボット学会学術講演会 RSJ2001,2j 12,pp.163-164(2001-9)
4. 小林 宏,石田 祐輔,松下 泰介,小関 光弘: "筋力補助スーツ(マッスルスーツ)の開発",ヒューマンインタフェースシンポジウム2001論文集,pp.495-498, (2001-10)
5. 小林 宏,石田 佑輔,松下 泰介,小関 光弘:"人間行動を補助するマッスルスーツの開発", (社)計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 2001 講演論文集,pp.179-180(2001-12)
6. 石田,松下,小林: "マッスルスーツを用いたマスタースレーブシステムの開発", 日本機械学

- 会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02, 1P1-F07(2002-06)
7. 小林, 真鍋, 宮島: "空気圧アクチュエータを用いたマスタースレーブシステムの開発", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02, 1P1-H04, (2002-06)
 8. 石田, 内村, 椎葉, 小林: "マッスルスーツの開発 - マスタースレーブ式動作実験 - ", ヒューマンインタフェースシンポジウム 2002 対話発表, P515-517(2002-09)
 9. 小林, 内村, 椎葉, 石田: "マッスルスーツの開発 - マスタースレーブ式動作実験 - ", 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会, 1F33(2002-10)
 10. 室町, 内村, 小林: "人間行動を支援するマッスルスーツの開発(直立補助に関する検討)", 計測自動制御学会主催第 3 回システムインテグレーション部門講演会, 1A22-03(2002-12)
 11. 石田雄二郎, 椎葉太一, 内村明高, 小林宏, 佐藤裕, 平松万明, 小浪信, 松下泰介: "マッスルスーツの開発(外転動作の実現)", 日本ロボット学会第 21 回学術講演会, 2F24 (2003-09)
 12. 内村明高, 小林宏, 椎葉太一, 石田雄二郎, 佐藤裕, 平松万明, 小浪信, 松下泰介: "マッスルスーツによる上肢動作の実現", ヒューマンインタフェースシンポジウム 2003 論文集, pp. 511-514 (2003-10)
 13. 小林宏: "上半身用マッスルスーツの開発", 第 46 回自動制御連合講演会講演概要集, FP2 06-1, pp.82 (2003-11)
 14. 小林宏, 平松万明: "上肢動作を補助するマッスルスーツの開発", ジェロンテクノロジー研究フォーラム 2003 - 健康維持増進とジェロンテクノロジー -, (2003-12)
 15. 小林宏, 椎葉太一, 平松万明, 小浪信, 松下泰介, 佐藤裕: "McKibben 型人工筋アクチュエータの開発", (社)計測自動制御学会(SICE) 第 4 回 SICE システムインテグレーション部門講演会, 3H3-6, (2003-12)
 16. 小林宏, 石田雄二郎, 椎葉太一, 内村明高, 平松万明, 小波信, 松下泰介, 佐藤裕: "マッスルスーツによる上肢動作の実現と解析", 第 9 回ロボティクスシンポジア, pp. 254-259, (2004-3)
 17. 奥野 太嗣, 藤原 誠, 道免 和久, 小林 宏, 畠中 輝昭, 宮越 浩一, 玉置 由子, 後藤 健: "マッスルスーツの臨床応用のための予備的検討", 第 41 回日本リハビリテーション医学会学術集会 抄録集, VOL.41 SUPPL 2004, pp.S403(2004-6/5)
 18. 小林 宏, 真鍋 健太郎, 椎葉 太一: "空気圧アクチュエータを用いたマスタースレーブシステムの開発, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 2P1-L1-55(1)-(4), 2004.6.18-20
 19. 小林 宏, 椎葉 太一, 石田 雄二郎, 内村 明高, 佐藤 裕, 平松 万明, 小波 信, 松下 泰介: "マッスルスーツの開発(上肢7動作の実現), 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 2P2-H-58(1)-(3), 2004.6.18-20
 20. 鈴木 秀俊, 小林 宏: "マッスルスーツによる上肢全 7 動作の実現, 日本ロボット学会 第 22 回学術講演会'04 講演概要集, 3K11, p.205, 2004.9.15-17.

総説・解説

1. 小林宏: "[解説]ウェアラブルロボットの福祉機器への応用", 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.8, pp.805-808, (2002-11)

特許出願

1. 着用形姿勢調節装置(特願 2001-117697)

受賞

1. 優秀プレゼンテーション賞(ヒューマンインタフェースシンポジウム 2002, 平成 14 年 9 月 1 日 3 日)
2. BEST PAPER AWARD(2002 International Conference on Control, Automation and Systems,

平成 14 年 10 月 16 日 19 日)

新聞

1. Changing the paradigm (THE DAILY YOMIURI 2002 年 3 月 28 日 (木))
2. Inflatable muscle suits for elderly (BBC News 2002 年 5 月 23 日 (木))
3. 福祉ロボ研究最前線 - 動作を補助するスーツ - (日刊工業新聞 2002 年 10 月 23 日 (水))
4. ウェア型の筋肉補助装置 (化学工業日報 2002 年 11 月 18 日 (月))
5. 産学連携の現場 - シーズ開拓へ転換 (日経産業新聞 2003 年 3 月 3 日 (月))
6. 脱着しやすいパワードスーツ: 人工筋肉使い腕力補助 (日経産業新聞 2003 年 10 月 6 日 (月))
7. 21 世紀の気鋭 (日経産業新聞 2003 年 11 月 13 日 (木))
8. 愛知万博 来年 3 月開幕 ロボット・プロジェクト「マッスルスーツ」 (産経新聞 2004 年 9 月 30 日 (木))

雑誌

1. ROBODEX で見えてきたロボットデザインの重要性 (NIKKEI DESIGN 新年号 2001, 1 p.26-27)
2. ロボットの世紀 (エンジニア type 2001-2-1 p.125)
3. 「”アトム”はいつできる?」 (週間宝石 2001 1.25)
4. 感情表現, 筋肉補完, マッスルスーツ (HOT・DOG PRESS 2001 2/12 p.18, p.19, p.60)
5. 高齢者や障害者の行動をサポートするマッスルスーツ (ばんぶう 2001 3 pp.6-7) P.6, P.7
6. ロボットの正体を知る (Newtype.com 2001 May p.102)
7. ロボットの世紀: ロボットは「顔が命」 (エンジニア type 2001 7-1 pp.110-111) P.110 P.111
8. 本当にやってくるロボット時代 (Newton 2001 10 p.85)
9. 人に役立つシステムを研究しています (ROBODEX2002 OFFICIAL GUIDE BOOK p.36)
10. ロボットの世紀 - エピローグ/ROBODEX2002 リポート - (エンジニア type vol.6 p.48)
11. Tech Watch: Strength in Bubbles (TIME Europe Magazine 2002 6-3)
12. コミュニケーションロボット/人の動きをトレースするマスタースレーブシステム (ascii24.com 2002 6-23)
13. Walk tall with an airpowered suit - Power dressing - (NewScientist 2002 5-25 p.23) Top cover and Contents Article
14. 人生劇場「驚異のマッスルスーツ! ?」 (駿台予備校 ADVANCE 2002 年度 Vol.3 pp.32-37)
15. ODE AAN HET MUSCLE SUIT (De Ingenieur: the Dutch technology magazine, 21 March, 2003)
16. 役に立つロボットマッスルスーツ開発と研究室改革に燃える (ポジティブ 2003 年 4 月 1 日 (火)) P.4 P.5 P.6 P.7
17. 3 年以内に実用化できる収穫目前の研究 マッスルスーツ (日経バイオビジネス 6 月号 p.64, 2003)
18. 身障者に夢の補助具 (JST 基礎研究最前線 No.2 6 月号, 2003) P.14 P.15
19. 自力で動けない人も活動できるスーツ 上アブラブルロボット (日経トレンディ 9 月号 p.60, 2003)
20. DRAAGBAAR ROBOTPAK Muscle Suit (De Ingenieur p.30,31, 2003)
21. 今週のロボット: マッスルスーツの紹介 (週間アスキー 2004, 4/27 号 (4 月 13 日発行) p.13)
22. 「介護支援向けに空圧アクチュエータ駆動「マッスルスーツ」開発」 (2004 年 8 月 18 日「日経 B P 産学連携ビジネス (WEB のみ)」)
23. 技術&イノベーション: 人力補助ロボット (日経ビジネス 2004 年 09 月 13 日号 p.86)

テレビ

1. テレビ東京「ワールドビジネスニュース」でマッスルスーツが紹介 (2002 年 1 月 7 日 (月))
2. NHK「おはよう日本」でマッスルスーツが紹介 (2003 年 3 月 19 日 (水))
3. 韓国 SBS テレビ 顔ロボット SAYA と共に出演、マッスルスーツの紹介 (2003 年 8 月 3 日 (日))

4. NHK 教育テレビ「福祉ネットワーク」でマッスルスーツが紹介(2003年11月17日(月))
5. CNN 「Land of the rising robot」(2004年8月23日)
6. フジテレビ「めざましテレビ」で「マッスルスーツ」が紹介(2004年10月6日(水))

展示会

1. ROBODEX2002 パシフィコ横浜, 2002.3
2. ROBOTREX2002, 福岡ドーム, 2002.6
3. 人とロボットの未来, 千葉県立現代産業科学館, 2002.7
4. 国際新技術フェア 2002, 東京ビッグサイト, 2002.9
5. ロボット展, 日立シビックセンター科学館, 2003.3
6. 国際モダンホスピタルショウ 2003, 東京ビッグサイト(2003年7月16日(水) 18日(金))
7. 私のしごと館(京都府 精華・西木津地区)(2003年10月4日(日)-13日(月))
8. 第30回国際福祉機器展 H.C.R.2003, 東京ビッグサイト(2003年10月15日(水)-17日(金))
9. HOSPEX JAPAN 2003(第28回) 医療・福祉施設のための設備・機器総合展 (2003年11月11日(火)-14日(金))
10. 2003 国際ロボット展RT交流プラザ, 東京ビッグサイト(2003年11月19日(水)-22日(土))
11. TEPIA 第16回展示「ロボットと近未来ホーム～日本を元気にする新技術～」PART , TEPIA(機械産業記念館)1階(2004年4月7日(水)-7月23日(金))
12. 第41回日本リハビリテーション医学会学術集会「マッスルスーツ」の展示, 京王プラザホテル(新館), (2004年6月3日(木)-5日(土))
13. 国際モダンホスピタルショウ 2004, 東京ビッグサイト(2004年7月14日(水)-16日(金))
14. 「か・ら・だ博～みえる、わかる、家族の健康～」, 東京ビッグサイト(2004年8月3日(火)-8日(日))
15. イノベーション・ジャパン, 東京国際フォーラム(2004年9月28日(火)-30日(木))
16. 第31回国際福祉機器展 H.C.R.2004, 東京ビッグサイト(2004年10月13日(水)-15日(金))
17. 第38回東京モーターショー 働くくるま福祉車両 (2004年), 幕張幕張メッセ<日本コンベンションセンター> (2004年11月2日(火)-7日(日))

研究課題別評価

1 研究課題名: 人とロボットの共生と学習に関する研究

2 研究者氏名: 柴田崇徳

3 研究の狙い:

人と共存・共生するロボットは、作業を目的としない場合には、楽しみや安らぎなど精神的な効果を期待され、その価値を主に人の主観によって評価される。これまでに筆者は、心理実験の結果から人との身体的な触れ合いを重視し、人への精神的な効果を目的とする動物型のメンタルコミットロボットを研究開発した。これは、メカのロボットより高い主観評価を得、また、小児病棟や高齢者施設における約2ヶ月のロボット・セラピーを目的とする共生実験により、ロボットから人への心理的、生理的、社会的効果を確認した。

長期間の人とロボットの相互作用においては、ロボットには学習機能などによって行動の生成に変化がある。しかし、人の慣れや飽きなど、人の主観を考慮した学習方法は確立されてない。つまり、これらの要素が、人のロボットに対する主観評価に及ぼす影響が明らかではないため、ロボットの学習や成長の有効な手法が明らかではない。

本研究では、短期的な相互作用における主観評価実験や、長期間の相互作用の実験等により人の慣れと飽きについて研究し、さらにロボットの視覚、聴覚、触覚情報を統合して、飼い主(人)との関係に関する学習を行い、人に依存した価値に基づく学習を行うことにより、人がロボットに対して愛着を醸成し、長期間に渡り相互作用を継続させるための人とロボットの共生型学習法の研究開発を行う。そして、相互作用を通して、人にロボットに対する主観的価値を創造させる手法を確立する。

4 研究成果:

4.1. 人とロボットの短期的相互作用

4.1.1. 国内外における展示でのロボットに対する評価

人とロボットの相互作用において、短期間の場合に人がロボットに対して、どのように評価を行うのかについて研究を行った。

これまでに、日本国内において、パロを展示し、ロボットの機能やセラピーへの応用などの目的について説明した後、実際にパロにふれあっていただいた被験者に、アンケート形式で、パロに対する評価と被験者に関する情報を回答してもらった。

同様のアンケート内容を、海外では、現地の言語に訳し、一般の人々に回答しやすい形式とした。また、パロの説明に当たっては、現地の言語で説明員が行った。

02年には、英国・ロンドンの科学博物館、03年には、スウェーデン・ストックホルムの国立科学技術博物館、イタリア・ローマの日本文化会館、韓国・慶州市のロボット展示会、04年には、ブルネイ・国際交易見本市において、それぞれパロの展示、説明、アンケート調査を実施した。

それぞれの実験で、アンケート用紙に対象となる質問項目のすべてに回答があったものを有効とした。日本では641件、英国では320件、スウェーデンでは111件、イタリアでは76件、韓国では120件、ブルネイでは83件の有効な回答があった。



図1 アザラシ型ロボット・パロ



図2 ロンドン・科学博物館



図3 スウェーデン・国立科学技術博物館



図4 イタリア・ローマ



図5 韓国・慶州



図6 ブルネイ

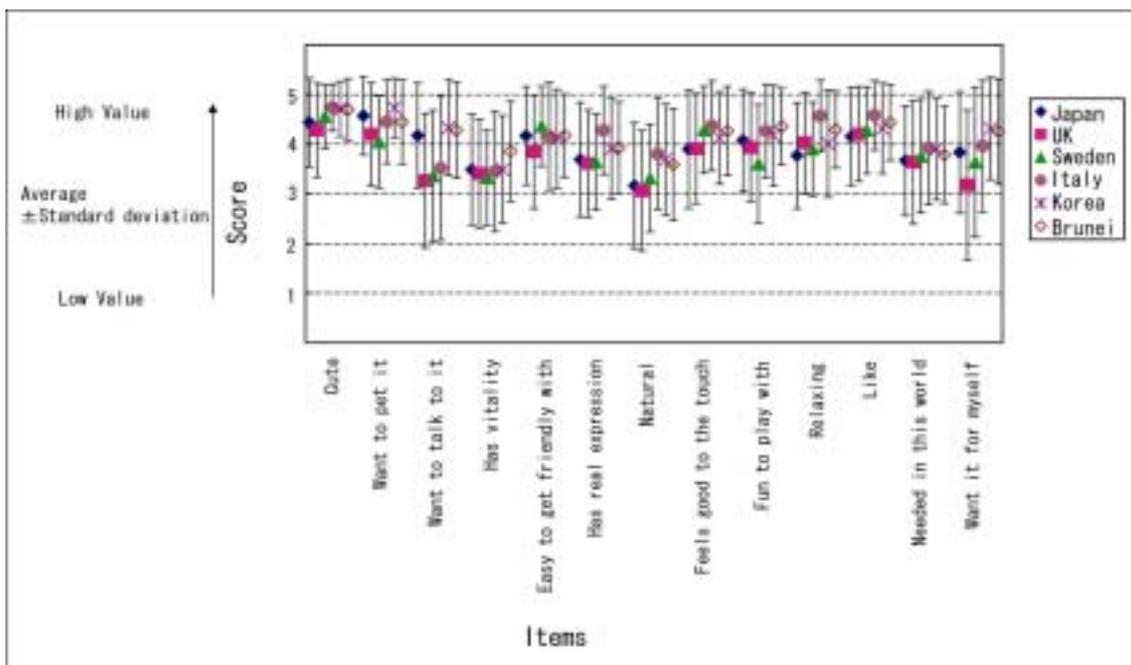


図7 6カ国でのパロに対する主観評価の結果とその比較

4.1.2. 評価結果の比較と分析

各国での結果をそれぞれ統計解析により分析した結果については、外部発表リストの論文等を参照していただきたい。

ここでは、6カ国における主観評価の比較とその分析結果について述べる。それぞれの国では、国籍、人種、文化、宗教が異なっている。しかし、パロに対する13個の質問の結果では、「話しかけたい」という項目以外は、概ね同じような回答が得られており、違いがほとんどない。これらにより、短期的な相互作用においては、パロはどの国においても、高い評価で受け入れられる可能性があることを示した。

ところで、「話しかけたい」の質問に対する評価結果の違いについて検討する。日本で実験を行ったときには、パロは日本語の音声認識機能があった。英国で行ったときには、日本語だけ認識できたため、英語の認識ができないことを説明した後、人々はパロと触れ合い、その後、主観評価を行った。同様に、スウェーデン、イタリア、韓国では、パロが日本語と英語の音声認識機能を有していたものの、それぞれの国の言語を認識できていなかった。韓国では、話しかけたい、の評価結果は高かったものの、スウェーデン、イタリアでは、低めの評価となった。

一方、ブルネイは、99%の国民が英語を話している。そのため、英語の音声認識機能があったことから、話しかけたい、の評価は高くなった。

これらの結果から、音声認識機能があると、パロとの相互作用の中で、話しかける、というコミュニケーションをとりたくなる、ということがいえる。そこで、例えば、スウェーデンでパロによる長期的相互作用を実施するには、スウェーデン語の音声認識機能をパロに実装することが、効果的であると考えられる。

4.2. 人とロボットの中長期的相互作用

4.2.1. デイサービスセンターにおける中期的相互作用

パロと高齢者の中期的相互作用について、デイサービスセンターにおいて6週間の相互作用を実施した結果を用いて解析した。被験者は、73歳から93歳までの26名の女性であった。6週間のうち、パロは最初の5週間ふれあってもらった。1週間あたりでの参加日数は人により異

なり、週に1日から3日の参加であった。1回のふれあいは、パロ1台に対して最大8名までで、20分間ふれあった。ふれあいの前後で、気分を評価するための POMS (Profile of Mood States, ポムス:緊張・抑うつ・怒り・活気・疲労・混乱の6つの因子を同時に測定するアンケート形式の評価方法)による主観評価を行った。6週間を通してデータを得られた人は、11名であった。また、ビデオでふれあいの様子を記録し、人とパロとの相互作用の時間的な変化について分析を行った。

図8は、POMS の結果から、パロとのふれあいの前後での11名の「活気」の平均値を示している。結果として、毎回「活気」が向上し、それが5週間持続した。

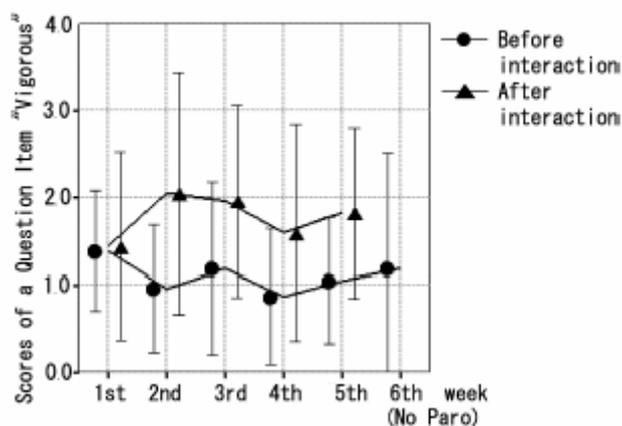


図8 POMS による「活気」に関する評価結果: 4が最大、0が最小

次に、ビデオで記録した人とパロとのふれあいの分析結果について述べる。人がパロに対して3秒間以上話しかけた場合、それを1回とカウントした。接触についても同様に、1回当たり3秒間以上、パロを触っている場合を1回とカウントした。

結果として、話し掛け回数、接触回数については、話し掛け回数が増える(減る)人は接触回数も増える(減る)傾向にあった。

分析結果について、接触時間/回数については、一人を除き増加した。そして一回あたりの接触時間が増えた。ただし、時間が減少した人の接触回数は増えた。これらの事から、比較的回数多く触れ合う人と、回数は少ないが一回あたりの触れ合い時間が長くなる人、という様に触れ合いの仕方に違い(個性)が見られた。

次に、主観評価の結果として得られた「活気」に関して、被験者の属性、話し掛け回数、接触回数などのデータとの関係に関して、重回帰分析 [複数の説明変数(独立変数)とある目的変数(従属変数)の間に式をあてはめ、目的変数の変動が説明変数の変動によってどの程度影響されるかを分析する手法]を行った。

まず、変数「接触時間/回数」について、「活気」の向上に関わる要素として、2週目に変数として採用されているが、5週目には採用されていない。しかし、実際の時間は増えている事から、最初、接触が新鮮な刺激で意識的なものであったが、時間と共に無意識のうちに成されるようになったと考えられる。

変数「ペット飼育経験」について、パロとのふれあいによる活気の向上には、ペット飼育経験のある人に、より効果的であった。時間と共にパロを通して飼育していたペットを思い出し、その思い出や話題などで活気が出たと考えられる。

変数「年齢」について、この実験では、たまたま、個性として活発で面白い人の年齢が高かったためと考えられる。逆に、比較的若い人の方がおとなしい性格であったり、症状が重かったり

した。

変数「話かけ」については、5週目に、たくさん話し掛けていた人の活気が、触れ合い後、減少したため、他の被験者では活気が増加しているにもかかわらず、ネガティブな傾向の結果となった(触れ合い前:4点、触れ合い後:2点)。この被験者は、話し掛け回数が、他の被験者の平均の約5倍と突出して多いため、解析結果が、この被験者によって引っ張られた。話し掛けすぎで疲れたとも考えられる。

これらの結果から、相互作用の仕方やその質について、時間の流れと共に変化が生じることを明らかにした。

表1 「活気」に関する重回帰分析結果

Explaining variable	Standard partial regression coefficient	Significance
2nd week		
Age	0.795	**
Time of touch divided by number of touch to Paro	0.42	*
R ² adjusted for degree of freedom	0.739	**
5th week		
Age	0.594	**
Experience of breeding pets	0.454	**
Number of speech to Paro	-0.621	**
R ² adjusted for degree of freedom	0.859	**

* p value < 0.05

** p value < 0.01

4.2.2. 介護老人保健施設における長期的相互作用

平成15年8月から1年間以上のパロとの長期的な相互作用の実験を介護老人保健施設「豊浦」にて実施している。

施設には約100名の高齢者がいるが、実験への参加について本人もしくは家族の同意を得た14名の女性を対象として、実験を実施した。実験開始時では、被験者は77歳から98歳であった。

この実験においては、介護老人保健施設の通常の活動の中に、パロとふれあう時間帯をとってもらったため、週に2回(水曜日と土曜日)に午後2時から3時までの1時間に実験を行った(図9)。また、介護者が1名または2名が、パロとのふれあいの中で、世話をを行った。



図9 パロを撫でたり、話しかけたり、抱っこしたり、キスをするなどのふれあい介護老人保健施設「豊浦」にて

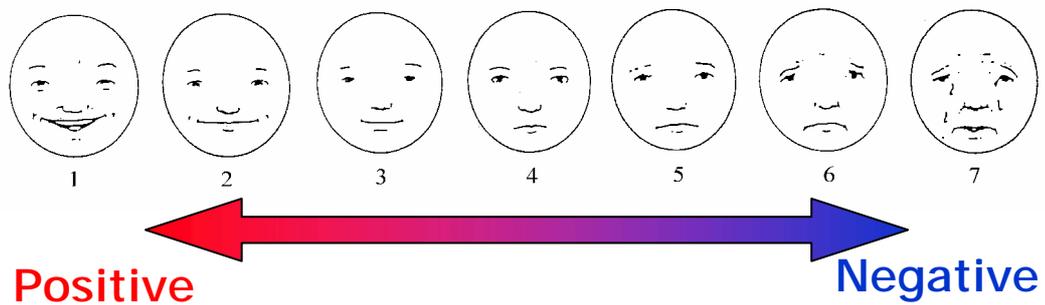


図10 7段階のフェイススケール

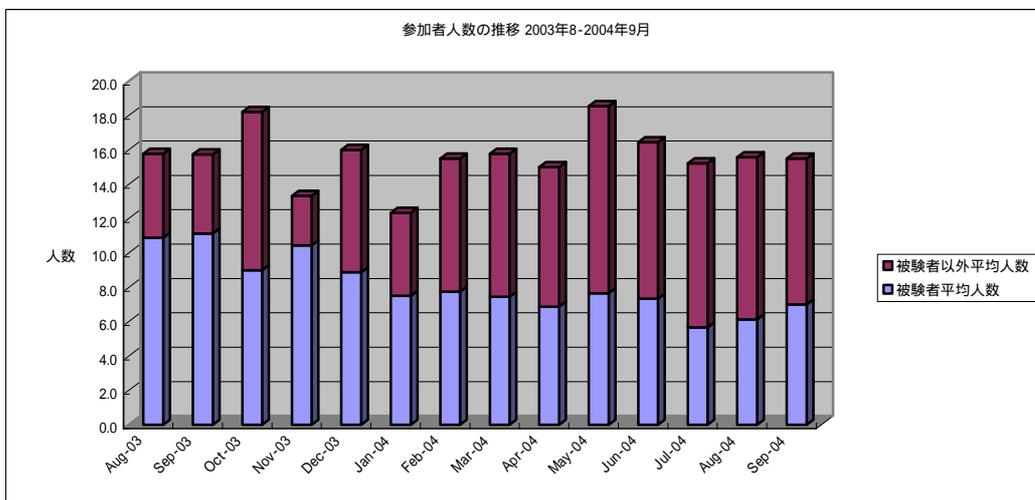
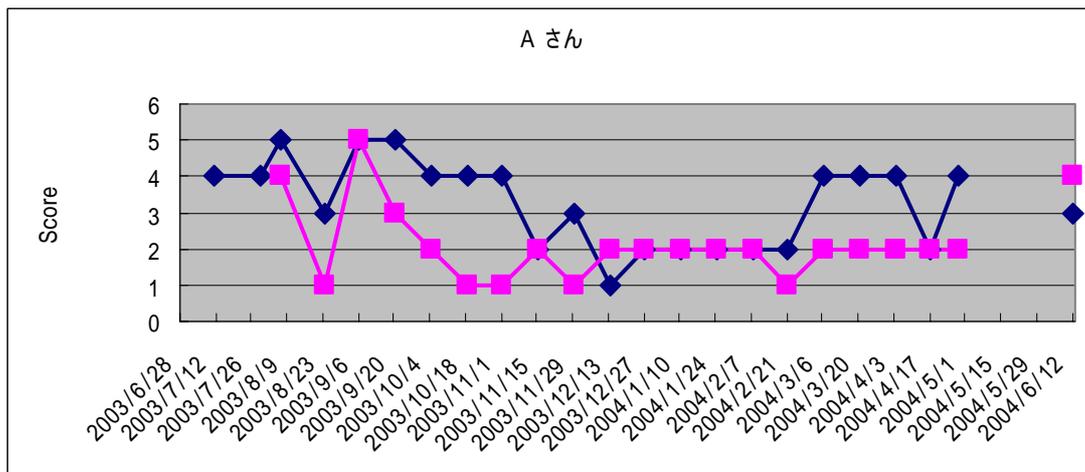
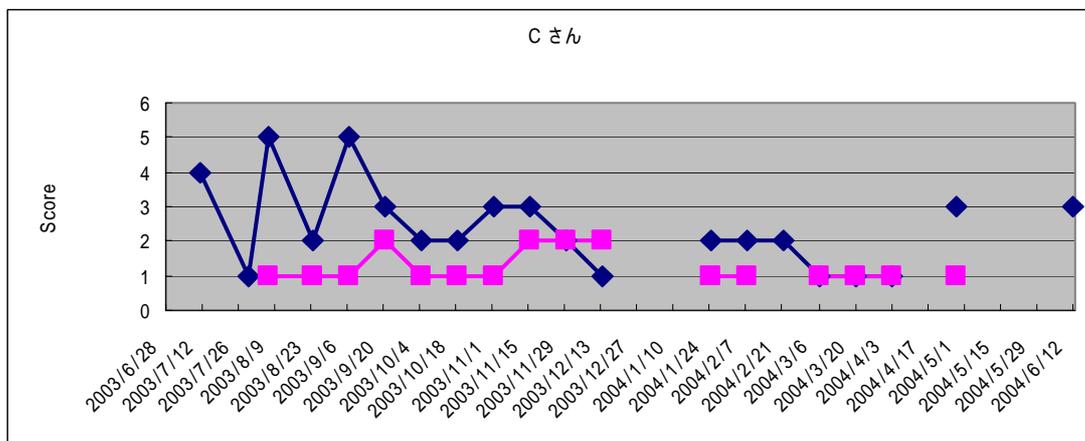


図11 実験参加者(被験者と被験者以外)の推移



(a) Aさん



(b) Cさん

図12 気分の推移:フェイススケール・スコア

紺はパロと触れ合う前、ピンクはパロと触れ合った後

評価の方法として、気分を表現するため、笑顔を1、泣き顔を7とした、図10の7段階のフェイススケールを用いた。また、「うつ」の状態を評価するため、15個の質問項目からなり、はい、または、いいえで回答する GDS(Geriatric Depression Scale)を用いた。これは、通常、高齢者が施設などに入居している場合、加齢や身体の動作の不自由などからうつに陥り易いと問題があることから、その評価を行った。GDSの得点が6点以上、15点以下は、「うつ」の状態にある。

パロとのふれあいにおいては、被験者以外の人で希望する人は、パロの時間に参加を認めた。これは、施設での自然なシーンの中でパロがどのように受け入れられていくかを評価するため、実験への参加を認めている被験者以外でも、パロとふれあってもらった。毎回の参加者数の推移を図11に示す。

被験者は、平成15年8月の実験開始時点では14名であったが、平成15年10月末までに1名が、パロに対する評価は高かったものの、他の被験者との人間関係が合わず、実験から離脱した。さらに、平成16年6月末の時点では、1名が死亡し、1名が施設を退所したため、実験から離脱し、結果として11名の被験者が実験に残っていた。

図11の結果では、毎回、15名ほどの参加者があるが、平成15年11月は他の行事(歌手の訪問など)と日程が重なったり、平成16年1月は風邪が流行したりしたため、参加者数は減少した。被験者については、平均としては、減少したものの、1年間を通して、飽きられずにパロとの

ふれあいが持続した。

図12に、フェイススケールの推移の結果について示す。個人差はあるものの、パロとのふれあいの前後で、気分が向上し、それが実験期間を通して持続している。途中で、データが無いのは、体調不良や入院などによって、パロとのふれあいを欠席したためである。

図13に、Cさんの場合のGDSの結果を示す。パロを導入する前は、「うつ」状態が続いていたが、パロとのふれあいによって、「うつ」の状態が改善された。また、その効果も持続した。

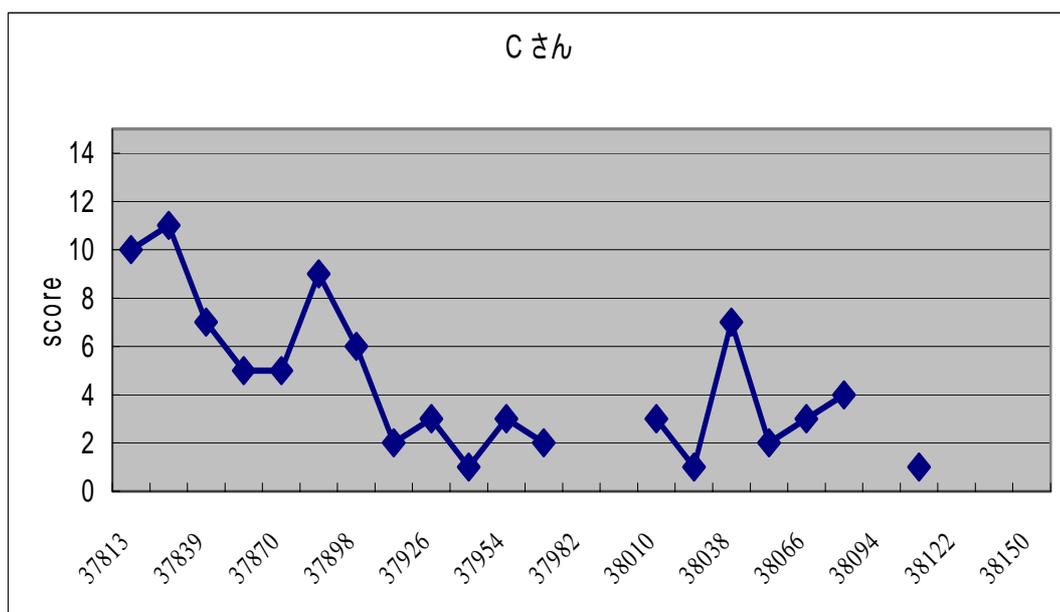


図13 Cさんの場合のGDSの結果:6点以上は「うつ」状態

5 自己評価:

人との相互作用により、楽しみや安らぎを提供するメンタルコミットロボットの研究開発を行った。相互作用を数分から数時間の短期、2ヶ月程度の中期、2ヶ月以上の長期に分類し、人とロボットの関係を時間的変化の観点から研究した。短期および中期の相互作用において、人のロボットに対する主観的な評価を高める要素を分析し、それらの機能を研究開発してロボットに実装した。これにより、短期的相互作用での主観評価を高め、また中長期間、相互作用を持続させた。3年間の研究成果としては、内容が濃い研究を実施できたと思う。

今後は、長期的な相互作用において、ロボットと相互作用する人に関する属性(例えば年齢、性別、好み、生活環境、病状、宗教など)と、ロボットから人に与える効果の目的に応じて、ロボットに与えるべき機能を明らかにする。また現状で実現されていない機能は、新たに研究開発し、ロボットへの実装を目指し、持続的相互作用が可能なロボットを研究開発し、特に国際的にロボット・セラピーで役立てたい。

6 研究総括の見解:

本研究では、短期的な相互作用における主観評価実験や、長期間の相互作用の実験等により人の慣れと飽きについて研究し、相互作用を継続させるための人とロボットの共生型学習法の研究開発を行う。犬や猫のようにあまり身近ではないため、かえって違和感なく人から受け入れられやすいアザラシ型のロボット「パロ」を研究開発した。このロボットを「ロボット・セラピー」に応用し、デイサービスセンター、介護老人保健施設、特別養護老人ホームなどの高齢者向け福祉施設や、病院の小児病棟などにおいて実験を行うことにより、ロボット・セラピーの効果を科学的データによ

って検証したことは大きな成果であり、高く評価できる。

今後は、長期的な相互作用において、ロボットと相互作用する人に関する属性(例えば年齢、性別、好み、生活環境、病状、宗教など)と、ロボットから人に与える効果の目的に応じて、ロボットに与えるべき機能を明らかにし、ロボットへの実装を目指すことにより、国際的にロボット・セラピーで役立てられることが期待できる。

7 主な論文等:

発表論文:

1. Takanori Shibata, Teruaki Mitsui, Kazuyoshi Wada, and Kazuo Tanie, Subjective Evaluation of Seal Robot: Paro Tabulation and Analysis of Questionnaire Results -, Journal of Robotics and Mechatronics Vol.14, No.1, pp.13-19, 2002.
2. Teruaki Mitsui, Takanori Shibata, Kazuyoshi Wada, and Kazuo Tanie, Psychophysiological Effects by Interaction with Mental Commit Robot, Journal of Robotics and Mechatronics Vol.14, No.1, pp.20-26, 2002.
3. Kazuyoshi Wada, Takanori Shibata, Tomoko Saito, and Kazuo Tanie, Psychological and Social Effects of Robot-assisted Activity in the Elderly Robot-assisted at Health Service Facilities, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.7, No.2, pp.130-138, 2003.
4. Kazuyoshi Wada, Takanori Shibata, Tomoko Saito, and Kazuo Tanie, Effects of Robot Assisted Activity for Elderly People and Nurses at a Day Service Center, Proc. of the IEEE, Vol.92, No.11, pp.1780-1788, 2004.
5. T. Shibata, An Overview of Human Interactive Robot for Psychological Enrichment, Proc. of the IEEE, Vol.92, No.11, pp.1749-1758, 2004
6. P. Marti, T. Shibata, F. Fano, V. Palma, A. Pollini, a. Rullo, Agentivity in Social Interaction with Robots, the Journal of Interaction Studies: social behaviour and communication in biological and artificial systems, 2004 (submitted)

国際会議発表論文:

1. Kazuyoshi Wada, Takanori Shibata, Tomoko Saito, and Kazuo Tanie, Robot Assisted Activity for Elderly People and Nurses at a Day Service Center, Proc. of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1416-1421, 2002.
2. Kazuyoshi Wada, Takanori Shibata, Tomoko Saito, and Kazuo Tanie, Psychological and Social Effects to Elderly People by Robot Assisted Activity at a Health Services Facility for the Aged, Proc. of Joint 1st International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 3rd International Symposium on Advanced Intelligent Systems, paper number 23Q1-3, in CD-ROM Proc., 2002.
3. Kazuyoshi Wada, Takanori Shibata, Tomoko Saito, and Kazuo Tanie, Analysis of Factors that Bring Mental Effects to Elderly People in Robot Assisted Activity, Proc. of the 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1152-1157, 2002.
4. Takanori Shibata, Kazuyoshi Wada, and Kazuo Tanie, Tabulation and Analysis of Questionnaire Results of Subjective Evaluation of Seal Robot at Science Museum in London, Proc. of the 2002 IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication, pp.23-28, 2002.
5. Kazuyoshi Wada, Takanori Shibata, Tomoko Saito, and Kazuo Tanie, Relationship between Familiarity with Mental Commit Robot and Psychological Effects to Elderly People by Robot Assisted Activity, Proc. of 2003 IEEE Int. Symp. on Computational Intelligence in Robotics and Automation, pp.113-118, 2003.

6. Kazuyoshi Wada, Takanori Shibata, Tomoko Saito, and Kazuo Tanie, Psychological, Physiological and Social Effects to Elderly People by Robot Assisted Activity at a Health Service Facility for the Aged, Proc. of the 2003 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.272-277, 2003.
7. Kazuyoshi Wada, Takanori, Shibata, Tomoko Saito, and Kazuo Tanie, Psychological and Social Effects to Elderly People who Stay at a Health Service Facility for the Aged, Proc. of the 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3996-4001, 2003.
8. Takanori Shibata, Kazuyoshi Wada, and Kazuo Tanie, Statistical Analysis and Comparison of Questionnaire Results of Subjective Evaluations of Seal Robot in Japan and U.K. Proc. of the 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3152-3157, 2003.
9. Kazuyoshi Wada, Takanori Shibata, Tomoko Saito, and Kazuo Tanie, Effects of Robot Assisted Activity to Elderly People who Stay at a Health Service Facility for the Aged, Proc. of the 2003 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2847-2852, 2003.
10. Takanori Shibata, Kazuyoshi Wada, and Kazuo Tanie, Subjective Evaluation of Seal Robot at the National Museum of Science and Technology in Stockholm, Proc. of the 2003 IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2003.
11. Takanori Shibata, Kazuyoshi Wada, and Kazuo Tanie, Tabulation and Analysis of Questionnaire Results of Subjective Evaluation of Seal Robot in Japan, U.K., Sweden and Italy, Proc. of the 2004 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1387-1392, 2004.
12. Kazuyoshi Wada, Takanori Shibata, Tomoko Saito, and Kazuo Tanie, Long-Term Experiment of Robot Assisted Activity to Elderly People who stay at a Health Service Facility for the Aged, Proc. of Int. Workshop on Fuzzy Systems & Innovational Computing 2004, pp.259-264, 2004.
13. Takanori Shibata, Kazuyoshi Wada, and Kazuo Tanie, Subjective Evaluation of Seal Robot in Brunei, Proc. of the 2004 IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication, paper number 135, 2004.
14. Kazuyoshi Wada, Takanori Shibata, Tomoko Saito, and Kazuo Tanie, Psychological Effects and Change of Familiarity with Robots in Long-term Experiment of Robot Assisted Activity, Proc. of Joint 2nd International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 5th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, paper number FP-4-1, 2004.
15. Kazuyoshi Wada, Takanori Shibata, Tomoko Saito, and Kazuo Tanie, Psychological and Social Effects in Long-Term Experiment of Robot Assisted Activity to Elderly People at a Health Service Facility of the Aged, Proc. of the 2003 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3068-3073, 2004.
16. Takanori Shibata, Kazuyoshi Wada, Kazuo Tanie, Wan Kyun Chung, and Youngil Youm, Subjective Evaluation of Seal Robot in Gyeongju, Korea, Proc. of the 30th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, #WC5-1, 2004.
17. Kazuyoshi Wada, Takanori Shibata, Tomoko Saito, Kayoko Sakamoto, and Kazuo Tanie, Long-term Robot Assisted Activity to Elderly People at a Health Service Facility for the Aged, AI Robotics and Control, The Proceedings of the 4th International Conference on Human and Artificial Intelligence Systems (the book title is tentative) (accepted)
18. Tomoko Saito, Takanori Shibata, Kazuyoshi Wada, and Kazuo Tanie, Examination of Change of Stress Reaction by Urinary Tests of Elderly before and after Introduction of Mental Commit Robot to an Elderly Institution, Proc. of the 7th Int. Symp. on Artificial Life and Robotics, pp.316-319, 2002.
19. Kazuyoshi Wada, Takanori Shibata, Tomoko Saito, and Kazuo Tanie, Robot Assisted Activity at a Health Service Facility for the Aged, Proc. of the 8th Int. Symp. on Artificial Life and Robotics,

- pp.301-304, 2003.
20. Takanori Shibata, Kazuyoshi Wada, and Kazuo Tanie, Questionnaire Results of Subjective Evaluation of Seal Robot at the National Museum of Science and Technology in Stockholm, Sweden, Proc. of the 4th Int. Symp. on Advanced Intelligent Systems, pp.16-19, 2003.
 21. Takanori Shibata, Kazuyoshi Wada, and Kazuo Tanie, Subjective Evaluation of Seal Robot at the Japan Cultural Institute in Rome, Proc. of Int. Conf. on Control, Automation, and Systems, pp.651-656, 2003.
 22. Takanori Shibata, Kazuyoshi Wada, and Kazuo Tanie, Questionnaire Results of Subjective Evaluation of Seal Robot at the Japan Cultural Institute in Rome, Italy, Proc. of the 9th Int. Symp. on Artificial Life and Robotics, pp.103-106, 2004
 23. Takanori Shibata, Ubiquitous Surface Tactile Sensor, Proc. of the IEEE TExCRA 2004, 2004

国内会議発表論文:

1. 柴田崇徳, 和田一義, 谷江和雄, スウェーデンにおけるアザラシ型メンタルコミットロボットの主観評価, 第 19 回「ファジィ システム シンポジウム」講演論文集, pp.609-610, 2003.
2. 柴田崇徳, 和田一義, 谷江和雄, アザラシ型ロボット「パロ」に対する主観評価結果の国際比較, 第 4 回システムインテグレーション部門学術講演会講演論文集, pp.540-541, 2003.
3. Kazuyoshi Wada, Takanori Shibata, Tomoko Saito, and Kazuo Tanie, Effects of Three Months Robot Assisted Activity to Depression of Elderly People who stay at a Health Service Facility for the Aged, Proc. of SICE Annual Conf. 2004, pp.2709-2714, 2004

著書:複数

総説、解説:

1. 柴田崇徳, 人とロボットの身体的相互作用による感情的行動の発現, 日本鉄鋼協会, ふいらむ, Vol.6, No.9, pp.40-49, 2001.
2. 柴田崇徳, 人道的対人地雷探知・除去ロボティクスの動向と展望, 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 6, pp. 689-695, 2001
3. 柴田崇徳, メンタルコミットロボットによるセラピーと高齢者に対する介助活動, 病院設備, Vol.44, No.2, pp.146-148, 2002
4. 柴田崇徳, 人の心を豊かにするメンタルコミットロボットとロボット・セラピー, ロボット, No.147, pp.9-15, 2002
5. 柴田崇徳, 人はロボットに癒されるか - アザラシ型ロボット「パロ」の開発と評価, 人間生活工学, Vol.3, No.4, pp.16-20, 2002
6. 柴田崇徳, 癒しとコミュニケーションのためのロボット, リハビリテーション・エンジニアリング, Vol.17, No.4, pp.19-24, 2002
7. 柴田崇徳, ロボットと癒し, 映像情報メディア学会誌, Vol.57, No.1, pp.38-42, 2003
8. 柴田崇徳, 人の心を癒すメンタルコミットロボット・パロ, 病院設備, Vol.45, No.1, pp.51-56, 2003

特許など出願:16件

その他(受賞等):

1. Excellent Presentation Award, Joint 1st Int'l. Conf. on Soft Computing and Intelligent Systems and 3rd Intl. Symp. on Advanced Intelligent Systems, October 21-25, 2002
2. Exhibition Award, Joint 1st Int'l. Conf. on Soft Computing and Intelligent Systems and 3rd Intl. Symp. on Advanced Intelligent Systems, October 21-25, 2002

3. Good Design Award 2002, October 30, 2002
4. AROB Achievement Award, the 8th Int'l Symp. on Artificial Life and Robotics, January 24-26, 2003
5. Robot Exhibition Award、スウェーデン国立科学技術博物館
6. 人間力大賞、日本青年会議所主催、「人間力大賞」
7. TOYP会長特別賞、同上
8. 人間力大賞グランプリ、同上
9. 内閣総理大臣奨励賞、同上
10. Best of COMDEX Finalist、COMDEX
11. Interactive Robot、韓国 Intelligent Robot Contest
12. 感謝状、富山県・富山市から観光振興に対して
13. Best of Technical Exhibition, IEEE TExCRA 2004
14. The Outstanding Young Person of the World, 59th Junior Chamber International World Congress

研究課題別評価

1 研究課題名: 弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの開発

2 研究者氏名: 高崎正也

3 研究の狙い:

手でものに触れたときの感覚は生理学的に力感覚と皮膚感覚に大別される。力感覚とは、重さ・抵抗感、大まかな形状を受容する感覚であり、筋肉による作用の結果により知覚している。一方、皮膚感覚とは固体表面の粗さ、摩擦、微細模様などを受容する感覚であり、皮膚組織内の機械受容器細胞(神経細胞)により知覚している。力感覚を提示するデバイスの開発は広く進められており、製品化の例も見られる。しかし、皮膚感覚を提示するデバイスの開発研究は複数の研究者によって行われているが、未だ決定的なデバイスの出現には至っていない。本研究では、超音波振動の一種である弾性表面波の機械振動を利用した皮膚感覚提示方法を提案し、その原理に基づいて皮膚感覚ディスプレイを試作した。本研究では、弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの開発とそれを用いた皮膚感覚の提示を目的としている。また、皮膚感覚ディスプレイのコンピュータインターフェースへの応用に関しても併せて検討を行った。

4 研究成果:

4.1 弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの製作

固体表面を指でなぞると、表面の凹凸や模様に応じて皮膚表面に振動が発生する。その振動が皮膚組織内部の神経細胞で受容され、なぞり動作とともに脳の中で処理された結果皮膚感覚として受容していると考えられている。よって、皮膚感覚を再現するには、なぞり動作に応じた振動を発生して皮膚に供給することが有効である。本研究では、弾性表面波を用いた皮膚感覚提示原理を2種類提案した。一方は弾性表面波の進行波を用いるタイプであり、他方は定在波を用いるタイプである。前者は弾性表面波アクチュエータを応用したものであり、指に接触したディスプレイから振動を出力し皮膚感覚を提示する。このタイプではディスプレイと指との相対運動は必要なく、Passive Typeと呼んでいる。後者は弾性表面波の励振による振動子表面の摩擦の制御を応用している。周期的な摩擦の変化を受容するためにはなぞり動作が必要であることから、Active Typeと呼んでいる。

Active Type を PC マウスに取り付けて使用できるようにしたものを Fig. 1 に示す。アプリケー