

## テクニカルノート

# 微生物との実世界インタラクションシステムの提案と 初期検討

尾川 順子<sup>†1,†2,\*1</sup> 菊田 恭平<sup>†1</sup> 奥 寛雅<sup>†1</sup>  
長谷川 健史<sup>†1</sup> アルバロ カシネリ<sup>†1</sup>  
石川 正俊<sup>†1</sup>

スケールの壁を取り払い、マイクロ世界とマクロ世界をつなぐ新しいインタフェースの一例として、微生物との実世界インタラクションを等価的に体験できるシステムを提案する。微生物の状態は実世界のアバタロボットに投影され、ユーザはアバタロボットを介して微生物とインタラクションを行う。本稿では微生物と人間とのインタラクションの物理的実現可能性について、簡単なシステムを試作して初期検討を行う。

## Proposal for Real-world-oriented Interaction System with Microorganisms and Its Preliminary Study

NAOKO OGAWA,<sup>†1,†2,\*1</sup> KYOHEI KIKUTA,<sup>†1</sup>  
HIROMASA OKU,<sup>†1</sup> TAKESHI HASEGAWA,<sup>†1</sup>  
ALVARO CASSINELLI<sup>†1</sup> and MASATOSHI ISHIKAWA<sup>†1</sup>

We propose a novel system that enables us to interact with microorganisms in the real world. It is a kind of a new interface linking the macro- and micro-world over the scale. The status of the microorganism is projected onto the avatar robot in the real world, and the user interacts with microorganism through the robot. The experimental system demonstrates the feasibility of human-microorganism interaction.

†1 東京大学

The University of Tokyo

†2 日本学術振興会特別研究員 PD

Research Fellow PD of the Japan Society for the Promotion of Science

\*1 現在、宇宙航空研究開発機構

Presently with Japan Aerospace Exploration Agency

## 1. ま え が き

近年の計算機科学の発展は遠隔地や仮想空間内の相手との自在なインタラクションを可能にした。しかし、異なるスケールの世界にいる存在とのインタラクションはいまだに困難である。特にマイクロメートルオーダの世界（以下、マイクロ世界）とのインタフェースはいまだ顕微鏡をのぞき込むことが主流であり、ユーザビリティは著しく低い。マイクロ・ナノ操作のためのインタフェース<sup>1),2)</sup>も近年さかんに研究されているが、存在感やインタラクションの自然な伝達には十分に至っていない。

そこで著者らはこのスケールの壁を取り払い、マイクロ世界とマクロ世界をつなぐ新しいインタフェースの必要性を提起したい。本稿ではその一例として微生物との物理的な触れ合いを等価的に体験できるインタラクションシステムを提案し、微生物と人間とのインタラクションの実現可能性について、簡単なシステムを実装し初期検討を行う。

本システムの特徴の1つはアバタロボットを介した実世界志向インタラクションである。アバタロボットは、微生物側から見れば人間と直接にコミュニケーションするための対人間インタフェースであり、人間側から見れば微生物の存在感や状態をリアルに伝達する実世界メディアといえる。ロボットは微生物の動きや状態を投影してまるで微生物が乗り移ったかのように動く。逆にユーザからのアクションはロボットに検知され、微生物に対して何らかの物理的な刺激が返る。こうしてある種のコミュニケーションが両者の間に成立し、ユーザはベットと触れ合うかのような感覚で微生物とインタラクションを行うことができる。本システムはマイクロ世界インタフェースの共通要素となる異なるスケール間の計測・制御やフィードバックループを有し、今後スケールの壁を超えたインタラクションを広く考えていく際の基盤となると考えられる。またアート・エンターテインメントや教育・学習への応用も期待される。

微生物とのインタラクションに仮想空間ではなくアバタロボットを介することの意義に関する議論は、数多くの実世界インタラクションやロボットメディア研究に共通する主題である。微生物のCGを大画面や没入型ディスプレイで提示すれば、一緒に泳いでいるような高い臨場感が得られるはずであるし、実世界への微生物像重畳なども技術的には実現可能である。しかしヒューマノイドロボットを実世界アバタとして用いる多くの研究が指摘しているように<sup>3)-7)</sup>、実体を持ったロボットは相手の存在感をより強力に伝達し、直感的で豊かなインタラクションの重要な基盤となる。これまで顕微鏡を通してしか知覚できなかった微生物がそこにいるかのような強い存在感・臨場感は、実ロボットならではのものである。さら

に日常空間をロボットと共有し、触れる・近づくなどの身体性の強い働きかけや、逆に微生物の運動が日常空間に対して物理的に及ぼす影響を通じて、微生物に対する親しみをより深められると著者らは考える。なおアバタロボットを用いることで視覚的リアリティは犠牲となるが、本稿の段階では「微生物によってロボットが動き、ロボットへの働きかけが微生物に戻る」というインタラクションの物理的成立可能性の検討を目標とし、アバタの視覚デザインについては本稿の考察の対象としない。

## 2. 関連研究

人間以外の生物とのインタラクションとしては、たとえば仮想空間を介して遠隔地のハムスターと遊ぶシステムや<sup>8)</sup>、ロボットを介してニワトリと触れ合うシステム<sup>9)</sup>などが提案されている。しかしこれらは職場などから遠隔地にいる自分のペットと触れ合うことを目的としており、距離の壁さえなければこのシステムを使わなくても物理的に触れ合うことは可能である。一方、本研究は距離の壁よりむしろスケールの壁を解消するものであり、微生物との触れ合いという本来不可能なインタラクションを創出する点が異なる。

微生物や昆虫の動きを実世界に投影する試みとしては、ダンゴムシの動きから音楽を生成する作品<sup>10)</sup>やマジジノの動きを仮想的に表示する作品<sup>11)</sup>などがあるが、人間はただ鑑賞するのみの作品が多く、インタラクティブ性は低い。微生物の遊泳運動を制御して様々なタスクを行わせる事例もあるが<sup>12)</sup>、本研究の目的はロボットを用いて微生物を制御することではなく、むしろ微生物がロボットを動かして人間とコミュニケーションするというものである。

的場による Micro Friendship<sup>13)</sup> は、昆虫の住む世界と人間の世界を大画面上でシームレスにつなぎ、スケールを超えた一体感を作り出すという作品であり、本研究のコンセプトと共通する点も多い。しかしながら、昆虫が付着したロッドを回す様子を拡大画面で観察するというインタフェースは機構上は既存のマクロ操作システムとほぼ同等であり、一方的で限定された働きかけにとどまっている。人間側から昆虫側へのアクションは確かに直感的であるが、昆虫側から人間側への物理的なアクションは不可能であり、真のインタラクションとはいきれない。

## 3. 微生物インタラクションシステムの構成

### 3.1 概要

前述したコンセプトをふまえた微生物インタラクションシステムの概要を図1に示す。ユーザと微生物はロボットを介して互いにインタラクションを行う。微生物とロボットはマ

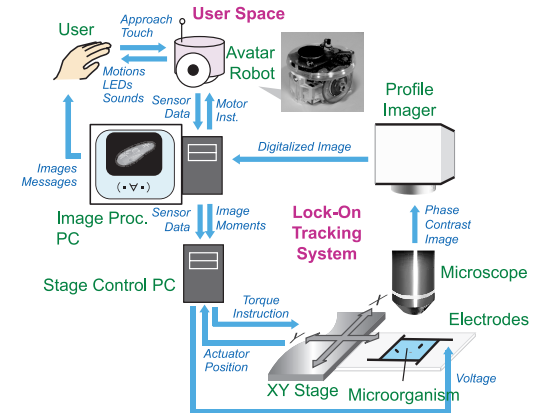


図1 システムの概要  
Fig.1 System configuration.

スタスレーブの関係にある。微生物の情報は顕微鏡に取り付けられたトラッキングシステムを用いてリアルタイムで取得され、ロボットが微生物の運動に応じた行動を起こす。逆にユーザからのアクションはロボット上のセンサによって検知され、電場刺激となって微生物に戻る。このようにしてフィードバックループが生成され、微生物とユーザとの間で一種のコミュニケーションが成立する。以下では各サブシステムを説明する。

### 3.2 微生物とスケール比設定

微生物には原生動物の一種であるゾウリムシ (*Paramecium caudatum*) 27aG3 株を用いた。ゾウリムシは体長約 200  $\mu\text{m}$  の楕円体形の単細胞生物で、繊毛により水中を遊泳する。また溶液中に電場をかけると陰極方向に泳ぐ性質（電気走性）がある<sup>14)</sup>。本システムではゾウリムシを 1 辺数 mm、厚さ 0.5 mm 程度の平面状の容器に封入し、2 次元平面内を自由に遊泳させるようにした。なお今回提案するシステムの基本的構成は微生物の種類に依存しない。そのため、異なる微生物を用いればまったく異質なインタラクションを創出しうる。

マイクロ世界の現象をマクロ世界に投影する際のスケール比は、今回は数百倍程度を想定した。微生物の大きさが数百  $\mu\text{m}$  オーダ、容器が mm オーダであることから、マクロ世界ではそれぞれ数 cm オーダ、数十 cm オーダ程度となり、ちょうど小型のペットと触れ合っているような規模のインタラクションとなる。

### 3.3 マイクロ世界からマクロ世界への働きかけ

#### 3.3.1 微生物の情報の取得

微生物の存在をマクロ世界に提示するには、まず微生物の位置や速度をリアルタイムで継続的に計測する必要がある。計測時に微生物に影響が及ばない非侵襲、非接触な手段が望ましく、視覚的計測は情報の質、実装しやすさの両面において有力な手段である。本研究ではカメラを顕微鏡に設置し、画像処理によって微生物の情報を取得する。

微生物の捕捉・計測には Lock-on トラッキングを導入した<sup>12),15)</sup>。これは XY ステージ上の試料の位置を動かして微生物自身の動きをキャンセルしつつ対象を視野中心で捕捉・計測し続ける技術で、高速で遊泳する微生物の情報を安定して取得できる。本研究では、高速 CMOS イメージャ Profile Imager (浜松ホトニクス) を正立顕微鏡 (BX50WI, オリンパス) 上にマウントし、PC 上の画像処理により 1 kHz で対象の位置と速度、向きを取得した<sup>16)</sup>。これらの情報はアバタロボットに送られるほか、XY ステージ (CSZ-080-01, Hephaist) 上の微生物の運動のキャンセルにも使われる。なお今回は深さ方向の移動は計測していないが、3 次元トラッキングシステム<sup>17)</sup> を導入することで将来的に対応可能である。

#### 3.3.2 アバタロボットの制御

トラッキングシステムが取得した微生物の位置・速度はアバタロボットに伝えられる。2 次元平面上のゾウリムシの運動は 2 輪車の並進・回転運動で近似できるため<sup>18)</sup>、本研究では EPFL が開発した教育用小型 2 輪ロボット e-puck<sup>\*1</sup> をアバタとして用いることとした。直径 70 mm と小型であり動きも俊敏であること、ロボットのアニメーション (生物らしさ) の評価に使用され高いアニメーションを表出していること<sup>19)</sup>、通信やセンサなどが充実していることから、本実証実験に適していると判断した。なお e-puck はあくまでインタラクション成立確認のためのプロトタイプであり、本研究の最終形態を示すものではない。

人間とロボットのインタラクションの時間的粒度はほぼ秒オーダーであることから、トラッキングシステムが 1 kHz で取得したデータをさらに 2.5 Hz でサンプリングしてロボット制御に用いた。絶対位置は指示せず、速度と向きのみをロボットに指示している。簡単のため微生物の向きは 8 方向に量子化してロボットへの指令とし、また微生物の速度に応じてロボットの速度が調整されるようにした。

今回ロボットには内界センサやデッドレコニング機能を実装しておらず、自己位置同定ができないことから、時間経過につれてマイクロ世界とマクロ世界との誤差が蓄積してい

く、本稿の段階では軌道の再現の厳密性や特定のロボットの設計指針よりも時系列的なインタラクション成立の可能性を重視することとし、誤差については扱わないが、今後リアリティを高めていくうえでは検討すべき課題である。

#### 3.4 マクロ世界からマイクロ世界への働きかけ

上述したマイクロ世界からマクロ世界への働きかけと比較して、逆方向の働きかけは実装がきわめて難しい。マイクロ世界の計測手法が顕微鏡によってすでに確立されているのに対し、マイクロ世界の制御手法にまだまだ決定的なものがないためである。そこで簡単のため、本フェーズではマクロ世界とマイクロ世界の間で必ずしも物理的にメタファを共有しないものとし、マクロ世界からの働きかけを実装が容易な形式に変換してマイクロ世界に渡すこととする。アクションの中身ではなくタイミングを重視し、ユーザの働きかけと微生物の反応に何らかの因果関係が認められればある種のコミュニケーションが成立したと見なす。以下、各フェーズを説明する。

##### 3.4.1 ユーザからのアクションの取得

ユーザからのアクションはロボット上のセンサにより取得する。上記の方針によりどのような種類のアクションを検知するかは実装依存であり、設計の自由度は比較的高い。今回はペット感覚の親しみやすさという観点から、e-puck 上の接触センサを利用した。

##### 3.4.2 微生物への刺激提示

微生物への刺激提示方法としては、ユーザへのフィードバックが分かりやすくなるよう、微生物に何らかの動きを誘発するようなものが好ましい。外部刺激に対して微生物が定位置ながら移動する性質である「走性」は有用な候補の 1 つである。走性には電気走性、光走性、熱走性など様々な刺激に対するものがあり、生物種によって異なった挙動を示す。本研究では実装の簡単さから、ゾウリムシの持つ電気走性を利用して刺激提示を行う。

図 1 に示したように、容器の 4 辺に配置した炭素電極から 2 次元平面内に最大 5 V/cm の電場を発生させ、微生物に運動方向を指示する。電場パターンによって様々な運動を誘発できるが、今回は簡単のため最も単純な「ユーザの接触から逃げる」方向に電場を発生させる。微生物の状態や個体差などにより電場に対する反応は必ずしも一定ではなく、電場に反応しない場合や、逆方向に泳ぎ始める場合すらある。しかしこの気まぐれさは生物特有のゆらぎの反映であり、むしろユーザが微生物の生物らしさを意識するうえでプラスに働くものと思われる。

なお前述のようにロボットには自己位置同定機能がないため、たとえばユーザがロボットを持ち上げて他の場所に置いても、同様の移動が微生物に起こるような機能は実装されてい

\*1 <http://www.e-puck.org/>

ない。

### 3.5 擬人化演出機能

顕微鏡画像から得られる以上の情報を付随的に提示することで、より豊かなインタラクションを演出できるかどうか検討した。具体的には微生物を「擬人化」した情報を提示し、ロボットへの感情移入をより深めることを狙った。

微生物は弱ると動きが遅くなるため、微生物の単位時間あたりの移動距離から疑似的に「元気度」を押し量ることができる。この元気度を、e-puck 上の LED の点灯パターンによって表現した。またユーザとの接触時にロボットが音を鳴らして「驚き」を演出した。さらに、微生物の元気度や電場に対する反応パターンを 9 種類に分類し、それぞれに対して微生物の「気持ち」を割り当て、「気持ち」を表す顔文字とメッセージ（例として「(´ ˘ ˘) 今日平和だなあ」「(・\_・)ビックリしたよ！」など）をリアルタイムにユーザに提示した。簡単のため、提示は PC モニタ上にて行った。これらはあえて過剰な演出を行うことで微生物への親しみを増加させることを意図したものである。ただし人間が勝手にあてはめたものであり、インタラクションの方向性を限定してしまう危険性があるため、著者グループ内でも様々な意見が出た。今回は試験的に導入してユーザの反応から有効性を検討することとした。

## 4. 初期評価実験と考察

構築したシステムを用いて簡単な初期実験を行った。

### 4.1 微生物の運動の再現実験

アバタロボットによる微生物の運動の再現は、微生物インタラクションにとって最初に達成すべき目標である。本節ではユーザからのアクションを特に行わずに微生物に自由に遊泳させ、その動きをアバタロボットに体現させる実験を行った。その結果、ロボットが微生物と同様に動くのが観察され、数分間の連続稼働に成功した。微生物の軌跡とロボットの軌跡（0.2 秒おきに計測）の例を図 2 に示す。微生物の運動や方向転換などをロボットがよく再現できていることが分かり、マイクロ世界の微生物の運動をマクロ世界に物理的に投影する目処が立ったといえる。また螺旋運動や回転運動などもよく再現されることが確認された。

### 4.2 インタラクションループの成立検証実験

マクロ世界とマイクロ世界間のインタラクションループの成立を確認する実験を行った。例として、マクロ世界におけるアバタロボットへのアクションが微生物の動きを介して再びアバタロボットに戻ってくる過程を検証した。ロボットへのアクションは本来ユーザが

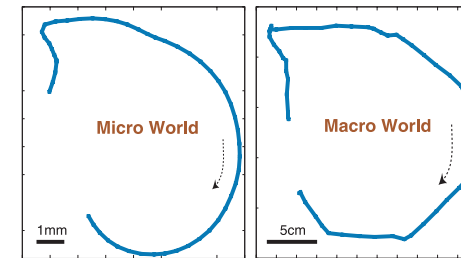


図 2 微生物の動き（左）とアバタロボットの動き（右）の例  
Fig. 2 An example for motion trajectories of the microorganism (left) and the robot (right).

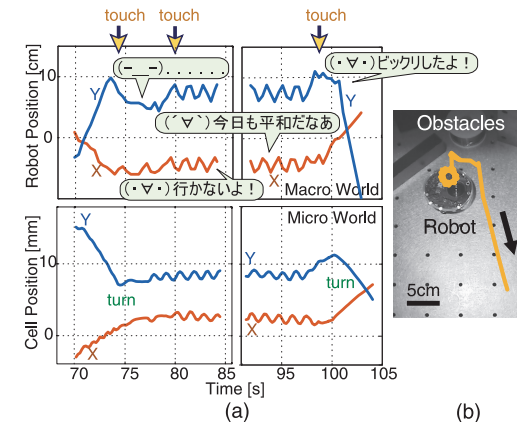


図 3 (a) インタラクションループ成立検証実験の結果の例。(b) 障害物とのインタラクション  
Fig. 3 (a) Experimental results for verification of interaction loop. (b) Interaction with external obstacles.

行うものであるが、簡単のためにロボットを壁で囲み、接触アクションをロボットと壁との接触現象で代用した。また同時に、擬人化演出機能についても動作確認を行った。

結果を図 3 に示す。図中 (a) は上段がアバタロボットの X, Y 方向変位、下段が微生物の X, Y 方向変位を示しており、上部矢印はロボットへのアクション（壁との接触）のタイミングである。吹き出しは各時刻での主な擬人化メッセージを示している。前半と後半で進行方向が一致していないが、これは長時間の実験で方向誤差が蓄積したことによるものであ

り、インタラクション成立の可否には影響しない。74 秒付近でまずロボットが壁にぶつかってわずかに跳ね返っているが、それにとまって微生物が運動の方向を変えている。さらにそれに従いロボットも運動の方向を変化させている。一方、80 秒付近での接触では、微生物は電場刺激に従わず、ロボットも同様にリアクションを見せていない。擬人化メッセージもアクションに反応しない旨が表示されている。さらに 98 秒付近の衝突では微生物、ロボットともに大きく運動を変化させており、メッセージも状態遷移が発生している。また図中 (b) は (a) の 95~105 秒付近におけるアバタロボットの軌跡を示したものである。障害物付近で回転していたロボットが、障害物に衝突後方向転換し、遠ざかっている。ロボットには障害物から逃げるような行動がいつさいプログラムされていないことを考えると、これは微生物の行動を反映することによって初めて生じた行動であるといえる。

これらの結果より、ユーザ(壁)→ロボット→微生物→ロボット→ユーザというループが確かに成立しており、外界と微生物との間で一種のコミュニケーションが確認できた。

#### 4.3 アンケートによる簡易評価

システムの簡単な評価と微生物インタラクションの将来的な発展可能性の検討を行うために、簡易的なアンケートを実施した。被験者は 20~30 代の男女 5 名で、実験前にシステムの概要や意図、使い方について簡単に説明した後、実際のインタラクションを数分間体験してもらい、4 段階評価((A) はい、(B) どちらかといえばはい、(C) どちらかといえばいい、(D) いいえ)と自由記述欄(任意回答)からなるアンケートを依頼した。

結果は以下のとおりである。「物理的なインタラクションが達成できているか」に対しては (A) 1 名、(B) 3 名、(C) 1 名となりおおむね肯定的であったが、システム自体の安定性を向上させればさらに評価が上がるものと予想される。「インタラクションは直感的で親しみが持てるか」は (A) 2 名、(B) 3 名と肯定的評価が得られた。さらに「微生物とのインタラクションは楽しい、または興味が持てるものとなりうるか」については 5 名全員が (A) と回答し、これは微生物との触れ合いが一般に広く受け入れられる可能性を示している。これに対し、「擬人化演出は効果的だったか」に対しては (A) 3 名、(B) 1 名、(C) 1 名と意見が分かれる結果となっており、「発声の方がイメージとあってよかった」などの意見がある一方で、演出は不要であり「ゾウリムシっぽさを前面に出した方がわかりやすいと思った」といった意見も見られた。リアル志向の是非はユーザごとの嗜好にかなり依存することを示唆している。また小さな子供向けの導入部などには有用な可能性があるが、微生物のありのままの姿を体感したい場合には過度の演出が弊害となる危険性もあり、慎重な導入が望まれる。今後さらに多くの被験者の意見を募り、長期利用による意識の変化や、

仮想空間を利用した場合との比較、実際のマイクロ世界との連動をどれほど感じるかなどを調査していく必要がある。

#### 4.4 展 望

本稿で紹介したシステムは微生物インタラクションの実現可能性を検証するテストベッドとして構築されたものであり、必要最小限のインタラクションを実現したにすぎない。より自然で楽しいインタラクションを行うためには、多くの技術的改善点が考えられる。さらに本稿では物理的なインタラクションの構築に主眼をおいており、今回あまり扱わなかった存在感の伝達やコミュニケーションの質などの評価に関しては、今後あらためて検証していく必要があると考えている。

微生物への刺激提示には簡単のため電気走性を用いたが、本来電気走性は微生物にとって意図しない反応であり<sup>14)</sup>、強制的に運動させているというイメージが付きまとう。そこで、電気走性以外の手段を積極的に取り入れて行くことが望ましい。たとえば葉緑体を持つ一部の微生物は光走性を示し<sup>20)</sup>、光に集まることは自身の生存にも有利であることから、微生物に対しよりフレンドリーなインタラクションの実現につながると考えられる。またユーザからのアクションにも光を導入し、小型ライトなどをインタフェースとして用いれば、物理的にもメタファの一致したより直感的なインタラクションが可能となる。他にも餌を撒くなど、微生物もユーザも「楽しめる」インタラクションが理想であるといえる。

今回はインタラクションの実現可能性に重きを置いたため、外見のデザインは特に行わなかった。しかしエンターテインメント的側面を考慮したとき、触れ合いたいくなるようなデザインの検討は重要である。また外見は存在感の伝達にも大きな影響を与えることが予想される。できるだけ実際の微生物らしさを生かすリアル志向の方向性や、逆に生々しさを抑え抽象化あるいは擬人化する方向性などが考えられるが、前節のアンケート結果からもここはユーザによって好みの分かれるところと予想される。著者らはロボットの外見上のリアリティは必ずしも不可欠な要素ではないと考えているが、たとえばロボットの表面にプロジェクタで実際の微生物映像を投影するなどの手法を用いれば、存在感がより増強されると予想している。また、より「細胞らしさ」を強調したデザインとして球形の次世代プロトタイプロボットを現在開発中である。さらにマイクロ世界では慣性力に代わって粘性力が支配的になるなど、諸々の物理現象に現れるスケーリング則<sup>21)</sup>を考慮したインタラクションデザインも今後重要となると思われる。今後インタラクションの幅を広げるために検討していきたい。

本研究はエンターテインメント・アート作品としての側面を強く持ち、ペットと触れ合う

かのように微生物とインタラクションを行うことで、微生物と人間の間まったく新たな関係性を創出するものである。これに加えて微生物の運動を実世界で直感的に理解できるという点で、顕微鏡の狭い視野と使いにくさを解消した新しいマイクロ世界インタフェースの一例となりうるほか、微生物の世界に親しみを持ってもらうための教育・学習分野への応用も期待できる。

## 5. むすび

本稿では微生物との物理的な触れ合いを等価的に体験できるインタラクションシステムを提案し、微生物と人間とのインタラクションの実現可能性について、簡単なシステムを構築して初期検討を行った。マイクロ世界とマクロ世界の間インタラクションループを形成することに成功した。

## 参 考 文 献

- 1) 村上昭継, 田中芳夫, 木内陽介, 三澤弘明: マイクロ微粒子高密度配置のためのレーザーマニピュレーションインタフェースの開発, 電子情報通信学会技術研究報告 MBE2001-36 (2001).
- 2) Sitti, M., Aruk, B., Shintani, H. and Hashimoto, H.: Scaled Teleoperation System for Nano Scale Interaction and Manipulation, *Advanced Robotics*, Vol.17, No.3, pp.275-291 (2003).
- 3) 坂本大介, 神田崇行, 小野哲雄, 石黒 浩, 萩田紀博: 遠隔存在感メディアとしてのアンドロイド・ロボットの可能性, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.12, pp.3729-3738 (2007).
- 4) 三浦郁奈子, 近野 敦, 庄司道彦: 人間との物理的インタラクション可能なバーチャルヒューマノイド, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.12, No.3, pp.305-314 (2007).
- 5) Tachi, S., Kawakami, N., Inami, M. and Zaitzu, Y.: Mutual Telexistence System using Retro-Reflective Projection Technology, *Int. J. Humanoid Robotics*, Vol.1, No.1, pp.45-64 (2004).
- 6) 森田友幸, 間瀬健二, 平野 靖, 梶田将司, 岡留 剛: ヒューマノイドロボットを用いた遠隔コミュニケーションにおける注目伝達, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.12, pp.3849-3858 (2007).
- 7) Kidd, C.D. and Breazeal, C.: Effect of a Robot on User Perceptions, *Proc. 2004 IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)*, pp.3559-3564 (2004).
- 8) Tan, R.T.K.C., Todorovic, V., Teh, J.K.S., Andrejin, G., Ping, L.S. and Cheok, A.D.: *Metazoa Ludens*, *ACM SIGGRAPH 2006 Sketches* (2006).
- 9) Ping, L.S., Farbiz, F. and Cheok, A.D.: Touchy.Internet: A cybernetics system for human-pet interaction through the Internet, *ACM SIGGRAPH 2003 Sketches & Applications*, New York, NY, USA (2003).
- 10) 宮下芳明, 西本一志: 「音楽の条件」とは何か?, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.1, pp.11-20 (2005).
- 11) Nonnenmacher, M.: Living Interface (2007). [http://gestaltung.fh-wuerzburg.de/blogs/exint\\_ws06/?p=630](http://gestaltung.fh-wuerzburg.de/blogs/exint_ws06/?p=630)
- 12) Ogawa, N., Oku, H., Hashimoto, K. and Ishikawa, M.: Microrobotic Visual Control of Motile Cells using High-Speed Tracking System, *IEEE Trans. Robotics*, Vol.21, No.4, pp.704-712 (2005).
- 13) 的場ひろし: 微小な世界とのインタラクションを実現するインスタレーション作品: Micro Friendship, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.6, No.2, pp.129-135 (2001).
- 14) 内藤 豊: 単細胞動物の行動—その制御のしくみ, 東京大学出版会 (1990).
- 15) Oku, H., Ogawa, N., Hashimoto, K. and Ishikawa, M.: Two-Dimensional Tracking of a Motile Micro-organism Allowing High-Resolution Observation with Various Imaging Techniques, *Rev. Sci. Instr.*, Vol.76, No.3 (2005).
- 16) 長谷川健史, 尾川順子, 奥 寛雅, 石川正俊: 高速ビジョンによるトラッキングを用いた3次元空間内での微生物運動制御, 第25回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2D12 (2007).
- 17) Oku, H., Theodoros, Ishikawa, M. and Hashimoto, K.: High-speed autofocusing of a cell using diffraction pattern, *Opt. Express*, Vol.14, pp.3952-3960 (2006).
- 18) 尾川順子, 奥 寛雅, 橋本浩一, 石川正俊: 電気走性アクチュエーションにおけるゾウリムシの非ホロノミック性, 第23回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 3F14 (2005).
- 19) 植田一博, 福田玄明: 対象の運動に対する関わりがアニメーション知覚に与える影響, 第21回人工知能学会全国大会予稿集, 2D5-11 (2007).
- 20) 豊田洋二, 伊東明俊: 光による原生動物の行動制御に関する研究 (第1報: ミドリムシの光驚動性を利用した行動制御), 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス研究会 2001 (ROBOMECH2001) 講演論文集, 2P2-B8 (2001).
- 21) 下山 勲: マイクロロボットのスケール効果, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.8, pp.1106-1108 (1996).

(平成 20 年 3 月 24 日受付)

(平成 20 年 7 月 1 日採録)



尾川 順子

2000年東京大学工学部計数工学科卒業。2002年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。2004年日本学術振興会特別研究員DC2。2005年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻博士課程修了。同年日本学術振興会同特別研究員PD。2008年宇宙航空研究開発機構・宇宙航空プロジェクト研究員，現在に至る。ロボティクス，宇宙機の航法誘導制御等の研究に従事。博士（情報理工学）。



菊田 恭平

2008年東京大学工学部計数工学科卒業。同年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程入学，現在に至る。微生物インタラクション，没入型立体視覚ディスプレイの研究に従事。



奥 寛雅

1998年東京大学理学部物理学科卒業。2000年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。2003年同専攻博士課程修了。同年科学技術振興機構研究員。2005年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻助手。2007年同助教，現在に至る。ダイナミックイメージコントロール等の研究に従事。博士（工学）。



長谷川健史

2007年東京大学工学部計数工学科卒業。同年東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻修士課程入学，現在に至る。微生物の運動制御に関する研究に従事。



アルパロ カシネリ

2000年パリ第11大学シャルル・ファブリ研究所博士課程修了。2001年東京大学リサーチアソシエイト。2002年科学技術振興機構研究員。2005年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻助手。2007年同助教，現在に至る。光コンピューティング，ヒューマンインタフェース等の研究に従事。Ph.D.



石川 正俊（正会員）

1977年東京大学工学部計数工学科卒業。1979年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。同年通産省工業技術院製品科学研究所入所。1989年東京大学工学部計数工学科助教授。現在，東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻教授。超並列・超高速ビジョン，センサフュージョン，メタ・パーセプション等の研究に従事。工学博士。