

# 群れ行動の数理モデルとその応用

## ～ 群れお絵かきツールと Swarm Wall ～

### Modeling and Application of Collective Motions: Drawing tool and Swarm Wall

菅原研<sup>1</sup> 畑佳菜子<sup>1</sup> Nikolaus Correll<sup>2</sup> Michael Theodore<sup>2</sup>

Ken Sugawara<sup>1</sup> Kanako Hata<sup>1</sup> Nikolaus Correll<sup>2</sup> Michael Theodore<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北学院大学

<sup>1</sup>Tohoku Gakuin University

<sup>2</sup>コロラド大学

<sup>2</sup>University of Colorado

**Abstract:** In this paper, we propose a new type of drawing tool and a large art work based on a dynamics of collective motions reported in our previous work. Dynamics of collective motion is described by fundamental kinetics of particles including the heading dynamics of each element. We firstly explain the model in detail and show various types of behavior such as marching, oscillatory, wandering and swarming emerges. Next, we explain the drawing tool, in which the drawn objects are characterized by their shape and show intuitively appropriate collective motions. Lastly we report the art work named “swarm wall” composed of 70 actuating units. Ordered/Disordered behaviors are self-organized based on the proposed dynamics. It also expresses an interaction with audiences by changing its collective behavior.

## はじめに

自然界には群れをなして行動する生物が数多く見られる。海中ではマグロやイワシなどの魚が、向きを揃えて互いの距離を一定に保つような群れを形成して遊泳している。空に目を向けると、鶴などの比較的大型の鳥による直進性の高い編隊飛行、ムクドリなどの小型の鳥による迷走行動、あるいはユスリカのような小型の昆虫が形成する蚊柱など、様々な形態の群れ行動を見出すことができる。

物理学の分野では、一見複雑に見える「生物の群れ行動」を「自己駆動粒子系の動力学」という枠組みでとらえ、群れ行動に対する普遍的な理解を得ることを目的として多数の研究が報告されている[1]。外場によって生じる動きを記述する古典力学は基本的に完成した学問になっているのに対し、自己駆動力（自分で進む力）を有する多体系の振る舞いは、古典力学における系と本質的に異なるものであり、学問分野として未完成の状態にある。学術的な意味でたいへん興味深い「群れの科学」の面白さをより多くの人々と共有することはできないか？そのような視点から、本稿では単純でありながらも様々な群れ行動を示すことができる数理モデルを応用した2

つの事例を報告する。ひとつは自分が描いたものが、その形状に応じた群れ行動を示す「群れお絵かきツール」である。もうひとつはコロラド大学美術館に展示された巨大なアート作品 Swarm Wall である。これは 70 個のマイコンボードとサーボモータからなる均質な分散システムであり、群れの秩序行動・無秩序行動をコイルの往復運動に変換して視覚的および聴覚的な振る舞いを示すものとなっている。

次章以下、本稿で用いた群れのダイナミクス、群れお絵かきツールへの応用、Swarm Wall への応用の順で詳細を述べる。

## 群れのダイナミクス

群れ行動のモデルを構築する方法は大きく分けて 2 通りある。ひとつは各個体の行動をルールベースで記述する方法であり、もうひとつは個体にかかる力に基づいて動力的に取り扱う方法である。前者の例としては Boid[2]がよく知られている。後者については Vicsek モデル[3]や三宮らのモデル[4]などがあげられる。いずれも複雑な振る舞いを表現するためにノイズ項が導入されている。

一方、Shimoyama らは基本的な質点のダイナミク

スと頭軸ベクトルのダイナミクスを導入することで、ノイズ項を含むことなく複雑な群れ行動を表現できるモデルを構築した[5]。このモデルは比較的簡潔に記述されているにもかかわらず、生物の群れに見られるような様々な群れ行動を表現できる興味深いものとなっている。

このモデルは個体を質点とみなす力学方程式と頭軸のダイナミクスの式からなる (Fig.1)。まず、個体を質点とみなすことによって以下のような式が記述できる。

$$m \frac{d\vec{v}_i}{dt} = -\gamma \vec{v}_i + a \vec{n}_i + \sum_{j \neq i} \alpha_{ij} \vec{f}_{ij} + \vec{g}_i \quad (1)$$

ここで  $\vec{v}_i = |\vec{v}_i|(\cos \Phi_i, \sin \Phi_i)$  は個体  $i$  の速度ベクトルを表す。右辺第 1 項は粘性抵抗、右辺第 2 項はユニットの頭軸方向への推進力で  $\vec{n}_i = (\cos \theta_i, \sin \theta_i)$ 、第 3 項は他のユニットとの間に働く相互作用力とその方向依存性を表している。ここで  $\vec{f}_{ij}$  は以下の式で記述した。すなわち、 $r_c$  を境に  $r_{ij} > r_c$  の場合は  $r_{ij}$  に依存する引力が働き、 $r_{ij} < r_c$  の場合は  $r_{ij}$  に依存する斥力が働くことを意味する式である。

$$\vec{f}_{ij} = -c \left\{ \left( \frac{r_{ij}}{r_c} \right)^{-3} - \left( \frac{r_{ij}}{r_c} \right)^{-2} \right\} \cdot \left( \frac{\vec{r}_{ji}}{r_c} \right) \cdot \exp(-|\vec{r}_{ji}|/r_c)$$

$\alpha_{ij}$  は相互作用力の方向依存性を表す式である。個体  $i$  の頭軸ベクトル  $\vec{n}_i$  と個体  $i$  から個体  $j$  へのベクトル  $\vec{r}_{ji}$  がなす角を  $\beta$  として

$$\alpha_{ij} = 1 + d \cos \beta$$

とする。 $d$  は定数である。 $d=0$  はどの方向の他個体に対しても同等の「等方性」引斥力が生じる状態を表す。一方、 $d=1$  は前方の他個体に重きを置く「異方性」引斥力が生じる状態を表す。

第 4 項は群れの重心への引力を表す。重心の位置を  $\vec{g}$  として、

$$\vec{g} = \sum_i \vec{r}_i / N$$

次に向きのダイナミクスについて述べる。個体の移動において、個体の頭軸方向と速度方向は一致している場合が多いものの、常に一致しているとは限らない。その一例として鳥の飛行を考える。鳥は飛行中に体を傾けた際、速度の向きは一時的に頭（体軸）の向きと一致なくなる。多少の時間差をもって頭（体軸）の向きが速度の向きに一致する。このように個体の移動に関しては、速度ベクトルの向きに頭軸ベクトルが合うようなダイナミクスが存在することも考慮する必要がある (Fig.1 (下))。緩和時間  $\tau$  を用いて、この関係を最も簡単な式で表現すると式(2)のようになる。

$$\tau \frac{d\theta_i}{dt} = \sin(\Phi_i - \theta_i) \quad (2)$$

$\theta_i$  は個体  $i$  の頭軸ベクトルの向き、 $\Phi_i$  は個体  $i$  の速度ベクトルの向きを表す。

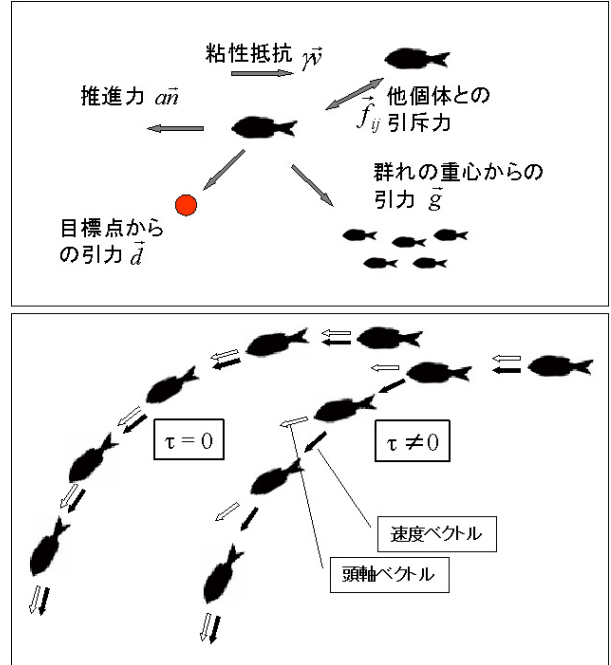


Fig.1 Schematic of the proposed model. Newton's equation of motion for particles (top) and the dynamics of heading (bottom).

式(1)(2)に含まれる変数の値を変えることで様々な集団行動が現れることが明らかになっている[5]。

- ①Marching：群れが秩序構造をもち、その重心の軌道が直線的に動く振る舞い
- ②Oscillation：群れが秩序構造をもち、その重心の軌道が周期的に変動する振る舞い
- ③Wandering：やや乱れた群れ構造を持ち、その重心の軌道が不規則な振る舞い
- ④Swarming：乱れた群れ構造をもち重心の軌道がほとんど動かない

Fig.2 にこれらの行動について集団の重心の軌跡と個体の行動軌跡を示す。この図から分かるように、「marching」「oscillation」は重心の軌道ならびに各個体の移動が直線的であるのに対し、「wandering」は重心の軌道、各個体の相互位置、頭軸ベクトルの乱れ具合は大きくなっている。「swarming」では重心の移動はほとんどないが、各個体の相互位置、頭軸ベクトルが激しく変動している。

このモデルにはもう一つ重要な特性がある。それは、物理的な考察から、群れ行動の特性を決定づけるコントロールパラメータの存在が明らかにされているということである[5]。

$$G = P/Q = r_c c / a^2 \tau \quad (3)$$

このパラメータ  $G$  には臨界値  $G_c \sim 2$  が存在し、 $G < G_c$  で marching や oscillation などの秩序行動、 $G > G_c$  で wandering や swarming のような無秩序行動が見られる (Fig.3)。

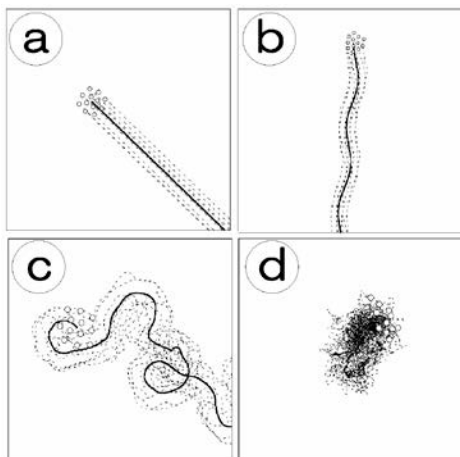


Fig.2 Typical behavior of the system. (a) marching, (b) oscillation, (c)wandering, and (d) swarming. Solid lines show the trajectory of the center of mass, and dotted lines show the trajectories of each unit.

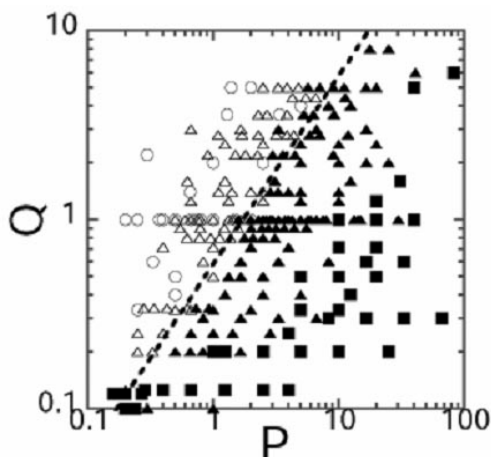


Fig.3 Phase diagram of collective motions in the viscous regime ( $R < 0.05$ ) obtained by independent numerical simulations by changing parameters ( $P$  versus  $Q$ ). In the diagram, white circles indicate marching, white triangles oscillation, black triangles wandering, and black rectangles swarming. Control parameter  $G$  is defined by  $P/Q$ .

## 群れお絵かきツールへの応用

本章では、この力学モデルをドローツールに応用した事例について述べる。ユーザーが描いたオブジェクトが群れて泳ぐドローツールである。

### システム概要

システムは「お絵かきパレット」と「キャンバス」で構成されている。ユーザーはお絵かきパレットを利用してオブジェクトを描画する。すると描かれたオブジェクトの形状に依存した群れ行動を示す。

魚群をイメージすると、個体の形状とその集団の行動の間には次のような関係があるとみなすことができる。(i) 高速で移動する性質を有するものは比較的細長い形状をもつ場合が多い。(ii) 旋回性能の高い性質を有するものは体幅が薄く、体高が高めである傾向が強い。(iii) 丸いものは直進性が低い傾向にある。そこで本研究では、描かれたオブジェクトについて、「外接四角形の面積」と「外接四角形のアスペクト比 (短辺/長辺)」を求め、それらをコントロールパラメータ  $G$  と関係づけることで群れ行動に反映させることを試みる。本研究ではアスペクト比  $\kappa$  が小さい場合は marching に近い行動をとり、比が 1 に近づくほど、迷走、蚊柱のような行動になっていくように設計した (Fig.4)。

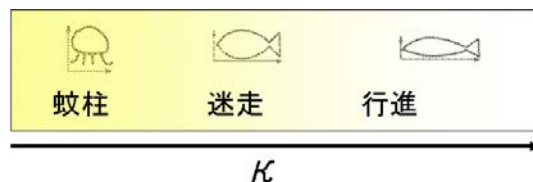


Fig.4 Relation between the aspect ratio  $\kappa$  and the desired collective motion.

式(3)より、ひとつの変数に着目し、他の変数を適切な値で固定するとパラメータ  $G$  は着目した変数でコントロールできることが分かる。ここでは  $\tau$  をアスペクト比  $\kappa$  の関数として記述し、オブジェクトの形状と群れ行動を関連付けることとした。

$$\tau = C_1 - C_2 / (1 + \exp(-\beta(\kappa - C_c))) \quad (4)$$

ここで  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_c$  は定数である。

Fig.5 は開発したシステム運用時のスナップショットである。ユーザーは電子ペンを用いてオブジェクトを描き、大きさと個体数を指示する。オブジェクトはキャンバス内にランダムに配置されるが、これまでに述べてきたダイナミクスに従って動き出す。複数種類のオブジェクトがある場合は、同種同士が集まって行動するようになっている (Fig.6)。



Fig.5 Users can draw any object on the screen by electronic pen and put it in "swim" field. Same objects gather and show the collective behaviors based on the proposed kinetics.

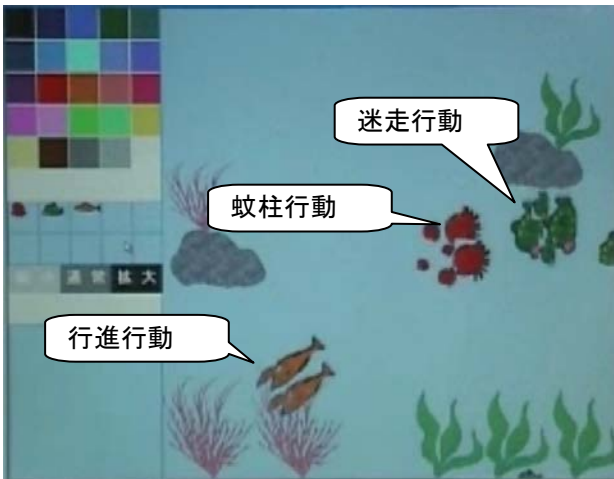


Fig.6 Snapshot of their motion. The objects show their own collective motion based on their shapes.

## システムの評価

システムの有効性を検証するためにユーザーの心理状態を測定した。心理状態を測定する評価方法として二次元気分尺度法を導入する[6]。これは気分形容詞尺度に関する先行研究などを元に選出した形容表現を「快適度」と「覚醒度」の観点から4カテゴリーに分類し、その形容表現のもつイメージをアンケートによって再評価することで、改めて「快適度」と「覚醒度」を二軸とする平面上にユーザーの心理状態を位置づける方法である。

この方法では、8つの項目からなるアンケートに対し、それぞれの項目の形容表現がどれだけ当ては

まるかを6段階に分けて被験者に回答してもらい、その値から「ポジティブ覚醒得点 P」と「ネガティブ覚醒得点 N」を算出する。快適度 H は  $H = (P-N)/2$  で求めることができる。極めて簡便な方法であるため、必ずしも客観性の高い計測法ではないが、質問項目が少ないため負担をかけずに心理状態を測定・記録できること、心理状態の変化を分刻みで繰り返し測定することが可能であること、尺度の測定結果がこれまで妥当性があるとされてきた既存の心理指標や生理学的変化に基づく指標と十分合っているという優れた特性を有している。

本研究では、通常のドローツールとの比較で本システムの評価を行うこととした。利用者に一般のドローツールで5分間魚の群れを描いてもらい、アンケートに記入してもらい、そして次に本研究である群れシュミレータを5分間使用してもらい、同様にアンケートに記入してもらい、このアンケート項目からペイント使用時と本研究使用時の期待度を求めた。その結果、通常のドローツールの快適度は平均2.77に対し、本システムの快適度は平均9.82、となった。また、「自分が描画した魚は自分のイメージ通りに群れたか」という質問に対しても当てはまる度合いを6段階に分けて聞いたところ、平均3.45という結果が得られた。このことから描画した人のイメージに、ある程度マッチした群れ行動が発現している、ということができる。

## アートへの応用 : Swarm Wall

Swarm Wall は、本稿で論じた群れモデルをメカニカルなリズムと結びつけることを試みたアート作品である[7][8]。個体の振る舞いを簡単な反復リズム運動に置き換えることで、その集団が示す多様な群れ行動を視覚的および聴覚的に表現している。



Fig.7 "Swarm Wall" displayed in CU Art Museum.

Swarm Wall は、可動コイルとサーボモータ、マイクロコントローラが組み込まれた基本パネルを横14枚、縦5枚、計70枚配置することで作られてい

る。そのサイズはおよそ 12.8m×3.8m である (Fig.6)。

基本パネルは 91.4cm × 76.0cm の木製ボードであり、表面には約 150 本のプラスチック製パイプ(直径 5cm のものと 2.5cm のもの、高さはランダム) が不規則に接着されている。パネルの中央にはサーボモータによって動くプラスチック製の可動コイルが配置されている (Fig.8 上)。このコイルがパイプと擦れることで音が鳴る。パネルの裏にはマイクロコントローラが設置されており、サーボモータの動きを制御する役割と、近傍のマイクロコントローラと情報のやりとりを行う役割を担う (Fig.8 下)。各コントローラは上下左右の隣接するコントローラとケーブルで接続されている。すべてのコントローラに同じプログラムが組み込まれ、隣接するコントローラのみとデータのやりとりを行いながら非同期的に作動する。最下段に位置するコントローラには超音波センサーが取り付けられており、人が近付くとその距離を測定することができるようになっている。



Fig.8 (Top) Plastic pipes and movable coil on the surface. (Bottom) micro-controllers on back side.

## Swarm Wall のダイナミクス

Swarm Wall では、式(1)に固定点からのバネ力(自然長 0)を追加し、さらに上下左右に隣接する個体との間のみ引斥力が働くものとして計算を行っている (Fig.9)。ひとつひとつの個体の動きが個別のマイクロコントローラによって独立に計算される。つまり、70 個のマイクロコントローラがそれぞれ 4 近傍

のコントローラと情報交換することで、「70 匹の個体の集団運動」を創り出しているのである。時々刻々変化する各個体の向き情報をコイルの往復運動に反映させることで集団運動の特性をリズム化する。整然とまっすぐ進む集団運動は秩序だった集団リズムを生み出し、蚊柱のような集団運動は無秩序なリズムを生み出す。

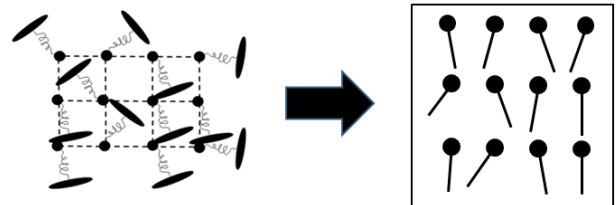


Fig.9 Collective motions are calculated by each micro controllers and their heading motions are reflected to the coil motion.

SwarmWall にはいくつかのモードが組み込まれているが、本稿ではその中の 2 つを述べる。

### 1. 群れモード

基本動作は群れ方程式の **Marching** に相当する同期的運動であるが、センサーが人を感知すると、同方程式の無秩序行動を示す。人が近づいたことで興奮した状態を表している。全体がゆったりとした「ザー・・・ザー・・・」音を奏でる一方、人のまわりでは「ザワザワッ」という音が出る (Fig.10)。

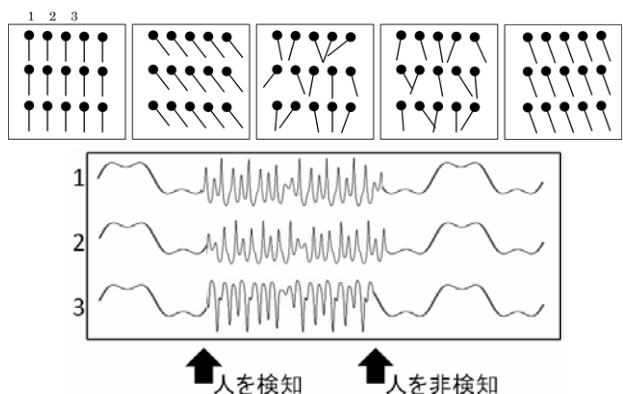


Fig.10 Schematic of coils' motion in "flocking mode."

### 2. 「こだま」モード

センサーが人や物体を検出しない場合は、群れ方程式における「無秩序行動」をベースにして、不定期に「ササッ」と小さく動く。一方、センサーが人の存在を検出すると、距離 3 の範囲 (図中の点線内) のコイルが、方程式の「無秩序行動」に基づいてランダムに「ザワザワ」動く (Fig.11)。

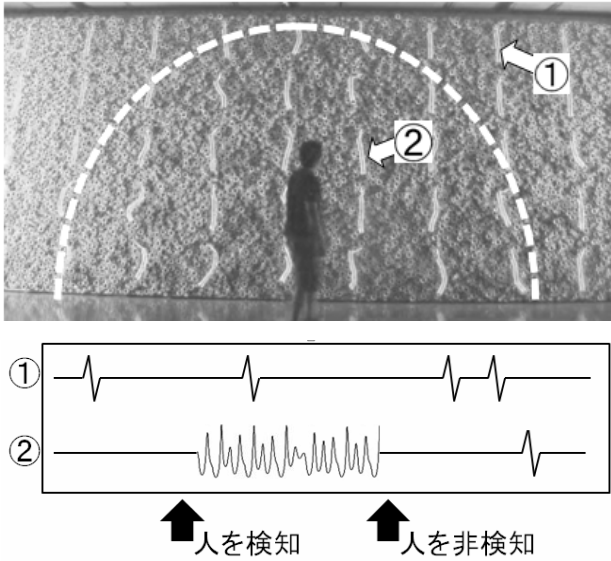


Fig.11 Schematic of coils' motion in "Kodama mode."

## まとめ

本稿では、生物の群れ行動に基づき、個体集団の多様な行動形態を記述できる力学モデルとその応用例について論じた。基本的な力学に基づいた単純なモデルであるにも関わらず、様々な群れ行動を示すことをシミュレーションによって示すとともに、理論的な解析を通して、その群れ行動を支配するパラメータ  $G$  が存在することを示した。

次に、この群れモデルをベースとして、ユーザーが描いたオブジェクトがその形状に合った群れ行動を示すシステムへの応用を試みた。描いたオブジェクトのアスペクト比に着目することで、直感に合う群れ行動を示すようにした。また、ユーザーの心理状態を簡潔に定量化できる二次元気分尺度法を用いて、システムの有効性について検証も行った。

最後に、この群れモデルを組み込んだアート作品について述べた。複数のコントローラとモータからなる分散システムを均質な個体集団と見立て、群れモデルで得られる秩序・無秩序行動をコイルの動きに反映させた。また、人の接近に応じて秩序行動と無秩序行動を遷移させる仕組みを導入することで、人とのインタラクションをもったシステムにした。

## 参考文献

- [ 1 ] T.Vicsek, A.Zafeiris, Collective motion, Physics Reports, vol.517, pp.71-140, (2012)
- [ 2 ] <http://www.red3d.com/cwr/boids/>
- [ 3 ] T.Vicsek, A.Czirok, E.Ben-Jacob, I.Cohen, and O.Shochet, Phys. Rev. Lett., Vol.75, pp.1226-1229, (1995)
- [ 4 ] 三宮、田、中峯、"魚群行動モデルにおける協調制御

の創発"、計測自動制御学会論文集, Vol.35, No.11, pp.1370-1376, (1999)

- [ 5 ] N. Shimoyama, K. Sugawara, T. Mizuguchi, Y. Hayakawa, and M. Sano, "Collective Motion in a System of Motile Elements", Phys. Rev. Lett. Vol.76, pp.3870-3873, (1996)
- [ 6 ] 坂入、征矢、"新しい感性指標：運動時の気分測定"、体育の科学, Vol.53, No.11, pp.845-850, (2003)
- [ 7 ] <http://vimeo.com/45073818>
- [ 8 ] N. Correll, N. Farrow, K. Sugawara, M. Theodore, "The Swarm Wall: Toward Life's Uncanny Valley", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Workshop on Art and Robotics: Freud's Unheimlich and the Uncanny Valley (2013)