

Modulobe : 多数のモジュールによる 動く表現物の創造と共有環境

江渡 浩一郎^{†1} 渡辺 訓章^{†2} 川崎 禎紀^{†1}
濱崎 雅弘^{†1} 西村 拓一^{†1}

単純な板状部品を多数用いることで様々な動きを表現できる物理シミュレーション環境 *Modulobe* を構築した。ユーザは、分かりやすい GUI により 3 次元状にモジュールを組み合わせ、部品間の接続部分に動きを指示することができる。また、この *Modulobe* で作成したモデルを共有するサイトを構築した。ユーザは作成したモデルをモデル共有サイトで共有し、またサイト上のモデルをもとに改良し独自のモデルへと発展させることもできる。本論文では *Modulobe* とモデル共有サイトを説明し、それらの試験運用の結果について述べる。

Creation and Sharing Environment of Virtual Creatures with Multiple Modules

KOICHIROU ETO,^{†1} KUNIAKI WATANABE,^{†2}
YOSHINORI KAWASAKI,^{†1} MASAHIRO HAMASAKI^{†1}
and TAKUICHI NISHIMURA^{†1}

We developed a physical simulation environment, *Modulobe* system, which allows the user to create models with various motion easily by combining simple board shape modules. The user can design motion pattern for each joint of two modules intuitively using the GUI connecting modules into a 3D model. A Model sharing site is also developed to help users to share their models and stimulate re-creation activities. In this paper, we describe the basic ideas, implementations details, and user experiences of the system.

^{†1} 産業技術総合研究所

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

^{†2} 有限会社すさみ

Susami Corporation

1. はじめに

人類は太古より洞窟壁に絵を描いたり、縄で模様をつけた壺を作成したりするなどの表現活動を行ってきた。表現するためのツールも絵筆や彫刻刀、キャンバスなど様々なものが生み出されてきた。これらの表現物は、様々な形態で世界中を流通し時間も超えてきた。昨今では、計算機およびインターネットを利用したデジタル表現が広がることにより、表現ツールの可能性だけでなく表現物の流通の速度と範囲が桁違いに高まっている。

デジタル表現には多くの種類や可能性があり、現実世界のものとはまったく異なる優れた創造が多くなされている。しかし、今回は、ある表現物を作成したときに、その表現物が重力や摩擦、慣性や運動量保存の法則などの現実世界の制約に従って動く表現ツールに焦点をあてる。

また、表現物が迅速に世界的に流通し、再表現活動が活性化するために、いかに表現物の共有環境を実現するかにも関心がある。

物理法則に基づく表現ツールとして、Soda 社の *Sodaplay*¹⁾ や *Springs World 3D*²⁾ が知られている。これは、物体が質点で構成されており、質点間の距離がバネダンパによって一定に保たれるとして計算するペナルティ法³⁾ によって生物のように動くモデルを作るツールである。他のユーザが作成した様々なモデルを、ブラウザ上で動かして見ることができるものの、モデルは質点とバネダンパによる柔らかい接続構造となっているため、実世界に多く存在する剛体の動きを表現することは困難である。Waddoups は、物理シミュレーション環境において様々な形態を作り、動かすことができるシステム *Juice*⁴⁾ を開発した。Juice は物理シミュレーションエンジンとして、現実世界の拘束条件をもとにした運動方程式を用いた物理計算エンジン *Open Dynamics Engine*⁵⁾ を使用している。そのため、多数の部品を用いた計算には不向きであり、実際には与えられたタイヤやパネルなどの部品を少数用いてモデルを作成する。1999 年に SCEI より発売された PlayStation 用のゲーム「パネキット」⁶⁾ では、様々な役割を持った正方形のパネルを組み合わせることで、地上を走る車、海を進む船、空を飛ぶ飛行機などの様々な乗り物を作ることができる。しかし主に乗り物のような動きに特化しており、また、Juice 同様に与えられた多数のモジュールを少数個組み合わせるものになっている。

そこで本研究では、各部品の表面の模様や色・形状を柔軟にデザインできる方向ではなく、単純な板状部品を多数用いることで様々な動きを表現できる物理シミュレーション環境 *Modulobe* を構築する。ユーザは、分かりやすい GUI により 3 次元状にモジュールを組み

合わせ、部品間の接続部分に動きを指示することができる。さらに、この Modulobe で作成したモデルを共有するサイトを構築した。本論文では Modulobe とモデル共有サイトの説明と、それらの試験運用の結果について述べる。

本論文の構成は以下のとおりである。まず 2 章で Modulobe の設計について述べる。次に 3 章で Modulobe の実装、4 章でモデル共有サイトについて述べる。そして 5 章において Modulobe およびモデル共有サイトの試験運用結果について述べ、最後に 6 章で本論文をまとめる。

2. Modulobe の設計

Modulobe の設計において、基本的な形を組み合わせることで任意の形を作りあげることができるレゴ・ブロックに強い影響を受けた。基本的な形は単純で種類も少ない。しかし、その多数の組合せにより様々な形状の表現物を創造できる。また、蟻人形などに比べて写実的でないにもかかわらず、様々なものに見立てることができる。レゴを教材にした教育システムの研究に取り組んでいる MIT のパパートらは、小学校での実験から、素材の少なさがかえって制作者の創造性を喚起するという知見を示している⁷⁾。さらに、制作者らが互いに模倣をしたりパーツの交換をしたりすることで創造活動を発展させていく様子が見られたことも述べている。

そこで、Modulobe でも、様々な組み合わせることができる単純かつ少ない種類のモジュールによって表現物が作られるようにする。そして、それらがユーザ間で容易に模倣および共有できるようにする。

2.1 モジュールの基本形状

レゴ・ブロックのような立体的なブロックの場合は、ボリュームのある形状を表現するには都合がいいが、関節によって曲がるような形は表現しにくい。同様に、平面的なパネルの組合せも、関節による動きを表現しにくい。丸い棒や断面が正方形の棒の場合には向いている方向が分からなくなってしまう。以上のことから、モジュールは細長い板のような形とする。

モジュールにはシャフトとリンクの 2 種類を用意する。シャフトは 4 方向に新しいモジュールを接続できる、分岐構造を形成可能なモジュールである。リンクは 2 方向に接続可能で、中心で曲げられるモジュールであり、同時に動力にもなる。このリンクの角度を設定して変化させることによってモデルに動きを与える。Modulobe では多数のリンクとシャフトを組み合わせることで大きなモデルも構築可能にする。

2.2 物理シミュレーション

Modulobe は現実世界の物理現象をできるだけ忠実に再現した表現ツールの構築を目標としている。先述のモジュールによって構成されるモデルは重力や摩擦、慣性や運動量保存の法則に従って動く。これを実現するためには、物理法則の演算を行う物理シミュレーションエンジンが必要となる。

Modulobe の物理シミュレーションエンジンには、現実の物理現象に忠実であると同時に、汎用的な PC でリアルタイム処理が可能であることが求められる。これは、ユーザが表現ツールとしてストレスなく利用するためにはインタラクティブ性が必要であるため、その計算はリアルタイムで行われる必要があることと、より多くの人に利用してもらえるように本システムの稼働環境としては一般的な PC を想定しているためである。

Modulobe の基本モジュールは細長い板である。細長い板どうしが末端で関節によって接続され、モデルを構成する。可動部は関節部のみであるため、基本的にはペナルティ法によってシミュレーションが可能である。しかし単純にペナルティ法を適用すると、物理法則との不整合や計算量などで問題が生じる⁸⁾。そのため、Modulobe に適した計算モデルが必要となる。

2.3 モデル作成インタフェース

Modulobe は、物体の形状として三次元形状のモデルを構築できるシステムを想定している。しかしながら三次元形状による物体の作成は二次元形状に比べて習熟を要するため、ユーザにモデル作成のための理解を促す、ユーザ・インタフェースのデザインは重要な課題の 1 つである。

この課題に対して Modulobe では、徐々にレベルアップできるようなインタフェースを目指す。具体的には三次元形状の物体を作る前に、二次元形状の物体を作成できるようにするというアプローチをとる。モデルに対して奥行き方向へのモジュール追加や動作設定を行わなければ、二次元形状の物体としてモデル作成可能なようにすることで、ユーザはまず二次元形状のモデル作成を経て、三次元形状のモデル作成へと移行することができる。この際、モデル作成操作は二次元と三次元とでまったく変わらないようにすることが重要である。

そのほかには、作成途中のモデルでも容易に動作確認ができること、マウス操作のみで様々な角度からモデルを確認したりモデルの挙動に対して干渉したりできることなど、直感的かつインタラクティブな操作を可能にすることがあげられる。

2.4 モデルの共有と継承

モデルの流通を促すための試みとして、本システムには Web を通じたモデルの共有機能

が組み込まれている．システムからは，自分で作成したモデルを動画とともにアップロードできるようにする．逆に，Web からは新しく投稿されたモデルや，ユーザによって付けられたタグなどをもとに，自由にモデルをダウンロードできるようにする．ダウンロードしたモデルは再生だけでなく，改変も可能にする．

ここで重要なのは，改変したモデルもまた，Web に投稿することができるということである．他人の「表現物」であるモデルを手に入れてから，それに自分の変更を加え，そして Web 上で発表・共有する，という一連の再表現のためのプロセスを，Web サイトを含めた 1 つの系の中で完結させる．

このプロセスを促すためには，再表現された過程をも共有することが重要である．他者の表現に影響を受け模倣をすることは表現活動にとって重要であり，それを促すことは表現活動を行うコミュニティの活性化にとっても有用である．ただし，その際に模倣した側とされた側との継承関係がコミュニティ内で明らかにされないと，それは剽窃となり，結果的にコミュニティにダメージを与える．この継承関係を明らかにするプロセスをシステムに組み込むことも重要な課題であると考えられる．Modulobe ではモジュールにユニーク ID を付与することで，継承関係をシステムがトラッキングできるよう試みる．

3. Modulobe の実装

Modulobe 本体は，Visual C++環境において DirectX 9 を用い，実装した．主に物理法則の計算を行う物理シミュレーション部分とモデルの作成や動きを見るユーザ・インタフェース部分からなる．以降それぞれの実装に関して説明する．

3.1 物理シミュレーション

一般に剛体の物理シミュレーションを行う方法として，解析法とペナルティ法の 2 種類が知られている⁹⁾．解析法は，運動方程式と拘束条件の式を連立させて解く方法で，ODE⁵⁾などが採用しているが，連結されるモジュールの数が増えると飛躍的に計算量が増大する．また，地面との摩擦や跳ね返りを計算することが困難である．ペナルティ法は，物体間の連結にバネダンパが入っていると仮定して計算する方法であり計算量が少ないという特徴がある．しかし，多数のモジュールが連結した剛体では，モジュール間のバネダンパにより剛体が曲がるなどの現象が起きる．また，衝突時には他の剛体の中に食い込むなどの問題がある．

1 自由度の関節を実現するには，解析法の一つである自由度削減法を用いるのが一般的だが，その場合は指定された軸以外の方向にはいっさい回転しなくなる．本論文では，生物の関節のように多少柔らかい見た目を実現するために，ペナルティ法を採用する．また，多数

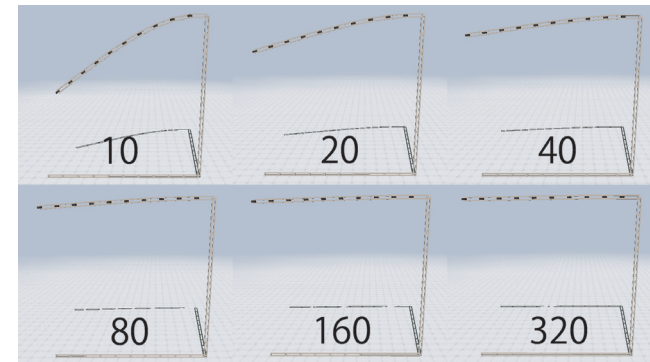


図 1 サンプルレートを変化させたときの剛体の見た目の変化．図中の数字はそれぞれのサンプルレートを示す
Fig.1 Shapes of the rigid body with sample rates from 10 to 320. Numbers in the figure show the sample rate of each sample.

表 1 テストプログラムの実行環境

Table 1 Execution environment of the test program.

プロセッサ	1.33 GHz (Core 2 Duo U7700)
チップセット	GM965 Express
メインメモリー	2 GB
OS	Windows XP Service Pack 2

のモジュールを連結した表現物を扱うため，現実的な計算量に抑える必要もある．また，上記のペナルティ法の課題を解決するために，次節で述べるようにモデル内と衝突時において異なった計算法を用いることとした．

3.1.1 モデル内の計算最適化

ペナルティ法では，モジュール間はすべてバネダンパにより連結される．したがって，回転方向ではない方向にも回転することになる．たとえば，図 1 の左上の図は，右下の図と比べて上部の棒が左下の方に垂れ下がっている．実は，この上部の棒は水平方向にのみ回転するリンクで接続しているため，理想としては剛体のように水平に伸びることが望ましい．このような場合，ペナルティ法では，描画フレーム間で複数回の演算を繰り返すことで問題を解決できる．この 1 秒間の演算回数をサンプルレートと呼び，このサンプルレートを変化させた場合のモデルの変化が図 1 に示したとおりとなる．本実験で用いた実行環境を表 1 に，物理シミュレーションの係数を表 2 に示す．

表 2 サンプルレート 80 Hz のときの物理シミュレーションの係数 . この値はサンプルレートの数値に比例する

Table 2 The coefficients of the physical simulation with sample rates of 80 Hz. This number increases according to the sampling rates.

モジュールの大きさ	2 m * 0.5 m * 0.1 m
モジュールの重さ	2 kg
慣性モーメント	1.8 kgm ²
バネ係数	300 N/m
ダンパ係数	480 N/(m/s)
ねじりバネ定数	300 N/m
ねじりダンパ係数	480 N/(m/s)
表示フレームレート	60 Hz
重力加速度	72 m/s ²

表 3 サンプルレートの違いによる角度の差と CPU 利用率の関係

Table 3 Relationship among the sample rate, the bar angle, and CPU loads.

サンプルレート	角度	CPU 利用率
10 Hz	31.6	25% ~ 28%
20 Hz	12.5	25% ~ 28%
40 Hz	6.1	25% ~ 28%
80 Hz	3.0	25% ~ 28%
160 Hz	1.5	34% ~ 38%
320 Hz	0.8	49% ~ 50%

Modulobe では、多数のモジュールによりモデルを構築することを想定しており、ここで示したようにモジュール数 10 の棒が剛体として見えるようにつ、計算量としても妥当なサンプルレートを設定する。

図 1 に示したサンプルレートにおける垂れ下がり具合を、上辺の根本と先端の角度によって表 3 に示す。サンプルレートが 80 Hz の場合に角度が 3.0 度となる剛体としての違和感も減少する。よりサンプルレートを上げれば精度が向上するが、表 3 における CPU 利用率^{*1}から、それだけ計算負荷もかかることが分かる。サンプルレート 80 Hz 以下で下げ止まりをみせているが、これは物理シミュレーション以外の計算負荷が主となるためと考えられる。そこで、今回は垂れ下がり度合いと CPU の計算負荷の観点からサンプルレートを 80 Hz に設定した。

*1 Windows タスクマネージャの CPU 利用率を目視した値。

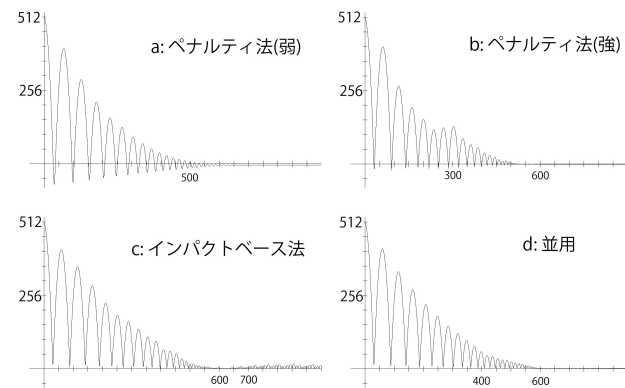


図 2 地面との衝突判定の予備実験の結果 . a はペナルティ法のみを用いた場合 . b は同じくペナルティ法で、係数を強くした場合 . c はインパクトベース法のみを用いた場合 . d はペナルティ法とインパクトベース法を並用した場合

Fig. 2 Results of preliminary experiments of collision detection. Cases a and b use the penalty method. Case b has stronger coefficient than case a. Case c uses the impact-based method. Case d uses both the penalty method and the impact-based method.

3.1.2 安定した地面との衝突判定の実現

モデルの動作では、地面との衝突や摩擦による力の発生が、全体の動きの変化に大きく関わってくる。また、地面の反発力の計算によって、地面に置かれた物体が振動してしまう場合があることはよく知られている。そのため、まず 4 種類の計算方法による衝突判定方法の予備実験を行った。図 2 に、結果となるグラフを示す。縦軸は初期状態を 1.0 とした地面からの高さ、横軸は計算のステップ数を表す。本実験で用いた実行環境を表 1 に、物理シミュレーションの係数を表 4 に示す。

図 2a は、ペナルティ法³⁾を用いた場合で、初期の状態での地面への沈み込みが激しい。また 500 ステップ付近では反発のカーブがサインカーブに近くなっており、物体は水に浮かんだ物体のようにゆらゆら動いて見えてしまう。図 2b は、ペナルティ法の反発の係数を強くした場合で、この場合は地面への沈み込みは顕著ではない。しかし反発力が収束する過程の 300 ステップ付近で、反動が強くなってしまい、逆に高く上がっているところが見られる。これは物体が地面の下にあると判定される回数によって離散的に反発力が変化してしまうからである。図 2c は、インパクトベース法を用いた場合で、この場合は収束の直前までは問題のないカーブを描くが、600 ステップ付近でいったん値が収束したものの、700 ス

表 4 テストプログラムの物理シミュレーションの係数

Table 4 The coefficients of the physical simulation of the test program.

質点の重さ	1 kg
表示上の 1 単位	1 m
重力加速度	1.0 m/s ²
バネ係数 (弱)	0.2 N/m
ダンパ係数 (弱)	0.03 N/(m/s)
バネ係数 (強)	2.0 N/m
ダンパ係数 (強)	0.1 N/(m/s)
跳ね返り係数 (インパクト)	0.9
バネ係数 (併用)	0.1 N/m
ダンパ係数 (併用)	なし
跳ね返り係数 (併用)	0.95

テップ付近からはまた振動が発生してしまい、以後ずっと振動を繰り返す。これはわずかな誤差が増幅されて拡大されてしまうからである。

そこで、ペナルティ法とインパクトベース法を並用する手法を採用した。その結果、図 2d のように、減少傾向のみで値が収束し、かつ収束した値が振動せずにとどまった。ただし、値が収束する過程のカーブの傾きは一定ではなく、400 ステップ付近で変化している。これは、400 ステップ以前ではインパクトベース法が優位なのに対し、それ以降はペナルティ法 (弱) の影響のほうが強くなるためである。ただし、収束時にはインパクトベース法の力も若干かかっているため、ペナルティ法 (弱) のみの場合のように「水に浮かんだ物体のようにゆらゆら動いて見えてしまう」ことがない。

一方、地面との間の摩擦力は、物体の重さによる地面への圧力と物体の速度と摩擦係数を掛けた値とした。摩擦係数は、各モジュールの当たっている個所に応じて、異なった計算を行っている。モジュールの角の部分は摩擦が大きく、平らな部分では摩擦が少なくなるようにすることによって、安定した足のような構造やスキーのようにすべる構造を同時に実現できるようにした。接触面の大きさおよび摩擦力の方向と摩擦係数の対応関係を表 5 に示す。

3.2 インタフェース

Modulobe は、編集モードと再生モードの大きく 2 つに分かれている。編集モードでは、ユーザはモデルの骨格を作り、その動作を指定できる。再生モードでは、編集モードで作成したモデルを動かしてみることができる。

図 3 にシステム起動時の画面を示す。システム起動時は編集モードとなっており、左上のメニューから、編集モードと再生モードを切り替えられる。

表 5 接触面の大きさおよび摩擦力の方向と摩擦係数の関係

Table 5 The relationship among the size of the contact, the direction of the friction force and the friction coefficient.

接触面サイズ	摩擦力	摩擦係数
縦 0.5 m * 横 0.1 m	縦方向	0.04
	横方向	0.2
縦 2.0 m * 横 0.1 m	縦方向	0.0025
	横方向	0.005
縦 2.0 m * 横 0.5 m	縦方向	0.0005
	横方向	0.002

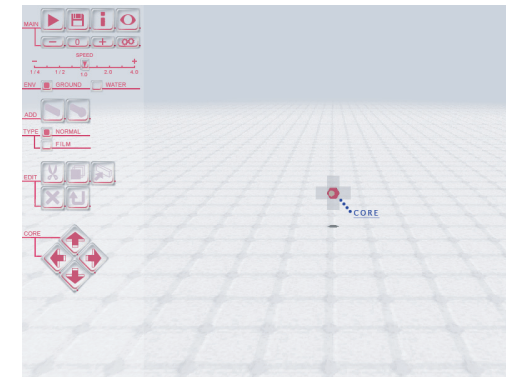


図 3 Modulobe 起動時の画面

Fig. 3 Screenshot of the start screen. Firstly, Modulobe is in edit mode. Users can change the mode using the menu.

3.2.1 編集モード

モデルは、モジュールと呼ばれる部品によって構成されている。モジュールにはシャフトとリンクの 2 種類がある。一番最初の初期状態では、コアという起点となる特殊なシャフトだけが存在する。コアに対してモジュールを接続していくことで、モデルの骨格を作っていく。全体としては、コアを起点としてモジュールが分岐する木構造となる。

初期状態ではコアが選択されており、その周囲には選択用のガイドが 4 方向に表示されている。このガイドのいずれかをクリックして選択すると、その場所に新しいモジュールを接続することができる。シャフトやリンクの中心をクリックするとそのモジュールが選択され、

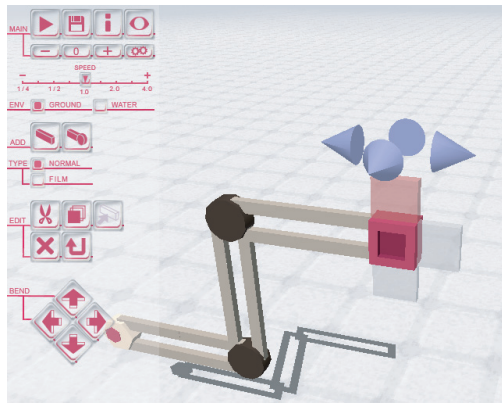


図 4 ガイド選択時のメニュー．新規モジュールを追加できる．連結角度変更のための青い三角錐が表示される
 Fig. 4 Menu for a guide. A user can add new shafts. Four blue tetrahedral are controllers for changing the angle.

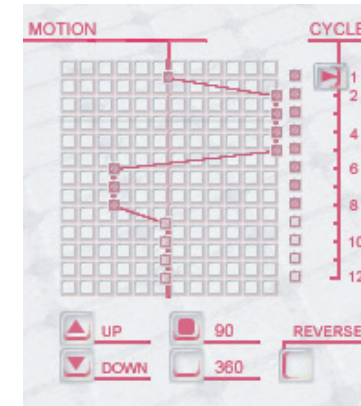


図 5 リンク選択時のメニュー
 Fig. 5 Motion graph for programming a motion pattern of a link module.

モジュールが接続されていない箇所にはガイドが表示される．続いてガイドを選択すると，コアの場合と同様に，その場所にモジュールを接続することができる（図 4）．このように，コアから始めてモジュールを接続していくことで，モデル全体の形状を構築していく．

それぞれのモジュール間の連結部分を選択すると，接続角度を変更できる（図 4）．接続角度は，回転方向には隣接する接続との距離が 45 度より小さくならない範囲で，折り曲げ方向には ± 45 度まで変化させることができる．角度変化は 15 度刻みである．このように，奥行きのある三次元形状を作成することができるようになっている．

なお，編集モードの最初の状態では，図 4 のように物体を横から見る視点となっている．この状態で前後方向の曲げを行わずに物体を作ると，二次元形状の物体を作ることになる．現実世界では，二次元形状の物体を地面に垂直に置くと，わずかな傾きをもとにその物体は倒れる．しかし，本システムでは物体を垂直方向に置いた場合には，Z 軸方向の回転以外は使わないため，XY 軸の値はゼロのままとなり，誤差なしで計算できるため，前後に倒れない．このような工夫によって，二次元形状による物体と三次元形状による物体とを，同じシステム内でシームレスに扱える．

リンク中心部分の曲がる方向は 1 方向だけであり，リンクモジュールのある平面に垂直な軸を中心に曲げられる．リンクを選択すると，そのリンクをどのように曲げるかを設定するグラフが表示される（図 5）．このグラフの縦軸は時間軸で，横軸はそのリンクの回転角

度である．15 度刻みとなっており， ± 90 度まで曲げることができる．また，360 度回転するリンクを選択することもできる．時間軸は縦方向につながっており，下まできたら，また上から繰り返す．右にある縦線と点は，角度変化の周期を示すものである．何も指定しないと，1 秒で 1 周し，最長で 12 秒で 1 周まで変化の周期を長くできる．ここで指定する角度は目標角度であり，実行時には角度が目標と一致させる方向に力が加えられる．そのため，高速に目標角度を変化させたり，重量のある物体を重力に逆らって回転させようとした場合には，目標角度に達しないことがある．

また，目標角度を設定しない，フリーリンクを作ることもできる．たとえば，図 5 の場合は，1 ステップ後に 90 度曲がり，その 4 ステップ後に反対側に 45 度曲がり，さらに 3 ステップ後には目標角度なしにすると設定している．

このグラフを時間方向にずらす，つまり変化パターンの位相をずらすこともできる．たとえば生物やロボットが移動する際には，複数の関節部で位相がずれた同一のパターンとなることが多い．そのような動きを作る場合には，まず 1 つの動きパターンを作ってからそれをカット&ペーストして位相をずらすことで容易に作る事ができる．

図 6 のように一部のモジュールが重なったり，密集してしまうことがある．その場合には，「Expand On」を選択することで，図 7 のように重なっているモジュールを展開して表示する．このような表示によって，モジュールを複数重ねて，見た目のうえでは接続して

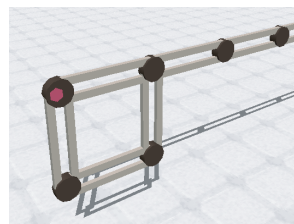


図 6 モジュールの重なりの展開をオフにした場合
Fig. 6 Expand mode is off.

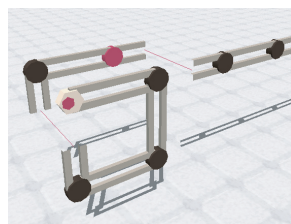


図 7 モジュールの重なりの展開をオンにした場合
Fig. 7 Expand mode is on.

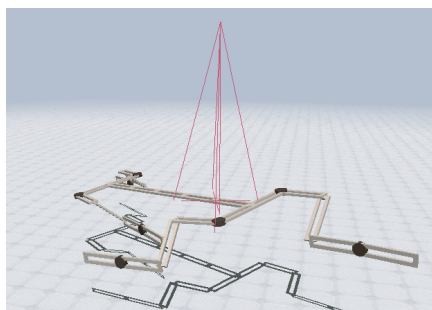


図 8 垂直方向に力を加えた状態
Fig. 8 Bringing up the model.

いるような形状が容易に作成できる。

以上のように、シャフトとリンクの 2 種類のモジュールを接続し、リンクの動きを設定するだけで、複雑な動きのモデルを簡単に作成できるようになっている。

3.2.2 再生モード

再生モードでは、モデルが動作するのを眺めることができる。平面は無限に広がり、壁や環境の変化は存在していない。マウスでモジュールを選択してからドラッグすることで、任意のモジュールに力を加えることもできる。マウスホイールの回転で上に持ち上げることができる(図 8)。左上の速度指定バーから、物体の動作速度を変更することができる。動作速度の変化によって、物体の動きがどのように変化するかを実験してみることができる。

3.3 共有機能

システムからは、自分で作成したモデルを動画とともにアップロードできる。モデルの動

画は別途アプリケーションを用意する必要はなく、再生モードで簡単に作成することができる。アップロードされたモデルは、モデル共有サイトより誰でも自由にダウンロードできる。人気のモデルなどを 1 度にダウンロードして、スライドショーのように再生することもできる。そして、再生しているモデルは、その場ですぐ編集モードに移行して改変を行うことができる。

モデルには作成時点でユニーク ID を割り当てている。さらにモデル内の各モジュールには、そのモジュールが由来するモデルの ID を保存する。これにより共有サイトでは改変元-改変先という親子、あるいは継承関係を追跡することができるようになる。

たとえば、モデル A で新しく生成されたモジュールは A の ID を記憶していて、A のモジュールを別のモデル B へコピー&ペーストした際にも、A の ID はそのまま保持される。これによって、共有サイトにアップロードした際に、各モジュールの ID を調べることで、親子関係を検知することが可能となっている。

4. モデル共有サイト

本章では Modulobe のモデル共有サイトの説明をする。本サイトは Modulobe ユーザ間でのモデル共有およびコミュニケーションを促し、ひいては創造活動を活性化することを目的として作られたものである。他のサイトと同様にモデルのアップロードおよびダウンロード、モデルに対するタグ付けやコメント書き込み機能などがある。しかし特徴的な機能として、他のモデルを参考に新たに作成し、モデルを投稿した場合に自動的に継承関係が表示されるため、ユーザは引用元の情報を書き忘れる心配がない。これは、本モデル共有サイトで採用したクリエイティブコモンズの規定である「引用元の情報を示すこと」を自動的にしているものであり、他に類を見ない。

図 9 はモデル共有サイトのトップページのスクリーンショットである。「Upload」はユーザがモデルをアップロードするためのフォームで、モデルに加えてサムネイル画像のアップロードおよびタグを指定することができる。サムネイル画像はどのような画像ファイルでも指定可能だが、Modulobe にはアニメーション GIF を出力する機能があり、多くの利用者はその出力画像をサムネイルに用いている。「Popular Tags」はモデルにつけられたタグをタグクラウド形式で表示している。タグをクリックすると、そのタグがついたモデルのリストが表示される。そのほかにも特にダウンロード数の多いモデルや最近アップロードされたモデル、最近タグやコメントがついたタグのリストなどもトップページには表示される。

図 10 はモデルのページである。モデルのサムネイル画像、作者による説明文のほかに、

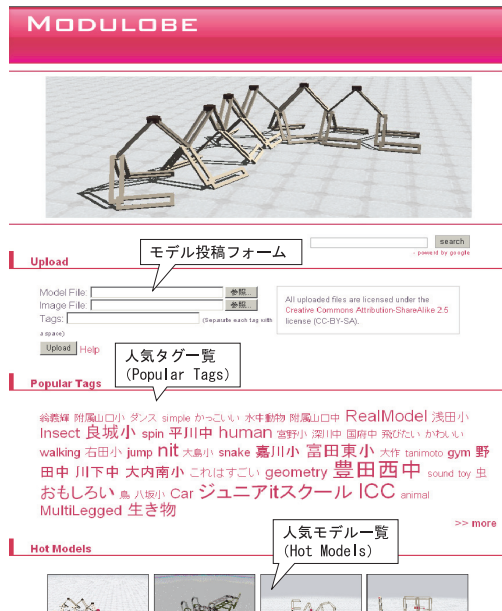


図 9 モデル共有サイトのトップページ
Fig. 9 The top page of the model sharing web site.

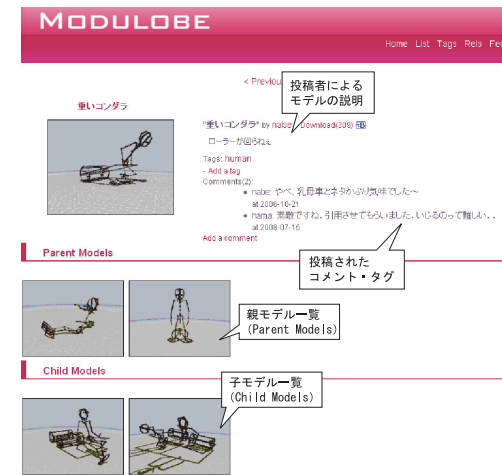


図 10 モデルのページ
Fig. 10 The page of a model.

作者および他のユーザによってつけられたタグやコメントが表示される。作者の名前をクリックすると、その作者によるモデルの一覧が、タグをクリックすると、そのタグがつけられたモデルの一覧が表示される。モデル名の横にはダウンロード数が表示されており、人気のモデルであることが分かる。画面下部にはモデルの親モデル（当該モデルを作成する際に再利用したモデル）と、子モデル（当該モデルを再利用して作られたモデル）が表示されている。一般に創作活動においては、特に影響を受けた過去の作品を陰に陽に示すことがマナーとされている。これは単なる儀礼的行動ではなく、創作者が正しく評価されるため、ひいてはコミュニティ全体の創作活動を促進するため、必要なことである。Modulobe ではシステム側がモデル間の継承関係を把握することで、自動的にその関係を可視化させることができ、作者に負荷をかけることなく作品（モデル）間の関係情報を共有することができる。

本サイトにアップロードしたモデルは Creative Commons ライセンス¹⁰⁾ で公開されており、原作者のクレジットを表示するという条件で誰でも自由にモデルを複製、頒布、二

次のモデルを作成することができる。原作者のクレジット表示については Modulobe アプリケーション自体にその機能が組み込まれているため、ユーザからすると自由にモデルをダウンロードして再利用できる環境といえる。Soda 社の *Sodaplay*¹⁾ や *Springs World 3D*²⁾ でもモデルを共有することができるサイトがあるが、このように自動的に継承関係を表示する機能は装備していない。

5. 運用結果

5.1 利用状況

本システムの試験運用を 2006 年 3 月 29 日より行った。本節では Modulobe 配布およびモデル共有サイトの試験運用結果について述べる。Modulobe の Windows アプリケーションは 2008 年 3 月 15 日時点で 171,267 回ダウンロードされ、モデル共有サイトには同じく 2008 年 3 月 15 日時点で累計約 686 万件のアクセスがあった。サイトに投稿されたモデルの数は 3,356 で、モデルのダウンロード回数は約 46 万回に至る。作者は 1,103 人であるが、作者（モデルの投稿者）は匿名でも可能なため、実際にはこれよりも多くの人々がモデル作成を行っていると考えられる。

共有サイトにアップロードされたモデルは、誰でも閲覧、ダウンロード、タグ付け、コメ

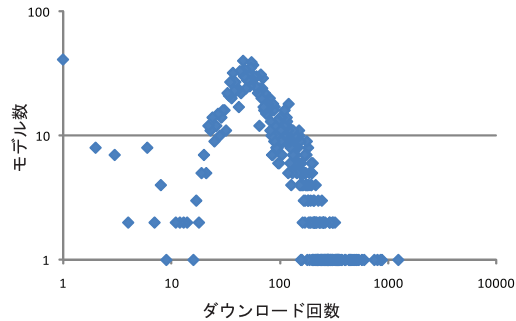


図 11 モデルのダウンロード数
Fig. 11 The number of downloaded models.

表 6 利用回数が上位のタグ
Table 6 Popular tags except for a user's affiliation.

タグ	モデル数
modulobe 秘密研究所 WS	272
ICC	172
nit	127
富田東小	108
豊田西中	82
大内南小	74
良城小	74
RealModel	70
川下中	68
生き物	67

ント書き込みが可能である。3,356 個のモデルのうち、73.5%にあたる 2,467 個が少なくとも 1 回以上ダウンロードされている。図 11 はモデルのダウンロード回数の分布を示したものである。このようなデータでは、大半のモデルはダウンロード回数が 0 か 1 で、ごく少数の人気モデルのみが大多数のダウンロード回数を占めるようになることが多い¹¹⁾。しかし図 11 を見ると、最初にダウンロード回数 1 回のところでピークがあり、次にもう 1 つ 50 回程度のところでピークが来、それ以降はベキ則に従っている。これは Modulobe のソフトウェアに、新着モデルの一括ダウンロード機能や大量のモデルをスライドショー形式で見られるなど、多くのモデルをダウンロードさせる仕組みを取り入れた結果と考えられる。

表 6 はタグ付けされたモデル数が多い上位 10 個のタグである。ユニークタグ数は 400 個

表 7 タグの分類例
Table 7 Type of tags in Modulobe.

タグの種類	タグの数	タグの例
作者情報	33	ICC, nit, 富田東小, tanimoto, など
種類	36	Car, 乗り物, 生き物, 鳥, など
品質や特徴	27	大作, simple, おもしろい, など jump, MultiLegged, spin, など
システム用	5	notags, uploadtest, など

程度であった。

本サイトでは誰でも自由にモデルへのタグ付けを行える。このようなタグ付けはソーシャルタギングと呼ばれ、創発的な情報分類手法として注目されている。ソーシャルタギングの特徴の 1 つとして様々なタイプのタグが付けられることがあげられる。Golder らはソーシャルブックマーク (Web ページへのソーシャルタギング) でのタグを「中身を示す」「持ち主を示す」「種類を示す」「品質や特徴を示す」など 7 種類に分類した¹²⁾。Golder らの分類は Web ページを対象とした個人用ブックマークのタグを対象としているため、Modulobe とは状況が少し異なる。彼らの分類を参考に、人気のタグ 100 個を対象にした分類を表 7 に示す。

作者情報およびモデルの種類について多種のタグが作られている。「jump」や「spin」などモデルの機能を示すタグは、たとえばモデルを作成する際に再利用できるモデルを検索したいときに有用である。このようなタグを自動的に付与するのはモデルの構造や挙動を解析する必要があり困難である。これは Modulobe の共有サイトにおいてソーシャルタギングによるタグ付けが有効であることを示す結果といえる。

5.2 モデルの再利用

Modulobe では他のモデルを再利用することで、モデル間に親子関係が生成される。親子関係のあるモデルの組は全部で 531 組あり、親となったモデルは 349 個 (全モデルの 10.4%)、子となったモデルは 449 個 (同じく 13.4%) であった。親子関係は何世代でも構築可能であるが、実際にはほとんどが 2 世代までで、最大で 4 世代であった。図 12 は最も多くのモデルが参加しているモデル間親子関係ネットワークである。

図 12 のネットワークには親を持たない始点ノードとなっている 4 つのモデル (434, 436, 438, 1,148) がある。436「変円」と 1,148「8 変化」はシャフト数が 10 個程度の非常にシンプルなモデルであった。この 2 つを再利用したモデルの多くは、他の複数のモデルを同時に再利用しており、親モデルを素材として活用している様子が見られる。対して 434「超メリーゴーランド」と 438「プテラノドン」は非常に複雑なモデルであり、これを起点に多く

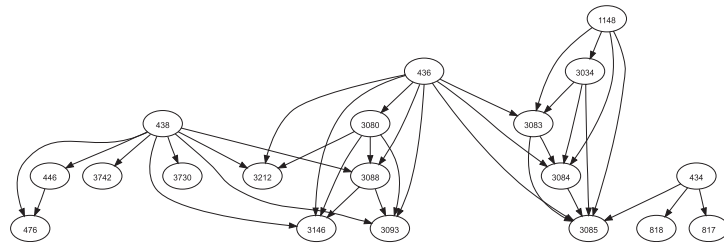


図 12 モデル間の親子関係ネットワーク
Fig. 12 A part of parent-child network.

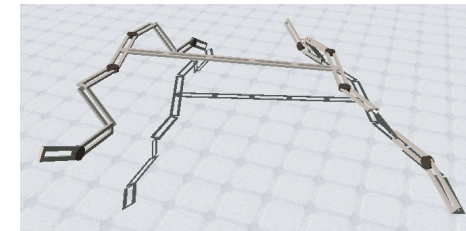


図 14 4本足で歩くモデル
Fig. 14 A model which walks on its feet.

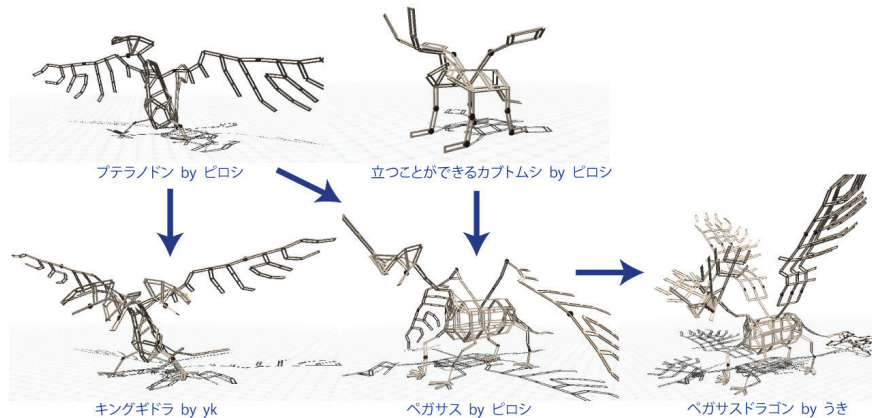


図 13 モデルの再利用による継承関係の可視化
Fig. 13 Examples of models which have parents and children.

の複雑なモデルが作られているものの、大半が親モデルが1つであり、親モデルをベースとして改造する形で活用している様子が分かる。

図 13 は図 12 のネットワーク内にある 438「プテラノドン」および 3,080「立つことができるカブトムシ」を始点とした親子関係ネットワークを持つモデルを図示したものである。再利用を介して複雑なモデルの生成が、複数人によって行われていることが分かる。

なお、Modulobe はモデルの中身が容易に見えるため、必ずしもコピーを行わなくても容易に模倣をすることができる。実際に、モデル共有サイト内のコメントから模倣したことがうかがえるケースがいくつかあったが、Modulobe のシステム上ではコピーが行われていな

かった。このような、ユーザがモデルを見て模倣することによって生じる継承関係をどのようにシステムがトラッキングするかは今後の課題である。

5.3 表現の多様性

Modulobe のモデルによく見られるものの1つに、水平移動するモデルがあげられる。ワークショップでユーザを観察していると、最初は試行錯誤で不規則に飛んだり跳ねたりするモデルを作るが、コツをつかんでくると、構造やリンクの振幅を制御して、安定して水平移動するモデルを作ろうと試み出す様子が幾度も見られた。また、共有サイト内では、より早く水平移動するモデルを作ろうと競争が行われているケースもあった。

Modulobe のモデルで水平移動を実現する方法は様々である。以下に、代表的な水平移動を行うモデルを示す。

図 14 は、右前足と左後ろ足、左前足と右後ろ足とを連動させ、足を上げながら前にもっていき、足を下げながら後にもっていくという動作を繰り返すことによって前進するモデルである。ほかにも、骨格はほとんど同じであるが、左右の足を同時に動かし、前後の足で違う動きを繰り返すことによって、ジャンプしながら前進するモデルも見られた。

図 15 は、蛇のように這うことによって前進するモデルである。地面との摩擦力は、接地する角度によって摩擦力の働く方向が異なるため、このように角度を変化させながら左右に移動するだけで、前進する方向に力が発生する。なお、モジュールの接地する面によって摩擦係数が異なるため、こちらの方が素早く前進する。

図 16 は、車輪を回転させることによって前進するモデルである。このモデルはまだ安定して水平移動しないが、このモデルを見た他のユーザが3輪により安定移動するモデルを作成し公開している。

以上のように水平移動という機能1つとっても、様々な方法で実現されていることが分か

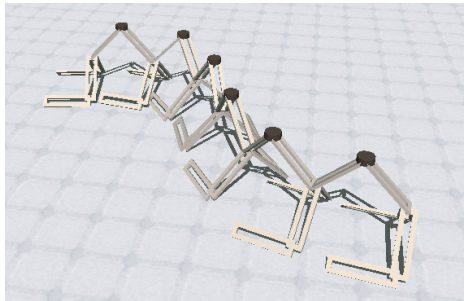


図 15 這うことによって前進するモデル
Fig. 15 A model which crawls on the ground.

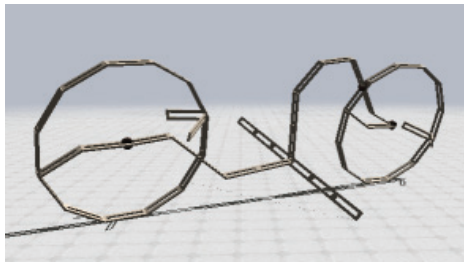


図 16 車輪を回転させて前進するモデル
Fig. 16 A model which has wheels.

る。モジュールとモジュール間の動きを設定するだけというシンプルな仕組みが、このような多様な水平移動方法の発案を促し、また、共有サイトを介したユーザ間の相互作用が個々の水平移動方法をより洗練させていったと考えられる。

6. おわりに

本研究では、単純な板状部品を多数用いることで様々な動きを表現できる物理シミュレーション環境 Modulobe を構築した。ユーザは、分かりやすい GUI により 3 次元状にモジュールを組み合わせ、部品間の接続部分に動きを指示することができる。また、この Modulobe で作成したモデルを共有するサイトを構築した。他のモデルを参考に新たなモデルを投稿した場合に自動的に継承関係が表示されるため、ユーザは引用元の情報を書き忘れる心配が

ない。

ペナルティ法をベースに改良を加えた物理シミュレーションにより、一般的な PC でもストレスなくインタラクティブに操作可能なモデル作成および動作環境を構築することができた。開発したソフトウェアのダウンロード数は 17 万件にのぼり、共有サイトでは 3,000 を超えるモデルが公開されている。公開されたモデルからは、リンクとシャフトの 2 種類のモジュールの組合せという単純な構成ながら、多数を組み合わせることによって多様な表現が生まれていることも確認できた。これは Modulobe のモジュールの基本設計が妥当なものであったことを示す結果といえる。また、共有サイトではユーザ間でコミュニケーションが行われるとともにモデルの再利用や模倣が行われ、共有サイトをきっかけに創造活動が促されている様子が確認できた。

2006 年、日本国内では仮想空間上でオブジェを作成し販売することができる *Second Life*¹³⁾ が、新しい表現活動の場として多くのクリエイタから注目を集めた。そして 2007 年には *YouTube*¹⁴⁾ やニコニコ動画¹⁵⁾ など動画共有サイトも同様に表現活動の場として注目を集めた。特に後者は他者の作品を改造したりコラージュしたりした動画が多数作られ、表現活動のコミュニティが形成された。いずれもここ数年の間に特に注目を集めたものであり、仮想空間と表現物の共有は、近年のインターネットのトレンドの 1 つといえる。仮想空間とモデル共有サイトにより構成される Modulobe は、その両方と深く関わっており、本システムの設計および試験運用の知見は同様のシステムを構築・運用するにあたって有用であると考えられる。

一方で、Modulobe のモデル公開・共有の場としてこのような仮想空間や動画共有サイトを利用していくことも考えられる。今後は継承関係のトラッキングなどの今回浮かび上がった課題の解決とともに、他のシステムとの連携により Modulobe によって創作された表現物をより広く公開し共有する環境の構築に取り組んでいきたい。

謝辞 本研究の一部は、科学技術振興事業団「JST」の戦略的基礎研究推進事業「CREST」における研究領域「デジタルメディア作品の制作を支援する基盤技術」の研究課題「情報デザインによる市民芸術創出プラットフォームの構築」の支援により行いました。

参考文献

- 1) Burton, E.: Sodaplay (2008). <http://www.sodaplay.com/>
- 2) Falco, M.: Springs World 3D. <http://www.sodaplaycentral.com/features/sw3d2/>
- 3) 藤井伸旭, 長谷川晶一, 橋本直己, 小池康晴, 佐藤 誠: ペナルティ法を用いた剛

- 体運動シミュレータの開発, 日本バーチャルリアリティ学会第7回大会論文集 (2002).
- 4) Waddoups, N.: Juice. <http://www.natew.com/juice/>
 - 5) Smith, R.: Open Dynamics Engine (2008). <http://ode.org/>
 - 6) SCEI: パネキット (1999).
 - 7) ヘンリー・ヴィンセック: レゴの本—創造力をのばす魔法のブロック, ブッキング (2004).
 - 8) Baraff, D.: Analytical methods for dynamic simulation of non-penetrating rigid bodies, *Computer Graphics Proceedings (SIGGRAPH89)*, Vol.23, pp.223-232 (1989).
 - 9) 長谷川晶一: ゲームと実時間物理シミュレーション技術, IGDA 日本ゲームテクノロジー研究会 (2004).
 - 10) Creative Commons: Creative Commons Attribution-Share Alike 2.5 Generic (2008). <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/>
 - 11) Barabasi, A.-L.: 新ネットワーク思考, NHK 出版 (2002).
 - 12) Golder, S. and Huberman, B.A.: Usage Patterns of Collaborative Tagging Systems, *Journal of Information Science*, Vol.32, No.2, pp.198-208 (2006).
 - 13) Linden Research, Inc.: Second Life (2008). <http://secondlife.com/>
 - 14) YouTube, LLC: YouTube (2008). <http://youtube.com/>
 - 15) ニワンゴ: ニコニコ動画 (2008). <http://www.nicovideo.jp/>

(平成 20 年 3 月 24 日受付)

(平成 20 年 9 月 10 日採録)



江渡浩一郎 (正会員)

1997 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修了。修士 (政策・メディア)。同年国際メディア研究財団に所属。メディア・アーティストとして作品制作を行う。2002 年独立行政法人産業技術総合研究所に所属。ネットワーク上の共有知に興味を持つ。



渡辺 訓章

1996 年東京電機大学理工学部情報科学科卒業。同年ゲームデザイナーおよびプログラマとしてゲーム制作を行う。2004 年独立行政法人産業技術総合研究所に所属。2006 年有限会社すさみを設立、代表取締役。物理シミュレーション技術を応用したエンターテインメント環境に興味を持つ。



川崎 禎紀

2006 年東京大学大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻修士課程修了。修士 (理工学)。2004 年独立行政法人産業技術総合研究所に所属。2005 年仮想生物構築環境 Modulobe の制作に参加。



濱崎 雅弘

2000 年同志社大学工学部知識工学科卒業。2002 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。2005 年総合研究大学院大学数物科学研究科博士後期課程修了。博士 (情報学)。同年より、産業技術総合研究所情報技術研究部門勤務。情報推薦やオンラインコミュニティの研究に従事。人のネットワークを活用した情報システムに興味がある。人工知能学会, 電子情報通信学会, ACM 各会員。



西村 拓一 (正会員)

1992 年東京大学工学系大学院修士 (計測工学) 課程修了。同年 NKK (株) 入社。X 線, 音響・振動制御関係の研究開発に従事。1995 年技術研究組合新情報処理開発機構つくば研究センタに outward, 1998 年 NKK (株) 復帰。1999 年技術研究組合新情報処理開発機構つくば研究センタに所属。2001 年独立行政法人産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センターに所属, 2005 年同情報技術研究部門実世界指向インタラクショングループ長, 同年筑波大学大学院知能機能システム専攻助教授 (連携大学院) を併任, 現在に至る。博士 (工学)。時系列データ検索・認識, 実世界情報支援に興味を持つ。電子情報通信学会, 人工知能学会, ヒューマンインタフェース学会, 赤外線学会, ACM 各会員。