

精緻なフィジカルインタラクションにおいて生物らしさを実現するバーチャルクリーチャの構成法

三武 裕玄^{*1}

青木 孝文^{*1}

長谷川 晶一^{*1}

佐藤 誠^{*1}

Reactive Virtual Creatures for Dexterous Physical Interactions

Hironori Mitake^{*1}, Takafumi Aoki^{*1}, Shoichi Hasegawa^{*1}, and Makoto Sato^{*1}

Abstract – Dexterous physical interactions with virtual creatures are important to bring fun of playing with animals into arts and entertainments. Virtual creatures are required to react in various ways stands on physical and psychological laws according to highly varied user inputs for reality of interaction. We propose to construct virtual creatures with physics simulator, sensor / attention models and physical motion controllers. Physical simulator and motion controllers generate highly varied reactions with physical reality, and sensor / attention models provide psychologically feasible target selection for motion controllers. We constructed an example of the virtual creature, and communicative physical interactions are realized as guessing and attracting virtual creature's attention by touching them via haptic device. With the example we confirmed effectiveness of the proposal experimentally.

Keywords : Virtual Creature, Attention, Sensorimotor System, Motion Generation, Physically Realistic Interaction

1 背景

バーチャルクリーチャ(人間の考えた生き物・キャラクターの総称, 以降では VC と略称) は, 映画やテレビの登場人物・ゲームのキャラクターなど様々な場面で使われ, インタラクションや感情移入の対象となり, 仕草や行動・表情等で個性やストーリーを表現する役割を担っている. そのため, 魅力的な体験を提供するために, インタラクションの対象としてリアリティが高く, 感情移入しやすい VC の実現が重要視されてきた.

一方, 現実の生き物に触れる事は人々に楽しみや癒しを提供することから, VC に触れるインタラクションの実現は作品に生き物に触れる楽しさをもたらし, アート性やエンタテインメント性を高めると期待される. 近年のインタフェース技術の発展によるフィジカルな (=直接的・物理的な) インタラクションの実現に伴い, VC とのフィジカルなインタラクションの実現が重要性を増している.

このことから, 筆者らはリアリティのあるフィジカルなインタラクションが可能な VC[1] を実現し, 実現した VC である Kobito と実物の紅茶缶を通じてインタラクションする作品『Kobito -Virtual Brownies』[2] を制作した. Kobito は, 実際に缶が衝突したかのような力学的妥当性とあらかじめ作りこまれたかわいら

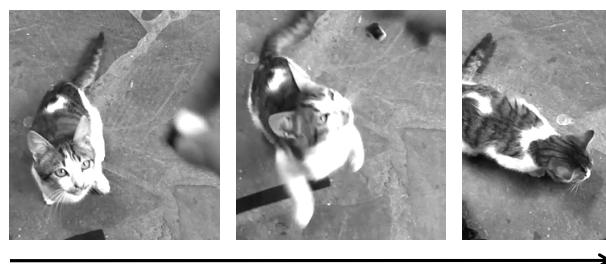


図1 餌に注意を払う猫

Fig.1 A Cat Paying Attention for a Food

しい仕草を両立する多様な反応動作を行い, バーチャルな生き物の存在感の提示に成功した. 展示では多数の体験者が, テーブル上に置いた缶に Kobito が走り寄って押す動作を観察したり, 缶を手に持ち Kobito をつついて転倒させるフィジカルなインタラクションを体験する様子が見られた.

一方, これらの体験行動はペット等現実の生き物に対するものとは異なる. 主な相違としてインタラクションが精緻でない点, Kobito が行動の意図を表出しない点の2点が挙げられる. 現実の生き物の多くは我々の手や指より比較的大きく, つつく・なでる・つまむなど精緻なインタラクションが可能であるのに対し, Kobito とのインタラクションは自身と同サイズの缶を通じて行うため押す・叩くなどの動作しか実現しない. また, 現実の生き物は図1のように意図や注

^{*1}東京工業大学 精密工学研究所

^{*1}Tokyo Institute of Technology Precision and Intelligence Laboratory

意・関心など行動の心理的要因を反映した動作を行うため、我々は相手の意図を想像し心理的な駆け引きを行ったり、相手に感情移入したりすることができる。一方 Kobito は体験者の手に注意を払う等の動作を行わず、こうしたインタラクションが成立しない。

しかし、精緻なフィジカルインタラクションと生き物らしい意図の表出の両立には困難が伴う。精緻なフィジカルインタラクションでは VC に対する体験者の入力に格段に多様化するため、VC は入力に応じた多様で適切な反応動作を要求される。しかし、想定されるあらゆる入力に対し、現在行われているようにアニメータによる作り込みやモーションキャプチャ等で、あらかじめ生き物らしく意図を表出する反応動作を準備しておくことは難しい。これは VC 一般についていえる問題である。

よって、VC を用いた作品に生物に触れる楽しさをもたすためには、精緻なフィジカルインタラクションにおいて生物らしく意図を表出する VC の動作生成手法が必要であるといえる。そこで本研究では、次の 3 点に着目し実現を目指す。

まず、手指で生き物の身体の一部に接触して力のやり取りを行うフィジカルインタラクションに着目する。現実の生き物との間では、触れて動きを感じる、動きを妨げる、力を加えて姿勢を変化させるなど、身体の一部との力のやり取りに基づく精緻なフィジカルインタラクションが多く行われる。これは能動的に動く生き物とのフィジカルなインタラクションとして基本的なものといえる。

次に、生き物らしさの実現のため、生き物が感覚に基づいて行動することに着目する。現実の高等動物の多くは周囲の状況を感じ、感覚に基づく判断により行動する。一方で我々は生き物がおかれた状況を観察して生き物の感覚内容を推測することで、生き物の行動の意図を想像できる。そのため、例えば視野外の物体を触覚・聴覚無しに察知するなど、感覚を逸脱した原因による行動は違和感を生じる。よって、VC が現実の動物と同様の感覚に基づいて行動することが重要である。

さらに、意図を表出する動作として注意の表出に着目する。現実の高等動物の多くは注意の働きにより、重要と見なした対象に多くの感覚器を向けようと動作する。そのため、注意による動作は生き物が重要と感じる対象を表出する。

以上より本研究では、手指によるフィジカルインタラクションにおいて、生き物らしい感覚に基づいて注意・関心を表出する多様な反応動作を行う VC の構成法の実現を目的とする。これにより、体験者が VC の心の働きを想像しながら多様なフィジカルインタラク

ションを行うことを可能とし、VC を用いた作品に生き物に触れる楽しさを付与する基盤を実現する。

2 関連研究

生き物らしく動作することを目的とした人工物の研究は多数行われている。

まず、実世界のロボットを対象として、生物らしい動作やインタラクションの実現を目指した研究が数多く行われてきた。これはカメラ・接触センサ・マイクなど、感覚器を模擬したセンサをロボットに搭載し、生き物の認知メカニズムを模擬したセンサデータ処理と運動メカニズムを模擬した動作制御により、生き物らしい動作や反応を行わせるものである [3, 4, 5]。一方本研究は、実世界でなくバーチャル世界で同様の仕組みにより生き物らしく動作する VC を目指す。バーチャル世界では VC を含む環境全体が計算機内で管理される。実ロボットが実世界のセンサデータに基づいて物体の切り出しや種類の認識等をボトムアップ的に行う必要があるのに対し、VC は環境を管理する計算機から情報を取得して容易に知覚入力や認知情報を再現でき、高次の心理機能の模擬に用いることができる。

一方、VC の研究では、フィジカルなインタラクションを実現する動作生成の研究が多数行われている。これらは主に、あらかじめ準備された動作データを用いるもの [6, 7, 8]、動力学計算により動作を生成するもの [9, 10, 11]、両者を組み合わせて用いるもの [12, 13] に分類できる。力学に従った行動や反応動作を生成する手法であり、インタラクションに応じて意図や注意を表出する動作を自動生成する機構は含まない。また、精緻なフィジカルインタラクションへの適用を考えると、動作データを用いる手法は想定すべき入力の多様化に伴って準備すべきデータ量が膨大になる問題がある。動作データと計算を組み合わせる手法でも、基本となる動作を準備する必要があるものや、単純化した力学モデルを用いたりするのは、精緻なインタラクションに対する反応動作生成への適用は困難である。このことから、本研究ではリアルタイム動力学シミュレーションを用いて VC の動作を全て計算で生成する方式をとる。

注意を表出する動作の自動生成法としては、視線移動動作を対象とした研究がある。ボトムアップ性視覚的注意を模擬したモデルにより、アニメーション生成や対話インタラクションにおいて注意を反映した視線を自動生成する手法 [14, 15] や、統計モデルにより対話インタラクションにおいて視線を生成する手法 [16] 等が提案されている。アニメーションの作成や対話インタラクションにおける視線生成を扱っており、フィジカルなインタラクションでの反応動作生成にそのま

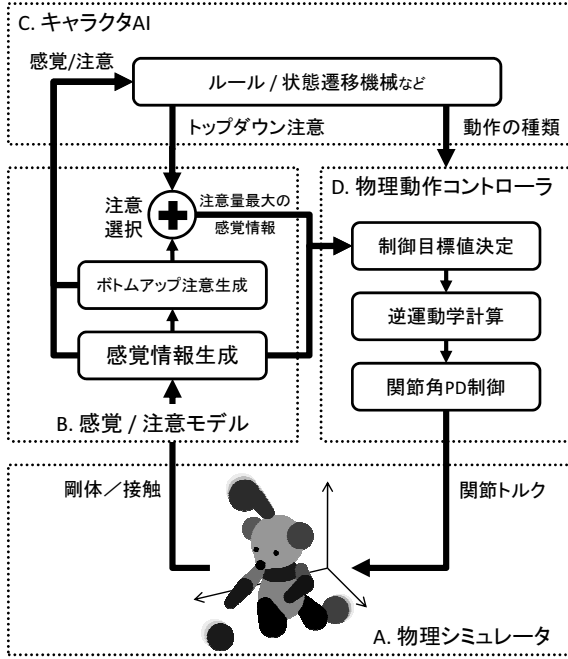


図2 提案手法の全体像
Fig. 2 Overview of the proposed method

ま用いることは難しい。

近年、バーチャルペットとのフィジカルインタラクションを目的としたゲームが市販されている [17, 18]. タッチパネルディスプレイや複合現実感環境でバーチャルペットにペンや手で触れることができ、バーチャルペットはあらかじめ作りこまれた魅力的な反応動作を行う。しかし、ペンや手で触れる多様な入力に対して、受動的な変形や限られたパターンでの反応動作しか行わないため違和感がある。

3 提案手法

1章で述べた VC に関する要求を以下にまとめる。

- 手指による身体の一部との接触を伴うフィジカルインタラクションに対し、状況に応じて多様な反応動作を行うこと
- 動物と同様の感覚のモデルに基づいて行動決定・動作生成を行うこと
- VC 自身の注意・関心を動作で表出すること

これらの要求を実現するため、リアルタイム物理シミュレータ、物理動作コントローラ、感覚・注意モデル、キャラクタ AI による VC の構成 (図 2) を提案する。

フィジカルインタラクションの実現には VC が力学に従って動作することが重要である。そのため提案手法ではリアルタイム物理シミュレータを用いて動作を生成する (図 2A)。さらに身体の一部への力の作用を計算するため VC を多関節剛体モデルで表現する。

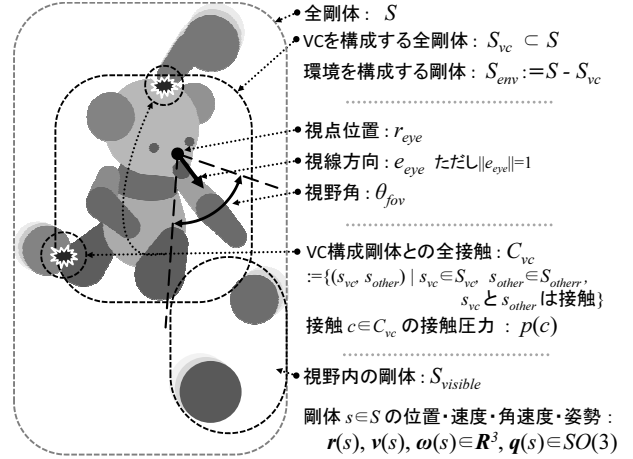


図3 VC と環境に関する定義
Fig. 3 Definition on the VC and the Environment

動力学モデルを動作させるため、現実の動物同様に関節トルク制御で目的の動作を実現する、物理動作コントローラを構築し用いる (図 2D)。到達運動や注視など動作の種類ごとにコントローラを用意し、状況に応じて複数組み合わせることで状況に応じた多様な動作を可能にする。

また、VC 周囲の状況を物理シミュレータから取得し、高等動物の感覚系を模擬したモデルにより VC にとっての感覚情報を再現する (図 2B)。さらに、選択的注意を模擬したモデルにより注意の対象を選択し、注意対象の位置・運動に基づいて物理動作コントローラを動作させることで注意・関心を動作で表出する。

これらに加え、現在のゲーム等の多くで行動決定に用いられる if-then ルールや状態遷移機械等、キャラクタ AI と呼ばれる仕組みを用い、感覚情報をもとに作動させるコントローラの種類を選択することで VC の行動を決定する (図 2C)。

4 実現

提案に基づき、実際に VC を構成した。本実現例を用い、提案する構成法の具体的な適用について述べる。なお、以降の議論で用いる定義を図 3 に示す。

4.1 物理シミュレータ

動力学シミュレータと、VC の身体構造を表現したシミュレーションモデルにより VC の動作を生成する。力学に従った多様な動作やフィジカルなインタラクションが可能な VC を実現する。

提案手法ではリアルタイム剛体シミュレータを用いる。剛体シミュレータは複数の剛体の衝突・摩擦等を計算し、剛体の移動・回転をシミュレートする。また、VC のシミュレーションモデルとして多関節剛体モデルを用い、関節トルク制御によって駆動する。同時に

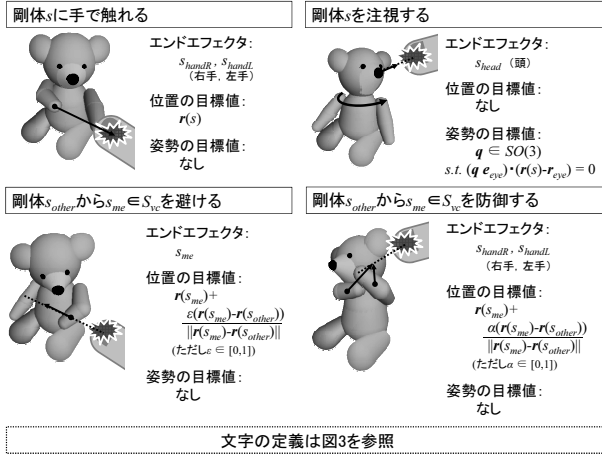


図4 制御目標値の算出

Fig. 4 Target Values of Controlling

VCの周囲の環境を構成する物体も剛体関節モデルで表現し、シミュレーションの対象とする。これにはプレイヤー（体験者）が操作する物体やプレイヤーの手指自体も含まれる。

これにより、VC身体の全体や一部に対する物体やプレイヤーの手指による力が、VCの動作やポーズに与える影響が力学に従って計算され、精緻なフィジカルインタラクションが実現する。VCに力覚デバイス等を介して触れれば、実際の動物に触れた場合と同様にVCの動作を力で感じたり、VCに触れて力を加えることで動作を妨げたり姿勢を変化させたりすることが可能となる。また、状況に応じて力学的に正しい動作が自動生成される。例えばVCが物体を持ち上げる際、物体の重量によって持ち上げる速さや重心位置に差が生じるなどである。

4.2 物理動作コントローラ

動力学シミュレーションされた多関節剛体モデルで動作させるため、関節トルク制御により動作を実現する動作コントローラを複数用意し、状況に応じて組み合わせる。

VCに様々な動作を行わせるため、動作コントローラは視線移動・到達運動など、動作の種類ごとにそれぞれ用意する。また、個々の動作コントローラは、注視目標や到達目標など動作の目標を任意に設定して目的の動作を実現できるよう構築することで、VCに対象の位置・運動に応じた動作を行わせる。このような動作コントローラを実現するため、提案手法では動作の目標位置・姿勢決定、逆運動学計算（IK）、関節角PD制御の3段階で動作制御を行う。

まず、動作の種類に応じて、VC身体の剛体 $s_{vc} \in S_{vc}$ (図3) から動作させる剛体（以降ではエンドエフェクタと呼ぶ）を選択し、エンドエフェクタの目標位置・

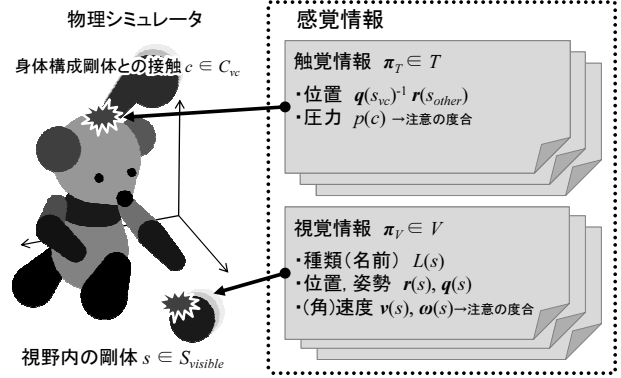


図5 感覚情報

Fig. 5 Sensor Information

姿勢を、動作目標剛体の位置・姿勢・運動に応じて決定する。物体を注視しながら手先を到達させるなど、VCは複数の動作を同時に実行しようとする。よって、エンドエフェクタの運動は複数同時に行う必要がある。そこで、ヤコビアン の擬似逆行列を用いた逆運動学計算（IK）により、可能な限り全てのエンドエフェクタを目標位置・姿勢に近づけるよう、身体を構成する各関節の角速度を計算する。最後に、各関節がIKで計算された角速度をPD制御によって実現するよう、各関節トルクを決定する。

本実現例では4種の動作コントローラを構築した。図4にそれぞれの動作についてエンドエフェクタと目標位置・姿勢決定の式を示す。

4.3 感覚情報生成

現実の動物を模擬した感覚系のモデルを用い、VCの行動決定と動作生成を行う。視界に入った物体に反応するなどの生き物らしい行動を実現したり、視野外の物体を触覚無しに察知するといった動物の感覚の限界を超える不自然な動作を防止する。感覚系として、特に視覚と触覚に着目する。動物の大半が視覚から最も多くの情報を得るため、視覚に基づいて行動を決定することはリアリティのため重要である。また、フィジカルなインタラクションではVCに直接触れられるため、VCが触覚刺激に反応する事も重要である。

このことから、VCにとっての視覚・触覚を再現した情報を、物理シミュレータ内の剛体の位置・運動・接触状態に基づいて生成する。

まず、視覚情報は、VCの視野に入った物体について得られる、物体の種類・位置・運動の情報と定義する。剛体シミュレータ内では剛体が物体を構成する最小単位であるため、視覚情報は剛体ごとに算出する。

また、触覚情報については、身体の一部に対する多様な触れ方が想定されるため、身体上の接触位置および接触面積・接触力などの触れ方の情報が必要であ

る．剛体シミュレータは剛体同士の接触判定・接触力計算を行って剛体の運動を計算していることから，剛体シミュレータから VC 身体を構成する剛体の接触状態を取得し触覚情報として用いる．

本実現例における視覚情報 V ・触覚情報 T の概略を図 5 に，定義を式 (1),(2) に示す．

$$V := \{(s, \mathbf{r}(s), \mathbf{q}(s), \mathbf{v}(s), \boldsymbol{\omega}(s), L(s)) \mid s \in S_{visible}\} \quad (1)$$

$$T := \{(c, p(c), \mathbf{q}(s_{vc})^{-1} \mathbf{r}(s_{other})) \mid c := (s_{vc}, s_{other}) \in C_{vc}\} \quad (2)$$

ここで， $S_{visible}$ は視野内の剛体であり，式 (3) で定義する．

$$S_{visible} := \{s \in S_{env} \mid \left(\frac{\mathbf{r}(s) - \mathbf{r}_{eye}}{\|\mathbf{r}(s) - \mathbf{r}_{eye}\|} \cdot \mathbf{e}_{eye} \right) \geq \cos(\theta_{fov}/2)\} \quad (3)$$

また， $L(s)$ は剛体ごとに予め付与された剛体の種類を表すラベル (右手, 頭, リンゴ, など) である．また，触覚情報の第 3 要素 $\mathbf{q}(s_{vc})^{-1} \mathbf{r}(s_{other})$ は，VC の身体座標を基準とした接触対象の位置である．

その他の文字の定義は図 3 を参照されたい．

4.4 選択的注意

高等動物に備わる基本的な認知機構として，より重要な対象に意識や感覚器を向けようとする選択的注意の作用に着目する．感覚器を注意対象に向けて動かす行動は，どの対象を重要と判断したかを反映しており，観察者が動物の心の動きを想像する手がかりとなる．

提案手法では，選択的注意を模擬し，次に示す式 (4) に従って注意対象の感覚情報 $\pi_{attention}$ を選択する．

$$\pi_{attention} := \arg \max_{\pi} (A_{bot}(\pi) + A_{top}(\pi)) \quad (4)$$

ここで，

$$\pi(\in V \cup T) = \begin{cases} (s_{\pi}, \mathbf{r}_{\pi}, \mathbf{q}_{\pi}, \mathbf{v}_{\pi}, \boldsymbol{\omega}_{\pi}, L_{\pi}) & \text{if } \pi \in V \\ (c_{\pi}, p_{\pi}, \mathbf{r}_{\pi}) & \text{if } \pi \in T (c_{\pi} = (s_{vc_{\pi}}, s_{other_{\pi}})) \end{cases}$$

動物の注意は周囲より際立った感覚情報に起因するボトムアップ性のものと，意志に起因して特定の対象に向けられるトップダウン性のものがある．提案手法ではまず，感覚情報の各要素 π についてボトムアップ性注意の程度を表す数値 $A_{bot}(\pi)$ を計算する．次に，意思決定の仕組みであるキャラクタ AI によって感覚

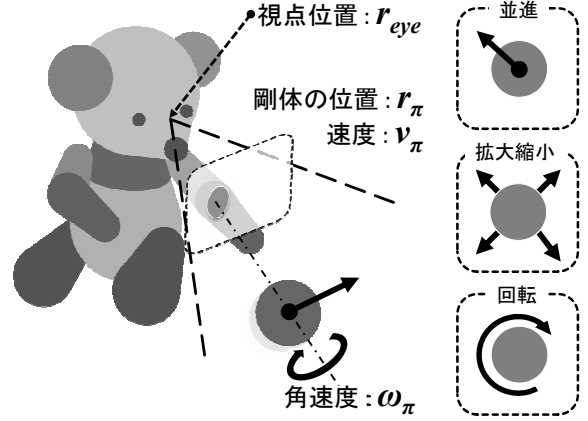


図 6 ボトムアップ性視覚的注意の決定要素
Fig. 6 Bottom-up Visual Attention

情報に対する関心の意思の度合い $A_{top}(\pi)$ を計算し，加算する．最後に，注意の程度の合計値が最大である感覚情報を注意対象として選択する．

次に，ボトムアップ性注意の具体的な決定法を述べる．本実現例では，網膜像の動きに対する視覚のボトムアップ性注意と接触圧力に対するボトムアップ性注意を実現した．ボトムアップ性注意をモデル化した Saliency Model[14] は，網膜像上で周囲と異なる色・形状特徴を持つ視覚刺激を注意の対象とする．一方，想定するインタラクションではプレイヤーは物体や手指の動きを入力するため，動きに対するボトムアップ性注意の再現が反応動作のために重要である．ここで，静止した背景に対して十分小さな剛体が運動している場合，剛体は常に背景と異なる運動特徴を持つ．そこで，本実現例では運動する剛体を視覚的注意の対象とし，運動の大きさによって視覚的注意の大きさを定義する．具体的には，運動する剛体は網膜像上では並進・拡大縮小・回転の 3 種類の運動 (図 6) を行うことから，式 (5) により視覚的注意量を定義する．定義から，より激しく動く物体はより大きな注意を得る．

$$A_{visual}(\pi) := k_T \|\mathbf{v}_{\pi} - \mathbf{d}_{\pi}(\mathbf{d}_{\pi} \cdot \mathbf{v}_{\pi})\| + k_S \|\mathbf{d}_{\pi} \cdot \mathbf{v}_{\pi}\| + k_R \|\mathbf{d}_{\pi} \cdot \boldsymbol{\omega}_{\pi}\| \quad (5)$$

ただし，

$$\mathbf{d}_{\pi} = \frac{\mathbf{r}_{\pi} - \mathbf{r}_{eye}}{\|\mathbf{r}_{\pi} - \mathbf{r}_{eye}\|}$$

また， k_T, k_S, k_R は各運動要素が注意量に寄与する比率を設定するためのパラメータである．

触覚的注意も同様に，VC の身体に対する剛体の接触を対象とし，接触圧力の大きさによって触覚的注意の大きさを定義した (式 (6))．接触圧力に基づいて定義することで，強い力での接触のほか，尖った物体に

よる接触がより大きな注意を得る.

$$A_{touch}(\pi) := k_P p_\pi \quad (6)$$

ただし k_P は圧力が注意量に寄与する比率を設定するためのパラメータである.

式 (5),(6) を用い, $A_{bot}(\pi)$ を両者の和として定義する (式 (7)).

$$A_{bot}(\pi) := A_{visual}(\pi) + A_{touch}(\pi) \quad (7)$$

これらのモデルを用いて, VC に注意を表出する動作を行わせることができる. 定義より, ボトムアップ性注意の対象とトップダウン性注意の対象が異なる場合両者は拮抗する. この構造から, 関心対象に注意を集中しようとしつつも, 視界に入る無関係な物体に集中を阻害されるといった所作が生成される.

また, 定義に含まれる k_T, k_S, k_R, k_P 等のパラメータや, トップダウン性注意の値の大小を変化させることで, 視覚・触覚刺激による注意の誘発のされやすさや, ボトムアップ性注意による注意選択の阻害されやすさを変化させることができる. パラメータは, VC のおかれた状況や, 実現したい VC の個性などの設定に基づき, 目的とする挙動が実現するよう設定・調整する. これらのパラメータはその役割がわかりやすいため, VC の挙動を見ながら容易に調整することができる.

4.5 キャラクタ AI

現在のゲームでは, ゲームキャラクタに状況にあわせた行動を行わせるために, ルールや状態遷移機械などのキャラクタ AI と呼ばれる仕組みを用いる事が多い. 提案手法でも, VC の行動決定のためにキャラクタ AI を用いる.

提案手法においてキャラクタ AI には, 生き物らしい行動判断を行うこと, 選択的注意モデルや物理動作コントローラと組み合わせて使用できることが要求される. そのため, まずルールや状態遷移機械の条件判断を感覚情報のみに基づいて行う. これにより, 実際の生物の限界を超えた判断能力を VC が持つことを防ぐ. また, キャラクタ AI により感覚情報に対するトップダウン注意の数値の決定, および使用する物理動作コントローラの決定を行う. これにより, キャラクタ AI の決定に従って VC に注意や動作を行わせることができる.

本実現例におけるキャラクタ AI は, 以下の 2 つのルールから成る. なお, 両ルールは同時に適用されるものとし, その場合 2 種類の動作コントローラが同時に実行される. また, t_{look}, t_{touch} は閾値であり, 表現したいキャラクタの設定に応じて調整する.

● ルール 1

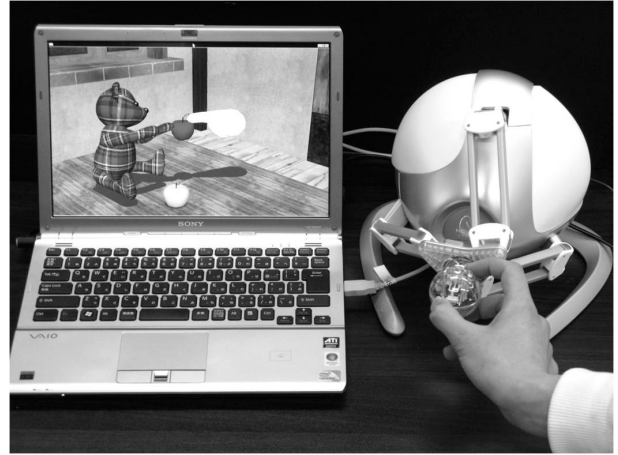


図 7 実験環境

Fig. 7 Experimentation Environment

条件 $A_{bot}(\pi_{attention}) + A_{top}(\pi_{attention}) > t_{look}$

実行コントローラ 視線移動

● ルール 2

条件 $A_{top}(\pi_{attention}) > t_{touch}$

実行コントローラ 手先到達運動

5 評価

生き物らしい注意・関心の表出を伴う多様なフィジカルインタラクションが実現したことを検証するため, 4 章で述べた VC とのインタラクション実験を行った.

5.1 実験環境

力覚インタフェースによる VC とのインタラクション環境を構築した (図 7). 力覚インタフェースとして NOVINT Falcon(3 自由度)を使用した. 被験者はポインタを操作して VC に触れたり, VC の周囲にある物体を持って動かすことができる. 力覚レンダリングにはバーチャルカップリングを用い, カップリングのバネ係数を $K_p = 50000$, ダンパ係数を $K_d = 200$, ポインタの質量を $0.0001[\text{kg}]$, 更新周期を $50[\text{Hz}]$ とした.

物理シミュレータとして Springhead2[19] を用いた. Springhead2 は一般的な PC 程度の計算資源でリアルタイム動作する剛体運動シミュレータであり, 解析法による衝突計算を備えている. 物理シミュレータ内には, VC の他に, 被験者が操作でき VC の注意の対象となる物体として 2 個のリンゴ (赤・緑) を配置した.

VC はラップトップ PC (Intel(R) Core2Duo プロセッサ T9800, ATI Mobility Radeon HD4570 搭載), Windows XP 上で動作させた. 本環境で動作生成及び物理シミュレーションの処理は $30[\text{cycle/sec}]$ 以上で動作しており, リアルタイムでのインタラクションが実現している.

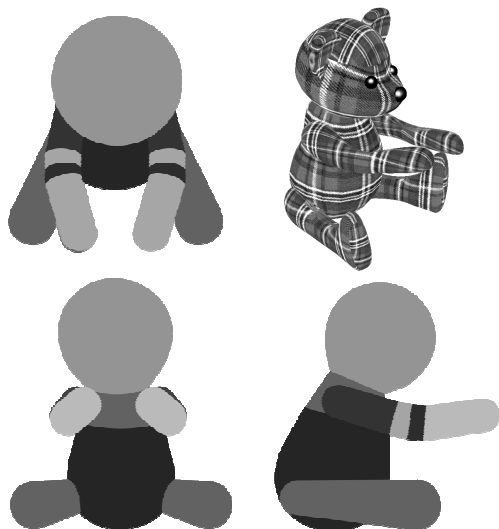


図8 実験で使した多関節剛体モデル
Fig.8 Articulated Body Model of Virtual Creature for Experimentation

表1 実験で使したパラメータ
Table 1 Parameter Settings for Experimentation

パラメータ	設定値	パラメータ	設定値
$L(s_{pointer})$	"pointer"	$A_{top}(s_{pointer})$	0.5
$L(s_{greenapple})$	"greenapple"	$A_{top}(s_{greenapple})$	0.0
$L(s_{redapple})$	"redapple"	$A_{top}(s_{redapple})$	1.0
k_T	0.03	t_{look}	0.05
k_S	0.03	t_{touch}	0.2
k_R	0.03	k_p	2.0

5.2 VCの設定

VCの剛体関節モデルを図8に示す。実験で使したモデルは17剛体・16関節・44自由度である。

実験で使したパラメータを表1に示す。これらの値は、実験環境において被験者の入力に対し適切な反応が得られるようVCの挙動を観察しながら調整した。

5.3 実験

被験者に10分間VCとインタラクションを行ってもらい、様子を映像で記録した。この際、リンゴに対するトップダウン性注意の値を1分おきに増加させ、被験者が実験中にトップダウン性注意とボトムアップ性注意の比率の異なる複数の状態を体験するようにした。実験終了後、記録映像を観察し、インタラクションのパターンを抽出した。被験者は成人男性7名である。

5.4 結果

結果を表2に示す。また、実現したインタラクションにおける特徴的な動作の例を図9に示す。

抽出されたインタラクションは16パターンであった。これらは大きく分けて、VCに様々な動作をさせ

表2 実現したインタラクションの種類
Table 2 Patterns of Realized Interaction

インタラクションの大分類	被験者の操作	バーチャルクリーチャの反応	動作例
リンゴを見ている際に注意を引きつけようとするインタラクション	VCの前でポインタを振る	ポインタが動くと、ポインタを見る リンゴを見続ける	図9(a)
	VCをポインタでつつく	ポインタが触れると、ポインタを見る	図9(c)
	VCの注視しているリンゴをポインタで持って動かす・投げる	リンゴを視線および手で追い続け、受け取ろうとする	図9(d)
	VCが注視していないリンゴをポインタで持って動かす・投げる	リンゴが動くと、注視しているリンゴを見るのをやめてポインタが持っているリンゴを見る	
		リンゴが動くと、注視しているリンゴとポインタが持っているリンゴを交互に見る	
		ポインタの持つリンゴの動きがゆっくりである場合、気づかずにもとのリンゴを注視しつづける	
	注視していないリンゴを視野外から落とす	視野に入ると注視し、手を伸ばす	
ポインタでVCに触れ、様々な反応を引き起こそうとするインタラクション	注視していないリンゴをVCに押し付ける	リンゴがVCに触れると、触れたリンゴを注視する	
	ポインタでVCをつつく	ポインタで押さえられた腕が曲がる	図9(e)
		ポインタに押され、上半身がのけぞる	
		ポインタに押され、頭が傾いて首が反る	図9(b), (e)
	リンゴを顔に近づけ、そのまま顔の上に載せる	受け取ろうと手を伸ばし、手と頭でリンゴを受け取る	図9(d)
	ポインタを近づける	ポインタに向けて手を伸ばし、相互に接触する	図9(e)

ようとするもの、VCの注意を引きつけようとするものの2通りに分類された。なお、各パターンに分類された個々のインタラクションは、実際にはポインタとVCの位置関係や接触の仕方等が異なっている。

5.5 展示

予感研究所3[20]において、VCとのインタラクションを体験できるデモ展示を行った。1000名以上の来場者を楽しんでいただき、VCに対してかわいい、生きているようだ、等の感想を得た。

展示における体験者の体験行動・発言をビデオ撮影し観察を行った。まず、体験者の行動に対してVCが反応すると、「こっちを見た」「リンゴを取った」などのように行動を解釈する発言が多数あった。また、VCに対し「あっち向いてホイ」を試みる体験者もいた。このことから、体験者はVCが体験者の手の動きに注目していることを正しく解釈し、VCに反応行動を行わせたり注意を引いたりして楽しんでいたと考えられる。

また、体験者がリンゴを押し付けた際の反応動作に対し「嫌がっている」「怯えている」など、VCの感情を推定する発言があったことから、VCが感情を動作によって表現できた可能性が示唆される。

さらに、リンゴを渡して食べさせようとする行動が多く見られた。VCがリンゴを欲しがっているという発言もあったことから、VCは関心対象を動作によって表現できており、リンゴを渡されて食べるような生き物として捉えられていたと考えられる。

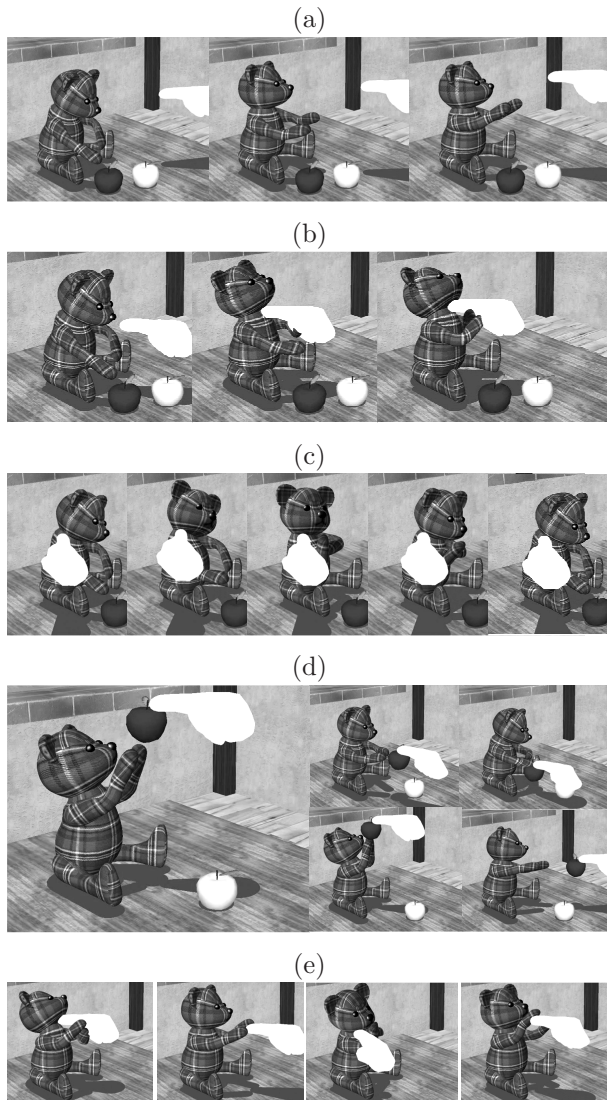


図9 VCの反応動作例
Fig.9 Examples of Reactions

5.6 考察

実験において、VCは被験者の多様なポインタ操作に応じて、ポインタ及び物体の位置・動かし方にあわせた視線移動や到達運動の動作を連続的にを行い、ポインタやリングに注意を向ける様子を表現した。また、力覚インタフェースを通じ、ポインタでVCに触れた際の反力を感じることやポインタにVCが触れた際にVCがポインタを押そうとする力を感じることができた。さらに、VCの腕や頭に触れて動かしたり動作を妨害したりするなど、身体の一部に対するフィジカルインタラクションが実現した。このことから、精緻なフィジカルインタラクションに対して多様な動作で反応するVCが実現できていたといえる。

また、突然VCの視界に入った物体に対して視線移動したり、関心対象として設定されたリングに対し注視した上で手を伸ばして取ろうとしたりといった行動

が実現した。このとき、VCは物体に手を伸ばす前に必ず視線移動して物体を注視した。行動の前に対象を視覚で捉えようとする動作は現実の生き物にも見られるものである。加えて、これらの行動は全て視野内および接触中の物体について行われており、被験者によって物体を視野外に隠されると気づかないなど、実際の生物同様の挙動が実現している。

さらに、関心の程度の違いを表出する行動が実現した。実験では赤いリングに緑のリングより大きなトップダウン性注意を設定したため、VCの視野内に両方のリングがあると赤いリングを優先して注視した。またこのとき、関心対象への注視の維持と、視覚や触覚からのボトムアップ性注意による視線移動が拮抗する様子が見られた。例えば、リングへのトップダウン性注意が小さい実験前半では、体験者がポインタを軽く動かしたりポインタがわずかにVCに触れただけで視線をポインタに対して移動したが、後半では、リングが視野内にあると注視し続け、ポインタの大きな動きや強い接触でのみ注意を逸らす事ができた。

これに対し、被験者はVCの注意を引きつけるため視野内でポインタを素早く動かす、頭や脇など身体をつつく、注視対象の物体を移動させるなど、現実のペットや人を相手とするインタラクションでも見られるような行動を行っている。さらに展示においても体験者がVCの注意を引いて反応行動を楽しんだり、生き物を相手とする場合と同様のインタラクションを試みたりしていたことから、生物らしい動作で注意を表出するVCが実現できていたと言える。

以上から、提案手法により、手指によるフィジカルなインタラクションにおいて、生物らしい感覚に基づいて注意・関心を表出する多様な反応動作を行うVCが構成できたといえる。

また、実験における16パターンのインタラクション例は、わずか2通りのキャラクタAIルールに基づいて実現している。提案手法により少ないルールから多様な反応動作を生成する仕組みが実現できたといえる。VCを実際に作品に用いるためには様々な個性や挙動をデザインできる必要があり、少ないルールで多様な挙動を記述できる特徴は好ましい。

6 まとめと展望

本論文では、手指によるフィジカルなインタラクションにおいて、注意・関心を表出する多様な反応動作を行うVCの構成法を実現することを目的とし、物理シミュレータ・物理動作コントローラ・感覚/注意モデル・キャラクタAIから成るVCの構成法を提案した。提案手法によるVCを実現し、実際のインタラクションを通じて目的を達成する反応動作が実現している事

を検証した。

提案する構成は既存のゲームキャラクタの行動決定手法と組み合わせて用いることができる。提案手法を用いることで、状況やインタラクションに応じた多様な反応動作を行ってプレイヤーを感情移入させるゲームキャラクタを実現することができ、ゲームの世界をより豊かで生き生きとしたものにしていくことに役立つと考えられる。特に近年普及しつつある、物理シミュレーションを用いたゲームや、モーションセンサなどの身体の動作を直接入力とするインタフェースとの親和性は高い。

一方、提案する構成では生き物において重要である記憶の機能を含んでいない。そのため、記憶に相当する機能を実現するためにはキャラクタ AI において従来手法により記述を行う必要がある。記憶は、注意の表出においても重要な役割を果たす。一度感覚して記憶している対象へは注意が小さくなる、記憶に無い物体へは大きな注意が誘発される、などである。提案手法を拡張し、記憶の機能を搭載することで、より生き物に近い挙動を行う VC を実現できると考えられる。

また、提案手法は、VC を実現するために多数の調整すべきパラメータを含んでいる。これらのパラメータは、VC の挙動をデザインするために重要である。提案手法では、感覚運動系と注意を模擬したモデルを用いているため、これらのパラメータは感覚・運動・注意といった人間が理解しやすい概念の挙動に直接対応しており、パラメータの意味は理解しやすい。そのため、提案手法においては実際に VC を動作させ、挙動を観察しながらパラメータ調整を行うことが有効である。こうした調整を支援する環境を実現することで、提案手法による VC を作品にあわせてデザインしやすくなると考えられる。

将来、複合現実感技術等が進歩すれば、VC を現実の世界に重畳して提示する事が可能になる事が期待される。このとき、提案手法を用いた VC は、手などで直接インタラクションすることができ、現実世界の様々な物体に注意を示す動作を行うことで多彩な意図を表現することができる。このように、あたかも現実の世界に存在するかのように触れ合うことができる VC は、現実世界とより密接に結びついた未来のゲームや新たなエンタテインメントを実現することにつながると考えられる。その中で、生き物らしく振舞う VC は現在のペット等と同様の楽しみをもたらす身近な存在となっていくであろう。

参考文献

[1] 三武, 青木, 浅野, 遠山, 長谷川, 佐藤. キャラクタとの物理的なインタラクションのための剛体モデルと多

- 次元キーフレームの連動による動作生成法. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 12(3):437-446, 2007.
- [2] 青木, 三武, 浅野, 栗山, 遠山, 長谷川, 佐藤. 実世界で存在感を持つバーチャルクリーチャの実現 kobito-virtualbrownies-. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 11(2):313-322, 2006.
- [3] R. A. Brooks and L. A. Stein. Building brains for bodies. *Auton. Robots*, 1(1):7-25, 1994.
- [4] 三輪, 伊藤, 松本, 今西, M. Zecca, S. Roccella, M. C. Carrozza, P. Dario, 高信, 高西. ヒューマノイドロボットの心理モデルの構築 -意識・行動モデルの導入-. 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2004.
- [5] N. Mitsunaga, T. Miyashita, Y. Yoshikawa, H. Ishiguro, K. Kogure, and N. Hagita. Robovie-iv: An every day communication robot. *Technical report of IEICE. PRMU*, 105(534):47-52, 2006.
- [6] L. Kovar, M. Gleicher, and F. Pighin. Motion graphs. In *SIGGRAPH '02: Proc. of the 29th annual conf. on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 473-482, New York, NY, USA, 2002. ACM Press.
- [7] M. Gleicher. Retargetting motion to new characters. In *SIGGRAPH '98: Proc. of the 25th annual conf. on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 33-42, New York, NY, USA, 1998. ACM Press.
- [8] A. Bruderlin and L. Williams. Motion signal processing. In *SIGGRAPH '95: Proc. of the 22nd annual conf. on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 97-104, New York, NY, USA, 1995. ACM Press.
- [9] C. Rose, B. Guenter, B. Bodenheimer, and M. F. Cohen. Efficient generation of motion transitions using spacetime constraints. In *SIGGRAPH '96: Proc. of the 23rd annual conf. on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 147-154, New York, NY, USA, 1996. ACM Press.
- [10] Y. Abe, C. K. Liu, and Z. Popović. Momentum-based parameterization of dynamic character motion. In *SCA '04: Proc. of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics symp. on Computer animation*, pp. 173-182, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2004. Eurographics Association.
- [11] S. Hasegawa, I. Toshiaki, and N. Hashimoto. Human scale haptic interaction with a reactive virtual human in a realtime physics simulator. In *ACE '05: Proc. of the 2005 ACM SIGCHI Intl. Conf. on Advances in computer entertainment technology*, pp. 149-155, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [12] V. B. Zordan, A. Majkowska, B. Chiu, and M. Fast. Dynamic response for motion capture animation. *ACM Trans. Graph.*, 24(3):697-701, 2005.
- [13] M. da Silva, Y. Abe, and J. Popović. Interactive simulation of stylized human locomotion. *ACM Trans. Graph.*, 27(3):1-10, 2008.
- [14] Peters C. and Sullivan C. O. Bottom-up visual attention for virtual human animation. In *Proc. of Computer Animation for Social Agents*, 2003.
- [15] L. Itti, Dhavale N., and Pighin F. Realistic avatar eye and head animation using a neurobiological model of visual attention. In *Proc. SPIE Intl. Symp. on Optical Science and Technology*, Vol. 5200, pp. 64-78, Aug 2003.
- [16] Lee S. P., Badler J. B., and Badler N. I. Eyes alive. *ACM Trans. Graph.*, 21(3):637-644, July 2002.
- [17] NINTENDO. nintendogs, 2005. <http://www.nintendo.com>

- nintendo.co.jp/ds/adgj/.
- [18] SCE. Eyepet, 2009. <http://www.eyepet.com/>.
- [19] S. Hasegawa and M. Sato. Real-time Rigid Body Simulation for Haptic Interactions Based on Contact Volume of Polygonal Objects. *Computer Graphics Forum*, 23(3):529–538, 2004. <http://springhead.info/>.
- [20] 予感研究所 3, 2010. <http://openspiral.jp/>.

(2010 年 3 月 29 日受付)

[著者紹介]

三武 裕玄 (学生会員)



2006 年 東京工業大学工学部情報工学科卒業, 2008 年 同大学大学院知能システム科学専攻修士修了, 同年 日本学術振興会特別研究員, 現在 同専攻博士後期課程在学中. バーチャルクリーチャ, バーチャルヒューマンの研究に従事.

青木 孝文 (学生会員)



2005 年 東京工業大学理学部情報科学科卒業, 2007 年 同大学大学院知能システム科学専攻修士修了, 同年 日本学術振興会特別研究員, 2010 年 同専攻博士修了. 在学中はバーチャルクリーチャ, バーチャルリアリティ, 複合現実感, エンタテインメントコンピューティングの研究に従事. 工学博士.

長谷川 晶一 (正会員)



1997 年 東京工業大学工学部電気電子工学科卒業, 1999 年 同大学大学院知能システム科学専攻修士修了, 同年 ソニー株式会社入社, 2000 年 東京工業大学精密工学研究所助手, 2007 年 電気通信大学知能機械工学科准教授, 2010 年 東京工業大学精密工学研究所准教授, 現在に至る. バーチャルリアリティ, 力覚インタフェース, ヒューマンインタフェースの研究に従事. 工学博士.

佐藤 誠 (正会員)



1973 年 東京工業大学工学部電子物理工学科卒業, 1978 年 同大学院博士課程修了, 同年 同大学工学部助手, 現在 同大学精密工学研究所教授. パターン認識, 画像処理, ヒューマンインタフェースの研究に従事. 工学博士.