

# ヒューマノイドロボットのコンテンツ技術化に向けて

## — クリエイターによる多様な表現の創出が可能な 二足歩行ヒューマノイドロボットの実現 —

中岡 慎一郎\*、三浦 郁奈子、森澤 光晴、金広 文男、金子 健二、梶田 秀司、横井 一仁

ヒューマノイドロボットは人間と同様に多様な振る舞いを表現する能力を秘めていることが大きな特徴であり、これをコンテンツ技術として利用することが期待できる。この利用法を実用的にするための技術的課題をロボットハードウェア、動作表現支援、音声表現支援、統合インタフェースの観点から考察し、それらの課題を解決する技術の開発と統合を行った。その結果人間にとっても近い外観を有する二足歩行ヒューマノイドロボットHRP-4Cと、その動作をCGキャラクターと同様に振り付け可能な統合ソフトウェアChoreonoidを実現した。また、これらを用いたコンテンツ制作実験により、ヒューマノイドロボットのコンテンツ技術としての可能性を検証した。

キーワード：二足歩行ヒューマノイドロボット、コンテンツ技術、エンターテインメント、サイバネティックヒューマン HRP-4C、動作作成、キーポーズ、Choreonoid、VOCALOID

## Toward the use of humanoid robots as assemblies of content technologies

### – Realization of a biped humanoid robot allowing content creators to produce various expressions –

Shin'ichiro NAKAOKA\*, Kanako MIURA, Mitsuharu MORISAWA,  
Fumio KANEHIRO, Kenji KANEKO, Shuuji KAJITA and Kazuhito YOKOI

A significant feature of humanoid robots is their potential to make various expressions as humans do, and this feature will allow the use of humanoid robots as assemblies of content technologies. Technical issues required for the practical use of humanoid robots are discussed in terms of robot hardware, motion expression generation, vocal expression generation and integrated GUI (Graphical User Interface), and the development of technologies to solve the issues and their integration have been carried out. As a result, we have produced HRP-4C, a life-size biped humanoid robot with realistic human-like appearance, and Choreonoid, an integrated software interface that allows us to choreograph motions with robots as done with CG characters. Experiments on creating contents with these technologies verified the potential of humanoid robots as assemblies of content technologies.

**Keywords** : Biped humanoid robots, content technology, entertainment, cybernetic human HRP-4C, motion creation, key pose, Choreonoid, VOCALOID

### 1 コンテンツ技術としてのヒューマノイドロボット

ヒューマノイドロボット（人間型ロボット）は、人間を模して作られた人工物が人間のように動くことのおもしろさや、様々なことを人間と同様に行ってくれることへの期待、フィクションの中で活躍してきたイメージ等から、ロボットの中でも特に多くの人々の興味を惹きつける魅力をもっている。この魅力を原動力として、実際に多くのヒューマノイドが開発されてきた。特に1996年にホンダが等身大で安定な二足歩行が可能なヒューマノイドであるP2<sup>[1]</sup>を発表して以来、ヒューマノイドの開発が活発になり、それらの一般向けのメディア・イベント等における露出も増えてきた。その結果、ヒューマノイドの実用化に対する期待も高まりつつある。

人々が実用化を期待するロボットの応用として、ロボット

に人間の生活を支援する様々な作業を行ってもらうことがあり、ヒューマノイドについてもこの期待に応えるための研究が進められている<sup>[2][3]</sup>。人間の生活環境の中で自由に移動し、人間も使う様々な道具や機器をそのまま使うことを目標とすると、人間と同様の身体を持つことが合理的であると考えられるのである。ただし、人々がロボットに期待する移動や作業の能力と現在のロボットの技術水準との乖離は非常に大きく、この方向での実用化のめどはついていないのが現状である。

一方で、人々に見せたり聞かせたりすることを目的としてロボットに何らかの振る舞いを行わせることも、ヒューマノイドの実用化に向けた応用として大きな可能性を秘めている。具体的にどのような振る舞いをどのように利用するかと

産業技術総合研究所 知能システム研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2  
Intelligent Systems Research Institute, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan \* E-mail: s.nakaoka@aist.go.jp

Original manuscript received November 8, 2010, Revisions received February 21, 2011, Accepted March 7, 2011

ということについては様々なことが考えられるが、技術的な観点で見ると、それらの多くは「コンテンツ技術」という枠組みでとらえることが可能である。ここで「コンテンツ」とは、それに向き合う観衆・視聴者・消費者に何らかの価値をもたらすひとまとまりの情報や体験を意味している。そして、ヒューマノイドをコンテンツのキャストとして活用できるとすれば、それはコンテンツの表現や運用を支援する「コンテンツ技術」であると言えるのである。

ヒューマノイドはこのようなコンテンツ技術としての魅力を潜在的に備えている。そもそも、冒頭で述べた「人々の興味を惹く魅力」は、コンテンツとしての価値に直結するものである。また、ロボットというものはコンピュータで制御される機械であり、様々な情報技術と融合させたり、特殊な身体機能を実装することも含めて、コンテンツの作成・表現・運用において生身の人間ではできないことも可能となる。そして、人々が求めるコンテンツの多くは人間を対象とするものであるため、ヒューマノイドは他の形態のロボットと比べて、より一般的なジャンルのコンテンツに対応可能であると考えられる。

以上の特徴は、コンピュータグラフィックス (CG) のキャラクターアニメーションと重なる部分もある。実際、CG キャラクターは様々なかたちで活用され、コンテンツ技術として欠かせない存在となりつつある。その上で、ロボットは実世界における実体をもつという点が CG キャラクターとは大きく異なる。これにより、CG キャラクターでは実現不可能なリアリティや臨場感、物理的インタラクション等の表現が可能となってくる。

私達は、そのようなコンテンツ技術としての利用こそが、ヒューマノイドの特性を最大限に活かすことが可能な価値ある応用として、まず実用化を目指すべきであると考えている。これにより、CG やコンピュータミュージック、ゲーム機等のデジタルコンテンツ技術が成りてきたように、新たな価値をもつコンテンツを創出し、それらコンテンツと関連技術にかかわる産業を活性化していくことが期待できるのである。また、この応用によってヒューマノイドが広く利用されるようになれば、ヒューマノイドへの継続的な投資も期待でき、先に述べた生活支援等の他の応用の発展にもつながっていくと思われる。

## 2 研究の目的と課題

ヒューマノイドを用いたコンテンツと言えるものは、これまで全く存在していなかったというわけではない。すなわち、最先端のヒューマノイドの技術デモンストレーションは、ヒューマノイドの特定の振る舞いを観衆が見て驚いたり喜んだりするという点で、これに相当すると言えるのである。た

だし、それらは基本的に、ロボットの開発者が手掛けてきたものであり、内容的にもロボットの技術に焦点をおくものであった。また、これによって十分な収益を得るだけの価値や広がりを実現できているわけではなかった。

これに対して、本来コンテンツの作り手となるべきなのは、コンテンツ創作の専門家である「クリエイター」と総称される人々である。そして、様々な分野のクリエイターが自ら手掛けるコンテンツにヒューマノイドを取り込み、そこでロボット技術という範疇にとどまらない内容を表現できるようになることが、私達の目指す「ヒューマノイドのコンテンツ技術化」である。これが達成されなければヒューマノイドが広く利用されることは無いであろうことは、既存のコンテンツ技術の状況からも明らかである。しかし、十分な表現能力とそれを利用可能とする手段があるかという点で、従来のヒューマノイドとその周辺技術はクリエイターにとって現実的ではなかったのである。

本研究の目的は、この状況を改善するにあたって基盤となる要素技術の開発と統合を行い、その検証を行いながらヒューマノイドをコンテンツ技術として産業化する道筋をつけることにある。この取り組みの概要を図1に示す。

私達はこの取り組みにおいて、まず以下の技術的な課題を解決することを目標とした。

### ロボットハードウェア

従来にない表現能力をもつハードウェアとして、全身に渡って人間に近い外観を有する等身大の二足歩行ヒューマノイドを開発する。

### 動作表現支援技術

多様な動作の表現を作成する手段として、CG キャラクターのキーフレームアニメーションと同様の操作による二足歩行ヒューマノイドの全身動作の振り付けを可能とする。

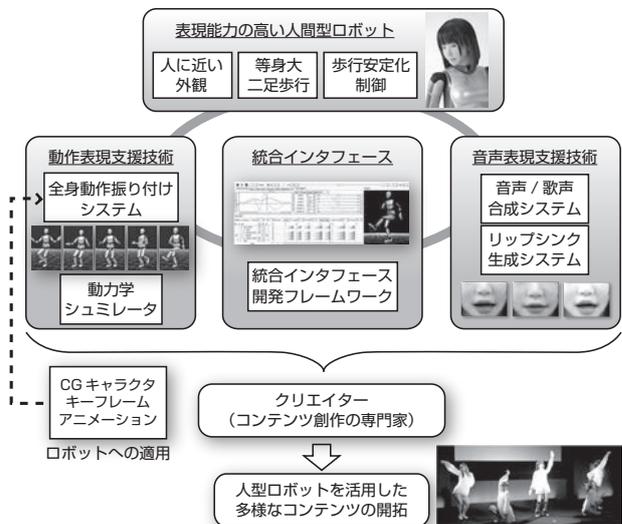


図1 研究の概要

## 音声表現支援技術

音声合成技術と連携し、口元の動きも伴う発話や歌唱の多様な表現を容易に作成可能とする。

## 統合インタフェース

以上の技術と既存の情報技術・コンテンツ技術を統合的に扱うことが可能なソフトウェアインタフェースを開発する。

これらを解決するためには、図1に示すような様々な要素技術の開発、選択、および統合を総合的に行うことが必要となる。

また、これらの技術的課題を乗り越えた上で、それらを用いて一般のクリエイターが創作した表現が、これまでにない新しいコンテンツとして認識されるかどうかを検証することも、本研究の重要な課題である。私達が構築する技術基盤とクリエイターのアイデアやスキルが組み合わさることにより、ヒューマノイドを活用した多様なコンテンツが開拓されていくというのが、私達の期待するシナリオである。

以下では、各技術的課題について、その設定に至った背景と解決に向けて実際に開発や統合を行った技術の内容を解説し、その後技術の検証に向けた取り組みと今後の展望について述べる。

## 3 ロボットハードウェア

### 3.1 ロボットの形態・外観における課題

従来のヒューマノイドの多くは、「人間型」を名乗りながらも、その形態や外観は一目見てロボットと分かるものがほとんどであった。それらは「ロボットらしい形態や外観」を意図的に表現するコンテンツにおいては有用なものであるが、そのようなコンテンツは人々が接するコンテンツ全体の一部のジャンルであると言える。これに対して、人間に十分近い形態と外観をもち、人間と同様の表現能力をもつロボットが加われば、多くのジャンルのコンテンツにおいてロボット利用の可能性が高まると考えられる。

以上を考慮して、ロボットハードウェアについては、以下の要件を満たすことを課題として設定した。

- (1) 等身大で自立二足歩行を安定に行えること
- (2) 全身にわたって人間に近い外観を有すること

要件(1)を満たすためには高度な技術が必要であり、ヒューマノイド全体の中ではこれを満たさないものも多い。その例として、スタンドや車輪で支持されるものや、体外の装置とケーブル等で繋がれているもの、小型のもの等が挙げられる。しかし、それらのロボットは全身動作やスケール感において人間と同様の表現能力をもつとは言えないものであるが、近年の研究の成果により、要件(1)を満たすロボットも多くのロボット開発機関によって開発されてきた<sup>[11][4][9]</sup>。しかし、それらのロボットの外観はいずれも「ロ

ボットらしい」ものであり、要件(2)を満たすものではなかった。その例として、私達の研究グループが開発にかかわってきた従来の二足歩行ヒューマノイドの外観を図2に示す。リアルな頭部を搭載した二足歩行ヒューマノイドである“Albert HUBO”<sup>[12]</sup>も開発されているが、これも頭部以外は従来と同様の外観であった。逆に、要件(2)のみに着目すれば、一見して人間と見間違ふほど人間に近い外観をもつロボットも開発されている<sup>[13][14]</sup>ものの、それらのロボットは基本的に上半身のみが動くものであり、要件(1)を満たしていない。したがって、両技術の一つのロボットへ統合することができれば、この課題が達成されたことになる。

要件(1)を満たすロボットがロボットらしい外観をもつ理由は、意図的にそのようにデザインしたというだけでなく、胴体や四肢、関節の大きさや形状に関する機構上の制約によるところも大きい。また、要件(2)を満たす従来のロボットでは、人間に近い外観に見合う多数の関節を高速に動作させるため、その駆動装置はロボット体外に置かれていた。両要件を同時に満たすために、人間と同様のスリムな身体に自立二足歩行が可能な機構を組み込み、その上に人間に近い外観を統合していくことは、技術的にも難しい課題なのである。

なお、ディズニーランドの“Audio-Animatronics”と呼ばれるものをはじめとする機械仕掛けの人形は、ある意味コンテンツ技術として実用化されたヒューマノイドと言えるかもしれない。しかしそれらは要件(1)を満たさないばかりでなく、特定の場所に設置され特定の動作を行うよう限定されたものであり、そこから切り離して利用できるだけの汎用性や魅力を備えたものではない。したがって、これは私達が目指す「コンテンツ技術」とは異なるものである。

### 3.2 サイバネティックヒューマンHRP-4Cの開発

私達はこの課題の解決に取り組み、その結果として、図3に示す「サイバネティックヒューマン<sup>注1</sup>HRP-4C」<sup>[15][16]</sup>

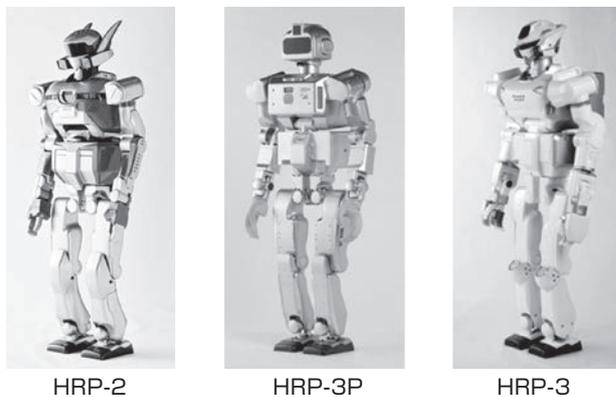


図2 従来の二足歩行人間型ロボット  
左から、HRP-2<sup>[6]</sup>、HRP-3P<sup>[10]</sup>、HRP-3<sup>[11]</sup>。

の開発に成功した。図3からも分かるように、HRP-4Cは全身に渡って人間に近い外観を実現した等身大(身長158cm)のヒューマノイドである。さらに、HRP-4Cは動作に必要な機構をすべて体内に備えており、二足歩行を行うための機構も備えた自立型のロボットである。その身体のサイズや形状は日本人青年女性の平均体型に近いものとしており、従来の二足歩行ヒューマノイドと比較して格段にスリムな体型を実現している。総重量は47 kg<sup>注2</sup>となっている。

関節は頭部に8、首に3、各腕に6、各手に2、腰に3、各脚に7の自由度を備えており、総自由度は44となっている。頭部の8自由度により、表情の変化、視線の移動、発声に伴う口元の動き等も表現可能である。また、腰部位の3自由度により、しなやかな胴体の動きも可能になる。これらにより、動きの面でも従来以上に人間に近い表現能力を秘めていると言える。

先に述べたように、このようなハードウェアを実現することは技術的にも難しい課題であった。HRP-4Cの開発にあたっては、HRP-2<sup>[6]</sup>やHRP-3<sup>[11]</sup>の開発で培ってきた設計技術の上に、小型分散モータードライバを組み合わせた分散制御システムや、新規開発の足首関節駆動機構等を導入し、可搬重量を軽減した設計によってアクチュエータやバッテリーの小型軽量化も図った。これらを結集した総合的な取り組みの結果として機構や電装システムの小型軽量化を達成し、課題を解決することができた。

### 3.3 歩行安定化制御システムの改良

HRP-4Cは足に関しても人間に近い形体を実現するため、図4に示すように、従来の二足歩行ロボットと比べてその足裏は小さく、足首中心もより踵方向に近づけた設計となっている。二足歩行ロボットでは、足裏の圧力中心の位置(ZMP)が足裏のエッジにくると、そのエッジ回りに転倒してしまう<sup>[17]</sup>。このため、足裏と床との間の圧力中心点(ZMP)を精度よく足裏の内部に制御することが、転倒

を避けるために必要となるが、足裏の面積が小さいほどこの制御は難しくなる。これについては、二足歩行の不整地対応能力を高める基礎研究として私達が取り組んできた、線形倒立振子トラッキング制御に基づく新しい歩行安定化制御システム<sup>[18]</sup>を導入することによって、十分な安定性を確保することに成功した。

## 4 動作表現支援技術

### 4.1 動きの振り付けにおける課題

ロボットの形態や外観に加えて、その身体の動きも当然のことながらコンテンツにおいて重要な表現要素となる。これに関してコンテンツ技術としてまず基本となる機能は、コンテンツ制作者が定めた一連の動きをロボットが行うことであろう。

問題は、その動きをいかなる手段でロボットに振り付けるかにある。本研究が対象とする等身大の二足歩行ロボットにおいては、動作の振り付けの手段として、特定の動作を生成するプログラムを個別に開発したり、あらかじめ用意された基本動作に対応するコマンドを記述するといった手段がこれまで一般的であった。しかし、それらは専門技術を要する非直感的な作業である上、結果も単調な動きに陥りがちである。これに代わるものとして、多様な動きを思いどおりに振り付けるための分かりやすく効率的な手段の提供が望まれるのである。

ここで再度着目したいのが、CGキャラクターアニメーションの技術である。人間を模した身体モデルに望みの動きを振り付けるという点では、ヒューマノイドもCGキャラクターもやるべきことは同じである。そして、CGキャラクターアニメーションは、長年にわたって多くの映像コンテンツにおいて利用されてきた実用的な技術である。したがって、CGキャラクターと同様の感覚でヒューマノイドの振り付けをできるようにすることは、ヒューマノイドのコンテンツ技術としての実用性を現実的なものにするための課題として妥当である。



図3 サイバネティックヒューマン HRP-4C  
愛称は「未夢(ミーム)」

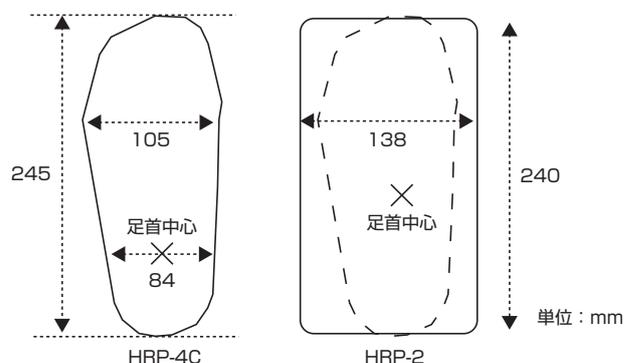


図4 HRP-4CとHRP-2の左足裏の大きさと足首中心位置  
比較のため、右図のHRP-2の足裏においてはHRP-4Cの足裏も点線を重ねてある。

CGアニメーションにおいて最も基本となる手法は、「キーフレームアニメーション」と呼ばれる手法である。ここで「フレーム」とはアニメーションにおいて秒間数十コマで切り替わっていく時系列の各画像を意味している。この手法では、キーフレームとして選んだいくつかのフレームにおけるキャラクターの姿勢（キーポーズ）を与えると、残りのフレームに対してキーポーズ間を補間した姿勢が自動で生成され、その結果がキャラクターの動きとなる。これにより、無駄な作業は省きつつも、キャラクターに対して直接詳細な動きを振り付けていくことが可能であり、動きの素になる姿勢を与えていくという操作も直感的で分かり易い。

この手法のロボットへの適用を目指したソフトウェアシステムは以前より開発されてきたものの、それらはいずれも「二足歩行型」のロボットに対しては不完全なものであった。

そもそも多くのシステムでは、キーポーズから動きを生成する処理において、実世界におけるロボットと床との間の物理的な挙動を考慮していない。その場合、自脚でバランスをとって支持することに関して物理的に無理のある動きとなってしまう、それをロボットで実行しようとすると容易に転倒に至ってしまうのである。ここがロボットとCGキャラクターで大きく異なる点である。そのようなシステムでも、ロボットが小型軽量で相対的な足裏サイズも大きい場合は、転倒せずにバランスを維持できる領域も広がるため、キーポーズの調整次第では転倒しない動きになることもある。このことにより、それらのシステムは主にホビーロボットの分野で限定的に用いられてきたが、私達の目的に対しては全く現実的ではない。

ロボットと床との間の物理的な挙動を考慮した唯一のシステムとして、“SDR Motion Creating System”<sup>[19]</sup>があり、このシステムを用いて身長58cmの小型二足歩行ヒューマノイドQRIO<sup>[20]</sup>の全身を使った様々な動作が実現されていた。ただし、このシステムにおいてキーポーズから動きを作れるのは上半身のみであり、下半身についてはシステムの提供する特定のコマンドとそのパラメータによって動きを設定するようになっている。この場合、下半身の動きはコマンドで表現できるものに限定されてしまうし、全身の動きを作成する作業はより複雑になってしまう。逆に、そのようにしなければ安定な動作を作れなかったところに、この問題の難しさがある。

以上のように、等身大二足歩行ヒューマノイドの全身動作をキーフレームアニメーションと同様に作成可能なシステムはこれまで存在しなかった。私達はそのようなシステムこそがヒューマノイドの動作表現のための基盤となる技術であると考え、キーフレームアニメーション技術と二足歩行ロボット技術の統合によりこれを実現することを課題として設

定した。

## 4.2 全身動作振り付けシステムの開発

私達は、上で述べた課題を解決する技術として、二足歩行ヒューマノイドのための全身動作振り付けシステムの開発に成功した<sup>[21]</sup>。このシステムのインタフェースとそれを用いて作成した動作の例を図5に示す。

本システムのインタフェースは、上半身と下半身を分けることなく全身に対して統一されたものとなっている。ユーザーは図5の中段に示すようなキーポーズをロボットのCGモデルに設定していけばよく、その結果は自脚でバランスをとって支持することに関して安定な動作となる。後は自己干渉や関節角速度のリミット超過が無ければ（それらが発生した際の修正はユーザーに委ねる仕様としている）、ロボット実機で転倒せずに実行することが可能である。

これを実現するため、私達はこれまでにないインタフェース設計を考案した。その大きな特徴は、各キーポーズにおける腰の水平位置を、ロボットがバランスをとれるようにシステムが決定するところにある。この決定はユーザーがキーポーズの入力や修正を行う度に瞬時に行われ、その結果はキーポーズにおける腰位置の補正というかたちでその場でユーザーに提示される。そして、キーポーズ間の補間もバランスのとれた動きとなるよう行われる。これは逆に言えば、初めからバランスのとれた動きしか振り付けできないということである。これを実現しながらも、ユーザーの行う操作自体は通常のキーフレームアニメーションと同様なため、まさにCGキャラクターと同様の感覚で、ロボットに振り付けを行っていくことが可能となるのである。なお、床に対するロボットの体重のかけ方を、足裏と床との間の圧力



図5 全身動作振り付けシステムの動作編集画面と作成した動作（キーポーズ）の例

この例では8パターンのキーポーズを与えることにより、ポーズをとりながら一歩踏み出してキックする約7秒の動作を作成することができている。

中心点（ZMP）としてキーポーズに対して明示的に指定することで、バランスのとれる範囲内で腰の水平動作を望みに近づけることも可能である。

このような設計は自明ではなく、この考案に至ったことは課題の克服にあたって重要な成果である。さらに、この設計を実装することも難しい課題であった。ユーザーにシンプルなインタフェースを提供するその裏で、システムは足裏接地状態の検出、目標 ZMP 遷移、補間空間遷移、補助キーポーズの追加、目標 ZMP に適合する重心軌道の計算といった多くの複雑な処理を統合的に行う必要があり、さらにそれが高速に動作する必要があるからである。

このような実装上の課題を克服するにあたっては、私達が中心となって開発してきたロボット用動力学シミュレータ“OpenHRP3”<sup>[22]</sup>の技術も大いに活用することができた。シミュレータにおいて実装されているロボティクスに関する各種計算処理は、実行速度や精度の面で実用的なシミュレーションに耐えるよう開発が進められてきたものであり、本システムの実装においても有用なものであった。また、OpenHRP3のために私達が開発した動力学シミュレーション手法<sup>[23]</sup>は、二足歩行ロボットの床上での挙動を精度よく検証できるものである。これを本システムにも組み込むことにより、実装の妥当性をシステム上で直接検証できるようになり、開発の効率を高めることができた。

本システムは HRP-4C に対しても有効であることを確認できている。作成された全身動作は、3.3 節で述べた歩行安定化制御システム<sup>[18]</sup>と組み合わせることにより、図 5 の例のように実際に HRP-4C の実機でも安定に実行可能である。HRP-4C のように足裏の小さい等身大ヒューマノイドでこのような複雑な動作を思いどおりに構築できることは、画期的な成果である。また、図 6 に示すような顔の表情変化も作成可能である<sup>[24]</sup>。本システムでは、頭部に対する操作結果をリアルタイムで実機に反映させることも可能としており、これを用いることで、CG による完全な再現が難しい実機の微妙な表情の変化も、効率的に作り込むことが可能となっている。このように、本システムによって HRP-4C の動きの表現能力を引き出すことが可能となるのである。



(a) 微笑み

(b) 驚き

(c) 怒り

図 6 表情の作成例

#### 4.3 モーションキャプチャを用いる手法

CG キャラクタアニメーションにおいては、実際に人が行った動作をモーションキャプチャを用いて取り込む方式も広く用いられている。そして、キャプチャした人の全身動作を二足歩行ヒューマノイドの全身動作に適用する手法が中岡ら<sup>[25]</sup>によって開発されており、これを用いて HRP-2<sup>[6]</sup>による会津磐梯山踊りも実現されている。

この手法と本研究で開発した手法とを比較すると、人の動作を再現することに関しては、当然ながら前者が適している。ただし、中岡らの手法の制約やロボットの動作能力の限界により、現状では人の動作を再現仕切れないことも多いことには注意が必要である。一方で、ロボットならではの動きを表現したり、ロボットの動作能力の限界内で質の高い動きを作りこむことに関しては、初めからロボットに対して直接振り付けを行っていく後者の手法が適している。さらに、前者は専用の機材やスタジオに加えて望みの動作を行うスキルをもつ演者も必要とするが、後者はそれらを必要とせず一般的な PC 上で利用可能なため、より手軽に利用可能となっている。

以上の特徴を考慮すると、ヒューマノイドを用いた新たなコンテンツの創造とその利用の拡大という目的に対しては本研究の手法がより基本となるものであり、今回の成果によりこれを初めて実現したことには大きな意味がある。一方で、モーションキャプチャを用いる手法も有用なものであり、両者を統合的に使えるようにすることが今後の課題である。

#### 5 音声表現支援技術

ロボットの発する音声もコンテンツにおいて重要な表現要素となる。発声の形態については、人間の声帯を模した発声機構の研究もされているが<sup>[26]</sup>、これは肺に相当する部分も有する大きな機構となっており、現状では HRP-4C のようなヒューマノイドに搭載できるものではない。したがって、発声の形態としては適当な音声ソースをスピーカーから出力するのが妥当である。この場合、ロボットが発声しているように見せるためには、音声ソースに合わせてロボットの口元が動くこと（リップシンク）が必要である。また、音声ソースを得る手法としては、人間の声を取り込む手法と音声合成技術を用いる手法が考えられる。両者の特徴の差異は、4.3 節で述べた動きの作成に関する二つの手法の差異と同様であり、その意味では、音声合成を用いる方が私達の目的に対してより基本となる手法だと言える。

以上の考察から、音声表現に関しては、音声合成技術と連携し口元の動きも伴う多様な話し方や歌唱の表現を容易に作成可能とすることが課題となる。

この課題に対して、私達はヤマハ株式会社と共同で、同社の歌声合成技術“VOCALOID”<sup>[27]</sup>をHRP-4Cの音声表現に用いるシステムを開発した<sup>[28]</sup>。VOCALOIDは歌声の合成用に開発され、人間の歌唱に近い音声を実現可能な音声合成技術である。さらに、この技術をイントネーションの豊かな自然な話し方の生成に応用した“VOCALOID-flex”技術も利用可能となっており、多様な音声表現が可能である。このシステムはVOCALOIDの音声データからロボットのリップシンクを自動で生成する機能を実現しており、これを用いることでロボットの自然な発話や歌唱の振る舞いを容易に作成可能となっている。

## 6 統合インタフェース

4.2節で述べた全身動作振り付けシステムの実装にあたっては、キーポーズ処理の本質的な部分に加えて、各種データの管理、3Dモデルの表示や操作、キーポーズの時系列表示、動力学シミュレーションをはじめとする多様な機能を連携可能なかたちで実装することが必要である。また、ロボットの総合的な表現を作成しそれをロボット実機で提示するためには、振り付けシステムと音声表現支援技術、およびロボットハードウェアも連携させ、それをユーザーにとって分かりやすく使いやすいかたちで提供しなければならない。さらに、既存のものや今後開発されるものも含めて、ロボットの表現において有用な情報技術・メディア技術も連携して利用可能とできれば、コンテンツ技術としての有用性をさらに高めていけると思われる。4.3節で述べたモーションキャプチャ利用技術もそのような技術の例として挙げられる。

私達は以上を実現するため、統合インタフェース開発のためのソフトウェアフレームワークである“Choreonoidフレームワーク”を開発した。そしてこの上に本研究で開発・選定した技術のインタフェースを実装し、これを統合ソフトウェア“Choreonoid”<sup>注3</sup>とした。

ChoreonoidフレームワークはC++言語を基盤としており、CやC++で記述されたプログラムとの相性がよく、高速な処理が必要なアルゴリズムやインタフェースも実現しやすい。また、Model-View-Controllerと呼ばれるアーキテクチャとシグナル機構に基づいて設計されており、オブジェクト同士の独立性を高めることで保守性や拡張性を確保しつつも、オブジェクト間の複雑な連携を行うことが可能な設計としている<sup>[29]</sup>。これにより、プラグインとして新たな機能の追加ができるようになっており、プラグインが既存の機能や他のプラグインの機能と連携することも容易である。このような特徴により、Choreonoidは今後コンテンツ技術という枠組みも超えて、ロボット用ソフトウェアの上位層を開

発する環境として広く活用されていくことも期待できる。

## 7 コンテンツ制作実験

本研究においては、実際にChoreonoidとHRP-4Cを用いてコンテンツを制作し、技術の検証と改良、およびプロモーションを進めることが必要である。この際、本研究の目的を考えると、私達ではなく外部のクリエイターに主体となってコンテンツを制作してもらうことが重要である。これにより、実用性の検証や新たなコンテンツの開拓において大きな効果を期待できる。

これを実現するため、東京大学IRT研究機構特任研究員の石川勝氏と共同で、ダンスクリエイター/ダンサーとして著名なSAM氏にHRP-4Cを用いたエンタテインメントコンテンツを制作してもらう取り組みを行った。これはデジタルコンテンツEXPO(DC-EXPO)<sup>注4</sup>2009、DC-EXPO2010の支援を受けて行い、結果を同イベントにて発表してきた。以下ではChoreonoidの開発後に行われたDC-EXPO2010の取り組みについて紹介する。

DC-EXPO2010では、本論文で述べた技術を総合かつ本格的に検証するため、図7に示すようなHRP-4Cが歌って踊るコンテンツの開発に挑戦した。このコンテンツは、HRP-4CがSAM氏の振り付けによるダンスを踊りながら、日本の音楽グループ“Every Little Thing”の曲である「出逢った頃のように」を歌う約3分のデモとなっている。

ダンスの動作はSAM氏の振り付けをもとにすべてChoreonoidを用いて制作した。振り付けにおいては事前にロボットの動作能力をSAM氏に伝え、その能力の範囲内で魅力あるコンテンツとなるよう振り付けを行ってもらった。実現したダンスの動作は図8に示すように全身を活用した様々なポーズ・動作を盛り込んだものとなっており、ロボットのダンスとしては表現の豊かさの点でこれまでに無いものである。演出面でも、ダンスのイメージにあったウィッグと衣装をHRP-4Cに装着し、ステージのライティングも趣向を凝らしたものとした。さらに、SAM氏の振り付けはバックダンサーとのコンビネーションを含めてデザインされており、人間のバックダンサー4人との共演による迫力あ



図7 HRP-4Cが歌って踊るデモ

るパフォーマンスを実現した。

歌唱についてはヤマハ株式会社に協力を要請し、VOCALOIDによる音声データとリップシンクデータの提供を受けた。使用したVOCALOID音源はクリプトン・フューチャー・メディア株式会社によるCV-4Cβである。音声データの作成にあたっては、中野・後藤によるVocaListener<sup>[30]</sup>の技術を用いて<sup>注5</sup>、原曲の歌手である持田香織氏の歌い方(エイベックス・トラックより提供された持田香織氏によるボーカルパートの音声トラック)をお手本としたチューニングが行われ、人間に近い表情豊かな歌声を実現した。リップシンクデータについては、5章で述べたVOCALOID連携機能を用いることで、音声データからの自動生成を行い、効率的に作成することができた。

このダンスデモは2010年10月16日の発表後ネットを中心として非常に大きな反響を呼んだ。反響の大きさを示す例として、ステージの観衆によって動画投稿サイトYouTubeに投稿されたデモの動画が、デモ発表後10日間で、延べ200万回以上の再生数と1500件以上のコメントを獲得したことが挙げられる。動画のひとつはその後YouTube日本語版の年間再生回数トップ6を獲得した。また、そのようなネット上の反響の直後に、海外も含む各方面から、このデモの公演依頼やHRP-4Cへの共演依頼が多数寄せられた。これは、本研究で構築した技術を用いてクリエイターが創作した表現が、これまでにない新しいコンテンツとして認識されたことを示しており、私達のシナリオの有効性を実証するものである。

なお、今回Choreonoid上でのキーボード入力作業は筆者のひとりが行ったが、入力に要した時間は実質80時間



図8 ダンス中で実現した多様な動作・ポーズの例

程度であった。3分の動作に対しては少なくない時間がかかってしまったが、これは担当者がCGキャラクターアニメーション作成の経験を持っていなかったことも大きい。本来キーボード入力作業も含めてプロのクリエイターによる検証が必要なのは言うまでもなく、今後はプロのCGクリエイターに直接Choreonoidを操作してコンテンツを作成してもらい取り組みも進めていきたいと考えている。

## 8 今後の展望

HRP-4Cは2009年3月の発表以来、その利用に関する依頼や提案を各方面から受け、2009年3月に開催されたファッションショー「第8回東京発日本ファッションウィーク」の「SHINMAI Creator's Project」においてオープニングスピーチを務めたり、同年7月に開催された「ユミカツラパリグランドコレクションイン大阪」においてウェディングドレスのモデルを務めたり、同年9月に開催された「CEATEC JAPAN 2009」の「ヤマハ株式会社ブース」において「初音ミク」をはじめとするVOCALOIDのキャラクターに扮して歌唱を披露するといった活動も行ってきた<sup>[31][29]</sup>。

ここで注目したいのは、このようなHRP-4Cに関する一般からの依頼は、実際に何をやらせるかについて私達ロボットの開発者に委ねるものに止まらず、ロボットにさせたいことを依頼者が自ら積極的に提案するものが多くを占めていたということである。これは従来私達が使用してきたHRP-2をはじめとするロボットでは無かったことであり、この意味でも3.1節で述べたロボットの形態と外観に関する戦略が成功したと言えよう。

そして、本研究で開発した動作表現支援技術や音声表現支援技術により、DC-EXPO2010のダンスのようにヒューマノイドの表現能力を総合的に活用したコンテンツも作成可能となり、HRP-4Cの利用に関する様々な提案に応じていくことが可能となった。これをさらに実証していくため、7章で述べたような取り組みを今後もさまざまなクリエイターと共同で進めていくべきだと考えている。

そのような取り組みを進めながら、技術的な面でもまだやるべきことは多く残っている。まず二足歩行にかかわる部分としては、現状の振り付けシステムでは滑りやジャンプを含むような動作や膝を伸ばしたより人らしい歩行等を作成することができないが、これらはコンテンツの幅と質を向上させる上で必要なものである。それぞれの動作を単体で実現した例<sup>[32][34]</sup>はあるものの、これらを組み合わせた動作を自由に作成することは依然として難しい課題として残されている。

より自然な動作を表出するための自律性の向上も課題である。例えば目線の動きが自然となるよう自動化したり、あ

る姿勢を維持する際にも完全に静止するのではなく、微妙なゆらぎを自動生成すること等が考えられる。

そして、ロボット技術全体にかかわる部分でも、まだ改善が必要である。コンテンツによってはロボットが周囲の環境に適応的に動作しなければならないので、環境認識やそれに基づく動作計画、あるいは人間とのインタラクションにかかわる研究成果を活かすことができる。また、小道具を扱うコンテンツにおいては、マニピュレーション能力も必要になってくる。

以上のようなロボットの各種技術は段階的にコンテンツへ取り入れながら発展させていけばよい。したがって、ヒューマノイドを用いたコンテンツを開拓していく取り組みは、ロボットの技術を総合的に発展させそれを産業に展開していく場としても有効である。その結果ロボットの能力が高まっていけば、生活支援も含めて、コンテンツ技術という枠を超えたヒューマノイドの実用化も視野に入ってくると期待できる。

以上を踏まえながら、今後もコンテンツ技術としてのヒューマノイドの発展に向けた研究開発を進めていく予定である。

## 謝辞

HRP-4Cの開発は、産総研産学連携プロジェクト「産総研産業変革研究イニシアティブ」の「ユーザー指向ロボットオープンアーキテクチャ(UCROA)の開発」の一環として実施された。また、Choreonoidの開発はNEDO「次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト」の支援を受けて開発した「動作パターン設計ツール」をベースとした。

UCROAプロジェクトの遂行にあたっては、産総研知能システム研究部門長の比留川博久氏、元産総研理事の伊藤順司氏の多大なる支援を受けた。産総研の藤原清司氏、原田研介氏、阪口健氏、有隅仁氏、喜多伸之氏、原功氏、辻徳生氏、元産総研のNeo Ee Sian氏には本研究に関して貴重な意見をいただいた。DC-EXPO2010におけるコンテンツ制作は、東京大学IRT研究機構特任研究員の石川勝氏、ダンスクリエイターのSAM氏、ヤマハ株式会社の大島治氏・剣持秀紀氏・橋誠氏をはじめとする多くの方々の協力により実現したものである。

**注1)** 人間に近い外観・形態を持ち、人間に極めて近い歩行や動作ができ、音声認識等を用いて人間とインタラクションができるヒューマノイドロボットを意味する造語である。

**注2)** 本論文執筆時点の最新の仕様である。他の記述についても同様とする。

**注3)** Choreonoidという名称は“Choreograph”と“Humanoid”の組み合わせによるものであり、このソフトウェアの核となる振り付け機能をイメージしたものである。

**注4)** デジタルコンテンツEXPO (DC-EXPO) は、経済産業省と財団法人デジタルコンテンツ協会が主催する国際イベントで、2008年より毎年10月に日本科学未来館、東京国際交流館にて開催されてきた。

**注5)** 正確には、産総研からこの技術のライセンスを受けてヤマハ株式会社が開発した「Netほかりす」サービスが使用された。

## 参考文献

- [1] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: The development of Honda humanoid robot, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium*, 1321-1326 (1998).
- [2] E. S. Neo, T. Sakaguchi, K. Yokoi, Y. Kawai and K. Maruyama: A behavior level operation system for humanoid robots, *Proceedings of the 6th IEEE/RSJ International Conference on Humanoid Robots, Genoa, Italy*, 327-332 (2006).
- [3] K. Okada, M. Kojima, S. Tokutsu, Y. Mori, T. Maki and M. Inaba: Integrating recognition and action through task-relevant knowledge for daily assistive humanoids, *Advanced Robotics*, 23 (4), 459-480 (2009).
- [4] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki and K. Fujimura: The intelligent ASIMO: System overview and integration, *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, EPFL, Lausanne, Switzerland*, 2478-2483 (2002).
- [5] S. Kagami, K. Nishiwaki, J. Kuffner, Y. Kuniyoshi, M. Inaba and H. Inoue: Online 3D vision, motion planning and bipedal locomotion control coupling system of humanoid robot: H7, *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, EPFL, Lausanne, Switzerland*, 2557-2562 (2002).
- [6] 五十棲隆勝, 赤地一彦, 平田勝, 金子健二, 梶田秀司, 比留川博久: ヒューマノイドロボットHRP-2の開発, *日本ロボット学会誌*, 22 (8), 1004-1012 (2004).
- [7] I.-W. Park, J.-Y. Kim, J. Lee and J.-H. Oh: Mechanical design of humanoid robot platform KHR-3 (KAIST humanoid robot -3: HUBO), *Proceedings of the 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Tsukuba, Japan*, 321-326 (2005).
- [8] Y. Ogura, H. Aikawa, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, H. Ok Lim and A. Takanishi: Development of a humanoid robot WABIAN-2, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, USA*, 76-81 (2006).
- [9] 高木宗谷: トヨタパートナーロボット, *日本ロボット学会誌*, 24 (2), 208-210 (2006).
- [10] K. Akachi, K. Kaneko, N. Kanehira, S. Ota, G. Miyamori, M. Hirata, S. Kajita and F. Kanehiro: Development of humanoid robot HRP-3P, *Proceedings of the 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Tsukuba, Japan*, 50-55 (2005).
- [11] 金子健二, 原田研介, 金広文男, 木村勉, 宮森剛, 赤地一彦: ヒューマノイドロボットHRP-3の開発, *日本ロボット学会誌*, 26 (6), 658-666 (2008).
- [12] J.-H. Oh, D. Hanson, W.-S. Kim, I. Y. Han, J.-Y. Kim and I.-W. Park: Design of android type humanoid robot Albert HUBO, *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China*, 1428-1433 (2006).
- [13] H. Ishiguro: Android science: conscious and subconscious recognition, *Connection Science*, 18 (4), 319-332 (2006).

- [14] 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*, 48 (12), 3279-3738 (2007).
- [15] 金子健二, 金広文男, 森澤光晴, 三浦郁奈子, 中岡慎一郎, 原田研介, 梶田秀司: サイバネティックヒューマンHRP-4Cの開発-プロジェクト概要からシステム設計まで-, *日本ロボット学会誌*, 28 (7), 79-90 (2010).
- [16] 金子健二, 金広文男, 森澤光晴, 三浦郁奈子, 中岡慎一郎, 梶田秀司, 横井一仁: エンターテインメント応用に向けたサイバネティックヒューマンHRP-4Cの改良, *第28回日本ロボット学会学術講演会*, 1A3-4 (2010).
- [17] 梶田秀司(編): ヒューマノイドロボット, オーム社(2005).
- [18] S. Kajita, M. Morisawa, K. Miura, S. Nakaoka, K. Harada, K. Kaneko, F. Kanehiro and K. Yokoi: Biped walking stabilization based on linear inverted pendulum tracking, *Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan* (2010).
- [19] Y. Kuroki, B. Blank, T. Mikami, P. Mayeux, A. Miyamoto, R. Playter, K. Nagasaka, M. Raibert, M. Nagano and J. Yamaguchi: Motion creating system for a small biped entertainment robot, *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, Nevada*, 1394-1399 (2003).
- [20] Y. Kuroki, M. Fujita, T. Ishida, K. Nagasaka and J. Yamaguchi: A small biped entertainment robot exploring attractive applications, *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan*, 471-476 (2003).
- [21] S. Nakaoka, S. Kajita and K. Yokoi: Intuitive and flexible user interface for creating whole body motions of biped humanoid robots, *Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan*, 1675-1682 (2010).
- [22] 中岡慎一郎, 山野辺夏樹, 比留川博久, 山根克, 川角祐一郎: 分散コンポーネント型ロボットシミュレータOpenHRP3, *日本ロボット学会誌*, 26, 5, 399-406 (2008).
- [23] S. Nakaoka, S. Hattori, F. Kanehiro, S. Kajita and H. Hirukawa: Constraintbased dynamics simulator for humanoid robots with shock absorbing mechanisms, *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, USA*, 3641-3647 (2007).
- [24] S. Nakaoka, F. Kanehiro, K. Miura, M. Morisawa, K. Fujiwara, K. Kaneko, S. Kajita and H. Hirukawa: Creating facial motions of Cybernetic Human HRP-4C, *Proceedings of the 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Paris, France* (2009).
- [25] 中岡慎一郎, 中澤篤志, 金広文男, 金子健二, 森澤光晴, 比留川博久, 池内克史: 脚タスクモデルを用いた2足歩行ヒューマノイドロボットによる人の舞踊動作の再現, *日本ロボット学会誌*, 24, 3, 112-123 (2006).
- [26] K. Fukui, Y. Ishikawa, K. Ohno, N. Sakakibara, M. Honda and A. Takanishi: Three dimensional tongue with liquid sealing mechanism for improving resonance on an anthropomorphic talking robot, *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Kobe, Japan*, 5456-5462 (2009).
- [27] 剣持秀紀, 大下隼人: 音声合成システムVOCALOID-現状と課題, *情報処理学会研究報告*, 2008-MUS-74-9, 12, 51-58 (2008).
- [28] 橋誠, 中岡慎一郎, 剣持秀紀: 歌うロボット-VOCALOIDとサイバネティックヒューマンHRP-4Cのコラボレーション-, *情報処理学会研究報告*, 2010-MUS-84, 14 (2010).
- [29] 中岡慎一郎, 比留川博久: OpenRT Platform/動作パターン設計ツール, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECS2009, 福岡*, 2A2-C12 (2009).
- [30] 中野倫靖, 後藤真孝: VocaListener: ユーザ歌唱を真似る歌声合成パラメータを自動推定するシステムの提案, *情報処理学会研究報告*, 2008-MUS-75, 50, 49-56 (2008).
- [31] K. Miura, S. Nakaoka, S. Kajita, K. Kaneko, F. Kanehiro, M. Morisawa and K. Yokoi: Trials of cybernetic humanoid HRP-4C toward humanoid business, *Proceedings of the 6th IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, Seoul, Korea*, WA01 (2010).
- [32] 三浦郁奈子, 中岡慎一郎, 金広文男, 原田研介, 金子健二, 横井一仁, 梶田秀司: 足裏の滑りを利用した2足歩行ロボットの方向転換-滑り現象のモデル化と回転角の予測-, *日本ロボット学会誌*, 28, 10, 84-94 (2010).
- [33] 但馬 竜介, 菅 敬介: 1脚ロボットによる跳躍動作の実現, *第24回日本ロボット学会学術講演会*, 岡山, 2F16 (2006).
- [34] Y. Ogura, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, T. Okubo, S. Momoki, H. ok Lim and A. Takanishi: Human-like walking with knee stretched, heelcontact and toe-off motion by a humanoid robot, *Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China*, 3976-3981 (2006).

#### 執筆者略歴

中岡 慎一郎 (なかおか しんいちろう)

2001年東京工業大学理学部情報科学科卒業。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博士課程修了。博士(情報理工学)。2006年4月より産業技術総合研究所知能システム研究部門研究員。2008年度日本ロボット学会論文賞、IROS2010 Best Paper Finalist 受賞。ヒューマノイドロボットによる動き提示、ロボットソフトウェアプラットフォームの研究に従事。本研究では、主として動作表現支援技術、音声表現支援技術、統合インタフェースの開発と、コンテンツ制作実験を担当した。



三浦 郁奈子 (みうら かなこ)

2004年東北大学大学院情報科学研究科修士課程修了。同年フランス Université Louis Pasteur 博士課程修了。博士(情報科学) / le grade de docteur: Electronique, Electrotechnique, Automatique。同年東北大学研究支援者。2005年より株式会社 NTT ドコモ総合研究所研究員。2007年より産業技術総合研究所知能システム研究部門研究員。人間の動作解析、ヒューマノイドロボット動作計画等の研究に従事。本研究では、主として HRP-4C の開発を担当した。



森澤 光晴 (もりさわ みつはる)

2004年慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年4月より産業技術総合研究所知能システム研究部門研究員。2009年4月より1年間、仏国 LAAS-CNRS 客員研究員。パラレルメカニズム、モーションコントロール、ヒューマノイドロボット等の研究に従事。本研究では、主として HRP-4C の開発を担当した。



金広 文男（かねひろ ふみお）

1999年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。博士（工学）。1998年より日本学術振興会特別研究員。2000年工業技術院電子技術総合研究所入所。2001年より組織改変に伴い産業技術総合研究所知能システム研究部門研究員。2007年10月主任研究員。2007年4月より仏国 LAAS-CNRS 客員研究員。ヒューマノイドロボットのシステム構成法、全身行動制御に興味がある。本研究では、主として HRP-4C の開発を担当した。



金子 健二（かねこ けんじ）

1990年慶應義塾大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年工業技術院機械技術研究所に入所。1995年9月より半年間米国カーネギーメロン大学客員研究員、1999年9月より1年間仏国 CNRS パリロボット研究所客員研究員。2001年より組織改変に伴い産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員、現在にいたる。博士（工学）。モーションコントロール、マイクロマシン、遠隔制御、ヒューマノイドロボット等の研究に従事。2009年 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots Best Paper Award (Oral Category) 受賞。本研究では、主として HRP-4C の開発を担当した。



梶田 秀司（かじた しゅうじ）

1985年東京工業大学大学院修士課程修了（制御工学専攻）。同年工業技術院機械技術研究所に入所。1996年2月より1年間米国カリフォルニア工科大学客員研究員。1996年東京工業大学より学位取得。工学博士。2001年より組織改変に伴い産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員、現在に至る。二足歩行ロボット等の動的制御技術の研究に従事。1996年度計測自動制御学会論文賞、2005年度日本ロボット学会論文賞受賞。本研究では、主として HRP-4C と歩行安定化制御システムの開発を担当した。



横井 一仁（よこい かずひと）

1986年東京工業大学大学院機械物理工学専攻修了。同年工業技術院機械技術研究所に入所。2001年産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員。2004年同所同部門研究グループ長、2009年同所同部門副研究部門長、現在に至る。1995年～1996年スタンフォード大学客員研究員、2003年～2008年 AIST-CNRS Joint Robotics Laboratory Co-director、2005年より筑波大学大学院システム情報工学研究科教授（連携大学院）兼任。人間型ロボット等の自律性の向上に関する研究に従事。1993年日本機械学会賞研究奨励賞、1993年計測自動制御学会論文賞、2003、2004年 IEEEICRA Best Video Award、2005年日本ロボット学会論文賞、2006年日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門学術業績賞、2008年日本機械学会賞（論文）他受賞。博士（工学）。本研究では、主としてコンテンツ制作実験を担当した。



## 査読者との議論

### 議論1 構成学としての全体構成

コメント（持丸 正明：産業技術総合研究所デジタルヒューマン工学研究センター）

#### 【構成学としての論文構成】

構成学としては、等身大のリアルなヒューマノイド（ハードウェアとしてのプラットフォーム）、運動表現支援技術（全身動作生成+動力学シミュレータ）、歌唱表現支援技術（音声合成技術+リップシンク技術）の三つの要素技術を統合し、それによって産み出された表現が、これまでにない新しいメディアコンテンツとして認識されるかどうかを検証した、という枠組みになると理解しました。構成学の論文として、この位置付けを明瞭化して、それに沿って章立てを考える方が良いと思います。

コメント（小林 直人：早稲田大学研究戦略センター）

#### 【構成学としての全体像が掴める図】

要素技術として、「サイバネティックヒューマン“HRP-4C”の完成」、「全身動作作成ソフトウェア“Choreonoid”の生成」、「顔動作生成機能の実現」「動力学シミュレータの開発と活用」等が極めて重要なものであり、これらを統合することにより、最終目標を達成できたと認識しました。ここで各要素技術を一つのブロックとして表現し、要素技術ブロック同士の関係やそれらをどう組み合わせ構成して最終目標に近づけたかを一つの図で表現すると読者の理解が高まると思われれます。「構成学」としての学の観点からも非常に重要です。

#### 【統合における技術的困難性の記述】

またその際、統合に向けて乗り越えるべき大きな困難があったとしたらそれが何であったかを記述されるとよいと思います。

#### 【統合から要素技術へのフィードバック】

さらに統合に向けて、個々の要素技術の修正や改善までフィードバックをする必要があったかと思いますが、もしそのような分かり易いフィードバックの例があると、読者の参考になりますので例示をしていただけるとよいと思います。

回答（中岡 慎一郎）

#### 【構成学としての論文構成】

コメントを参考にして、記述を改めました。章の構成については、まず2章で本研究の目的と課題となる四つの技術領域について簡潔にまとめた上で、課題の詳細とそれに対する取り組みは四つの技術領域ごとに章をまとめて記述する構成としました。その上で、【構成学としての全体像が掴める図】として、本研究の概要を表す図1を追加しました。

#### 【統合における技術的困難性の記述】

「ロボットハードウェア」「動作表現支援技術」「音声表現支援技術」「統合インタフェース」を構成要素とする大きな枠組みでは、それらの必要な要素を検討して総合的に作り上げるところに困難性がありました。一方で、ロボットハードウェアと動作表現支援技術のそれぞれの枠組みでは、「人に近い外観」と「二足歩行」を「統合」することの困難や、「CGのキーフレームアニメーション」と「二足歩行ロボットの安定な動作の作成」を統合することの困難がありました。これらの困難性の記述をそれぞれの章に含めました。

#### 【統合から要素技術へのフィードバック】

確かにそのような事例がありました。特に、歩行安定化制御システムに改良が必要になったので、3.3節にて詳しく述べました。

### 議論2 ヒューマノイドのコンテンツ産業

質問（小林 直人）

コンテンツ・メディアとしてのヒューマノイドの産業化を目指しているとの記述があります。現時点では、この論文の例で示された「歌唱やダンス」、「ファッションショーの司会」、「モデル」等以外に、今後具体的にどのようなニーズが考えられ、全体としてどれくらいの市場規模の産業（ヒューマノイド・コンテンツ産業やヒューマノイド・アミュー

ズメント産業)が想定されるでしょうか。またその場合に、他にどのような技術、機会や工夫があるとその産業がさらに育っていきと考えられますか。

回答 (中岡 慎一郎)

HRP-4Cを用いた具体的なコンテンツとしては、論文で示した例以外にも、演劇や、成人式でのメッセージビデオ、見本市における製品紹介等を実際に行ってきました。また、2010年に開催されたアジア太平洋経済協力(APEC)首脳会議においては、日本の先端技術の展示会にてHRP-4Cが歓迎のあいさつを各国首脳に行いました。論文で示した例も含めて、このようにHRP-4Cのようなヒューマノイドが何かを「伝える」「提示する」「表現する」「演じる」といったことの応用範囲は広く、具体的なニーズをコンテンツの内容で考えていくことにはきりがありません。この部分はクリエイターの仕事となってくるので、今後、多様な分野のクリエイターの方々と広く議論していきたいと考えています。

産業に関しては、まずは既存のコンテンツ産業やアミューズメント産業の枠組みの中でロボットが使われるようになるというイメージで考えています。そのような期待は、経産省の技術戦略マップ2010においても「アイドルロボット」として記述されており、影響を与える範囲として、音楽、映画、ドラマ、遊園地、観光の各産業が取り上げられています。これらのライブ・エンターテインメントの市場は1兆円(2007年)です。この中でロボット自体(ロボットのハードウェア・ソフトウェア・運用サービス等)の市場規模として、まずは国内で数十億円程度を達成することが目標となるかと思っています。その後、「8.今後の展望」に述べた技術発展によってロボットの応用範囲を広げること、この産業をさらに育てていければと思います。また、産業を育てる機会や工夫という点では、やはりクリエイターとの連携が重要になると思います。

### 議論3 日本文化としての特性

質問 (小林 直人)

このようなヒューマノイドに対して感じるある種の親近感、日本特有の文化に根ざしていると考えられないでしょうか。もし文化が異なった場合は、人間が感じる印象も異なると考えられますが、国際学会での評判や反応はいかがでしょうか。

回答 (中岡 慎一郎)

国際学会での研究者から直接得られる評判や反応は、国籍を問わず好意的なものが中心でした。これは、技術を中心に評価していることや、もともとロボット研究者はロボットが好きなおからくるものだと思います。したがって、国によってどのように印象が変わっているかについて、学会の反応からはよく分かりません。一方、動画投稿サイト等のネット上で寄せられたコメントは、好意的な意見ばかりではありませんでした。その中で気づいたこととして、海外の人が書いたと思われる英語のコメントの中には「いずれ人を襲う」「戦争に使われる」といった趣旨のコメントも多かったのですが、日本語で書かれたコメントの中にはそのようなものはほとんどなく、この点では文化の違いのようなものを感じました。いずれにせよ、非常に多数のコメント

が寄せられているので、それらの統計をとれば印象の違いに関する正確な傾向が分かるかもしれません。

### 議論4 ヒューマノイドの技術的進化とコンテンツの魅力限界

質問 (小林 直人)

現在はヒューマノイドが人間のように動いてコンテンツを作っていることが大きな興味を惹いていると思います。今後、技術がより高度になると、人間ができないこともできるようになると思います。コンピュータがチェスで初めて人間に勝ったときには興味を惹きましたが、その先は興味がなくなってしまったように、ヒューマノイドによるコンテンツにも人間の興味を失わせる限界があるような気がします。もしそうだとすると、その限界はどのようなもので、いつごろ到来すると考えられるでしょうか。あるいはそうならないためにはどのような工夫がいるのでしょうか。

回答 (中岡 慎一郎)

ヒューマノイドロボットを用いたコンテンツが人の興味を惹く要素として、「ロボット自体への興味」と、「コンテンツの内容への興味」があるかと思っています。前者については、人間と変わらないところまで進化し、さらにロボットが人間を超えて進化していくことに関して、人々の興味はつきないかと思っています。また、後者については、興味深い内容を実現するためにロボットの特徴や機能が表現や運用の面で役に立てばよいのだと思います。これについても、ロボットが進化していくことで人間にできないようなことができるようになれば、それだけコンテンツの表現や運用の幅が拡がり、より一層興味を惹くコンテンツ内容に繋がると考えています。

### 議論5 ヒューマノイド研究開発の戦略

質問 (小林 直人)

ヒューマノイド研究開発の戦略や方針の一つとして、本研究のようなコンテンツ・メディアとしてのヒューマノイド利用を先行させ、その利用に駆動されるかたちでヒューマノイドの運動能力や堅牢性・安全性等の基本性能を向上させ、これらの基本性能の向上をヒューマノイドによる生活支援を含む他の応用に繋げる方策であると理解しました。その戦略は妥当だと思います。一方で、人間の機能を支援する場合は必ずしもヒューマノイドである必要はないと考える意見は、依然根強いと思われる。人間自身の心理的側面も考慮して、ヒューマノイドが必要だという意見があればお聞かせ下さい。

回答 (中岡 慎一郎)

人間の生活を支援するためにロボットにできる作業を増やしていけば、「1.コンテンツ技術としての人間型ロボット」の第2段落で述べた理由により、ロボットの物理的な形態は必然的に人間に近づくのではないかと考えています。また、人間に近い形態は人間を心理的側面から支援することに対しても有効であると考えられます。結局、ロボットにどこまで求めるかという問題であり、生活支援における高い要求に答えていくためには、多くの要素技術の発展に加えて、「ヒューマノイドという形態」も必要となると考えています。