

CG とセンサによるロボットのCG 頭部実現方法

鈴木 智也[†] 高山 麻美[†]
杉本 裕介[†] 加藤 清敬[†]

近年、人間との親和性を重視したパートナーロボットの実現を目指し、ロボットの頭部を構築するための様々な手法が研究されている。なかでも、CG で構築する試みは、コストや保守性の面で有用である。しかし、現実世界の物理的環境がロボットの頭部に反映されず、リアリティの欠如につながることは否定できない。本研究では、現実世界と仮想世界との関わり合いを密にし、リアリティのあるロボットの頭部構築方法を提案する。その手法として、ロボットの頭部に取り付けたセンサにより取得した「現実世界での環境変化」や「現実世界からの働きかけ」を、ロボットの頭部に反映することにより、CG で描かれたロボットの頭部が現実世界にあるかのように表現する。そして、プロトシステムを構築し、アンケート調査を行うことで、その有効性の検証と問題点の抽出を行った。その結果、リアリティや親和性の向上に有効であることが分かったので報告する。

Realization of Robot's Head Using Computer Graphics and Sensors

TOMOYA SUZUKI,[†] ASAMI TAKAYAMA,[†] YUSUKE SUGIMOTO[†]
and KIYOTAKA KATO[†]

Recently, research and technological development about a robot's head has been made widely to realize a partner-type robot. Above all things, a robot's head using computer-graphics has advantages in cost and maintenance. However, it cannot be denied that reality is lacking in a robot's face using CG because a robot's head in the virtual world does not fit in the environment of the real world. This paper proposes a robot's head with CG and several kinds of sensor that responds to a surrounding environment in order to reduce the discomfort. There, the face and hair of a robot can be represented realistically in a display according to the change of a surrounding environment and human approach. The construction of a prototype system and a questionnaire survey verifies the usefulness of the proposed system with some problems. Consequently, this paper reports that a robot's head using CG and sensors can work realistically and it can improve the human feelings such as friendship.

1. 緒 論

情報化・高齢化社会などの背景から、パートナーロボットが様々な機関で研究されてきた。このようなロボットは、従来の産業用ロボットとは異なり、我々の生活をサポートし、あるときはペットのように癒しとして機能するなど、人間にとって家族のような身近な存在となると予想される。そこには、人間とロボットとの意思疎通が重要なテーマとなる。

人間同士の意志疎通方法については、数多くの研究がなされている。エンゲルは、意思疎通を行う要素として非言語要素が93%を占めており、特に顔の表情は全体の55%を占めていると報告している¹⁾。また、マ

レービアンは、意思疎通を行う要素として7%が言語的要素であり、38%が音声の特徴、55%が顔の表情によると報告している²⁾。そのほかにも、意思疎通において顔の表情は重要な要素の1つであるという報告がある^{3),4)}。このことから、人間とロボットとの円滑な意思疎通を実現するためには、ロボットが顔を有することが重要であるといえる。また、我々は日常「うなずく」、「首を振る」など顔および頭部全体を用いたジェスチャによっても意思疎通を行っているため、「顔の表情を含む頭部全体」が重要な要素であるといえる。そして、人間とロボットが人間同士のように円滑に意思疎通を行うためには、ロボットの頭部を人間同様にリアルに実現することが有効であろう。

人間の頭部をリアルに表現する方法には、コンピュータグラフィクス(CG)を使用するものがある。これには、レンダリングの方法と実画像のテクスチャマッ

[†] 東京理科大学工学部
Faculty of Engineering, Tokyo University of Science

ピングの方法があげられる⁵⁾。前者の方法は 3 次元モデルをレンダリングすることで実現するものである。人間の顔の細かな凹凸や皺など、リアルに表現するには 3 次元モデルの精細化が必要となるためデータ量の増大が問題となる。このため、比較的少ないデータ量でリアルな頭部を表現する方法として、実写画像をテクスチャマッピングする後者の方法が数多く研究されてきた^{6)~8)}。

このように CG を用いて作成した頭部を、ロボットの頭部に実装した例としては、以下のものがあげられる。「健くん」⁹⁾は介護保健施設において、高齢者と楽しく会話することを目的に開発されており、顔に液晶を組み込み、様々な表情や手の動き、声の調子で多様な感情を表現する。また、人間型ソフトウェアロボットの研究とその応用システムの提案¹⁰⁾では、人に似た姿をした CG 像に視覚・聴覚・顔表情・ジェスチャなどの日常的な刺激を与え、できるだけ人間に近い形式で、子供が成長するように学習するシステムの提案を行っている。これら CG を用いて実現されたロボットの頭部は、イラスト調であったりシンプルな顔モデルで表現されており、リアルな頭部のモデリングはなされていない。

一方、CG によるロボットの頭部のリアリティの限界から⁵⁾、機械的な機構によりロボットの頭部を構築した研究がある¹¹⁾。そこでは、ロボットの顔表情によって人間らしいコミュニケーションを可能にすることを目的に、人間と同様な顔を持ち表情を表出する顔ロボットを実現した。この顔ロボットは、アクチュエータやシリコンゴム皮膚によって構成された 3 次元の立体形状を有し、「驚き、恐れ、嫌悪、怒り、幸せ、悲しみ」の 6 基本表情を表出し、リアリティのある顔を実現している。また、機械式の別の研究として、「視覚・聴覚・臭覚・触覚の感覚機構」と「眼瞼・眉・唇・顎・顔色・声を用いた表情表出機能」を有する人間型頭部ロボットの研究がある^{12),13)}。そこでは、刺激によりリアルな表情を表出するロボットが実現されている。

以上のことから、現状のロボットの頭部の実現においてはリアリティの面では、機械式が優位であるといえる。これらの機械式のロボットの頭部は、かなりのリアリティを与えることに成功しているが、コストがかかりかつ機械部品から構成されるため保守性に問題がある。家庭用のロボットとしては、安価かつ小型軽量で保守性のあるものが望ましく、その面では CG 式によるロボットの実現が有効であると考えられる。形状処理技術の進展から顔をリアルに表現する技術も進展している^{14)~16)}。さらに、CG 式では、機械式には難

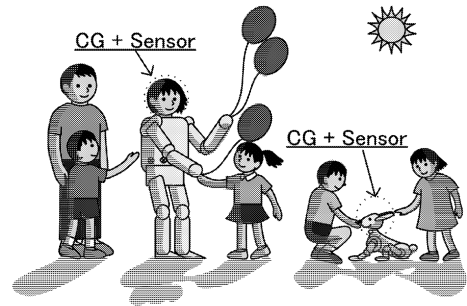


図 1 人間らしさ
Fig. 1 Reality.

しい誇張表現なども可能であり、新たなコミュニケーションの形態も創造できる可能性がある。

本研究では、今後有望と考える CG 方式によるロボットの頭部の実現方法として、その欠点であるリアリティの欠如に焦点を当てる。その要因の 1 つに、現実世界の光や風や接触といった物理的要因が仮想空間上のロボットに反映されない点が考えられる。この点に関して、前述の実写画像を用いて表現した CG の頭部は、実写画像の照明が固定であるという問題点の指摘もある¹⁷⁾。このことから、ロボットの頭部に CG による頭部を使用する場合、環境の変化に対応可能なレンダリングによる方法が望ましいと考えられる。そして、CG 式の欠点を解消しリアリティを向上させるために、ロボットの頭部を CG とセンサにより構成し、現実世界の物理的要因を CG に反映させる方法を提案する^{18),19)}。

図 1 は将来のパートナーロボットのイメージ図で、CG とセンサから構成された人間や動物の形をしたロボットの頭部により、人間とのコミュニケーションを実現することをイメージしたものである。ここで、「現実世界での環境変化」に関しては、CG により構築された頭部に光や風といった外部環境要因を反映することで、あたかもロボットの頭部が現実世界に存在するかのよう表現する。また、「現実世界からの働きかけ」に関しては、頭部を通して円滑に意思疎通を行ううえで重要なスキンシップに着目し、仮想世界と現実世界との間にインタラクションを設ける。

以下、提案の方法を検証するためのプロトタイプシステムの実装方法について述べる。また、提案のシステムの有効性を客観的に評価するために、50 名を対象にしたアンケート調査について述べる。そして、アンケート調査の結果、リアリティの向上と親和性の向上に有効であることが分かったので報告する。

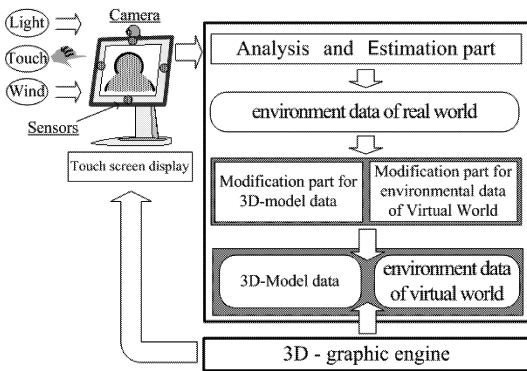


図 2 実証システム

Fig. 2 System configuration.

2. CG とセンサを用いたロボットの頭部実現方法

本研究では、環境要因の中でも頭部の外観に大きな変化を与える光と風、接触による圧力を考慮してロボットの頭部を実現する。

頭部の外観は光の加減により変化を生じる。人間の頭部に光が当たると影ができ、肌や髪の色合いも変化する。しかし、これまでのCGによるロボットの頭部では、顔に光が当たっても変化が生じないためリアリティに欠ける。そこで、CGによるロボットの頭部に外界の環境要因である光を反映することにより、リアルな頭部の実現を試みる。

また、風が人間の頭部に当たると髪がなびき、頭部の外観に変化を生じる。髪は顔の表情と同様、その色・質・スタイルなどにより頭部の印象を大きく左右する。このため、髪も意思疎通において重要な要素であるといえる。しかし、これまでのCGによるロボットの頭部では、風が当たっても変化が生じない。そこで、CGによるロボットの頭部に外界の環境要因である風を反映することにより、リアルな頭部を実現する。

さらに、接触による圧力も顔の皮膚や髪の外観を大きく変化させる要素である。人間が人間の頭部に触れると、皮膚がくぼんだり、髪が変形したりする。しかし、これまでのCGによるロボットの頭部では、人間が接触しても変化が生じない。そこで、CGによるロボットの頭部に外界の環境要因である接触による圧力を反映することにより、頭部のリアリティを向上させる。

図 2 に、我々が提案するシステムの構成を示す。本システムは同図に示すように、モニタと外部環境取得のためのセンサを有し、ソフトウェアとして解析・推定部と 3 次元モデル変更部、仮想環境要因変更部、3

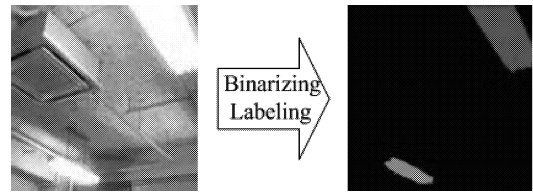


図 3 画像処理による光源の推定

Fig. 3 Image processing for estimation of light sources.

次元モデル表示部を備えている。まず、センサに外的要因である光や風、圧力などが入力されると、その位置や強弱を解析・推定する。次に、解析・推定された外部環境要因をもとに、3次元モデルと仮想空間中の環境に反映する。最後に、3次元モデル表示部を用いてCGで描画し表示装置に表示する。これにより、仮想世界に存在するロボットの頭部の外観が、現実世界の環境要因に連動して変化する。以下、それぞれ光、風、接触による圧力をロボットの頭部へ反映させる方法について述べる。なお、本研究はロボットの頭部をCGを使ってモニタ画面で実現するもので、ロボットの体の部分については実現していない。

2.1 光の反映による頭部の変化

光には、強弱や方向、色、形状など様々な属性がある。こうした光の属性を取得するセンサとして、カメラを使用する。図 2 に示す推定部では、画像処理により環境光を推定する。画像処理部分(図 3)は、まず、入力された画像を二値化し、光源の位置情報を取得する。次に、ラベリング処理を行うことによって光源を特定し、その位置、大きさ、色、形状を取得する。そして、それをロボットの頭部に反映し、ディスプレイに表示することによって仮想空間上に環境光を表現する。なお、本研究で用いたカメラの仕様は「サンワサプライ製 CMS-V11, 30 万画素 CMOS センサ, ビデオ解像度: 640 × 480」である。

2.2 風の反映による髪の変化

図 2 に示す推定部では、風の推定に流体解析を使用する。まず、モニタの周囲 4 点に取り付けたセンサに風が入力されると、モニタ前面の風圧を線形近似する。次に、その情報をもとに流体解析を行うことによって風の場を推定する。そして、それを仮想空間上のロボットの髪に反映し、ディスプレイに表示することによって仮想空間上に風を表現する。

流体解析部分では、コンピュータの計算速度と表示能力を考慮し、図 4 に示すように、上下左右にセンサを配置し、そこから得られた圧力をもとに、格子点を各軸 20 等分、タイムステップを 0.1 msec として風の場を数値計算により求める。風速は音速よりも十分小

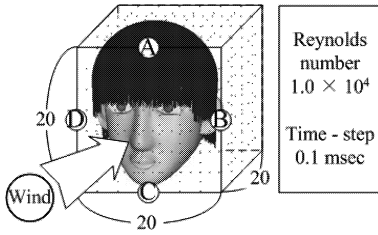


図 4 流体解析のためのパラメータと格子点

Fig. 4 Parameters and lattice points for fluid analysis.

さいため、非圧縮性と仮定できる．そこで式 (1), (2) よりなるナビエ・ストークス方程式を用いて流体解析を行う．流体解析には、様々な解析手法があるが、厳密さよりも解析速度を考え、最も簡易的に行える MAC 法²⁰⁾ を用いて解析する．なお、それぞれ式 (1) は質量保存を、式 (2) は運動量保存を表す式である．

$$\nabla \cdot V = 0 \tag{1}$$

$$\partial V / \partial t + (V \cdot \nabla)V = -(1/\rho)\nabla P + (\mu/\rho)\nabla^2 V \tag{2}$$

V : flow velocity P : pressure
 ρ : density μ : viscosity coefficient

式 (2) より、速度 V は、時間発展型になっているが、圧力 P は時間発展型になっていない．そこで解析を行うために式 (1), (2) をそれぞれ変形すると、

$$\Delta P = -\nabla \cdot \{V \cdot \nabla V\} + D^n / \Delta t \tag{3}$$

$$\partial V / \partial t + (V \cdot \nabla)V = -\nabla P + (1/Re)\nabla^2 V \tag{4}$$

$D \equiv \nabla \cdot V$ Re : Reynolds number
 $n = 0, 1, 2, 3 \dots$

となり、この式から流体解析を行う．なお、 D は式 (2) より 0 となっているが、数値解析の都合上、定数として扱う．

また、図 5 に示すように頭部形状を半球と考え、その頭頂をつむじとする．髪モデルの従来研究として、頭髪を「空間曲線」で近似し、風になびく頭髪の運動を制御する際はこの曲線の形状制御点の位置を、「剛体セグメントモデル」を用いた運動方程式から求めている²¹⁾．本研究ではこれを参考に、リアルタイムに髪の「なびき」を描画するため次のようなモデルを用いて頭髪の形状制御を行った²²⁾．まず、頭部形状に沿って、つむじから毛先まで一定間隔で制御点を置き、これを直線で結ぶ．そして、髪の動きは、流速と重力により決定付ける．

なお、一般環境下における微弱な風の感知を行うセンサとして、圧力センサは感度や応答性の面で不適切であった．そこで、本システムでは風取得のためのセンサとして、圧力型マイクロフォンを使用した．その仕様は「無指向性、周波数帯域：50 Hz ~ 16 kHz、検

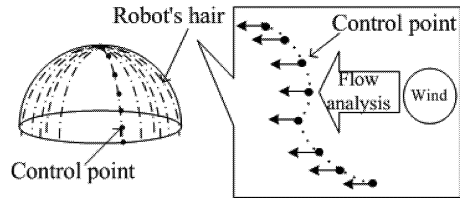


図 5 ロボットの毛髪モデル

Fig. 5 Robot's hair model.

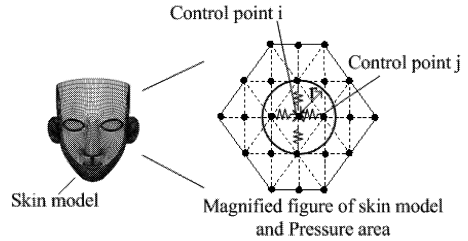


図 6 皮膚形状変化のための皮膚モデル

Fig. 6 Skin model.

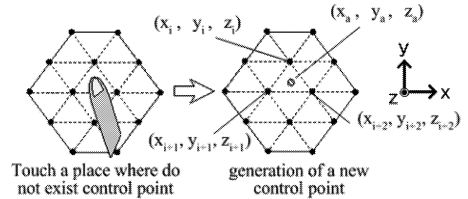


図 7 制御点の生成

Fig. 7 Generation of a control point.

出感度： -58 ± 2 dB (0 dB = 1 v/pa, 1 kHz), 信号対雑音比：60 dB 以上、エレクトレット型コンデンサマイクロフォン」である．

2.3 圧力の反映による頭部形状変化

2.3.1 圧力による皮膚形状変化

図 6 に、皮膚モデルと、その一部を拡大したものを示す．皮膚モデルはすべて三角形ポリゴンで構成され、三角形の各頂点を形状変化のための制御点とする．まず、接触によってタッチパネルに圧力が入力されると、その圧力の大きさと座標値を検出する．次に、検出された圧力・座標値をもとに力の及ぶ範囲と該当する各制御点に加わる力を線形的に定め、それを制御点に適用する．なお、本システムでは、各制御点間をパネによって結合するパネモデルを使用する．

また、ロボットの顔に指が接触した際、接触点に制御点が存在しないことも起こりうる．このような場合は、図 7 に示すように制御点を生成する．

指が接触した際の周囲 4 点の制御点をそれぞれ $(x_i, y_i, z_i) \sim (x_{i+2}, y_{i+2}, z_{i+2})$ とおく．ここで、説明を簡略化するために奥行きである z 軸座標は、すべて同じとして扱う．次に、タッチパネルにより検出され

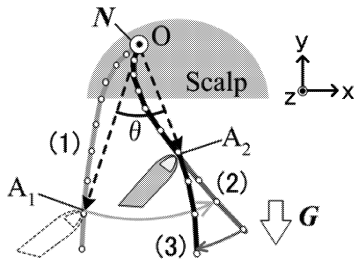


図 8 接触した際の毛髪形状変化

Fig. 8 Change in the hair model when stroked.

た座標値から、仮想空間にあわせて変換された座標値 (x_a, y_a, z_a) を計算機内部の形状データの配列である制御点 $(x_i, y_i, z_i) \sim (x_{i+2}, y_{i+2}, z_{i+2})$ の間にくるように内挿して、新しい形状データとして更新した後、前記バネモデルを適用する。なお座標系は、図 6~8 に示すように、右手座標系に従い、画面に向かって水平右向きを正として x 軸、垂直上向きを正として y 軸、手前方向を正として z 軸をとる。

2.3.2 圧力による毛髪形状変化

ロボットの髪に接触した際の毛髪形状変化は、以下の手順で行っている。この様子を図 8 に示す。なお、図 5 においても示したように、制御点間を直線で結ぶことによって髪を描画している。

- (1) 指がロボットの髪に触れると、指と接触している髪を判定する。なお、ロボットの髪に接触した際の指の座標点 $A_1 = (x_1, y_1, z_1)$ 、接触した髪の毛根の座標点を O とおく。
- (2) 指を移動後の座標点を $A_2 = (x_2, y_2, z_2)$ とする。
- (3) $\overline{OA_1}$ と $\overline{OA_2}$ との外積方向に回転軸 \vec{N} をとり、指と接触している髪の全制御点を、 $\overline{OA_1}$ と $\overline{OA_2}$ のなす角 θ だけ回転軸 \vec{N} を中心に回転移動する。回転移動後、指の座標点 A_2 に最も近い制御点から毛先までの間に存在する制御点に重力 \vec{G} を加えることにより、移動後の髪の形状を決定する。

なお、タッチパネルディスプレイは「タッチパネルシステムズ(株)製タッチモニター(9416TD15)、超音波表面弾性波方式、15インチ」を使用した。

3. 動作検証実験

前章のシステムを実装し、以下の動作検証実験を行った。

- I ロボットに向かってライトを当てる。
- II ロボットに向かって団扇で扇ぐ。
- III ロボットの皮膚や髪を触る。



left → front → right

図 9 向かって左から右へ光を当てたとき

Fig. 9 Changes in the robot's head when the light is moved from the left to the right.



up → front → down

図 10 上から下へ光を移動したとき

Fig. 10 Changes in the robot's head when the light is moved from the up to the down.



dark ← → bright

図 11 弱, 中, 強の光を順に当てたとき

Fig. 11 Changes in the robot's head when the light fades in.

3.1 動作検証実験結果

I ロボットに向かってライトを当てる。

図 9, 図 10, 図 11 にロボットにライトを当てた結果を示す。図 9 は、光源をロボットに向かって、順に左から右へ移動した場合である。

また、図 10 は弱い光源を左から右へ移動した場合、図 11 は上から下に移動させた場合である。実験結果から、ロボットの顔がライトの当て方で変化することが確認できた。また、光源の色を変えると、ロボットの顔の色合いが変化することも確認できた。

II ロボットに向かって団扇で扇ぐ。

図 12, 図 13, 図 14 にロボットを団扇で扇いだ結果を示す。時間経過は、無風状態を t_0 として t_1, t_2 と変化する。図 12 は、正面から風を発生させた場合の頭部の様子である。また図 13, 図 14 はロボットの頭部に向かって右から風を発生させた場合であり、図 13 が強風、図 14 が弱風を与えた場合である。実験結果からロボットの顔が風の当て方により変化することが確認できた。

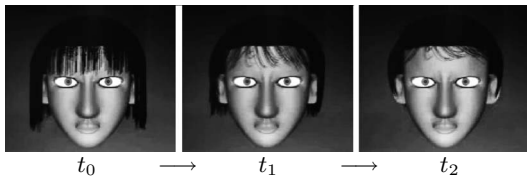


図 12 正面から風を発生させたとき

Fig. 12 Changes in the robot's hair when the wind is applied forward.

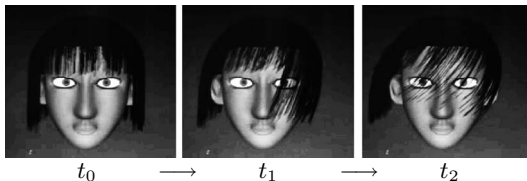


図 13 向かって右から強風を発生させたとき

Fig. 13 Changes in the robot's hair when the strong wind is applied from the right.

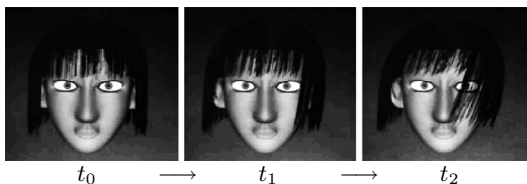


図 14 向かって右から弱風を発生させたとき

Fig. 14 Changes in the robot's hair when the weak wind is applied from the right.

III ロボットの皮膚や髪を触る .

ロボットの皮膚を指で押した際の変化を図 15 と図 16 に示す . なお , 図 15 はロボットに向かって右の頬を押した場合であり , 図 16 は目の下を引っ張る動作をした場合である . また , 髪にさわった際の変化を図 17 と図 18 に示す . ここで , 図 17 は前髪を撫でた場合であり , 図 18 は髪を下から上にかきあげる動作をした場合である . 実験結果からロボットの皮膚や髪を触ることで , 皮膚や髪が変化することが確認できた .

4. 被験者実験

実際に構築したロボットの頭部の有意性を評価するために , ヒューマンインタフェースに関する専門知識を持たない東京理科大学の学生 50 名 (男性 41 名 , 女性 9 名 , 平均年齢 21.2 歳) を対象としてアンケート調査を行った . その方法は , 以下のようにそれぞれ異なる機能を持った 4 台の同じ顔のロボットの頭部に対して , それぞれ 1 分間ずつインタラクションをとってもらい , SD 法^{23),24)} による印象評価のための 5 段階 ,

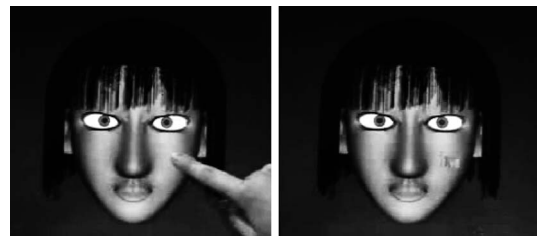


図 15 向かって右の頬を押したとき

Fig. 15 Changes when the right cheek is touched.

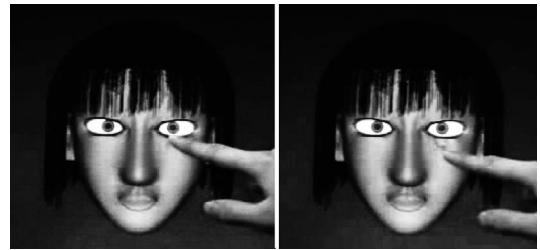


図 16 目の下を引っ張ったとき

Fig. 16 Changes when the eyelid is pulled down.



図 17 前髪を左から右に向かって撫でたとき

Fig. 17 Changes when the robot's fringe of hair is stroked from the left to the right.



図 18 髪をかきあげたとき

Fig. 18 Changes when the robot's hair is stroked from the down to the up.

10 個の形容詞対からなるアンケートに回答してもらうというものである . なお , SD 法は印象評価を数値化する統計的手法で , 被験者に刺激を与え , その印象を相反する形容詞対によって測定しようとする方法である .

1) 4 台のロボット

- ロボット 1 : 何も機能を持たない .
- ロボット 2 : 光により変化をする .
- ロボット 3 : 風により変化をする .
- ロボット 4 : 接触により変化をする .

表 1 アンケート結果の平均値と標準偏差
Table 1 Mean and s.d. of the questionnaire result.

adjective	no function		light		wind		contact	
	mean	s.d.	mean	s.d.	mean	s.d.	mean	s.d.
gentle	1.82	0.72	1.88	0.72	1.80	0.73	1.94	0.84
affable	2.10	0.68	2.32	0.82	2.26	0.83	2.32	0.82
friendly	1.84	0.77	2.26	0.92	2.26	0.97	2.42	0.84
comfortable	2.72	1.07	2.74	1.10	2.78	1.13	2.84	1.11
psychologically acceptable	2.82	1.14	2.62	0.78	2.60	0.88	2.88	1.04
recognizable	2.18	1.12	2.84	1.11	3.60	1.01	3.64	1.12
interesting	2.24	1.04	3.00	1.11	3.42	1.05	3.78	0.89
real	2.56	1.15	3.08	1.10	3.06	1.08	2.98	1.10
humanlike	2.44	0.97	2.58	0.86	2.70	0.93	2.48	0.93
agile	2.00	1.01	2.34	1.08	3.28	0.95	3.16	1.06

表 2 有意性
Table 2 Significant.

adjective	light			wind			contact		
	difference	p value		difference	p value		difference	p value	
gentle	0.06	0.569		-0.02	0.868		0.12	0.335	
affable	0.22	0.078	**	0.16	0.159		0.22	0.040	**
friendly	0.42	0.004	***	0.42	0.002	***	0.58	0.000	***
comfortable	0.02	0.916		0.06	0.746		0.12	0.523	
psychologically acceptable	-0.2	0.268		-0.22	0.195		0.06	0.705	
recognizable	0.66	0.004	***	1.42	0.000	***	1.46	0.000	***
interesting	0.76	0.000	***	1.18	0.000	***	1.54	0.000	***
real	0.52	0.004	***	0.5	0.006	***	0.42	0.024	**
humanlike	0.14	0.398		0.26	0.119		0.04	0.792	
agile	0.34	0.097	*	1.28	0.000	***	1.16	0.000	***

2) インタラクションの方法

アンケート調査の際、被験者全員に以下の条件で各ロボットとインタラクションをとってもらった。

- I ロボットに向かってライトを当てる(上下左右)。
- II ロボットに向かって団扇で扇ぐ(上下左右)。
- III ロボットの皮膚や髪を触る。

3) アンケート内容

被験者が4台のロボットとインタラクションをとる順番はランダムとした。また、アンケート内容は以下のとおりで、各形容詞対について、1から5までの5段階尺度を用いた。

アンケート項目

こわい	1-2-3-4-5	やさしい
感じが悪い	1-2-3-4-5	感じがよい
親しみにくい	1-2-3-4-5	親しみやすい
違和感がない	1-2-3-4-5	違和感がある
心理抵抗がない	1-2-3-4-5	心理抵抗がある
分かりにくい	1-2-3-4-5	分かりやすい
退屈な	1-2-3-4-5	興味深い
リアルでない	1-2-3-4-5	リアルな
機械的な	1-2-3-4-5	人間らしい
鈍感な	1-2-3-4-5	敏感な

4.1 被験者実験結果

アンケート結果より、SD (Semantic Differential) 法を用いて各ロボットにおける印象評価点の平均値 (Mean) と標準偏差 (Standard Deviation, 以下 s.d. と略す) を算出した結果を表 1 に示す。表 1 から、機能なし (ロボット 1) に比べて、機能あり (ロボット 2, 3, 4) のほうが全体的に平均値が高くなっていることが確認できた。

4.2 被験者実験考察

表 1 のアンケート結果をもとに、有意性を確認するために、t 検定を行った。その結果を表 2 に示す。表 2 より「感じのよい」、「親しみやすい」、「分かりやすい」、「興味深い」、「リアルさ」、「敏感さ」の項目に関しては、P 値が 0.1 以下であるため有意性を確認することができた。また、逆に「違和感」、「心理的抵抗」の項目に関しては、P 値が 0.1 より大きかったため、その有意性を確認することができなかった。なお、表 2 中の「*」において、統計学的に * は有意傾向あり、** は 5% 水準で有意、*** は 1% 水準で有意を意味する。

ここで用いた P 値とは、帰無仮説の下で、ある統計量が生じる確率の値である。この P 値が設定した危険率以下のとき、帰無仮説を棄却して対立仮説を採用

する。本実験での帰無仮説は「ロボット1とロボット2,3,4には差がない」とした。つまりP値が危険率以下の場合、対立仮説である「ロボット1とロボット2,3,4には差がある」を採用するものとする。

以上の結果からリアリティと親和性の改善が確認できた。また、人間とロボットの物理的なインタラクションは違和感や心理的抵抗に寄与しないことが分かった。この問題点については「顔だち」「表情」「馴染み」などの項目にも関係するものと考えられ、その原因究明のため検証実験などを検討していく。また、アンケートにより、被験者より「もっと優しい顔のほうが親しみやすい」「無表情で怖い」「反応が遅いものもある」との意見が得られたが改善項目として今後検討していく。

5. 結 論

本研究では、CG方式によるロボットの頭部の実現方法として、ロボットの頭部をCGとセンサにより構成し、リアリティの向上をはかる方法を提案した。そして、被験者実験を行い、その有効性の検証を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 提案方式により現実世界の環境に応じてCGによるロボットの頭部の外観が、実際の人間のように変化するようになった。
 - ロボットの周囲の風の向き、強弱に応じて、髪の毛の向きや揺らぐ幅が変化する。
 - ロボットの光の強弱、色に応じて、ロボットの顔の皮膚および髪の毛の色合いが変化する。
 - 現実世界からの接触による圧力、位置に応じて、ロボットの皮膚がへこみ、髪が揺れる。
- (2) アンケート調査により以下のことが分かった。
 - 本方式により構築したロボットの頭部は、人間にリアリティおよび親和性を提供することができる。
 - 本方式により構築したロボットの頭部は、違和感や心理的抵抗の軽減には貢献しない。

本研究では、プロトタイプによる効果を調査したが今後の展望として次の項目をあげることができる。今回はプロトタイプとして平面ディスプレイにより実現したが、3次元のロボット頭部を実現する方法としては、3次元的なドーム状の頭部に映像を投影する方法が今現在実現可能な方法としてあげられる。また、自由形状に対応した曲面液晶の実用化が進めばその適用も行いたい。

また、今回の研究では、風圧はマイクロフォンに加

わる圧力であり、それをディスプレイの奥行き方向の圧力として測定した。今後の展開として、3次元的なロボットの頭部に適用するためには、3軸方向の圧力が測定できるセンサの利用が理想的ではあるが、超小型のマイクロフォンを頭部の要所に複数配置し、それらの圧力から風の分布を推定することで対応可能と考える。

そして、今回のプロトタイプでは接触圧力を超音波方式によるタッチパネルにより実現したが、3次元的形状における取得方法としては、柔軟性のある3次元ドーム状頭部に内部に歪みゲージを複数配置し圧力を推定する方法で実現できると考える。

参 考 文 献

- 1) W. フォン・ラフラー・エンゲル, 本名信行, 井出祥子, 谷林真理子 (訳): ノンバーバル・コミュニケーション ことばによらない伝達, 大修館書店 (1981).
- 2) A. マレーピアン, 西田 司 (訳): 非言語コミュニケーション, 聖文社 (1986).
- 3) 黒川隆夫: ノンバーバルインタフェース, ヒューマンコミュニケーション工学シリーズ, オーム社 (1994).
- 4) マジョリー・F・ヴァーガス, 石丸 正 (訳): 非言語コミュニケーション, 新潮選書 (1987).
- 5) 崔 昌石, 原島 博, 武部 幹: 顔の3次元モデルに基づく表情の記述と合成, 電子情報通信学会論文誌 (A), Vol.J73-A, No.7, pp.1270-1280 (1990).
- 6) 長谷川修, 森島繁生, 金子正秀: 顔の情報処理, 電子情報通信学会論文誌 (D), Vol.J80-D-II, No.8, pp.2047-2065 (1997).
- 7) 青木義満, 橋本周司: 解剖学的知見に基づく顔の物理モデリングによる表情生成, 電子情報通信学会論文誌 (A), Vol.J82-A, No.4, pp.573-582 (1999).
- 8) 佐藤 一, 大谷 淳, 寺島信義: 顔面筋動作に基づく形状変形とテクスチャの張替えによる三次元人物顔画像の再構築, 電子情報通信学会論文誌 (D), Vol.J88-D-II, No.7, pp.1126-1142 (2005).
- 9) 上田邦良: 介護ロボット「健くん」の開発, 第2回福祉工学シンポジウム公演論文集, 8C21 (2002).
- 10) 長谷川修: マルチモーダル対話における視覚の役割とその応用, コンピュータビジョンとイメージメディア&ヒューマンインタフェース研究会共催研究会 (オーガナイズドセッション), HI-95&CVIM-129-023, pp.165-170 (2001).
- 11) 小林 宏, 原文雄, 内田 豪, 大野宗久: アクティブ・ヒューマン・インターフェース (AHI) のための顔ロボットの研究 顔ロボットの機構と6基本表情の表出, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.1, pp.155-163 (1994).

- 12) 三輪洋靖, 伊藤大輔, 大口哲矢, 高信英明, 高西淳夫: 多彩な感情表出が可能な人間形頭部ロボット WE-3RV の開発, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp.271-272 (2001).
- 13) 三輪洋靖, 伊藤大輔, 大口哲矢, 高信英明, 高西淳夫: ヒューマノイドロボットにおけるロボットパーソナリティの導入, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp.273-274 (2001).
- 14) DeRose, T., Kass, M. and Truong, T.: Subdivision Surface in Character Animation, *J-COMP-GRAPHICS*, Vol.32, No. Annual Conference Series, pp.85-94 (1998).
- 15) 加藤清敬, 三上 博, 小山宏峰, 西村敬介, 川面恵司: 離散化制御点による曲面創成方法, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.1, pp.124-133 (2003).
- 16) Sederberg, T.W., Zheng, J., Bakenov, A. and Nasri, A.: T-splines and T-NURCCs, *ACM Trans. Graphics*, Vol.22, No.3, pp.477-484 (2003).
- 17) 佐々木康, 小野英太, 森島繁生, 原島 博: 3次元構造モデルに基づく自然顔画像の陰影制御, 情報処理学会研究報告グラフィックスと CAD, 1992-CG-60, pp.17-23 (1992).
- 18) 新井政行, 加藤清敬: CG とセンサの融合によるロボットの顔の表示方法, *Visual Computingグラフィックスと CAD 合同シンポジウム 2002 予稿集*, pp.19-24 (2002).
- 19) 高山麻美, 鈴木智也, 新井政行, 加藤清敬: パーチャルヒューマンの CG とセンサによる実現 タッチパネルを利用した頭部形状変化, 情報処理学会第 66 回全国大会講演論文集, No.4, pp.137-138 (2004).
- 20) 河村哲也: 流体解析 1, 朝倉書店 (1996).
- 21) 三枝 太, 森島繁生: ダイナミクスモデルに基づく頭髪の運動表現, 情報処理学会研究報告グラフィックスと CAD, 1997-CG-087, pp.25-30 (1997).
- 22) 鈴木智也, 新井政行, 加藤清敬: パーチャル・ヒューマンにおける, センサと流体解析を利用した髪表現, 情報処理学会第 65 回全国大会講演論文集, No.5, pp.435-438 (2003).
- 23) 神田崇行, 石黒 浩, 石田 亨: 人間-ロボット間相互作用にかかわる心理学的評価, 日本ロボ

ト学会誌, Vol.19, No.3, pp.362-371 (2001).

- 24) 福田忠彦: 人間工学ガイド, サイエンス出版社 (2004).

(平成 17 年 1 月 5 日受付)

(平成 17 年 10 月 11 日採録)



鈴木 智也

2003 年東京理科大学工学部卒業 .
2005 年同大学大学院工学研究科修了 . トヨタ自動車 (株) 入社 .



高山 麻美

2004 年東京理科大学工学部卒業 .
現在, 同大学大学院工学研究科在学中 .



杉本 裕介

2005 年東京理科大学工学部卒業 .
現在, 同大学大学院工学研究科在学中 .



加藤 清敬 (正会員)

1978 年早稲田大学理工学部電気工学科卒業 . 同年三菱電機 (株) 入社 . 形状処理, CAD/CAM, 数値制御に関する研究開発に従事 . 1993 年博士 (工学, 東京大学) . 2000 年より東京理科大学工学部電気工学科助教授 . CG, VR, モデリング, システム制御, ロボティクスに関する研究開発に従事 . 精密工学会, ロボット学会各会員 .