

学術論文

アクティブ・ヒューマン・インタフェース(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—

小 林 宏*¹ 原 文 雄*²
内 田 豪*² 大 野 宗 久*²

Study on Face Robot for Active Human Interface —Mechanisms of Face Robot and Facial Expressions of 6 Basic Emotions—

Hiroshi Kobayashi*¹, Fumio Hara*², Gou Uchida*² and Munehisa Ohno*²

In order to develop "Active Human Interface (AHI)" that realizes heart-to-heart communication between intelligent machine and human being, we've been undertaking the investigation of the method for improving the sensitivity or "KANSEI" communication between intelligent machine and human being. This paper deals with the mechanical aspects of "Face Robot" that produces facial expressions in order to express the artificial emotions as similar as human being. As actuators move the face skin of the face robot, we select the flexible microactuator (FMA) driven by air pressure for the sake of moving the control points of the face robot corresponding to Action Unit (AU)s, and we design the aluminium frame of the Face Robot for disposing the FMA and then we make the skull frame onto the aluminium frame. The skin of the face robot made by silicon rubber covers up the skull frame. Then we undertake psychological recognition test by showing the face images of 6 basic facial expressions expressed on the Face Robot, and the results show us that the correct recognition ratio accomplishes 83.3% for 6 basic facial expressions. This high ratio shows the possibility of Face Robot as a "KANSEI" communication medium between intelligent machine and human being.

Key Words: Active Human Interface, Robot-Human Communication, Face Robot, Facial Expression

1. は じ め に

近年の情報社会の中で、ロボットやコンピュータに代表される知能機械と人間の関わりは密接になってきており、現代の社会はそれらなしでは正常に機能し得ないとも言えよう。機械が知能情報処理の面で日々めざましい進歩を遂げている現在、人間と機械との関わりは良きにつけ悪きにつけますますます緊密になり、機械は人間の日常生活の中で重要な位置を占めるようになりつつある。このような人間と機械との関わりにおいては、必然的に人間と機械とのコミュニケーションが必須になり、より人間に優しい機械が求められるようになると考えられる。より人間に優しい機械は、機械が人間に従うだけではなく、人間や環境に応じて柔軟に対応するように、人間と能動的にコミュニケーションできるインタフェースを必要とすると著者らは考えている。Fig. 1 に示すように、人間と機械とのコミュニケーションにおいては、人間と機械とが双方に関係し合い、お互いの心理的なインタラクションにより人間の能力を高めることも

可能である。また、Fig. 1 において、人間と機械との間で交わされる情報は論理的情報のみでなく、人間同士のコミュニケーションと同様に感情や感性といった心理的情報も含まれる。機械は人間の表情、音声、動作などから人間の感情や「心」を認識・理解し、それに応じて積極的な反応（例えば、人間と同じように笑ったり、泣いたりする）をすることにより人間に優しくすることが大切である。

以上のように、論理的情報と同時に心理的情報を扱うことのできる機械を実現するための能動的なインタフェースには、少なくとも次の3つの機能が必要であると考えられる。すなわち、

- (1) 機械が人間の感情、強いては「心」を理解する。
- (2) (1)での理解をもとに、機械が人間に対してどのような反応をすれば良いかを考える。

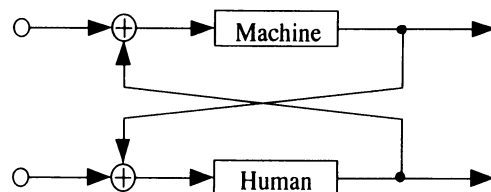


Fig. 1 Schematic diagram of human and machine interaction

原稿受付 1993年3月10日

*¹東京理科大学大学院

*²東京理科大学工学部

*¹Graduate School, Science University of Tokyo

*²Faculty of Engineering, Science University of Tokyo

(3) 機械が(2)の結果を人間に分かりやすいように表示伝達する。

このインタフェースは、機械が人間に積極的に働きかけることを目的としているので、特に「Active Human Interface: AHI」と呼ぶことにする[2]-[11]。言い方を変えれば、AHIは、人間の感情を検知するためのセンサ部((1))、それに対してどのように反応すれば良いか決定するコントローラ部((2))、及びそれらを人に表示伝達するアクチュエータ部((3))を有することになる。

ところで、人間対人間のコミュニケーションにおいて、メッセージのわずか7%が言語で伝達され、55%が顔の表情によって伝達されるという報告があり[12]、人間と機械とのコミュニケーションにおいても顔表情は非常に重要なメディアであると考えられる。そこで、AHIという新しいパラダイムを実現するために、著者らは人間と機械とのコミュニケーションのためのメディアとして特に「顔表情」を取り上げ、上記(1)、(2)、(3)それぞれについて検討してきた。(1)のセンサ部、すなわち機械が人間の感情を顔表情から認識・理解するための研究として、静止顔画像に対して、「驚き」、「恐れ」、「嫌悪」、「怒り」、「幸せ」、「悲しみ」の6基本表情[13]のニューラルネットワークによる認識[1][2]、6基本表情の強さの認識[3][4]、それらの混合表情の認識[5][6]について報告してきた。また、動的顔画像に対してリカレントニューラルネットワークによる顔表情認識の研究成果を報告した[7][8]。(2)のコントローラ部に関しては、調和理論[14]を用いた人工感情モデルについて報告した[9][10]。最後に(3)のアクチュエータ部に関しては、コンピュータ・グラフィックス(CG)により人工感情に応じた顔表情をCRT上に表出できるシステムを報告した[11]。このシステムは、顔の3次元ワイヤーフレームモデルに顔画像をテクスチャマッピングする方法を用いており、ワイヤーフレームモデルの格子点座標を動かすことにより様々な顔表情を手軽に作ることができる。同様な方法を用いた先駆的研究として顔画像の知的符号化の立場からCRT上に顔表情を表出する研究が崔らによって報告されている[15][16]。これらの研究は、3次元のワイヤーフレームモデルを用いているものの、「中立の顔」をテクスチャマッピングしているため、表情を表出した場合の輝度値の変化が実際とは異なること[15]、3次元形状変化がモデルの格子点座標の推定値に基づいていること[15]、皺や歯は「中立の顔」では表出されていないため、補助登録して、ある特定の顔の動きのときだけそれらを顔画像上に付加せねばならず不自然であること[16]等、CGの場合の問題点が指摘されていた。

本論文は、(3)のアクチュエータ部に関するもので、顔表情により人間らしきコミュニケーションを可能にするため、人間と同様な顔を持ち表情を表出する顔ロボットを製作し、その表情表出の静的特性を明らかにしたのでそれらを報告する。この顔ロボットは3次元の立体形状を有し、上記のようなCGの場合の問題点を解決すると共に、立体感(特に、奥行き感)、質感、量感、実在感等の感性的因子をよりよく表出できる特徴を有すると考えられる。このように、機械が人間に積極的に働きかけるAHIとしてのコミュニケーションを目的にし、人間と同様

な表情を表出する顔ロボットの研究は現在までに著者の知る範囲では一例も報告されていないが、顔ロボットの製作例は、以下に述べる2例(学天則[17]、THREE-DIMENSIONAL FACIAL CONTROL[18])が報告されている。

学天則[17]は、人間と同じような動きをすることを目的に、1930年代前半に製作された。頭部の運動に関しては、眼球、顎、顔の一部、呼吸(頬を膨らませる)等の動作を空気圧を使って実現し、微笑みと怒りが表現できたようであるが、自由度や機構などの詳細は不明である。文献[18]の人形顔は、話をしているように口形状が制御されるもので、(1)顎の上下、(2)唇を横に引く、(3)上下唇中央の上げ下げ、(4)まばたきの合計4自由度の運動ができる。これらの動作は空気圧シリンダを用いたリンク機構によって作られる。機構の先端を表皮に取り付けているため、互いに独立な動きをするのには適しているが、リンク機構により表皮の特定の場所を固定しているため、表情を表出するときのように表皮の複数箇所動きが連成する場合には適当ではない。また、リンク機構の表皮への取付点の選定も、十分な解剖学的、あるいは心理学的な根拠に基づいたものではない。

本研究では、顔表皮の複数箇所の動きの干渉をも考慮にいれて、表情を表出するためのアクチュエータとして用いる小型フレキシブルマイクロアクチュエータ(FMA[20];後述)と顔表皮とをワイヤーで接続する方法を採用している。また、2.で詳しく述べるが、顔ロボット上に表情を作るためのパラメータとして、心理学の分野で用いられている顔面筋の基本的動作を表す44のAction Unit(AU)[19]を用いている。

本論文では、顔ロボットの構造を説明し、顔ロボットによる6基本表情の表出実験とその結果を報告する。まず、上述したAU[19]を実現して顔面上に表情を表出することができるような小型アクチュエータとして、フレキシブルマイクロアクチュエータ(FMA)[20]を選ぶ。続いて、6基本表情を表出するために必要なAU(例えば眉を上げるなど)を調べ、それを実現するために、必要なAUに対応した顔面表皮の特定部位の移動量(ベクトル)を明らかにする。次に、表情表出だけではなく、眼球の回転、頭部全体の運動など、顔ロボットの運動自由度を明らかにし、それらを実現するためのアクチュエータを決定する。そして、以上の顔ロボットの表情表出と運動を実現するための機構やアクチュエータの配置などの顔ロボットの構造、表皮(皮膚)の製作と表情を表出するための表皮とアクチュエータの取付け方法、及びアクチュエータの制御方法について記述する。最後に、意図したAUが顔ロボット上に実現されていることを確認し、顔ロボットが表出した6基本表情の評価を人間の認識テストによって行う。顔ロボットの6基本表情の評価結果は、6基本表情について平均で83.3%の正解率が得られ、顔ロボットが表出した6基本表情はそれぞれの表情を適正に表現していることが確認された。

2. 顔ロボットの設計と製作

表情を表出する顔ロボットを設計する際に、まず、いかなるパラメータを用いて表情を顔ロボット上に作るかが問題となる。心理学の分野では顔面筋の動きをAction Unit(AU)と呼

ばれる44の基本動作に分解している[19]ことを参考にして、著者らはこのAUを表情パラメータとして用いて様々な表情を表現できるように、必要なAUの動きを実現できる機構を採用することにした。この機構を動かすアクチュエータに関して、本研究では、将来的に表情だけでなく声も発生する装置の取付や顔ロボット全体を動かすことを考えて、アクチュエータを含めた機構はできるだけコンパクトにすることを念頭に置いた。そこで、アクチュエータは、人間と同様にすべて顔面内皮に配置できるような小型なもので、かつ、滑らかな動きをするものが好ましく、フレキシブルマイクロアクチュエータ(FMA)を用いることにした[20]。FMAは、構造が簡単のため小型化が容易であり、摺動部がないため動作が滑らかで作動流体の漏れがない等の特徴を有し[20]、上記の条件に適するものである。本研究では、このFMAを、表情表出のために必要なAUに対応するように配置する。

2.1 FMAによる表情表出のための基礎実験

FMAにより顔ロボットの顔面皮膚を動かし、表情を表出することが可能であるか確認するためには、顔の表皮(皮膚)を何で作るかが問題となる。本研究では、成形が容易で皮膚と同様な質感があり、人形などに使われているシリコンゴム(Kokusai Craft社製のSeamless Silicone)を皮膚として用いることにした。このシリコンゴム皮膚は、FMAの負荷となることに注意する。

FMAはFig. 2に示すように3つの圧力室で構成され、各圧力室の圧力を調整することにより3自由度の動作が可能である[20]が、顔ロボットでは、FMAの曲げ剛性が小さいことを考慮して、FMAの軸方向(Z方向)の伸縮動作のみを用いることにする。FMAの3圧力室に等しい空気圧を印可することで軸方向の変位を制御する。このとき、レギュレータによりFMAへの入力圧力を一定にし、レギュレータとFMAの間に電磁弁を入れ、その電磁弁の開時間によりFMAの軸方向伸縮量を制

御することにした。本研究で用いた $\phi 16[\text{mm}]$ 、全長 $120[\text{mm}]$ 、駆動部 $104[\text{mm}]$ (Fig. 2のLに対応)のFMAについて、入力圧力が2, 3, 4気圧の場合における、電磁弁の開時間とFMAの軸方向の伸び率(駆動部の長さとし伸びとの比)との関係をFig. 3に実線で示す。これより、FMAは滑らかに伸び、入力圧力及び電磁弁の開時間により伸びの速度及び伸び率が制御可能であることが分かる。

次に、FMAによるシリコンゴム皮膚の変形特性を確認するため、FMAによるシリコンゴム皮膚の引っ張り試験を行った。本研究では、シリコンゴム皮膚の平均厚さを約 $1[\text{mm}]$ に成形することに計画したため、試験用のシリコンゴム皮膚の厚さを $1[\text{mm}]$ とした。また、この試験用皮膚の大きさは、成人の正面顔の中におさまる大きさ、すなわち $120[\text{mm}] \times 120[\text{mm}]$ とした。次に、そのシリコンゴム皮膚をアルミ板の上に置いて4辺を固定し、その中心の $10[\text{mm}] \times 10[\text{mm}]$ の領域をワイヤーを介してFMAにより引っ張り、シリコンゴム皮膚の中心の時間的変位を測定した。これよりシリコンゴム皮膚の負荷特性が知れることになる。

人間の場合、皮膚と骨の間には脂肪があるので、皮膚の動きはどこかでなくなり、そこが固定辺と考えることができる。このことを考えると、正面顔の中におさまる大きさでかつ4辺を固定し、アルミ板との間に摩擦のある試験用シリコンゴム皮膚は、人間の皮膚より大きな動きの抵抗を受けていると言える。したがって、この4辺固定の試験用シリコンゴム皮膚をFMAにより表情表出に必要な量だけ動かすことができれば、FMAにより表情を表出することが可能であると言える。そこで、本試験において、FMAへの入力圧力が2, 3, 4気圧の場合の、電磁弁の開時間とFMAの軸方向の伸び率との関係をFig. 3に破線で示す。シリコンゴム皮膚をFMAの負荷にすることにより伸び率は減少するものの、無負荷(実線)の場合と同様にFMAは滑らかに伸び、入力空気圧及び電磁弁の開時間により伸びの速度及び伸び率の制御が可能であることが分かる。また、入力空気圧が4気圧の場合では20% ($20.8[\text{mm}]$)以上の伸び率を期待できることが分かる。ところで、著者らが収集した30人の6基本表情を表す顔画像(合計180画像)[1]~[4]それぞれについて、機械による表情認識のために用いた眉・目・口の周りの30特徴点[1]~[8]それぞれの「中立」(無表情)からの移動量を求めた結果、移動量の最大値は約 $13[\text{mm}]$ であった。この値は、上記のFMAの20%の伸び($20.8[\text{mm}]$)の約6割に相当する。以上のことから、FMAによりシリコンゴム皮膚を十分に変形させ、顔ロボットの表情を表出することが可能であることが確認された。

2.2 AUに基づいた顔面の制御点の決定

EkmanらのAUは基本的に顔面筋の動きに対応しており、AUの組合せにより様々な表情を表出することができる[19]。そこで、人工顔面のどの点を動かすかは、表情表出のために必要なAUを基に決める。本研究では、顔ロボットにより6基本表情を表出することを目的とし、そのために必要なAUにより顔面上の動かす領域を決めることにする。

44のAUの中で、表情に関わるものは24のAUであるが、その中で6基本表情を表出するために必要なのはEkmanら

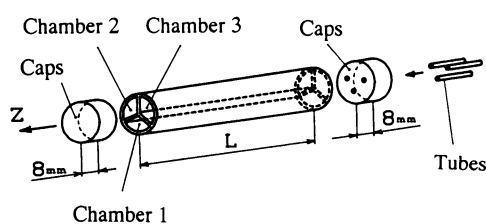


Fig. 2 Structure of FMA

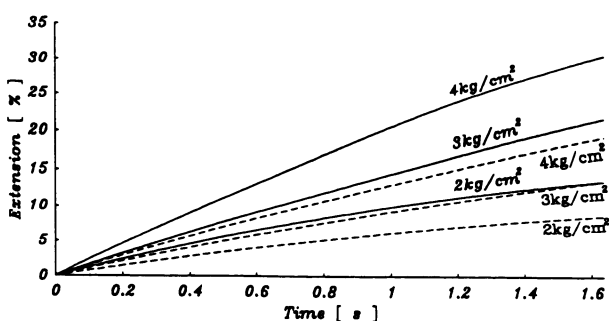


Fig. 3 Skin stretch experiment by using FMA

[13]によると **Table 1** に示す 14 の AU である。 **Table 2** には各基本表情を表出するために必要な AU の組合せを示す。

Table 1 の AU を実現するために、解剖学の文献[21]を参考に顔面筋の始点、終点、及び動く方向を調べ、実際に鏡の中の顔

Table 1 Required Action Unit (AU)s for expressing 6 basic facial expressions

AU No.	Appearance Changes
1	Inner Brow Raiser
2	Outer Brow Raiser
4	Brow Lowerer
5	Upper Lid Raiser
6	Cheek Raiser & Lid Compressor
7	Lid Tightener
9	Nose Wrinkler
10	Upper Lid Raiser
12	Lip Corner Puller
15	Lip Corner Depressor
17	Chin Raiser
20	Lip Stretcher
25	Lips Part
26	Jaw Drop

Table 2 6 basic facial expressions organized by AUs

Expression	Action Units
Surprise	1+2+5+26
Fear	1+2+4+5+7+20+25, 26
Disgust	4+9+17
Anger	4+5+7+10+25, 26
Happiness	6+12 (+26)
Sadness	1+4+15

Table 3 Correspondence of AUs to Control Points

Action Unit Number	Control Point	
	Right	Left
1	2	3
2	1	4
4	5, 6	7, 8
5	9	10
6	11	12
7	9	10
9	13	
10	13	
12	11	12
15	16	17
17	18	
20	14	15
25	18	
26	18 & Motor	

を見ながら各 AU に相当する筋肉を動かしたり手で引っ張るなどして、どこを動かせば最も良く AU が表現されるか調べた。その結果、**Fig. 4** に示す①～⑮の 18 箇所を矢印の方向に動かすことが必要であるという結論に至った。以降、**Fig. 4** の 18 箇所の領域を制御点 (Control Point) と呼ぶ。 **Table 3** に各 AU と制御点との対応を示す。なお、**Table 3** にあるように、AU 26 は一本の FMA とステッピングモータにより制御するものとする。

2.3 顔ロボットの全体構成

本研究で用いた FMA は、製作の容易さ、及び FMA の剛性を考え $\phi 16[\text{mm}]$ のものを使用する。1. で述べたように FMA をすべて顔面内皮上に配置する関係上、FMA の大きさにより顔ロボットの大きさが決まる。顔ロボットの骨組みは基本的に人間の頭蓋骨と同様とするため、**Fig. 4** の 14～18 の制御点を制御する 5 本の FMA は顎の部分に取り付けることになり、 $\phi 16[\text{mm}]$ の FMA を使う場合、顎の大きさは成人の平均の 1.2 倍にせねばならない。したがって顔ロボット全体は成人の顔の 1.2 倍の大きさになる。当然のことであるが、将来的にもっと細い FMA を使えば、人間と同じ大きさの顔ロボットを作ることが可能である。

次に、顔ロボットのシリコンゴム皮膚の動き以外の機能を説明する。まず、眼球に関しては、**Fig. 5** に示すような 2 自由度の動きを 2 つのステッピングモータにより実現する。さらに、眼球の中に小型 CCD カメラを入れ、将来的に画像認識による

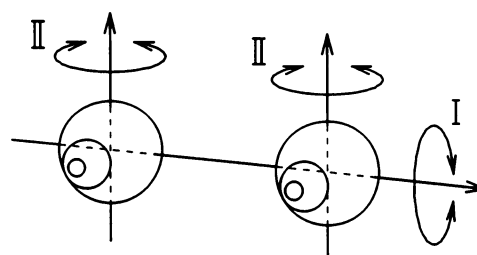


Fig. 4 Position of control points

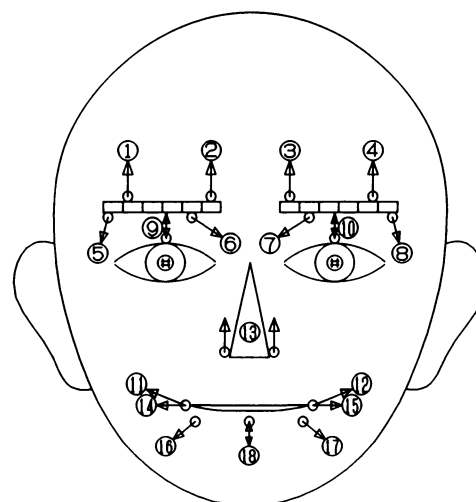


Fig. 5 Degree of freedom of eyeball

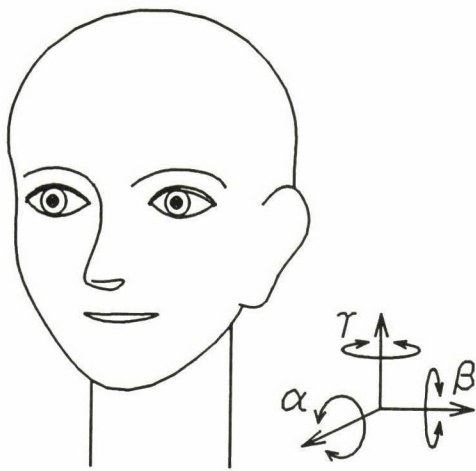


Fig. 6 Degree of freedom of the head

人間の追跡や目線（視線）の制御が出来るようにする。顔全体の動きには、Fig. 6 に示すように左右に傾ける、前後に傾ける及び首を回すの3自由度を持たせる。 α と β の動きは空気圧シリンダで、 γ の動きはステッピングモータで行う。以上、顔ロボットの自由度をまとめると、

- ・表情表出……FMA により 18 自由度
ステッピングモータにより 1 自由度
- ・眼球の動き……2 ステッピングモータにより 2 自由度
- ・顔全体の動き…ステッピングモータと空気圧シリンダにより 3 自由度

となり、合計で 24 自由度を有する。

一方、構造的視点からみると、顔ロボットは大きく分けて3構成になっている。まず、上記全アクチュエータを取り付けるアルミフレーム部分があり、その上にプラスチックでできた骨格フレーム（人間の頭蓋骨に相当）部がある。さらにその上をシリコンゴムで作った表皮（皮膚）で覆う。骨格フレーム部と皮膚との間には、人間の脂肪に相当するスポンジを入れる。また、これらをそれぞれ脱着可能とし、皮膚の形状、及びスポンジの量や配置を変えることにより、いろいろな人相の模倣ができるようにする。

3. 顔ロボットの構造及び機構

3.1 アルミフレーム部の構造

2.3 で述べたように、顔ロボットには表情表出、眼球の回転及び顔全体の動きを実現するために、その内部に FMA やステッピングモータ等のアクチュエータを配置する必要がある。これらを固定するためのアルミフレームによる構造を Fig. 7 に示す。

3.2 骨格フレーム部の構造

頭部アルミフレームの上に、人間の頭蓋骨に相当する骨格フレームを取り付ける。骨格フレームは、アルミフレーム部の上に外見上人間の頭蓋骨と同様な形になるようにプラスチックで形成する。Fig. 8 にアルミフレーム頭部とその上に骨格フレームを取り付けた写真を示す。また、眼球はプラスチックにより著者らが製作し、歯は入れ歯を用いた。

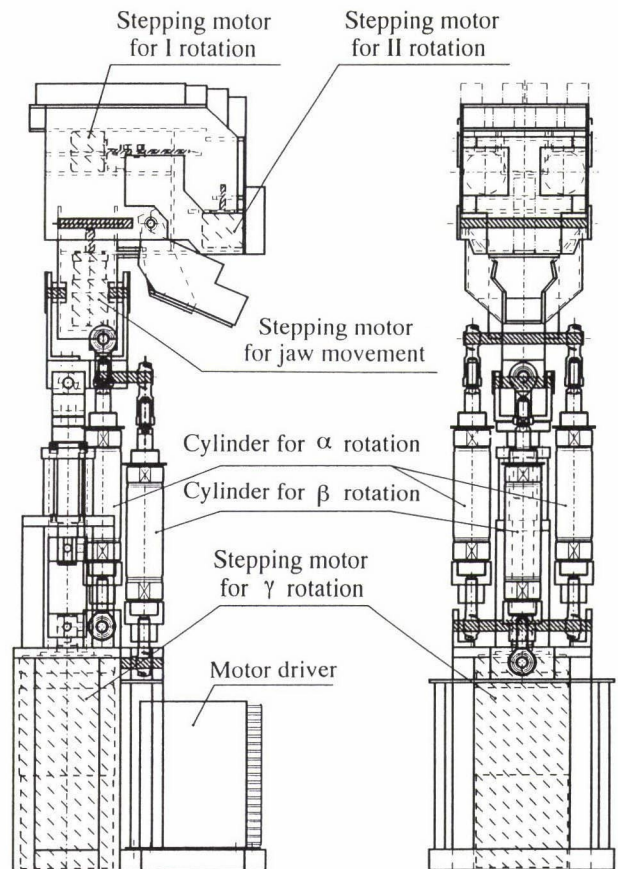


Fig. 7 Structure of face robot

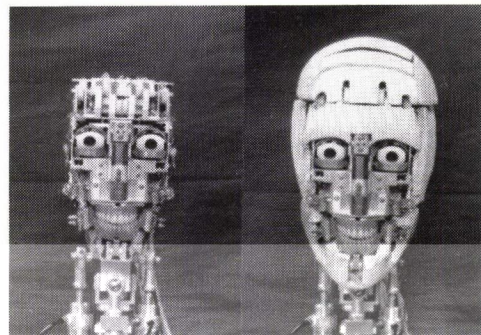


Fig. 8 Aluminium-frame and skull-frame

3.3 皮膚の製作及び取り付け

皮膚の材料は、先述したようにシリコンゴムである。人の顔のデスマスクを作り、それを基に雄型と雌型を石膏で作る。雄型と雌型の間を約 1[mm]にし、その間にシリコンゴムを流し込む。出来上がった皮膚の制御点の内側にワイヤーを取り付け、そのワイヤーを FMA にあらかじめ取り付けておいたワイヤーと金具により接続する。骨格フレームと皮膚との間にはスポンジを入れて顔の形を整える。スポンジを入れる場所、及び量は表情がうまく表出されるよう、試行錯誤で決定した。このように、制御点と FMA とは基本的にワイヤーで接続するが、接続にワイヤーを使用しない脛 (9, 10) とオトガイ部 (18) の

接続については、機構を含めて3.5で詳しく説明する。

3.4 制御点の移動量とFMAの長さの決定

顔ロボット上に表情を表出するために、まず各制御点をどの程度動かす必要があるか決める必要がある。本研究では、3人の男子学生に鏡を見ながら各制御点付近を動かしてもらい、各人の顔面上で制御点に相当する点の動きの最大量を測定し、3人の平均値を制御点の必要移動量の算定基礎とした。制御点の最大移動量の測定は、被験者の正面顔をビデオテープに録画し、その中から各制御点が最も動いている画像を抽出して制御点の移動量を算定することにより行った。これらの制御点の必要移動量を基に、制御点を動かすためのFMAの長さを次のように決定した。

前述のように、FMAの伸び率は約20%は達成できるので、この量が制御点の必要移動量になるようにFMAの長さを決定した。また、FMAの加工の問題から、同じ長さのものができるだけ多くなるように配慮した。Table 4にFMAの駆動部の長ささと各制御点の必要移動量を示す。顔ロボットは成人の顔の1.2倍の大きさなので、Table 4の必要移動量は上記3人の平均値を1.2倍したものである。さらに、FMAはFig.2に示すように駆動部以外にさらに16[mm]（駆動部前後に8[mm]ずつ

Table 4 Required displacement of Control Points and the length of FMA

Control point		Required displacement [mm]	Length of FMA driver part [mm]
Right	Left		
2	3	12.0	104
6	7	12.0	
1	4	9.6	
5	8	2.4	60
9	10	11.0	
11	12	10.8	
16	17	6.0	40
13		6.0	
18		4.8	
14	15	3.6	30

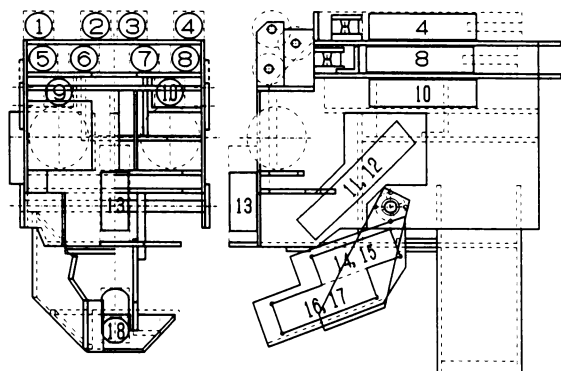


Fig. 9 Disposition of FMA

固定部がある）の長さを必要とするので、FMAの全長は駆動部にこの長さを足した値となる。なお、Table 4の影のついてる所は、お互いに逆の方向に動くことを示しており（①と④に対して⑥と⑧が、②と③に対して⑥と⑦が逆向きに動く）、お互いに動きを妨げないように一方の必要移動量分ワイヤーをたるませ、かつ自身の必要移動量だけ動くようにしてある。例えば、①の場合を考えると、逆の動きをする⑥が2.4[mm]動くため、その分だけワイヤーをたるませ、かつ①自身が9.6[mm]動く必要があるため、①に対応するFMAは合計12[mm]（2.4+9.6）動くことができるようになっている。

3.5 FMAの配置及び表情表出機構

Fig. 4に示した制御点の位置、及びTable 4のFMAの長さを基に、FMAの配置を決定した。Fig. 9に頭部組立て図、及びFMAの配置図を示す。図中の1～18の番号の箇所がFMAを配置する場所で、その番号が制御点の番号に対応している。FMAとシリコンゴム皮膚は前述のようにワイヤーでつながっており、滑車を介してFMAによりシリコンゴム皮膚を引っ張る。ただし、瞼を動かす9と10及びオトガイ部を動かす18の駆動機構はワイヤーを使用していない。

さて、瞼を動かすための駆動機構をFig. 10に示す。瞼には上瞼と下瞼があり、上瞼の動きに伴い下瞼もわずかに動くので、歯車を用いて上瞼と下瞼の動く割合を20対3とした。瞼は、AU5に相当する上瞼を上げる場合と、普通に開けている場合、閉じている場合の3状態がある。本研究では、FMAの自然長をAU5、つまり上瞼を持ち上げている状態に対応させ、普通に開けている場合と閉じている場合はFMAを伸ばすことにより実現する。

この瞼の部分と皮膚との取り付けのために、Fig. 10に示した上瞼駆動部と下瞼駆動部の先端に脱着可能な取付用金具を用意する。その取付用金具を皮膚に接着すれば、皮膚と瞼の機構部分の脱着が可能になる。上瞼はこの方法だと、眉の上下変化に応じて上瞼の形が変化（例えば3角形になったりする）しないので、Fig. 11に示すように取付用金具にそれと同じ形のシリコンゴムを接着し、その上にシリコンゴム皮膚を折り返して接着することにした。この取り付け方法により、眉の変化に応じて上瞼の形が変わることが可能になる。

オトガイ部の駆動機構をFig. 12に示す。この機構により下

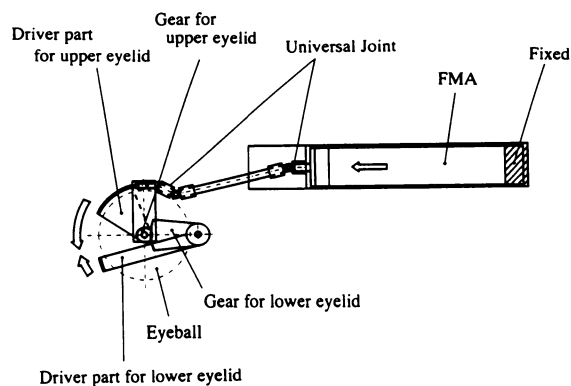


Fig. 10 Mechanism of eyelid movement

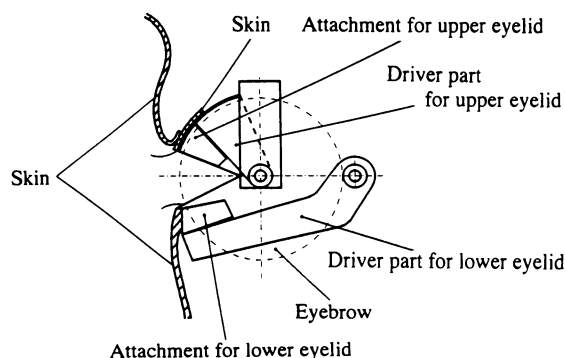


Fig. 11 Connective mechanism of eyelid

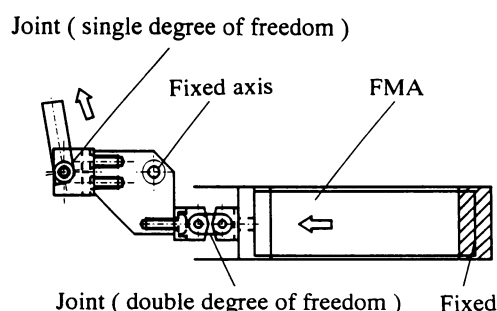


Fig. 12 Mechanism of chin movement

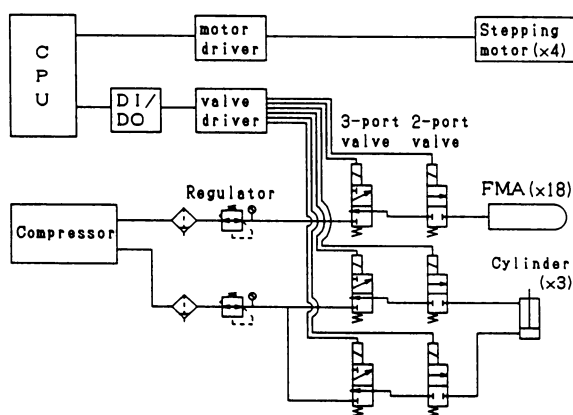


Fig. 13 Control system

唇を上下することができる。この機構の先端部をシリコンゴム皮膚に取り付けるために、機構先端部が脱着可能となるように皮膚側に脱着用具部を用意した。

3.6 各アクチュエータの制御

Fig. 13 に制御システムを示す。FMA の制御方法は以下の通りである。3 ポート弁により、2 ポート弁に送る空気圧をレギュレータで設定した圧力にするか、大気圧（1 気圧）にするか決める。FMA を伸ばす場合は、2 ポート弁にレギュレータで設定した空気圧を送り、2 ポート弁の開時間により FMA の長さを制御する。FMA を自然長に戻す場合には、2 ポート弁に大気圧を送るように切り替え、2 ポート弁を開く。空気圧シリンダも同様な方法により制御する。

Table 5 Implemented displacement of Control Points

Control point		Required displacement [mm]	Implemented displacement [mm]
Right	Left		
2	3	12.0	16.0
6	7	12.0	11.0
1	4	9.6	13.5
5	8	2.4	4.5
9	10	11.0	14.0
11	12	10.8	14.0
16	17	6.0	9.0
13		6.0	8.0
18		4.8	5.5
14	15	3.6	8.0

4. 表情の表出実験

4.1 制御点の移動量

顔ロボットにおいて、表情表出に必要な各 AU が実現されているか確認するため、各制御点の実際の移動量が十分であるか否かを調べる。FMA の伸びは、入力空気圧力と電磁弁（2 ポート弁）の開時間に依存するが、今回は電磁弁を開いたままにし、入力空気圧を 4 気圧にした場合の制御点の移動量を測定した。測定方法は 3.4 で説明したようにビデオテープを用いる方法である。Table 5 に制御点の移動量を示す。これより、制御点 6, 7 の移動量がわずかに足りないほかは、必要移動量以上の移動量が得られていることが分かる。ここでの必要移動量はあくまでも目安であるので、本研究の表情表出実験における制御点の移動量は、顔ロボットの顔のつくりや形に応じて表情がうまく表出されるように選んだ。

本論文での顔ロボットは、18 の制御点の動きを組み合わせるなどして Table 6 に示す 24 の AU を実現することができた。なお、顔ロボットで実現できていない AU は、1) 口をすぼめる動作、2) 息を吸ったりはいたりする事に伴う頬の動き、3) 鼻の穴の動き、4) 舌を使った動きである。

4.2 6 基本表情の表出実験とその評価

Table 2 に従い顔ロボットの制御点を FMA により動かし、顔ロボットに 6 基本表情を表出させた。Fig. 14 に「中立」の顔と 6 基本表情の顔写真を示す。これらの表情が良く表されているか評価するため、以下のような心理実験を実施した。すなわち、顔ロボットが表出した 6 基本表情の写真を被験者に見せ、それを 7 カテゴリー（中立、驚き、恐れ、嫌悪、怒り、幸せ、悲しみ）に分類する判断をしてもらう。被験者は顔表情の認識について特別に訓練を受けていない 30 人の学生である。顔ロボットの顔写真が本来表す表情毎に、被験者がどの表情に判断しているかをまとめ、その結果を Table 7 に示す。この結果より、「恐れ」の正解率が 53% と低く、かつ「驚き」に誤認識しやすいことが分かる。これは、両表情の特徴が非常によく似ており表情認識の訓練を受けていない人はその区別がつきにくい

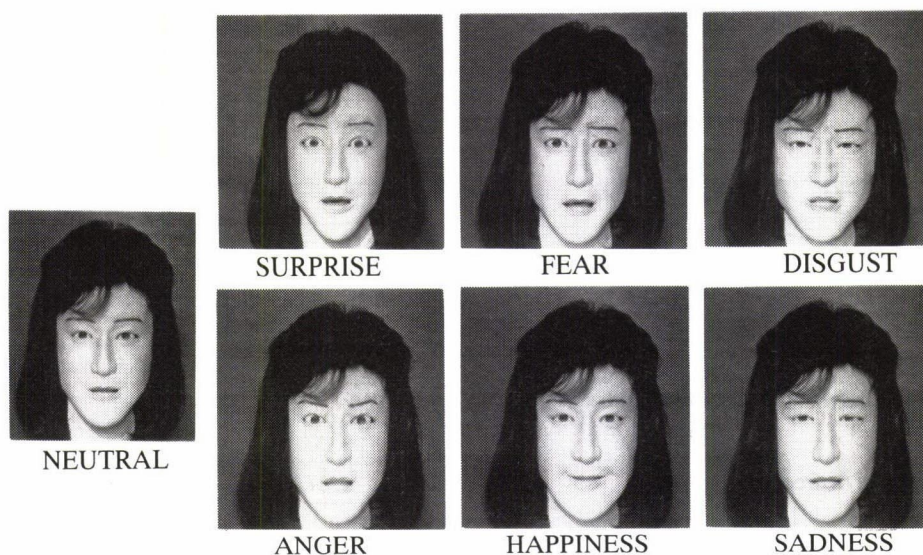


Fig. 14 Neutral and 6 basic facial expressions expressed by face robot

Table 6 Implemented AUs of Face Robot

AU No.	Appearance Changes
1	Inner Brow Raiser
2	Outer Brow Raiser
4	Brow Lowerer
5	Upper Lid Raiser
6	Cheek Raiser & Lid Compressor
7	Lid Tightener
9	Nose Wrinkler
10	Upper Lid Raiser
11	Nasolabial Furrow Deepener
12	Lip Corner Puller
14	Dimpler
15	Lip Corner Depressor
16	Lower Lip Depressor
17	Chin Raiser
20	Lip Stretcher
25	Lips Part
26	Jaw Drop
27	Mouth Stretcher
41	Lid Droop
42	Slit--Optional
43	Eyes Closed--Optional
44	Squint
45	Blink--Optional
46	Wink--Optional

からであると思われる（文献[13]，p. 50）．しかし，6 基本表情についての平均では 83.3% という高い認識正解率が得られた．この値は，表情認識の訓練を受けた人が俳優の演じた 6 基本表情を識別した場合の平均正解率の 87% [22] とほぼ同等の値であり，顔ロボットにより 6 基本表情が良く表出されていることが分かる．

Table 7 Recognition result of 6 basic facial expressions expressed by Face Robot unit : %

		Recognition result					
		Su	Fe	Di	An	Ha	Sa
Facial expression	Surprise (Su)	97	3	0	0	0	0
	Fear (Fe)	27	53	10	3	0	7
	Disgust (Di)	0	0	77	20	0	3
	Anger (An)	3	3	10	84	0	0
	Happiness (Ha)	0	0	3	3	94	0
	Sadness (Sa)	0	0	3	0	0	97

5. ま と め

本研究は，人間と機械とのコミュニケーションにおいて，機械が人間の命令に従うだけでなく，人間に積極的に働きかけることを可能にするための新しいインタフェースである Active Human Interface (AHI) を実現するための一連の研究の 1 つである．本論文では，機械が人間とコミュニケーションするために，機械の「心」とも言うべき機械の内部状態を，人間と同様な顔表情により表示伝達する顔ロボットの構造・機構と表情表出の制御について報告した．

まず，顔ロボットが表情を表出するためのアクチュエータとしてフレキシブルマイクロアクチュエータ (FMA) を選び，それにより表情表出が可能であることを示した．次に，表情表出のパラメータとして Action Unit (AU) を採用し，AU を実現できる顔ロボットの機構と構造を明らかにした．そして，顔ロボットが表出した 6 基本表情を 30 人の学生に示して認識テストを実施した結果，平均 83.3% の認識正解率が得られ，顔ロボットの表情表出が十分に達成され，顔ロボットが人間と機械とのコミュニケーションにおける表情表出メディアとしての可能性のあることを確認した．

顔ロボットは、AUの組合せにより6基本表情以外に様々な表情を表出することができると考えられ、これら様々な表情を人間のように自然に表出できるように、FMA及び他のアクチュエータを並列的にかつ動的に制御する方法を明らかにする予定である。

最後に、顔ロボットのAHI以外の利用の可能性について述べておくことにする。顔ロボットは様々な表情を表出でき、かつそれらを簡単に再現できることから、学問的には心理学実験の刺激として利用されること、また、軽度の身障者のコミュニケーションの能力回復用メディアとしての可能性のあること、さらには、高齢化社会においてますます必要になるであろう介護ロボットや、教育の場で先生の代わりをするロボットなど、様々なアプリケーションが期待できると著者らは考えている。

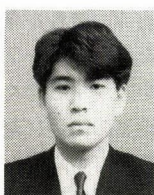
謝 辞

顔ロボットの製作の目的を十分に理解してくださり、快くFMAを提供してくださった(株)東芝の鈴森康一氏はじめ(株)東芝の関係者各位に心から感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] Kobayashi and Hara: "The recognition of basic facial expressions by neural network," International Joint Conference on Neural Network, pp. 460-466, 1991.
- [2] 小林, 原: "ニューラルネットによる人の基本表情認識", 計測自動制御学会論文集, vol. 29, no. 1, pp. 112-118, 1993.
- [3] 小林, 原: "人の基本表情のニューラルネットによる計測の研究", 日本機械学会 Dynamic & Design Conference シンポジウム講演論文集, pp. 231-235, 1992.
- [4] Kobayashi and Hara: "Recognition of six basic facial expressions and their strength by neural network," IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp. 381-386, 1992.
- [5] 小林, 原: "ニューラルネットによる人の混合表情の認識", 電子情報通信学会技術研究報告, HC91-56, pp. 17-22, 1992.
- [6] Kobayashi and Hara: "Recognition of mixed facial expressions

- by neural network," IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp. 381-386, 1992.
- [7] 小林, 原, 池田: "リカレントニューラルネットワークによる動的な顔表情認識", 第8回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp. 55-60, 1992.
- [8] 小林, 原, 池田, 山田: "リカレントニューラルネットワークによる動的な基本表情認識", 電子情報通信学会技術研究報告, HC 92-59, pp. 11-16, 1992.
- [9] 茂木, 原: "人工心理モデルの基礎的研究", 電子情報通信学会技術研究報告, HC 91-42, pp. 1-8, 1992.
- [10] Mogi and Hara: "Artificial emotion model for human-machine communication by using harmony theory," IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp. 149-154, 1992.
- [11] Hara and Kobayashi: "Computer graphics for expressing robot-artificial emotions," IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp. 155-160, 1992.
- [12] 本名他訳: "ノンバーバル・コミュニケーション", pp. 237, 大修館書店, 1981.
- [13] 工藤 力訳, P. Ekman and W. V. Friesen 著: "表情分析入門", pp. 1-277, 誠信書房, 1988.
- [14] D. E. Rumelhart and J. L. McClelland: "Parallel distributed processing," pp. 546-611, MIT Press, 1986.
- [15] 崔, 原島, 武部: "知的画像符号化における頭部の動きと顔面の動き情報の高精度推定", 電子情報通信学会技術研究報告 PRU 90-68, 1990.
- [16] 崔, 原島, 武部: "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.
- [17] 井上晴樹著: "日本ロボット創世記", pp. 1-361, NTT出版, 1993.
- [18] A. V. Villa: "Three-dimensional animated facial control," United States Patent 4177589, 1979.
- [19] P. Ekman and W. V. Friesen: "Facial action coding consulting", Psychologist Press, 1977.
- [20] 鈴森康一: "フレキシブルマイクロアクチュエータに関する研究(第1報, 3自由度アクチュエータの静特性)", 日本機械学会論文集(C編), vol. 55, no. 518, pp. 2547-2552, 1989.
- [21] 小川他: "解剖学1(総説, 骨学, 靱帯学, 筋学)", pp. 279-291, 金原出版, 1991.
- [22] J. N. Bassill: "Emotion recognition: the role of facial movement and the relative importance of upper and lower areas of face," Journal of Personality and Social Psychology, vol. 37, no. 11, pp. 2049-2058, 1979.



小林 宏 (Hiroshi Kobayashi)

1966年8月29日生。1990年東京理科大学工学部機械工学科卒業。1992年同大学院修士課程修了。現在、同大後期課程在学中。1992年度より日本学術振興会特別研究員。1992年度SICE学術奨励賞受賞。ヒューマン・インタフェース、ロボットのダイナミクスと制御の研究に従事。

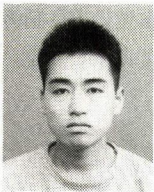
(日本ロボット学会正会員)



原文雄 (Fumio Hara)

1941年4月7日生。1970年東京大学大学院(博士課程)修了。1971年東京理科大学工学部助教授, 1983年同教授。流体関連振動とその制御, ヒューマン・インタフェース, ロボットのダイナミクスと制御の研究に従事。工学博士。日本機械学会, ASME, IEEE, 等の会員。

(日本ロボット学会正会員)



内田 豪 (Gou Uchida)

1970年12月14日生。1993年東京理科大学工学部機械工学科卒業。同年同大学院博士課程入学, 現在在学中。ヒューマン・インタフェース, ロボットのダイナミクスと制御の研究に従事。



大野宗久 (Munehisa Ohno)

1969年12月1日生。1993年東京理科大学工学部機械工学科卒業。同年(株)東芝入社。