

ライフマスクを用いた顔ロボットによる動的表情表出*

橋本卓弥*¹, 平松幸男*²
辻俊明*³, 小林宏*⁴

Dynamic Display of Facial Expressions on the Face Robot with a Life Mask

Takuya HASHIMOTO*⁵, Sachio HIRAMATSU,
Toshiaki TSUJI and Hiroshi KOBAYASHI^{*5} Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science,
1-3 Kagurazaka, Shinjyuku-ku, Tokyo, 162-8601 Japan

In face-to-face communication, we use not only verbal medium but also non-verbal medium for communication. In particular facial expressions are very important for emotional communication because they show emotions and feelings effectively. Therefore it is thought that facial expressions are necessary in order to make human-robot communication more naturally. In this paper, "Face Robot" that has human-like appearance and can display facial expressions similar to human being is developed. In order to improve the humanity, the skin of the face robot is taken from the cast of female's face (i.e. life-mask). We then add and improve control points of the face robot according to features of her face. Moreover we analyze her facial expressions in order to mimic her real-time facial expressions with the face robot. We then confirm that mimicking of her real-time facial expressions and face features with the face robot are reproduced successfully. Finally, we compare their facial expressions by comparison of facial characteristics points and sensory evaluations.

Key Words: Face Robot, Life-Mask, Real-Time Facial Expressions, Human-Robot Interaction

1. 緒 言

人間同士のコミュニケーションでは、論理的な情報のやり取りは主に音声言語を用いて行われるが、表情や視線、身体動作、外見といった非言語情報も大きな役割を担っている⁽¹⁾。人間は、これらの非言語情報と言語とを相補的に用いながら円滑なコミュニケーションを実現している。そこで、人間とロボットとの円滑なコミュニケーションを実現するために、音声対話機能だけでなく、非言語機能をロボットに持たせる研究が行われている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。これらの研究では、ロボットの持つ身体性を活かし、視線やうなづき、腕の動きなどの非言語表現を用いて人間との円滑なコミュニケーションを実現している。

さて、非言語情報の中でも、特に重要とされるものに顔表情がある。表情は主に情動を表し、人間の喜怒哀楽を如実に表現するものである。また、人間同士の対面コミュニケーションにおいて、伝達されるメッセ

ージの実に55%が顔表情によるものだという報告もあり⁽⁵⁾、表情の果たす役割は大きい。そこで、この表情の重要性に着目して、人間との円滑なコミュニケーションを実現するためのロボットの表情に関する研究がいくつか行われている⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾。これらの研究では、表情を効果的に表現するために、特徴的な部位に注目してロボットの顔をデフォルメし、頭部全体の動きや目、眉、唇などの部位を変化させることで表情の表出を実現している。

一方で筆者らは、人間に似た顔、皮膚の質感を持った顔ロボット⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾の開発を行っており、顔の筋肉の動きを基にした自然な表情表出を実現している。特に、世界共通に認識・表出が可能とされる基本的な6つの表情(驚き、恐怖、嫌悪、怒り、幸福、悲しみ)⁽¹³⁾に関して高い認識率を得ており⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾、受付ロボットとして2004年1月から本学で稼働している⁽¹⁴⁾。このような人間に似たロボット、いわゆるアンドロイドロボットの大きな特徴は、本当の人間と接しているような親和感を対話者に与えることが出来るということである。つまり、ロボットとコミュニケーションする場合でも、人間同士のように自然なコミュニケーションが実現出来ると考えられる。

* 原稿受付 2008年4月7日。

^{*1} 正員, 東京理科大学大学院工学研究科(☎162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3)。^{*2} トヨタ自動車(株)(☎471-8571 豊田市トヨタ町1)。^{*3} 正員, 埼玉大学工学部(☎338-8570 さいたま市桜区下大久保255)。^{*4} 正員, 東京理科大学工学部。

E-mail: tak@kobalab.com

本研究では、顔ロボットの実在感を高めるために実在の人間にそっくりな顔ロボットを開発し、その表情がどの程度正確に人間に伝達できるか評価することを目的とする。これまでも実在の人間をモデルとしたアンドロイドロボットは開発されてはいるものの⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾、その外観および表情や動作がどれだけモデルとなった人間に似ているかを定量的に評価してはいない。そこで本研究では、まず実在する人間から顔型を取って皮膚(ライフマスク)を製作し、そのモデルとなった人間に酷似した表情を再現する。そして、開発した顔ロボットによりモデルの表情演出過程(動的表情演出)を再現し、顔上の特徴点の時間-変位関係をモデルと比較することにより再現性を定量的に評価する。さらに、開発した顔ロボットの表情に関して、どの程度モデルとなった女性と似ているか、また、意図した表情が正確に伝わるのかを官能評価実験により評価する。なお、顔ロボットの動的表情演出に関しては、小林らの先行研究⁽¹¹⁾において実現しているものの、表情のモデルとなった人間と顔ロボットの顔が異なっており、顔の大きさも人間の1.5倍と大きかった。そのため、顔ロボットがどの程度モデルとなった人間と似ているかを比較することが出来なかった。

以下、2章では、ライフマスクの製作と顔ロボットの構造について説明する。3章では、顔ロボットによる表情演出について述べると共に、モデルの表情の特徴を再現するために追加・改良した制御点について説明する。4章では、開発した顔ロボットを用いてモデルと同等の表情演出を実現し、その特徴点追従性の評価結果を示す。5章では、顔ロボットとモデルの表情の比較と官能評価の結果を示す。

2. ライフマスクを用いた顔ロボットの製作

2.1 ライフマスクの製作 20代女性をモデルとして顔ロボットの皮膚を製作した。製作手順は以下の通りである。また、製作の様子を図1に示す。

- (i) ゴムキャップで頭部を保護した上でアルジネート印象材を頭部に塗布し、石膏で外側を固めて雌型を製作する。
- (ii) (i)で製作した雌型に石膏を流し込んで雄型を製作し、それをシリコン樹脂で覆って再び雌型を製作する。
- (iii) (ii)で製作した雌型に粘土を入れて雄型を製作する。ここで、人間から型を取る際に目や口が閉じた状態になっているため、写真を基に彫刻を施して整形する。
- (iv) (iii)の粘土の雄型を基にFRPで雌型および雄型を

製作する。

最終的に(iv)のFRP製の雌型および雄型がマスター型となり、これを基に皮膚を製作する。皮膚の素材には軟質ウレタン樹脂を用いており、厚みは平均5mmである。軟質ウレタン樹脂は硬度0と5の2種類を混合したものを用いており、皮膚の色を着色している。また、顔型と同時に歯型も取り、義歯を製作した。

2.2 顔ロボットの構造 顔ロボットの内部構造を図2に示す。金属フレームを頭蓋骨に見立てたFRP製の骨格で覆い、その上から皮膚を被せる。FRPの骨格は、モデルの顔型を基に製作しており、全体の大きさは210×110×130mm(=縦×横×奥行)である。

表情演出における顔面上の自由度は27あり、それらの変位を制御するMcKibben型人工筋肉は全部で39本ある。アクチュエータ配置を図3に示す。図中の数字はアクチュエータの番号を表しており、39本全てを骨格内部に納めている。その内27本(図3中1~8, 19~37)がワイヤを介して皮膚を直接引っ張るアクチュエータである。また、図3中9~18は、瞼の開閉に用いられるアクチュエータである。瞼部は、図4に示すように2つのフレーム(図4中A, B)から成っており、片側で2自由度を有する。上瞼および下瞼は、McKibben型人工筋肉で上下方向に駆動でき、ばねの復元力を利用して初期位置に戻る。上瞼に3本(図3中9, 11, 12または10, 13, 14)、下瞼に2本(図3中15, 17または16, 18)、片眼で計5本のアクチュエータを使用してい

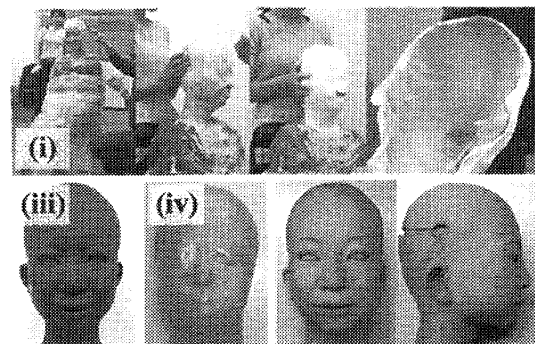


Fig. 1 The process of forming life-mask

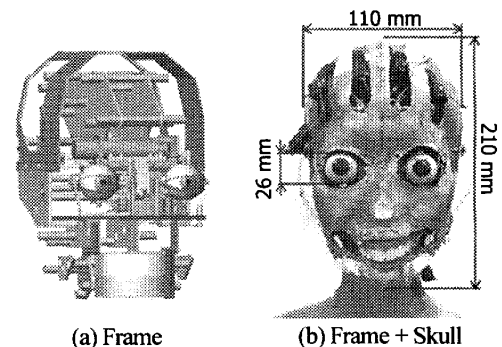


Fig. 2 Inner structure

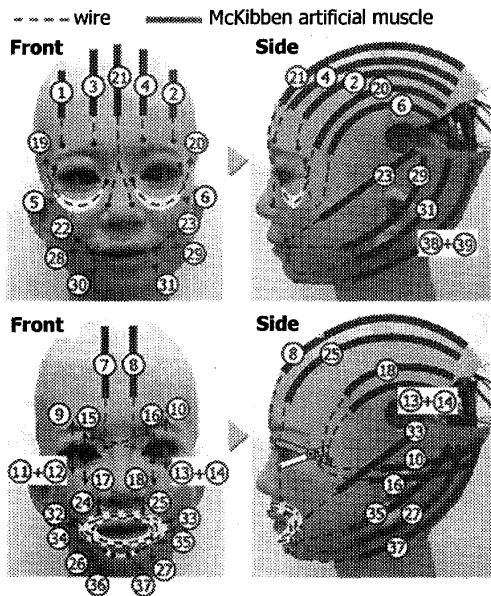


Fig. 3 Actuator distribution

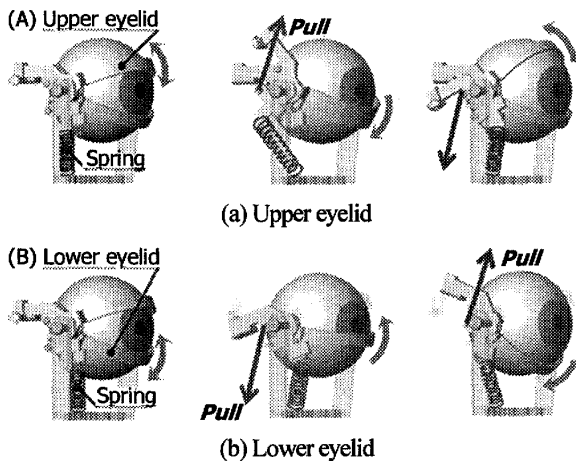


Fig. 4 Eyelid motion mechanism

る。皮膚はフレームに直接接着している。さらに、図3中38, 39は、顎の開閉用のアクチュエータである。

眼球部は両眼合わせて2自由度あり、それぞれDCモータにより駆動する。眼球の大きさは標準的な人間と同等の直径約26mm⁽¹⁷⁾とした。

顔ロボットで用いているMcKibben型人工筋肉⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾は、図5に示すように、空気供給用のエアチューブ、ゴムチューブ、ナイロンスリーブチューブにより構成されており、内側のゴムチューブを外側のナイロンスリーブチューブで覆う構造となっている。ゴムチューブ内に圧縮空気を供給するとゴムチューブが膨張するが、外側のナイロンスリーブチューブにより半径方向の膨張が抑制されるため、アクチュエータは軸方向に収縮して力を発生する。軽量、高出力、高コンプライアンスという特徴があり、柔軟であるため、顔ロボットの骨格のような曲面上にも配置することができる。顔ロボットでは直径が約12.7mmのものを使用してお

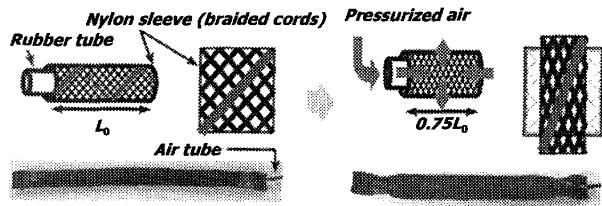


Fig. 5 McKibben artificial muscle

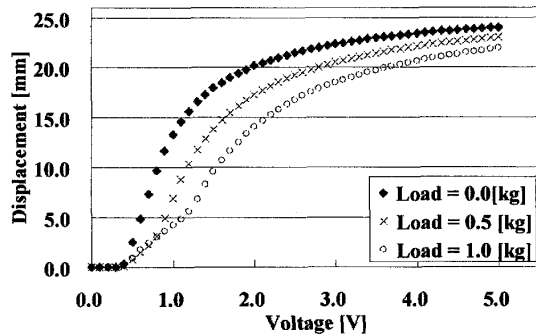


Fig. 6 Characteristics of McKibben artificial muscle

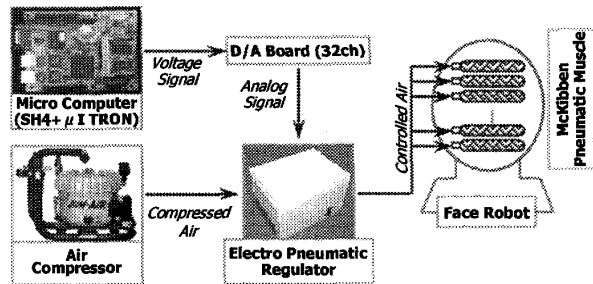


Fig. 7 System configuration

り、無負荷状態では約25%の収縮率が見込める。図6には、顔ロボットで使用しているのと同じ直径約12.7mm、長さ100.0mmのMcKibben型人工筋肉に垂直方向に0.0, 0.5, 1.0kgの錘を付加したときの変位の様子を示す。ここで、横軸は後述する電空レギュレータへの入力圧力を示している。

2.3 システム構成 システム構成を図7に示す。マイコン(SH4)からD/Aボードに電圧信号が送られ、電圧信号に応じたアナログ信号が電空レギュレータに送られる。電空レギュレータでは、コンプレッサーから送られてきた圧縮空気をアナログ信号に応じた空気圧に調整し、McKibben型人工筋肉に出力する。OSにはリアルタイムOSであるμITRON ver.4.0を用いており、周期1msで制御可能である。また、これをSH4マイコンに搭載することによりシステムを小型化した。

3. 顔ロボットによる表情表出

3.1 表情表出メカニズム 顔ロボットでの表情の生成には、P. Ekmanらにより提唱されたFACS(Facial Action Coding System)⁽²⁰⁾を参考にしている。これは、解剖学的な知見を基にして人間の表情筋の動きを44の動作単位(AU: Action Unit)に分割したものである。ま

た、表情の中でも特に万国共通に認識・表出することができる表情として6基本表情(驚き、悲しみ、怒り、嫌悪、恐怖、幸福)がある。本研究では、この6基本表情に関してモデルの表情を顔ロボット上で再現する。表1に6基本表情の表出に必要な14種類のAUを示す(10)(13)(21)。

3・2 制御点 顔ロボット上でAUの動作を実現する場合、顔面上の制御したい点(制御点 Control Point : CP)に対応して皮膚の裏側にコネクタを取り付け、そのコネクタをMcKibben型人工筋肉で引くことで皮膚を変位させる。

先行研究(10)(11)では、表1の14種類のAUを実現するため、顔面上に19箇所の制御点(図8中の1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 19, 20, 23, 25, 26, 27, 30, 31, 32)を設け、標準的な6基本表情の表出を実現した。しかしながら、実際の人間の表情を忠実に再現する場合、モデルとなった人間の顔器官の大きさや筋肉の発達具合に応じて制御点を追加または改良し、その位置や動作方向を検討する必要がある。図8に本研究で用いた32の制御点を示す。また、表1に各AUを実現するための制御点の組み合わせを示す。図8中の四角で囲まれたものが新たに追加または改良した制御点である。以下に詳細を述べる。

Table 1 Required AUs (Action Units) for 6 typical facial expressions

AU	Appearance change	Control point	
		Right	Left
1	Inner Brow Raiser	2	3
2	Outer Brow Raiser	1	4
4	Brow Lowerer	5, 6	7, 8
5	Upper Lid Raiser	9	10
6	Cheek Raiser	17	18
7	Lid Tightener	11, 13	12, 14
9	Nose Wrinkler	19	
10	Upper Lip Raiser	21	22
12	Lip Corner Puller	20	23
15	Lip Corner Depressor	27	30
17	Chin Raiser	29	
20	Lip Stretcher	25	26
25	Lips part	31	
26	Jaw Drop	32	

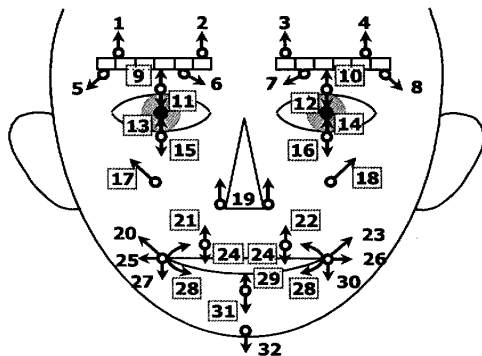


Fig. 8 Control points

3・2・1 眼輪筋(CP17, 18) 眼輪筋はAU6に対応し、“幸福”の際に頬を持ち上げる筋肉である。先行研究(10)(11)では、口角を上方に引き上げるにより頬上げを行っていたが、実際は目の周りの眼輪筋の眼窩部によって頬全体が大きく持ち上げられる。そこで、人間の眼輪筋の構造を参考にして、2枚の布を縫い合わせ、その間にワイヤを通したコネクタを作成し、これを皮膚に固定した(図9)。ここで、目頭側のワイヤの端を骨格に固定し、他方をMcKibben型人工筋肉で引くことにより頬を上げる。布には伸縮性のある素材を用い、布の伸縮性を妨げないよう千鳥がけで2枚の布を縫い合わせた。

3・2・2 口輪筋(CP24, 28)および上唇挙筋(CP21, 22) 口輪筋は口の周りを環状に取り巻く筋肉である。これは、6基本表情を表出するために必要な14種類のAUには直接は関係しないが、口を閉じたりすばませたりする際に必要となる。AU番号では、AU18(20)の”Lip Pucker (口をすばめる)”になる。また、本研究でモデルとなった女性の場合、“驚き”の表情を表出する際に口をすばませる動きが見られた。この口をすばませる動きを実現するためには、ワイヤの張力を口をす

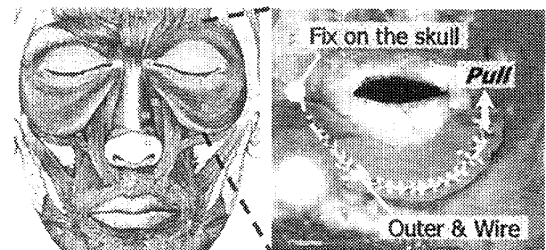


Fig. 9 Mechanism of cheek raiser

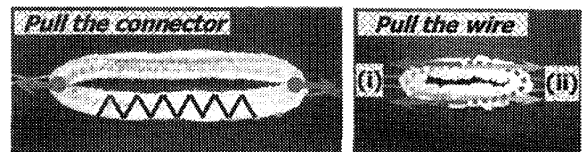
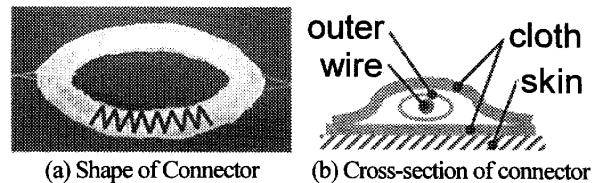


Fig. 10 Connector for m. orbicularis oculi motion

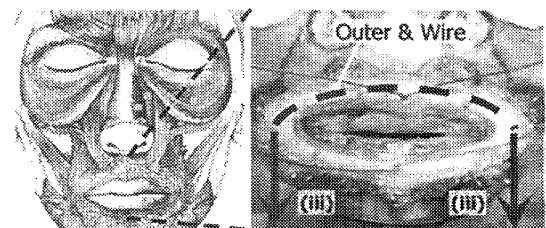


Fig. 11 Mechanism of m. orbicularis oculi motion

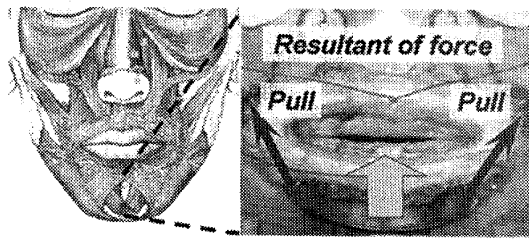


Fig.12 Mechanism of m. mentalis motion

ぼませる圧縮力に変換する必要がある。そこで、図 10 のような布 2 枚の間にワイヤを入れたコネクタを作成し、この両側から McKibben 型人工筋肉 (片側 1 本) を用いて図 10(d)中(i)(ii)のそれぞれ上下 2 本のワイヤを引くことで口をすぼませる動きを実現した。また、口を閉じる方向にもワイヤを配し、図 11 中(iii)の方向に引くことにより上唇を閉じるようにした(CP24)。コネクタの素材や取り付け方は眼輪筋の場合と同じである。

上唇挙筋は、AU10の上唇を上を引き上げる筋肉で、“怒り”の表情を表出するのに用いられる。先行研究⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾では制御点 CP19 を用いてこの動きを実現していたが、本研究では、新たに制御点 CP21, 22 を追加し、これらのコネクタを McKibben 型人工筋肉で引くことにより再現する。

3・2・3 オトガイ筋(CP29)および下唇下制筋(CP31)

オトガイ筋は AU17 に対応し、“嫌悪”の際にオトガイ部を上を引き上げる筋肉である。本研究では、CP29 の制御点を McKibben 型人工筋肉で引き挙げることにより実現する。しかし、オトガイ部を直接引き挙げた場合、ワイヤが口から見えてしまう。そこで、図 12 に示すように 2 本のワイヤを引いて、その合力でオトガイを持ち上げることとした。

下唇下制筋は AU25 に対応し、“怒り”や“恐怖”の際に下唇を下げる筋肉である。先行研究⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ではオトガイ筋と同じアクチュエータを用いて実現していたが、本研究では、制御点 CP31 を McKibben 型人工筋肉で直接引くことにより実現する。

3・2・4 上下瞼の開閉(CP9~16)

瞼の動きは AU5, 7 に対応し、“驚き”、“怒り”、“恐怖”における瞼の緊張や弛緩といった微細な動きに影響する⁽¹³⁾。また、目が上を向いたら上瞼が上がり、下を向いたら下瞼が下がるといったように、眼球の動きに合わせて上下瞼が動くこともある。先行研究⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾では上下瞼が連動して動いていたが、本研究では、瞼の細かな動きを再現するため、2・2 で説明した機構を用いて上下瞼を独立に制御出来るようにした。

3・3 6 基本表情の表出

顔ロボットにより、モデルとなった 20 代女性の 6 基本表情を再現する。この女性は、表情表出に関する特別な訓練を受けてはいない

ため、FACS に添って各表情の特徴を説明した。その後何度か練習してもらい、6 基本表情表出時の動画と静止画を撮影した。この時のモデルの表情を顔ロボットで再現した様子を図 13 に示す。ここで、右側がモデルの表情で、左側が顔ロボットで再現した表情である。また、各表情を再現するときに使用した AU の組み合わせを表 2 に示す。今回のモデルの場合、“驚き”の際に口をすぼめる(AU18)、“嫌悪”の際に頬を上げる(AU6)、といった基本表情における標準的な AU 以外の表情の変化が見られたため、表 2 にはそれらの AU も

Table 2 6 typical facial expressions organized by AUs

Facial expression	Action Units (AUs)
Surprise	1+2+5+18+26
Fear	1+2+4+5+7+20+25, 26
Disgust	4+6+9+17
Anger	4+5+7+10+25, 26
Happiness	6+12 (+26)
Sadness	1+4+15

Table 3 Required length and quantity of McKibben artificial muscle for each control point

Control Point		Actuator number		Required length [mm]	Quantity
Right	Left	Right	Left		
1	4	1	2	90	2
2	3	3	4	90	2
5	8	5	6	90	2
6	7	7	8	120	2
9	10	9	10	110	2
11	12	11+12	13+14	80	4
13	14	15	16	110	2
15	16	17	18	110	2
17	18	19	20	90	2
19		21		130	1
20	23	22	23	90	2
21	22	24	25	90	2
24		26	27	110	2
25	26	28	29	90	2
27	30	30	31	90	2
28		32	33	130	2
29		34	35	90	2
31		36	37	90	2
32		38+39		110	2



Fig.13 6 typical facial expressions

併せて示してある。さらに、表3に制御点毎に要したMcKibben型人工筋肉の長さ和本数を示すと共に、各制御点と図3中のアクチュエータ番号との対応を示す。

ここで、図13の表情は、次章の動的表情表出の最終結果、つまり表情が表出し終わった状態を表している。そこで、この6基本表情の比較・評価は、動的表情表出と併せて次章以降の4章と5章にて行うこととする。

4. 動的表情表出

4.1 動的表情表出の解析 本章では、表情を表出する過程、つまり、モデルが表情を表出する時の顔の特徴点の時間-変位関係を顔ロボットで再現する。顔の特徴点には、図14に示す7点を用いた。これらの点は、崔ら⁽²²⁾が表情分析に用いたもので、顔面の動きをよく表現でき、比較的安定かつ容易に抽出できる。

この特徴点の時間-変位関係を調べるため、表情表出時の“中立”から“ある表情”まで連続的に変化する様子をビデオで撮影した。その動画をPCで1/30秒毎(ビデオレート)に静止画として取り込み、その静止画から各特徴点の座標値(ピクセル値とする)をマウスにより取得した。解析には20インチモニタを用い、1ピクセル=約0.2mmで解析を行った。

こうして得られた時間-変位関係を多項式で近似し、顔ロボットでの目標値とした。

4.2 動的表情表出の制御 先行研究⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾では、変位量を測定できる空気圧シリンダ(ACDIS)を開発し、ピストンの先端位置を制御することで動的表情表出を実現した。この時、顔ロボットの皮膚の厚みは1mmと薄く、皮膚とピストンの変位量が等しいと仮定できた。しかしながら本研究では、McKibben型人工筋肉を骨格内に39本配置しており、その変位量を測定するためのセンサ類を搭載するスペースを確保するのは難しい。また、耐久性を持たせるために皮膚の厚みを平均5mmに変更したことにより、皮膚とアクチュエータの変位量が等しいと仮定できない。さらに、隣接する制御点

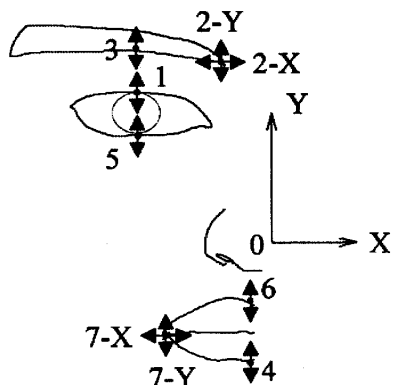


Fig. 14 Facial characteristic points (FCPs)

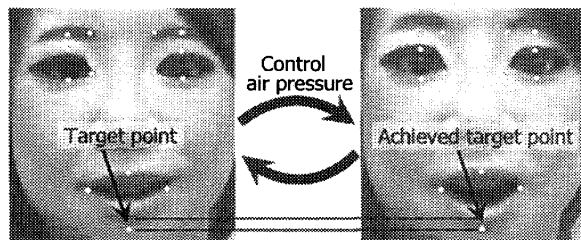


Fig. 15 Control procedure

Table 4 Correspondence of FCPs to CPs

FCP No.	Direction	Control Point	
		Right	Left
1	+	9	10
	-	11	12
2-X	+	6	7
	+	2	3
2-Y	-	6	7
	+	1+2	3+4
3	-	5+6	7+8
	+	29	
4	-	31+32	
	+	13	14
5	-	15	16
	+	21	22
6	-	24	
	+	28	
7-X	-	20+25	23+26
	+	20	23
7-Y	-	27	30

同士の動きが互いに干渉してしまう(例えば眉を上げた場合に、瞼も同時に動く)。そこで、基本表情毎に顔面上の特徴点の変位量と各制御点への注入圧力との関係を求め、フィードフォワード制御を行うこととした。

まず、ビデオカメラを用いて顔ロボットをPC画面上にキャプチャする。次に、ある時刻における特徴点の目標位置を4.1で得られた近似多項式から求め、顔ロボットと同じ画面上に合成して表示する。さらに、その合成した目標位置に達するよう、顔ロボットの各制御点への空気圧を調整する(図15)。これを1/60秒毎に繰り返して時間-空気圧の関係を求め、多項式近似により補間する。ここで、解析の時間間隔を短くした場合、精度の良いフィードフォワード値が得られるが、データ数が多くなるため、値の取得に時間が掛かる。そこで、目標値の追従性を損なわない最大の時間間隔を経験的に求め、1/60秒間隔でフィードフォワードデータを取得した。このとき得られたフィードフォワード制御値とその近似曲線、および相関係数の2乗値(R^2 値)を後出の図17に示す。

上記の処理により得られたデータを用い、フィードフォワード制御を行う(制御周期1ms)。表4に各特徴点を動かすために必要な制御点を示す。

4.3 動的表情表出実験 前節で述べた制御方法により顔ロボット上で動的表情表出を実現し、モデルとなった女性の表情表出過程をどの程度再現出来るか

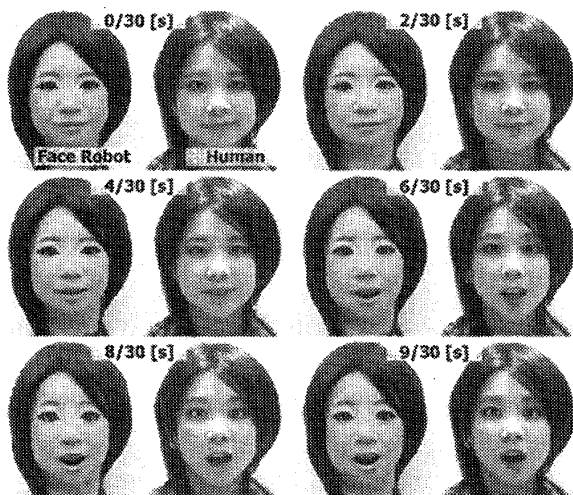


Fig. 16 Time series of facial image from “neutral” to “surprise”

を定量的に評価した。

結果の一例として、“驚き”の表出過程を図 16 に示す。また、その時の時間-変位の関係を図 17 に示す。さらに、6 基本表情毎の各特徴点における目標変位量と実際の変位量との絶対値誤差に関して、最大値と平均値を表 5 に示す。ここでは、各表情において実際に変位した特徴点のみを記載した。

この結果より、最大絶対値誤差は最大約 0.5 mm、絶対値誤差の平均値は最大約 0.4 mm となった。本研究で使用した McKibben 型人工筋肉は図 6 に示すような特性を持ち、例えば 0.01V 刻みで入力を与えた場合、無負荷状態では最大で約 0.3mm 変位するため、今回の実験で得られた程度の誤差は十分生じるものと考えられる。しかしながら、0.5mm の誤差は、1.0m 離れた人間の視覚角度としては $0.028^\circ (= \arctan(0.5/1000))$ であり、十分小さいと言える。以上より、前節の制御法により、人間と同速度での動的表情表出が精度よく実現できることが確認できた。

5. 表情の比較と官能評価

5.1 特徴点による表情の比較 動的表情表出における最終結果、つまり表情が表出し終わった状態での静的な表情に関して特徴点の比較を行う。表 6 は、表情表出におけるモデル(Hu)と顔ロボット(FR)の各特徴点の最終的な変位量と誤差を表している。

誤差は最大でも 0.3mm で、モデルの 6 表情を良く再現出来ているのが分かる。比較的大きな誤差が口周り(FCP4, 6, 7)に現れているが、これは、人間の口が良く動き、他の部位に比べて形状変化が複雑だからだと考えられる。今後、口周りの制御点を増やすなどし、口周りの自由度を増やす必要があると考えられる。

Table 5 Maximum and average of the absolute error between target and actual displacements in FCPs

Facial expression		Facial Characteristic Points (FCPs)								
		1	2-X	2-Y	3	4	5	6	7-X	7-Y
Surprise	Max.	0.3	—	0.1	0.3	0.5	0.2	—	—	—
	Ave.	0.1	—	0.0	0.1	0.4	0.1	—	—	—
Fear	Max.	0.3	—	0.3	0.4	0.5	—	—	0.4	0.4
	Ave.	0.1	—	0.1	0.1	0.2	—	—	0.1	0.1
Disgust	Max.	0.4	0.5	0.4	0.2	0.2	0.1	0.3	0.4	0.5
	Ave.	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2
Anger	Max.	—	0.2	0.2	0.3	0.4	—	—	0.4	0.5
	Ave.	—	0.0	0.0	0.1	0.2	—	—	0.1	0.2
Happiness	Max.	0.2	—	—	—	0.4	0.2	0.3	0.2	0.3
	Ave.	0.1	—	—	—	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1
Sadness	Max.	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	—	0.4	0.4	0.5
	Ave.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	—	0.1	0.1	0.2

Unit [mm] Max. : Maximum error Ave. : Average error

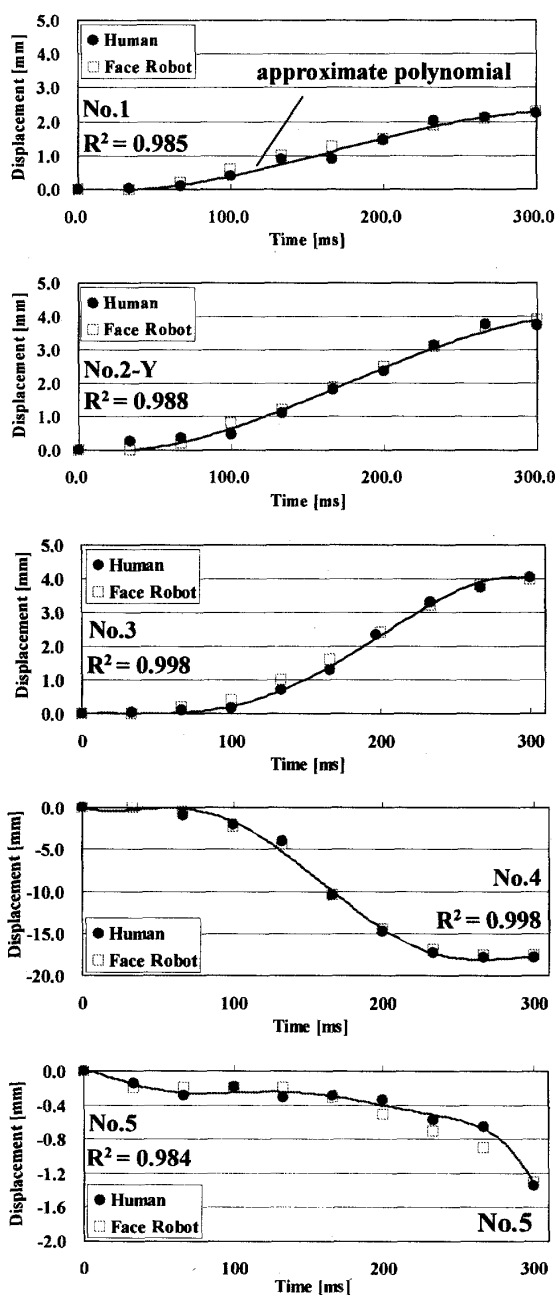


Fig. 17 Dynamic expression of “Surprise”

Table 6 Comparison of each FCP's displacement in 6 typical facial expressions between the human and the face robot

Facial expression		Facial Characteristic Points (FCPs)								
		1	2-X	2-Y	3	4	5	6	7-X	7-Y
Surprise	Hu	2.3	—	3.7	4.0	-17.9	-1.3	—	—	—
	FR	2.3	—	3.9	4.0	-17.6	-1.3	—	—	—
	Error	0.0	—	0.2	0.0	0.3	0.0	—	—	—
Fear	Hu	3.7	—	8.5	7.2	-4.5	—	—	-2.7	-4.6
	FR	3.7	—	8.6	7.4	-4.3	—	—	-2.9	-4.6
	Error	0.0	—	0.1	0.2	0.2	—	—	0.2	0.1
Disgust	Hu	-2.9	2.6	-3.5	-2.1	-0.4	3.3	1.5	1.4	-6.7
	FR	-2.9	2.6	-3.5	-2.0	-0.4	3.2	1.5	1.4	-6.5
	Error	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2
Anger	Hu	—	2.0	-2.6	-2.3	-4.4	—	—	-1.5	-5.4
	FR	—	2.0	-2.6	-2.2	-4.1	—	—	-1.5	-5.1
	Error	—	0.0	0.0	0.1	0.3	—	—	0.0	0.3
Happiness	Hu	-1.1	—	—	—	2.0	1.3	2.7	-1.8	2.3
	FR	-1.0	—	—	—	1.8	1.3	2.5	-1.7	2.2
	Error	0.1	—	—	—	0.2	0.0	0.3	0.1	0.1
Sadness	Hu	-1.8	2.9	0.4	-1.3	-2.4	—	-1.8	1.1	-9.7
	FR	-1.8	2.9	0.4	-1.2	-2.4	—	-1.9	1.1	-9.8
	Error	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	—	0.1	0.0	0.1

Unit [mm]

Table 7 Result of facial recognition rate and evaluation of similarity between the human and the face robot

	Recognition result [%]						Similarity		
	Su	Fe	Di	An	Ha	Sa	Ave.	S.D	
Facial expressions	Surprise (Su)	96.7 (86.7)	3.3 (13.3)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.83	0.83
	Fear (Fe)	13.3 (23.3)	63.3 (60.0)	0.0 (16.7)	10.0 (0.0)	0.0 (0.0)	13.3 (0.0)	1.30	0.70
	Disgust (Di)	0.0 (0.0)	0.0 (3.3)	86.7 (80.0)	10.0 (3.3)	0.0 (0.0)	3.3 (13.3)	0.73	1.01
	Anger (An)	3.3 (0.0)	13.3 (3.3)	10.0 (10.0)	70.0 (86.7)	3.3 (0.0)	0.0 (0.0)	1.33	0.76
	Happiness (Ha)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	3.3 (0.0)	0.0 (0.0)	96.7 (100.0)	0.0 (0.0)	0.23	1.04
	Sadness (Sa)	0.0 (0.0)	6.7 (6.7)	20.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	73.3 (93.3)	0.63	1.03

5.2 官能評価

開発した顔ロボットに関して被験者を用いた官能評価実験を行った。具体的には、顔ロボットが中立の状態からある表情(6基本表情のうちの1つ)へと表情を変えると時の様子を被験者に動画で提示し、それがどの表情(驚き、恐れ、嫌悪、怒り、幸福、悲しみ)に当たるのかを判断してもらった。このとき、重複して回答しても良いとした。さらに、顔のモデルとなった女性と顔ロボットを並べて提示したとき、顔ロボットがどの程度モデルと似ているかをそれぞれの表情に対して5段階(-2~2)で評価してもらった。また、自由記述欄を設け、コメントを求めた。なお、それぞれの実験において、順序効果の影響を排除するため、表情の提示は被験者毎にランダムに行うこととした。被験者には、顔表情の認識に関して特別に訓練を受けていない20代学生30人を用いた。そして、提示した表情毎に、被験者が実際に認識した表情の割合をまとめた。その結果を表7に示す。ここで、表中の括弧内の数字は、顔のモデルとなった女性を用いて同じ実験を行った場合の認識率である。

表7の結果から、認識率の平均値を比較してみると、モデルの場合が84.4%であるのに対して顔ロボットの場合は81.1%となり、モデルの場合よりも顔ロボットのほうが他の表情に誤認識されることが多いため、怒りと悲しみの表情の認識率はモデルと比べて特に低く、改善が必要である。

また、表情の酷似度と認識率の関係について見てみると、恐怖(Fear)と怒り(Anger)の表情の酷似度は他と比べて比較的高いものの、表情の認識率は他に比べて低いのが分かる。人間のモデルの場合でもこの2つの表情の認識率は他の表情と比べて低く、それが顔ロボットの場合の認識にも影響していると考えられる。一方で、驚き(Surprise)や嫌悪(Disgust)、幸福(Happiness)の表情は恐怖や怒りの表情よりも酷似度が低いものの8割以上の認識率を得ており、特に驚きと嫌悪の表情に関してはモデルよりも認識率が高いのが分かる。この結果から、顔ロボットの表情をモデルに似せることで、表情が伝わり難くなってしまったと言える。しかしながら、表情の伝達にのみ注目した場合、顔ロボットの表情は自由に操作可能であり、顔ロボットの表情表出の仕方を工夫することにより、モデルとなった人間よりも効果的に表情を表出することが可能だと考えられる。さらに、自由記述欄を設けて顔ロボットの表情に関して被験者に意見を求めたところ、「シワが不自然」、「顔の凹凸が少ない」、「口・目元の動きが弱い」などの意見が多く、今後の改善が必要である。また図13から、例えば嫌悪の表情の場合に、口角を引いた際に口角部分が窪んでしまっているのが分かる。今後は、奥行き方向も考慮して立体的な表情の変化を再現する必要がある。

6. まとめ

本論文では、顔ロボットの实在感をより良く表現するため、生きている人間の顔型を取って皮膚(ライフマスク)を製作した。そして、そのモデルとなった人間に酷似した顔ロボットを製作した。次に、モデルの表情表出をより良く再現するため、制御点を19ヶ所⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾から32ヶ所に変更した。これは、今回のモデルに特化したものではなく、様々な顔のモデルに適用出来ると考えられるが、モデルとなる人間の顔器官の大きさ、筋肉の発達具合等に応じて制御点の位置や大きさ、動作方向を変更する必要がある。

さらに、開発した顔ロボットを用いてモデルの表情表出過程を再現することを行った。ここでは、あらかじめ撮影しておいたモデルの表情表出を解析し、ある

時刻における顔面上の特徴点の目標変位量を求めた。次に、解析した時間-変位関係を基に各時刻におけるアクチュエータの注入圧力を求めた。これを基本表情毎に行い、フィードフォワードデータを取得した。そして、顔ロボットでの動的表情表出実験を行い、顔上の特徴点の時間-変位関係をモデルと比較した結果、モデルの表情表出過程を精度よく再現できていることが確認された。また、表情が表出し終わった状態の静的な表情に関しても、特徴点の変位量の比較を行い、十分な再現性を得られていることを確認した。そして、官能評価実験を行い、6基本表情の認識に関して、平均で81.1%の認識率を得られることを確認した。さらに、表情毎にモデルと顔ロボットの類似度を評価してもらったところ、恐怖と嫌悪の表情は比較的高い評価を得たものの、その他の表情に関しては評価が低く、今後の改善が必要である。

今後は、より立体的な表情の変化、つまり図14におけるz軸方向の変化に関しても評価する必要があると考えられる。また、コミュニケーション中における表情の変化を詳細に解析し、表情の自然な強弱のつけ方や6基本表情以外の表情変化に関しても追求する必要がある。さらに将来的には、遠隔地で暮らす家族(例えば子供や孫)の顔を持つロボットを開発し、独居老人などがそのロボットを介して遠くにいる家族と対話することが出来るシステムに応用したいと考えている。

文 献

- (1) Matsuo, T., *Psychology of Communication*, Nakanisiya Publishers, (1999), pp.41-68. (in Japanese)
- (2) Matsusaka, Y., Tojo, T., and Kobayashi, T., *Conversation Robot Participating in Group Conversation*, *Journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers D-II*, Vol.J84-D-II, No.6 (2001), pp.898-9028. (in Japanese)
- (3) Kanda, T., Kamashima, M., Imai, M., Ono, T., Sakamoto, D., Ishiguro, H. and Anzai, Y., *Embodied Cooperative Behavior for a Humanoid Robot that Communicate with Humans*, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.23, No.7 (2005), pp.808-909. (in Japanese)
- (4) Watanabe, T., Okubo, M. and Ogawa, H., *An Embodied Interaction Robots System Based on Speech*, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.66, No.648 (2000), pp.251-258. (in Japanese)
- (5) Mehrabian, A., *Communication without words*, *Psychology Today*, Vol. 2 No. 4 (1968), pp.52-55.
- (6) Miwa, H., Takanobu, H. and Takanishi, A., *Development of a Human-like Head Robot for Emotional Communication with Human*, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.68, No.675 (2002), pp.219-224. (in Japanese)
- (7) Breazeal, C. and Scassellati, B., *How to build robots that make friends and influence people*, *Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (1999), pp.858-863.
- (8) Kano, M., Kato, S. and Itoh, H., *Facial Expressions Using Emotional Space in Sensitivity Communication Robot "Ifbot"*, *Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2004), pp.1586-1591.
- (9) Hashimoto, M., Yoshida, S. and Tamatsu, Y., *Gaze Guidance with Emotional Presentation of a Head Robot*, *2007 IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering*, (2007), pp.1357-1360.
- (10) Kobayashi, H., Hara, F., Uchida, G. and Munehisa, O., *Study on Face Robot for Active Human Interface*, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.12, No.1 (1994), pp.155-163. (in Japanese)
- (11) Kobayashi, H. and Hara, F., *Real Time Dynamic Control of 6 Basic Facial Expressions on Face Robot*, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.14, No.5 (1996), pp.677-685. (in Japanese)
- (12) Hashimoto, T., Hiramatsu, S., Tsuji, T. and Kobayashi, H., *Development of the Face Robot SAYA for Rich Facial Expressions*, *SICE-ICASE International Joint Conference 2006*, (2006), pp.5423-5428.
- (13) Ekman, P. and Friesen, W.V., *Unmasking the Face*, Prentice-hall, Inc., (1975).
- (14) Hashimoto, T., Senda, M., Yamazaki, Y., Shiiba, T. and Kobayashi, H., *Development of the Interactive Receptionist System by the Face Robot*, *4th JSME Annual Conference on Robotics and Mechatronics*, 2A1-H-45(1)-45(3) (2004). (in Japanese)
- (15) Sakamoto, D., Kanda, T., Ono, T., Ishiguro, H. and Hagita, N., *Android as a Telecommunication medium with Human-like Presence*, *Proceedings of 2nd ACM/IEEE International Conference on Human Robot Interaction (HRI2007)*, (2007), pp. 193-200.
- (16) Oh, J., Hanson, D., Kim W., Han, I., Kim, J. and Park, I., *Design of Android type Humanoid Robot Albert HUBO*, *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2006), pp.1428-1433.
- (17) Iijima, T., *ANATOMY OF THE HUMAN BODY (THE GRAPHIC BIBLE FOR CG DESIGNERS)*, *Works Corporation Inc.*, (2003), pp.28-33. (in Japanese)
- (18) Chou, C.P. and Hannaford, B., *Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscle*, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.12 (1996), pp.90-102.
- (19) Schulte H. F., *The characteristics of the McKibben artificial muscle*, *In The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics*, *National Academy of Sciences-National Research Council*, Publication 874, (1961), pp.94-115.
- (20) Ekman, P. and Friesen, W.V., *The Facial Action Coding System*, *Consulting Psychologists Press*, (1978).
- (21) Saeki, Y. and Sasaki, M., *Active Mind*, *University of Tokyo Press*, (1990), pp.114-117. (in Japanese)
- (22) Choi, C. S., Takebe, T. and Harashima, H., *Analysis of Facial Expressions Using Three-Dimensional Facial Model*, *Journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers D-II*, Vol.J74-D-II, No.6 (1991), pp.766-777. (in Japanese)