

A Study on the Classification of Moving Units for Facial Expression Robot : Proposal of Moving-Unit for Animatronics

権, 泰錫
九州大学大学院芸術工学研究院

<https://doi.org/10.15017/13962>

出版情報 : 九州大学, 2008, 博士 (芸術工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

第3章

人間表情と顔表情ロボットの関連について

3-1. 既存の顔表情ロボットで用いられる

駆動ユニットの分類

3-1-1. 調査目的

アニマトロニクス制作や制御の過程で、駆動ユニットを如何に分類するかということが重要であると考えられる。駆動ユニットの分類によって全体的な機械構造や制御方法が変わるためである。アニマトロニクスの顔表情の表現において、アクチュエータの減少化やよりリアルな表現のための駆動ユニットの分類のために、既存のアニマトロニクス分野やロボット工学分野の先行研究における駆動ユニットに関する調査が必要である。

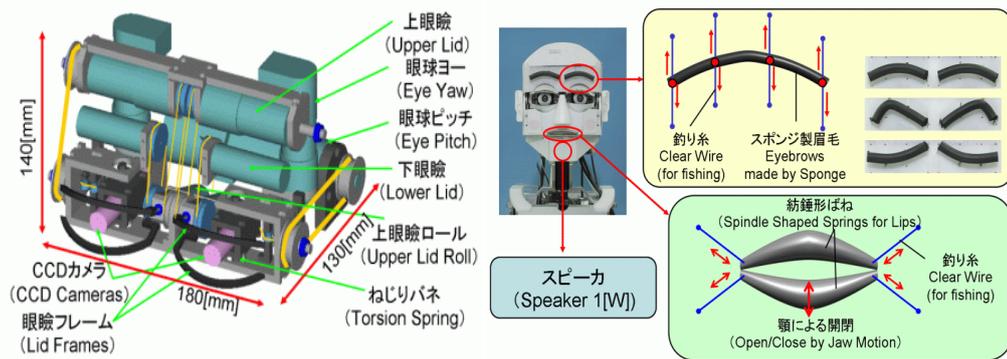
本調査は既存のアニマトロニクスやロボットの表情表現において、よく使われる駆動ユニットの位置や数、駆動ユニットの分類・表記方法などを調べ、本論文で提案する駆動ユニット分類の基礎資料として使うことを目的とする。

3-1-2. 調査方法

アニマトロニクスやロボット工学分野の表情表現に関する研究の中で、分析対象の範囲を決め、本調査の対象を選択した。文献やインターネットに掲載されている資料から各研究の駆動ユニットに関する情報を得た。駆動ユニットに関する情報から顔表情ロボットの表情表現によく使う駆動ユニットの位置や数、駆動ユニットの分類・表記方法について比較分析を行なった。

3-1-3. 駆動ユニットの調査

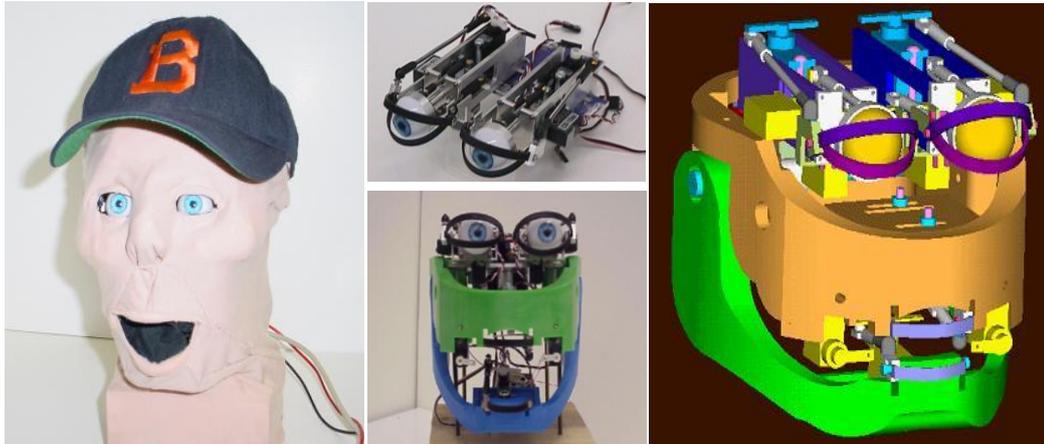
サンプル1として、図3-1に早稲田大学ヒューマノイド研究所で制作された情動表出ヒューマノイドロボット「WE-4RII (Waseda Eye No.4 Refined II)」を示す。この研究についてムハマド (Muhamad, 2004) らは、駆動ユニットの名称や役割に関しては、上眼瞼、眼球ヨー、上眼瞼ロールなど、動く部分の名称や動作の描写等を混用し、眉や口の動きに関する駆動ユニットには名称がついていない[19]。表情に関する駆動ユニットは、眉の部分に左右4個ずつ、口は両側に2個ずつ、目の部分は上下の瞼の駆動ユニットが左右に3個ずつ、目玉は上下・左右の動きで3個、顎に1個あり、顔全体で総22個の駆動ユニットを組み合わせることで表情の表現を行う。また、首は4軸の駆動ユニットにより制御している。さらに、手は12個、腕は18個、腰は2個、呼吸装置は1個の駆動ユニットで制御している。アクチュエータとしては、DCモーターが利用されている[19]。



(出典 : <http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/research/we/we-4rII/index.htm>)

図3-1. 「WE-4RII」の眼球・眼瞼部機構図と表情表出機構

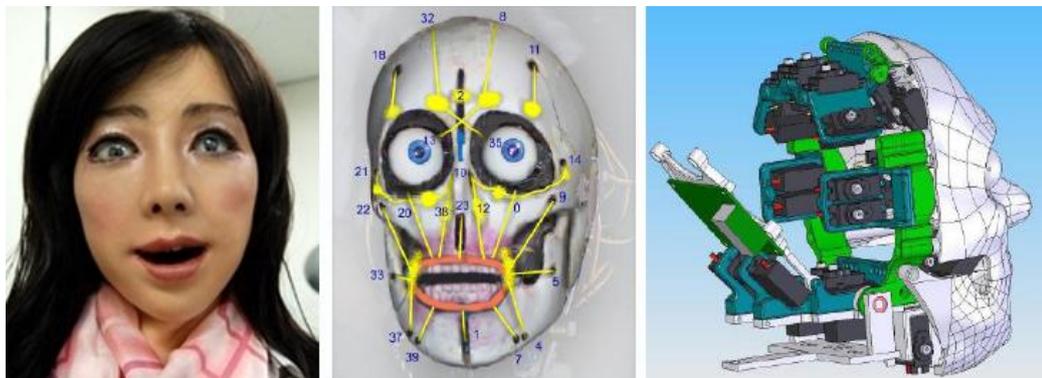
サンプル2として、図3-2にアメリカのバックネル大学 (Bucknell University)のシューター (Steven. B. Shooter) 研究室で制作されたアニメトロニクスを示す。この研究についてノバコフスキ (Nowakowski, 2003) らは、駆動ユニットの制御に関する説明を Lower Lip, Jaw, Eyeball のように、動く部分の名称として表記している[20]。アクチュエータによる駆動ユニットは、眉の部分は無く、口の部分は上・下の唇に1個ずつと左右に1個ずつ、目の部分は左右の瞼にそれぞれ2個ずつ、目玉は上下・左右の動きで2個、顎の動きに1個であり、総11個の駆動ユニットを用いて表情を表現する。首は動かない。アクチュエータとしては、RCサーボ・モーター (Servo Motor) が利用されている[20]。



(出典 : <http://www.facstaff.bucknell.edu/shooter/>)

図 3-2. バックネル大学のアニマトロニクスとその内部構造

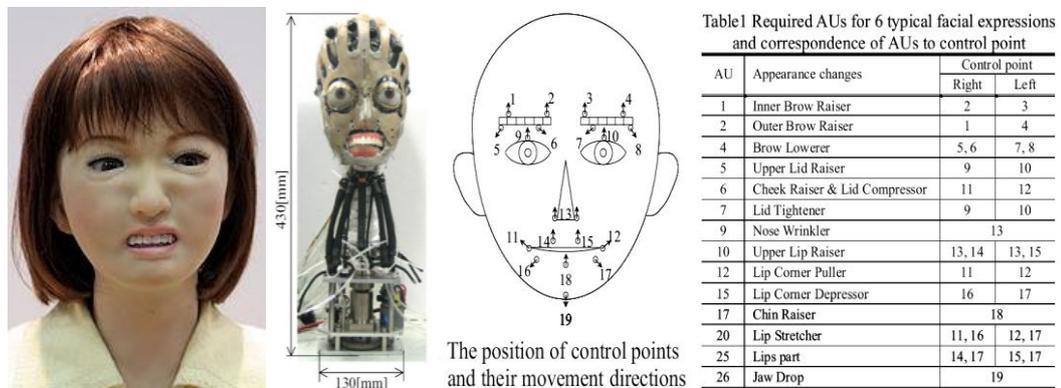
サンプル 3 として、図 3-3 に韓国生産技術研究院 (KITECH) で制作されたロボット歌手「EveR-2」を示す。この研究についてイドンウク (Dong-Wook Lee, 2008) らは、駆動ユニットの制御に関する説明を、任意の数字を付与し行なっている [21]。アクチュエータによる駆動ユニットは眉の部分に左右 4 個ずつ、口は両側に 3 個ずつ、上・下の唇に 7 個、鼻に 2 個、目の部分は左右の上瞼にそれぞれ 1 個ずつ、目玉は上下・左右の動きで 2 個、頬の部分に 2 個、顎の動きに 1 個があり、総 30 個の駆動ユニットを用いて表情を表現している。アクチュエータとしては、RC サーボ・モーター (Servo Motor) が利用されている。首は 3 軸の駆動ユニットを用いて制御する。全身では 73 個の駆動ユニットがある [21]。



(出典 : http://blogfile.paran.com/BLOG_822906/200803/1206534909_AndroidRoblt_1.pdf)

図 3-3. ロボット歌手「EveR-2」とその内部構造

サンプル 4 として、図 3-4 に東京理科大学の小林研究室によって 2006 年に制作された顔ロボット「SAYA」を示す。この研究について橋本卓也ら (2006) は、駆動ユニットの制御に関する説明を任意の数字を付与して行っており、それぞれの駆動ユニットは AU に対応している。アクチュエータによる駆動ユニットは眉の部分に左右 4 個ずつ、口は両側に 1 個ずつ、上・下唇に 2 個ずつ、オトガイに 1 個、鼻に 1 個、目の部分は左右の上瞼にそれぞれ 1 個ずつ、顎の動きに 1 個であり、総 19 個の駆動ユニットを用いて表情を表現する。首は 5 軸の駆動ユニットを用いて制御している [22]。アクチュエータとしては DC モーターと空圧のエアー・マッスル (Air Muscle) が利用された。



(出典： Takuya Hashimoto, Sachio Hiramatsu, Hiroshi Kobayashi, 2006)

図 3-4. Face Robot 「SAYA」 とその内部構造

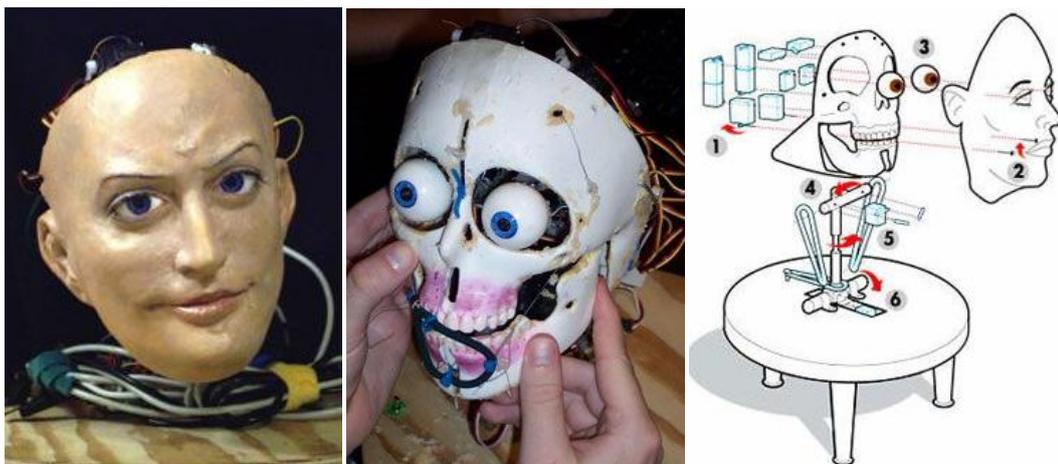
サンプル 5 として、図 3-5 に韓国科学技術院 (KAIST) の呉俊鎬 (オ・ジンホ) 教授チームのアインシュタインをモデルとしたロボット「アルバート HUBO」を示す。顔の部分制作はハンソン・ロボティクス (Hanson robotics) 社が行なった。なお、この研究について呉俊鎬ら (2005) は、駆動ユニットの名称や役割を、動作部分の名称、動作の描写等を混用し、説明している [23]。眉の部分は左右それぞれ 4 個ずつ、口は両側に 2 個ずつ、上・下唇に 2 個ずつ、目の部分は左右の上瞼と下瞼にそれぞれ 2 個ずつ、目玉は上下・左右の動きで 3 個、鼻の部分は両側に 2 個ずつ、顎に 1 個あり、総 28 個の駆動ユニットを用いて表情を表現している。首は 3 軸の駆動ユニットを用いて制御している。顔の部分に 31 個の RC サーボ・モーターが搭載されてある。「怒る」などの 10 種類の表情が表現可能である [23]。



(出典 : http://hubolab.co.kr/AlbertHUBO_Specification.php)

図 3-5. 韓国科学技術院の「アルバート HUBO」とその内部構造

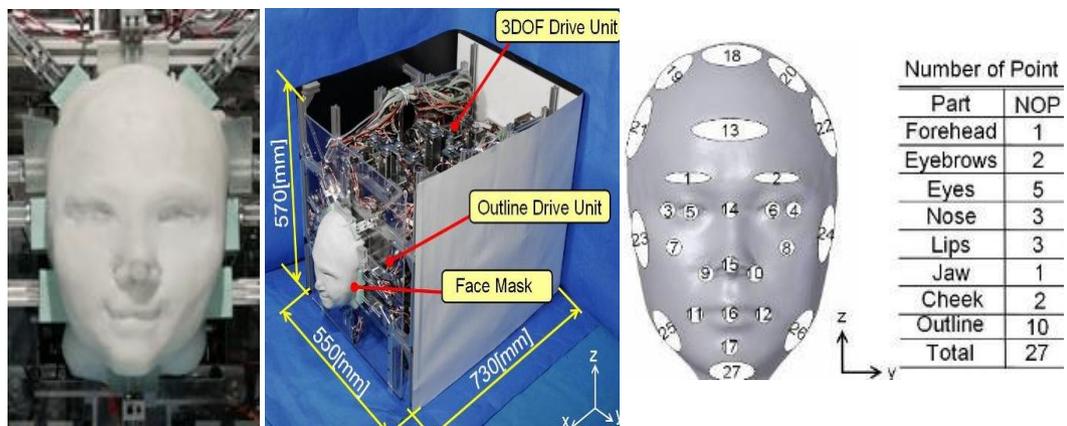
サンプル 6 として、図 3-6 にハンソン・ロボティクス (Hanson robotics) 社が制作した「VERA」を示す。「VERA」に関する論文や文献がほとんどないため、WEB サイト[24]で掲載されている写真より部分的に構造を見ることができる。駆動ユニットは眉は左右それぞれ 1 個ずつ、口は両側に 1 個ずつ、上・下唇に 1 個ずつ、目の部分は左右の上瞼にそれぞれ 1 個ずつ、目玉は上下・左右の動きで 2 個、顎に 1 個あり、総 10 個の駆動ユニットを用いて表情を表現する。首は 3 軸の駆動ユニットを用いて制御している。アクチュエータとしては RC サーボ・モーター (Servo Motor) が利用されている。



(出典 : <http://www.hansonrobotics.com/robots.html>)

図 3-6. Hanson robotics 社が制作した「VERA」とその内部構造

サンプル7として、図3-6に早稲田大学とドコモが共同で開発した顔ロボット「WD-2」を示す。この研究について高西淳夫ら(2007)は、駆動ユニットの制御に関する説明を Lips, Jaw, Eyebrows のように動く部分の名称として行っている[25]。27個のサーボ・モーターとマイクロコントローラーを搭載し、全56自由度でそれぞれのパーツを駆動している。駆動ユニットは額の動きを含む眉の部分に3個、目の部分に5個、鼻の部分に3個、頬の動きを含む口の部分に5個、顎に1個あり、総17個の駆動ユニットを用いて制御している。顔の外部のアウトラインに10個の駆動ユニットがある[25]。



(出典 : http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/research/docomo/index_j.htm)

図3-7. 早稲田大学の「WD-2」とその内部構造

3-1-4. 駆動ユニットの分析結果

顔表情ロボットの駆動ユニットの分類の結果から、ロボットに適用された駆動ユニットの名称や役割が統一されていないことや、各ロボットの駆動ユニットの共通部分がわかった。

駆動ユニットの名称や役割の分類を表3-1に示す。駆動ユニットの表記方法はFACSにおけるAUによるもの、表情筋を含む筋肉名称によるもの、動作部位によるもの、任意の数字によるもの、動作の描写によるものなど、まちまちである。

表3-1に示したように、人間の顔を表現したロボットの駆動ユニットでよく用いられる部分は眉、目玉、瞼、口、鼻、顎、首である。眉の部分の駆動ユニットは全体で1個から、左右それぞれ4個ずつ、総8個のものまでである。口の部分は4個から13個までの駆動ユニットが用いられている。上瞼は全て両側に各々1個ずつの駆動ユニットを用いており、下瞼は表現しない場合もある。目玉の部分は通常二つの目玉の上下の動作と左右の動作にそれぞれ1個ずつの駆動ユニットが用いられているが、3個の駆動ユニットを用いている場合もある。鼻の部分は両側の鼻翼に1個又は2個の駆動ユニットが用いられている。顎の動きは全てのサンプルが1個の駆動ユニットで制御している。首は3軸から5軸までの駆動ユニットが用いられている。

表3-1. 既存の顔表情ロボットの顔部分の駆動ユニット数と表記方法

駆動ユニット 部位 ロボット	眉	目玉	瞼	口	鼻	顎	首	その他	合計	駆動ユニットの 表記に関する備考
早稲田大学 「WE-4R II」	8	3	2	4	—	1	4	—	22	動作部分や動作 描写を混用
Bucknell Univ. シューター研究室	—	2	4	4	—	1	—	—	11	動作部分の 名称のみ表記
KITECH 「EveR-2」	8	2	2	13	2	1	3	2	33	AUに対応しない 独自の数字を利用
東京理科大学 「SAYA」	8	—	2	7	1	1	5	—	24	AUに代入した数字
Hanson Robotics 「VERA」	1	2	2	4	—	1	3	—	13	—
早稲田大学 「WD-2」	3	—	5	5	4	1	—	10	27	動作部分の 名称のみ表記
KAIST 「アルバート HUBO」	8	3	4	8	4	1	3	—	31	動作部分や動作 描写を混用

3-2. 駆動ユニットの記述方法

ロボットの表情は、アクチュエータと呼ばれる油圧・空圧や電動モータなどを用いて、並進または回転運動による制御がなされる。

アクチュエータのコントロールや表情の表現を容易にするためにアクチュエータによる駆動ユニットの名称や役割の分類を行なった。本調査対象となったロボットのアクチュエータによる駆動ユニットの名称や役割は、表 3-1 の分析結果のように、FACS における AU、表情筋を含む筋肉名称、動作部位、任意の数字、動作の描写などの混用によって分類されている。アクチュエータによる駆動ユニットの分類に筋肉名称を用いることは名称の難しさや口輪筋のように多数の動作を担当する筋肉もあるため困難である。動作部位と動作の描写を駆動ユニットの名称として用いると、「オトガイの皮膚を引き上げ、皺を作る」のように文字数が多くなるため、単純な記号表記が必要である。

アクチュエータによる駆動ユニットの分類には、FACS における AU のように各ユニットに意味があり、制御に関する情報が入っているものが必要である。FACS における AU は表 2-2 で示したように動作部位や、動作の強みの情報も含むことができ、人間の表情の表出の結果の分析に対しては便利であるが、ロボットの駆動ユニットの制御や制作にはアクチュエータの複数の可動要素や変化量加わるために AU を駆動ユニットとして用いるのは不向きである。以下(1)～(4)にその問題点を示す。

(1) 単独制御による複数の AU の表現

アニメトロニクスではロボットの頭部空間の中にアクチュエータや各種の機械装置及びコントローラなどを組み込まなければならないため、使用する駆動ユニットの数を如何に減らし、高い表現を行うかということが重要である。このため、表情に対応した、単独あるいは複数のアクチュエータの効果的な組み合わせを見つけ出すことが必要である。例として瞼の表現をあげる。ロボットで瞼の動きを表現する場合、AU5（上瞼を上げる）、AU7（瞼を緊張させる）、AU41（上瞼を力なく下げる）、AU42（薄目）、AU43（瞼を閉じる）、AU44（細目にする）、AU45（まばたきをする）、AU46（ウィンクする）を担当するアクチュエータは左右に1個ずつで十分である。これは、1つのアクチュエータの動く量を調節することによって表現できるためである。

(2) 駆動ユニットのムービングポイントに対する AU の不足

例として、アニマトロニクスにおける眉の表現をあげる。FACS における眉の動きに関する AU は AU1 (眉の内側を上げる)、AU2 (眉の外側を上げる)、AU4 (眉を下げる) の三つであり、駆動ユニットのムービングポイントの位置がより詳細である場合不便である。表 3-1 に示したように、眉の駆動ユニットが片方に 1 個から 4 個までの用いられているロボットでは、図 3-8 に示すように更に細かな駆動ユニットが必要である。

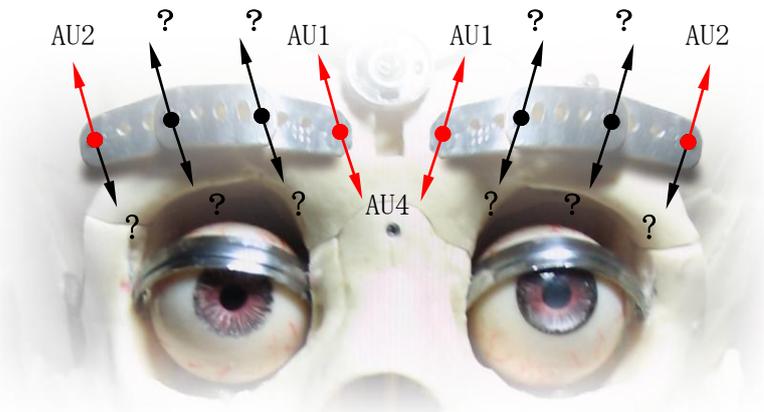


図 3-8. 駆動ユニットを AU で表現する場合、眉の部分を担当する AU

(3) 複数のアクチュエータの組み合わせによる AU の表現

例として、AU20 (唇両端を横に引っ張る) の表現をあげる。AU20 の場合、図 3-9 のように実際の間では 1 つの筋肉 (笑筋) を用いるが、アニマトロニクスのモデルでは複数の駆動ユニットを組み合わせることによってこれを表現する必

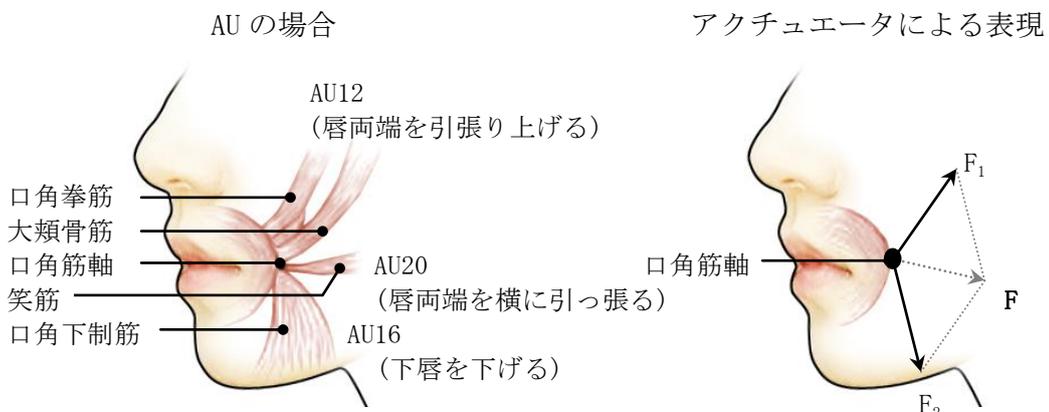


図 3-9. AU20 の動きを担当する筋肉とアクチュエータによる駆動ユニットで表現比較

要がある。AU20は2つの駆動ユニットを組み合わせた合力を用いて表現し、3つのAU（AU12(唇両端を引張り上げる), AU16(下唇を下げる), AU20(唇両端を横に引っ張る))を表現することが出来る。

(4) 動作量の不確実性

第2章に示した表2-2によると研究者によって表記方法が異なり、アニメトロニクスの制御にFACSのAUを適用することは困難である。

以上の理由のため、アニメトロニクスのための駆動ユニット分類が必要だと考えられる。

3-3. 実験1：人間の表情変化に伴う可動域の検出実験

3-3-1. 実験目的

アニメトロニクスにおけるより少ない数のアクチュエータの利用によるよりリアルな顔表情の表現のため、駆動ユニットの分類が必要であることを第3-2章で述べた。このため、人間の顔表情変化に伴う顔面の可動域の検出実験を行った。

本実験はアニメトロニクスの顔表情の表現における駆動ユニットの分類のために、顔にある40本余の表情筋による顔面の連動、組み合わせ、AUによる担当部位等の関係について明らかにすることを目的とする。

3-3-2. 実験方法

本実験は二つのイメージの変化差を分析する白黒濃度差（intensity differences）法を応用し、動画の変化差の分析を行った。

(1) 実験装置

被験者に同じ条件を付与し、安定した映像を得るために図3-10に示したように実験装置を製作した。カメラを頭に固定することで頭の動きによる誤差を最小化し、イメージの位置あわせや透視図の幾何学変換の過程（Perspective Alignment）と、同等の効果を得るようにした。

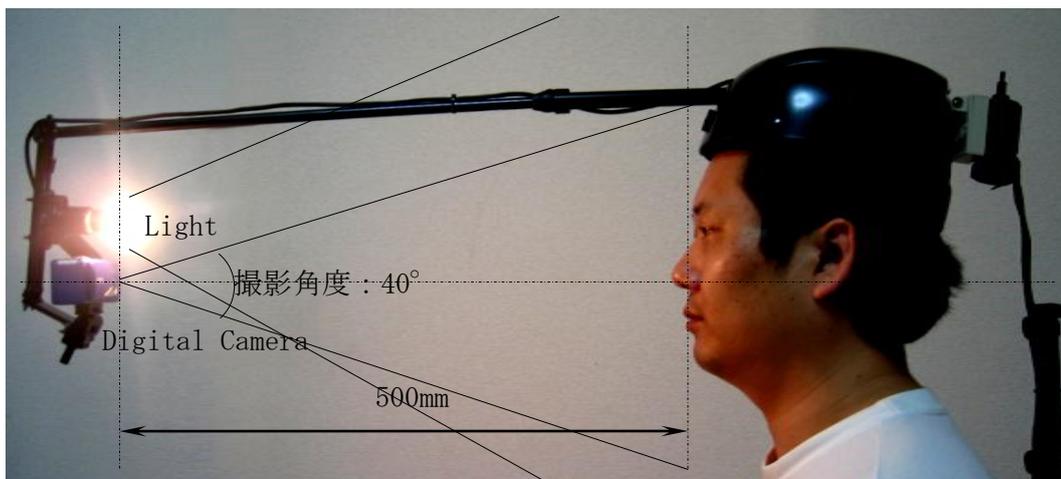


図3-10. 実験装置

デジタルカメラのレンズから被験者の顔面までの距離は 500 mm で固定し、照明は 100 V、12 W の 60 W 形の電球形蛍光灯を使って行った。

顔面の平均照度を 450 ルクスで制限し、撮影角度は 40° で固定し、映像は 12 frame/sec、画面解像度 320×240 で基本表情から各 AU に基づく表情になるまでの過程を撮影した。

(2) 被験者

被験者としては九州大学芸術工学部及び芸術工学府に在学する 25 歳～40 歳の男子学生 11 名を対象に、同じ条件下で実験を行った。

(3) 実験対象

実験の対象とした表情は、FACS の分類の中に重要だと示された 17 個の AU の表情を被験者に示すように伝えた AU の表情によっては、表現が不可能の場合あるいは片方のみ可能の場合は被験者から口頭で回答をもらった。

(4) 可動域分析ソフト

実験分析には MathWork 社の「MATLAB」を用いた。

3-3-3. 可動域の分析方法

実験の分析は白黒濃度差 (intensity differences) 法を動画が分析できるように応用して行った。

白黒濃度差 (intensity differences) 法という分析方法はイメージ整列 (Perspective Alignment) の過程として、二つのイメージの位置を合わせ、二つのイメージにおける明暗度の差異 (intensity differences) を利用し、二つのイメージの変化した領域を分析する方法である。[26] [27]

Blend と Base Image の絶対値による差を、一つのイメージの R で表現する計算数式は次のように示される。

$$R = | \text{Base} - \text{Blend} |$$

本論文では、白黒濃度差 (intensity differences) 法を動画が分析できるように応用した。連続する各フレームのイメージと基本画像との差を得るために、連続する各フレームのイメージをそれぞれ一つの合成画像 B であらわす。連続するフレームのイメージの f とフレームの数の n ($i = 1, \dots, n$) で連続する Blend Image B を下の数式のように表現することができる。

$$B = \sum_{i=1}^n f_i / n$$

つまり、差異値の R は下の数式のように B (Blend Image) と M (Base Image) の絶対値による差である。下の数式は各 Pixel に対して適用する。

$$R = \left| \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n} - M \right|$$

n 枚の連続した画像 f と基礎画像 M との濃度差の絶対値の総和を、各ピクセルに適用し集積することで、表情変化の大きさを知ることができる。

本実験の全体的な流れは図 3-11 に示す。また、同領域間の検出手順を図 3-12 に示す。

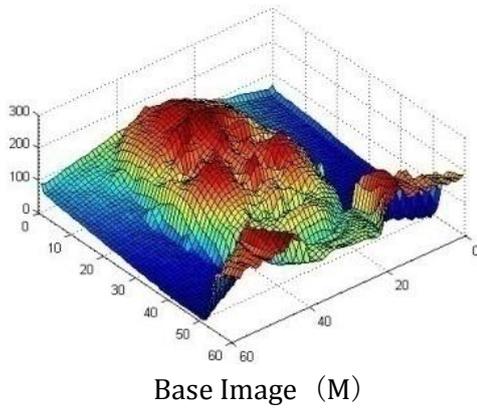


図 3-11-1. 最初の基本画像 (Base Image) の白黒濃度さ

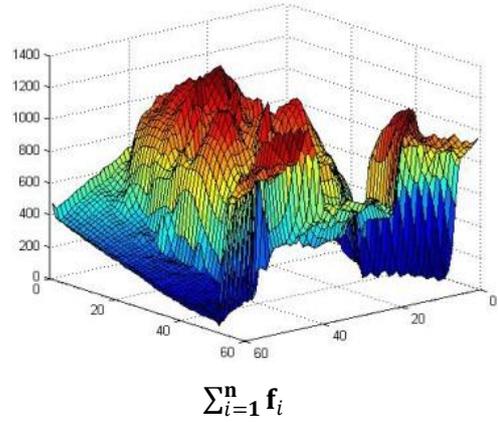


図 3-11-1. 連続する各フレームのイメージを一つに合算

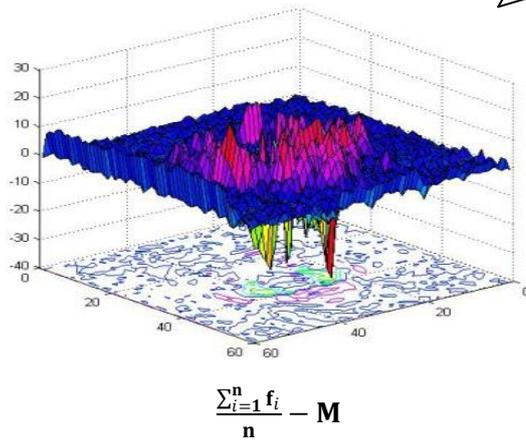


図 3-11-3. B (Blend Image) と M の引算

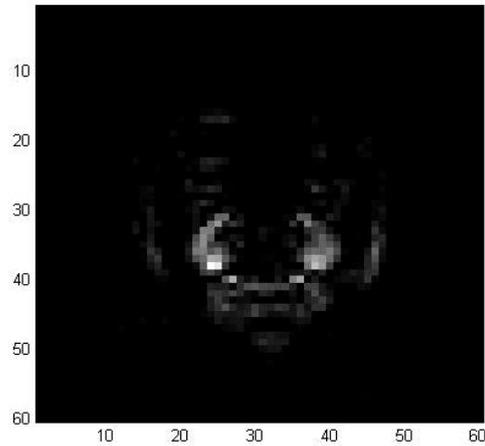


図 3-11-1. B-M の絶対値として最終の Image Sequence

図 3-11. 白黒濃度差による領域検出過程

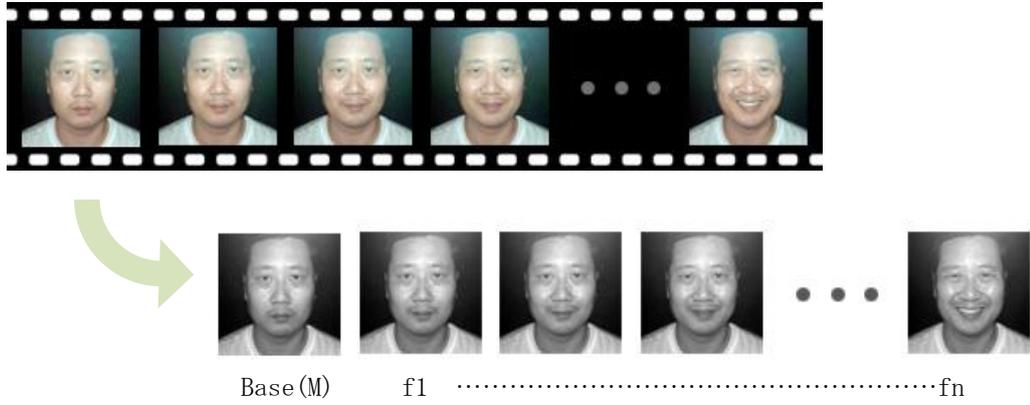
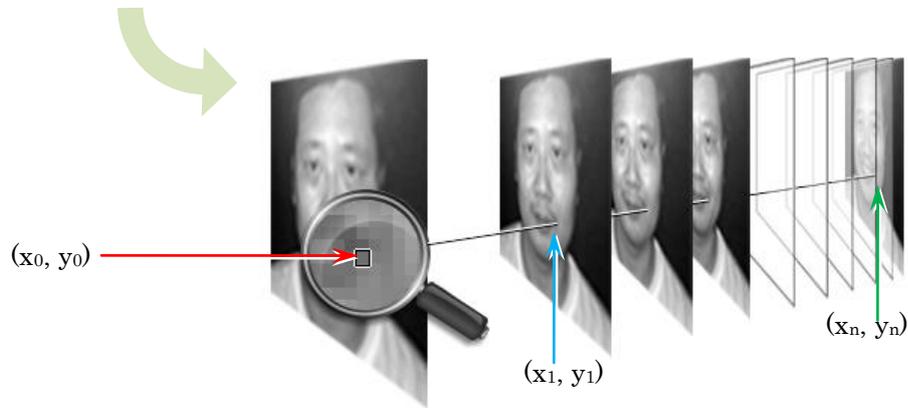


図 3-12-1. 連続した画像の各フレームのイメージを白黒静止画に変換



$$R(x, y) = \left| \frac{\sum_{i=1}^n f_i(x_n, y_n)}{n} - M(x_0, y_0) \right|$$

図 3-12-2. 同領域の各ピクセルの白黒濃度差を計算

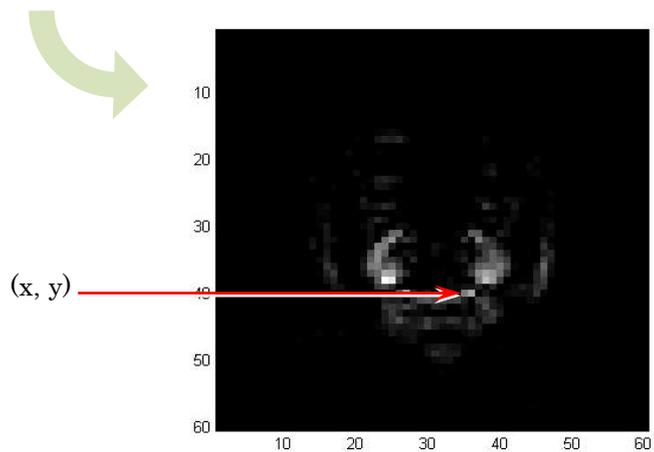


図 3-12-3. 最終の Image Sequence

図 3-12. 同領域検出手順

白黒濃度差による可動域検出過程の手順を以下に示す。

一つ目は、基本表情（初期画像）からある表情が終了するまでの時系列的变化を複数の連続した静止画像として記録する（図 3-12-1）。イメージを白黒に変換すると各イメージの pixel は位置情報（ x , y ）と明暗情報を持つようになる。

二つ目は、各フレーム間の位置情報合計と初期画像の位置情報との画素ごとの白黒濃度差を集積する（図 3-12-2）。

三つ目は、濃度差の絶対値に応じて着色すること（図 3-12-3）で表情変化にともなう動きの領域を分析する。

図 3-12 において各フレームの $x \times y$ の解像度を持つ 2D 静止画を構成するピクセルの配列情報 $f(x_n, y_n)$ は 256 段階の白黒濃度情報であらわされる（図 3-12-1）。各ピクセルごとの濃度差の絶対値を 2D イメージで表現した Image Sequence が図 3-12-3 である。

3-3-4. 実験分析の結果

白黒濃度差法で得られた各 AU 別の可動域検出の例を表 3-1 に示す。

実験結果から、指示した AU 以外の部分が動いていることにより、筋肉の連動関係があることや一つの筋肉でも多様な AU の動きがあることが分かった。また、実験しなかった筋肉の連動関係まで推定することも可能である。

AU1（眉の内側を上げる）、AU2（眉の外側を上げる）、AU4（眉を下げる）は、担当する筋肉を見るとそれぞれ内側の前頭筋、外側の前頭筋、鼻根筋と皺眉筋と分かれているが、図 3-13 に示すように AU1 と AU4 のムービングポイントはどちらも眉頭にあり、非常に近似している。また、眉頭、眉山、眉尻のムービングポイントを見ると、AU1 では眉頭の上昇が眉山と眉尻の上昇を引き起こす。AU2 ではムービングポイントである眉山の上昇が眉頭と眉尻を引き寄せると同時に上昇する。AU4 ではムービングポイントである眉頭の下降が眉山と眉尻を引き寄せると同時に下降する。特に、AU1 と AU2 を動かすことができない被験者は AU4 を動かす距離が相対的に短い。

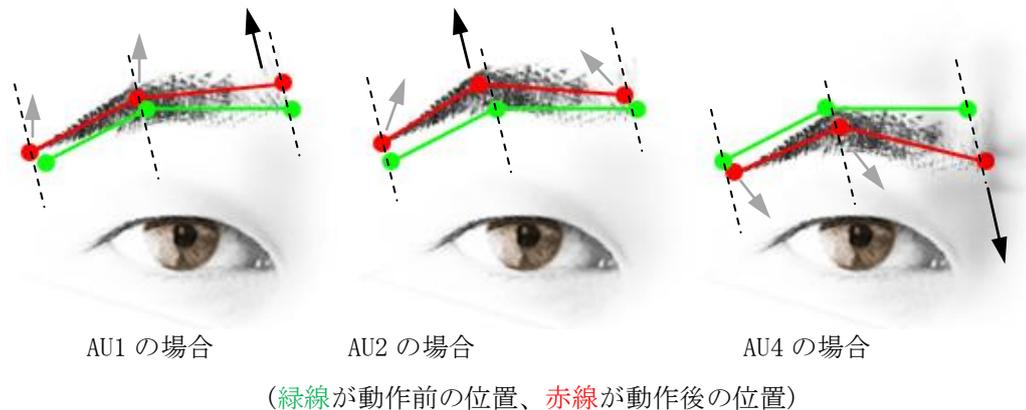


図 3-13. AU1 と AU2 と AU4 の連動関係や動作方向

AU5（上瞼を上げる）、AU41（上瞼を力なく下げる）、AU42（薄目）、AU43（瞼を閉じる）、AU44（細目にする）、AU45（まばたきをする）、AU46（ウィンクする）は、瞼の動きの強みを変化させることによって表現できる。

AU9（鼻にしわを寄せる）と AU6（頬を持ち上げる）のような表情は、筋肉の連動のため、それぞれ AU9 は AU4 と、AU6 は AU12（唇両端を引張り上げる）との連動を引き起こすが、AU4 と AU12 の表情は AU9 と AU6 と関係なく再現可能である。AU9 と AU10（上唇を上げる）の動きによって鼻頭は動かず、小鼻の部分のみ上下運動をする。

AU8（唇同士を接近させる）、AU12（唇両端を引張り上げる）、AU18（唇をすぼめる）、AU20（唇両端を横に引っ張る）、AU22（唇を突き出す）、AU23（唇を固く閉じる）、AU24（唇を押さえつける）、AU28（唇を吸い込む）等の口輪筋と関係のある表情は多様な動きをするため、ロボットやアニマトロニクスでは一つのアクチュエータでは表現が不可能である。そのため、周りにある幾つかのアクチュエータを相互に組み合わせて表現しなければならない。

表 3-1 の AU15（唇両端を下げる）では、首の全体が動いている。首を引き締めることが AU21（首を緊張させる）であり、反対に AU21 を動かすと AU15 も連動する。

AU25（顎を下げずに唇を開く）、AU26（顎を下げて唇を開く）、AU27（口を大きく開く）、AU31（歯を食いしばる）等の顎と関係ある表情はいずれも側頭筋や咬筋の動きによるものであり、表 3-1 の AU27 の表情を行う過程において類似の表情を見ることができる。

そのため、一つの駆動ユニットを利用し、動作量によって再現可能であるが AU29（下顎を突き出す）、AU30（下顎を横へずらす）は別途の駆動ユニットが必要である。

また、個人によって動かすことができない筋肉や認識調節ができない表情も多くあった。AU2（眉の外側を上げる）の場合、動かすことができる被験者より、できない被験者の方が多く、総 17 個の AU の中には片方可能を含め、平均 13% の AU を動かすことができないことがわかった。特に、被験者 C は、AU1, AU2, AU9, AU10 を含め、不可能項目が 4 個、片方可能が 1 個で約 26% を動かすことができなかった。

表3-1. 被験者による各AU別の可動域検出の例

AU 区分	Neutral	AU1	AU2	AU4	AU5	AU6	AU7	AU9	AU10	AU12	AU15	AU17	AU20	AU23	AU24	AU25	AU26	AU27
被験者 A																		
	回答		不可能						不可能		不可能				不可能			
被験者 B																		
	回答		不可能										不可能					
被験者 C																		
	回答		不可能		不可能	不可能	不可能	不可能	不可能	片方不可能								
被験者 D																		
	回答		片方不可能															
被験者 E																		
	回答	不可能									不可能							