人間との情緒的コミュニケーションを目的とした 人間形頭部ロボットの開発*

(第 1 報, 表情表出機構と視覚系の構築)

三輪 洋靖^{*1}, 高信 英明^{*2}, 高西 淳夫^{*3}

Development of a Human-like Head Robot for Emotional Communication with Human

(1 st Report, Development of Facial Expressions and Visual Sensation)

Hiroyasu MIWA, Hideaki TAKANOBU and Atsuo TAKANISHI^{*4}

^{*4} Humanoid Robotics Institute, Waseda University,
Department of Mechanical Engineering, Waseda University,
3-4-1 Ookubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555 Japan

The authors developed a human-like head robot WE-3 RV (Waseda Eye No.3 Refined V). It realized the pursuing motion in 3D space using coordinated head-eye motion with V.O. R. (Vestibular-Ocular Reflex) as well as pursuing a motion in depth direction using the angle of convergence between the two eyes. Moreover, it can express human like facial expressions using eyebrows, eyelids, lips, jaw, facial color and voice.

Key Words: Humanoid Robot, Eyes, Sensation, Facial Expression

1. 緒 言

人間をはじめとして多くの動物は、頭部に五感のすべてが存在している。すなわち、視覚・聴覚・触覚・嗅覚・味覚という五感の受容器のうち、眼(視覚)、耳(聴覚)、鼻(嗅覚)、舌(味覚)という4感が頭部に局在しており、また皮膚感覚は身体全体に分布しているので、当然のことながら頭部にも存在する。また、人間や動物の心理状態は多くの場合、顔の表情や目の動きに表れ、われわれは人と話す時、その言葉の意味のみでなく、相手の表情・視線などから多くの情報を得ている。つまり頭部は、外部環境に対しての入力と出力の両機能を兼ね備えた部位であり、人間形ロボットにおいて、頭部を入出力の両面から研究していくことが重要であると筆者らは考えている。

そこで、筆者らは人間形頭部ロボットを開発することにより、人間の知覚・認識機能を工学的視点から解明し、得られた知見をもとに新しいヒューマン

コミュニケーションシステムを開発することを目標としている。

ロボット分野において、頭部ロボットに関する研究は盛んにおこなわれている。Brooks らは眼球・眼瞼・眉・口により表情を表出する頭部ロボットの開発をおこなっており、CCD カメラを使用して、視覚情報による人間とのコミュニケーションをおこなっている⁽¹⁾。小林らは Ekman らの 14 の Action Unit⁽²⁾⁽³⁾を用いた顔ロボットを製作している。表情 19 自由度、眼球 2 自由度、首部 3 自由度の合計 24 自由度を有し、メインアクチュエータとして空気圧を用い、人間と同速度で 6 基本表情の表出を実現できる。また、眼球に搭載された CCD カメラの画像から、ニューラル・ネットワークを用いて人間の表情を認識し、前に座った人間と同じ表情を表出することなどができる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし、表情表出機能と複数の感覚機能を同時に有するロボットの研究例は少ない。そこで、筆者らは人間とのコミュニケーションを目的とし、高い表情表出能力と複数の感覚機能を同時に実装可能な人間形頭部ロボットを開発してきた。

本論文では、開発した人間形頭部ロボット WE-3RV(Waseda Eye No.3 Refined V)の表情表出部と視覚部分についての詳細を述べる。第 2 章では WE-3RV の機構について、第 3 章において制御アル

* 原稿受付 2002 年 1 月 21 日。

^{*1} 正員, 早稲田大学大学院理工学研究科(☎ 169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)。

^{*2} 正員, 工学院大学工学部(☎ 163-8677 東京都新宿区西新宿 1-24-2), 早稲田大学ヒューマノイド研究所。

^{*3} 正員, 早稲田大学理工学部, 早稲田大学ヒューマノイド研究所。

E-mail: miwa@asagi.waseda.jp

Table 1 DOF Configuration

Part	DOF
Neck	4
Eyes	4
Eyelids	6
Eyebrows	8
Lips	4
Jaw	1
Lung	1
Total	28

リズムについて、第4章でWE-3RVを用いた評価実験の結果について述べる。第5章は結言である。

2. 機 構

人間形頭部ロボットWE-3RVの写真を図1に示す。WE-3RVは表1に示すような28自由度を有している。また、表情表出機能としては図1(b)のように各機能が配置されている。以下にそれぞれについて述べる。

2.1 首部 首部は解剖・機能学的に人間の頸椎を参考にした上で、人間が通常の姿勢を取るのに十分な上部ピッチ・下部ピッチ・ヨー・ロール軸の4自由度とした(図2)。これにより、首を突き出す動作

Fig. 2 Neck and Eyelids Mechanisms

Table 2 Movable Range

Axis	Up / Right °	Down / Left °
Upper Pitch	40	30
Lower Pitch	30	40
Roll	45	45
Yaw	80	80

を可能とした。各軸の可動範囲は表2に示すとおりで、人間と同等の $160[^\circ/\text{s}]$ で運動できる。ヨー軸はハーモニックドライブ減速機を用いた直接駆動、他の3軸はDCモータとばね拮抗のワイヤ駆動方式とした。

2.2 眼球・眼瞼部 眼球部は両眼とも2自由度のジンバル構造でばね拮抗のワイヤ駆動方式とした。最高角速度は $600[^\circ/\text{s}]$ となっており、人間と同等の運動性能を有する。眼球内部にはモノクロ CCD カメラ、CS3500(東京電子工業)を搭載し、重心演算ボードおよび輝度算出ボードを用いて画像処理をおこなっている。これにより、3次元空間内の動視標追従、視標の位置計測、光強度に対する適応を実現している。

眼瞼部は図2に示したようなジュラルミン製のフレームに皮膚に似たゴム製の膜を張り付けた構造となっており、光量の調節および表情表出を担っている。上部眼瞼には開閉動作だけでなく、回転機構を付加することで、目尻の上げ下げを可能として

おり、豊かな表情表出を可能としている。上部眼瞼の回転と下部眼瞼の開閉はばね拮抗のワイヤ駆動方式、上部眼瞼の開閉はワイヤ駆動方式とし、開閉における最大角速度は人間と同等の $900[^\circ/\text{s}]$ であり、 $0.3[\text{s}]$ 以内の瞬目が可能である。

2.3 表情表出部 表情表出部は、眉・口唇・顎・顔色から構成されている。眉および口唇部には円錐状の引きばねを用い、ロボットの背面に搭載したステッピングモータによる蛇管ワイヤ駆動方式とし、また、顎部は開閉のみの1自由度でDCサーボモータによる直接駆動方式とした。引きばねの形状および顎を開閉を変化させることで、表情を表出する。

顔色には顔面に搭載されている他のセンサの動作に影響を与えないデバイスとして、薄膜・軽量であ

るEL(Electro Luminescence)シートを採用した。さらに、青色のELシートの上に直径1[mm]の円孔の空いた赤色ELシートを重ね、ELシートと表皮の間に透明なゲルをはさむことにより、赤色と青色の2色の顔色を表出可能とした。皮膚表面から5[mm]の位置でのEL発光時の性能は、赤色ELの色温度は1706[K]、輝度が17.91[cd/m²]、青色ELの色温度は12550[K]、輝度が3.09[cd/m²]である。2色の顔色を表出可能とすることで、紅潮した顔色と蒼ざめた顔色の両者を表現可能となった。ELシートは図3(a)のように額、目の周り、頬および鼻梁の4箇所に配置している。また、ロボットの皮膚は図3(b)に示すような5層構造となった。

表情の制御にはEkmanの6基本表情⁽²⁾⁽³⁾を参考にした。Ekmanの6基本表情に近くなるよう試行錯誤的に、

Fig. 3 Robot Skin's Structure

Fig. 4 Seven Basic Facial Expression

Fig. 5 System Configuration

Happiness (喜び), Anger (怒り), Disgust (嫌悪), Fear (恐れ), Sadness (悲しみ), Surprise (驚き)の6つの情動に対応する表情にNeutral (通常状態)における表情を加えた7つの基本表情パターンを設定した。そして、ロボットの表情表出パラメータである眉・口唇部の変位をNeutralと各表情の間で50段階に補間し、情動の強さと各部の動きの大きさを対応させることで、多様な表情表出を可能としている。WE-3RVでは図4で示した表情を基本表情パターンとして定義した。

2.4 全体システム 人間形頭部ロボット WE-3RVのシステム構成を図5に示す。ロボットの制御には、2台のパーソナルコンピュータ(PC/AT 互換機)を使用しており、Ethernetにて互いに接続されている。PC1(Pentium II 450[MHz], OS: Windows 98)では、画像処理ポートによってロボットの視覚情報を30[frame/s]で取得している。さらに、その情報をPC2に送信している。PC2 (Pentium III 800[MHz], OS: Windows 2000)ではPC1より送られてきた画像情報により、ロボットの駆動系の制御および表情・顔色

Fig. 6 Pursuing Motion in the Depth Direction

表出をおこなうと同時に、聴覚・嗅覚・触覚情報を取得しPC1に送信している。

3. 制御アルゴリズム

3.1 追従運動制御アルゴリズム WE-3RVでは前庭動眼反射(V.O.R. (Vestibular-Ocular Reflex))⁽⁶⁾⁽⁷⁾による頭部・眼球と首の協調運動を実現した。また、視標が一定距離(奥行方向反応距離 L_{max})以内に近づいた場合のみ、奥行方向の追従運動をおこなう。奥行方向の追従運動に関しては幅輻角を用いて視標までの距離を算出し、視標までの距離を一定(L_{const})に保つように首の制御をおこなう(図6)。動体視標追従における制御ブロック図を図7に示す。

3.2 光強度適応アルゴリズム 人間の輝度に対する調整器官のうち、眼瞼をハードウェアによって、

Fig. 8 Transition Diagram of Finite State

Fig. 7 Algorithm of Pursuing Motion

虹彩と網膜の機能をソフトウェアによって実現した。ロボットの視覚系の反応を決定する網膜における光の強さを光強度感覚とし、人間の網膜上における光の強さに基づいて、次のように定式化した。

$$B = \log \left(\alpha L S_p \left(1 + k \frac{S_i - S_s}{S_s} \right) - \log R \right) \quad (1)$$

ただし、

B: 光強度感覚

α : 比例定数 (文献(8)を参考に 0.36 とした)

L: 視標の最も明るい点の輝度

S_p : 瞳孔面積

S_i : 視標面積

S_s : 基準となる視標面積

k: 比例定数

R: 網膜の順応状態

瞳孔径は人間の虹彩の反応を参考に視標の輝度から算出する。また、ソフトウェア上に網膜の順応レベルを設定しそのレベルを決定する。

また、人間は視標をまぶしいと感じても、暗くても見づらいと感じてもともに不快を感じると言われており、ロボットの感じる不快感 D を

$$D = |B| \quad (2)$$

と定義した。そして、この不快感 D を減少させるよ

(a) Yaw Axis

(b) Pit Axis

Fig. 9 Result of Pursuing Motion

うにロボットを制御している。そのために、ロボットの状態として「正常」「眼裂を細める」「完全に閉じる」「視標を見失う」「発見」の5つの有限状態を設定し、光強度感覚によって状態の遷移を決定する。遷移関係を図8に示す。

4. 評価実験

4.1 3次元動視標追従実験 3次元空間内における動視標の追従実験をおこなった。実験は照度 300[lx]の蛍光灯下の室内でおこない、視標として直径 50[mm]、40[W]の白熱電球を使用し、視標を左右に振幅 0.5[m]、1[s]周期で動かした。視標までの距離は 500[mm]以内の視標に対して注視点距離を 200[mm]に保つようにし、500[mm]以上離れた視標に対してはニュートラルポジションで2次元平面的に追従をおこなうようにした。実験結果を図9に示す。図9では視標とカメラ注視点の誤差をあらわしたものである。これより、ヨー軸において 5[°] の範囲、ピッチ軸においては 4[°] の範囲の誤差で追従がおこなえることを確認した。

4.2 光強度適応 視標の光強度の変化に適応する実験をおこなった。実験は照度 300[lx]の蛍光灯下の室内でおこなった。視標には直径 50[mm]、40[W]の白熱電球を用い、ロボット正面 250[mm]の位置に固定した状態で、光強度の強弱を 3[s]周期で変化させた。ロボットの眼球部における視標の明るさは、明時 650[lx]、暗時 350[lx]である。そして、視標を見つ

Fig. 10 Result of Periodic Input

Table 3 Comparison of Discomfort

Part	Discomfort
Nothing	0.313
Neck	0.257
Eyelids	0.241
Neck and Eyelids	0.216

めて、何も動かさない場合、眼瞼を固定し首のみを用いる場合、首を固定し眼瞼のみを用いる場合、眼瞼および首を用いる場合の4通りにおける光強度感覚を比較した。実験結果を図10に、実験中の不快感Dの平均値を表3に示す。実験結果より、眼瞼部・首部を用いて光強度の変化に適応する場合が不快感Dを最も小さく抑えることが可能であった。以上より視標の光強度に適応することが可能であることを確認した。

4.3 表情認識率 開発したロボットの表情がどの程度正確に感情を伝えることが可能であるかを実験によって確かめた。実験は図4に示したWE-3RVの基本表情のカラー写真を男性22人(平均年齢23歳)に見せ、それぞれどのような表情に感じるかを調査した。そして、正しく認識された割合を表情認識率として計算した。実験結果を図11に示す。

その結果、Disgust, Surprise, Sadness, Angerに関しては、平均94.3[%]の認識率であり非常に高い認識率を得ることができた。一方、Fearに関しては72.7[%]と先の4表情と比較すると低い認識率にとどまった。人間の表情における表情認識率⁹⁾は日本人29人を対象としており、われわれの実験とは同一の実験条件ではないため、単純比較はできない。ロボットでは、人間の表情認識率に比べて、Fearにおいて人間よりも高い認識率を得ることができたが、Happinessに関しては79.0[%]とFearよりは高い認識率ではあるものの、人間のそれと比較すると低い認識率であり、今後の改善を必要とする結果となった。

全表情としての平均認識率は87.9[%]と高く、WE-3RVの表情表出機構の有効性を確認できた。

5. 結 言

多様な表情を表出可能な人間形頭部ロボットWE-3RV(Waseda Eye No.3 Refined V)を開発した。また、開発したロボットが3次元空間内での動視標の追従、光強度への適応が可能であることを確認した。さらに、評価実験よりロボットの表情表出機構の有効性を確認した。今後は、視覚以外の複数の感覚機能や心理モデルをロボットに組み込むことでより人間らしい動作を目指す。

謝 辞

本研究は早稲田大学ヒューマノイド研究所でおこ

Fig. 11 Result of Facial Recognition Rate

なわれた。本研究所のコンソーシアムへの参加企業に対して感謝の意を表します。また、本研究に協力していただいた早稲田大学文学部木村裕教授、理工学研究科修士の松野忠雄氏、平野哲氏、加藤烈氏、佐藤謙輔氏、梅津智彦氏、機構部製作に協力して頂いたオキノ工業株式会社の沖野晃久氏に感謝致します。

文 献

- (1) Cynthia Breazeal, Brian Scassellati: How to build robots that make friends and influence people, IROS99, pp.858-863, 1999
- (2) Paul Ekman, Wallace V.Friesen: Facial Action Coding System, Consulting Psychologists Press Inc., 1978
- (3) 工藤力, P.Ekman, W.V. Friesen; 表情分析入門 -表情に隠された意味をさぐる-, 誠心書房, 1987
- (4) 小林, 原, 他: 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), 日本ロボット学会誌学術論文, Vol.12, No.1, pp.155-163, 1994
- (5) 小林, 原: 顔ロボットにおける6基本表情の動的実時間表出, 日本ロボット学会論文集, Vol. 14, No. 5, pp.677-685, 1996
- (6) 水戸部一孝, 他: 光と音に対する頭と眼の協調運動に関する考察, 電子情報通信学会, Vol.91, pp.81-87, 1992
- (7) Lauritis V.P. and Robinson D.A.: The vestibulo-ocular reflex during human saccadic eye movements, J. Physiol., 373, pp.209-233, 1986
- (8) 池田光男; 視覚の心理物理学, 森北出版, pp.5-8, 1975
- (9) 鈴木清; 心理学 経験と行動の科学, ナカニシヤ出版, p.22, 1996