

## 第6章 記憶モデルのヒューマノイド ロボットへの応用

- 6.1 はじめに
- 6.2 情動表出ヒューマノイドロボット WE-4RII
- 6.3 記憶モデルを有する新しい心理モデルの構築
- 6.4 WE-4RII を用いた新しい心理モデルの評価と考察
- 6.5 まとめ

### 6.1 はじめに

現在、最も普及しているロボットは産業用ロボットであるが、これはあらかじめ定義されている動作しかすることができず、その定義には高い専門知識を必要とする。一方、近年、福祉やエンターテイメント等の分野において人間との共存が可能なパーソナルロボットの開発が盛んに行われている。このようなロボットには、産業用ロボットとは異なり、人間とコミュニケーションをとる機能、同一刺激に対しても自分自身の経験に基づいて行動を決定する機能、接する人間に応じて動作を変化させる機能が必要であると考えられるが、従来のロボットは、ある刺激に対する認識が一意的で、それに対応するあらかじめ定義された動作しか表出することができない。このため、自身の経験を保存し、同一刺激に対してもその経験に応じた認識を行い、行動を生成する必要がある。

第5章で述べた通り、本論文で提案した相互結合した2組のカオスニューラルネットワークを用いると、同一刺激に対しても気分および欲求に応じた記憶を想起することができ、覚醒度によるパフォーマンスの違いをニューラルネットワークの計算時間を変化させることによって容易に表現することができる。しかし、これまで新しく提案されたニューラルネットワークモデルの有効性、応用の可能性などについて実証する手段はほとんど皆無であった。そこで、本研究では、ここで構築した記憶モデルがヒューマノイドロボットの行動の多様化に関する問題に適用できるものと考え、これをニューラルネットワークの応用方法の1つとして提案した。

現在、様々なヒューマノイドロボットが研究、開発されているが、本研究で着目したのはコミュニケーション機能の開発に重点を置いている情動表出ヒューマノイド

ロボット WE-4RII (Waseda Eye No.4 Refined II) である。WE-4RII は人間の五感のうち味覚以外の視覚・聴覚・嗅覚・触覚の4感覚を有しており、ある刺激がこれらの感覚器に入力されると、搭載されている心理モデルに従って心理状態が変化していく。そして、表情・首・肺・腰・腕・ハンドを用いてそのときの情動を表出することが可能である。特に、心理モデルには、快・覚醒・確信の3成分を有する情動，快・覚醒の2成分を有する気分，食欲・安全欲求・探索欲求からなる欲求が組み込まれているため，気分の快度・食欲・覚醒度に従って変化する記憶モデルの導入に適しているといえる。本章では，WE-4RII の機械ハードウェアおよび心理モデルについて詳しく説明した後，WE-4RII に記憶モデルを適用し，その結果について考察する。

## 6.2 情動表出ヒューマノイドロボット WE-4RII

Fig.6.1 に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。WE-4RII は座高 970[mm]，重量 59.3[kg] (PC，電気回路を除く) で，Fig.6.2

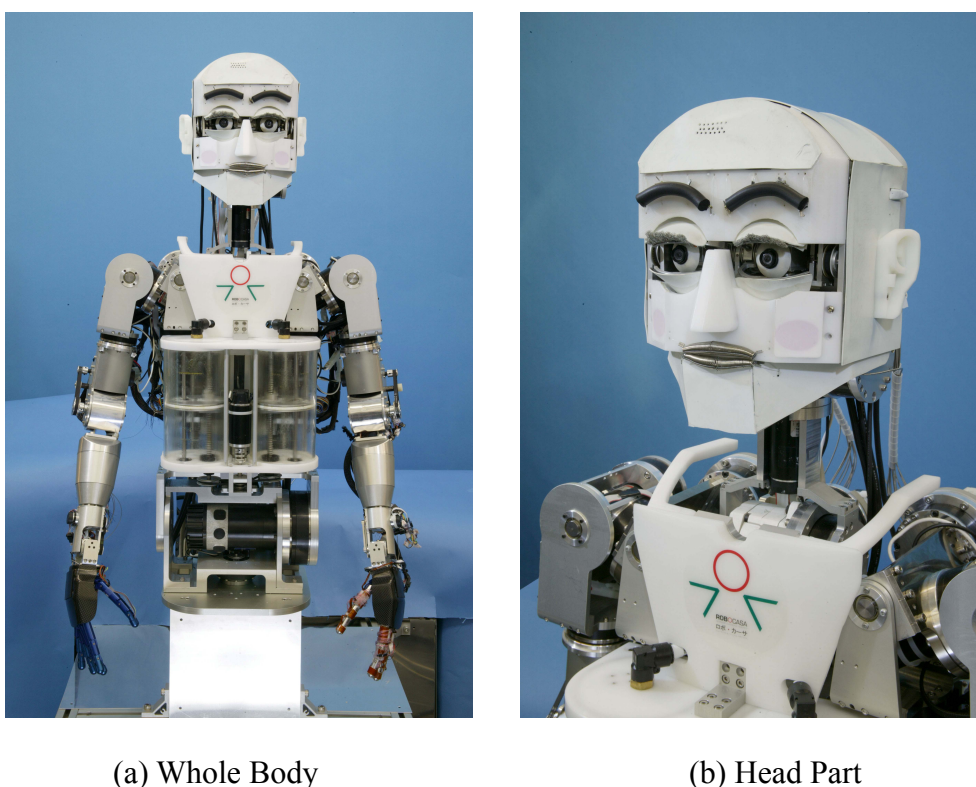


Fig.6.1 Emotion Expression Humanoid Robot WE-4RII

のように入力機能として人間の五感のうち視覚・聴覚・嗅覚・触覚の4 感覚器 (Table 6.1) を, 出力機能として 59 自由度 (Table 6.2) を有している. 以下, WE-4RII の機能と, 制御系として組み込まれている心理モデルについて詳しく述べる.

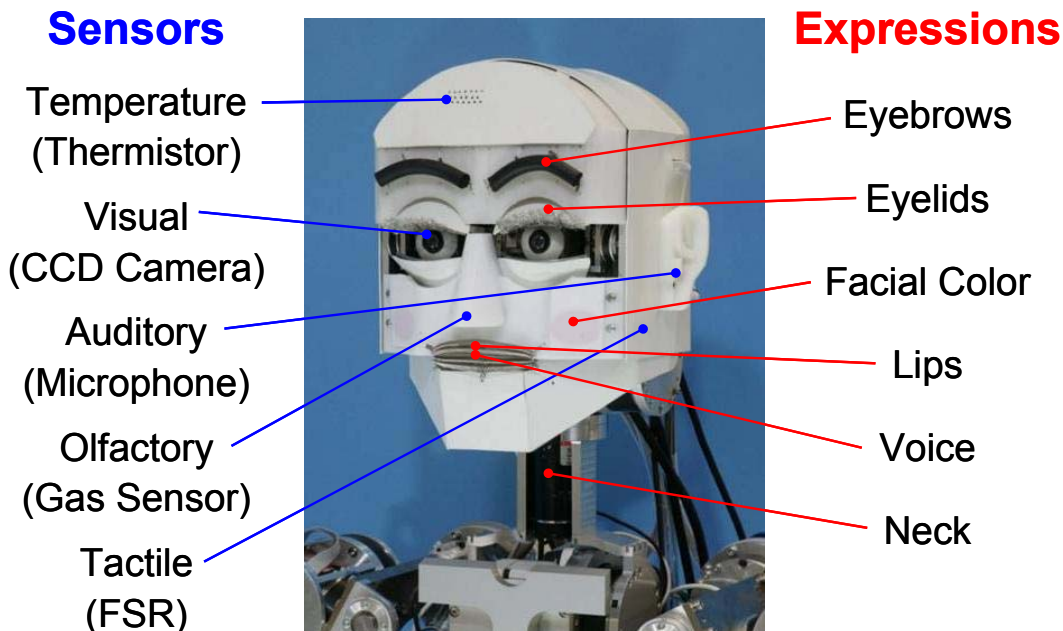


Fig.6.2 WE-4RII's Functions

Table 6.1 Sensors on WE-4RII

Part	Sensation		Device	Quantity
Head	Visual		CCD Camera	2
	Auditory		Microphone	2
	Cutaneous	Tactile	FSR	26
		Temperature	Thermistor	1
		Weight	Current Censor	2
	Olfactory		Semiconductor Gas Sensor	4
	Consumption Energy		Current Sensor	1
Hand	Cutaneous	Tactile	Contact Sensor	16
		Tactile	FSR	4
		Force	3D Force Sensor	2

Table 6.2 DOF Configuration of WE-4RII

Part	DOF
Eyebrows	8
Eyelids	6
Eyes	3
Lips	4
Jaw	1
Neck	4
Lung	1
Waist	2
Arms	18
Hand	12
Total	59

### 6.2.1 WE-4RII の入力機能

#### (1) 視覚センサ

WE-4RII は、両眼にカラーCCD カメラ（CS6550，東京電子工業）を有しており、任意の指標の色の面積および重心を計測することにより、その指標を追従することが可能である。ここでは、まず2つの CCD カメラから得られた画像がフィールド多重化回路によって1画面に統合され、フレームグラバボード（PICOLO, Euresys）によって PC に送信される。そして、PC によって再び眼球ごとの画像に分解され、任意の



Fig.6.3 Robot Vision



指標の色の面積と重心を計算する．ロボットがある色を認識している様子を Fig.6.3 に示す．現在，同時に 8 色まで認識可能で，そのときの心理状態に最適な指標を選択し，追従等の動作を行うことができる．

## (2) 聴覚センサ

左右の耳部に小型のコンデンサマイク（BL1994，ノウルズ・エレクトロニクス・ジャパン株）が搭載されており，マイクに入力された音は PC のサウンドカードに入力される．そして，FFT 解析することにより，音の大きさと左右の位相差から音源の方向を特定することができ，音の大きさがある閾値より大きくなると，音源方向に顔を向けるといった動作を行う．

## (3) 嗅覚センサ

WE-4RII の鼻部の奥には，Fig.6.4 に示したように 4 種類の半導体ガスセンサ（SB-19，SB-30，SP32，SP-AQ2，FIC Inc.）が設置されており，肺で息を吸うことにより，「アルコール」「アンモニア」「たばこの煙」の 3 種類のニオイを判別することができる．Fig.6.5 のように，SB-19 はアンモニアとたばこの煙，SB-30 と SP32 はアルコール，SP-AQ2 はアルコールとアンモニアに強く反応する．ニオイの強度があるレベルを超えると，そのニオイの好き嫌いに従って喜びや嫌悪の情動を表出することが可能である．

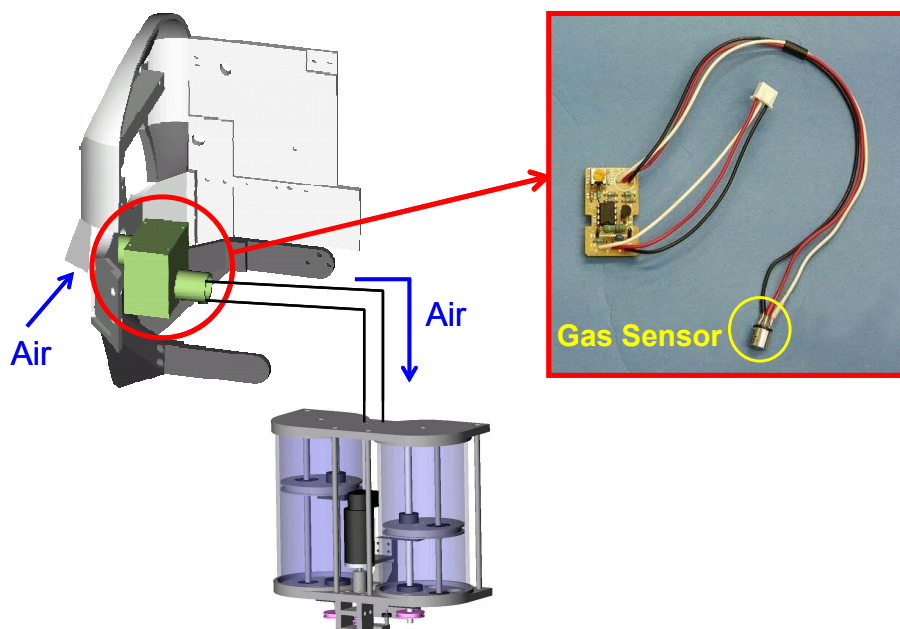


Fig.6.4 Olfactory Sensation Mechanism

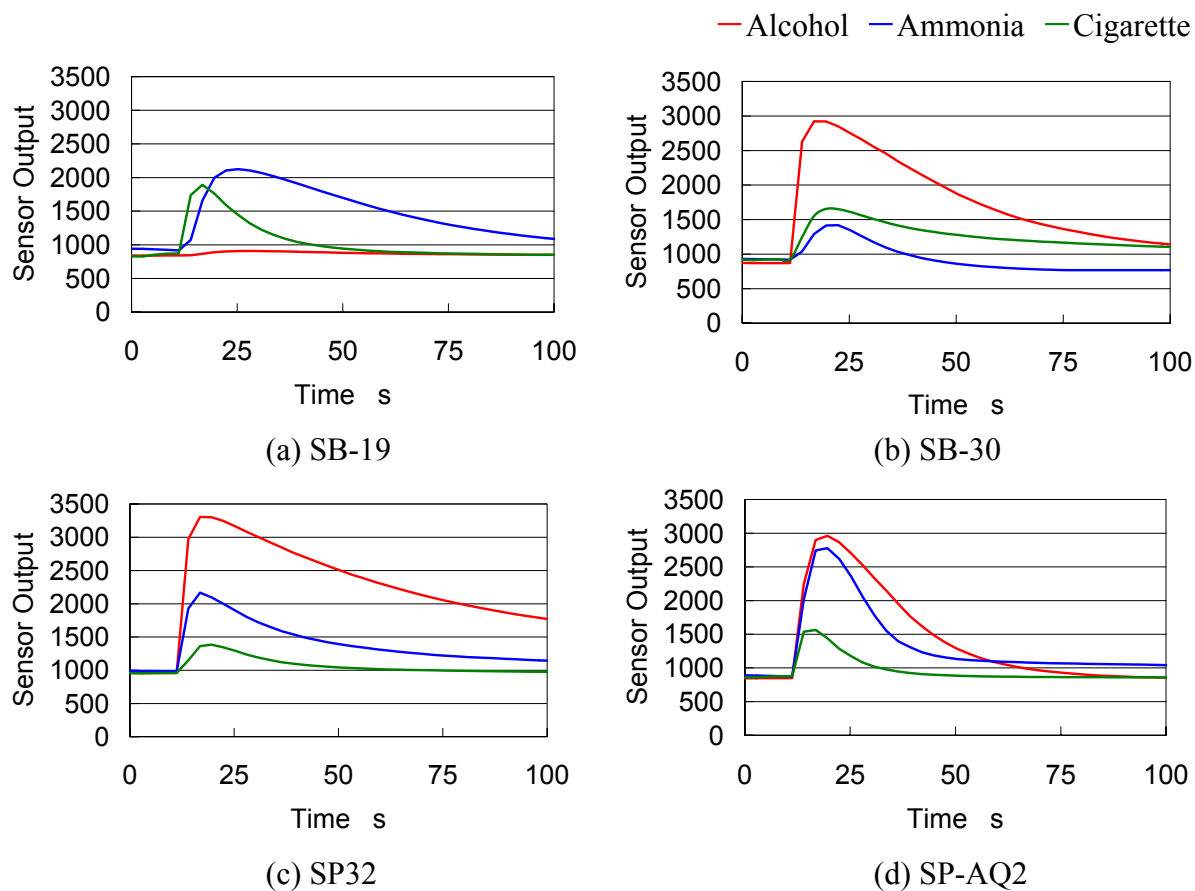


Fig.6.5 Output of Semiconductor Gas Sensors

#### (4) 触覚センサ

頭頂部・側頭部・額・頬に、Fig.6.6のようなシート状の感圧式可変抵抗であるFSR (Force Sensing Resistor) を2枚重ねて配置し、上下のFSRの出力の相関と時間変化をみることによって、「なで」「押し」「たたき」の判別を行うことが可能である。これは、上下のFSRの出力の相関は、なでたときよりも押したときの方が高く、たたいたときの方が押したときよりも反応時間が短くなることを利用している。

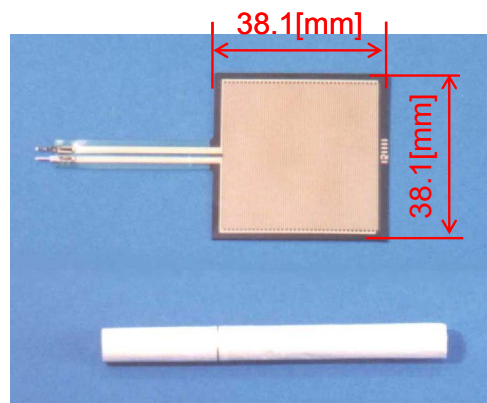


Fig.6.6 FSR

## 6.2.2 WE-4RII の出力機能

WE-4RII は、前項で挙げたセンサからの入力に対して、表情や腕・ハンドの動きなどによって、そのときの情動を表出したり様々な動作をすることができる。ここでは、表情・眼・首・肺・腰・腕・ハンドの各機構について詳しく説明する。

### (1) 表情表出機構

WE-4RII は、眉・口唇・顎・顔色・声を用いて、表情を表出することができる[36]。まず、眉には伸縮性の高いスポンジを採用しており、Fig.6.7 のように左右それぞれに4本のワイヤを取り付けモータで駆動することによって、上下に変動する。Fig.6.8 に眉の形状の例を示す。

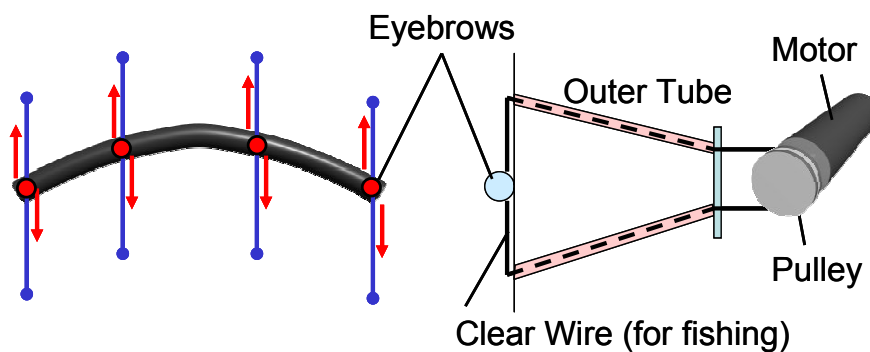


Fig.6.7 Eyebrows Mechanism

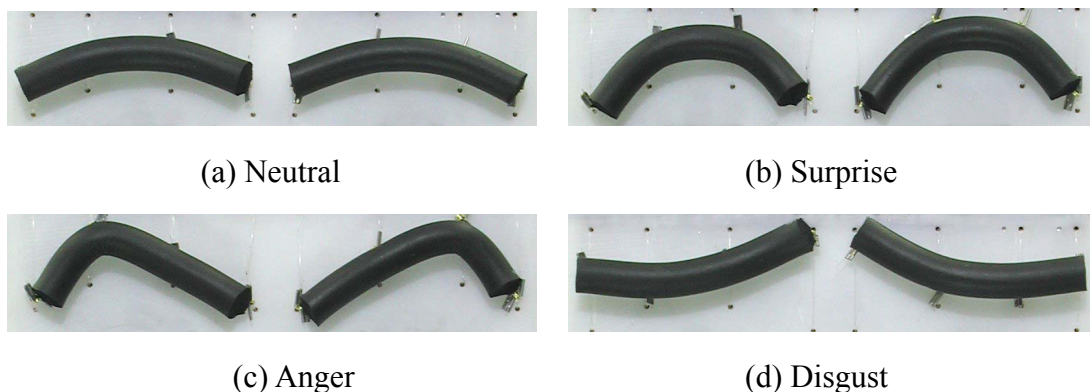


Fig.6.8 Example Shape of Eyebrows

また、口唇部には紡錘形のバネを用いており、Fig.6.9のように上下それぞれのバネの端にワイヤを取り付け、左右から引っ張ることによって形状を変化させる。さらに、顎の動きを加えることにより、開閉口も可能である。

顔色は、頬部に赤色と青色のEL（Electro Luminescence）シートを2枚重ねて組み込むことによって表出する。頬には触覚センサであるFSRも配置しているため、Fig.6.10のような多層構造となっている。また、下顎の内側には小型スピーカーを有しており、合成音生成ソフト（LaLaVoice 2001, ㈱東芝）を用いて生成された合成音声が発話可能である。

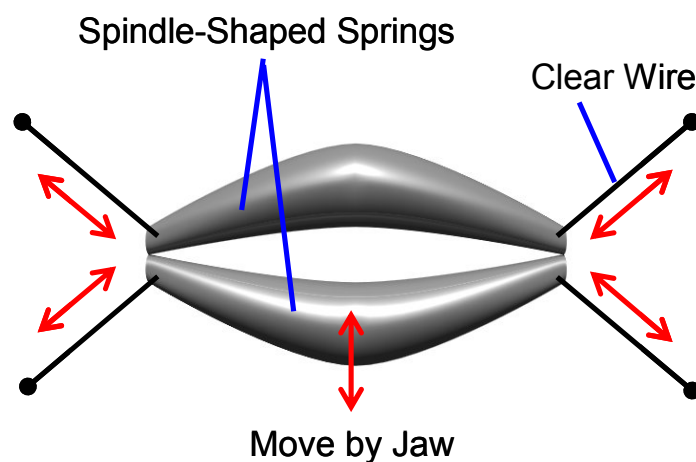


Fig.6.9 Eyebrows Mechanism

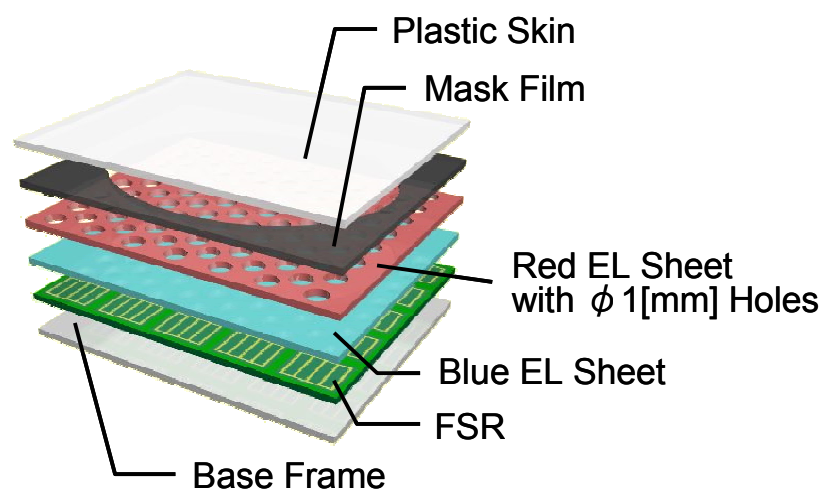


Fig.6.10 Robot Skin on Cheek

## (2) 眼球・眼瞼機構

Fig.6.11 のように、眼球と眼瞼が一体となっており、ベルト駆動とワイヤ駆動の両者を用いることによって、非常に小型で軽量の機構となっている。この機構では、眼球の上下運動と眼瞼の開閉運動を機械的に同期させているため、眼球と眼瞼の強調動作が可能である。

各機構について見てみると、眼球部は、左右のヨー軸および左右共通のピッチ軸の3自由度で構成されており、人間と同等の最高角速度  $600[\text{deg/s}]$  で動かすことができる。このヨー軸は DC モーターばね拮抗のワイヤ駆動方式、ピッチ軸は DC モータとハーモニックドライブ減速機を用いたベルト駆動方式を採用している。

また、眼瞼部に関しては、眼球ユニットのジュラルミン製の眼瞼フレームにゴム製の皮膚を貼り付けることによって、多様な眼瞼の動きを表出することができる。これは、左右それぞれ3自由度有しており、上下の開閉運動は DC モータによるベルト駆動方式、上部の回転運動は直接駆動方式を用いている。開閉運動の最大角速度は人間と同程度の  $900[\text{deg/s}]$  で、 $0.3[\text{s}]$  以内の瞬目も可能である。

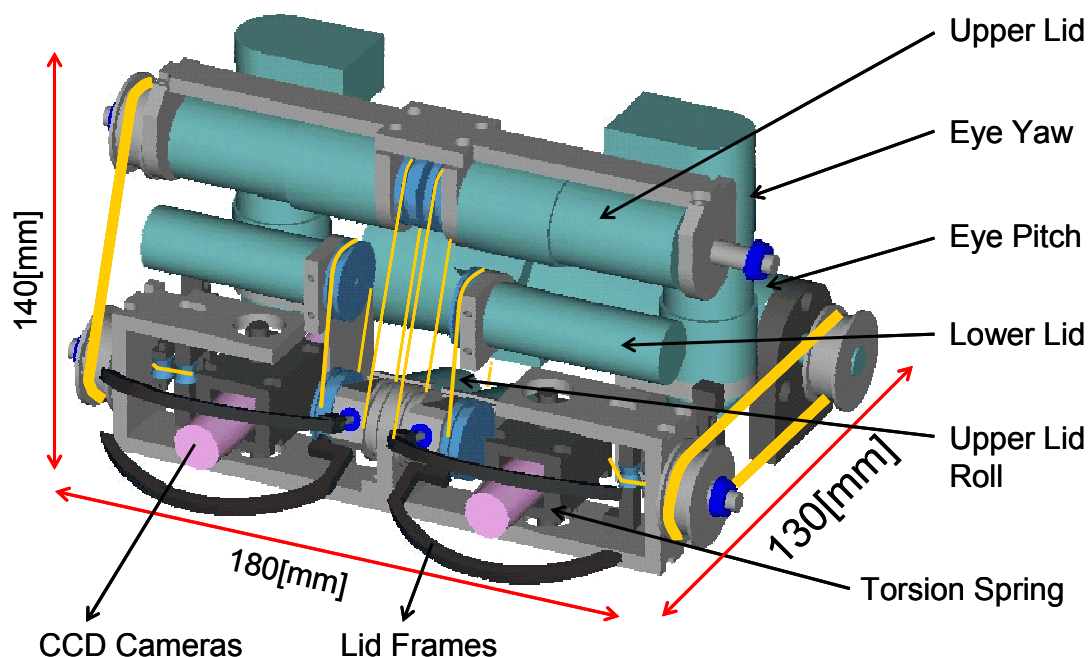


Fig.6.11 Robot Skin on Cheek

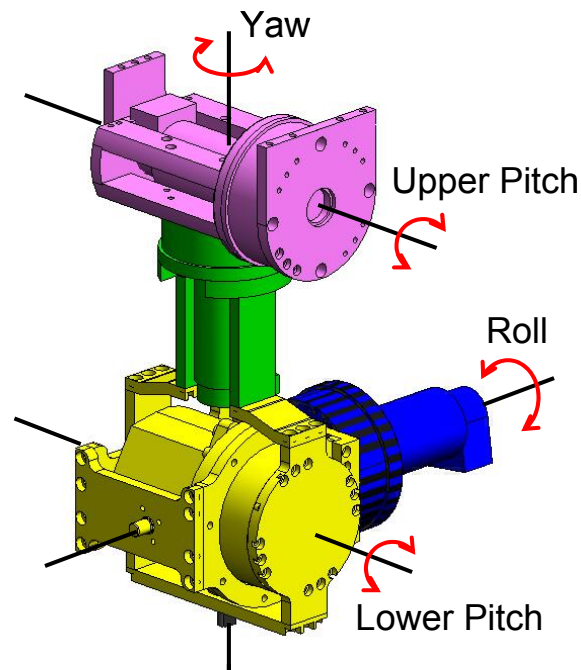


Fig.6.12 Neck Mechanism

### (3) 首機構

首部の自由度は、Fig.6.12 に示したように上部ピッチ・下部ピッチ・ヨー・ロール軸の4自由度で、下部ピッチ軸はACモータとハーモニックドライブ減速機、他の軸はDCモータとハーモニックドライブ減速機を用いた直接駆動方式によって駆動する。ピッチ軸に2自由度有しているため、顎を突き出す動作もすることができる。これも人間と同等の160[deg/s]の動きが可能である。

### (4) 肺・腰機構

まず、肺にはFig.6.13のようにシリンダを用いており、DCモータでボールねじを駆動することによってシリンダ内のピストンを上下させる。この肺と鼻がチューブで接続されているため、空気を肺内に取り込むことで鼻の奥に設置されている嗅覚センサが反応し、ニオイの判別が可能である。また、肺の動きを見ることができるので、驚くとはっと息を止めるなど情動表出の役割も果たす。

さらに、Fig.6.14にはWE-4RIIの腰機構を示した。ヨー軸とピッチ軸で構成されており、ピッチ軸はハーモニックドライブ減速機を用いた直接駆動、ヨー軸はDCモータとハーモニックドライブ減速機を用いたベルト駆動となっている。



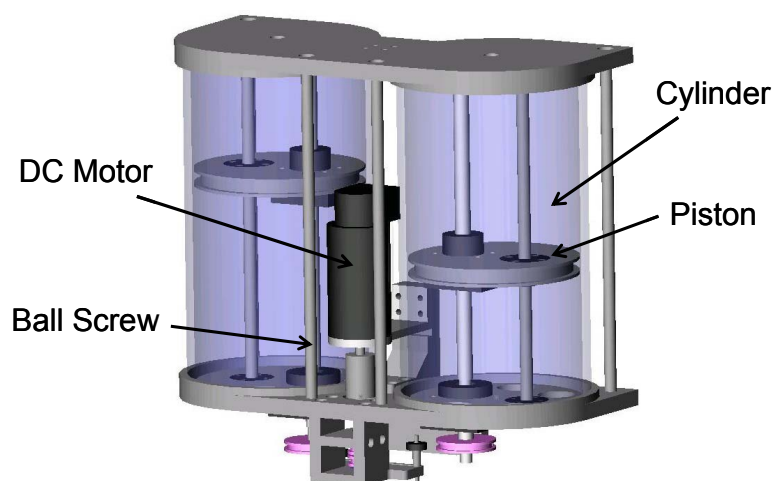


Fig.6.13 Lungs Mechanism

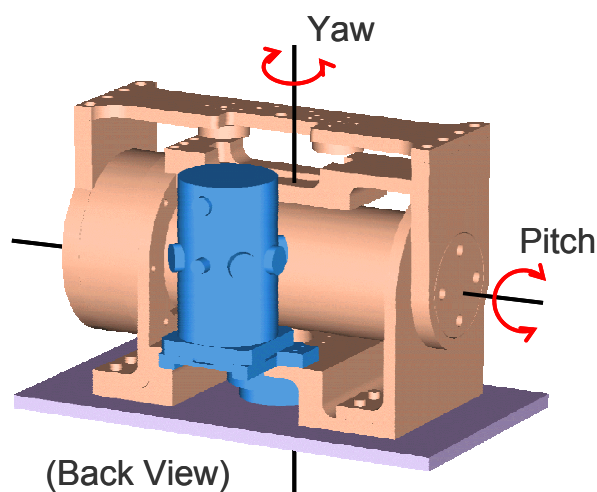


Fig.6.14 Waist Mechanism

### (5) 腕機構

心理志向型9自由度ロボットアームを Fig.6.15 に示す. 人間の腕は肩3自由度, 肘1自由度, 手首3自由度の7自由度であると言われているが, 肩関節自体も上下・前後に動かすことによって, 肩をいからせたりすくめたりすることができ, 多彩な情動表出を行っている. そこで, WE-4RII には肩付け根に2自由度を加え, 肩付け根2自由度, 肩3自由度, 肘1自由度, 手首3自由度の合計9自由度を有する心理志向型9自由度ロボットアームを搭載している[37].

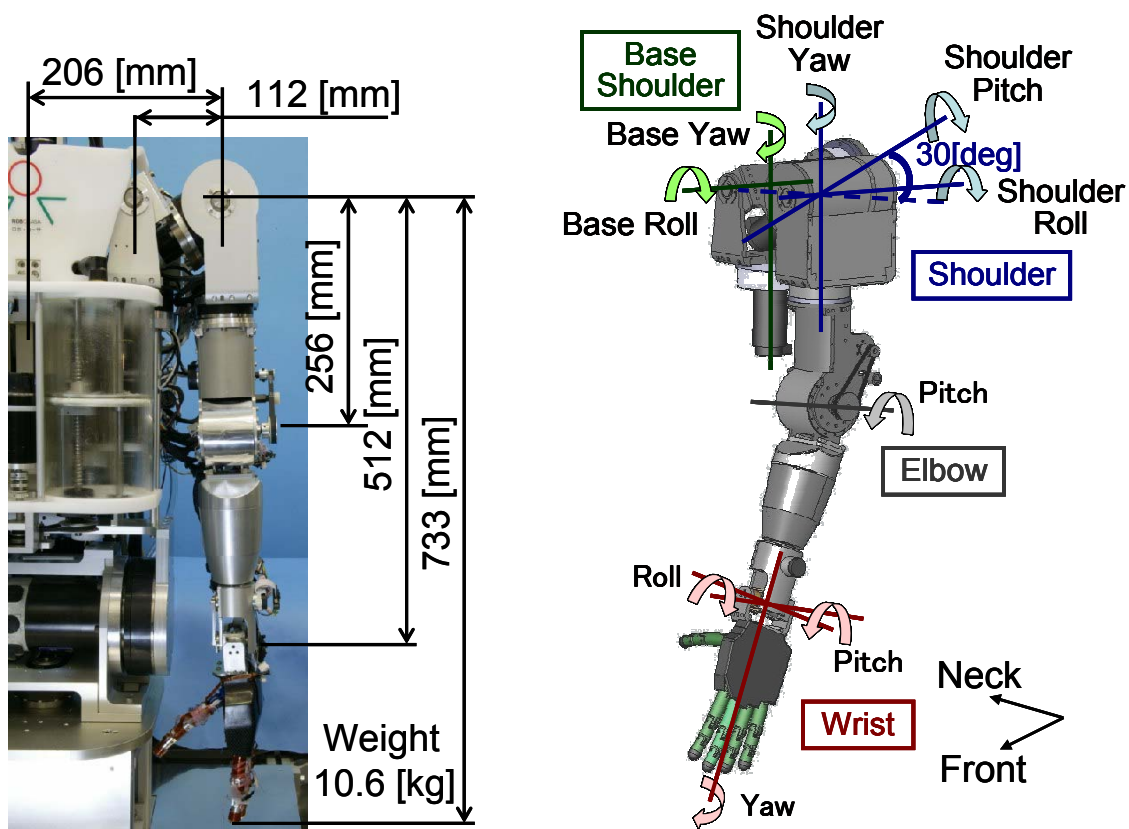


Fig.6.15 Emotion Expression 9-DOF Humanoid Robot Arm

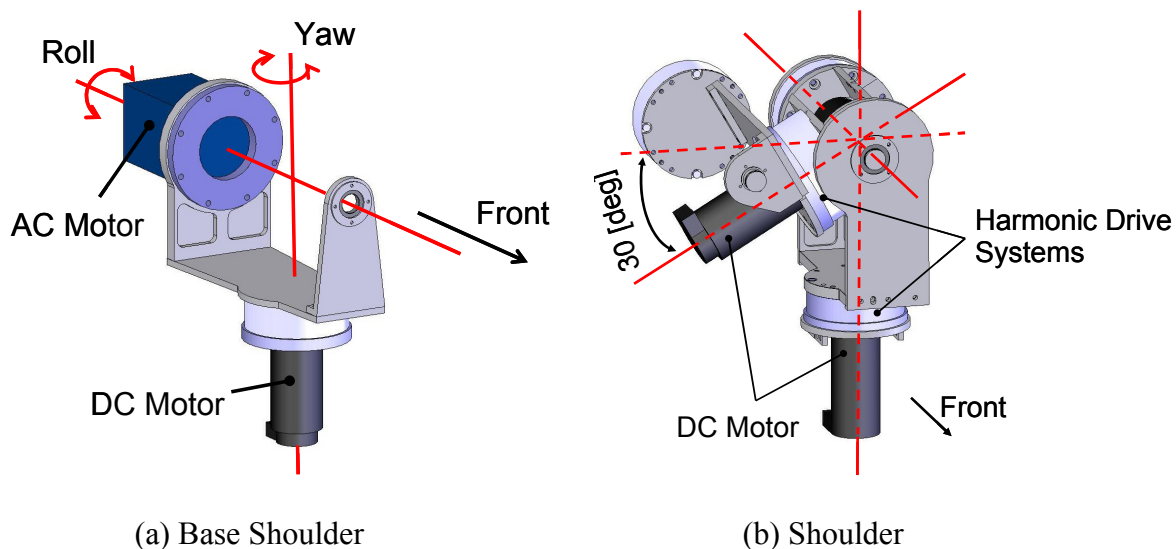


Fig.6.16 Base Shoulder and Shoulder Mechanisms

まず、肩付け根部は Fig.6.16(a)のようにヨー軸とロール軸を有しており、これらは直交している。ヨー軸は DC モータとハーモニックドライブシステムによる直接駆動方式、ロール軸は大きなトルクを必要とするため、AC モータとハーモニックドライブシステムによる直接駆動方式を採用している。

また、肩部はピッチ・ロール・ヨー軸の3自由度からなり、いずれも DC モータとハーモニックドライブシステムによる直接駆動方式を用いている。ここで、注意しなければならないのが特異点問題である。これらの3軸が1点で直交する場合、腕を横に水平に伸ばした姿勢が特異点となってしまうが、これは日常生活において頻繁にとる姿勢であるため、特異点にならないように設計する必要がある。そこで、Fig.6.16(b)に示したように、ピッチ軸を30度傾けて配置することにより、この姿勢での特異点を回避した。

次に、肘は1自由度だが、人間の場合可動範囲が非常に広い。そこで、ハーモニックドライブシステムを肘部に、DC モータを駆動軸と平行に配置し、両者をタイミングベルトで接続したベルト駆動方式をとっている。

最後に、手首部は Fig.6.17のように、ピッチ・ロール・ヨー軸の3軸が1点で直交した設計になっている。3軸とも DC モータと小型ハーモニックドライブシステムを用いており、ロール軸とヨー軸は直接駆動方式によって駆動する。しかし、ピッチ軸はモータを軸に平行に配置し、両者をリンクにより結合することによって、省スペースおよびバックラッシュレスな駆動が可能である。

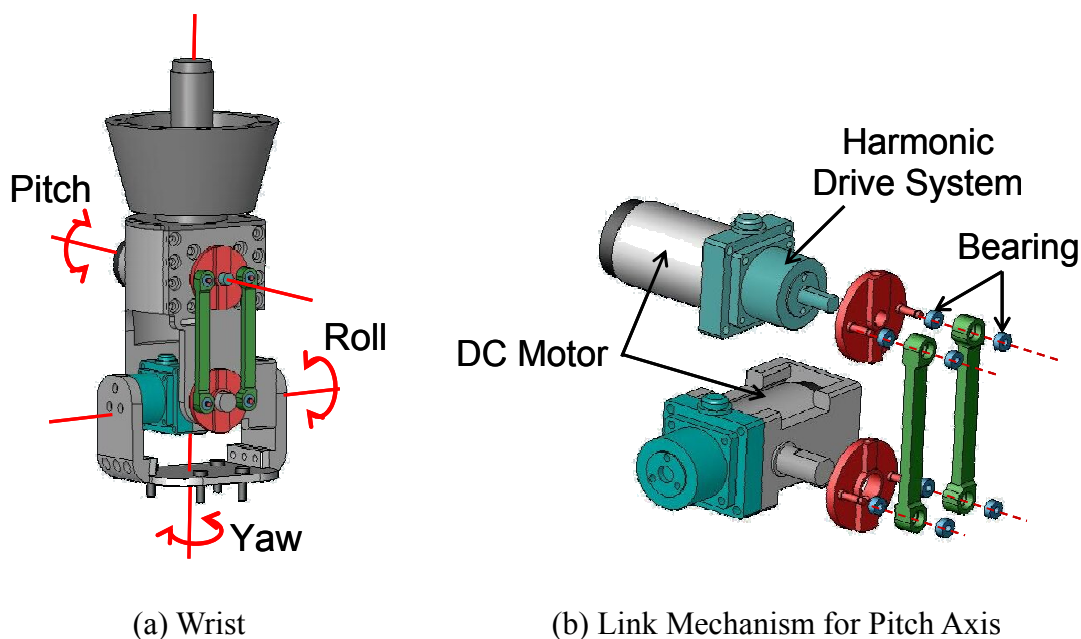


Fig.6.17 List Mechanism

## (6) ハンド機構

把持，触覚，情動表出の3機能を有するヒューマノイドロボットハンド RCH-1 を Fig.6.18 に示す．これは，聖アンナ大学院大学の ARTS Lab.で設計・開発されたもので，各指は1自由度の能動自由度と2自由度の受動自由度を有し，それぞれ独立に屈伸可能である[39]．さらに，親指には内転・外転の1自由度があるため，様々な形状の物体を把持することができる．

まず，曲げ伸ばしに関しては，指先に固定したワイヤを Fig.6.19 のようにプーリとばねが配置されている関節に通し，アクチュエータに接続することで駆動している．各関節のプーリは独立して回転するため，ワイヤが引っ張られると物体の形状に倣って指が曲がり，緩められるとバネの力によって指が伸びる[77]．また，アクチュエータには遊星ギア付きの DC モータを用いており，Fig.6.20 に示したように人間の筋肉と同様の前腕上部に内蔵されている．

一方，親指の内転・外転駆動には，Fig.6.21 のように小型の遊星ギア付き DC モータと歯車による直接駆動方式を採用しており，この駆動部は全て掌内に配置している．

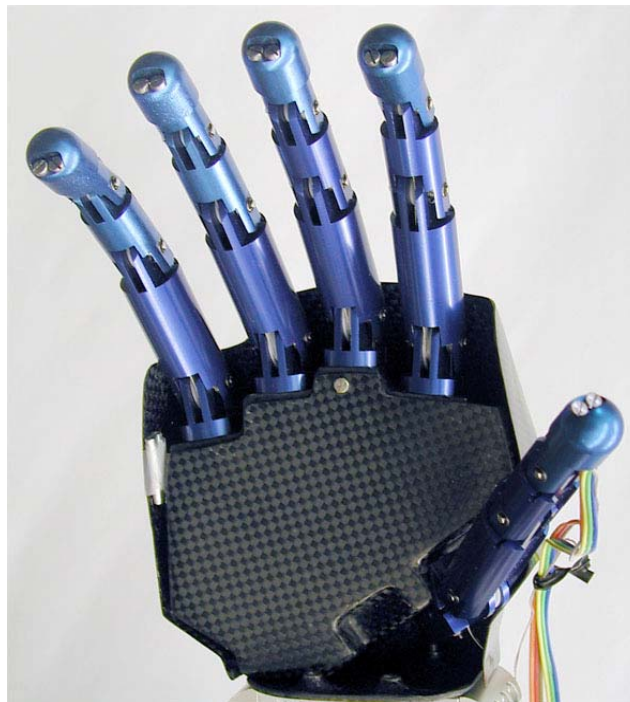


Fig.6.18 Humanoid Robot Hand RCH-1

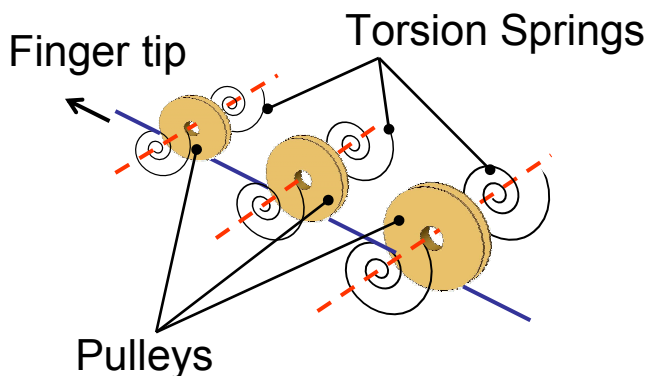


Fig. 6.19 Finger Mechanism of RCH-1

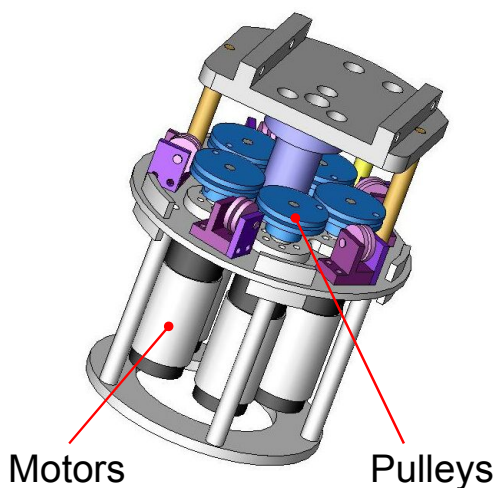


Fig.6.20 Finger Actuators

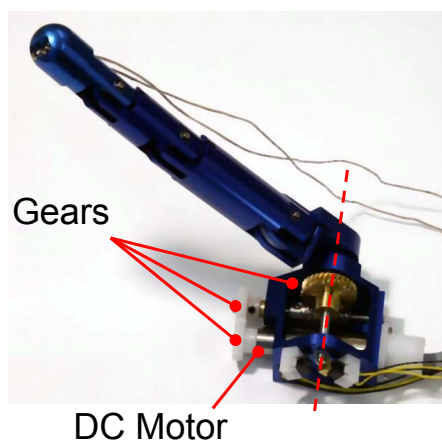


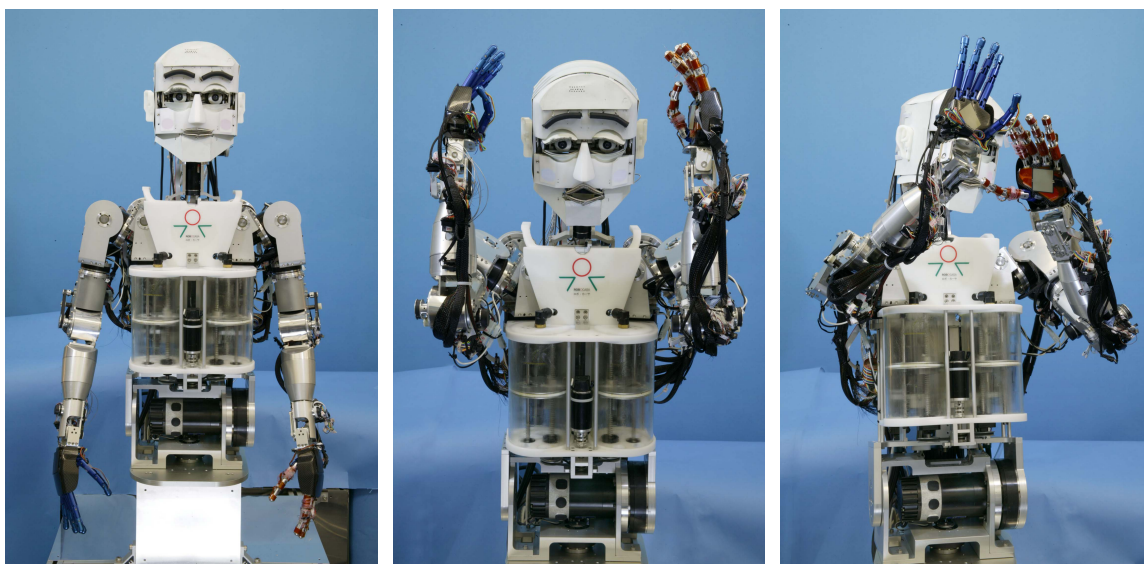
Fig.6.21 Addtion / Abduction Mechanism

また、RCH-1は、on/off コンタクトセンサ・FSR・3D Force センサの3種類のセンサを用いた触覚機能を有している。まず、on/off コンタクトセンサは薄膜状のスイッチで、指の腹15箇所、掌1箇所の計16箇所に配置されている。FSRは、頭部で使用したものと同様に2枚重ねて手の甲に貼付することで、「なで」「押し」「たたき」の判別を行うことができる。最後の3D Force センサは、RCH-1の親指と人差し指の指先に内蔵されており、ロボットが物体に接触したときの力を、3軸方向に計測可能である。



(7) 情動表出

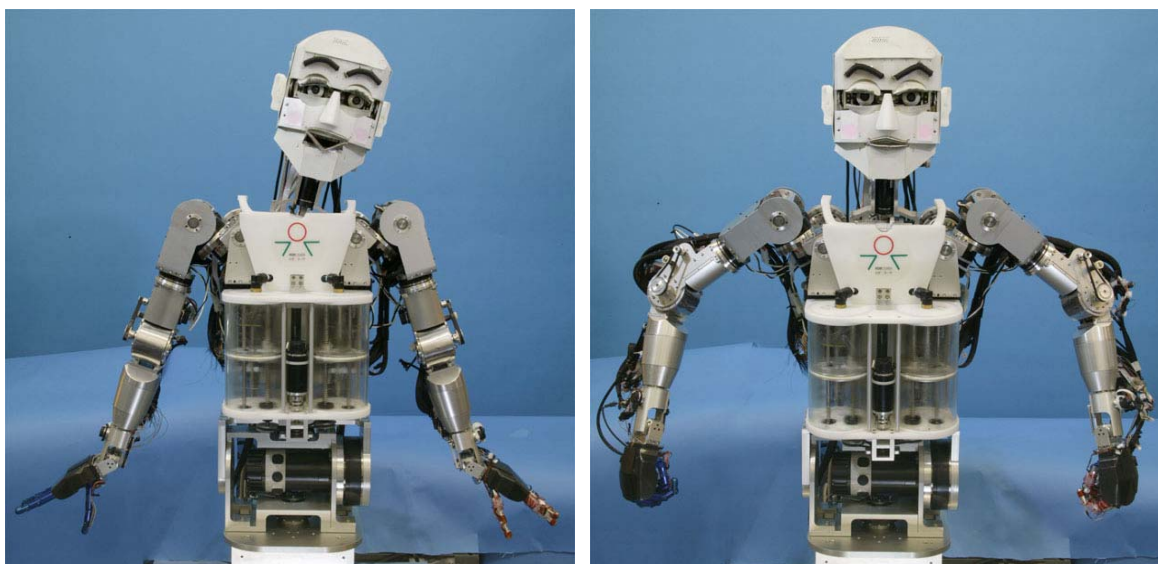
WE-4RII は、表情・首・腰・腕・手の動きなどを用いて様々な情動を表出することができる[38]。その様子を Fig.6.22 に示す。情動によって腰や首、腕の動作速度を変化させることにより、より効果的な表出が可能となっている。



(a) Neutral

(b) Fear

(c) Disgust

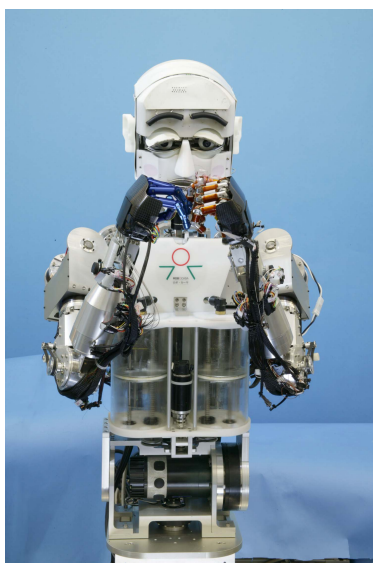


(d) Happiness

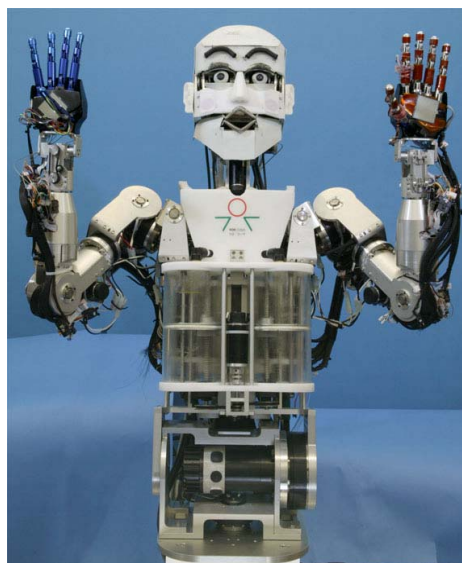
(e) Anger

Fig.6.22 Emotional Expression of WE-4RII





(f) Sadness



(g) Surprise

Fig.6.22 Emotional Expression of WE-4RII

### 6.2.3 従来の心理モデル

人間の脳は、Fig.6.23 のように脊髄・脳幹，大脳辺縁系，大脳新皮質の3層からなっており，それぞれ，反射，情動，知能の役割を果たしていると考えられている．このうち反射および知能層に関しては，すでにロボットの制御系に組み込まれているが，Fig.6.24 のように情動層まで実現した制御系はほとんど存在しない．

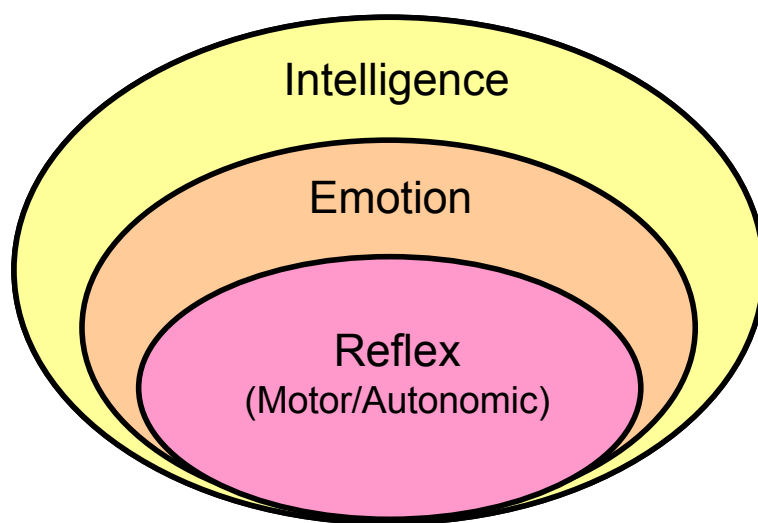


Fig.6.23 Structure of Human Brain

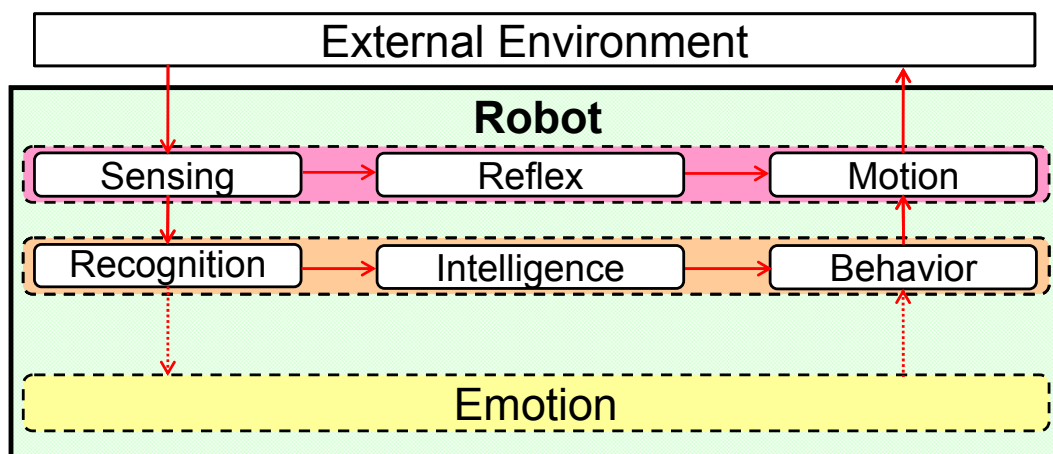


Fig.6.24 Robot Control System with Structure of Human Brain

そこで、情動層を含む制御系として新たに心理モデルが開発された。Fig.6.25 に WE-4RII に組み込まれている心理モデルを示す。ここでは、外界からある刺激が入力されると、ロボットはその刺激を認識し情動層に伝える。情動層では、まず感受個性によって刺激がロボットの心理状態にどのように作用するか決定され、それに従ってロボットの心理状態を変化させる。その心理状態をどの程度外界へ出力するかを決めるのが表出個性で、それに従ってロボットはある行動を表出する。特に、ロボットの心理状態は、感情・気分・意識・欲求の4つの要素によって構成されている。人間の心理状態の遷移には、短時間で変化する情動と比較的長時間にわたる弱い変化である気分があることが知られており、前者を感情、後者を気分として表現している。また、外界には複数の刺激が存在するが、ロボットがどの刺激に対して行動しているのか明確でなければ、その行動の意味を正確に伝えることはできない。そこで、意識モデルによって、どの刺激に意識を向け行動するのかを決定している。欲求モデルは、ロボットから人間への自発的な行動を実現するために必要である。以下、情動層の詳細を示す。

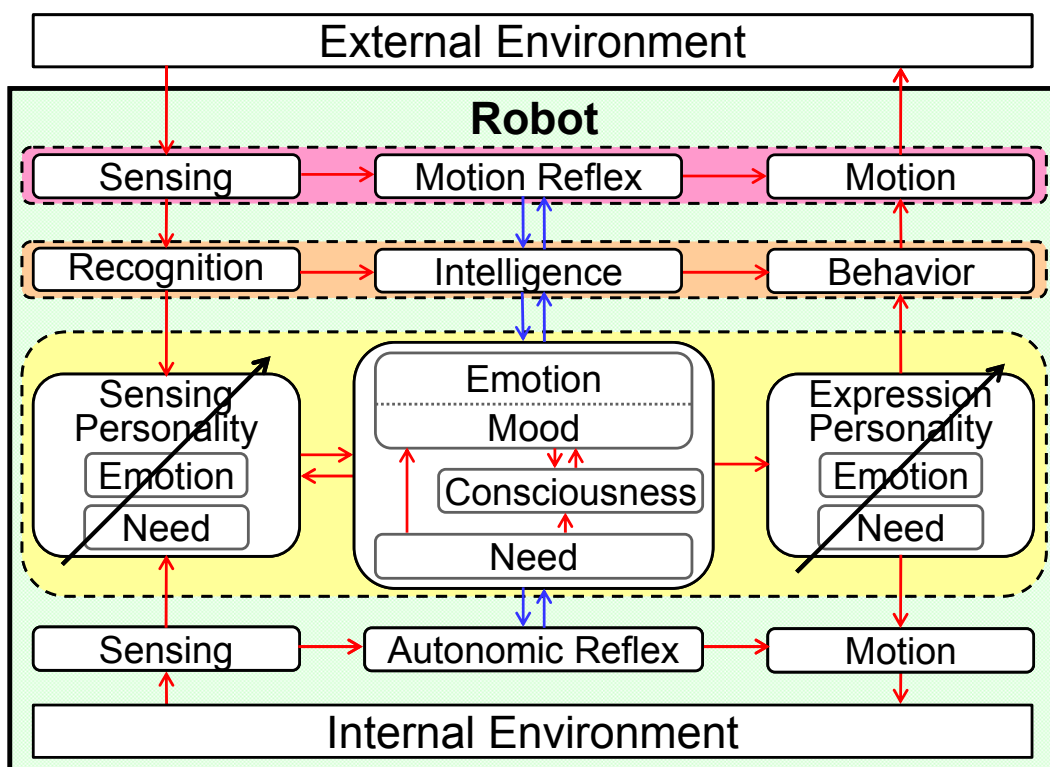


Fig.6.25 Mental Model of WE-4RII

Table 6.3 Example of Sensing personality Table

Stimulus	Sensation	P <sub>a</sub>	P <sub>p</sub>	P <sub>c</sub>	
Visual	Loose Sight of the Target	0	-	-	
	Dazzling Light	+	-	0	
	Target is Near	0	-	+	
	Target Color	1	+	+	+
		2	+	-	+
:		0	0	0	
8		0	0	0	
Tactile	Pushed	+	-	0	
	Stroked	+	+	+	
	Hit	+	-	-	
Auditory	Loud Sound	+	-	0	
Temperature	Cold	0	+	-	
	Hot	0	-	0	
Olfactory	Alcohol	+	+	+	
	Ammonia	+	-	0	
	Smoke	+	-	+	
	No sense	+	-	0	

### (1) パーソナリティ

ロボットが刺激をどのように感じるか、行動をどのように表出するかに関して、人間と同じように多様性をもたせるため、感情への入力に作用する感受個性と感情からの出力に作用する表出個性の2つのパーソナリティを有している。特に、感受個性はTable 6.3のようなSPT (Sensing Personal Table) によって表わされ、各刺激が感情の3成分にどのような影響を与えるか定義することができる。

### (2) 感情

ここでは、Ekman が提案した怒り・喜び・驚き・悲しみ・嫌悪・恐怖の6基本感情[78][79]に通常状態を加えた7つの感情を表現するため、快-不快、覚醒-不覚醒、確信-不確信の3次元からなる心理空間が定義されている[40]。Fig.6.26に3次元心理空間を示す。ここで、情動ベクトル (Emotion Vector)  $\mathbf{E}$  はロボットの心理状態を表わしており、ロボットはこの情動ベクトル  $\mathbf{E}$  が指している感情を表出する。 $E_p$ ,  $E_a$ ,  $E_c$  はそれぞれ情動の快度、覚醒度、確信度である。

$$\mathbf{E} = (E_p, E_a, E_c) \quad (6.1)$$

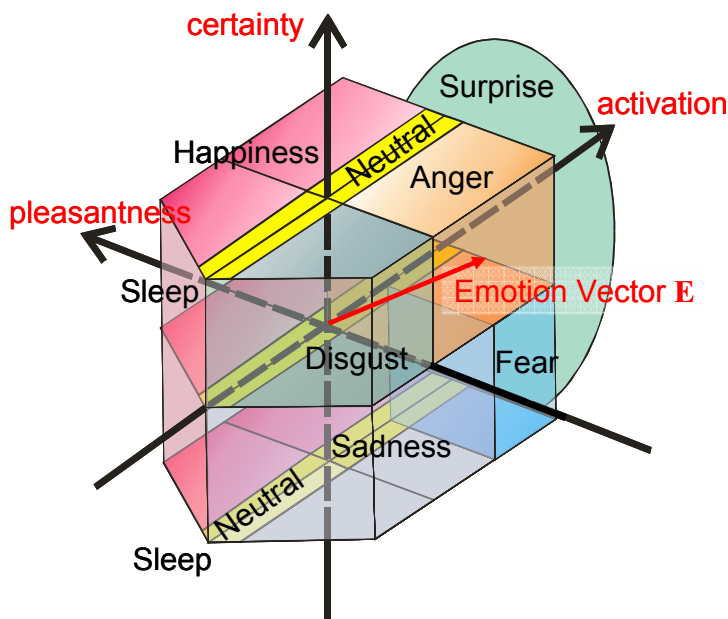


Fig.6.26 3D Mental Space

情動ベクトル  $\mathbf{E}$  は刺激に対する過渡応答の多様性を表わすことができるよう、式(6.2)のような情動方程式に従って変化する。

$$I_E \ddot{\mathbf{E}} + V_E \dot{\mathbf{E}} + E_E \mathbf{E} = A_E \tag{6.2}$$

- $E$ : 情動ベクトル (Emotion Vector)
- $I_E$ : 情動慣性行列 (Emotional Inertia Matrix)
- $V_E$ : 情動粘性行列 (Emotional Viscosity Matrix)
- $E_E$ : 情動弾性行列 (Emotional Elasticity Matrix)
- $A_E$ : 情動評価ベクトル (Emotional Appraisal Vector)

情動係数行列  $\mathbf{I}_E$ ,  $\mathbf{V}_E$ ,  $\mathbf{E}_E$  は  $3 \times 3$  行列で、力学系における慣性，粘性，弾性を表している。また，情動評価ベクトル  $\mathbf{A}_E$  は，ロボットの情動ベクトルに対する刺激の作用量を表している。

### (3) 気分

人間の心理状態の遷移には，短時間の変化である情動と比較的長時間にわたる弱い変化である気分があり，気分と情動とは密接な関係にあるといわれている[80]。そこで，快度と覚醒度からなる気分ベクトル (Mood Vector)  $\mathbf{M}$  が定義されている。

$$M = (M_p, M_a, 0) \tag{6.3}$$

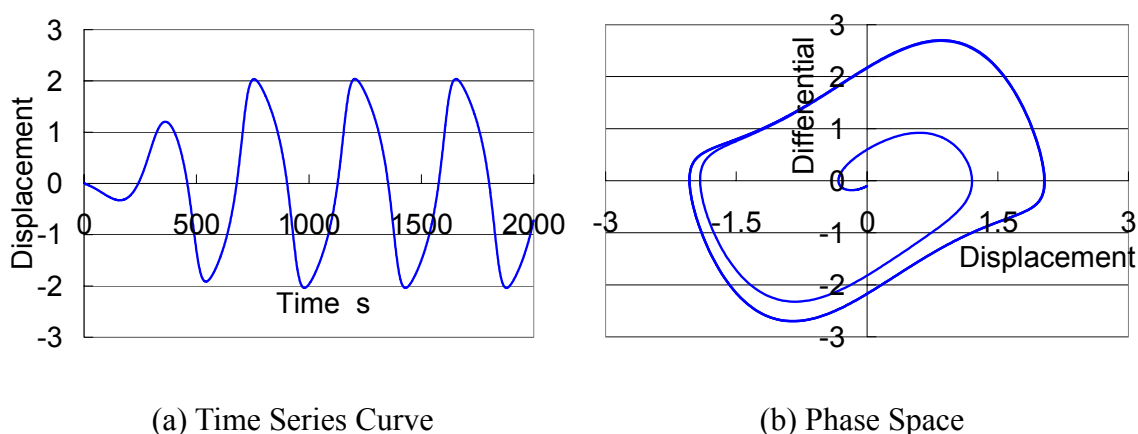


Fig.6.27 Van del Pol Equation

ここで、気分の快度は、長時間にわたる情動の快度の変化が現在に現れると考えられるため、情動の快度の時間積分となっている。また、覚醒度は、人間の睡眠・覚醒のような生体リズムに相当するとし、Fig.6.27のような自励振動方程式である Van del Pol 方程式を用いて表わしている。これにより、ロボットに人間の体内時計と同様の周期性を組み込んでいる。

$$M_p = \int E_p dt \quad (6.4)$$

$$\ddot{M}_a + (1 - M_a^2)\dot{M}_a + M_a = 0 \quad (6.5)$$

#### (4) 欲求

人間は何らかの欲求が生じ、その対象が存在するときに行動を起こすとされている [81]。そこで、ロボットがある刺激に対して行動を引き起こす要素として欲求モデルが考案され、欲求が高まったときに自発的に行動を出力することが可能となっている。ここでは、Maslow の欲求階層論 [82] において最も下層に位置する食欲・安全欲求、および探索欲求が導入されており、式(6.6)のような欲求行列  $\mathbf{N}$  を定義している [41]。

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_A \\ N_S \\ N_E \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

$N_A$ : Appetite

$N_S$ : Need for Security

$N_E$ : Need for Exploration



そして、人間の欲求は、ある刺激に対して連続的に加算されると言われているため、ロボットの欲求も同様の欲求方程式によって表わされている。

$$N(t + \Delta t) = N(t) + P_N \cdot \Delta N \quad (6.7)$$

$$\Delta N = f_N(I, S, E) \quad (6.8)$$

$P_N$ : Need Personality Matrix

$I$ : Internal State

$S$ : Stimulus

$E$ : Emotion Vector

ここで、 $\mathbf{P}_N$ は欲求に対するパーソナリティで、 $\Delta \mathbf{N}$ はロボットの内的状態、入力された刺激、情動によって変化する単位時間あたりの欲求の差分である。

まず、食欲について説明する。人間の食欲は消費エネルギー量と相関があり、消費エネルギーは安静時でも消費する基礎代謝エネルギーと、運動によって消費するエネルギーの和とされている。そこで、ロボットの欲求も、基礎代謝エネルギー $G_B$ と運動によって消費されるエネルギー $G_M$ を足し合わせた総消費エネルギー量 $G$ の関数となっている。このうち基礎代謝エネルギーは、時間に比例する量で、その比例係数はロボットの情動によって変化する。一方、運動によって消費されるエネルギーは、ロボットが消費したエネルギーとロボットが取得したエネルギーの差より求めれば良い。つまり、ロボットは、電源から取得した電力をアクチュエータで力に変換しているため、アクチュエータに流れる総電流を計測することによって、ロボットの消費エネルギーが求められる。

$$G = G_B + G_M \quad (6.9)$$

$$G_B = \int f_{GB}(E) \cdot dt \quad (6.10)$$

$$G_M = \int f_{GM}(I, S) \cdot dt \quad (6.11)$$

$$= \int (k_{MA} \cdot G_{MA} - k_{MF} \cdot G_{MF}) \cdot dt$$

$G_{MA}$ : Total Consumption Power of Actuators

$G_{MF}$ : Total Energy of Virtual Foods

$k_{MA}$ : Consumption Power Coefficient

$k_{MF}$ : Food Coefficient

従って、単位時間あたりのロボットの食欲の変化は次のようになる。

$$\Delta N_A = f_{NA}(\Delta G) \quad (6.12)$$

続いて、安全欲求とは、自分自身に降りかかる危険を回避し安全でありたいという防衛反応の1つで、反射的に危険刺激から体を遠ざける生体防御反射とは異なり、弱い危険刺激であっても長い時間入力された場合に生じる欲求である。そこで、刺激が入力された部位と刺激の強度により安全欲求が定義されている。まず、ロボットの部位をセンサの配置によって、眼球・耳・鼻・額・頭頂部・左右側頭部の7つに分割し、それぞれの部位における一定時間あたりの危険刺激および安全刺激を計測する。ここで、危険刺激は安全欲求を上げ、安全刺激は安全欲求を下げるものをいい、そこから求められた安全欲求が最も高い部位の値をロボットの安全欲求としている。

$$\Delta N_{S\_part} = \int (S_D - S_S) dt \quad (6.13)$$

$$\Delta N_S = \max(\Delta N_{S\_part}) \quad (6.14)$$

$S_D$ : Dangerous Stimulus

$S_S$ : Safety Stimulus

$part$ : Robot Part

最後に、探索欲求とは、人間や動物が新しい場面や対象に遭遇すると、好奇心を示して探索行動を示すというもので、ロボットにおいても新しい刺激が入力されたときに高まるようになっている。ここでは、ある視覚刺激に対して、ロボットがその属性情報をもっている場合は既知刺激、もっていない場合は未知刺激とし、未知刺激が入力されると探索欲求が増加する。そして、それがある閾値を越えると、未知刺激を手に取りその属性情報を取得する。

## (5) 意識

ロボットに対して複数の刺激や対象物が存在する場合、ロボットの行動の対象が明確にされなければ、その行動を正確に理解することはできない。そこで、人間と同じように意識を向けた刺激に対して行動できるよう、安西らによる意識モデル[83]を参考にした意識が導入されている。これは、意識は下層より、刺激を受容する準備ができていたことを示す「覚醒」、意識の容量を各刺激に分配し、最も意識量の多い刺激に対して意識を向けるという「アウェアネス」、自分の意識自体を意識する「自己意

識」からなるというもので、ロボットには覚醒とアウェアネスが組み込まれている。

まず、人間は低い覚醒状態においては刺激に対する反応が鈍くなるといったように、意識と覚醒度の間に高い相関がある。そこで、ロボットの覚醒度に従って変化する意識総量  $C_T$  を定義することによって覚醒の意識を導入している。

$$C_T = k_C \cdot (E_a - E_{a\_min}) \quad (6.15)$$

$C_T$ : Total Amount of Consciousness

$k_C$ : Consciousness Amount Coefficient

$min$ : Minimum Value

また、アウェアネスは特定の対象や事象に向かう意識のことで、その刺激を選択することによってもたらされる効果、すなわち感受個性と刺激の強度、欲求の状態と深く関係している。そこで、式(6.15)で表わされている意識総量  $C_T$  を上記の3要素に従って各刺激に分配し、分配された意識量が最も大きい刺激を選択するものとしている。まず、意識を分配するためには、どの刺激にどんな割合で分配するかを決める必要があるので、各刺激に対する意識の相対量を示す相対意識量行列  $\mathbf{C}_R$  が定義されている。

$$C_{R\_γ} = |S_{t\_γ} \cdot P_γ| + |N \cdot T_{N\_γ}| \quad (6.16)$$

$C_R$ : Relative Consciousness

$S_t$ : Stimulus Strength

$P$ : Sensing Personality of the Stimulus

$T_N$ : Need Table of the Stimulus

$γ$ : Stimulus

そして、この相対意識量に従って各刺激に意識が分配される。実際に分配される絶対意識量は、絶対意識量行列  $\mathbf{C}_A$  として次のように表わされている。

$$C_A = \frac{C_T}{\sum_{γ} C_{R\_γ}} \cdot C_R \quad (6.17)$$

ロボットは絶対意識量が最も多い刺激を選択し、その刺激に対して情動を変化させたり行動を生成したりする。

### 6.3 記憶モデルを有する新しい心理モデルの構築

以上のように、情動表出ヒューマノイドロボット WE-4RII は、優れた入力機能と出力機能を有しているロボットであるが、複数ある刺激の中から心理状態に応じて適当な刺激を選択することはできるものの、同一刺激に対してはその刺激に対応した行動しか出力することができない。それに対して、人間は同一刺激を知覚した場合であっても、そのときの気分や欲求、覚醒度によって多様な反応を示す。このような機能をもっていない場合、相手がどのような反応を示すのか予想できてしまうため、飽きが生じ、コミュニケーションが成立しなくなってしまう恐れがある。従って、人間とロボットの自然なコミュニケーションを実現するためには、同一刺激が入力された場合でも、そのときの気分・欲求・覚醒度に従って多様な行動を示す機能が必要不可欠であると考えられる。

そこで、このような問題を解決するため、本論文で提案した記憶モデルを WE-4RII の心理モデルに組み込むこととした。この際、ある刺激から想起するものが気分によって変化するが、これは刺激を知覚後どのように認識するのかに相当するのではない

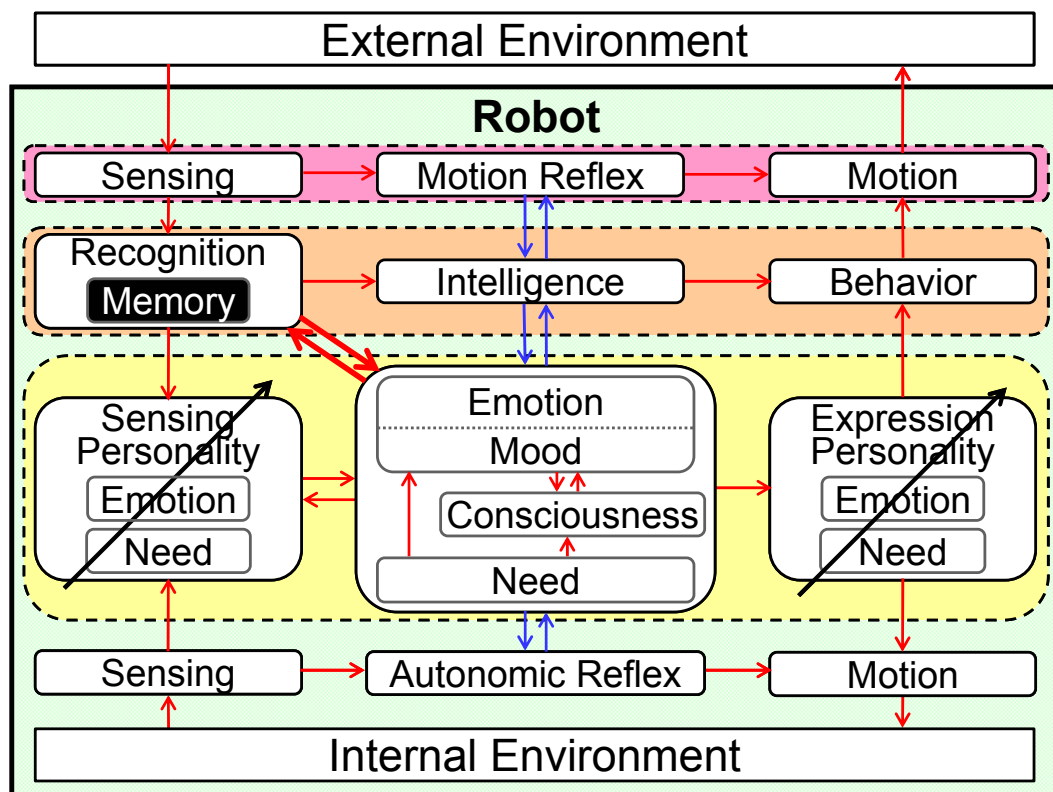


Fig.6.28 New Mental Model with Memory Model

かと考えた。また、意識の向いた刺激をコード化し、保存された記憶を気分・欲求・覚醒度に従って想起するのに加え、想起された記憶がさらに情動に影響を与えることから、認識と情動・気分・意識・欲求間で情報伝達が行われるものといえる。従って、Fig.6.28 のように従来の心理モデルの認識部内に記憶モデルを組み込み、認識と情動・気分・意識・欲求間の情報伝達を示す矢印を加えた新しい心理モデルを構築した。以下、具体的な導入方法について説明する。

### 6.3.1 コード化モデルの導入

人間は、目が覚めて覚醒し刺激を受容できる状態になると、無制限に刺激を知覚するが、意識が向いた刺激でなければコード化は行われず、記憶として保存されることはない。そこで、本研究では、複数の刺激の中から最も意識の向いている刺激、つまり式(6.17)において絶対意識量  $C_{A,y}$  の値が最も大きい刺激に対してコード化を行うこととした。ここでは、まず、その刺激の情報と刺激が入力されたときの気分の快度を、Table 6.4 ように正規化することによって入力ベクトルに変換する。そして、重みベクトル  $W$  の初期値を乱数とし、入力ベクトル  $u$  と重みベクトル  $W$  との距離  $l$  を求める。

$$l_j = |u_i - W_{j,i}| \tag{6.18}$$

次に、 $l_j$  が最小となるニューロンを  $j^*$  とすると、 $j^*$  とその周辺のニューロンに対する重みを更新する。

Table 6.4 Normalization of Sensation in Encoding Model

Stimulus	Sensation	Memory 1	Memory 2	
Visual	Target Color	Red	1	...
		Blue	0	...
		Green	0	...
Tactile	Pushed	0		
	Stroked	1		
	Hit	1		
Auditory	Left	1		
	Right	0		
Mood	Pleasantness	0		

$$\Delta W_{j,i} = \eta f(j, j^*) (u_i - W_{j,i}) \quad (6.19)$$

$$f(j, j^*) = \exp\left(\frac{-|j - j^*|^2}{\sigma^2}\right) \quad (6.20)$$

$\sigma$ は  $f(j, j^*)$ の影響が及ぶ近傍領域を表わすパラメータで、学習が進むにつれて減少していくように、次のように定義した。

$$\sigma(t) = \sigma(0) \exp(-t/\varepsilon) \quad (6.21)$$

ここで、 $\eta$ はある定数、 $\varepsilon$ は学習回数である。以上のような自己組織化マップによって、類似した入力ベクトルごとに2次元マップ化され、刺激の情報がコード化される。本研究では、入力ベクトル数を Table 6.4にあるような9個、マップ層を  $20 \times 20$ とした。

### 6.3.2 想起モデルの導入

WE-4RIIには、情動・気分・欲求が既に組み込まれているため、第5章で構築したモデルをそのまま導入することが可能である[84-86]。まず、ある刺激をどのように認識するかを、Fig.6.29のような相互結合された2組のニューラルネットワークによって決定する。また、このネットワークにおけるニューロンモデルを Fig.6.30に示す。ここでは、各ニューロンは調和振動子の運動方程式に従って変化し、カオス時系列であるロジスティックマップの分岐パラメータを変調することによって、カオス的出力の力学的性質を決定している。

$$\ddot{x}_i^\alpha(t) + k_h \dot{x}_i^\alpha(t) + \omega_0^2 x_i^\alpha(t) = E_{f_{-i}}^\alpha(t) \quad (6.22)$$

$$r_i^\alpha(n) = 4 - b + b \cos^2 \beta x_i^\alpha(n) \quad (0.0 \leq b \leq 4.0) \quad (6.23)$$

$$y_i^\alpha(n+1) = r_i^\alpha(n) (0.5 - y_i^\alpha(n)) (0.5 + y_i^\alpha(n)) - 0.5 \quad (0.0 \leq r_i(n) \leq 4.0) \quad (6.24)$$

そして、ニューロンの出力はネットワーク内の全てのニューロンともう一方のネットワークの同じ番号のニューロンに入力される。ただし、入力が時間間隔  $\tau$  で段階的に変化するよう式(6.27)のようにおいた。



$$h_i^A(n) = \sum_{j=1}^L W_{i,j}^A y_j^A(n) + Z_i^{A,B} y_i^B(n) \tag{6.25}$$

$$h_i^B(n) = \sum_{j=1}^L W_{i,j}^B y_j^B(n) + Z_i^{B,A} y_i^A(n) \tag{6.26}$$

$$E_{f-i}^\alpha(t) = \frac{K}{\sqrt{\tau}} h_i^\alpha(n) \quad \text{for } n\tau \leq t < (n+1)\tau \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \tag{6.27}$$

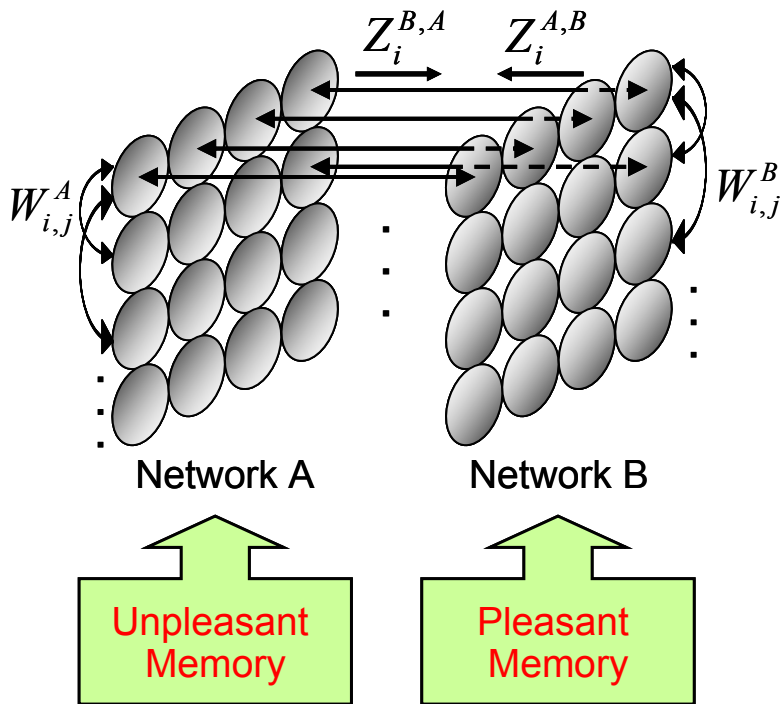


Fig.6.29 Neural Network Model for Retrieval Model

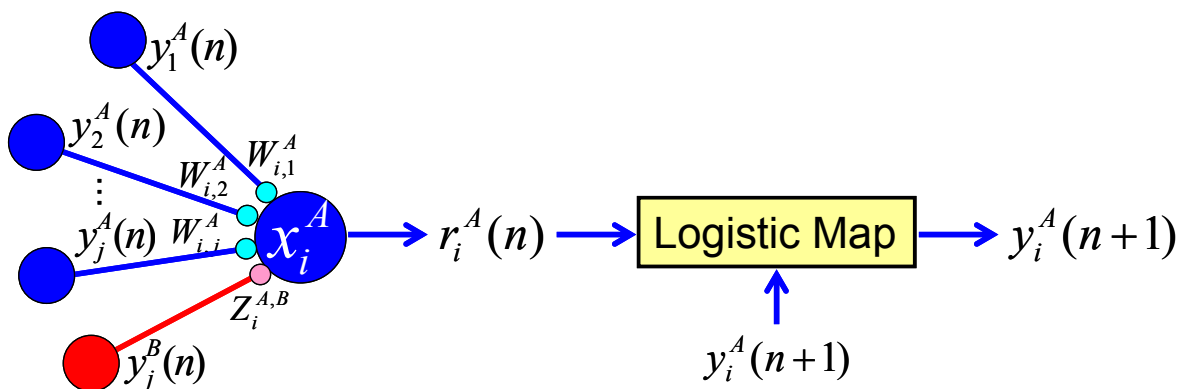


Fig.6.30 Neuron Model for the Retrieval Model

ここで、ネットワーク内のニューロン間の結合定数  $W_{ij}^a$  は、Network A に不快記憶パターン、Network B に快記憶パターンを保存するため Hebb 則によって決定し、自己結合定数は  $W_{ij}^a=1$  とした。

$$W_{i,j}^a = \xi_i^a \xi_j^a \quad (\xi_i = \pm 1) \tag{6.28}$$

一方、Network A から Network B への結合定数  $Z_i^{B,A}$  は、気分適合性およびこれらに当てはまらない食欲の影響を表現するため、式(6.4)のように表わされている気分の快度  $M_p$  と、式(6.6)-(6.12)で表わされている食欲  $N_A$  を用いて次のように定義した。ただし、気分が中程度の場合は、気分適合性に従わず、ロボットは刺激をそのまま認識する。

$$Z_i^{A,B} = M_p + N_A \tag{6.29}$$

また、パフォーマンスと覚醒度の関係を表現するため、ある刺激を認識するための時間、つまりニューラルネットワークの計算時間  $n$  を、式(6.1)の情動の覚醒度  $E_a$  に従って変化させた。このとき、Fig.6.31 のように、中程度の覚醒度のときは刺激を速く認識するが、覚醒度が低かったり高いときは刺激を認識するまで時間がかかる。

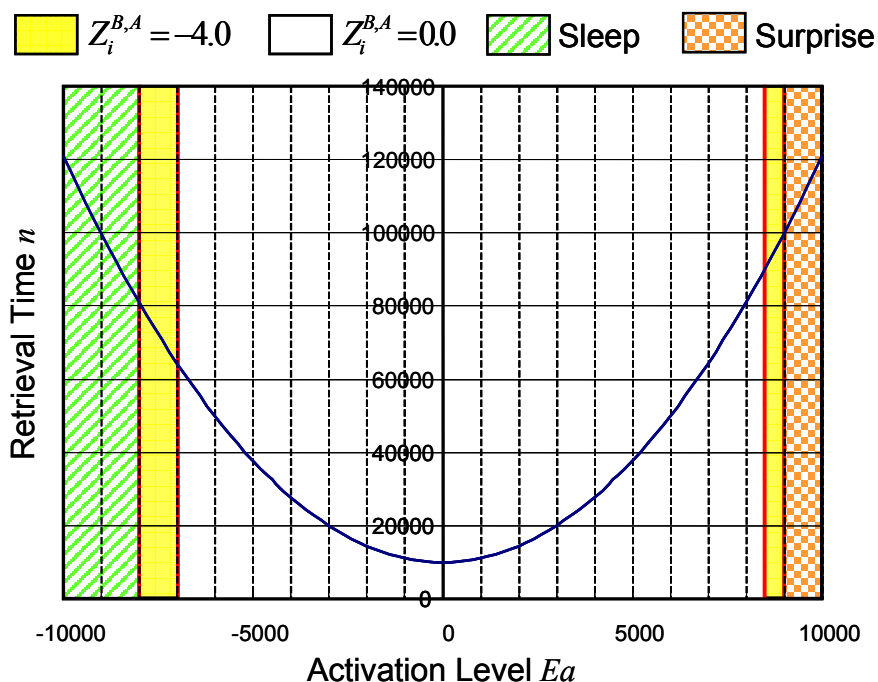


Fig.6.31 Relation between Retrieval Time and Activation Level

さらにパフォーマンスと覚醒度の関係を表わす別の手段として、Network A から Network B への結合定数  $Z_i^{B,A}$  を 2 つの値を用いて定義した。まず、情動の覚醒度  $E_a$  が中程度のときは  $Z_i^{B,A} = 0.0$  とし、気分適合性に従って記憶を想起させる。しかし、覚醒度が高すぎたり低すぎたりする場合は  $Z_i^{B,A} = -4.0$  とし、気分と一致する記憶が想起されない場合が現れるようにした。

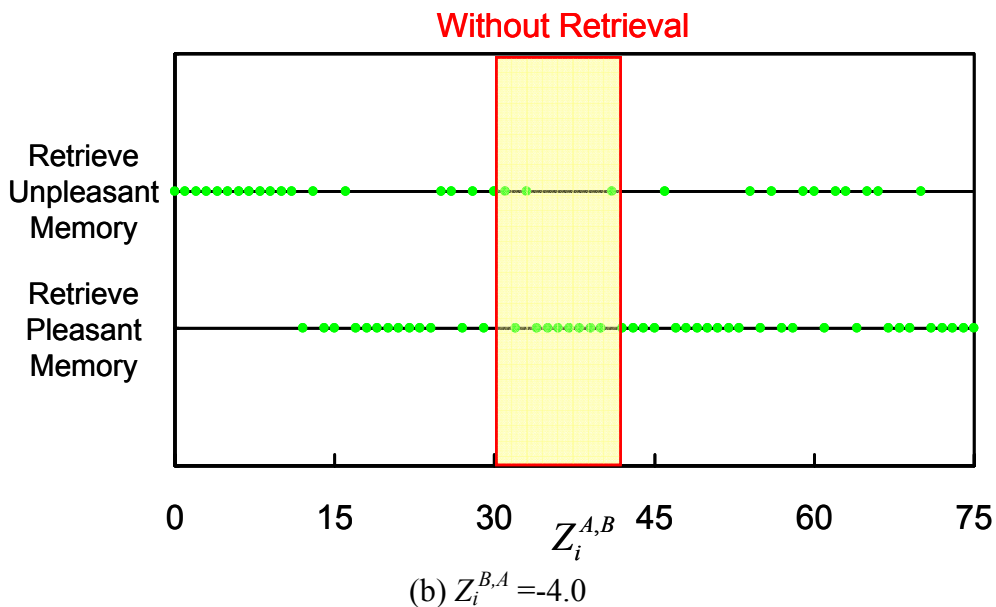
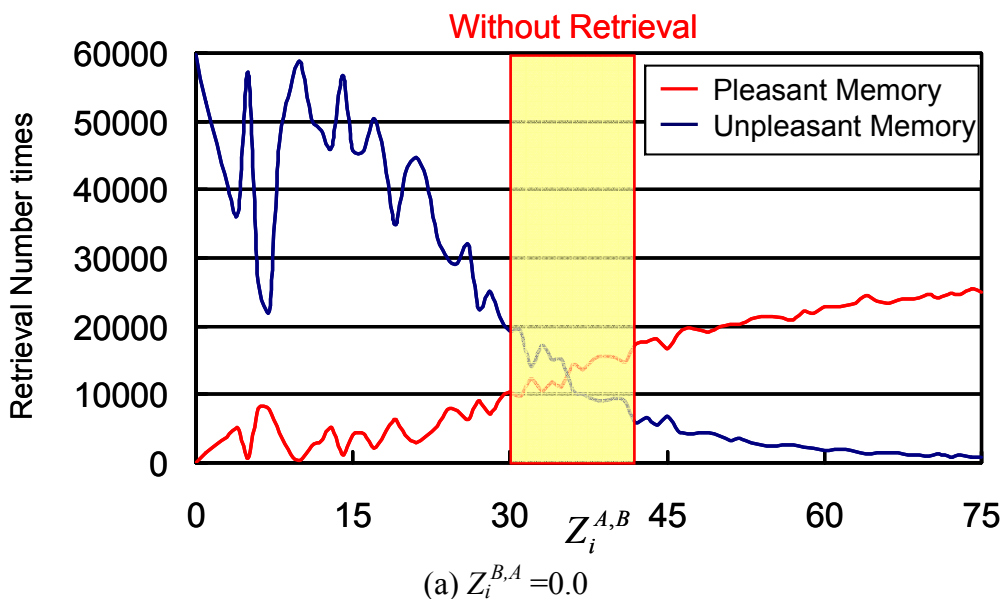


Fig.6.32 Retrieval Patterns for the different  $Z_i^{B,A}$

加えて、人間は快記憶を想起すると気分が良くなったり、不快記憶を想起するとさらに不快になってしまうことがある。このように、そのときの気分によって想起する記憶が変化するだけではなく、想起するパターンの属性がさらに気分に影響を与えるのではないかと考え、ある刺激に対して快記憶パターンが想起された場合は情動の快度が増加し、不快記憶パターンが想起された場合は情動の快度が減少するものとした。気分の快度は、式(6.4)のように情動の快度の時間積分となっているため、情動の快度を変化させることによって、気分に影響を与えることが可能である。

## 6.4 WE-4RII を用いた新しい心理モデルの評価と考察

前節で構築した記憶モデルを有する新しい心理モデルを情動表出ヒューマノイドロボット WE-4RII に適用し、これまで入力された刺激に対してその刺激に対応した行動しか出力することができなかったロボットが、新しい刺激の情報を保存し、同一刺激が入力された場合でも、そのときの気分・欲求・覚醒度に従って異なった認識をすることができるかどうか実験を行った。

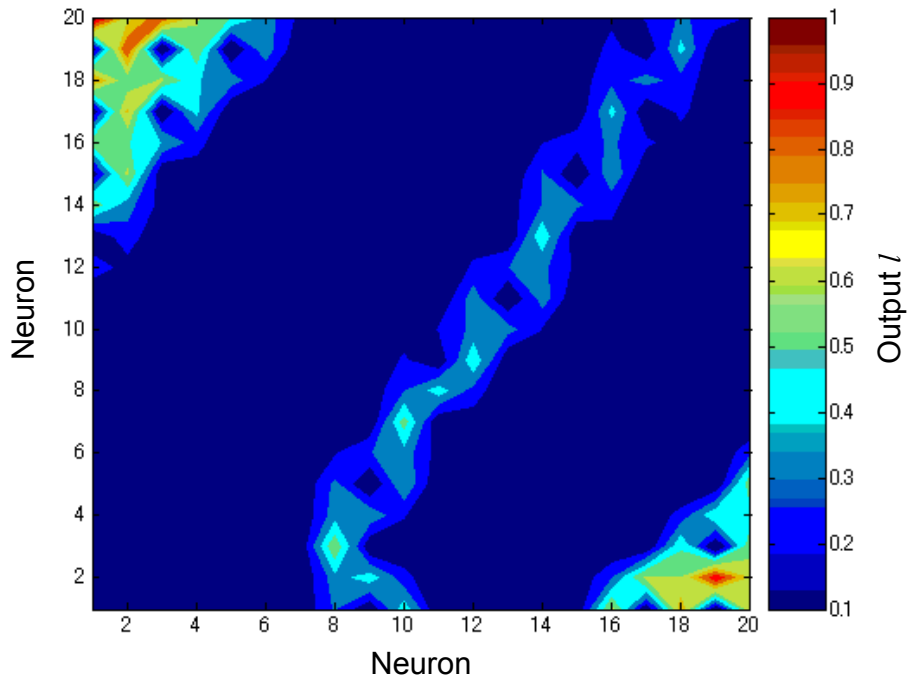
### 6.4.1 コード化モデルの評価実験

まず、WE-4RII がコード化モデルによってある情報をパターン化し、それを保存することができるかどうか確認するため、刺激の情報がどのように2次元マップ化されるか実験した。ここでは、各パラメータは次のようにおいた。

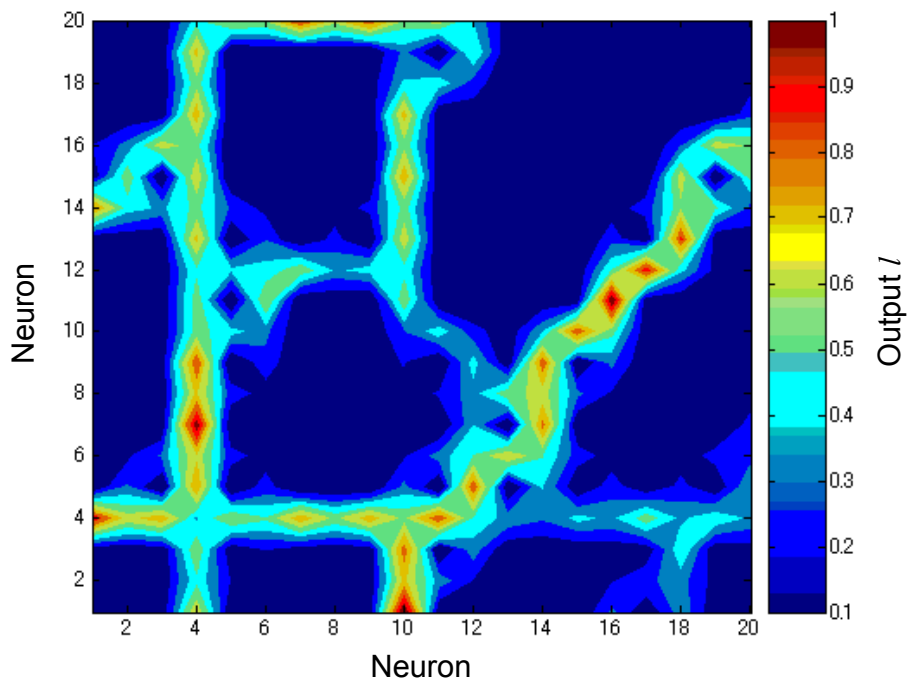
$$\eta=0.4, \sigma(0)=1.2, \varepsilon=20000 \quad (6.30)$$

そして、ロボットに、(a)赤いボール、(b)「たたき」・「なで」・「押し」といった触覚刺激を呈示し、このときの実験結果を Fig.6.33 に示した。

ロボットに赤いボールを追従させると、そのときの刺激情報は視覚の「赤」だけなので、「赤」の入力ベクトルのみが1、それ以外の入力ベクトルは0となる。Fig.6.33(a)を見ると、このときの刺激情報が2種類のベクトルに分類されていることがわかる。一方、Fig.6.33(b)に示した、ロボットに「たたき」・「なで」・「押し」の3つの情報を与えたときの学習結果を見ると、3つの情報に対する入力ベクトルと無刺激だった入力ベクトルの4つに分類されたことが確認できる。従って、本モデルをロボットに適用することにより、ロボットが新しい情報をコード化し、保存することに成功したと言える。



(a) "Red" Stimulus



(b) "Hit", "Stroked" and "Stroked" Stimuli

Fig.6.33 Experimental Results of Encoding

### 6.4.2 想起モデルの評価実験

次に、ロボットに同一刺激が入力された場合においても、想起モデルによって、ロボットがそのときの気分・欲求・覚醒度に従った異なる認識をすることが可能かどうか確認するため、WE-4RIIが任意の刺激をどのように認識するか実験を行った。

ここでは、まず、視覚刺激「赤」に対する不快記憶パターンを「トマト」、快記憶パターンを「リンゴ」とし、それぞれ Network A, Network B に保存させた。各パラメータの値と初期値は、次のようにおいた。

$$K=14.0, \tau=0.1, \mu=0.05, T=2.0, \beta=0.05, b=1.2 \quad (6.31)$$

$$x_i^a(0)=2.5, v_i^a(0)=0.0, y_i^a(0)=0.2 \quad (6.32)$$

そして、(a)空腹でないときの気分適合性、(b)空腹時の気分適合性、(c)覚醒度が中程度のときのパフォーマンス、(d)覚醒度が高すぎるときのパフォーマンスに関して、ロボットが想起するパターン、および情動・気分がどのように変化するか調査した。4つの実験の実験方法を Table 6.5 に、実験結果を Fig.6.34 に示す。ここで、ピンク色のラインは情動の快度  $E_p$ 、緑色のラインは情動の覚醒度  $E_a$ 、茶色のラインは気分の快度  $M_p$ 、青色のラインは食欲  $N_A$  の変化を表わしている。また、図の上部に、オレンジ色でロボットに与えた刺激を、濃い青色でロボットが想起しているパターンを示した。

Table 6.5 Experimental Method of Retrieval Model

実験	実験方法
(a)	① 実験終了時まで赤いボールを呈示 ② 右頬をなでる ③ アンモニアのニオイを呈示
(b)	① 実験終了時まで赤いボールを呈示 ② 左頬を叩く ③ しばらくボールを追従させる
(c)	① 左頬を2回叩く ② 赤いボールを呈示
(d)	① 左頬を20回程度叩く ② 赤いボールを呈示

まず、Fig.6.34(a)では、実験を通してロボットに「赤」いボールを見せていた。このとき快刺激である「なで」を呈示すると、ロボットは快状態となり、快記憶パターンである「リンゴ」を想起するが、不快刺激である「アンモニア」のニオイをかがせると、ロボットは不快状態となり、不快記憶パターンの「トマト」を想起している。つまり、同じ「赤」という視覚刺激を、気分適合性に従って認識できていることがわかる。

次に、Fig.6.34(b)では、初めロボットの側頭部に「たたき」の刺激を与えたため、ロボットは不快感を覚え、不快記憶である「トマト」を想起した。そして、しばらく時間が経過すると、ロボットは基礎代謝により消費するエネルギーが増加していくため、食欲が高まり、ますます不快となっていく。しかし、食欲が高まった後は、気分適合性に関わらず、ロボットが好きな「リンゴ」を想起することができている。ここで、想起した記憶パターンの属性が気分に影響を与える、つまり快記憶を想起したら気分が良くなるものとしているが、快記憶パターンである「リンゴ」を想起しても気分は良くなるどころか不快になっていっている。これは、ロボットに「リンゴ」を呈示せず、ロボットが食欲を満たすことができなかつたためである。

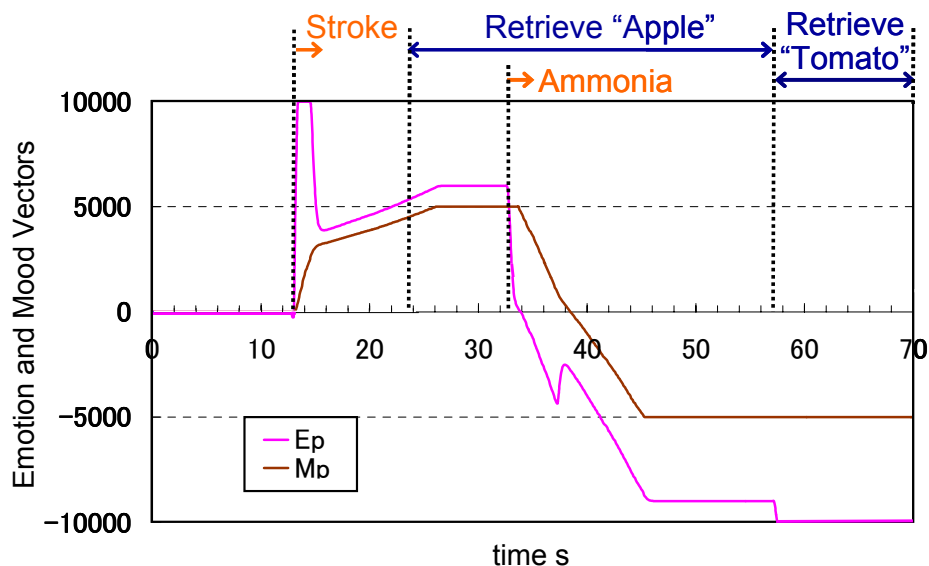
続いて、覚醒度が中程度のときの実験結果を Fig.6.34(c)に、覚醒度が非常に高いときの実験結果を Fig.6.34(d)に示す。Fig.6.34(c)では、初め不快刺激である「たたき」を呈示することにより、ロボットが不快になっている。また、たたかれることによってロボットの覚醒度は上昇するが、刺激を与えるのが2回程度であれば、覚醒度はすぐに中程度に落ち着く。ここで、「赤い」ボールをロボットに見せると、約 2[s]後に気分適合した不快記憶パターン「トマト」を想起していることがわかる。

一方、Fig.6.34(d)においても、ロボットは「たたき」刺激に対して不快感を示しているが、刺激を複数回与え続けることによって、覚醒度が非常に高い状態になっている。このとき、ロボットは混乱した状態にあるため、不快な気分であるにも関わらず、「赤い」刺激に対して快記憶パターンの「リンゴ」を想起していることが確認できる。また、「赤い」刺激の呈示から想起まで約 9[s]も要しており、覚醒度が中程度のときと比べて非常に長い時間を必要としている。ロボットは、この後覚醒度が減少したため、気分適合性に従って不快記憶パターン「トマト」を想起する。さらに、気分の快度に着目すると、快記憶「リンゴ」を想起している間は気分が良くなるように、不快記憶「トマト」を想起している間は気分が悪くなるように変化しており、想起した記憶パターンの属性の影響を受けていることがわかる。

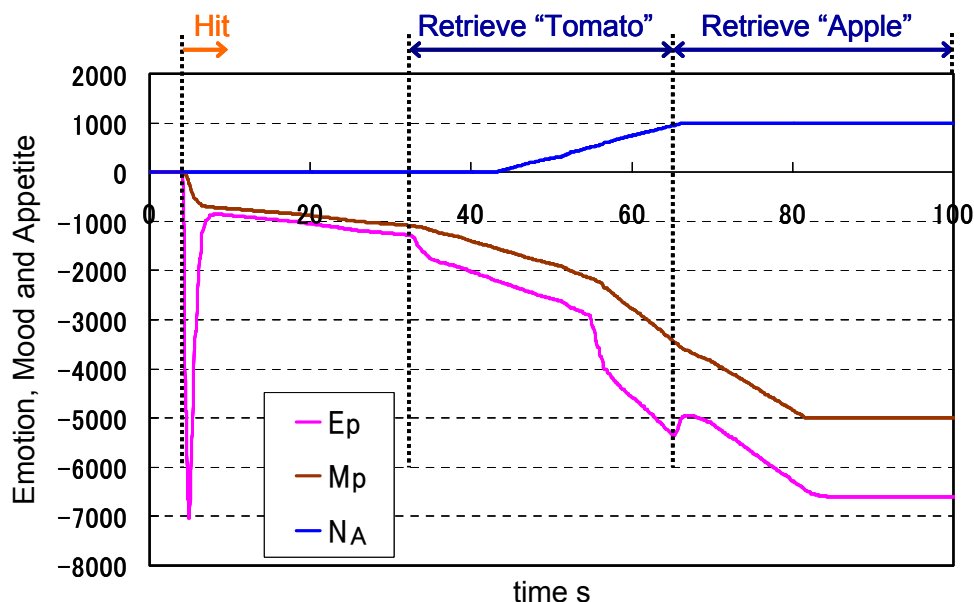
以上のように、本研究で構築した想起モデルをロボットに導入することにより、ロボットは同一刺激に対しても、気分適合性に従った異なる認識を行うことが可能となった。また、覚醒度が中程度のときは、入力された刺激をそのときの気分に従ってす



ばやく認識することができるが、覚醒度が非常に大きいときは、認識するまでに時間を要し、さらにそのときの気分と相当しない認識をおこなう場合も存在することを確認した。そして、刺激をどのように認識するかが、その後の気分と強く影響することがわかった。

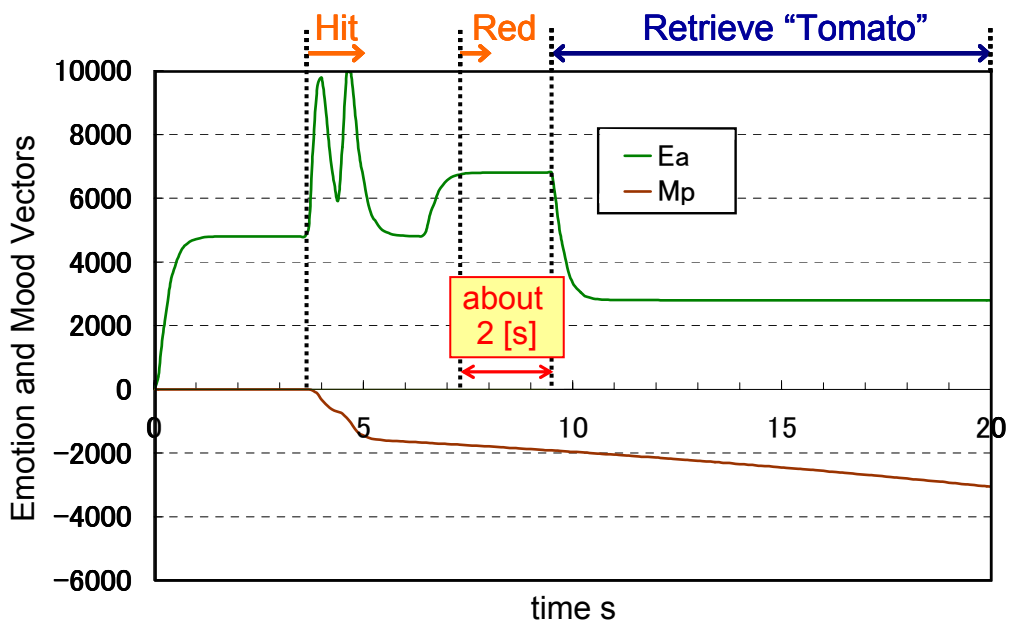


(a) Result of Mood Congruency without Appetite

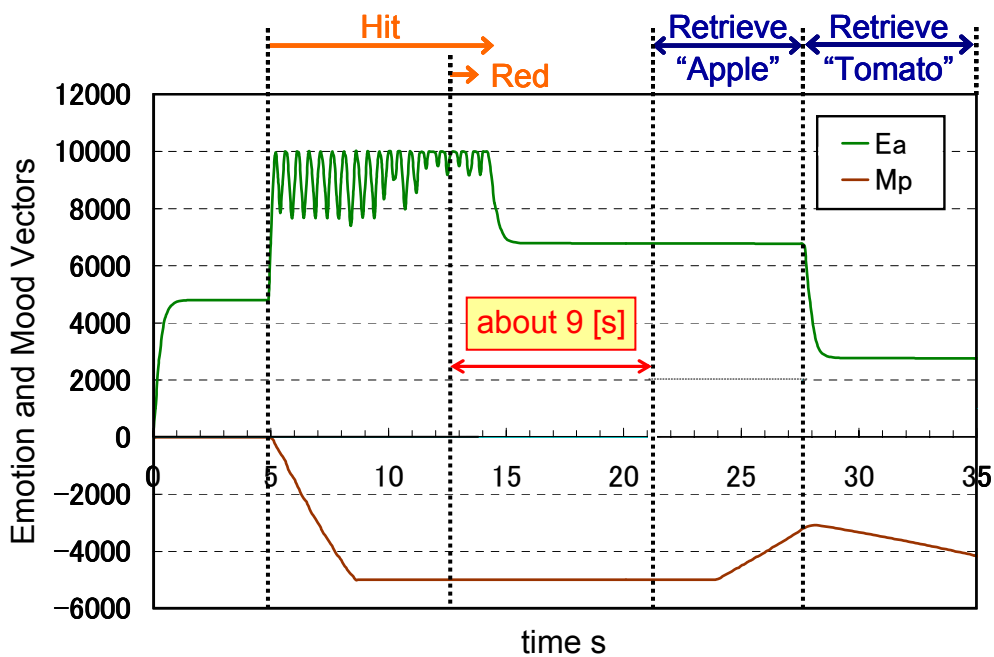


(b) Result of Mood Congruency with Appetite

Fig.6.34 Experimental Results of Retrieval Model



(c) Result for Low Activation Level



(d) Result for High Activation Level

Fig.6.34 Experimental Results of Retrieval Model

## 6.5 まとめ

人間は同一刺激を知覚しても、そのときの気分や欲求、覚醒度によって多様な反応を示すが、従来のロボットは同一刺激に対して、その刺激に対応した行動しか出力することができなかった。そこで、人間とロボットの自然なコミュニケーションを実現するため、ロボットに同一刺激が入力された場合でも、そのときの気分・欲求・覚醒度に従って多様な行動を示すことができるよう記憶モデルを導入した。

本研究では、人間の五感のうち視覚・聴覚・嗅覚・触覚の4感覚を有し、表情・首・肺・腰・腕・ハンドによってそのときの心理状態を表出することができる情動表出ヒューマノイドロボット WE-4RII (Waseda Eye No.4 Refined II) を用いて記憶モデルの有効性を調査した。これは、WE-4RII に心理モデルが内蔵されており、この中の情動・気分・意識・欲求を用いることによって記憶モデルを容易に組み込むことが可能であったためである。この結果、WE-4RII はある刺激をコード化して保存し、同一刺激に対しても、気分適合性に従った異なる認識を行うことが可能となった。また、覚醒度が中程度のときは入力された刺激をすばやく認識するが、覚醒度が非常に大きいときは認識するまでに時間がかかるなど、多様な認識を実現することができた。

従って、本論文で提案した自己組織化マップを用いたコード化モデルと、相互結合した2組のカオスニューラルネットワークを用いた想起モデルは、ロボットの行動の多様化を実現するための有効な手段であったと考えられる。