

# 自己受容器を介した視野外の身体像獲得モデルの提案

## Acquiring the Invisible Body Image Based on the Autoreceptors

○ 福家 佐和 (阪大) 正 荻野 正樹 (阪大) 正 浅田 稔 (阪大, 阪大 FRC)

Sawa FUKUE, Osaka University  
Masaki OGINO, Osaka University  
Minoru ASADA, HANDAI Frontier Research Center, Osaka University

Body-image is necessary for a robot to adapt to a variety of situations. Moreover, it is required to have the body-image of the invisible parts such as the organs of the face or the back. In this paper, we simulate that a robot learns the relationship between the displacement of the coordinate of the hand and that of the joint angles of the arm during moving its hand in front of the face. With this relationship, we proposed a model that the robot learns the integration of visual and tactile sense through the somatic sense through touching the face.

**Key Words:** Body-image, Multi-modal

### 1 はじめに

私達人間は、自身の手や道具を使って様々なタスクを行うことが可能である。そのためには、自身の身体のパーツと外部空間の関係を把握する必要があり、このような身体表現のことを「身体像」と呼ぶ<sup>1)</sup>。この身体像の獲得のためには、自己身体に接触した際に、視覚だけではなく、刺激として入ってきた聴覚、体性感覚といった異なる modal の感覚を時間的にも空間的にも統合することが必要であると考えられる。しかし、それらがどのように関連づけられているのかは、まだほとんど知られていない。Ramachandran<sup>1)</sup> や, Iriki et al.<sup>2)</sup> の知見から、生物ではこれらの統合は動的に構成されると考えられる。

ロボットも人間社会に共存していく上で、身体像を持つことは環境との相互作用が求められるタスクを行うために、非常に重要な機能の1つである。この身体像は、現在あらかじめ設計者によってプログラムされ、与えられている場合が多い。しかし、センサなどのハードウェアの条件が変化したり、ロボットが複数の道具を使用する場合を想定すると、人間が初に埋め込んだ身体像でタスクを実行することには限界がある。よって、外界や自身の機体の変化に応じて、ロボットが人間同様自律的に獲得することが望ましい。

これまで、身体像の獲得の研究としては、まず Nabeshima et al.<sup>3)</sup> が Iriki et al. らの身体像延長現象の生物学的知見のモデルを提案した。これは、ロボットは、時空間連想記憶を用いて視覚と触覚の2種類の刺激の同期性を検知し、道具を発見し身体図式を学習するという手法である。また、Yoshikawa et al.<sup>4)</sup> は身体像の獲得方法として、ロボットが自身の身体を触った時の、触覚情報と視覚情報と体性感覚との結び付きを Hebb 学習によって構成する手法を提案した。しかし上記の手法では、獲得できる身体像はカメラの視野に依存し、ヒューマノイドロボットの背中や腹部等の死角部分の像を獲得することは不可能であるという問題があげられる。しかし、このような部分の身体像の獲得なしでは、障害物を臨機応変に回避するといった行動の実現が困難であると考られる。

よって本稿では、ロボットが能動的に腕を動かし、手先がプローブの役割を果たし関節角度を通して、顔のパーツの触覚と視覚の刺激を空間的に結び付けるモデルを提案する。顔のパーツ配置像の獲得の実現は、将来ロボットにとって死角となっている身体のパーツのつながりを

獲得する研究へ発展できると考えられる。

また、この養育者の顔の特徴を認識でき、自身の知覚できる特徴との関係を見出す能力 (Organ Identification) は、新生児模倣の代表的モデルである AIM モデル<sup>5)</sup> において、乳児が持っているべき能力の1つとして位置づけられている。よってこのシステムの実現は、認知発達分野においても人間の基本の学習方法である「模倣」のメカニズムの理解を助けることが可能と考えられる。

### 2 視覚空間の手先位置推測モデル

身体象は視覚、触覚、体性感覚の異なるモーダルの情報が統合されたものとして表現されていると考えられる。本研究では、それらが互いに結びつけられたときに身体像が確立されるものとする。すなわち、視覚、触覚、体性感覚の表象空間の間を関係づける写像が得られることを身体像として定義する。このような関係は、例えば、手先で身体部位を触ったときに、触った部位のカメラ画像の座標 (視覚)、反応した触覚センサーの ID (触覚)、その時の関節角度 (姿勢感覚) を対応づけることによって得ることが可能である。しかし、顔のように手先位置が視覚上で確認できない場合には、実際には得ることのできない視覚空間上での手先の位置情報を推測する能力が必要となる。この推測能力を学習によって獲得させるため、手先が視野内にあるときに得られる関節角度変異と視覚空間上での変異の関係を利用する。

ロボット自身が仮に視野内で自身の腕を動かした場合、視覚空間上での手先の位置変化量  $\Delta \mathbf{r}_m$  と、自身の関節角度空間上での変化量  $\Delta \theta_m$  との関係は

$$\Delta \mathbf{r}_m = f(\Delta \theta_m) \quad (1)$$

とすると、この変位の関係を写像する関数  $f$  を学習することで、ロボットは自身の顔を能動的に触った時の関節角度変化量  $\Delta \theta_s$  の結果から視覚空間上の  $\Delta \mathbf{r}_s$  を推測する。

### 3 顔のパーツ配置像獲得モデル

2の学習の結果を利用した顔部位の身体像獲得モデルを提案する。ロボットは自身の顔を触り、以下に示す学習を繰り返し行い、それぞれのモーダルを獲得していく。

#### 3.1 初期化

ロボットは、あらかじめ関節角度空間の自己組織化マップ (SOM) を形成しているとする。この SOM の各 cell には視覚空間の手先位置情報が結び付いているとし、初

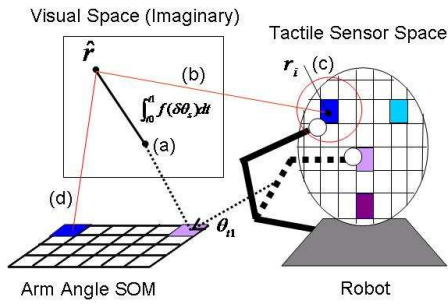


Fig.1 The model to learn the integration of three kinds of sense

期条件としてはロボットが視野内の腕の運動の経験で得た位置情報が設定されているとする。また、顔の触覚センサにも視覚空間の手先位置情報が結び付いているが、これは最初はランダムな値が入力されているとする。

### 3.2 触覚空間と視覚空間の統合の学習

$n$  番目の試行において、ロボットが時刻  $t_0$  から  $t_1$  のまで顔に触れた時、 $t_1$  の手先位置  $\hat{\mathbf{r}}$  は、

$$\hat{\mathbf{r}} = F(\theta_{t_0}) + \int_{t_0}^{t_1} f(\Delta\theta_s) dt \quad (2)$$

と表すとする。  $F$  は関節角度空間の SOM の cell に結び付いている位置情報への変換であり、  $f$  は 2 章で述べた関節角度の変位と画像空間の変位の関係に関連づける関数である。一般的には、ロボットの姿勢に応じて  $f$  は異なる写像となるが、ここでは手先が視野内にあるときに得られた関係をそのまま用いる。

この推定された仮想的な手先位置  $\hat{\mathbf{r}}$  に対して、自己組織化マップと同様の更新を以下のように行う。すなわち、触覚の表象空間において、この  $\hat{\mathbf{r}}$  に最も近い位置情報を持つ触覚センサ  $c$  とする。

$$c = \arg \min_i \|\hat{\mathbf{r}} - \mathbf{r}_i\| \quad (3)$$

このとき、 $i$  番目のセンサに対応づけられる仮想的な手先位置  $\mathbf{r}_i$  を以下のように更新する。

$$\Delta \mathbf{r}_i(t) = \alpha(t) \exp(-\|\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_c\|/\gamma)(\hat{\mathbf{r}} - \mathbf{r}_i(t-1)) \quad (4)$$

ここで、 $\alpha(t)$  は学習回数とともに減少する学習率であり、 $\mathbf{s}$  は触覚の表象空間上の位置である。

### 3.3 関節角度空間と視覚空間の統合の学習

$\hat{\mathbf{r}}$  に最も近い位置情報を持つ関節角度空間の SOM のノードを探し、そのノードに対しても上記と同様な更新を行う。

## 4 実験

提案したモデルの有効性をシミュレーションによって示す。腕は 5 自由度を持つロボットを設定し、顔の接触センサは Fig. 2 に示すように格子状に配置されている。

### 4.1 手先位置推測モデルの実験

2 章で述べたようにロボットが視野内で手先をランダムに動かした時に得られる情報から、関節角度の変位と画像空間の変位の関係に関連づける関数  $f$  をニューラルネットワークでバックプロパゲーション法によって学習させた。この時学習係数は 0.2、学習回数は 200 回とした。ロボットが視野外にある自身の顔の表面に触れた時の実際の  $\Delta \mathbf{r}_s$  と、 $\Delta \theta_s$  から学習した  $f$  によってロボットが推測した  $\Delta \mathbf{r}_{s'}$  を比較したものを Fig. 3 (a) に、 $\Delta \mathbf{r}_s$

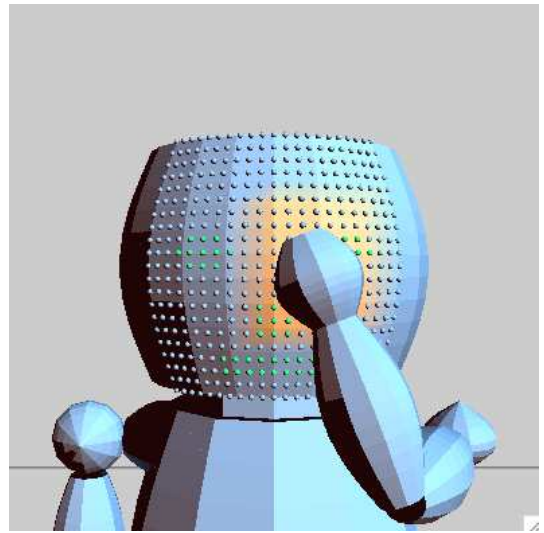


Fig.2 The face of the robot

と  $\Delta \mathbf{r}_{s'}$  を時間積分し、視覚空間上の手先位置の軌道として比較したものを Fig.3 (b) に示す。結果より視野外においてもロボットが視野内で学習したヤコビの関係  $f$  を用いて自身の関節角度から実際の動きに近い手先軌道を推測できていることがわかる。

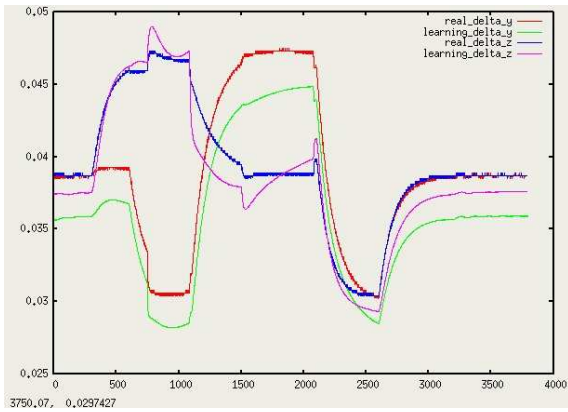
### 4.2 顔表面に対応した仮想的視覚座標の獲得

Fig. 2 に示すロボットモデルに対して、提案手法を用いて顔表面上の触覚の仮想的な視覚座標への対応付けを行った。ロボットは左手の手先を使って顔表面のランダムな位置をなぞり、触覚センサが反応すると仮想的な手先の視覚座標が計算され、それぞれの触覚センサに対応する仮想的な視覚座標が前章で述べた更新式によって更新される。Fig. 4 に各学習段階における仮想的な視覚座標上の触覚センサの位置を示す。緑のマーカは目、口、鼻に対応するセンサを示す。学習の後期には、位置については歪んでいるものの、ほとんどセンサにおいて相対的な位相関係が正しく写像されていることが分かる。一方で、手先が届かず頻度の少ない端の触覚センサに対しては、相対位置も大きく歪んでいる。

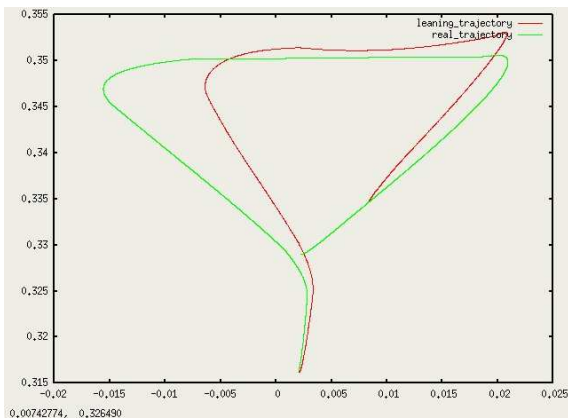
## 5 まとめと今後の展望

本研究では、視野外の身体像の獲得として、顔表面の触覚配置を仮想的な視覚座標で表現した。しかし、現状では視覚においては 2 次元的な認識しか行っておらず、身体像を 3 次元的に空間表現することはできない。今後、視覚で 3 次元的な認識を可能とすることで、背中などの身体像の獲得に発展させる必要がある。

また、もう一つの興味深い発展として、他者との身体部位の対応の獲得の問題がある。前述したように、新生児模倣の代表的モデルとして AIM モデルがあげられている。このモデルが確立するために必要な能力の 1 つである「Organ Identification」に注目してみると、乳児がこの把握能力をいつどのようにして獲得したのかはいまだはっきりとしていない。ここで、在胎期間 24 週から 27 週の頃の胎児にしきりに見られる、顔を撫でたり指を握ったりする行為に注目すると、本稿のモデルをこの能力の獲得メカニズムのモデルとして提案ができるのではないかと考えられる。胎児はこの動きの中で、自身の腕の動きと感覚が反応する部位の相関をとっていると仮定すると、腕の動きを通して自身の各パーツ配置の平面的なトポロジー(要素のつながり)を大まかに獲得していると考えられる。出生後には、次第に視力が発達し特徴を見分



(a) Imaginary and real displacement



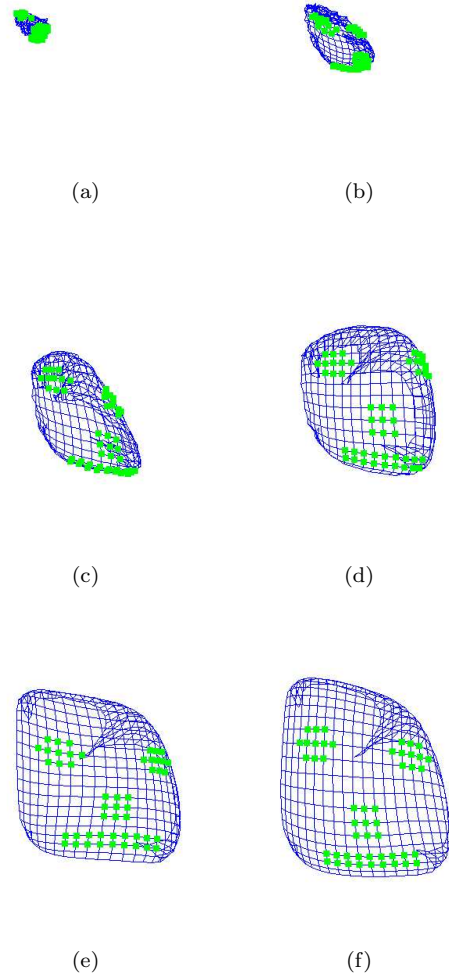
(b) Imaginary and real trajectories of the hand

**Fig.3** result of the learning of the Jacobian determinant

けることが可能になり，自身が内面に持っているトポロジーと類似したトポロジーを養育者の顔のパーツ配置に見出し，要素を一致させることで顔のイメージを獲得しているのではないかと提案できる。

### 参考文献

- [1] Ramachandran, V. S. and Blakeslee, S.: Phantoms in the Brain: Probing the Mysteries of the Human mind. William Mollow, 1998.
- [2] Atsushi Iriki, Michio Tanaka, Shigeru Obayashi and Yoshiaki Iwamura: Self-images in the video monitor coded by monkey intraparietal neurons. *Neuroscience Research*, 40, 163-173, 2001.
- [3] Cota Nabeshima, Max Lungarella and Yasuo Kuniyoshi: Timing-Based Model of Body Schema adaptation and its Role in Perception and Tool Use: A Robot Case Study, The 4th IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL-05), Osaka, Japan, July, 2005.
- [4] Yuichiro Yoshikawa, Hiroyoshi Kawanishi, Minoru Asada, Koh Hosoda: Body Scheme Acquisition by Cross Modal Map Learning among Tactile, Visual and Proprioceptive Spaces. *Proceedings of the 2nd*



**Fig.4** Touch sensors mapped on the imaginary visual field

International Workshop on Epigenetic Robotics, pp.181-184, 2002.

- [5] Andrew N. Meltzoff and M. Keith Moore, Explaining Facial Imitation: A Theoretical Model. *Early Development and Parenting*, Vol.6, 179-102, 1997.