複数センサデータの不変性に基づく身体の発見 声川雄-郎^{*1}細田 耕^{*1*2}浅田 稔^{*1*2} 辻 義 樹^{*1}

Body finding based on the invariance in multiple sensory data

Yuichiro Yoshikawa^{*1}, Koh Hosoda^{*1*2}, Minoru Asada^{*1*2} and Yoshiki Tsuji^{*1}

Finding the body in uninterpreted sensory data is one of the fundamental competences to construct the body representation that influences on adaptability of the robot to the changes in the environment and the robot body itself. The invariance of sensation seems a promising key information to find the self body since the sensory data are considered to be consistent in self body observation. To discriminate its body from non-body, the robot should complementarily utilize the invariance in multiple sensory data since single sensory data involve noise or a certain ambiguity occurred in the observation process. In this paper, we propose a method to discriminate body from non-body based on a conjecture about the distribution of the variance of sensations in terms of each observing posture. It can be approximated by a mixture of two Gaussian distributions for observing the body and non-body, respectively. After estimating the distribution by an EM algorithm, the robot can discriminate body from non-body by judging which distribution likely causes the variance of sensory data in the current observing posture. Experiments with real robots show the validity of the proposed method.

Key Words: body finding, acquisition of body representation, invariance in self-body-observation

1. はじめに

従来のロボティクスでは,外部観測者の視点から導入した座 標系でロボットのタスクが与えられることが多かったため,タス ク遂行に必要な身体の表現は,設計者の手によって同じ座標系 で定義・較正される必要があった(例えば[1][2]).しかしこの ように設計者の導入した座標系でロボットの身体を定義するア プローチでは,環境やロボット自身の身体の変化に対する適応 性が設計者の想定した範囲に限られてしまうという問題がある. 一方,ロボット自身が環境へ働きかけることを通じセンサデー タを構造化することで,タスク達成のための感覚・運動変換の 学習を簡単化する情報の抽出が可能であることが指摘されてい る[3].このように,設計者が導入した座標系に基づく代わりに, ロボット自身のセンサ空間上にタスクを定義し,ロボット自身 の視点からタスク達成のための変換を学習するアプローチによ り,適応性の高いロボットを実現できる可能性がある.このア プローチに従うとき,タスク遂行に必要な身体の表現をロボッ

学術・技術論文

トのセンサ空間でどのように構成可能かを考える必要がある. 一方,生物の自己の身体についての意識は身体像ないし身体 図式と呼ばれ,道具使用[4]や模倣[5][6]など,運動や認知のメ カニズムの基盤となる要素として注目を集めている.その獲得 過程について発達心理学[7]や比較認知科学[8]の分野などで研 究が進められているが,まだ明らかであるとは言えない.従っ て身体表現を獲得するロボットの実現は,知能ロボットの設計 論の確立と生物の知能の構成論的理解の両方を同時に目指す認 知発達ロボティクス[9]の課題としても非常に興味深い.

ロボットの身体表現の獲得に関する従来研究は,何が仮定されているかという観点から,3つに分類される.

(1)身体の抽出方法

逆運動学や逆動力学[10],あるいは身体の広がり[11][12] などの学習を扱った従来研究では,注目すべき身体をセン サデータから抽出する方法が既知であることが仮定された. しかし設計者があらゆる状況を想定して身体抽出方法を実 装することは困難であるので,ロボットがセンサデータか ら身体を自律的に抽出できることが望ましい.

(2)身体構造についての先見的知識

ロボットが自律的に身体を発見する方法として,運動指 令と相関のあるオプティカルフローが生じることを利用し て,視覚センサデータの運動指令に対する相関係数[13]~ [15] や状態遷移モデル[16]の推定により,視覚センサ上に

原稿受付

^{*1}大阪大学大学院工学研究科 知能・機能創成工学専攻

^{*2}阪大フロンティア研究機構

^{*1}Dept. of Adaptive Machine System, Graduate School of Engineering, Osaka University

 $^{^{\}ast 2}{\rm HANDAI}$ Frontier Research Center

吉川雄一郎 細田 耕 浅田 稔 辻

自身の身体を発見する手法がある.これらの手法では,視 点が移動する場合,視野全体にその運動と相関のあるオプ ティカルフローが生じてしまうため,視覚センサは環境に 対して静止していなければならなかった.このため,ロボッ トはどの自由度が視覚センサを動かす自由度であるかを知っ ている必要があった.しかしロボットの実装によらず身体 の発見を実現するには,このような身体構造についての先 見的知識が不要である枠組みが望ましい.

(3)知覚における身体の拘束

ロボットのセンサデータは身体が受ける物理的拘束を反 映する.従って身体構造についての先見的知識がなくても, 収集されるセンサデータの統計的性質を見ることによって 身体表現を発見できると考えられる.収集されたセンサデー タの統計的性質から,身体表面に分布するセンサのトポグ ラフィーを構築したり[17][18],身体が存在する空間の概 念を発見する手法[19] などがこのような身体表現につなが ると考えられるが,センサデータのどの部分が身体である かを発見するには至っていない.

本研究では身体構造についての先見的知識がないという仮定 の下に,知覚における身体の拘束に基づき,センサデータから 身体を受容した部分を抽出する手法を提案する.身体について の知覚は環境によらずおおむね一定であるという考察から,セ ンサデータがロボットの姿勢に対して不変であるか否かをもっ て身体を定義できると考えられる.そこで本論文では,複数の センサデータについて,このような不変性の混合正規分布モデ ルを導入し,複数のセンサを相補的に利用して身体・非身体を 識別する手法を提案する.

以下では,第2章において,問題設定とセンサデータの不変 性に基づいて身体を発見する手法の基本的なアイデアについて 説明し,第3章で不変性の混合正規分布モデルに基づいた身体・ 非身体の識別手法を導入する.第4章で,実ロボットを用いた 実験により,複数のセンサデータの相補的な利用によって身体・ 非身体の識別が実現されることを確認し,最後に討論と結論を 示す.

2. 不変性に基づく自己身体の発見

2.1 問題設定

ロボットは,例えばカメラやタッチセンサのような,外界を 観測するためのセンサによって自身の身体も観測できるような 身体構造を持ち,さらに姿勢を検出する固有感覚センサを備え ているとする.外界センサの信号から,いくつかの特徴抽出過 程を経て,複数のセンサデータが生成される(Fig.1).ロボッ トはこれらのセンサデータと固有感覚センサのデータのそれぞ れを異なるモダリティとして扱うことができるとする.ただし, センサデータから身体を抽出する方法は未知であるとする.例 えば,ロボットは自分の身体が何色であるか教えられないし,ど のようなテクスチャを持っているかも教えられない.ロボット のタスクは,以上の仮定の下で,現在の姿勢における知覚が身 体を観測したことによって生じているものなのか,外界を観測 したことによるものなのかを識別することである.



義 樹



2.2 身体を観測する場合の不変性

ロボット自身の身体を受容したセンサデータはロボットの姿 勢に関しておおむね不変であると考えられる.例えば,ロボッ トがある姿勢で外界の物体を注視したとき,同じ姿勢であって も外界の状況によって,捉えられる刺激は変わってしまう(Fig. 2(a) と(b)).しかし,ロボットが自身の身体を注視する姿勢で は,外界の状況によらず,統計的に同じ身体部位が見える(Fig. 2(c) と(d)).触覚センサを用いる場合も同様に,自分自身を触 る姿勢のときのセンサデータ,外界を触る姿勢のときのセンサ データはそうではない(Fig.3).従って,センサデータが捉えてい るものが身体であるか,あるいは環境であるかを判定すること ができる.すなわち,同じ姿勢で常に観測されるものが身体と 定義される.



Fig. 2 The invariance/variance of the view in terms of postures: when it observes the environment ((a) and (b)), what it observes depends on the environment. When it observes its body ((c) and (d)), it can observe the same part of the body independently of the environment.

センサデータと受容される身体の特性の組み合わせによって は,姿勢の摂動や外乱等の影響のため,身体を観測する姿勢で あっても不変性を常に見出せるとは限らない.従って,単一の センサデータを用いるとき,身体の一部しか正しく身体とみな すことができない,もしくは身体でないものを身体とみなして しまうことが予想される.例えばセンサデータとして,視差と 輝度値パターンを考える.身体のように空間的に連続する対象





(a) a posture with the invariant touch

(b) a posture with the variant touch

Fig. 3 The invariance/variance of the tactile sensations in terms of postures: when it touches its own body (a), it can always touch the same parts of the body. When it touches the environment (b), what it touches depend on the environment.

を観測するとき,視差は姿勢の摂動に対して鈍感であるが,粗 いテクスチャを持つ対象に対しては計測されにくい.一方,画 素の輝度値パターンは対象のテクスチャによらず計測すること ができるが,テクスチャが細かい場合は姿勢の摂動に対して敏 感である.従って複数のセンサデータを相補的に用いて,身体 と非身体の識別を実現する枠組みが必要である.つまり,細か いテクスチャを持つ身体部位では視差の,粗いテクスチャを持 つ身体部位では画素の輝度値パターンの分散が小さくなるため, これらを相補的に利用すればテクスチャによらない身体の発見 が可能であると考えられる.

- 3. 複数センサデータの不変性の混合正規分布モデルに基 づく身体・非身体の識別
 - **3.1** 混合正規分布モデル

複数のセンサデータを相補的に利用して身体の発見を実現するため,複数センサデータの不変性を表現するモデルを導入する.ロボットは,視差や輝度値など,D種類のセンサデータによる観測が可能であるとする.姿勢 $\theta \in \Re^N$ におけるi番目のセンサデータを $x_i(\theta) \in \Re^{M_i}, (i = 1, \dots, D)$ とする.ただし, θ はアームやカメラヘッドなど,ロボットの全ての関節の姿勢を要素とするベクトルであり,Nはその自由度である.また M_i はi番目のセンサデータの次元である.本論文では, $x_i(\theta)$ の分散をその共分散行列 $C(\theta)$ のトレース $\sigma_i^2(\theta) \triangleq tr[C(\theta)]$ とみなし,これをD種類のセンサデータについて集めた

$$\boldsymbol{z}(\boldsymbol{\theta}) = [\tilde{\sigma}_1(\boldsymbol{\theta})^2, \cdots, \tilde{\sigma}_D(\boldsymbol{\theta})^2]^T \in \Re^D, \quad (1)$$

を観測分散ベクトルと呼ぶ.ここで $\tilde{\sigma}_i^2(\theta)$ は, $\sigma_i^2(\theta)$ の対数の 最小値・最大値がそれぞれ 0 および 1 となるように正規化した ものである.

センサデータは身体の観測と外界の観測の両方によって生じ, 身体を観測するときのセンサデータの分散は外界を観測すると きのそれに比べ小さいと考えられる.そこで,各姿勢に対する センサデータの分散の分布は,身体の観測に起因するものと環 境の観測に起因するものの二つの混合正規分布であると仮定す る (Fig. 4 参照).すなわち, z の分布は

$$p(\boldsymbol{z};\alpha) = w_b \mathcal{N}(\boldsymbol{z};\boldsymbol{\mu}_b,\boldsymbol{\Sigma}_b) + w_e \mathcal{N}(\boldsymbol{z};\boldsymbol{\mu}_e,\boldsymbol{\Sigma}_e) \quad (2)$$

で与えられるとする.ここで, $\mathcal{N}(z; \mu, \Sigma)$ は,平均 μ ,共分散 Σ のzの正規分布を表し,添え字のbとeはそれぞれ,身体 と外界を表す.正の重み w_b と w_e は $w_b + w_e = 1$ を満たす.



Fig. 4 Mixture of Gaussian distribution model of the invariance of multiple sensory data

3.2 混合正規分布の推定

ロボットの姿勢が q_{θ} 個に量子化されているとき,ロボットは $z(\theta_i), (i = 1, \dots, q_{\theta})$ を計測することができるが,それぞれの $z(\theta_i)$ がどちらの分布から生じたのかは計測できない.従って, 混合正規分布を推定には,不完全データからパラメータの最尤 推定を行う理論的枠組みである EM アルゴリズム [20] を適用 する.

EM アルゴリズムでは,与えられた初期パラメータに対し, E-step と M-step を収束するまで繰り返し適用し,不完全デー タ $Z = \{z(\theta_1), \dots, z(\theta_{q_\theta})\}$ の対数尤度関数,

$$\mathcal{L} = \log p(Z|\alpha), \tag{3}$$

を最大化するパラメータ $\alpha = \{w_b, \mu_b, \Sigma_b, w_e, \mu_e, \Sigma_e\}$ を推定 する.E-step は,Z とパラメータの推定値 $\alpha^{(t)}$ が与えられた ときの完全データ $\{Z, H\}$ の対数尤度関数の期待値,

$$Q(\alpha|\alpha^{(t)}) = E_Z\{\log p(Z, H|\alpha)|Z, \alpha^{(t)}\}$$
(4)

を計算するプロセスである.ここで,H はそれぞれの $z(\theta)$ がどちらの分布に属するのかを示す隠れパラメータである.M-stepでは, $Q(\alpha|\alpha^{(t)})$ を最大化するよう, α が更新される.上記の E-step と M-step の繰り返しにおいて,対数尤度関数が単調増 加することが知られている [20].

ロボットのタスクは,現在の姿勢において観測している対象 が身体であるか,非身体であるかの識別である.これは,収集 したセンサデータから推定した混合正規分布を用いて,現在の 姿勢に対するセンサデータの分散 *z*(*θ*) がどちらの正規分布に 属するのかを判定することで実現される.本稿では,尤度の大 小によってこれを判定する.

4. 実 験

4.1 センサデータの相補的利用による身体の発見

Fig. 5 (a) に示すような実ロボットを用いて,提案手法によ リ,センサデータを相補的に利用して身体を発見可能であるこ とを示す.ロボットは二つのカメラを有し,センサデータとし て,左カメラ中心の視差,輝度値パターン,平均彩度,平均エッ ジ方向を獲得する.ロボットは二つのカメラが搭載されるカメ 吉川 雄一郎 細田 耕

ラヘッド,アーム,移動台車を有し,カメラヘッドはパン・チ ルト方向に運動することができる.アームは4自由度を有する が,結果の解釈を容易にするために,以下の実験では固定した. 提案手法がセンサデータを相補的に利用可能であることを示す ため,ロボットのアーム表面に2種類のテクスチャを貼り付け て実験を行った.Fig.5(b)は自身のアームを眺めるロボットの 視野の一例である.画面中央の正方形の領域は注視窓を示して おり,この領域の平均輝度値を平均輝度値パターンと呼ぶ.本 実験で用いた画像全体のサイズは240×180 [pixel] であり,注 視窓のサイズは8×8 [pixel] とした.



(a) The robotic test-bed



(b) An egocentric view of the robot

Fig. 5 The robotic test-bed: (a) the whole body and (b) an egocentric view

ロボットはランダムにカメラヘッドの姿勢を変えながら,様々 な姿勢でのセンサデータを収集し,各姿勢におけるセンサデー タの平均と分散を学習する、学習の間,ロボットが移動台車に よってランダムに動き回ることによって,環境は時々刻々変化 する、Fig.6(a)の右側の図は,例として,カメラヘッドの各 姿勢において獲得された平均輝度値パターンをパン(横軸)と チルト(縦軸)の順に並べて示したものである.ロボットのタ スクは獲得されたセンサデータから身体を捉えている部分のみ を抽出することである、従って,身体を捉えているとみなされ た姿勢における平均輝度値パターンをカメラヘッドの姿勢ごと にプロットしたものが,Fig.6(b)のように,実際に身体が捉

耕 浅田 稔 辻 義樹

えられている姿勢におけるそれと一致するかどうかで,提案手法を評価する.



(a) schematic examples of observing posture and the correction of the average luminance pattern in each posture



(b) the extracted body by a human experimenter

Fig. 6 Acquisition of sensory data and the desired extraction of the body

4.1.1 輝度値パターンを用いた身体-非身体の識別 (D = 1) センサデータとして, 左カメラの中心領域 (8 × 8 [pixel]) の 輝度値パターンを用いて身体-非身体の識別実験を行った.Fig. 7(a)は,輝度値パターンの分散の分布(ヒストグラム)とEM アルゴリズムにより推定された混合正規分布(実線)を示して いる.分散の低い側にある正規分布が身体を観察する姿勢にお ける輝度値パターンの分散の分布に,高い側が外界を観察する 姿勢における輝度値パターンの分散に対応すると考えられる. Fig. 7(b) は身体を観測していると判定された姿勢における平 均輝度値パターンを示している. Fig. 7 (b) と 目標の抽出結果 である Fig. 6 (b) を比較すると, 粗いテクスチャを持つ身体部 分については比較的正しく身体であると識別ができているのに 対し,細かいテクスチャを持つ身体部分については,外界であ るとみなしている部分があることがわかる.これは,細かいテ クスチャの輝度値パターンが,姿勢の違いに対して敏感に変化 するためであると考えられる.

4.1.2 視差を用いた身体-非身体の識別 (D = 1)

センサデータとして左カメラの中心領域の視差のみを用いて, 身体-非身体の識別実験を行った.Fig.8(a)は,視差の分散の 分布(ヒストグラム)とEMアルゴリズムにより推定された混 合正規分布(実線)を示している.Fig.7(a)と同様に,分散 の低い側の分布が身体を,高い側が外界を示していると考えら れる.Fig.8(b)は身体を観測していると判定された姿勢にお ける平均輝度値パターンを示している.Fig.8(b)を目標の識



Fig. 7 Body-nonbody discrimination with luminance pattern

別結果 (Fig. 6 (b)) と比較すると,センサデータとして輝度値 パターンを用いた場合の結果とは逆に,細かいテクスチャを持 つ身体部分については正しく身体であると識別ができているが, 粗いテクスチャを持つ身体部分について,外界であるとみなし ている部分があることがわかる.これは,粗いテクスチャを持 つ部分で,視差を計算するためのステレオマッチングの精度が 悪くなっているためであると考えられる.



Fig. 8 Body-nonbody discrimination with disparity

4.1.3 輝度値パターンと視差を用いた身体--非身体の識別 (D = 2)

単一のセンサデータを用いた身体-非身体の識別実験では,そ れぞれのセンサデータの性質に応じて,正しく身体-非身体が識 別できる部分が異なることがわかった.そこで次に,これらの センサデータを組み合わせることにより,相補的に身体-非身体 の識別が可能であることを示す実験を行った.

Fig. 9 はセンサデータとして, 左カメラ中心領域の視差と 8×8[pixel] の輝度値パターンの両方を用いた実験 (D = 2) の 結果を示している.Fig. 9(a) は視差と輝度値パターンの分散 の分布であり, Fig. 9(b) は EM アルゴリズムにより推定され た混合正規分布である.単一のセンサデータを用いた場合と同 じく,分散の低い側の分布が身体を,高い側が外界を示してい ると考えられる.Fig.9(c) は身体を観測していると判定された 姿勢における平均輝度値パターンを示している.Fig.9(c) は単 ーのセンサデータを用いた場合の結果 (Fig.7 (b) および Fig. 8 (b)) に比べ,目標の抽出結果(Fig. 6 (b)) に近く,それぞれ 単一のセンサデータを用いた場合では,正しく識別できていな かった身体部分に関して相補的に働いていることがわかる.





(a) distribution of observing variance

(b) the estimated distribution



(c) the extracted body

- Fig. 9 Body-nonbody discrimination with luminance and disparity
 - 4.1.4 輝度値パターン,視差,色,エッジ方向を用いた身 体・非身体の識別(D = 4)

さらに, 左カメラ中心領域の平均彩度および平均エッジ方向 を加えて,実験を行った.Fig. 10 (a) は左カメラ中心領域の平 均彩度のみを用いたとき (*D* = 1) に,身体を観測していると判 定された姿勢における平均輝度値パターンを示したものであり, Fig. 10 (b) は平均エッジ方向を用いたとき (*D* = 1) のもので ある.単一のセンサデータとして,視差や輝度値パターンを用 いた識別結果 (Fig. 7(b) および Fig. 8(b)) に比べ,比較的広 い範囲で外界を身体として識別してしまっている部分があるこ とが分かる.これらのセンサデータを加え,左カメラ中心の視 差,輝度値パターン,彩度,平均エッジ方向を用いた場合でも, 輝度値パターンと視差を用いた結果 (Fig. 9) と同程度,ある いはわずかではあるが,目標 (Fig. 6(b)) により近い識別結果 が得られた (Fig. 11).

以上の実験から,単一で用いた場合では,身体の一部を環境 とみなしてしまったり,環境の一部を身体と誤ってみなしてし まうようなセンサデータであっても,提案手法により同時に用 いることで,これらを相補的に利用して,身体・非身体の識別 が可能であることが確認された.

4.2 ヒトに似た身体表面を持つロボットによる身体発見実験 提案手法による身体発見が,特定の身体に特化したものでな

吉 川 雄一郎 細 Ħ 耕 浅 田 稔 i+ 義 樹



rection of edge

Fig. 10 Body-nonbody discrimination with additional sensory data



Fig. 11 Body-nonbody discrimination with four kinds of sensory data, luminance, disparity, color, and direction of edge

いことを示すため、4.1節の実験とは全く異なる外見のロボット においても身体の発見が可能であることを示す.実験には,Fig. 12(a) のような, 頭部が一つのカメラと置き換わった以外は人 間の乳児とほぼ同じ外見を持つロボットを用い、センサデータ として,カメラ画像中心の輝度値パターンと平均彩度を用いる. カメラはパン・チルト方向に駆動可能であり,ロボットの自由度 はこの二つである.ロボットはランダムにカメラの姿勢を変え ながら,様々な姿勢でのセンサデータを収集し,各姿勢におけ るセンサデータの平均と分散を学習する.学習の間,実験者が ロボットをランダムに移動させ,ロボットに対する環境を時々 刻々変化させる. Fig. 12(b) はロボットの視野の一例である.



(a) An appearance of the body

(b) An example of egocentric view

Fig. 12 A test-bed robot with an infant-like appearance

Fig. 13(a) は輝度値パターンと色の両方を用いて身体発見を 行った結果である.一部,環境を身体とみなしている領域があ るが,おおむね正しく身体を抽出できていることがわかる.Fig. 13(b) と(c) は輝度値パターンと色の分散の分布と推定された 混合分布であり, それぞれのセンサデータの分散のみの軸で見 ると二つの分布は重なる部分が多いが,両方の軸を用いるとこ れらの重なり部分が減っていることがわかる.従って,人間の 乳児のような身体表面を持つようなロボットにおいても、複数 のセンサデータの相補的な利用によって,身体発見が実現可能 であることが確認できた.



(a) found body



Fig. 13 Body-nonbody discrimination by an infant-like robot with luminance and color

5. 結 言 と 討 論

本稿では,センサデータの不変性によって観測対象が自己の 身体であるか否かを判別できるという考え方に基づき、センサ データから身体を発見する手法を提案した.提案手法では,身 体を観測したことによるセンサデータの分散の分布と環境を観 測したことによるそれが混合正規分布で近似されると仮定し、 現在の観測がこれのどちらに属するかを判定することで,観測 対象が自己の身体であるかを判定が可能である.例えば,外形 が変化するケースや,柔軟な素材に埋め込まれた触覚センサの ように,事前にセンサが身体をどのように捉えるかがわかりに くいケース,あるいは,観測時にセンサに加わるノイズが未知 であるケースにおいて,ロボットが動いてみることで,センサ データの不変性として身体が発見可能であると期待される.

実ロボットを用いた実験により,ロボットの身体表面の特性 によらず,複数のセンサデータを相補的に利用して身体・非身 体の識別が可能であることを確認した.センサデータと身体の 特性の組合わせによっては二つの正規分布が重なりあってしま うことがあるが、さらに多くのセンサデータを組み合わせるこ

とで,重なりの少ない高次元の混合正規分布を得ることができ ると考えられる.ただしセンサデータの次元の増加によって混 合正規分布の推定の探索空間が増大してしまうことに注意が必 要である.

本論文では結果の解釈を容易にするため,ロボットの自由度 はカメラヘッドのみに限定した実験を行ったが,これは提案手法 がアームなどカメラヘッド以外の自由度での運動を許容しない 枠組みであることを意味しない.カメラヘッド以外の自由度で の運動がある場合も,姿勢の要素にその自由度を追加すれば同 じ議論の展開が可能である.ただし姿勢の次元数を増やせば必 要なセンサデータの数も増えてしまうことに注意が必要であり, 効率的に姿勢を量子化する方法について検討する必要がある.

提案手法によりロボットができるようになったことは,現在 の姿勢において視覚で観察されるものが身体であるか否かの判 定のみであり,ロボットがタスクを実現するための身体表現と しては不足である.今後の課題の一つとして,複数の感覚様式 による身体表現の獲得に取り組む必要がある.複数の感覚様式 による知覚を考えるとき,各様式の受容野が有限であるために, 異なる様式では常に同じものが知覚されるとは限らず,統合が 困難であるという問題がある.我々は,この問題に対しても,自 分の身体を観測する際の不変性が利用できると考えており,こ れを利用して自身に対する接触と注視を結びつける方法を既に 提案している[21].また獲得された身体表現をどのようにタス クに適用するかも,同時並行して,考えていく必要がある.

自身の運動とセンサデータの相関に基づいて身体を発見する 方法[13]~[16]は、前述の通り、身体構造に関する先見的知識 を必要とし、また視覚センサが環境に対して静止していなけれ ばならないため、視覚センサと環境の間にある身体部位、例え ば胴体や足などはこの方法では発見することはできない.しか し人間の身体表現獲得過程のモデル化という観点からは、もっ ともらしい方法であると考えられる.実際、3-5ヶ月の乳児が 自身の運動との関係で自身の身体を捉えていることを示すデー タがある[7].本論文で我々はこれと異なるアプローチで身体発 見が可能な方法を提案したが、運動との相関に基づくアプロー チを否定するものではなく、両者のアプローチの手法は相補的 に機能しうると考えている.従って、ロボットの運動を考慮し た形に手法を拡張することが今後の課題となる.また構成論的 研究の観点から、センサデータの不変性に基づく身体発見をサ ポートするような観察を得ることも今後の課題の一つである.

謝辞 本研究は,21世紀型革新的先端ライフサイエンス技術 開発プロジェクト,萌芽・融合開発プログラム「動的インタラ クションによるコミュニケーション創発機構の構成と解明(タ イプA)」,ならびに,日本学術振興会特別研究員奨励費の援助 を受けた.

参考文献

- J.J. Kuffner, S. Kagami, K. Nishiwaki, M. Inaba, and H. Inoue. Dynamically-stable motion planning for humanoid robots. *Autonomous Robots*, Vol. 12, No. 1, pp. 105–118, 2002.
- [2] 藤原清司,金広文男,比留川博久.バランス制御と共存可能なヒューマノイドの障害物回避アルゴリズム.日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 6, pp. 639-646, 2003.

日本ロボット学会誌 xx 巻 xx 号

- [3] 石黒章夫,小林宏,細田耕監訳(編).知の創成 -身体性認知科学への 招待-,第12章センサーモータ協調の原理.共立出版,2001.
- [4] A. Maravita and A. Iriki. Tools for the body (schema). Trends in Cognitive Sciences, Vol. 8, No. 2, 2004.
- [5] 村田哲. ミラーニューロンとボディイメージ. 数理科学, Vol. 39, No. 12, pp. 69–77, 2001.
- [6] L. Berthouze and S. Itakura. Possibility of self-recognizing robots: From the perspective of research on nonhuman primates. Japanese Journal of Cognitive Studies: Consciousness: Toward a Cognitive Science of Brain and Mind (Special Issue), Vol. 4, No. 3, pp. 120–127, 1997.
- [7] P. Rochat. Blackewell Handbook of infant development, chapter Origins of Self-concept. Blackwell Publishing Ltd, 2004.
- [8] 板倉昭二. 自己の起源 比較認知科学からのアプローチ. 金子書房, 1999.
- [9] M. Asada, K. F. MacDorman, H. Ishiguro, and Y. Kuniyoshi. Cognitive developmental robotics as a new paradigm for the design of humanoid robots. *Robotics and Autonomous System*, Vol. 37, pp. 185–193, 2001.
- [10] 川人光男. 脳の計算理論,第5章教師あり運動学習. 産業図書, 1996.
- [11] Y. Yoshikawa, H. Kawanishi, M. Asada, and K. Hosoda. Body scheme acquisition by cross modal map learning among tactile, image, and proprioceptive spaces. In Proc. of the Second Intl. Workshop on Epigenetic Robotics, pp. 181–184, 2002.
- [12] K. F. MacDorman, K. Tatani, Y. Miyazaki, and M. Koeda. Proto-sysmbol emergence. In Proc. of the Intl. Conf. on Intelligent Robot and Systems, pp. 1619–1625, 2000.
- [13] M. Marjanovic, B. Scassellati, and M. Williamson. Self-taught visually-guided pointing for a humanoid robot. In Proc. of the Fourth Intl. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior, 1996.
- [14] P. Fitzpatrick and G. Metta. Toward manipulation-driven vision. In Proc. of the Intl. Conf. on Intelligent Robot and Systems, pp. 43–48, 2002.
- [15] P. Michel, K. Gold, and B. Scassellati. Motion-based robotic self-recognition. In Proc. of 2004 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 2763-2768, 2004.
- [16] M. Asada, E. Uchibe, and K. Hosoda. Cooperative behavior acquisition for mobile robots in dynamically changing real worlds via vision-based reinforcement learning and development. Artificial Intelligence, Vol. 110, pp. 275–292, 1999.
- [17] D. Pierce and B. Kuipers. Map learning with uninterpreted sensors and effectors. *Artificial Intelligence*, Vol. 92, pp. 169– 229, 1997.
- [18] Y. Kuniyoshi, Y. Yorozu, Y. Ohmura, K. Terada, T. Otani, A. Nagakubo, and T. Yamamoto. From humanoid embodiment to theory of mind. In *Embodied Artificial Intelligence*, Vol. 3139 of *LNCS/AI series*, 2004.
- [19] J.K. Philipona, O'Regan, and J.-P. Nadal. Is there something out there? inferring space from sensorimotor dependencies. *Neural Computation*, Vol. 15, pp. 2029–2049, 2003.
- [20] 上田修功. ベイズ学習 [1]-統計的学習の基礎-. 電子情報通信学会誌, Vol. 85, No. 4, pp. 265-271, 2002.
- [21] Y. Yoshikawa, K. Hosoda, and M. Asada. Cross-anchoring for binding tactile and visual sensations via unique association through self-perception. In Proc. of the third Intl. Conf. on Development and Learning, 2004.

吉川雄一郎

1977 年 9 月 6 日生.2005 年大阪大学大学院工 学研究科知能・機能創成工学専攻博士後期課程終 了.同年,国際電気通信基礎技術研究所(株)知能 ロボティクス研究所研究員となり現在に至る.在学 中,2003 年 4 月より日本学術振興会特別研究員 (DC2).認知発達ロボティクスの研究に従事.博士 (日本ロボット学会学生会員)

(工学)

細田耕

1993年京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博 士後期課程修了.同年大阪大学工学部助手.1997年 同大学大学院工学研究科助教授となり現在に至る. この間1998年から1年間スイスチューリヒ大学客 員教授.ビジュアルサーボ,知能ロボットの研究に 従事.博士(工学).IEEE,計測自動制御学会の (日本ロボット学会正会員)

会員.

浅田稔 1982年大阪大学大学院基礎工学研究科後期課程修 了.同年同大学基礎工学部助手.1989年同大学工 学部助教授.1995年同教授.1997年同大学大学院 工学研究科教授となり現在に至る.この間,1980 年から1年間米国メリーランド大学客員研究員.1

学博士.電子情報通信学会,情報処理学会,人工知 能学会,日本機械学会(2003 年 4 月からフェロー),計測自動制御学 会,システム制御情報学会,IEEE RAS, CS, SMC societies などの 会員.日本赤ちゃん学会理事,NPO ロボカップ日本委員会理事,ロ ボカップ国際委員会プレジデント. (日本ロボット学会正会員)

〕 辻義樹

2004 年大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成 工学専攻博士前期課程修了.同年リコーシステム開 発株式会社に入社,現在に至る.在学中,ロボット の身体表現獲得に関する研究に従事.