

相互感覚地図の学習を通じたロボットによる身体像の獲得

大阪大学・工・知能機能創成工学専攻 浅田 稔, 細田 耕, 吉川 雄一郎

1 はじめに

知的人工物創成のための機能デバイス・システムインテグレーションプロジェクトでは、最終的な統合の象徴の一つとして、ヒューノイドロボット開発があげられている。本研究では、そのヒューノイドの感覚・知覚・認知実装技術をデバイスが出来上がってから行うのでは遅いので、本年度から並行して実施すべき項目と考え、柔軟指の試作とロボットの身体像獲得研究を行った。

2 複数の触覚を持つ柔軟指の製作

2.1 はじめに

さまざまなロボットをより身近に活動させるためには人間を傷つけないことが必要である。そのためにはロボット表面を人間の皮膚のように柔軟な素材で覆い、そこに触覚センサを配置することで接触状態を検知する必要がある。柔軟な素材に触覚センサを埋め込み、それによって各種の触覚を得ようという研究は、これまでさまざまなものが提案されている [3, 4]。しかし素材の中にセンサを埋め込むという性質上、正確にセンサを配置することは難しいと考えられる。センサの規則的な埋め込みを目的とせず、素材内にランダムに配置する研究も進められている [1, 2] が、これらの研究でも埋め込まれているセンサは単一で、素材も均一なものを用いている。

人間の指を観察すると、その内部構造は均一ではなく、表面に剛性の高い表皮、内部に剛性の低い真皮が存在し、それらの中にさまざまな種類のセンサが埋め込まれている。そして、それぞれのセンサの特性の違いや、それが埋め込まれた部分の素材の性質の違いによって、さまざまな接触、すべり状態が検出されていると考えられる。

そこで本研究では、人間の皮膚の真皮と表皮に相当する構造を異なる剛性をもつシリコンゴムで模擬し、その中に二種類の異なった特性を持つ歪ゲージと PVDF (polyvinylidene fluoride) フィルムをランダムに配置した柔軟指を製作する。そして製作した柔軟指で、木と紙の上をなぞる実験を行い、どのような情報が検出可能であるかの基礎的なデータを収集した。

2.2 柔軟指の製作

本研究で用いる柔軟指の製作手順を図 1 に示す。まず指の型に触覚センサとして歪ゲージ、PVDF フィルム各 3 枚を任意の位置、方向で挿入する。また骨の役割をする金属性のボルトも挿入する。そして型にシリコンゴム (信越化学工業製 KE-1316) を流し込み硬化させる。さ

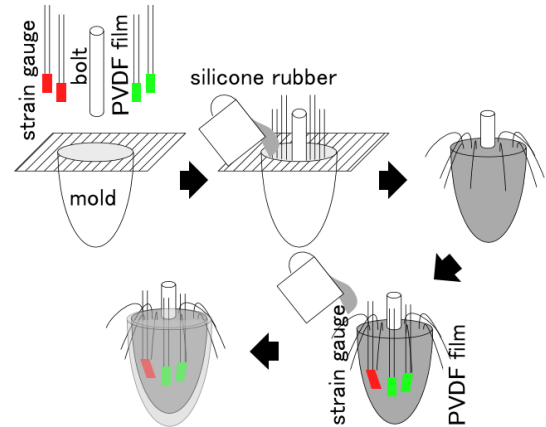


図 1 柔軟指の開発



図 2 触覚を有する柔軟指

らに硬化した指の表面に歪ゲージ、PVDF フィルム各 3 枚を張り付け、その周囲に KE-1316 よりも硬いシリコンゴム (信越化学工業製 KE-1300) の膜を生成する。この二段階の工程によって、人間の真皮と表皮の構造をまねた柔軟指となる。完成した柔軟指を図 2 に示す。

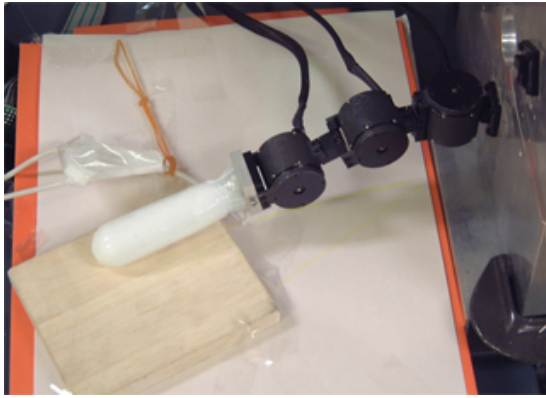
2.3 柔軟指を用いたなぞり実験

2.3.1 実験装置

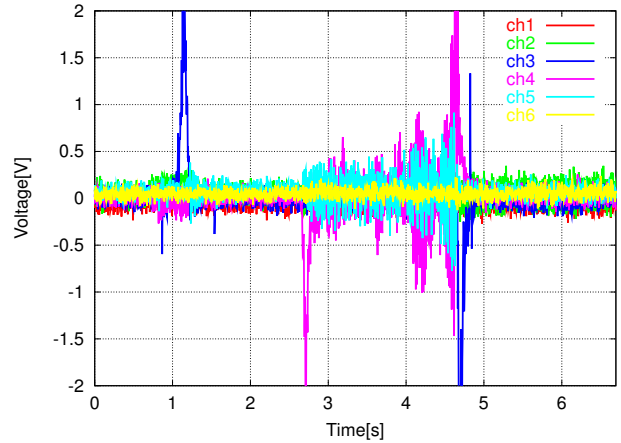
安川電機製の 3 自由度ロボット指先端に、製作した柔軟指を取り付け、種々の物体をなぞる実験を行った。実験装置の概観を図 3 に示す。

2.3.2 紙をなぞった場合

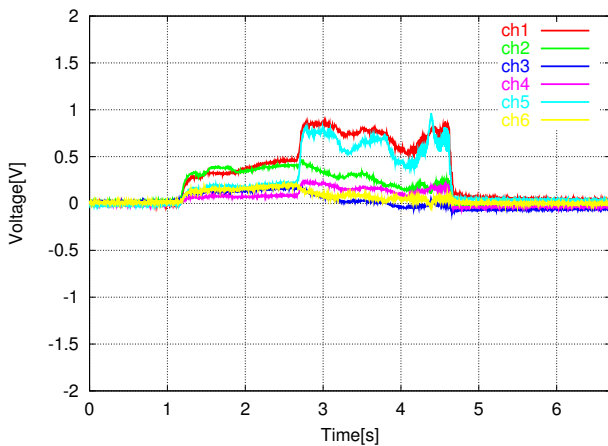
実験では一定の力で対象物体に指を押し付けた後、一定速度で物体表面をなぞる動作をした。紙 (コピー用紙) をなぞったときの歪ゲージ、PVDF フィルムの出力を図 4, 5 に示す。なお、歪ゲージのうち表皮部分に配置さ



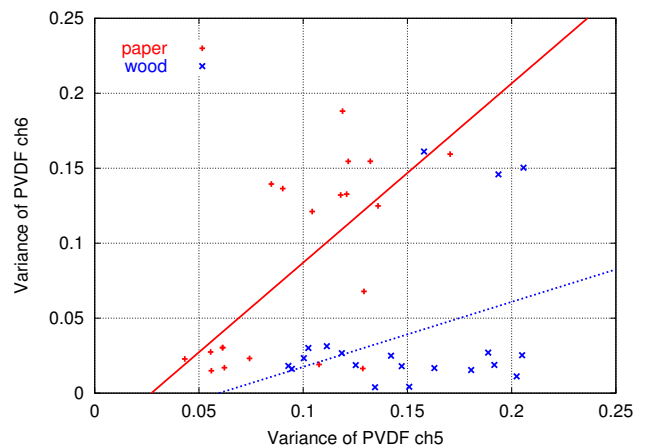
図． 3 柔軟指を有するロボットフィンガー



図． 5 PVDF フィルムの出力



図． 4 歪センサー出力



図． 6 PVDF フィルムのばらつき

れているのが ch1, ch2, ch5, 残りは真皮部分, PVDF フィルムのうち表皮部分に配置されているのが ch3, ch4, ch5 である。実験開始時には指は対象に接触しておらず、約 1[s] 後に接触し、約 2.7[s] 後まで静的に押し付け、その後なぞりを開始、4.6[s] まで対象上をなぞっている。

歪ゲージの信号は、振幅の変化はあるが、押し付け、物体表面のなぞりにおいて比較的安定している。一方、PVDF フィルムのそれは柔軟指が物体に接触したとき ch3 が特に大きな信号を出力しているが、その後はほとんど振幅が見られなくなる。そして物体をなぞりはじめた瞬間、ch4, ch5 が大きく反応し、その後、なぞる動作が終わるまで比較的大きな振動が続くことがわかる。

2.3.3 PVDF による紙と木の区別

表皮と真皮を模した構造を利用した計測が可能であるかどうかを調べるため、紙と木をなぞった場合に、それぞれの部分に存在する PVDF フィルムにどのような計測の違いが生じるかを調べた。横軸に表皮の PVDF フィルム (ch5) の分散を、縦軸に真皮にある PVDF フィルム (ch6) の分散を縦軸にプロットしたものを図 6 に示す。紙をなぞったときの結果を+印 (赤) で、木をなぞったときの結果を x 印 (青) でプロットした。この結果から、真

皮、あるいは表皮にだけ PVDF フィルムがある場合には素材の違いを検出できないが、表皮と真皮の PVDF フィルムの出力を両方利用することによって、違いを判別可能であると考えられる。

2.4 今後の課題

作成した指先を用いたさまざまな対象のさらに詳しい判別や、その結果に基づくロバストな把持を実現する。また、ランダムに配置されたセンサ素子をどのように利用するか、異なる特性を持つセンサが少しずれた位置に配置されている場合に、どのような計測を得ることになるか、そのずれをどのように制御に反映させるかなどについてもさらに検討しなければならないと考えている。

3 ロボットの身体像獲得研究:目的と背景

従来ロボティクスにおいて、ロボットの身体表現は設計者がカーテシアン座標系で定義することが多く、またそのため、ロボットのセンサ・モータ系とカーテシアン座標系との関係を設計者が校正する必要があった。従って、ロボットの身体あるいは環境に変化が起こったとき、

設計者の手によらないで、身体表現を適応させることは難しい問題であった。この問題に対して、行動を通して得られるセンサ情報から身体表現を学習する能力をロボットに与えるというアプローチが有効であると考えられる。

ロボットにとっては、身体表現の獲得は難しい問題であるが、生物は誰に教えられるでもなく、いとも簡単に身体表現を獲得しているように見える。神経心理学や発達心理学などの分野において生物の身体表現は、身体像あるいは身体図式などと呼ばれ、認知発達過程解明の重要な要素としてその構造あるいは獲得機構の研究が注目されている [5, 6, 7, 8] が、非侵襲計測の限界のため、有力なモデルは見つかっていないのが現状である。Asada et al. [9] が指摘するように、ヒトの認知発達仮定を再現するロボットの実現と検証を繰り返すことは、知能ロボットの設計論に対する示唆とヒト知能の構成論的モデルを得るための有効なアプローチであると考えられる。すなわち、これらの研究分野からの示唆は、身体像を自分自身で獲得するロボットの実現の助けになることが期待され、また同時に、身体像を獲得するロボットの実現を通じて、ロボットの設計論の導出と生物の身体像獲得のメカニズムの構成論的モデルの両方に貢献することが期待される。

身体像獲得するロボットの実現を考える際、設計者によるセンサ・モータ系の解釈なしに、ロボットが感覚受容野に自分の身体を発見することは、最も基本的な問題の一つである。Asada et al. [10] はロボットの運動系への運動指令と相関のある変化を生じる画像領域は、ロボットの身体であるか、あるいは静止環境であるとみなすことができることを指摘したが、ロボットの身体と静止環境をどのように区別するかという問題は扱っていなかった。Fitzpatrick and Metta [11] も同様の考え方で、外見についての先見的知識なしに、視覚においてロボット自身のアームの位置同定を実現したが、身体と環境の区別のために、カメラ運動に関する DOFs についての先見的知識をロボットに与えておく必要があった。

そこで本研究では、ロボットのセンサが物理的な身体に埋め込まれていることに起因する多様な感覚様式間の不変性によって身体が定義することができることを提案する。運動は感覚との相関をとるのに用いられるのではなく、不変性を知覚するための経験を導く役割を果たす。ロボットの身体がいくつかの様式の感覚受容野に捉えられているとき、ロボットの身体構造は短期間で変化しないとすると、それらのある種の関係は環境によらず不変である。一方、ロボットの身体を捉えていない場合、すなわち環境を捉えている場合、当然のことながら、感覚様式間の関係は環境に依存する。従って、ロボットは多様な感覚様式間の関係が不変であるか否かによって、感覚受容野が身体を捉えているか否かを判断する、すなわち、身体を発見することができる。

この考え方に基づき、Yoshikawa et al. [12] は、自分を触る経験 (ダブルタッチ) を通じて、視覚、触覚、固有感覚の相互感覚地図の学習によって身体表面の触覚センサの受容野と視覚パターンを対応づけることで、身体表面についての身体図式を獲得する手法を提案している。しかし、視覚パターンの分節化は設計者が行っており、完全にセンサ情報のみから身体図式の構成は実現されていない。そこで本研究では、はじめの課題として、視覚における注意対象が身体であるか否かを識別す

る問題を扱う。不変性を表現する構造として視覚と固有感覚の相互感覚地図を導入し、学習によって注視領域が身体であるか非身体であるかの識別を実現する手法を提案する。そしてこの相互感覚地図を上半身人型ロボットに適用し、手法の有効性を示す。続いて接触対象が身体であるか否か、という問題についても考え、同様に触覚と固有感覚の相互感覚地図により不変性が学習可能であるかを検討する。

3.1 相互感覚地図の学習

ステレオカメラを持つ m 自由度のロボットを考える。左カメラの中心領域を注視領域とし、注視領域の視差を d 、ロボットの姿勢を $\theta \in \mathbb{R}^m$ とする。ロボットがある姿勢 θ をとったとき、もし注視領域に身体がある場合には、異なる環境においても同じ視差 d となる (図. 7 参照)。一方、注視しているのが身体でない場合には、異なる環境では異なる d となる。この性質を利用すると、ある θ について時間経過に対して常に一定の d をとる部分が身体、そうでない部分が非身体であると言える。

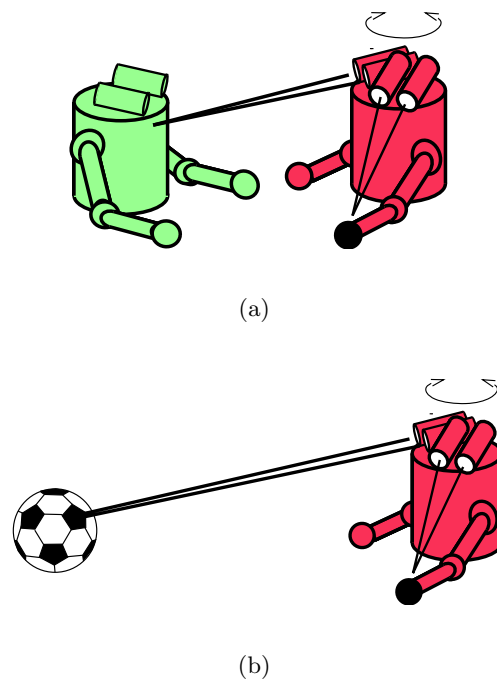
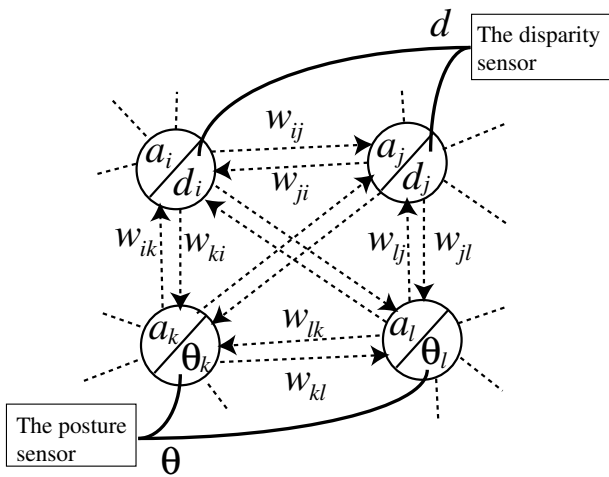


図. 7 環境変化 ((a) および (b)) に対する視差と姿勢の間の不変性。

そこで、時間経過に対する不変性を発見するための構造として、姿勢を表現するノード群と視差を表現するノード群の全結合ネットワーク (相互感覚地図) を導入する (図. 8)。1 から M_θ 番目のノードは姿勢を知覚するセンサに、また $M_\theta + 1$ から $M_\theta + M_d$ 番目のノードは視差を知覚するセンサに結び付けられており、 i 番目のノードは、それぞれ対応するセンサ値の次元の代表ベクトル x_i を持っている。 i 番目のノードは対応するセンサからセンサ値 x を受け取り、代表ベクトルとの距



図．8 相互感覚地図の構造

離に応じて活性度 a_i を

$$a_i = \exp(\|x - x_i\|/\sigma^2), \quad (1)$$

のように出力する．ここで， $\|x - x_i\|$ はベクトル x と x_i の距離を表わし， σ は定数である．ノード i から j へのシナプス強度 w_{ij} は

$$\tau \dot{w}_{ij} = -w_{ij} + ca_i a_j \quad (2)$$

のように更新する．ここで τ は学習の時定数， c は学習率である．式 (2) の更新則により，シナプス強度は

$$w_{ij} = cE\{a_i a_j\} \quad (3)$$

に収束する [13]．ここで $E\{x\}$ は x の平均値を表わす．実際には，式 (2) を離散化した式，

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \frac{1}{\tau}(a_i(t)a_j(t) - cw_{ij}(t)), \quad (4)$$

によってシナプス強度の更新を行なう．ここで， t は時間ステップを表わす．従って，ロボットを動的な環境下で移動させながら様々な姿勢をとらせて，相互感覚地図を学習させると，同じ姿勢 θ のときに必ず見える身体についての視差との結合が強められる．すなわち，ある姿勢のノードが視差のノードと結合しているか否かで，注視領域が身体か否かを知ることができる．

3.2 視覚と固有感覚の相互感覚地図の学習実験

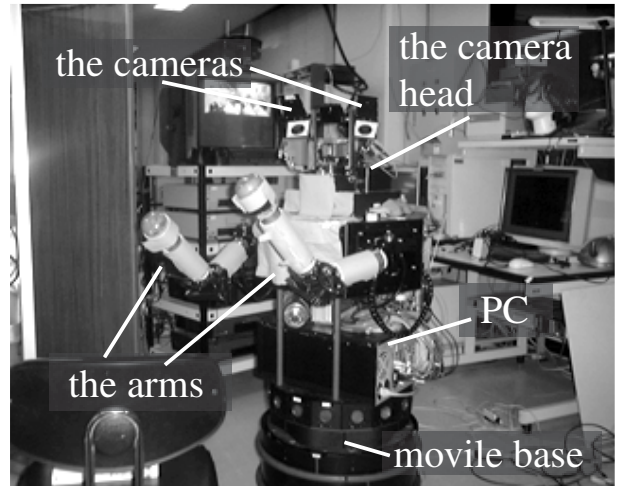
提案手法の有効性を確認するため，上半身人型ロボット (図. 9) に相互感覚地図を実装し，ランダムな注視と移動経験を通じて，多様な感覚様式間の不変性の学習を行なった．

3.2.1 実験設定

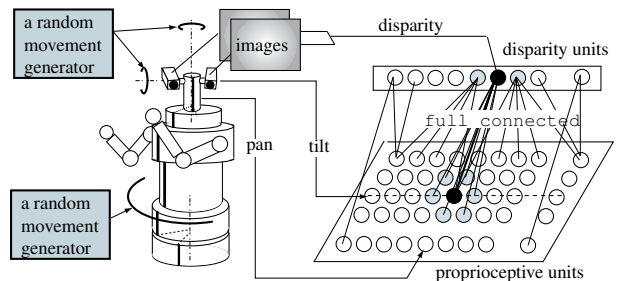
ロボットは2つのカメラ (SONY, CCB-EX37)，パンチルト軸に回転可能なステレオカメラヘッド (三菱エン

ジニアリング, CT-301)，手先に触覚センサを備える4自由度アーム，移動台車 (Nomadic, Nomad150) からなり，PC (Pentium II 400MHz) によって，33 msec の制御周期で制御される．

左カメラ中心の画像領域を注視領域とし，制御周期ごとに，右カメラの画像領域のなかで注視領域と相関の高い領域を探索し，十分相関の高い領域が発見された場合，その領域を注視領域に対応する領域として，左右カメラの視差を計算する．視差が計算された場合，視差とロボットのポテンシオメータの値と共に，相互感覚地図 (図. 10) に入力され，学習則に従いノード間の結合が更新される．



図．9 上半身人間型ロボットの概観．



図．10 相互感覚地図．

学習のプロセスと結果カメラヘッドの関節角はパンとチルトの可動域 (pan = $-45 \sim 45$ [deg], tilt = $10 \sim 70$ [deg]) を 20×15 個に，視差 d の定義域 ($-128 \sim 128$) を 15 個に量子化し，相互感覚地図とした．移動台車とカメラヘッドにランダムな入力を与え，約 6 分間学習を行なわせた．このとき，視差が計算可能であった回数，すなわち相互感覚地図の結合の更新を行なった回数を各ノードごとに示す (図. 11 参照)．図の横軸はノードの ID であり，0 から 299 番のノードは姿勢ノード，300 から 320 番のノードは視差ノードである．学習が行なわれたステップの合計回数は 5875 フレームであった．

学習後に獲得された身体図式を，簡単のためアームを適当な姿勢で固定したときの一断面を示す (図. 12 参

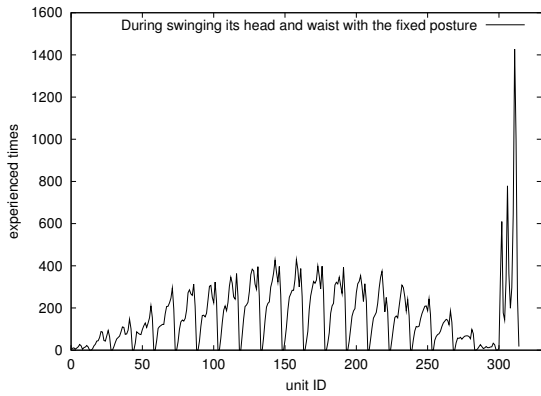


図 . 11 各ノード間結合の学習回数

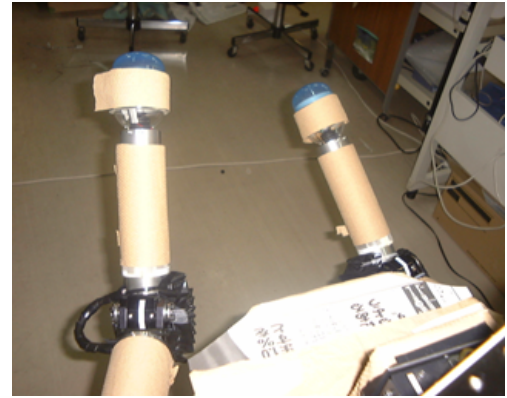


図 . 13 ロボットの視野の一例.

照). これは, 学習後のカメラヘッドのノードを一つ選んで発火させたとき, 結合を通して最も活性化した視差ユニットの代表ベクトルをカメラヘッドの関節角の関数として示したものである.

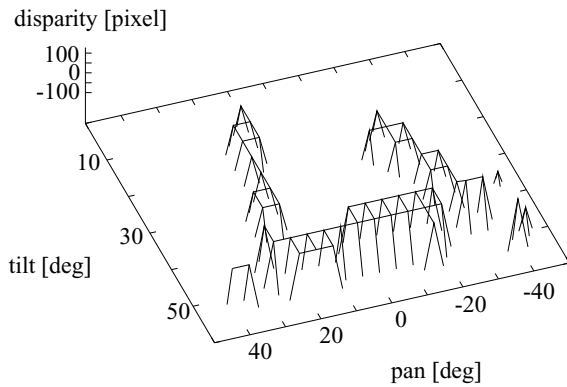


図 . 12

獲得された視覚/固有感覚相互感覚地図の活性度.

図 . 13 はロボットの視野の一例である. 図 . 12 とロボットの視野 (図 13) を見比べると, 腕と胸に対応する部分に視差ユニットとの結合が残っていることが読み取れる. 従って, 獲得された相互感覚地図はロボットの身体を表わしていると考えられる.

3.3 触覚と固有感覚の相互感覚地図の学習実験

不変性を学習することで身体表現を獲得するというアイデアは, 触覚と固有感覚の間の相互感覚地図にも適用可能であると考えられる. そこで, ロボットがアームを動かして手先に触覚センサによって自身の身体や外界の物体を接触する経験を通じ, 触覚と固有感覚間の相互感覚地図の学習によって身体の表現を獲得可能であることを確かめる実験を行なった.

ロボットは 3.2 章と同じものを用いる. アームの関節角 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]$ の可動域 ($\theta_1 = 0 \sim 90, \theta_2 = -90 \sim -45, \theta_3 = -90 \sim 15$) を $10 \times 10 \times 10$ に量子化し, 手先の触覚センサを触覚ノードとし, 相互感覚地図とした.

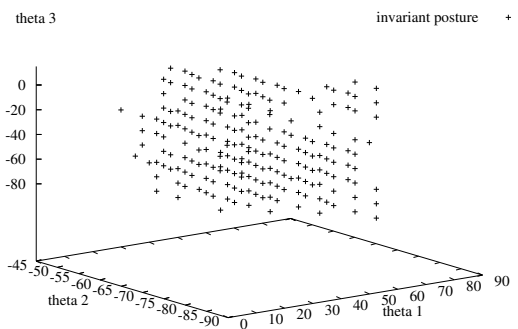


図 . 14

学習後の触覚/固有感覚相互感覚地図に獲得された身体表現

ロボットは手先の触覚センサに接触を検知したとき, ロボットのポテンシオメータの値と共に, 相互感覚地図に入力され, 学習則に従いノード間の結合が更新される.

497 回の接触経験の後に学習された相互感覚地図において, 触覚ノードと結合が残った姿勢ノードの代表ベクトルをプロットしたものを図 . 14 に示す. 図 . 14 にプロットされた点は, ロボットがその点が表わす姿勢をとったときに常に手先の触覚センサが接触を検知するような姿勢, すなわち自分自身に接触したときの姿勢を表わしている. 図 . 14 を人間が解釈することは簡単ではないが, ロボットが獲得する表現を必ずしも人間が解釈可能である必要はない. 図 . 14 でプロットされている点は自身に対する接触が起るときの姿勢の集合であるので, 手先で接触を検知したときに, 現在の姿勢がこの集合に含まれるか否かを判断することにより, 接触点が身体であるか否かを知ることができる.

3.4 議論と結論

本研究では, 多様な感覚様式間の不変性が身体を表現するという考えに基づき, 不変性を学習可能な構造として

相互感覚地図を導入した。これを上半身人型ロボットに適用し、先見的な知識なしに、注視領域が身体であるか非身体であるかを識別可能な表現を、相互感覚地図に獲得することができた。視差の代わりに、他の様式を用いても同様の結果が得られると考えられる。本報告では触覚センサを用いた場合についても同様に身体表現を獲得可能であるかを検討した。実験により、人間が解釈することは簡単ではないが、接触点が身体か否かの識別には用いることができる触覚/固有感覚間の相互感覚地図が学習可能であることを示した。

3章で述べたように、本研究は生物の身体像獲得のメカニズムの構成論的モデリングも目的のひとつにしている。現段階では十分説得力のあるモデルであるということとは難しいが、常に観測されるものの表現が身体像を構成する一つの要素であると推測している。神経科学の研究 [6] において、道具使用を学習したサルの脳に、道具が手の延長として一体化した像を表現していると考えられるバイモーダルニューロンが発見され、身体図式との関わりが指摘されている。道具使用時には、道具は常に手の先に観測されるものであるから、我々の推測はこの発見と矛盾しないと考えられる。しかし、このバイモーダルニューロンの受容野が、サルの道具を使うという意図に依存して変化することから、タスクに応じて相互感覚地図を修正可能であるような構造に変更することを検討する必要がある。

また、提案した相互感覚地図に獲得された表現は注視領域が身体であるか否かを識別することにしか用いることができない。獲得した表現をどのように様々なタスクに適用するのか、は今後の課題である。さらに、発見された身体を分節化して身体部位を同定することも今後の課題としてあげられる。これらの問題に対しては、触覚を含んだ多様式感覚、タスク達成および評価のシステムを統合することが必要であると考えられる。

参考文献

- [1] Mitsuhiro Hakozaiki, Katsuhiko Nakamura, and Hiroyuki Shinoda. Telemetric artificial skin for soft robot. In *Proceedings of TRANSDUCERS '99*, pp. 844–847, 1999.
- [2] Koh Hosoda, Yasunori Tada, and Minoru Asada. Internal representation of slip for a soft finger with vision and tactile sensors. In *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 111–115, 2002.
- [3] Ryosuke Kageyama, Satoshi Kagami, and Masayuki Inaba. Development of soft and distributed tactile sensors and the application to a humanoid robot. In *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 981–986, 1999.
- [4] Daisuke Yamada, Takashi Maeno, and Yoji Yamada. Artificial finger skin having ridges and distributed tactile sensors used for grasp force control. In *Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 844–847, 2001.

- [5] V. S. Ramachandran and S. Blakeslee. *Phantoms in the Brain: Probing the Mysteries of the Human mind*. William Mollow, 1998.
- [6] A. Iriki, M. Tanaka, and Y. Iwamura. Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurons. *Neuroreport*, Vol. 7, pp. 2325–2330, 1996.
- [7] A. Iriki, M. Tanaka, S. Obayashi, and Y. Iwamura. Self-images in the video monitor coded by monkey intraparietal neurons. *Neuroscience Research*, Vol. 40, pp. 163–173, 2001.
- [8] M. S. A. Graziano, D. F. Cooke, and C. S. R. Taylor. Coding the location of the arm by sight. *Science*, Vol. 290, No. 5498, pp. 1782–1786, 2000.
- [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] 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.
- [11] P. M. Fitzpatrick and G. Metta. Toward manipulation-driven vision. In *Proc. of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 43–48, 2002.
- [12] Y. Yoshikawa, H. Kawanish, M. Asada, and K. Hosoda. Body scheme acquisition by cross map learning among tactile, image, and proprioceptive spaces. In *Proc. of the 2nd Intl. Workshop on Epigenetic Robotics*, pp. 181–184, 2002.
- [13] 甘利俊一. 神経回路網の数理-脳の情報処理様式-, 神経細胞の学習理論. 産業図書, 1978.