

# 対象同定に基づく道具身体化の計算論

鍋 鳶 厚 太\* 國 吉 康 夫\*

## Computational Model of Tool-Body Assimilation based on Object Identification

Cota Nabeshima\* and Yasuo Kuniyoshi\*

When touching an object with a tool held by our hand, we tactually feel the object as if touching with our bare hand. We address what comprises this cognitive ability of “tool-body assimilation.” We compose a computational model of the tool-body assimilation and tool-use backed by physiology and robotics. Two processes of identification of the tool during a swing play a crucial role in the model. Exploiting the model, a robot on simulation can use first-appeared tools of various shapes to retrieve a target object. It synthetically instantiates how computation works in human’s brain during tool-body assimilation. It also exemplifies a scheme realizing autonomous tool using robots.

**Key Words:** Tool use, Body image/schema extension, Sensor fusion, Contingency, Adaptive robotics, Embodied cognitive science

### 1. 序 論

把持した道具で対象物に触れるとき、我々は道具を異物と意識せず、あたかもそれが自分の手であるかのように対象物との接触を感じとれる [1][2]。この現象は心理物理学実験からも支持されている。交差した手に触刺激を数百ミリ秒の間隔で連続して与えると、刺激の時間順序判断が逆転する現象がある [3]。閉眼条件で両手に棒を持たせ、棒のみを交差させた場合と、手のみを交差させた場合にも同様の現象が起こる [4]。これらの知見は、脳が道具の先を自分の手として、得られた触覚情報を処理している証拠と考えられる。サルの頭頂葉間溝部には、サル自身の手への触覚刺激と視覚刺激の両方に反応する bimodal neuron が存在する。サルが道具を使うように訓練された場合、この bimodal neuron の視覚受容野は道具まで延びることが知られている [5]。この延長現象は見えない道具やモニタに映る腕の像でも起こる [6]。神経レベルでも、道具の先を自分の手として処理していると思われる。

以上の知見から、ヒトやサルには道具による接触を自己身体による接触として認知する能力があると考えられる。この能力を本研究では道具身体化 (tool-body assimilation) と呼ぶ。自動販売機の下に落ちた硬貨を取り寄せるとき、我々はその場で得られた道具を使い、道具を伝わってくる手応えを頼りに見えない対象物の位置や視覚像を想像しながら取り寄せる (Fig. 1)。こ

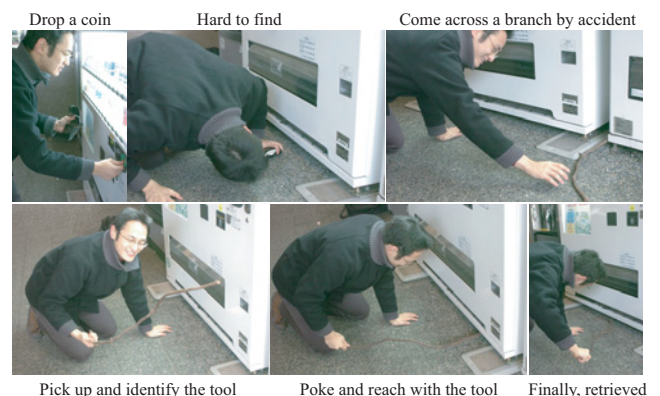


Fig. 1 Blind retrieval task as an instance of tool-body assimilation.

When retrieving a coin from beneath a vending machine, the contact between the “improvised” rake and the coin feel as originating from one’s hand.

のような取り寄せ行動は、道具身体化能力が活用される場面だと言える。道具身体化がより具体的にどのような能力であるか、その特徴を Fig. 1 の例の実現性から分析する。

行動の計画と実行に必要な情報に注目すると、手応えから対象物と道具が接触した位置と力を知覚しなくてはならない [I: 感覚延長性 (sensory extension)]。接触力と接触位置が知覚されない場合、物体操作の計画と実行に必要な対象物の位置や接触判定、対象物の運動の予測ができない。そのため取り寄せ行動ができなくなる。

予期しない状況に対応して道具を使うためには、特定の物体を持ち歩かず、その場で得られた物体を即座に使える必要があ

原稿受付

\*東京大学情報理工学系研究科

\*Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

る [II: 新規物即応性 (in situ adaptation)] . その場で得られた物体を使えなければ, 少なくとも予期しうる状況すべてに応じたあらゆる大きさや形状の道具 (Fig. 1 では棒) を全て持ち歩くことになる. これは可搬量の面から見て不利となる.

道具が果たす機能性は, 物体によらない法則の知識として持つ必要がある [III: 汎機能性 (generalizable functionality)] . 機能性を特定の物体に関する知識として持つ場合, その場で得られた物体へ機能性を適用することが困難になり, [II: 新規物即応性] を損なう. 物体同士が接触によってどのような運動をするかという法則を知らなければ, Fig. 1 において取り寄せ行動の指針が立てられず, 取り寄せを実現できない. [I: 感覚延長性], [II: 新規物即応性], [III: 汎機能性] の 3 つの特徴が全て揃うことは, 知能が実世界で身体を持ち, 道具を使うために必要と考えられる.

道具によってヒトは, 身体の機能を拡張あるいは追加できる. 道具使用機能をロボット上を実現することで, ヒトが使用する多様な道具やその場で手に入る物体を使えるようになれば, ロボットの自律性は高まる. 近年いくつか道具を使うロボットが発表されている ([7] [8] など) が, どれも設計者が道具の形状や慣性のモデルを予め与えていた. そのため [II: 新規物即応性] を持っていなかった. 旧来の人工知能研究では, 道具を使う知能を形状の判別問題として扱っていた [9] [10]. しかし身体を持たない知能であったので, 身体を持つ場合の道具使用に起因する [I: 感覚延長性] や [II: 新規物即応性] は考慮されていなかった. 未だ [I: 感覚延長性], [II: 新規物即応性], [III: 汎機能性] を兼ね備えたロボットシステムは存在しない.

我々は道具身体化機能を実現することが, 自律的な道具使用ロボットへの第一歩だと考える. しかし確かに道具身体化は我々が道具を使うときに起こっているにも関わらず, その具体的な情報处理的, 信号处理的メカニズム (計算原理) は解明されていない. 一般にヒトの能力はその具体的な情報处理的・信号处理的メカニズム (計算原理) が明らかであれば, ロボット上を実現可能と言える. そこで本論文は [I: 感覚延長性], [II: 新規物即応性], [III: 汎機能性] を満たす道具身体化能力の計算モデルの構築を目的とする.

2 章では道具と身体に関する生理学的な知見を集積し, 計算論仮説を立てる. これはあくまでヒトの道具身体化がどのような計算原理で成立しているかという仮説であることに留意する. 3 章では仮説に基づいて [I: 感覚延長性] と [II: 新規物即応性] の計算論を議論し, 本論文の提案する道具身体化モデルを述べる. 議論ではヒトやサルが同定すべき情報は何かを導き, その同定過程が 2 系統必要で, “素振り” によってなしうることを示す.

計算モデルの有効性はそのモデルを実装されたロボットシステムが, ヒトのような適応行動を生成できるかという規準 (システム全体としての振舞い) によって測ることができる. 本論文では Fig. 1 の状況を抽象化したタスクをシミュレータ内のロボットに行わせる. 実験におけるタスク設定および各機能の実装をあらかじめ 4 章に示し, 結果を 5 章に示す. シミュレーションでは適応的な道具使用行動が実現される.

本論文の実験から得られた考察を 6 章に述べ, 結論を 7 章に述べる. 構築したモデルは, ヒトの道具身体化能力を構成的に

説明すると同時に, 未だ実現していない適応的な道具使用ロボットの設計論に相当すると言える.

## 2. 生理学的知見に基づく計算仮説

議論に先立ち本論文では, 手に持つ棒などの物理的に身体の延長と見なせる物体を一次的な道具, ハサミやドアノブなど, 使用するために運動の束縛や手順が必要となる物体を二次的な道具と定義する. ハサミは紙を切る道具と見るとき, 一次的な道具かつ二次的な道具であり, 棒として使うときは単に一次的な道具であると考えられる. 本論文ではより基礎的な道具である一次的な道具に注目して議論する. “二次的な道具” という語は “道具を作るための道具” を指すことがある [11] が, ここではその定義とは異なり, 使用法の複雑さにより定義する.

ここで道具身体化の情報処理に関してやや抽象的な仮説を生理学的知見から立てる. 3 章ではこの仮説に基づいて [I: 感覚延長性], [II: 新規物即応性], [III: 汎機能性] の計算論を議論し, 道具身体化の計算モデルを提案する.

本章では以下の三つの仮説を導く. a) 道具は身体の情報表現 (身体表象) に同化し, 取り込まれる. b) 道具身体化は, 運動, 知覚, 認識の各レベルにおいて起こる. c) 身体の空間知覚は, 複数感覚情報の同調性 (同期性および同起性) によって変化する. 論拠となる生理学的知見を以下に示す.

### 2.1 脳内における身体の空間的な表象

身体と道具を区別なく使う我々の脳内で, 身体はどのように表象されているだろうか. ヒトの脳内における身体の表象は身体図式 (body schema) あるいは身体像 (body image) と呼ばれ, 身体運動に従って更新される身体各部の位置姿勢や占有領域の表現である [12]. 身体の変化に適応し, 複数感覚の統合の場ともなる. 身体図式は 1911 年に Head と Holmes によって紹介された, 身体の占有領域を無意識にマッピングし, モニターする表象である [1]. 身体像は 1935 年に Schiller によって定義された, 意識に上る身体の見えの表象である [13].

意識に上るか上らないか, 自己身体の見えを想像できるかが身体像と身体図式の主な違いだが, 意識の問題は客観的な評価に乗せるのが難しく, これらの用語は心理学や現象学的研究において混同されてきた [14]. 身体像と身体図式の本質が “身体の空間に関する表象” (以降単に身体表象と呼ぶ) として重なることも用語の混同の理由だろう.

身体の物理的な変化と見なせる一次的な道具の道具身体化は, 身体表象が物体を取り込むように適応するために起こるとされる [15]. そこで以下では (意識に関する議論を避け) 身体像と身体図式に関する知見をともに集める. それらの知見から, 身体表象の適応が何を手がかりに起こるかという抽象的な仮説を立てる.

### 2.2 道具身体化の三側面

我々は日常的に一次的な道具を身体と区別なく認知する. 遠くの物体を取り寄せるとき, 手も棒も特に意識せず使える. 金槌や義手, 義足 [1] [16] に見られるように, このとき我々は運動に関して (運動学的に) 道具に適応しているだけでなく, 感覚においても適応している. このような感覚と運動の適応の同起は, 道具使用するヒトやチンパンジー [17], 義足の馬 [18], 枝を啜

えて餌を握り出す鳥 [19] でも同様に観察されている。フックを指の代替物と見なすことができるように、我々は機能性に関しても、道具と身体を同じ様に認識することができる。

運動や感覚、認識の様相は互いに大きく異なるものであり、一つのメカニズムによってこれらが適応し、道具身体化を果たしているとは考えにくい。我々は運動、感覚、認識という複数のプロセスの協調によって道具身体化が起こると仮説を立てる。3章で述べる道具身体化の計算モデルを、機能モジュールが結合したシステムとする根拠である。

### 2.3 同調性を誘因とする道具身体化

ヒトは身体の変化を感覚情報から得るより他はない。感覚情報の何を手がかりに、身体変化を検知し適応しているのだろうか。身体表象と感覚統合の結び付きを示す知見として、空間的に離れた視覚刺激と触覚刺激のタイミングを同調させることによって、触覚刺激が視覚刺激の得られた空間位置から来ていると錯覚する現象が知られている [20]。あらかじめ自己身体に関して感覚間の時間的關係と空間的關係を学習 (統合) しているために、錯覚が生じるのだろう。ここでは身体の空間感覚が感覚間の同調によって変化している。

一次的な道具の身体化すなわち身体表象の適応は、少なくとも感覚情報間の同調 (同期, 同起) を手がかりに起こると考えられる [21]。3章で [II: 新規物即応性] の計算論を議論する際、時間的な同調に注目することへの根拠である。

## 3. 道具身体化モデル

道具身体化はどのような計算原理によって起こるのか。[I: 感覚延長性] の計算論からヒトやサルが同定すべき情報を導く。次にそれらの情報が道具を手にしたその場で同定可能であり、[II: 新規物即応性] が果たされることを示す。さらに [III: 可汎機能性] が工学的にどのような意味を持ち、どう果たされるかを論じる。2章で立てた仮説をより具体化し、複数の機能モジュールから成る道具身体化モデルを提案する。

本論文が提案する道具身体化の計算モデルの概念図を Fig. 2 に示す。[I: 感覚延長性] と [II: 新規物即応性] のために、慣性パラメータの同定と、視野内を身体運動に同調して運動する物体の特定という 2 系統の同定が素振りによって並列に行われる。道具の情報を同定したのち、身体表象を変更する。身体表象の変更によって、a) 身体の形状や慣性を利用する運動計画器や運動生成器の流用と、b) 事前に経験するなどして知っている物理法則の利用が可能になる ([III: 可汎機能性])。

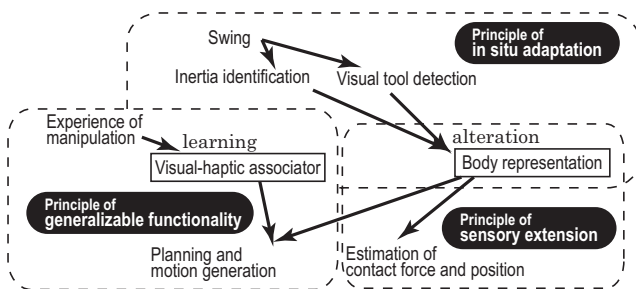


Fig. 2 Schematic structure of computational model of tool-body assimilation.

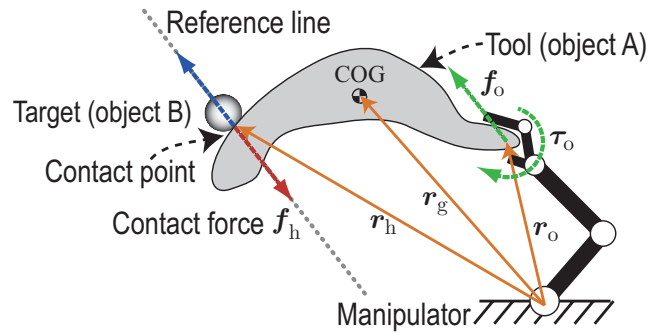


Fig. 3 Manipulator handling a rigid tool.

議論のため、 $A$  を把持される道具、 $B$  を取り寄せる物体などの目標物、 $r_o$  を身体中心座標系 (絶対座標系) における手の位置とする。 $A$  の重心位置を  $r_g$ 、 $A$  と  $B$  の接触点を  $r_h$  と表す。手を原点とする手に固定された座標系 (手座標系) における  $A$  の重心位置は  $l_g$ 、 $A$  と  $B$  の接触点は  $l_h$  とする。接触中に手が  $A$  に与える力とトルクをそれぞれ  $f_o, \tau_o$  とし、 $B$  が  $A$  に与えた力とトルクをそれぞれ  $f_h, \tau_h$  とする。位置、力、トルクは全て 3 次元縦ベクトルとし、簡単のため重力の影響が無い場合を考える。

### 3.1 瞬間的な感覚の延長

[I: 感覚延長性] とは少なくとも「把持する道具が対象物に触れたとき、その接触力と接触位置を瞬間的に知覚できること」だと言える。把持する道具を剛体とし、対象物との接触は一点で起こり、接触力と接触位置を手元で得られる力学的情報 (手応え) から推定する問題とする (Fig. 3)。

物体  $B$  の位置が固定されているときは、静力学によって推定問題が解決できる。静力学なので接触力は  $f_h = f_o$  かつ  $\tau_h = \tau_o$  となる。点接触の前提より、

$$\tau_h = r_{gh} \times f_h \quad (1)$$

なので、接触位置は手応え情報から絶対座標系の直線として求まる。ただし  $r_{gh} = r_h - r_g$  とし、記号  $\times$  を外積とした。ここで物体  $A$  の形状が未知だとする。対象物の位置が固定なので、物体  $B$  が十分に小さければ様々な方向から触って得られる複数の直線間の交点を求めることで、絶対座標系において接触位置  $r_h$  を推定することができる。しかしこのとき複数回の試行が必要となり、瞬間的な知覚ができない。物体  $A$  の形状が既知であれば、物体  $B$  の大きさに関わらず、式 (1) から得られた直線と輪郭との交点を取ることでありうる接触点が有限個となり、より素早く接触位置  $r_h$  の推定が可能となる。瞬間的な推定のために、物体  $A$  の形状の知識は不可欠と言える。

物体  $B$  の位置が動くとき、動力学的効果を考えなければならない。物体  $A$  に関する運動方程式は、

$$m \delta \dot{r}_g = (f_o + f_h) \delta t \quad (2)$$

$$\mathbf{I}_g \delta \omega = (r_{go} \times f_o + \tau_o + \tau_h) \delta t \quad (3)$$

ここで  $r_{go} = r_o - r_g$ 、物体  $A$  の質量を  $m$ 、重心回りの慣性テンソルを  $\mathbf{I}_g$  とした。これを变形して、

$$f_h \delta t = m \delta \dot{r}_g - f_o \delta t \quad (4)$$

$$\tau_h \delta t = \mathbf{I}_g \delta \omega - (r_{go} \times f_o + \tau_o) \delta t \quad (5)$$

となる．接触位置  $r_h$  は原理的に式 (1) から推定されるので， $f_h$ ， $\tau_h$  が得られている必要がある．つまり式 (4)，式 (5) の右辺が計算できなくてはならない．右辺の計算には原理的に  $m$ ， $\mathbf{I}_g$ ， $r_{g_0}$  の情報が必要である．つまり接触力  $f_h$ ，接触位置  $r_h$  を手応え情報  $f_o$ ， $\tau_o$  から瞬間的に推定するためには，慣性パラメータをあらかじめ知っていなければならない．さらに絶対座標系に対する手の回転行列  $\mathbf{R}_o$  を用いて，

$$r_g = r_o + \mathbf{R}_o l_g \quad (6)$$

$$r_{g_0} = -\mathbf{R}_o l_g \quad (7)$$

なので，手の座標系から見た物体の重心位置  $l_g = const$  が既知であれば  $r_{g_0}$  が既知であるのと等価となる．

物体  $A$  (道具) の慣性パラメータが既知であったならば，動力学的効果を取り除いて  $f_h$ ， $\tau_h$  が得られ，式 (1) によってありうる接触位置を絶対座標系における直線に限定できる．さらに形状の知識があれば，静力学の場合と同様に可能な接触位置を有限個にできる．物体  $A$  の運動の履歴を「今まで動いたところに対象物体は無い」という知識として使えば，接触点を一意に定めるような道具の運動を計画することができる．

この節では，道具の質量，慣性モーメント，手から見た重心位置 (慣性パラメータ) を知っており，その形状も記憶しておくことが [I: 感覚延長性] (瞬間的な接触力と接触位置の推定) に必要だと示した．以下では，その場で初めて手にした道具を使えるか ([II: 新規物使用性]) を計算論的に考察する．

### 3.2 In situ な慣性の同定

3.1 節の議論によると，[I: 感覚延長性] には道具の慣性パラメータの知識が必要であった．[II: 新規物即応性] を満たすためには，道具を手にしたその場で (in situ に) 道具の慣性パラメータを知る必要がある．これは原理的に，素振り時の手応え情報  $f_o$ ， $\tau_o$  から同定可能なことを示す．

対象物との接触が無い場合の物体  $A$  に関する運動方程式は，

$$m \delta \dot{r}_g = f_o \delta t \quad (8)$$

$$\mathbf{I}_g \delta \omega = (r_{g_0} \times f_o + \tau_o) \delta t \quad (9)$$

となる．式 (8) に式 (6) を代入すると，

$$m \delta (\dot{r}_o + [\omega \times] \mathbf{R}_o l_g) = f_o \delta t \quad (10)$$

となる． $[x \times]$  は，3次元ベクトル  $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$  による外積と等価な歪対称行列である．未知量をまとめるように式 (10) を変形して，

$$\delta \left[ \begin{array}{c} \dot{r}_o \\ [\omega \times] \mathbf{R}_o \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} m \\ m l_g \end{array} \right] = f_o \delta t \quad (11)$$

となる．この式は物体  $A$  の質量と重心位置が素振り中の時間サンプリングによって同定可能なことを示している．

質量と重心が同定されれば，慣性モーメントは容易に推定可能となる．式 (7) を式 (9) に代入すると，

$$\mathbf{I}_g \delta \omega = -(\mathbf{R}_o l_g) \times f_o + \tau_o \delta t \quad (12)$$

となる．この式は素振りによって慣性モーメントが同定可能な

ことを表す．以上の議論により，その場で得られた道具を素振りすることで，原理的にその道具の慣性パラメータを同定可能だと示した．

### 3.3 視覚からの道具の検出

3.1 節の議論によると，[I: 感覚延長性] のためには道具の形状の知識も必要となる．[II: 新規物即応性] を満たすためには，道具を手にしたその場で形状の知識を取得する必要がある．本論文では形状の取得のために視覚を用いるとする．視覚を用いるとき，複数の物体が視界に映る可能性がある．複数の物体のうち，どれが道具かを検出しなければならない．2.3 節の仮説より，身体と複数物体の運動間の同調を利用すれば良いと言える．その計算論的な根拠を以下に示す．

把持する物体  $A$  上の任意の点の絶対座標における位置  $r_a$  は，

$$r_a = r_o + \mathbf{R}_o l \quad (13)$$

であり，手座標系の位置ベクトル  $l = const$  を未知量とした場合でも， $r_a$  は既知量  $r_o$ ， $\mathbf{R}_o$  に対して線形となる．素振り中に時間的な相関を計算すれば，ある物体が道具かどうかを容易に検出できる．時間的な相関は，相関分析や同期性検出，運動の開始・停止の同起性によって計算可能である [22]．

視界に映る複数物体から注目すべき物体 (道具) が検出されれば，形状の取得がしやすくなる．運動制御に関して言えば，手と道具の Affine な位置の関係も学習可能となる．

### 3.4 可汎機能性

[III: 可汎機能性] は，身体によらない法則として道具の機能性の知識を持ち，利用することである．身体によらない法則であるので，道具でも身体でも物体操作運動の計画と生成が同じように可能となり，身体表象が変化した場合でも，法則を記憶しているモジュールを変更する必要がない (再利用性)．[II: 新規物即応性] と [III: 可汎機能性] をともに有することで，その場で初めて手にした道具でも，即座に使いこなすことが可能となる．

取り寄せの例 (Fig. 1) では，接触によって対象物がどのように動くかを法則として学習し利用する必要がある．接触による運動変化の学習は，一次的な道具の機能性の学習の問題であると同時に，感覚統合の問題でもある．接触力の知覚は対象物に直接接触することで得られる．一方どのように動いたかは，対象物に物理的な影響を与えずに測定する必要がある．非接触の感覚である視覚によって対象物の運動を測定するならば，取り寄せの例 (Fig. 1) における [III: 可汎機能性] とは，視覚と触覚の統合およびその利用に同義となる．従って Fig. 2 では視触覚統合器というモジュールとした．

## 4. 実験設定およびモデルの実装

3章の計算モデルを評価するには，その実現可能性を確かめる必要がある．本論文では道具具体化が不可欠と考えられる Fig. 1 の状況を抽象化したタスクを設定する．設定したタスクに基づいて計算モデルの各機能を実装し，シミュレータ内のロボットに行わせる．

### 4.1 ロボットとタスクの設定

以下のように自動販売機の下の硬貨を取り寄せるタスク (Fig. 1) を抽象化し，設定する (blind retrieval タスク): a) 道具の知識は



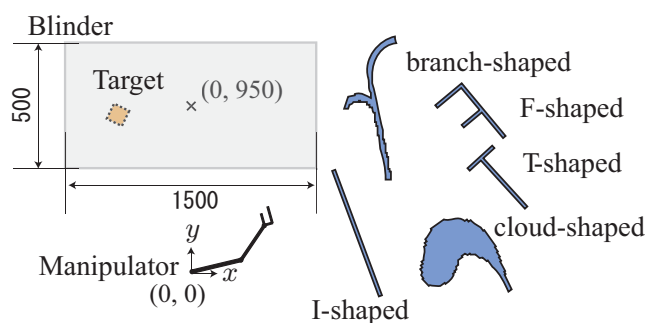


Fig. 4 Experimental setup consisting of manipulator, blinder, target object, and available tools. The units are [mm].

あらかじめ持たず、その場で獲得しなければならない。b) ロボットは表面分布触覚センサおよび各関節に角度センサ、力覚センサを備えたマニピュレータを持つ。その形状と運動計画/生成法は予め知っている。c) ロボットは視覚センサを持つが、目標物は手が届かない位置にある遮蔽に隠れている。そのため目標物の位置を視覚センサから取得できず、手/道具による手探りによって推定する必要がある。d) ロボットはその目標物を操作した経験がある。e) 目標物は作業平面に拘束される。f) 目標物を取り寄せるか、対象領域に存在しないことが判明すれば終了。

実験設定および実験でロボットが使う道具を Fig. 4 に示す。道具の形状は I 字型、T 字型、F 字型、枝型、雲型とする。I 字型は利用可能な面が少なく、重量の偏心も無いシンプルな棒であり、手前への取り寄せには向いていない。T 字型はアングル部が一つ、F 字型は二つあり、これらの道具は取り寄せに向いている。曲面で構成された枝型は明確なアングル部は無いが、凹部は存在する。雲形は凹部と凸部で構成される。

このような自由形状で構成された物体を扱う場合、旧来の人工知能で扱われていた形状の判別問題では対応しきれない。ロボットは道具のどの部位が取り寄せに使えるかを判断する必要がある。そのためロボットは、道具の形状によらない物理法則の知識を持つ必要がある (III: 可汎機能性)。様々な形状、慣性パラメータを持つ道具について同定できたならば、ロボットは [II: 新規物即応性] を有していると言える。適切に blind retrieval タスクを達成できたならば、手応えから道具上の接触位置を確率的に知覚 (I: 感覚延長性) していたと言える。

目標物が平面に拘束されているので、以下の実装および実験では簡単のためロボットを平面 3 自由度マニピュレータとし、作業空間内を鉛直に見下ろすように視覚センサ (カラーカメラ) を配置する。ロボットの形状として輪郭線を多角形で近似したものを知識として与える。また、対象領域には目標物のみが存在すると仮定する。本論文の主眼は、提案した道具身体化モデルが道具上の接触位置と接触力、および目標物の動きの推定をロボットに可能にするかであるので、対象領域に目標物以外の障害物は存在しなくとも良い。

#### 4.2 視覚情報の前処理

道具は身体によって操作されることで運動する。その運動情報を得ることができれば、身体の運動と比較することで、道具として認識することができる。比較のために視覚画像から物体を切り出し、トラッキングすることで運動情報を取得する。運

動に注目しているため、物体切り出し方法にはフレーム間差分による移動物体抽出を想定できる。実装ではその近似として背景差分画像を利用する。

得られた画像について Flood fill algorithm [23] を用いて物体を切り出す。物体の特徴量として a) 図心、b) HSV 色空間におけるクラスタ、c) 2 次モーメントによる主軸方向を取る。

前フレームで保存した物体の図心の位置および Hue 値が十分に近い物体を次フレームで該当する物体とし、トラックを実装する。

#### 4.3 視覚からの道具の検出

現実的には、視覚から切り出され運動情報が得られた物体群の多くは、身体とは物理的に接続していないと考えられる。これらの物体群から、道具 (身体に把持された物体) を特定しなくてはならない。

式 (13) によると、把持している道具と身体との位置関係を抽出するには、次元数の異なるベクトル間の線形の相関を計算する必要がある。そのために正準相関分析 [24] を用いる。視覚から抽出された物体の運動と、身体運動との間の正準相関を算出し、ある時間幅での正準得点が低い物体を道具の候補から外す。最終的に残った一つの物体を Douglas-Peucker アルゴリズム [25] によって多角形近似し、身体部位の外形を変更するように身体表象に追加登録する。

#### 4.4 慣性の同定

道具身体化モデルでは、接触力と接触位置の推定のために、ハンドに把持された物体の慣性パラメータを同定しなくてはならない。ハンドによる素振りから慣性を同定するためには、並進運動と回転運動が入り交じった場合について扱う必要がある。ある物体の重心、質量、慣性モーメントを推定する手法は多数開発されている [26] が、並進と回転を同時に扱った同定方法は確立されていない。

本研究では式 (11) と式 (12) を直接利用する。これらの式は素振り中の時間サンプリングによって容易に解くことができる。得られたデータ行列の疑似逆行列によって数値的に解く。

#### 4.5 接触力/接触点の推定

手に固定された座標系における道具と対象物の接触位置をベクトル  $l_h$  で表すと  $r_h = r_o + R_o l_h$  となり、式 (6) と合わせて、

$$r_{gh} = r_h - r_g = R_o (l_h - l_g) \quad (14)$$

これを式 (1) に代入し、両辺に  $\delta t$  を掛けて整理すると、

$$\tau_h \delta t = -R_o [(f_h \delta t) \times] (l_h - l_g) \quad (15)$$

となる。

式 (4)、式 (5) の右辺を  $p$ 、 $q$  というベクトルでそれぞれ定義する。 $p$  と  $q$  は慣性の同定後は既知量である。これらを式 (15) に代入し、

$$q = -R_o [p \times] (l_h - l_g) \quad (16)$$

を得る。この式で未知量は  $l_h$  のみであり、 $l_h$  は手に固定された座標系において直線となる。この直線と同定済みの道具の輪郭線との交差を取り、接触の候補点とする。交差検出によって複

数の交差点が出た場合は、運動の履歴を使って、今まで掃引していない領域の候補点を接触点とする。この時点で複数の候補がある場合は「どれかの位置で接触した」として、複数のまま接触位置と接触力の推定結果を視触覚統合器に渡す。

#### 4.6 視覚と触覚の統合

Blind retrieval タスクでは、触覚から目標物や作業領域の空間情報を推定しなくてはならない。同一の物体、重力、摩擦など一定の外力環境下であれば、目標物が静止するまでの変位は与えたエネルギーに概ね比例すると期待される。点接触を仮定するとこのエネルギーは目標物に与えた力積  $f \delta t$  の二乗に比例すると考えられる。よってここでは Blind retrieval タスクの前に、あらかじめ手によって目標物に接触させ、次の関係をメモリベースに学習させる: 接触によって生じた目標物の図心の変位を  $d$ 、接触時に与えた力積を  $f \delta t$ 、 $d$  の  $f \delta t$  に対する相対的な方向ベクトルを  $e$  とする。統合器には  $(\|d\| / \|f \delta t\|^2) e$  を学習させる。

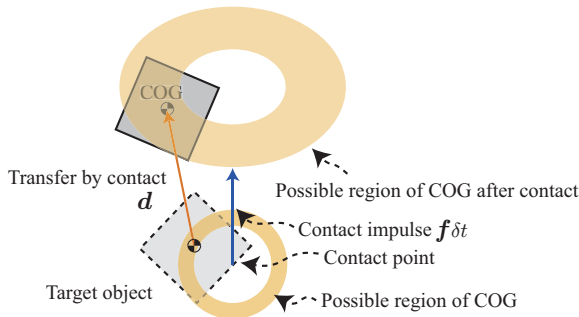


Fig. 5 Likelihood of target object location before and after contact.

接触時の目標物や環境の状態 (初期姿勢、摩擦など) によって視覚と触覚の関係はばらつくので、一つの  $f \delta t$  に対して推定される目標物の変位は複数存在する (Fig. 5)。そのため学習済みの統合器は、接触時に目標物の図心がありうる領域の外形をなす点群それぞれについて  $f \delta t$  から推定した複数の  $d$  を和し、接触後に目標物が存在しうる点を導く。ここでは導かれた複数点を包含する多角形領域を出力するように実装した。この多角形領域内に等確率で目標物が存在すると仮定する。ロボットは取得した接触位置と接触力を統合器に入力し、作業領域における目標物の存在領域を確率として得る。

#### 4.7 運動の計画と生成

Blind retrieval タスクでは初め、目標物は遮蔽で隠された領域全体に存在しうる。ロボットは腕を伸ばした状態で肩関節を回転させる sweep 動作を最初に行う。道具あるいは身体において接触が検出されたとき、視触覚統合器によって目標物の推定存在領域が得られる。一度視触覚統合器によって推定が行われたのちは、以下の行動方策を用いる: 道具を含む身体を構成する面のいずれかを、目標物が存在する可能性のある領域の向こう側に持っていき、身体中心に正対させ、手前に面を平行移動させる。目標物に与えた力と接触位置はこの retrieving 動作実行中に推定され、視触覚統合器に入力される。視触覚統合器によって接触後の目標物の移動領域が推定される。推定された領域から近い順に身体表象を構成する面を調べ、逆運動学を数値的に解くことで、その面が利用可能かを判定する。

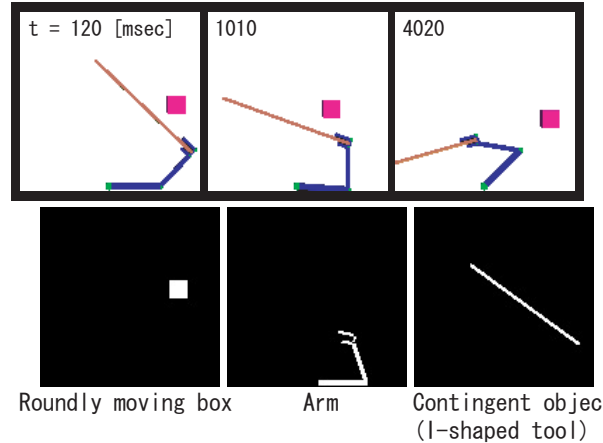


Fig. 6 Top: robot welding I-shaped tool. Bottom (from left to right): object moving in round path, manipulator, and tool.

対象物に触れずに移動する経路探索は、RRT-connect [27] を利用する。輪郭を表現する多角形間の衝突判定アルゴリズムは Jiménez らの方法 [28] を用いる。逆運動学は SR-Inverse による方法 [29] を用いて計算する。

## 5. 実 験

Blind retrieval タスクを、シミュレータ内のロボットに行わせることで道具身体化モデルを評価する。動力学および衝突計算には Open Dynamics Engine (ODE [30]) を利用した。

最初にロボットは道具を持たせられたことに気づき、道具を振り始める。その動作と動作中に得られたカメラ画像から物体を切り出した結果を Fig. 6 に示す。抽出された物体は白抜きされている。道具がどれかを判定するため、物体をトラッキングして得た運動情報と、手の運動情報との正準相関を取った結果を Fig. 7 に示す。グラフには I 字型、T 字型、F 字型の道具を素振りしたときの結果を示している。物体として円運動する四角形、腕、道具の 3 物体が切り出されている。横軸が時間、縦軸が正準相関係数である。実際に把持する物体のみが高い相関を示し、身体の運動に伴随する物体 (道具) としてロボットに発見された。腕より四角形のほうが高い正準相関係数を示した。これは腕がリンク構造を持つため、画像中に抽出された領域が時間によって変形することで図心の位置が揺動し、式 (13) の線形の関係が崩れてしまうためと考えられる。

道具は輪郭をとられ、手の外形を保持するメモリ (身体表象) に追加記憶された。道具の検出と並列に動作する道具の慣性パラメータの推定は、1[sec] の学習で真値と誤差 1% の範囲に収束した。

収束を検出したのち、ロボットは取得した道具形状と推定した慣性パラメータに加え、予め学習させた視触覚統合器を用いて Blind retrieval タスクを行う。Fig. 8 は左から T 字型、F 字型、枝型、雲型の道具を使った結果である。各コマの白色の四角が遮蔽された範囲を示している。いずれの場合でもロボットは取り寄せ動作が行なえている。道具それぞれによって、取り寄せにかかる時間や取り寄せの形態が異なった。枝型では凹部で目標物と多点接触し、擬似的に把持状態が生じた。雲型では一度

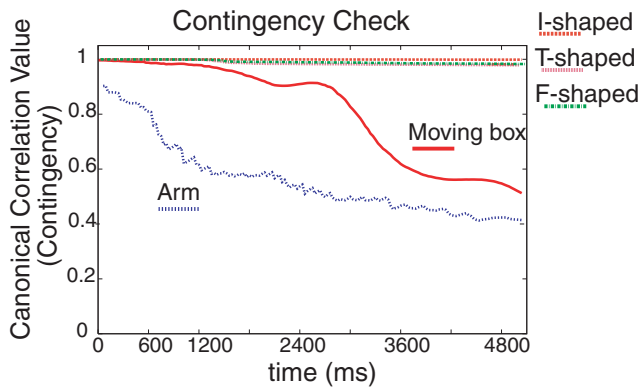


Fig.7 Contingency check via canonical correlation as a function of time.

の打撃による取り寄せが起こった。

それぞれの試行について、遮蔽中のどこに目標物があるかを推定した結果を Fig. 9 に示す。各コマは遮蔽と同じ領域についての推定結果である。存在可能性がある領域は明るく、身体が通るなどして存在可能性が無い領域は暗くなっている。どの試行でも、接触の前後で劇的に存在可能性のある領域が減っている。推定した接触力と接触位置を視触覚統合器に入力し、接触によって動いた後の目標物の大まかな位置を推定できていた。推定された領域に応じて次の取り寄せ行動が実行され、目標物と道具の接触が起こるたびに、徐々に手前に推定領域が移り、最終的に blind retrieval タスクが達成されている。

### 6. 考 察

実験では道具の形状により異なる取り寄せ方が起こった。特に雲型の道具では、特徴的な動作（一回の打撃による取り寄せ）が起こった。これは幾何学的（静的）な運動計画と生成を行っていたために、T 型、F 型、枝型に比べ質量と慣性モーメントが大きい雲型の道具で特徴的な動作が生成されたと考えられる。今回はシミュレーション実験であったため大きな違いは出なかったが、実機実験では目標物に接触したときの感度の違いも出ると思われる。

実験においては道具の形状だけでなく、慣性パラメータによってもタスクの達成動作の様相が異なった。これは形状や慣性パラメータによって、タスクの達成しやすさや道具の使いやすさに違いが出ることを意味する、換言すると、実際に使ってみることで初めてあからさまになる道具の機能性があると言える。道具の使いやすさを認識し、その場で必要とされる道具を割り出すような能力を実現するためには、実際の運動を通して自律的に道具の機能性を発見するような仕組みが不可欠になると考えられる。そのような自律的な道具機能理解のモデル化は今後の課題である。

構築した道具身体化の計算モデルは生理学的知見から立てた抽象的な仮説に沿ったものだった。しかし各機能モジュールの存在に生理学的な妥当性があるだろうか。慣性の同定に関して言えば、手応えから慣性を知覚し、それに基づいて物体の長さを知覚していると考えられる現象 (dynamic touch [31]) がある。類人猿にとって視野に映る身体運動と同調する物体の検出は、鏡像

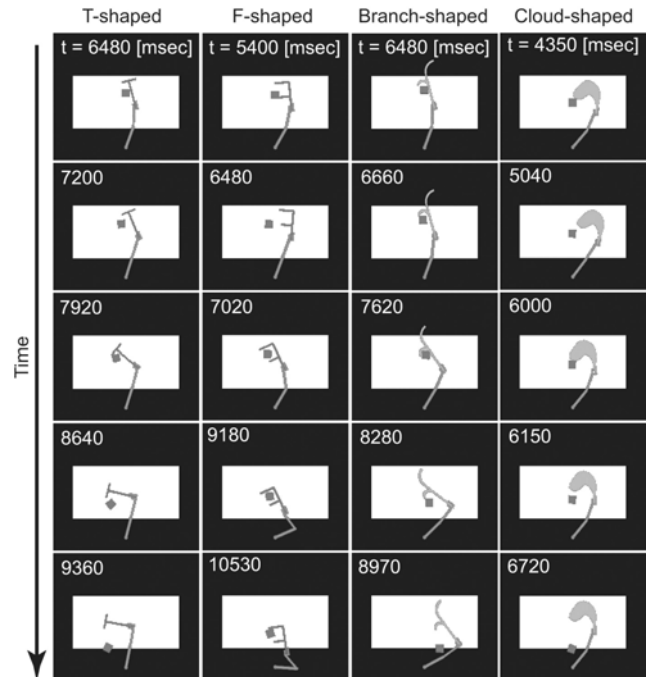


Fig.8 Blind retrieval with T-, F-, branch-, and cloud-shaped tools. The white rectangle indicates the “blind” zone.

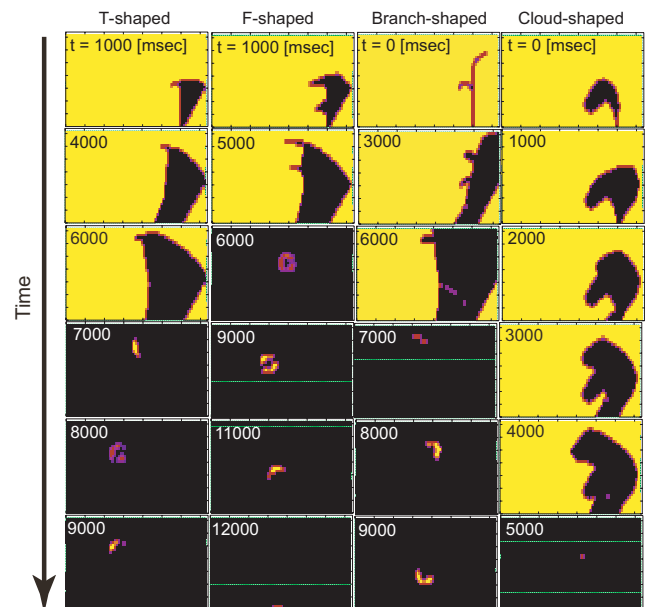


Fig.9 Likelihood of object location over time during blind retrieval using T-, F-, branch- and cloud-shaped tools (from top to bottom). The bright (yellow) tiles correspond to a high likelihood the dark tiles to a low likelihood.

認知に見られるように特徴的だと言われている [32]。鏡像認知は自己認知における中核であり、自己身体の見えの表象である身体像の構成と深く関わっている。これらの知見は少なくとも、提案モデルの構成機能である慣性知覚能力と同調物体検出能力がヒトに具備されていることを示している。機能がモジュールとして独立しているかは未知ではあるが、提案モデルはヒトの持つ基本的な能力を基に構成されているという意味で生体と対

応する計算原理から成っており、ヒトの道具身体化能力を構成的に説明していると言える。

## 7. 結 論

日常的に経験する道具身体化が [I: 感覚延長性], [II: 新規物即応性], [III: 可汎機能性] から成るとして、それぞれの計算論を議論し、主体 (ヒト, サル, ロボットなど) が行なわなければならない情報処理を明らかにした。その不可欠な情報処理の中心要素とは、感覚情報からの道具の同定、身体表象への道具の取り込み、道具の機能性としての感覚統合であった。計算論モデルの有効性を確認するために、モデルの実現として直接的な実装を行ない、シミュレーション実験を行なった。実験ではロボットは初めて手にした物体を道具として使い、blind retrieval タスクを達成できた。この実験より、本論文の提案する計算モデルが確かに [I: 感覚延長性], [II: 新規物即応性], [III: 可汎機能性] を満たすことを確認した。本論文では道具身体化の計算論を明らかにしたが、生体において道具身体化が認知メカニズムとしてどう実装されているかは未知であり、今後の研究課題である。

## 参 考 文 献

- [1] H. Head and G. Holmes: "Sensory disturbances from cerebral lesions," *Brain*, Vol. 34, pp. 102-245, 1911.
- [2] J. Paillard: *The Use of Tools by Human and Non-human Primates*. chapter The hand and the tool: the functional architecture of human technical skills, Oxford University Press, New York, 1993.
- [3] S. Yamamoto and S. Kitazawa: "Reversal of subjective temporal order due to arm crossing," *Nature Neuroscience*, Vol. 4, No. 7, pp. 759-765, jul 2001.
- [4] S. Yamamoto and S. Kitazawa: "Sensation at the tips of invisible tools," *nature neuroscience*, Vol. 4, pp. 979-980, 2001.
- [5] 入来篤史: 道具を使うサル. 医学書院, 2004.
- [6] 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.
- [7] H. Miyamoto and M. Kawato: "A tennis serve and upswing learning robot based on bi-directional theory," *Neural Networks*, Vol. 11, pp. 1331-1344, 1998.
- [8] 中井博之, 岡田慧, 佐藤顕治, 稲葉雅幸, 井上博允: "ヒューマノイドによる変形可能物体を道具化する環境適合行動の実現," 第 22 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 3L17, 2004.
- [9] J.H. Connell and M. Brady: "Generating and generalizing models of visual objects," *Artificial Intelligence*, Vol. 31, No. 2, pp. 159-183, 1987.
- [10] L. Bogoni: "More than just shape: a representation for functionality," *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 337-354, 1998.
- [11] J. Kitahara-Frisch: *The Use of Tools by Human and Non-human Primates*. chapter The origin of secondary tools, Oxford University Press, New York, 1993.
- [12] P. Haggard and D. M. Wolpert: *Higher-Order Motor Disorders*. chapter Disorders of Body Scheme, Oxford University Press, 2005.
- [13] P. Schilder: *The Image and Appearance of the Human Body: Studies in the Constructive Energies of the Psyche*. London: Kegan Paul, 1935.
- [14] S. Gallagher: "Body image and body schema: A conceptual clarification," *Journal of Mind and Behavior*, Vol. 7, pp. 541-554, 1986.
- [15] G. Berlucchi and S. Aglioti: "The body in the brain: neural bases of corporeal awareness," *Trends in Neurosciences*, Vol. 20, No. 12, pp. 560-564, 1997.
- [16] 川村次郎 (編): 義肢装具学 第 3 版. 医学書院, 2004.
- [17] B.B. Beck: *Animal Tool Behavior: The Use and Manufacture of Tools by Animals*. Taylor & Francis, 1980.
- [18] L.M. Koger, J. McIlhattan, and R. Schladetzky: "Prosthesis for partially amputated foreleg in a horse," *Journal of the American Veterinary Medical Association*, Vol. 159, No. 11, pp. 1600-1604, 1970.

- [19] G.C. Millikan and R.I. Bowman: "Observations on Galápagos tool-using finches in captivity," *Living Bird*, Vol. 6, No. 23-41, 1967.
- [20] V.S. Ramachandran and S. Blakeslee: *Phantoms in the Brain: Probing the Mysteries of the Human Mind*. Harpercollins, 1998.
- [21] C. Nabeshima, M. Lungarella, and Y. Kuniyoshi: "Body schema adaptation for robotic tool use," *Advanced Robotics*, Vol. 20, No. 10, pp. 1105-1126, 2006.
- [22] 鍋島厚太, 國吉康夫: "運動同起による身体視覚像の発見と体性感覚との結合," 第 7 回計測自動制御学会 (SICE) システムインテグレーション部門講演会 (SI2006), 2N4-1, 2006.
- [23] G. Bradski: "The opencv library," *Dr. Dobbs' Journal*, Nov 2000.
- [24] H. Hotelling: "Relations between two sets of variables," *Biometrika*, Vol. 28, pp. 321-327, 1936.
- [25] D.H. Douglas and T.K. Peucker: "Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature," *Canadian Cartographer*, Vol. 10, No. 2, 1973.
- [26] C. Schedlinski: "A survey of current inertia parameter identification methods," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 15, No. 1, pp. 189-211, 2001.
- [27] S.M. LaValle and J.J. Kuffner: "Randomized kinodynamic planning," In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '99)*, 1999.
- [28] J.J. Jiménez, R.J. Segura, and F.R. Feito: "Efficient collision detection between 2d polygons," In *Proceedings of The 12-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision*, pp. 191-198, 2004.
- [29] Y. Nakamura: *Advanced Robotics*. Addison-Wesley, 1991.
- [30] R. Smith: Open dynamics engine (ode). <http://www.q12.org/>.
- [31] M.T. Turvey: "Dynamic touch," *American Psychologist*, Vol. 51, pp. 1134-1152, 1996.
- [32] 板倉昭二: 自己の起源. 金子書房, 1999.

### 鍋島厚太 (Cota Nabeshima)

2006 年東京大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了。現在同研究科博士課程に在学中。日本学術振興会特別研究員 (DC2)。研究の興味は適応ロボティクス, 認知発達科学, 身体性認知科学と学際的。ロボットにより賢い道具使用をさせる計算戦略の開発が目標。(日本ロボット学会学生会員)

### 國吉康夫 (Yasuo Kuniyoshi)

1991 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了, 工学博士。同年電子技術総合研究所入所, 1996 年より 1 年間米国 MIT AI Lab。客員研究員, 2001 年東京大学助教授, 2005 年同教授, 現在に至る。身体性に基づく認知の創発と発達, 人間の行為の観察・理解システム, ヒューマノイドロボットなどの研究に従事。佐藤記念知能ロボット研究奨励賞, IJCAI Outstanding Paper Award, 日本ロボット学会論文賞等受賞。人工知能学会, IEEE, 日本赤ちゃん学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)