

力覚信号に基づく粒子フィルタを用いた 多数のパラメータで表現される道具形状の推定

Estimation of a tool shape with a number of parameters using a particle filter based on force signals

○沓澤京*, 林部充宏*

○Kyo Kutsuzawa*, Mitsuhiro Hayashibe*

*東北大学

*Tohoku University

キーワード : 力覚信号処理 (force-signal processing), 内在的接触計測 (intrinsic contact sensing), 粒子フィルタ (particle filter), 道具使用 (robotic tool use)

連絡先 : 〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

東北大学 大学院工学研究科 ロボティクス専攻 沓澤京

Tel.: 022-795-5682, E-mail: kutsuzawa@tohoku.ac.jp

1. 序論

人間が道具越しに環境に触れたとき、たとえ目をつむっていても、道具のどこにどの程度の力が加わったかを把握することができる。当然ながら道具には神経も感覚器もないので、人間は手元に伝わってきた力の情報から、道具上での接触状態を推定していることになる。身体感覚を外部の物体まで拡張するこの能力は、物体を巧みに操って作業する上で非常に有用と考えられる。

力触覚を基に測定点から離れた箇所での接触状態を推定する技術は、intrinsic tactile sensing¹⁾あるいはintrinsic contact sensing^{2, 3)}と呼ばれる。決まった和訳はないが、intrinsic contact sensingを直訳するなら「内在的接触計測」などとなるだろう。最も古い研究事例にはSalisbury

の論文⁴⁾が挙げられ、それ以降も「力とモーメントから剛体上の接触位置を推定する課題」を主として、様々に研究されている。この技術は環境との接触を伴う制御に有用である。例えば接触状態を制御する位置と力のハイブリッド制御^{5, 6)}では、接触点を原点とする座標系を扱うために接触位置を知る必要がある。

力覚信号から道具上の接触位置などを求めるために、従来手法のほとんどでは道具の形状が既知である必要があった^{2, 4)}。しかし、力覚センサに対する道具の形状が常に正確にわかるとは限らない。開かれた環境で臨機応変な道具使用や物体操作をおこなうときには道具もしくは物体の形状はふつう未知である。道具形状をまったく必要としない手法^{3, 7)}も提案されているが、推定には接触力の擾乱が必要であり、加えて推定の収束が原理的に遅いという弱点がある。

道具の形状が与えられない条件で素早い接触位置推定を実現するためには、道具形状を同時に推定することが有用である。粒子フィルタを利用することで、接触位置と道具形状とを同時に推定する手法が提案された⁸⁾。粒子フィルタは確率分布を点群で近似して扱う手法であり、不確実性を強く伴う推定において有用である。一方で、推定したい変数の数（状態変数の次元数）が増えるに伴い、近似に必要な粒子数が指数関数的に増加してしまう。そのため、先行研究⁸⁾の手法では道具形状が少数の変数で表現される場合にしか適用されていなかった。

そこで本研究では、確率モデルの修正によって、道具の形状が極めて多量の変数で表現される場合にも利用可能な粒子フィルタを構築する。simultaneous localization and mapping (SLAM)^{9, 10, 11)} で使われる粒子フィルタと同様の工夫によって、粒子群を形状パラメータの空間に散布する必要がないように確率モデルを分解することで、1000次元以上のパラメータをわずか30個の粒子で推定できるようになる。本稿では、平面状でのシミュレーションによって検証をおこなう。平面上ではあるが、道具形状をグリッド形式で表現すると、そのパラメータ数は容易に100を超える。

2. 基本原理

力覚センサが取り付けられた剛体の道具上に、環境から力が印加されたときを考える。このとき、接触位置を \mathbf{c} 、接触力を \mathbf{f} とする。また、力覚センサで計測される力とモーメントをそれぞれ \mathbf{F} 、 \mathbf{M} とする。道具について、以下のような力のつり合いが成り立つと仮定する。

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}, \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{c} \times \mathbf{f}. \quad (2)$$

環境からの接触は1点のみで生じ、接触点においてトルクが加わらないとする。また、重力や

慣性力の影響は事前に取り除いてあるとする。すると、接触点の位置 \mathbf{c} は以下のように求まる。

$$\mathbf{c} = \frac{\mathbf{F} \times \mathbf{M}}{\|\mathbf{F}\|^2} + \alpha \mathbf{F}. \quad (3)$$

ここで、 α は未知定数である。式(3)から、接触位置は一意に推定できないことがわかる。代わりに、接触点を通り接触力と平行な直線が、接触位置の候補直線として求まる。既存手法⁴⁾では基本的に、道具の形状が既知として、候補直線と道具表面との交差点が接触位置であるとして解を絞り込む。

$$\mathbf{c} = \frac{\mathbf{F} \times \mathbf{M}}{\|\mathbf{F}\|^2} + \alpha \mathbf{F}, \quad \text{s.t. } g(\mathbf{c}) = 0. \quad (4)$$

ここで g は、道具表面において値がゼロになるような関数である。

上記技術は、環境に接触する対象物の表面に分布型センサを敷き詰める必要がなく、単一の6軸力覚センサでセンサから離れた箇所の接触を計測できることから、外部物体の接触を扱うときに有用である。この技術はさまざまに改良がされており、道具の運動速度情報¹²⁾ や力の微分値¹³⁾ などを使って精度を向上することができる。また、多点接触への拡張^{14, 15, 16)} やロボット制御への応用^{14, 17, 18)} もされている。

力の瞬時値のみを利用するのでは、原理的に式(3)の情報までしかわからないため、性能に限界がある。過去の測定値も活用することで原理的な性能向上が期待できる⁴⁾。接触位置の変化よりも接触力ベクトルの変動のほうが十分速いと仮定することで、非凸包の物体への拡張¹⁹⁾ や、道具形状を必要としない接触位置推定^{3, 7)} が可能になる。

3. 手法

提案手法は、無香粒子フィルタ^{20, 21)} を使って、接触位置 \mathbf{c} と道具形状を表すパラメータ \mathbf{s} とを同時推定する。本研究では \mathbf{s} をグリッドマップとして表現する。グリッドマップの各セルで

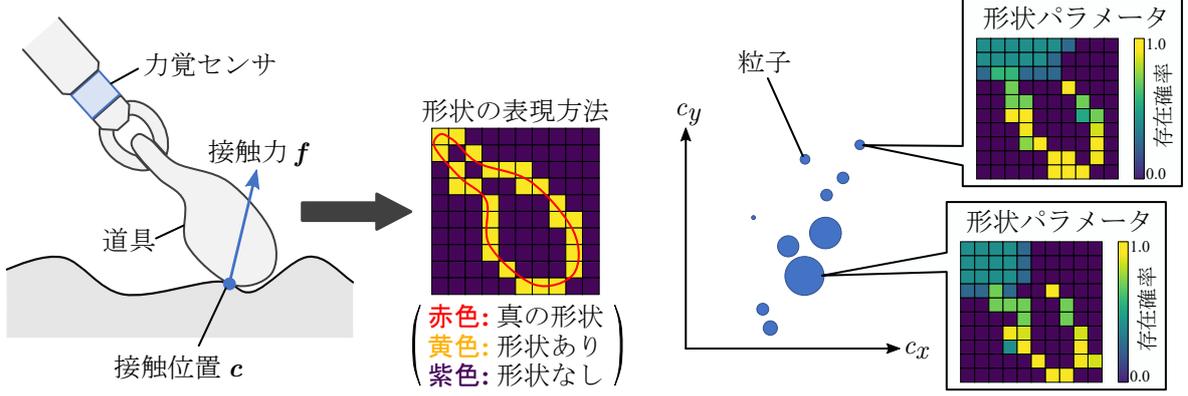


Fig. 1 提案手法の概要。道具の形状をグリッドマップで表現する。粒子フィルタにて粒子群は接触位置の空間にのみ分布され、各粒子は各々で形状パラメータの推定値をもつ。

は、道具表面が存在するかないかがスカラ値として表現される。これによってさまざまな形状が表現できるようになるが、一方で、次元数が極めて大きくなる（2次元平面の各軸を100分割すると、パラメータの次元数は $100^2 = 10000$ にもなる）。そのため、単純に $\mathbf{x} \triangleq (\mathbf{c}, \mathbf{s})$ として \mathbf{x} を推定しようとする、いわゆる次元の呪いによって指数関数的な数の粒子が必要になってしまう。本研究では、Rao-Blackwellized 粒子フィルタ⁹⁾と同様の工夫によって、粒子群を接触位置 \mathbf{c} の空間にのみ散布すれば良いように確率モデルを修正して、 \mathbf{s} の次元数によらず少数の粒子で計算できるようにする。手法の概念図を図1に示す。

3.1 粒子フィルタ

まずは一般的な粒子フィルタの確率モデルについて考える。時刻 k における観測変数を \mathbf{y}_k 、状態変数を \mathbf{x}_k とする。また、時刻0から k までの状態変数の時系列を以下のように表記する。

$$\mathbf{x}_{0:k} \triangleq (\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_k) \quad (5)$$

本研究では、状態変数を $\mathbf{x}_k \triangleq (\mathbf{c}_k, \mathbf{s}_k)$ とし、観測変数を $\mathbf{y}_k \triangleq (\mathbf{F}_k, \mathbf{M}_k)$ とする。推定の目標は、期待値 $\mathbb{E}_{\mathbf{x}_{0:k} \sim p(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})}[\phi(\mathbf{x}_{0:k})]$ を求めることである。ただし ϕ は任意の写像とする。この期待値は $p(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})$ に関するものであるが、こ

の確率分布は未知である。そこで、以下のように式変形して、提案分布と呼ばれる、設計者が任意に決める確率分布 $q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})$ の期待値に置き換える。

$$\begin{aligned} & \mathbb{E}_{\mathbf{x}_{0:k} \sim p(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})}[\phi(\mathbf{x}_{0:k})] \\ &= \int \phi(\mathbf{x}_{0:k}) p(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k}) d\mathbf{x}_{0:k} \\ &= \int \phi(\mathbf{x}_{0:k}) \frac{p(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})}{q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})} q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k}) d\mathbf{x}_{0:k} \\ &= \int \phi(\mathbf{x}_{0:k}) \frac{p(\mathbf{y}_{0:k}|\mathbf{x}_{0:k}) p(\mathbf{x}_{0:k})}{p(\mathbf{y}_{0:k}) q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})} q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k}) d\mathbf{x}_{0:k} \\ &= \frac{\int \phi(\mathbf{x}_{0:k}) \frac{p(\mathbf{y}_{0:k}|\mathbf{x}_{0:k}) p(\mathbf{x}_{0:k})}{q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})} q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k}) d\mathbf{x}_{0:k}}{\int \frac{p(\mathbf{y}_{0:k}|\mathbf{x}_{0:k}) p(\mathbf{x}_{0:k})}{q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})} q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k}) d\mathbf{x}_{0:k}} \\ &= \frac{\int \phi(\mathbf{x}_{0:k}) w_k q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k}) d\mathbf{x}_{0:k}}{\int w_k q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k}) d\mathbf{x}_{0:k}} \\ &= \frac{\mathbb{E}_{\mathbf{x}_{0:k} \sim q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})}[\phi(\mathbf{x}_{0:k}) w_k]}{\mathbb{E}_{\mathbf{x}_{0:k} \sim q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})}[w_k]} \quad (6) \end{aligned}$$

ここで、 w_k は確率分布 $p(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})$ と $q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})$ との違いを補正する重み係数であり、以下のように表される。

$$w_k \triangleq \frac{p(\mathbf{y}_{0:k}|\mathbf{x}_{0:k}) p(\mathbf{x}_{0:k})}{q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})} \quad (7)$$

さらに、

$$\begin{aligned} q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k}) &= q(\mathbf{x}_k|\mathbf{x}_{0:k-1}, \mathbf{y}_{0:k}) q(\mathbf{x}_{0:k-1}|\mathbf{y}_{0:k}) \\ &= q(\mathbf{x}_k|\mathbf{x}_{0:k-1}, \mathbf{y}_{0:k}) q(\mathbf{x}_{0:k-1}|\mathbf{y}_{0:k-1}) \quad (8) \end{aligned}$$

のように定義することで、 w_k を再帰的な形に変形できる。

$$w_k = \frac{p(\mathbf{y}_k|\mathbf{x}_k)p(\mathbf{x}_k|\mathbf{x}_{k-1})}{q(\mathbf{x}_k|\mathbf{x}_{0:k-1}, \mathbf{y}_{0:k})} w_{k-1} \quad (9)$$

一般的な粒子フィルタでは、上記の期待値を以下のように N 個の粒子群の平均で近似する。

$$\frac{\mathbb{E}_{\mathbf{x}_{0:k} \sim q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})}[\phi(\mathbf{x}_{0:k})w_k]}{\mathbb{E}_{\mathbf{x}_{0:k} \sim q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})}[w_k]} \approx \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \phi(\mathbf{x}_{0:k}^{(i)})w_k^{(i)}}{\sum_{i=0}^{N-1} w_k^{(i)}} \quad (10)$$

ここで $\mathbf{x}_{0:k}^{(i)}$ は提案分布からサンプリングされる粒子であり、 $w_k^{(i)}$ は粒子 $\mathbf{x}_{0:k}^{(i)}$ から計算される。

$$\mathbf{x}_{0:k}^{(i)} \sim q(\mathbf{x}_{0:k}^{(i)}|\mathbf{y}_{0:k}), \quad (11)$$

$$w_k^{(i)} = \frac{p(\mathbf{y}_k|\mathbf{x}_k^{(i)})p(\mathbf{x}_k^{(i)}|\mathbf{x}_{k-1}^{(i)})}{q(\mathbf{x}_k^{(i)}|\mathbf{x}_{0:k-1}^{(i)}, \mathbf{y}_{0:k})} w_{k-1}^{(i)} \quad (12)$$

このとき、提案分布 $q(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})$ が元の確率分布 $p(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{y}_{0:k})$ に近いほど期待値を高い精度で近似できる。無香粒子フィルタでは、提案分布 $q(\mathbf{x}_k|\mathbf{x}_{0:k-1}, \mathbf{y}_{0:k})$ を無香カルマンフィルタで実装する。

3.2 確率モデルの変形

上記の方法では、 \mathbf{s}_k が高次元なため、 $\mathbf{x}_{0:k}^{(i)}$ を直接サンプリングすると非常に多数の粒子が必要になる。そこで本研究では、以下のように提案分布を変形する。

$$\begin{aligned} q(\mathbf{x}_k|\mathbf{x}_{0:k-1}, \mathbf{y}_{0:k}) &\triangleq q(\mathbf{c}_k, \mathbf{s}_k|\mathbf{c}_{0:k-1}, \mathbf{s}_{0:k-1}, \mathbf{M}_{0:k}, \mathbf{F}_{0:k}) \\ &= q(\mathbf{c}_k|\mathbf{c}_{0:k-1}, \mathbf{M}_{0:k}, \mathbf{F}_{0:k})q(\mathbf{s}_k|\mathbf{s}_{k-1}, \mathbf{c}_{k-1}, \mathbf{F}_{k-1}) \end{aligned} \quad (13)$$

加えて、形状パラメータ \mathbf{s}_k に関する確率分布に以下のような仮定をおく。

$$q(\mathbf{s}_k|\mathbf{s}_{k-1}, \mathbf{c}_{k-1}, \mathbf{F}_{k-1}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \mathbf{s}_k = \psi(\mathbf{s}_{k-1}, \mathbf{c}_{k-1}, \mathbf{F}_{k-1}), \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

この仮定は、形状パラメータ \mathbf{s}_k が過去の状態変数および観測変数から一意に定まることを意味する。これによって、粒子 $\mathbf{x}_k^{(i)}$ は以下のように得られるようになる。

$$\mathbf{c}_k^{(i)} \sim q(\mathbf{c}_k^{(i)}|\mathbf{c}_{0:k-1}^{(i)}, \mathbf{M}_{0:k}, \mathbf{F}_{0:k}), \quad (15)$$

$$\mathbf{s}_k^{(i)} = \psi(\mathbf{s}_{k-1}, \mathbf{c}_{k-1}, \mathbf{F}_{k-1}) \quad (16)$$

$\mathbf{c}_k^{(i)}$ は高々3次元であり、 $q(\mathbf{c}_k^{(i)}|\mathbf{c}_{0:k-1}^{(i)}, \mathbf{M}_{0:k}, \mathbf{F}_{0:k})$ は無香カルマンフィルタで実用的に実装できる。

このとき $w_k^{(i)}$ は以下のようになる。

$$w_k^{(i)} = \frac{p(\mathbf{M}_k, \mathbf{F}_k|\mathbf{c}_k^{(i)})p(\mathbf{c}_k^{(i)}|\mathbf{c}_{k-1}^{(i)}, \mathbf{s}_k^{(i)})}{q(\mathbf{c}_k^{(i)}|\mathbf{c}_{0:k-1}^{(i)}, \mathbf{M}_{0:k}, \mathbf{F}_{0:k})} w_{k-1}^{(i)} \quad (17)$$

ただし、個々の確率分布は以下のように定義する。

$$p(\mathbf{M}_k, \mathbf{F}_k|\mathbf{c}_k^{(i)}) = p(\mathbf{M}_k|\mathbf{F}_k, \mathbf{c}_k^{(i)})p(\mathbf{F}_k), \quad (18)$$

$$p(\mathbf{c}_k^{(i)}|\mathbf{c}_{k-1}^{(i)}, \mathbf{s}_k^{(i)}) = p(\mathbf{c}_k^{(i)}|\mathbf{c}_{k-1}^{(i)})p(\mathbf{c}_k^{(i)}|\mathbf{s}_k^{(i)}), \quad (19)$$

さらに

$$p(\mathbf{M}_k|\mathbf{F}_k, \mathbf{c}_k^{(i)}) = \mathcal{N}(\mathbf{M}_k; \mathbf{c}_k^{(i)} \times \mathbf{F}_k, \Sigma^M), \quad (20)$$

$$p(\mathbf{F}_k) = \text{const}, \quad (21)$$

$$p(\mathbf{c}_k^{(i)}|\mathbf{c}_{k-1}^{(i)}) = \mathcal{N}(\mathbf{c}_k^{(i)}; \mathbf{c}_{k-1}^{(i)}, \Sigma^c), \quad (22)$$

$$p(\mathbf{c}_k^{(i)}|\mathbf{s}_k^{(i)}) = \text{Grid}_{\mathbf{s}_k^{(i)}}(\mathbf{c}_k^{(i)}). \quad (23)$$

であるとする。ここで $\mathcal{N}(\mathbf{x}; \boldsymbol{\mu}, \Sigma)$ は平均 $\boldsymbol{\mu}$ 、分散 Σ の正規分布を表す。 $\Sigma^M = \sigma_M^2 \mathbf{I}$ と $\Sigma^c = \sigma_c^2 \mathbf{I}$ はモーメントの観測値と接触位置との分散を表す。また、 $\text{Grid}_{\mathbf{s}}(\mathbf{c})$ は、 \mathbf{s} で表現される格子のうち位置 \mathbf{c} を含むセルを表す。

3.3 形状パラメータの推定

形状パラメータは、式(14)の写像 ψ によって計算される。本研究では、二つの指標を使って ψ を表現する。概念図を図2に示す。

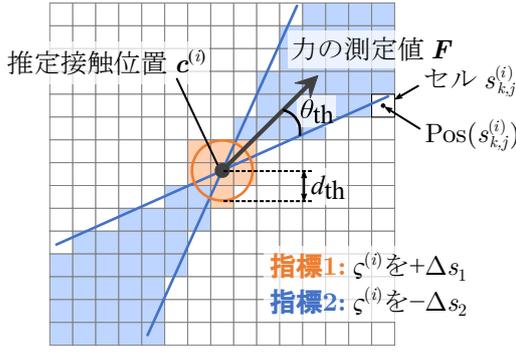


Fig. 2 形状推定概念図。各粒子は接触位置の推定値と測定値とを基に、2つの指標によって各セルでの形状表面の存在確率を増減させる。

一つ目の指標は、接触位置 \mathbf{c}_{k-1} が道具表面上にのみ存在することを表すものである。これは、次式によって表現される。

$$s_{k,j}^{(i)} = \frac{1}{1 + \exp(-\varsigma_{k,j}^{(i)})}, \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \varsigma_{k,j}^{(i)} &= \varsigma_{k-1,j}^{(i)} + \Delta s_1, \\ &\text{if } \|\text{Pos}(s_{k,j}^{(i)}) - \mathbf{c}_{k-1}^{(i)}\| < d_{\text{th}} \end{aligned} \quad (25)$$

ここで $\varsigma_{k,j}^{(i)}$ は形状パラメータの中間表現であり、 j はセルを特定するインデックスである。 Δs_1 は形状パラメータの増加量であり、 d_{th} は距離の閾値である。 $\text{Pos}(x)$ はセル x の中心位置である。この指標は、 $\mathbf{c}_{k-1}^{(i)}$ からの距離が d_{th} 未満であるセル $s_{k,j}^{(i)}$ の値を増加させる。

二つ目の指標は、接触位置の候補直線 (式 (3)) と道具表面との交差点は1点のみとするものである。この仮定は必ずしも正しくないが、広い範囲の形状パラメータを変更するため、推定的高速化が期待できる。この指標は、次式によって表現される。

$$s_{k,j}^{(i)} = \frac{1}{1 + \exp(-\varsigma_{k,j}^{(i)})}, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \varsigma_{k,j}^{(i)} &= \varsigma_{k-1,j}^{(i)} - \Delta s_2, \\ &\text{if } \text{Pos}(s_{k,j}^{(i)}) \in \text{cone}(\mathbf{c}_{k-1}^{(i)}, \mathbf{F}_{k-1}, \theta_{\text{th}}) \\ &\text{and } \|\text{Pos}(s_{k,j}^{(i)}) - \mathbf{c}_{k-1}^{(i)}\| \geq d_{\text{th}} \end{aligned} \quad (27)$$

ここで、 $\text{cone}(\mathbf{a}, \mathbf{v}, \theta)$ は頂点を \mathbf{a} 、軸を \mathbf{v} 、頂角を θ とする双円錐である。 Δs_2 は形状パラメー

Table 1 提案手法のパラメータ

項目	記号	値
粒子数	N	30
セルの大きさ	-	0.5 cm
セルの数	$\dim \mathbf{s}$	80×80
接触位置の標準偏差	σ_c	10^{-4} cm
モーメントの標準偏差	σ_M	10^{-3} Nm
距離の閾値	d_{th}	2 cm
角度の閾値	θ_{th}	$\frac{\pi}{12}$ rad
形状パラメータの増加量	Δs_1	10^{-2}
形状パラメータの減少量	Δs_2	5×10^{-3}

タの減少量であり、 θ_{th} は角度の閾値である。この指標は、接触位置の候補直線からの角度 θ_{th} 未満であるセル $s_{k,j}^{(i)}$ の値を減少させる。

4. シミュレーション検証

4.1 設定

提案手法を、平面上の接触を模擬したシミュレーションで検証した。本検証で利用した提案手法のパラメータを表1に記す。

道具の形状は平面上において直線状を取るとする。この設定は、例えば刃物においては通常は刃先の曲線状にのみ接触が生じる状況を模擬したものである。形状は力覚センサに固定された座標系において次式で表される：

$$\left\{ (x, y) \mid 0.1 \text{ m} \leq x \leq 0.3 \text{ m}, y = f(x) \text{ m} \right\} \quad (28)$$

ここで f は形状を指定する関数である。

接触位置 $\mathbf{c} = (c_x, c_y)$ は、2秒おきに次式に従って変化するとする。

$$c_x \sim U(0.1 \text{ m}, 0.3 \text{ m}), \quad (29)$$

$$c_y = f(x) \text{ m} \quad (30)$$

ここで $U(a, b)$ は $a \leq x < b$ の値域をとる一様乱数である。接触力 $\mathbf{f} = (f_x, f_y)$ は、75 s を境にして値の取り方が変化するとした。75 s までは、次式のように接触力の方向が時間的に変動

する。

$$f_x = A \sin \theta_f(t), \quad (31)$$

$$f_y = A \cos \theta_f(t), \quad (32)$$

$$\theta_f(t) = \frac{\pi}{6} \sin(4\pi t) + \theta_{\perp} \quad (33)$$

t は時刻であり、 θ_{\perp} は c_k において道具表面と垂直な方向の角度を表す。また、振幅 A は2秒おきに（すなわち、接触位置が変化すること）に次式によってランダムに変化する。

$$A \sim U(1.0 \text{ N}, 3.0 \text{ N}) \quad (34)$$

75 s以降は、接触力の変動がなくなり、2秒おきに次式のように定まるとした。

$$f_x = A \sin \theta_f, \quad (35)$$

$$f_y = A \cos \theta_f, \quad (36)$$

$$\theta_f \sim U\left(-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}\right) + \theta_{\perp}. \quad (37)$$

4.2 結果

形状推定の様子を図3に示す。ここで、赤色の曲線は形状の真値を表す。いずれの形状においても、形状パラメータが徐々に真値に収束している様子が観察できる。また、形状に応じて異なる形状パラメータへと収束していることから、提案手法によって形状推定ができたといえる。わずか30個の粒子で6400個ものパラメータで表現される形状が推定できたことは、提案手法の有効性を端的に示すといえる。

接触位置の推定結果を、既存手法と比較した。比較手法として、逐次最小二乗法を用いて形状情報を一切利用することなく接触位置を推定できる手法³⁾を利用した。ただし、逐次最小二乗法の忘却係数は $\alpha = 0.9$ とした。また、参考のため、形状既知における推定手法として式(4)を用いた手法⁴⁾を用いた。結果を図4に示す。ここでは、接触力の変動がなくなる75 s以降の接触位置の推定誤差について、各形状、各手法で5回の試行を実行した結果を示している。い

ずれの形状においても、提案手法は形状既知の場合にこそ劣るものの、比較手法よりも顕著に正確な推定ができた。これは、75 sまでの間に形状推定をおこなったためであり、形状推定をおこなうことの利点を示している。ただし、図3に示されたように、推定された形状はわずかであるが真値からのずれがあるため、形状既知の手法と比べると誤差が大きい。

提案手法と比較手法とでの接触位置推定の時系列を図5および6に示す。提案手法では接触力の変動がなくなった以降も、75 sまでと同程度に推定ができています。一方で、比較手法においては、75 s以降に接触位置の誤差が急増している。実際の作業中においては接触力が常に変動するとは限らないため、そのような場合は形状推定をおこなう提案手法のほうが有効であると期待される。

5. 結論

本研究では、確率モデルの工夫によって、高次元パラメータで表現される道具形状と道具上の接触位置とを同時に推定する技術を提案した。提案手法によって、わずか30個の粒子で6400個もの形状パラメータが推定できることが示された。また、形状推定を経ることによって、形状情報をまったく使わない場合よりも正確な接触位置推定ができることも示された。今後は、3次元空間への拡張やより複雑な形状への適用、ロボット制御への応用などの展開を想定している。

参考文献

- 1) A. Bicchi and D. Pavllo, "Intrinsic tactile sensing for artificial hands," in *Robotics Research - IV*, 1988, pp. 83-90.
- 2) A. Bicchi, "Intrinsic contact sensing for soft fingers," in *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and*

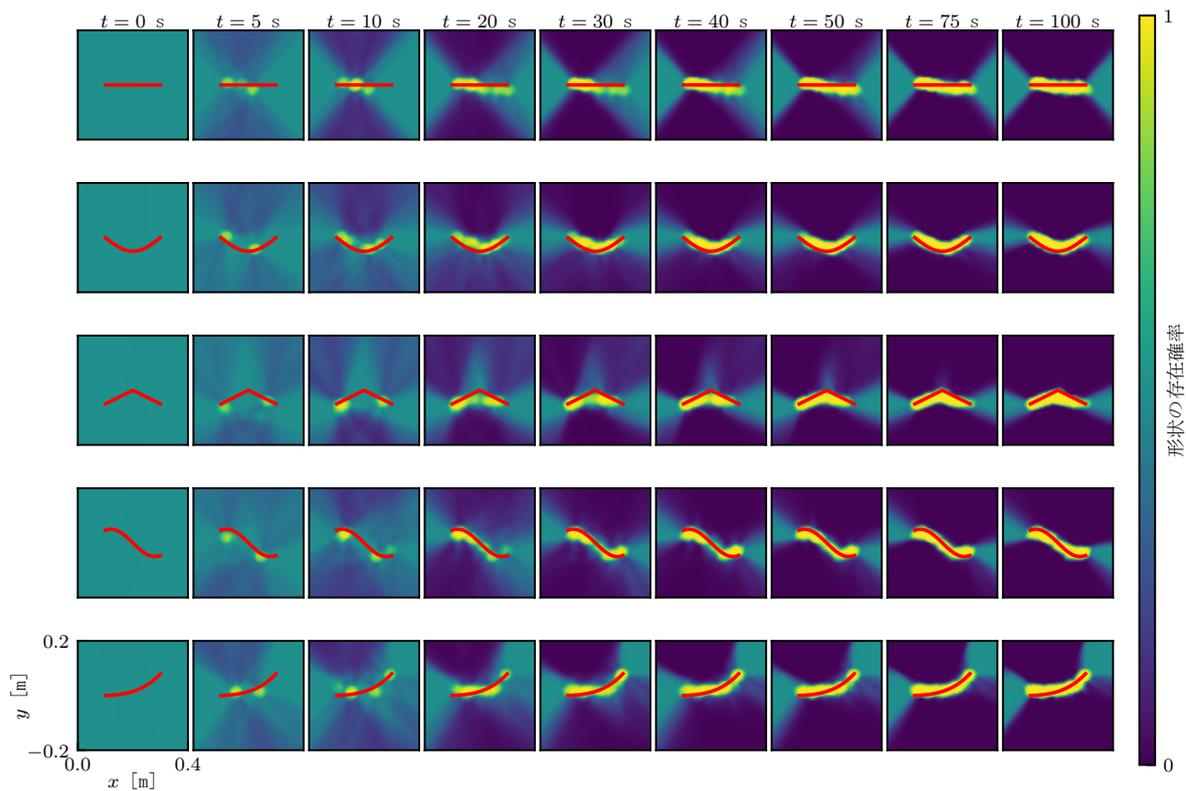


Fig. 3 さまざまな形状における形状推定の様子。形状パラメータが徐々に真値（赤色で表示）に収束していった。

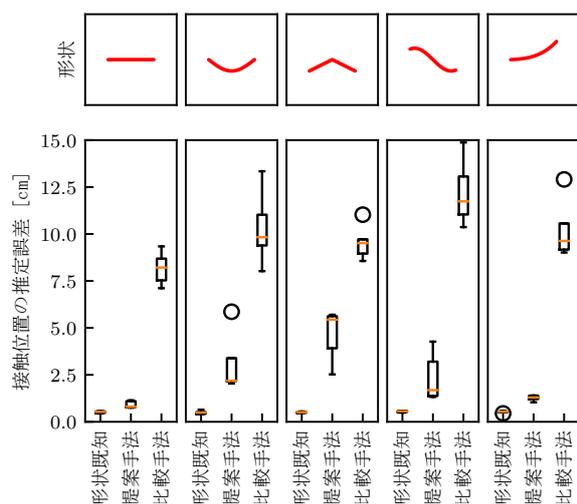


Fig. 4 75 s 以降の接触位置推定誤差の比較。提案手法はいずれの形状においても、形状情報を一切使わない比較手法よりも顕著に正確な推定ができた。

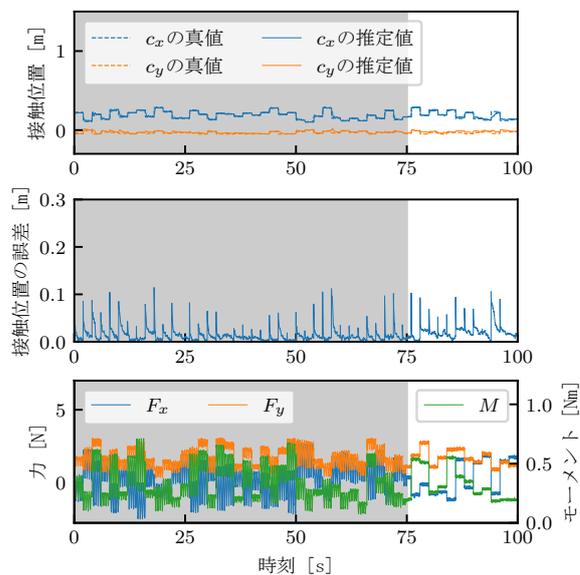


Fig. 5 提案手法での接触位置の推定結果。75 s で接触力の変動がなくなって以降も、変わらずほぼ正確に推定できている。

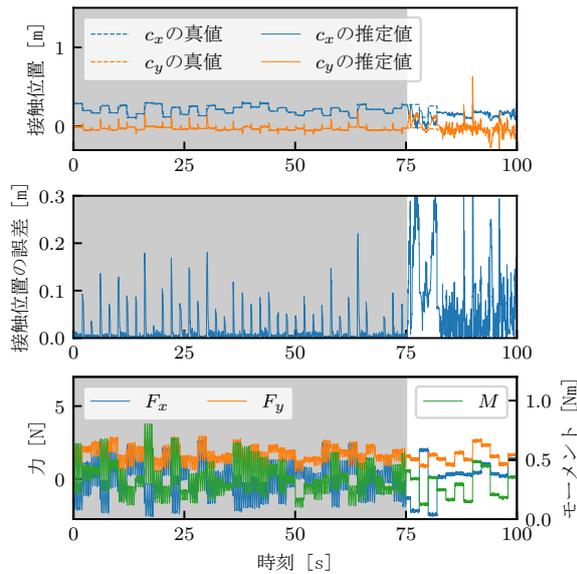


Fig. 6 比較手法での接触位置の推定結果。75 sで接触力の変動がなくなって以降は、推定誤差が急増している。

Automation. IEEE Comput. Soc. Press, 1990, pp. 968–973.

- 3) T. Tsuji, T. Seki, and S. Sakaino, “Intrinsic contact sensing for touch interface with movable structure,” vol. 64, no. 9, pp. 7342–7349, 2017.
- 4) J. Salisbury, “Interpretation of contact geometries from force measurements,” in *Proceedings. 1984 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1984, pp. 240–247.
- 5) M. H. Raibert and J. J. Craig, “Hybrid position/force control of manipulators,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 103, no. 2, pp. 126–133, jun 1981.
- 6) O. Khatib, “A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation,” *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 3, no. 1, pp. 43–53, feb 1987.
- 7) R. Koike, S. Sakaino, and T. Tsuji, “Contact point estimation in tactile interface using particle filter,” in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, vol. 24, no. 1. IEEE, oct 2017, pp. 8267–8272.
- 8) K. Kutsuzawa, S. Sakaino, and T. Tsuji, “Simultaneous estimation of contact position and tool shape using an unscented particle filter,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 9, no. 5, pp. 505–514, 2020.
- 9) K. P. Murphy, “Bayesian map learning in dynamic environments,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1999, pp. 1015–1021.
- 10) G. Grisetti, C. Stachniss, and W. Burgard, “Improving grid-based slam with rao-blackwellized particle filters by adaptive proposals and selective resampling,” in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2005, no. April. IEEE, 2005, pp. 2432–2437.
- 11) —, “Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 1, pp. 34–46, 2007.
- 12) S. Muto and K. Shimokura, “Contact point detection using force and velocity information complementarily.” *Journal of the Robotics Society of Japan*, vol. 11, no. 3, pp. 429–435, 1993.

- 13) H. Kitamura, S. Sakaino, and T. Tsuji, "Contact point calculation on a haptic interface utilizing differentiated force," *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 6, no. 2, pp. 151–159, 2017.
- 14) R. Featherstone, S. Thiebaut, and O. Khatib, "A general contact model for dynamically-decoupled force/motion control," in *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)*. IEEE, 1999, pp. 3281–3286.
- 15) K. Kutsuzawa, S. Sakaino, and T. Tsuji, "Estimation of individual contact force when two contact points exist during robotic tool use," in *The Abstracts of the international conference on advanced mechatronics : toward evolutionary fusion of IT and mechatronics : ICAM*, vol. 2015.6, no. 0. Japan Society of Mechanical Engineers, 2015, pp. 46–47.
- 16) —, "Estimation of individual force at three contact points on an end-effector by a six-axis force/torque sensor," in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 10 2016, pp. 6409–6414.
- 17) J. Park and O. Khatib, "Robot multiple contact control," *Robotica*, vol. 26, no. 5, pp. 667–677, 9 2008.
- 18) K. Kutsuzawa, S. Sakaino, and T. Tsuji, "A control system for a tool use robot: Drawing a circle by educating functions of a compass," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 29, no. 2, pp. 395–405, 4 2017.
- 19) N. Kurita, S. Sakaino, and T. Tsuji, "Whole-body force sensation by force sensor with end-effector of arbitrary shape," in *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 10 2012, pp. 5428–5433.
- 20) R. van der Merwe, A. Doucet, N. de Freitas, and E. Wan, "The unscented particle filter," 2000.
- 21) —, "The unscented particle filter," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 13. MIT Press, 2000.