

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5592703号  
(P5592703)

(45) 発行日 平成26年9月17日(2014.9.17)

(24) 登録日 平成26年8月8日(2014.8.8)

(51) Int. Cl. F I  
**B 2 5 J 19/02 (2006.01)** B 2 5 J 19/02  
 B 2 5 J 15/08 (2006.01) B 2 5 J 15/08 T

請求項の数 8 外国語出願 (全 14 頁)

(21) 出願番号	特願2010-122808 (P2010-122808)	(73) 特許権者	505212049
(22) 出願日	平成22年5月28日 (2010.5.28)		ジーエム・グローバル・テクノロジー・オペレーションズ・インコーポレーテッド
(65) 公開番号	特開2010-280054 (P2010-280054A)		アメリカ合衆国ミシガン州48265-3000, デトロイト, ルネッサンス・センター 300
(43) 公開日	平成22年12月16日 (2010.12.16)		
審査請求日	平成22年5月28日 (2010.5.28)		
(31) 優先権主張番号	12/474,068		
(32) 優先日	平成21年5月28日 (2009.5.28)		
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 粒子フィルタを使用した多指ロボットハンドのための接触状態推定

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

粒子フィルタ技法を使用してロボットハンドと対象物との間の接触状態を推定する方法であって、

接触位置、速度、及び力を含む測定値と、ハンド/対象物位置、ハンド/対象物向き又は対象物形状を含む接触状態との間の関係を記述する測定値モデルを用意し、

前記測定値モデルを使用して前記接触状態を推定する、各工程を備え、

前記測定値モデルは、トレーニングデータの集まりに基づき定式化されており、

前記トレーニングデータは、トレーニングデータの集まりの関数として定義される平均及び共分散パラメータを伴うガウス確率分布により、モデル化され、前記平均及び共分散パラメータは、ハンド/対象物状態空間における近い方から k 個の近傍値を用いて定義されることを特徴とする方法。

【請求項 2】

異なる種類間の共分散は、ゼロに設定されることを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

粒子フィルタ技法を使用してロボットハンドと対象物との間の接触状態を推定する方法であって、

接触位置、速度、及び力を含む測定値と、ハンド/対象物位置、ハンド/対象物向き又は対象物形状を含む接触状態との間の関係を記述する測定値モデルを用意し、

前記測定値モデルを使用して前記接触状態を推定する、各工程を備え、

前記測定値モデルは、トレーニングデータの集まりに基づき定式化されており、前記トレーニングデータは、放射基底関数を使用して定義され、前記放射基底関数は、前記接触状態空間における近い方から k 個の近傍値を用いて定義されることを特徴とする方法。

【請求項 4】

前記対象物は、窪みを含むプラスチックシートであることを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 5】

ロボットは、前記プラスチックシートの表面に対してその指を摺動させることにより、前記窪みの位置を推定することを特徴とする請求項 4 に記載の方法。

10

【請求項 6】

前記対象物は、円筒形であり、その円筒形における位置、向き、及び半径を推定することを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 7】

接触力情報が、ロボット指のリンク上に搭載された指骨ロードセルを使用して測定されることを特徴とする請求項 6 に記載の方法。

【請求項 8】

接触位置は、どの指骨ロードセルが、非ゼロ力を格納するかを特定することにより、判定されることを特徴とする請求項 7 に記載の方法。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

[0001]

本発明は、概して、ロボットハンドに組み込まれたセンサを使用して対象物の状態を検出するためのシステム及び方法に関し、特に、ロボットハンドと対象物の間の接触状態を推定するために粒子フィルタを採用した、対象物の状態を検出するためのシステム及び方法に関する。

【背景技術】

30

【0002】

[0002]

自立的で器用なマニピュレーションは、ロボット工学の研究のための挑戦的な領域である判明している。機械的に洗練された多くのロボットハンドが開発されたが、マニピュレータが把持しようとする対象物とどのように接触するかを正確に監視することは困難である。離れたパン/チルト可能な足場に搭載されたカメラを使用して、視覚的にハンド/対象物状態を監視しようとする試みはアピールである。しかしながら、マニピュレーションの過程で起こる閉塞状態が、接触する対象物の位置確認をより困難にする。代わりに、ロボットハンドの接触点の近くに置かれた接触センサが、ハンド/対象物状態の位置確認をより正確なものとしている。

40

[0003]

粒子フィルタは、時間経過に基づく一連のセンサ測定値を統合することにより、システムの状態を推定するベイズ状態推定過程の一実施化手法である。ロボット工学領域においては、粒子フィルタは、主に動的ロボットの位置確認の問題に適用されてきた。粒子フィルタを器用なマニピュレーションに適用しようとするアプローチは比較的少ない。初期の研究においては、ある研究者は、粒子フィルタをペグインホール挿入作業に適用した。ペグが、6 軸ロードセルを介して、ロボットマニピュレータに搭載された。制御システムは、接触が確立するまで、そのペグを面の方へ移動させた。マニピュレータを使用することにより、“接触ハイパー面”がオフラインで得られ、面のマップが形成された。一確認の間、粒子フィルタ測定モデルは、ペグの位置をマップ上の位置に一致させた。そのアプロ

50

ーチは、フォワードクラッチアセンブリに適用され、2, 3ミリ単位の位置確認が行えた。

[0004]

関連の研究において、他の研究者が、その粒子フィルタを、モデル化された非弾性対象物の位置確認の問題に適用した。エンドエフェクタが、6軸ロードセルを介して、マニピュレータに搭載された。ロードセルは、接触が確立するまで、対象物の方へ移動した。位置測定値が分析モデルに整合され、位置確認が達成された。その研究者により、その技法を任意の三角形の対象物に拡張するための方法が提案された。

[0005]

更に他の研究者は、既知の面への一点接触の位置確認に同様のアプローチを採用した。上記研究と同様、マニピュレータが対象物の面に接触している間、接触位置を測定することにより、位置確認が行われた。この研究は、位置確認をより迅速に達成するために、動的探査戦略を使用して、接触子を移動させた。

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

[0006]

粒子フィルタは、システムを、そのシステム状態が隠される隠蔽マルコフ過程としてモデル化している。センサ測定値(“観測値”)が、部分的に状態を反映している。各時間ステップにおいて、システムは、状態  $y_{t-1}$  から開始し、制御信号  $u_t$  を実行し、観測値  $z_t$  を排出しつつ状態  $y_t$  に到達する。その過程はマルコフ過程であるため、未来の状態への遷移は、(1)に示すように、条件付きで、全てのそれまでの観測値  $Z_t = z_1, \dots, z_t$  及び制御信号  $U_t = u_1, \dots, u_t$  に依存しない。

20

【0004】

【数1】

$$P(y_t | Z_t, U_t) \quad (1)$$

【0005】

この分布は、“信念状態”と呼ばれる。

30

[0007]

任意の(あるいは均一の)以前の分布から始めて、粒子フィルタは、前回の制御信号と測定値を統合することにより、各時間ステップ上の信念状態を反復的に更新している。これは、2つのステップで達成される。第一のステップ(動き更新)は、(2)に示すように、直近の制御信号を信念状態に組み込むことである。

【0006】

【数2】

$$\begin{aligned} P(y_t | Z_{t-1}, U_t) &= \sum_{y_{t-1}} P(y_t | y_{t-1}, Z_{t-1}, U_t) P(y_{t-1} | Z_{t-1}, U_t) \\ &= \sum_{y_{t-1}} P(y_t | y_{t-1}, u_t) P(y_{t-1} | Z_{t-1}, U_{t-1}) \end{aligned} \quad (2)$$

40

【0007】

ここで、マルコフの仮定によれば、 $P(y_t | y_{t-1}, u_t) = P(y_{t-1} | Z_{t-1}, U_t)$  と簡略化でき、また、現在の状態は、未来の接触信号に対して独立なのであるから、 $P(y_{t-1} | Z_{t-1}, U_{t-1}) = P(y_{t-1} | Z_{t-1}, U_t)$  と結論付けることができる。

[0008]

第二のステップ(測定値更新)は、直近の測定値を(3)のように組み込む。

【0008】

【数3】

$$P(y_t | Z_t, \alpha \Delta U_t) = \frac{P(z_t | y_t, Z_{t-1}, U_t) P(y_t | Z_{t-1}, U_t)}{P(z_t | Z_{t-1}, U_t)} \quad (3)$$

$$= \eta P(z_t | y_t) P(y_t | Z_{t-1}, U_t)$$

【0009】

ここで、 $P(z_t | Z_{t-1}, U_t)$  は、一定であると仮定される。マルコフの仮定により、等式  $P(z_t | y_t) = P(Z_t | y_t, Z_{t-1}, U_t)$  が成り立つ。

[0009]

10

信念状態分布を明示的に格納する代わりに、粒子フィルタは、状態が集合に属する確率が  $P(y_t | Z_t, U_t)$  に比例するように  $k$  個の点  $S_t = s_t^1 \cdot \dots \cdot s_t^k$  の有限集合を維持する。粒子フィルタの文脈においては、上述の動き及び測定値更新ステップは、以下のステップとなる。

【0010】

1. すべての

【0011】

【数4】

$$s_t^j \in S_t$$

20

【0012】

について、

2.

【0013】

【数5】

$$s_{t'}^j = \text{MotionUpdate}(s_t^j, u_t)$$

【0014】

3.

【0015】

30

【数6】

$$w_j = \eta P(z_t | s_{t'}^j)$$

【0016】

4. 重み  $W = w_1 \cdot \dots \cdot w_k$  に従って、 $S_t$  から  $S_{t+1}$  を再サンプルする。

[0010]

ステップ2においては、各粒子は、暗黙的に  $P(y_t | y_{t-1}, u_t)$  を符号化する MotionUpdate 関数に従って、確率的に移動する。ステップ3においては、粒子の各々は、新たな状態からどの程度観測ができるかに応じて重みづけされる。最後に、ステップ4は、重み  $W$  に比例した  $S_t$  からサンプルすることにより  $k$  個の粒子  $S_{t+1}$  の更新された組を作り出す。

40

【課題を解決するための手段】

【0017】

[0011]

本発明の教示によれば、ロボットハンドが触れようとする対象物の位置、向き及び形状を特定するための方法が開示されており、その方法は、粒子フィルタを使用している。また、その方法は、適切な動きモデルと、測定値モデルを規定している。動きモデルは、対象物に対して相対的に動くロボットハンドの動きを特徴付けている。また、測定値モデルは、接触位置、速度、及び、触覚センサ情報が与えられるハンド/対象物状態の観測の可能性を推定する。測定値モデルは、幾何学モデルに基づいて、又は トレーニングデータの

50

集まりに基づいて、解析的に近似される。いずれの場合も、測定値モデル分布は、ガウス分布として符号化されるか、又は放射基底関数を使用して符号化される。

[0012]

本発明の更なる特徴は、添付図面と併せてみれば、以下の記述及び付随の請求の範囲から、明らかになるであろう。

【図面の簡単な説明】

【0018】

[0013]

【図1】図1は、窪みを含んだプラスチックのフレキシブルシートを示す図である。[0014]

【図2】図2は、手（ハンド）の指と窪みとの間の接触状態を推定するために、粒子フィルタを採用した過程を使用して、図1に示されたプラスチックシートの窪みを検出するロボットハンドを示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0019】

[0015]

本発明の実施形態に係る以下の記述は、粒子フィルタを使用し、状態を推定し、ロボットハンドが触れようとする対象物の位置、向き及び形状を特定するシステム及び方法に関する。しかしながら、当業者であれば認識できるように、本発明は、ロボット以外の応用も考えられる。

[0016]

人間は、操作の間、触れる感覚を重視するという事実<sup>1</sup>に動機づけられて、本発明は、ロボットハンドに搭載された力又は触覚センサを使用してハンド/対象物状態を推定する方法を含んでいる。本発明は、接触位置及び接触速度と、力センサ測定値とを組み合わせ、ロボットハンドと対象物との接触状態を特定することを提案している。本発明の3つの実施形態が以下議論される。第一には、測定値モデルは、オフラインで得られたトレーニングデータの集まりから導かれた平均及び共分散を伴うガウス分布である。第二では、分布は、トレーニングデータから算出されたk個のガウス放射基底関数の混合からモデル化される。第三では、測定値モデルは、幾何学モデルと、測定値ノイズの分布に関する推定値を使用して解析的に算出される。

[0017]

本発明の全ての実施形態は、同じ動きモデルと、同じシステム状態表現を使用する。動きモデルは、確率分布  $P(y_t | y_{t-1}, u_t)$  ((4)参照) に応じて粒子を確率論的に移動させる関数により実現化される。マニピュレータの動きを  $u_t$ 、指令されたアクチュエータトルク、の関数としてモデル化することは困難であるので、そのモデルは、代わりにマニピュレータ速度の測定値に条件を与えることにより、簡略化される。この近似は、マニピュレータの慣性動力学を考慮に入れていないものの、本発明の目的の達成には十分正確である。動きモデルは、以下の式(4)として指令信号により生成できるマニピュレータ速度空間に渡って余分を排除することにより算出される。

【0020】

【数7】

$$P(y_t | y_{t-1}, u_t) = \sum_{\dot{q}_i} P(y_t | \dot{q}_i, y_{t-1}, u_t) P(\dot{q}_i | y_{t-1}, u_t) \quad (4)$$

【0021】

[0018]

しかしながら、通常、マニピュレータ速度を直接測定することが実用的であることから、つまり

【0022】

10

20

30

40

50

【数 8】

$$\dot{q} = \hat{q}$$

【0023】

であることから、測定値の確率に条件を与えることにより、上記合計が、以下の式(5)のように、排除できる。

【0024】

【数 9】

$$P(y_t | y_{t-1}, u_t) = P(y_t | \hat{q}_{t-1}, y_{t-1}) \quad (5) \quad 10$$

【0025】

[0019]

本発明の文脈においては、ハンド/対象物状態は、式(6)のように、対象物形状 についての相対的ハンド/対象物ポーズ から成る。

【0026】

【数 10】

$$y = \alpha, \beta \quad (6) \quad 20$$

【0027】

ここで、 は、指数座標におけるポーズを記述する仮定される。

[0020]

ハンドが、対象物に対して動くと、ハンド/対象物ポーズが、式(7)のように、アフィン変換に伏される。

【0028】

【数 11】

$$\alpha_{t+1} = R(\dot{q})\alpha_t + a(\dot{q}) \quad (7) \quad 30$$

【0029】

ここで、

【0030】

【数 12】

$$R(\dot{q})$$

【0031】

及び

【0032】

【数 13】

$$a(\dot{q}) \quad 40$$

【0033】

は、動きにより生じた、相対的向き及び位置における変化を記述している。粒子フィルタにより使用される動きモデルは、マニピュレータが、粒子フィルタ更新期間に

【0034】

【数 14】

$$\dot{q}$$

【0035】

50

の速度で移動した後の予測ハンド/対象物状態を確率的に算出する。

[0021]

測定値モデルは、センサ測定値  $z$  の確率を、システム状態  $y$  の関数として記述する。本発明は、接触位置、速度、及び力の測定値を使用する。これらの測定値は、対象物のハンドに対する接触を見つけ出して維持する機構に、暗黙的に制限される。組立てタスクの任意のマニピュレーションの工程において、ハンドは、部分的に対象物に接触すると仮定する。この点において、ハンドとアームの順応性が使用されて、接触点の数が改善されて拡張される。ハンド内に構築された機械的順応性、又は能動的トルク制御システムを使用して、順応性が達成される。加えて、ハンド接触が実際に起こる状況での推定のためのメカニズムが存在する必要がある。これは、接触が常に同じ位置で起こるといような、賢い設計の機械的構造により達成される。あるいは、それは、指に印加される負荷を直接的に測定する接触力センサにより達成される。ハンドが、対象物と  $k$  個の位置で接触するならば、 $k$  個の接触位置、速度、及び力のベクトルは、それぞれ、 $x = (x_1, \dots, x_k)$ 、 $v = (v_1, \dots, v_k)$ 、及び  $f = (f_1, \dots, f_k)$  として表現される。接触位置の推定値、

【0036】

【数15】

$\hat{x}$

【0037】

は、マニピュレータのどの点に対象物と接触するかを判定し（力センサを使用して、又はマニピュレータ構造の賢明な設計を介して）、マニピュレータ前方運動学の以前の知識と、ジョイント角度  $q$  のベクトルの測定値とを使用して位置を算出することにより、得られる。接触速度の評価値、

【0038】

【数16】

$\hat{v}$

【0039】

は、上記の差分をとることにより判定できる。最後に、接触力センサが使用されて、 $f$  の関数、 $\gamma = h(f)$  が推定される。測定値の組み合わせベクトルは、式(8)のようになる。

【0040】

【数17】

$z = (\hat{x}, \hat{v}, \gamma)$

(8)

【0041】

[0022]

本発明の3つの実施形態の各々は、異なる測定モデルを使用している。第一実施形態は、式(9)にあるように、測定値ベクトル  $z$  を、平均及び共分散を伴うガウス分布の状態関数としてモデル化している。

【0042】

【数18】

$P(z|y) = N(z|m(y), S(y))$

(9)

【0043】

ここで、

【0044】

10

20

30

40

50

【数 19】

$$N(z|\mu, \Sigma)$$

【0045】

は、ベクトル平均及び共分散行列  $m(y)$  及び  $S(y)$  を伴う測定値に渡るガウス確率分布関数である。

[0023]

パラメータ  $m(y)$  及び  $S(y)$  は、トレーニングデータの集まりから経験的に決定される。ロボットは、状態空間内を微細にサンプルし、対応する測定値を格納する。 $m(y)$  及び  $S(y)$  は、 $k$  個の順に近い値の組のサンプル平均及び共分散により近似される。パラメータ化に適した状態空間における計量距離を定義する。 $N^k(y)$  を、 $y$  に最も近い対応状態を伴う  $k$  個の測定値  $z$  の組とする。状態空間は、 $N^k(y)$  の各要素間で、局所的にユークリッド空間であると仮定すると、サンプル平均及び共分散は、式(10)及び(11)に示すようになる。

10

【0046】

【数 20】

$$m(y) = \frac{1}{k} \sum_{z_i \in N^k(y)} z_i \quad (10)$$

【0047】

【数 21】

$$S(y) = \frac{1}{k-1} \sum_{z_i \in N^k(y)} (z - m(y))(z - m(y))^T \quad (11)$$

20

【0048】

[0024]

第一実施形態は、ときに、異なるタイプの測定値の間の共分散が、式(12)に示すように、ゼロである仮定されるような檻ブロック対角形式を有するように、 $S(y)$  を制約する。

【0049】

【数 22】

$$S(y) = \begin{bmatrix} S_x(y) & 0 & 0 \\ 0 & S_v(y) & 0 \\ 0 & 0 & S_y(y) \end{bmatrix} \quad (12)$$

30

【0050】

ここで、 $S_x(y)$ 、 $S_v(y)$  及び  $S_y(y)$  は、各測定値タイプに対して別々に算出される  $N^k(y)$  の要素に対するサンプル共分散行列である。

[0025]

本発明の第二実施形態は、ガウス分布ではなく、放射基底関数 (RBFs) を使用して、測定モデルを近似する。RBFパラメータは、トレーニングデータの集まりに基づいてやはり決定される。しかしながら、近い方から  $k$  個の状態空間値の組に対してサンプル平均及び共分散を算出するのではなく、分布は、式(13)に示すように、 $k$  個の RBF の組としてモデル化される。

40

【0051】

【数 2 3】

$$P(z|y) = \frac{1}{\eta} \sum_{z_i \in N^k(y)} N(z|z_i, S_{rbf}) \quad (13)$$

【0052】

ここで、 $\eta$  は、正規化定数であり、 $S_{rbf}$  は、システム設計者により設定される一定共分散パラメータである。

[0026]

ガウスモデルとRBFモデルを比較することは意味あることである。測定モデル化に対するガウス分布によるアプローチは、測定値は、システム状態における雑音のある関数である仮定している。つまり、各状態は、本質的に、単一の“正しい”答えに関連している、ということである。これに対し、RBFアプローチというのは、多数モデル分布をモデル化できる。これは、システムの制御及び観測を超える原因により、あり得る測定が有限の組であるとき、又は、あり得る測定値の集合体が、ガウス分布でないときに適している。

[0027]

上述の第一及び第二の実施形態は、以下のように具体化される。図1は、プラスチックの窪み14を有するフレキシブルシートたるプラスチック12のイラスト10である。以下に議論されるように、窪み14は、ここで議論される粒子フィルタプロセスを使用してロボットハンドにより位置確認でき、そのプロセスは、経験的モデルに対して力センサ想定値を整合させている。

[0028]

図2は、ここでの議論と矛盾しない粒子フィルタプロセスを使用して、窪み14及び他の形状、物体又は特徴の位置確認が行えるロボットハンド20の斜視図である。ロボットハンド20は、複数のロボット指22及びロボット親指28を含んでおり、それぞれ、対象物を感知するための指関節角センサ24及び指骨センサ26を有している。そして、その対象物から測定値を得て、特徴を同定し、ハンド/対象物推定が行われる。ロボットハンド20は、指22をプラスチックシート12の表面全体に摺動させることにより、プラスチックシート12の窪み14の位置を確認する。指22が窪み14上を摺動していくときに、ロボットハンド20は、指関節角センサ24及び指骨センサ26を使用し、その窪み14の位置を特定する。

[0029]

第三実施形態は、トレーニングデータの集まりを参照することなく、解析的に測定値モデルを算出する。このアプローチは、状態空間の次元により、測定値モデル分布が十分にサンプリングできないときに、必要とされる。測定値は、状態のユニークな関数であると、常に仮定することができない、ということは既に指摘されてきている。一般的に、接触状態とハンド/対象物状態を区別する必要がある。ハンド/対象物状態は、粒子フィルタで推定される。しかしながら、接触測定値は、接触状態のユニークな関数である。多数接触状態は、任意のハンド/対象物状態と矛盾しない。 $x$ 、 $v$ 及び $f$ を、真の接触位置、速度、対象物に加わる力を表すものとして挙げる。すると、測定値である、

【0053】

【数 2 4】

 $\hat{x}, \hat{v}$ 

【0054】

及び  $\hat{f}$  は、以下の式のように、真の接触状態についての雑音のある関数として、モデル化できる。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 5 】

【数 2 5】

$$P(\hat{x}|x) = N(\hat{x}|x, \Sigma_x), P(\hat{v}|v) = N(\hat{v}|v, \Sigma_v)$$

【 0 0 5 6 】

及び、 $P(\quad | f) = N(\quad | h(f), \quad)$ 

ここで、 $\Sigma_x$ 、 $\Sigma_v$ 、及び $\quad$ は、対角対称共分散行列である。ジョイント分布は、故に、式(14)のようになる。

【 0 0 5 7 】

【数 2 6】

$$\begin{aligned} P(\hat{x}, \hat{v}, \gamma|y) &= \sum_{x,v,f} P(\gamma|x,v,f,y)P(\hat{v}|x,v,f,y)P(\hat{x}|x,v,f,y)P(x,v,f,y) \quad (14) \\ &= \sum_{x,v,f} P(\gamma|f,y)P(\hat{v}|v,y)P(\hat{x}|x,y)P(f|x,v,y)P(v|x,y)P(x|y) \\ &= \sum_{x,v} \left( \sum_f P(\gamma|f,y)P(f|x,v,y) \right) P(\hat{v}|v,y)P(v|x,y)P(\hat{x}|x,y)P(x,y) \end{aligned}$$

10

【 0 0 5 8 】

[0030]

接触力の空間を解析的に推定することは困難であるので、印加される力を接触位置と速度のみの関数とするようにシステムを制限することは有用である。これは、特定の方向における所望の力の大きさを維持するような力の制御により達成できる。この場合、直接的に $P(\quad | x, v, y) = \int P(\quad | f, y) P(f|x, v, y)$ とモデル化するようなデータ駆動アプローチを使用することができる。また、式(14)における $P(v|x, y)$ は、確定的なものであることに注意すべきである。故に、

20

【 0 0 5 9 】

【数 2 7】

$$\sum_v P(\hat{v}|v, y) P(v|x, y)$$

30

【 0 0 6 0 】

を、

【 0 0 6 1 】

【数 2 8】

$$\sum_{v \in \Gamma(x,y)} P(\hat{v}|v, y)$$

【 0 0 6 2 】

に置き換えることが可能である。ここで、 $\Gamma(x)$ は、対象物が構成 $y$ にあるとき、接触位置 $x$ で物体表面に接する単位ベクトル空間である。上記の2つの代入により、式(14)は、以下の式(15)のように簡略化できる。

40

【 0 0 6 3 】

【数 2 9】

$$P(\hat{x}, \hat{v}, \gamma|y) = \eta \sum_x \sum_{v \in \Gamma(x,y)} P(\gamma|x,v,y) P(\hat{v}|v,y) P(\hat{x}|x,y) \quad (15)$$

【 0 0 6 4 】

ここで、 $\eta = P(x, y)$ は、ハンド/対象物状態及び接触位置についての均一事前分布を符号化する正規化定数である。

[0031]

式(15)を使用するには、あり得る接触位置及び速度の組に渡った計算機による集中

50

的な加算を必要とする。x 及び v の範囲の空間に関する制約から、この加算はより扱いやすくなる。別の選択としては、その加算を最尤法により近似することである。式 (15) がピークを有する分布であるならば、それは式 (16) のように近似できる。

【0065】  
【数30】

$$P(\hat{x}, \hat{v}, \gamma | y) \approx \eta' P(\gamma | x_{max}, v_{max}, y) P(\hat{v} | v_{max}, y) P(\hat{x} | x_{max}, y) \quad (16)$$

【0066】

ここで、 $(x_{max}, v_{max})$  は、次式 (17) となる。

【0067】  
【数31】

$$(x_{max}, v_{max}) = \arg \max_{(x,v) \in X \times \Gamma(x,y)} P(\gamma | x, v, y) P(\hat{v} | v, y) P(\hat{x} | x, y) \quad (17)$$

【0068】

[0032]

x 及び v に渡る同時最大値も計算が煩雑なので、式 (17) を (18) 及び (19) で置き換えることが可能であることが分かった。

【0069】  
【数32】

$$x_{max} \arg \max_x P(\hat{x} | x) \quad (18)$$

【0070】

【数33】

$$v_{max} \arg \max_v P(\gamma | v, x_{max}) P(\hat{v} | v) \quad (19)$$

【0071】

[0033]

円筒位置確認は、解析的測定値モデルに基づくハンド/対象物状態推定について1つの応用である。この例においては、ロボットハンドは、工具を持つときのように、円筒形状の周りに複数の指を巻き付ける。ロボットハンドは、その円筒形状の上を僅かに移動する。接触位置及び速度の測定値は、複数の接触位置で得られる。これらの測定値の確率を状態の関数として推定するために、式 (5) が使用される。粒子フィルタは、これらの測定値を利用して、主軸方向及び半径方向の位置確認を進める。その結果、ロボットは、触覚的相互作用を介して円筒幾何形状の鍵となる要素を判定する。

[0034]

以上の議論は、本発明の単なる実施形態を開示し、記述したものである。当業者であれば、かかる議論と、添付の図面及び請求の範囲から、各種の変更、修正、及び変形が、以下の請求項の範囲に規定されるような発明の精神及び範囲から逸脱することなく、その範囲内であることが認識できるであろう。

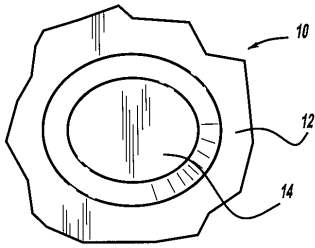
10

20

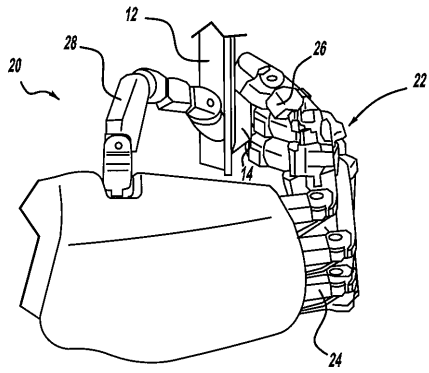
30

40

【 図 1 】



【 図 2 】



## フロントページの続き

(73)特許権者 510149563

ザ・ユナイテッド・ステイツ・オブ・アメリカ・アズ・リプレゼンテッド・バイ・ジ・アドミニ  
 トレーター・オブ・ザ・ナショナル・エアロノーティクス・アンド・スペース・アドミニストレ  
 ション

アメリカ合衆国ワシントン, ディストリクト・オブ・コロンビア 20546, サウスウエスト,  
 イースト・ストリート 300

(74)代理人 100140109

弁理士 小野 新次郎

(74)代理人 100089705

弁理士 社本 一夫

(74)代理人 100075270

弁理士 小林 泰

(74)代理人 100080137

弁理士 千葉 昭男

(74)代理人 100096013

弁理士 富田 博行

(74)代理人 100106208

弁理士 宮前 徹

(72)発明者 ロバート・ブラット

アメリカ合衆国テキサス州77019, ヒューストン, エルメン・ストリート 2415

(72)発明者 フランク・ノーブル・パーメンター

アメリカ合衆国テキサス州77598, ウェブスター, サラー・ディール 501, ナンバー 3  
 34

(72)発明者 クレイグ・エム・コーコラン

アメリカ合衆国テキサス州77401, ベルエア, サウス・サード・ストリート 511

(72)発明者 チャールズ・ダブリュー・ワンブラー, ザ・セカンド

アメリカ合衆国ミシガン州48009, バーミンガム, サフィールド・アベニュー 1196

審査官 鈴木 崇文

(56)参考文献 特開2004-160594(JP, A)

特開2007-075925(JP, A)

特開2007-160490(JP, A)

特開2008-119770(JP, A)

特開2007-285784(JP, A)

特開2007-052652(JP, A)

特開2008-014743(JP, A)

特開平08-174154(JP, A)

Petrovskaya, A.; Khatib, O.; Thrun, S.; Ng, A.Y., Bayesian estimation for autonomous  
 object manipulation based on tactile sensors, Robotics and Automation, 2006. ICRA 20  
 06. Proceedings 2006 IEEE International Conference on, 2006年 5月19日, 707 - 7  
 14

Klaas Gadeyne Herman, Herman Bruyninckx, Markov Techniques for Object Localization W  
 ith Force-Controlled Robots, Proceedings of the 10th International Conference on Advan  
 ced Robotics, 2001年 8月25日, pages:91-96

Goeger, D.; Ecker, N.; Woern, H., Tactile sensor and algorithm to detect slip in rob  
 ot grasping processes, Robotics and Biomimetics, 2008. ROBIO 2008. IEEE International  
 Conference on, 2009年 2月, pp.1480 - 1485

Morales, A. ; Chinellato, E. ; Fagg, A.H. ; del Pobil, A.P. , Experimental prediction of the performance of grasp tasks from visual features , Intelligent Robots and Systems , 2003. (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on , 2003年10月 , vol.3 , pp.3423 - 3428

Chen, H. ; Chang, K.C. , K-nearest neighbor particle filters for dynamic hybrid Bayesian networks , Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on , 2008年7月 , pp.1091 - 1101

(58)調査した分野(Int.Cl. , DB名)

B25J 1/00 - 21/02

IEEE Explore