

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局

(43) 国際公開日  
2012年12月27日(27.12.2012)



(10) 国際公開番号  
WO 2012/176249 A1

- (51) 国際特許分類:  
G01B 11/00 (2006.01) G05D 1/02 (2006.01)  
G01C 15/00 (2006.01) G01S 17/89 (2006.01)  
G01C 21/28 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2011/006846
- (22) 国際出願日: 2011年12月7日(07.12.2011)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願 2011-137623 2011年6月21日(21.06.2011) JP
- (71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 国立  
大学法人奈良先端科学技術大学院大学(NATION-  
AL UNIVERSITY CORPORATION NARA INSTI-  
TUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) [JP/JP];  
〒6300192 奈良県生駒市高山町8916-5  
Nara (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 日永田 佑  
介(HIEIDA, Yusuke) [JP/JP]; 〒6300192 奈良県生駒

市高山町8916-5 国立大学法人奈良先端  
科学技術大学院大学内 Nara (JP). 末永 剛(SUEN-  
AGA, Tsuyoshi) [JP/JP]; 〒6300192 奈良県生駒市高  
山町8916-5 国立大学法人奈良先端科学  
技術大学院大学内 Nara (JP). 竹村 憲太郎  
(TAKEMURA, Kentaro) [JP/JP]; 〒6300192 奈良県生  
駒市高山町8916-5 国立大学法人奈良先  
端科学技術大学院大学内 Nara (JP). 高松 淳  
(TAKAMATSU, Jun) [JP/JP]; 〒6300192 奈良県生駒  
市高山町8916-5 国立大学法人奈良先端  
科学技術大学院大学内 Nara (JP). 小笠原 司  
(OGASAWARA, Tsukasa) [JP/JP]; 〒6300192 奈良県  
生駒市高山町8916-5 国立大学法人奈良  
先端科学技術大学院大学内 Nara (JP).

- (74) 代理人: 小谷 悦司, 外(KOTANI, Etsuji et al.); 〒  
5300005 大阪府大阪市北区中之島2丁目2番2  
号大阪中之島ビル2階 Osaka (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保  
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA,  
BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO,  
CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI,  
GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS,

[続葉有]

(54) Title: SELF-POSITION ESTIMATION DEVICE, SELF-POSITION ESTIMATION METHOD, SELF-POSITION ESTIMATION PROGRAM, AND MOBILE OBJECT

(54) 発明の名称: 自己位置推定装置、自己位置推定方法、自己位置推定プログラム、及び移動体

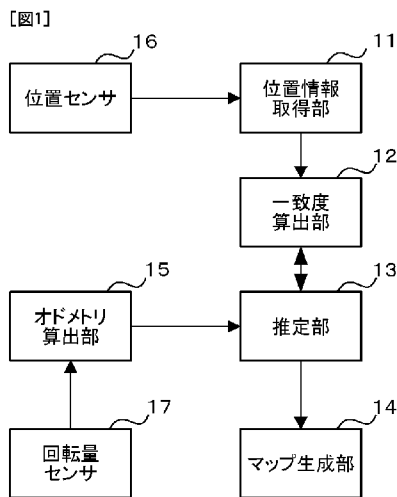


FIG. 1:  
16 Position sensor  
15 Odometry calculation unit  
17 Rotation amount sensor  
11 Positional information acquisition unit  
12 Coincidence degree calculation unit  
13 Estimation unit  
14 Map generation unit

(57) Abstract: A coincidence degree calculation unit (12) calculates the degree of coincidence of both pieces of positional information when positional information acquired at a time (t) by a positional information acquisition unit (11) is subjected to parallel translation and rotational movement with respect to positional information acquired at a time (t-1). An estimation unit (13) estimates a self-position by changing the parallel translation amount (T) and rotational movement amount (R) of the positional information at the time (t) to search for the parallel translation amount (T) and rotational movement amount (R) at which the degree of coincidence becomes maximum. When some measurement point of the positional information at the time (t) is present within a distance ( $\epsilon$ ) from some measurement point of the positional information at the time (t-1), the coincidence degree calculation unit (12) gives a predetermined point to the degree of coincidence.

(57) 要約: 一致度算出部 12 は、位置情報取得部 11 により時刻 t で取得された位置情報を、時刻 t-1 で取得された位置情報に対して平行移動及び回転移動させたときの両位置情報の一致度を算出する。推定部 13 は、時刻 t の位置情報の平行移動量 T 及び回転移動量 R を変更させて、一致度を最大にする平行移動量 T 及び回転移動量 R を探索し、自己位置を推定する。そして、一致度算出部 12 は、時刻 t の位置情報のある計測点が時刻 t-1 の位置情報のある計測点を中心として距離  $\epsilon$  以内に存在した場合、一致度に所定ポイント付与する。

WO 2012/176249 A1

JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

シア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラ

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

## 明 細 書

発明の名称：

自己位置推定装置、自己位置推定方法、自己位置推定プログラム、及び移動体

### 技術分野

[0001] 本発明は、移動体の自己位置を推定する技術に関し、特に、未知環境下で動作する移動体の自己位置を推定する技術に関するものである。

### 背景技術

[0002] 未知環境内をロボットが移動するためには、環境を計算機上にモデリングする必要がある。未知環境をモデリングする手法として、Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) が知られている（例えば、非特許文献1）。これは、未知環境下での相対的自己位置推定と地図生成を同時に行うことによって環境のモデリングを行う。SLAMでは周囲の環境は静的であるという仮定に基づくものが多く、動的環境下では、マッチング誤差が発生してしまうという問題があった。

[0003] そのため、作業領域を人と共有するような実環境下でロボットを運用する場合、人の往来など動的な環境変化に対応する必要がある。動的環境下で利用可能なSLAMとして、外れ値を考慮したランドマークに基づくアプローチが提案されている（例えば、非特許文献2）。

[0004] しかしながら、非特許文献2の手法には十分な数のランドマークが観察される必要性や、動的障害物による隠れの問題がある。

[0005] また、センシング対象の形状（非特許文献3）や、フレーム間の最近傍点距離（非特許文献4）によって、静止物体と移動物体とを区別し、マッチングを行う手法も提案されている。

[0006] しかしながら、非特許文献3、4の手法は、測定精度が移動物体かどうかを判定する判別器の性能に強く依存するという問題がある。

[0007] また、レーザレンジファインダで計測される2次元の位置情報のように、

複数の計測点により構成された位置情報同士のマッチングを行う手法として、L2ノルムを最小化する手法であるIterative Closest Point(ICP)も知られている(非特許文献5)。

[0008] 図23は、ICPを用いた場合のマッチングの誤差を示した図である。図23においては、ロボットの移動面を示す2次元の座標空間に、ロボットに搭載された位置センサにより計測された計測点と、移動体の周囲に存在する物体の実際の位置とが重ね合わせてプロットされている。そして、図23の円の点線で囲んだ領域に計測点と実際の位置との誤差が生じている。

[0009] このように、非特許文献5に示す手法では、図23に示すように、動的な環境下において多くのマッチング誤差が発生してしまう。

## 先行技術文献

### 非特許文献

[0010] 非特許文献1: S.Thrun et al. : “Simultaneous Mapping and Localization with Sparse Extended Information Filters: Theory and Initial Results” , Algorithmic Foundations of Robotics V, Vol.7, pp.363-380, 2003.

非特許文献2: Denis F Wolf, Gaurav s Sukhatme : “Mobile Robot Simultaneous Localization and Mapping in Dynamic Environments”

非特許文献3: A. Ess, B. Leibe, K. Schindler, L. vanGool : “Moving Obstacle Detection in Highly Dynamic Scenes” , ICRA09, 2009.

非特許文献4: 識名拓, 油田信一: “多く通行人がいる廊下環境での移動ロボットによる地図作成” , ROBOMECH2010, 1A2-D29, June 14-16, 2010.

非特許文献5: Sebastian Thrun , Wolfram Burgard , Dieter Fox : “Probabilistic robotics” , The MIT Press, 2005.

## 発明の概要

[0011] 本発明の目的は、移動物体が存在する未知環境下において移動体の自己位置を精度良く推定することができる技術を提供することである。

[0012] 本発明の一局面による自己位置推定装置は、移動体の自己位置を推定する自己位置推定装置であって、前記移動体の周辺空間に存在する各物体の位置

情報を時系列に取得する位置情報取得部と、前記位置情報取得部により第1時刻で取得された第1位置情報を、前記第1時刻と時系列的に前又は後の時刻である第2時刻で取得された第2位置情報に対して平行移動及び回転移動させたときの前記第1位置情報と前記第2位置情報との一致度を算出する一致度算出部と、前記第1位置情報の平行移動量及び回転移動量を変更させて、前記一致度を最大にする前記平行移動量及び前記回転移動量を探索し、前記自己位置を推定する推定部とを備え、前記一致度算出部は、前記第1位置情報を構成するある計測点に対し、一定距離内に前記第2位置情報を構成するある計測点が存在すれば、前記一致度に所定のポイントを付与し、付与したポイントの合計値を前記一致度として算出する。

[0013] また、本発明の別の一局面による移動体は、上記の自己位置推定装置と、前記位置情報を取得する位置センサとを備えている。また、本発明の更に別の一局面による自己位置推定方法及び自己位置推定プログラムは上記の自己位置推定装置と同じ特徴を備えている。

### 図面の簡単な説明

[0014] [図1]本発明の実施の形態による自己位置推定装置が適用された移動体のブロック図である。

[図2]本発明の実施の形態による自己位置推定装置の動作を示すフローチャートである。

[図3]図2のS2に示す探索処理の詳細を示すフローチャートである。

[図4]評価値の算出処理の詳細を示すフローチャートである。

[図5] (A) は評価値の算出手法を説明する概念図である。(B) は第1位置情報を構成する計測点  $a_1 \sim a_3$  が回転移動される様子を示している。

[図6]評価値としてL2ノルムを採用した場合において、動的環境下で時刻  $t-1$  の位置情報と時刻  $t$  の位置情報とにおいてマッチング誤差が生じる理由を示した図である。

[図7] (A) はSICKのLSM100の外観図である。(B) は本発明の実施の形態による移動体の外観図である。

[図8]位置センサの仕様を示した表である。

[図9]探索候補が生成される処理を説明する図である。

[図10]ハッシュテーブルを示した概念図である。

[図11] (A) は実験場所を示した図であり、(B) はこの実験場所に人物が行き来する動的環境を示した図である。

[図12]実験場所に人物が行き来していない静的環境下で生成した周辺空間の2次元マップを示している。

[図13]評価値として、L2ノルム、M-estimator、及びL0ノルムを用いた場合の実験結果を示した表である。

[図14]L2ノルムを採用した場合に作成した2次元マップである。

[図15]M-estimatorを採用した場合に作成した2次元マップである。

[図16]L0ノルムを採用した場合に作成した2次元マップである。

[図17]Brute-force、kd-tree、LSHを用いて計算時間を比較する実験を行った場合の実験結果をまとめた表である。

[図18]静的環境下でRBPF-SLAMを用いて生成した2次元マップである。

[図19]動的環境下で移動体を移動させながら計測した位置情報を利用し、L0ノルムを用いた評価値Eで位置情報同士のマッチングを行って生成した2次元マップである。

[図20]L2ノルムを用いた評価値で位置情報同士のマッチングを行って生成した2次元マップである。

[図21]RBPF-SLAMを用いて生成した2次元マップである。

[図22]本実施の形態による自己位置推定装置を用いて生成された2次元マップである。

[図23]ICPを用いた場合のマッチングの誤差を示した図である。

### 発明を実施するための形態

[0015] 以下、本発明の実施の形態による自己位置推定装置について説明する。図

1 は、本発明の実施の形態による自己位置推定装置が適用された移動体のブロック図である。自己位置推定装置は、位置情報取得部 11、一致度算出部 12、推定部 13、マップ生成部 14、及びオドメトリ算出部 15 を備えている。そして、自己位置推定装置は、位置センサ 16 により取得された位置情報に基づき、移動体の自己位置を推定する。移動体は、自己位置推定装置、位置センサ 16、及び回転量センサ 17 を備えている。

[0016] 本実施の形態では、自己位置推定装置は例えば CPU、ROM、RAM、及びハードディスク等を備えるコンピュータにより構成されている。そして、位置情報取得部 11、一致度算出部 12、推定部 13、マップ生成部 14、及びオドメトリ算出部 15 は、ハードディスクに格納された自己位置推定プログラムを例えば CPU が実行することで実現される。なお、自己位置推定プログラムは、DVD-ROM等のコンピュータ読み取り可能な記録媒体に記録されてユーザに提供される。ユーザはこの記録媒体をコンピュータにインストールすることで、コンピュータを自己位置推定装置として機能させる。

[0017] 位置情報取得部 11 は、位置センサ 16 により計測された移動体の周辺空間に存在する各物体の位置情報を一定の周期で時系列に取得する。ここで、位置情報は、物体が存在する箇所を示す計測点から構成されている。本実施の形態では、位置センサ 16 として、レーザレンジファインダが採用されている。そのため、計測点は、位置センサ 16 の位置を原点とし、位置センサ 16 の正面方向を基準方向とする 2次元のローカル座標空間において、その基準方向からの角度と、原点からの距離とを含む 2次元の極座標データにより表される。以下の説明では、ローカル座標空間は、基準方向に y 軸が設定され、原点を通り、かつ、基準方向に直交する方向に x 軸が設定されているものとする。

[0018] 一致度算出部 12 は、位置情報取得部 11 により第 1 時刻で取得された第 1 位置情報を、第 1 時刻と時系列的に前又は後の時刻である第 2 時刻で取得された第 2 位置情報に対して平行移動及び回転移動させたときの第 1 位置情

報と第2位置情報との一致度を算出する。本実施の形態では、第1時刻を時刻  $t$  とし、第2時刻を時刻  $t - 1$  として説明するが、これに限定されず、第1時刻を時刻  $t - 1$  とし、第2時刻を時刻  $t$  としてもよい。また、時刻  $t$  とは、位置センサが時系列に取得する位置情報の取得タイミングを示す。また、必要に応じて、位置情報の取得タイミングをフレームと記述する。

[0019] また、本実施の形態では、時刻  $t$  の位置情報と時刻  $t - 1$  の位置情報との一致の度合いを評価する評価値を用いて一致度を表す。具体的には、評価値  $E$  は、式 (1) により表される。

$$[0020] \quad E(R, T) = \sum_{i=1}^n f(R a_i + T, \{b_j\}) \quad (1)$$

$$f(a_i, \{b_j\}) = 0 \quad (\exists j, |a_i - b_j| \leq \varepsilon) \quad \text{or} \quad 1 \quad (\text{otherwise})$$

[0021] 但し、 $a_i$  は時刻  $t$  の位置情報の各計測点を表し、 $b_j$  は時刻  $t - 1$  の位置情報の各計測点を表している。また、 $R$  は時刻  $t - 1$  を基準としたときの時刻  $t$  の各計測点の回転移動量を示し、 $T$  は時刻  $t - 1$  を基準としたときの時刻  $t$  の各計測点の平行移動量を示す。 $i$  は時刻  $t$  の位置情報の計測点を特定するためのインデックスであり、 $j$  は時刻  $t - 1$  の位置情報の計測点を特定するためのインデックスである。 $\varepsilon$  はレーザレンジファインダの精度を考慮した距離である。 $n$  は計測点の個数を示している。

[0022] 式 (1) は、計測点  $a_i$  を  $R$  回転移動させ、かつ、 $T$  平行移動させたときにおいて、計測点  $a_i$  が計測点  $b_j$  を中心として距離  $\varepsilon$  以内に存在しなかった場合、評価値  $E$  に 1 のペナルティが課されると解釈することができる。したがって、式 (1) では評価値  $E$  が小さいほど時刻  $t - 1$  の位置情報と時刻  $t$  の位置情報との一致度が高いことを示す。

[0023] なお、式 (1) において、 $f(a_i, \{b_j\}) = 1 \quad (\exists j, |a_i - b_j| \leq \varepsilon) \quad \text{or} \quad 0 \quad (\text{otherwise})$  としてもよい。この場合、計測点  $a_i$  が計測点  $b_j$  を中心として距離  $\varepsilon$  以内に存在する場合、評価値  $E$  に 1 ポイントが付与され、一致度が高いほど評価値  $E$  が大きくなる。

[0024] 式 (1) の計算では、明示的に対応点を決定する必要はなく、単に、計測点  $b_j$  を中心として、距離  $\varepsilon$  内に計測点  $a_i$  が存在するか否かを判定すればよ

い。つまり、式（１）ではL 0ノルムを用いて評価値Eが定義されている。このようにして、計測点 $b_j$ に対して距離 $\varepsilon$ 内に計測点 $a_i$ が存在するか否かを探索する手法はr近傍探索と呼ばれている。

[0025] なお、ノルムとは距離を意味し、L 0ノルムの他、L 2ノルム等が存在する。L 2ノルムは距離の2乗和であり、従来より広く用いられている。

[0026] 図5（A）は、評価値Eの算出手法を説明する概念図である。図5（A）に示すように、時刻 $t-1$ の位置情報を構成するある計測点 $b$ に対し、時刻 $t$ の位置情報を構成するある計測点 $a_2$ は距離 $\varepsilon$ 内に位置している。よって、式（１）は $f(x) = 0$ となり、評価値Eにはペナルティが課されない。一方、時刻 $t$ の位置情報を構成する別の計測点 $a_1$ は計測点 $b$ に対し、距離 $\varepsilon$ 内に位置していない。よって、式（１）は $f(x) = 1$ となり、評価値Eには1のペナルティが課される。

[0027] 図5（B）は、時刻 $t$ の位置情報を構成する計測点 $a_1 \sim a_3$ が回転移動される様子を示している。図5（C）は、回転移動された計測点 $a_1 \sim a_3$ と計測点 $b_1 \sim b_3$ とにおいて評価値Eが算出される様子を示した図である。

[0028] 図5（C）では計測点 $b_1, b_2$ から距離 $\varepsilon$ 内に計測点 $a_1, a_2$ が位置しているが、計測点 $b_3$ から距離 $\varepsilon$ 内に計測点 $a_3$ が存在していない。そのため、評価値Eは1となる。

[0029] 図1に戻り、推定部13は、時刻 $t$ の位置情報の平行移動量 $T$ 及び回転移動量 $R$ を変更させて、一致度を最大にする平行移動量 $T$ 及び回転移動量 $R$ を探索し、自己位置を推定する。つまり、推定部13は、式（１）に示す評価値Eを最小にする回転移動量 $R$ 及び平行移動量 $T$ を探索する。このような探索を行い、その探索結果に基づいてマップを作成し、自己位置を推定する手法はSLAMと呼ばれている。

[0030] 具体的には、推定部13は、時刻 $t-1$ における位置情報において、時刻 $t$ における位置情報のローカル座標空間を平行移動量 $T$ で平行移動し、かつ、回転移動量 $R$ で回転させ、時刻 $t-1$ の位置情報と時刻 $t$ の位置情報との評価値Eを算出する処理を繰り返し、評価値Eを最小にする平行移動量 $T$ 及

び回転移動量  $R$  を探索する。

[0031] そして、推定部 13 は、評価値  $E$  を最小にする平行移動量  $T$  を時刻  $t - 1$  から時刻  $t$  までの移動体の移動量として求め、時刻  $t - 1$  における移動体の位置に移動量を加えた値を時刻  $t$  における移動体の位置として求める。

[0032] また、推定部 13 は、評価値  $E$  を最小にする回転移動量  $R$  を時刻  $t - 1$  から時刻  $t$  までの移動体の向きの変化量として求め、時刻  $t - 1$  における移動体の向きに変化量を加えた値を時刻  $t$  における移動体の向きとして求める。

[0033] ここで、時刻  $t$  における移動体の向きとしては、例えば、移動体の周辺空間を示す 2 次元のグローバル座標空間において、所定の基準方向に対する、時刻  $t$  における移動体の基準方向の角度を採用することができる。また、時刻  $t$  における移動体の位置としては、例えばグローバル座標空間における移動体の位置を採用することができる。

[0034] また、回転移動量  $R$  としては、例えば、時刻  $t - 1$  における移動体の向きに対する時刻  $t$  における移動体の向きの回転を示す  $2 \times 2$  の行列を採用することができる。また、平行移動量  $T$  としては、例えば、時刻  $t - 1$  から時刻  $t$  までの移動体の移動量を示す  $x$  成分と  $y$  成分との値を示す採用することができる。

[0035] 図 6 は、評価値  $E$  として  $L_2$  ノルムを採用した場合において、動的環境下で時刻  $t - 1$  の位置情報と時刻  $t$  の位置情報とにおいてマッチング誤差が生じる理由を示した図である。時刻  $t$  において、移動物体 41 は例えば人間のような移動する物体である。静止物体 42 は例えば壁のような静止している物体である。時刻  $t$  及び時刻  $t - 1$  の位置情報において、静止物体 42 のみが存在していれば、評価値  $E$  の最小値を求めると、時刻  $t - 1$  における静止物体 42 を時刻  $t$  における静止物体 42 に一致させることができ、誤差は生じない。

[0036] しかしながら、移動物体 41 が存在すると、移動物体 41 は時々刻々移動するため、時刻  $t$  における移動物体 41 及び静止物体 42 の位置関係と、時刻  $t - 1$  における移動物体 41 及び静止物体 42 の位置関係とは異なってし

まう。

- [0037] よって、評価値Eの最小値を求めたとしても、評価値EとしてL2ノルムを用いた場合は、移動物体41の影響により、時刻tにおける静止物体42に対して、時刻t-1における静止物体42を一致させることができない。その結果、静止物体42においてマッチング誤差が生じてしまうのである。
- [0038] このように動的環境下ではマッチング誤差が発生するが、本発明者らはL0ノルムを用いて評価値Eを算出すると、マッチング誤差を低減させることができることを見出した。そこで、本実施の形態では、評価値EをL0ノルムを用いて算出している。
- [0039] ノルムとは距離を示し、一般的によく用いられるのは、距離の2乗和であるL2ノルムである。L2ノルムを用いて最小の評価値Eを探索する場合、最適解を求める際に非線形最小二乗法を用いることができる。一方、L0ノルムを用いて最小の評価値Eを求める処理は、離散最適化問題に分類されるため、NP困難である。そのため、L0ノルムを採用した場合、時刻tに計測した位置情報の平行移動量T及び回転移動量Rを総当たりに変化させて最小の評価値Eを探索する必要がある。
- [0040] 図1に戻り、マップ生成部14は、推定部13により推定された時刻tでの移動体の位置及び向きをグローバル座標空間にプロットし、かつ、プロットした位置及び向きを基準とし、時刻tでの位置情報をプロットすることで、周辺空間の2次元マップを生成する。
- [0041] 位置センサ16は、レーザレンジファインダにより構成され、一定周期で時系列に位置情報を取得し、位置情報取得部11に供給する。レーザレンジファインダとしては、SICKのLMS100を採用することができる。図7(A)はSICKのLSM100の外観図である。図7(B)は本発明の実施の形態による移動体の外観図である。図7(B)に示すように、位置センサ16は移動体の前側に取り付けられている。
- [0042] 図8は、位置センサ16の仕様を示した表である。図8に示すように位置センサ16は、画角が270度であり、解像度が0.5度であり、測定可能

な範囲が20mであり、周波数が30Hzであり、取得できる計測点の個数が540個である。

[0043] 図1に戻り、オドメトリ算出部15は、移動体の車輪に取り付けられた回転量センサ17から供給される計測データにしたがって移動体のオドメトリを算出し、推定部13に供給する。ここで、オドメトリは回転量センサ17からの計測データに従って推定される時刻 $t-1$ を基準としたときの時刻 $t$ での移動体の自己位置である。本実施の形態では、オドメトリ算出部15は、位置センサ16と同じ周期で時系列にオドメトリを算出する。

[0044] 回転量センサ17は、移動体の左右一对の車輪のそれぞれに取り付けられ、移動体の車輪の回転量を示す計測データをオドメトリ算出部15に供給する。ここで、回転量センサ17は、位置センサ16と同じ周期で計測データを取得する。

[0045] 図7(B)に示すように移動体は、前方に設けられた左右一对の車輪91, 91、後方に設けられた左右一对の車輪92, 92を備えている。そして、一对の回転量センサ17は、それぞれ、車輪92, 92に取り付けられ、車輪92, 92の回転量を計測する。

[0046] その他、移動体は図7(B)に示すように、車輪91, 92の上部に設けられたフレーム93、フレーム93の底面931の表側に載置されたコンピュータ94、底面931の裏側に取り付けられたモータ95等を備えている。位置センサ16は、フレーム93の上部に設けられたバー932に取り付けられている。

[0047] コンピュータ94は、上記の位置情報取得部11～オドメトリ算出部15の機能を実現する。また、コンピュータ94は、移動体の駆動制御プログラムが実装され、移動体の駆動制御を司る。例えば、コンピュータ94は、マップ生成部14により生成された2次元マップを参照し、物体との衝突を回避しながら、所定のゴールに向けて移動するようにモータ95を駆動させる。

[0048] モータ95は例えば、車輪92, 92に取り付けられた一对のモータによ

り構成され、コンピュータ94からの信号に基づいて駆動する。左右一対のモータ95は、コンピュータ94からの信号にしたがって、車輪92, 92の回転量を変えることで移動体を旋回させる。

[0049] 次に、図1に示す自己位置推定装置の動作について説明する。図2は、本発明の実施の形態による自己位置推定装置の動作を示すフローチャートである。まず、位置情報取得部11は時刻tにおける位置情報を取得する(S1)。

[0050] 次に、推定部13は、時刻tにおける位置情報の平行移動量Tと回転移動量Rとを変化させて複数の探索候補を生成し、各探索候補の評価値Eを一致度算出部12に算出させ、評価値Eを最小にする探索候補を探索する(S2)。

[0051] 次に、推定部13は、S2で探索した探索候補の回転移動量Rと平行移動量Tとから移動体の自己位置を推定する(S3)。次に、マップ生成部14は、推定部13により推定された自己位置を2次元の座標空間にプロットし、移動体の周辺空間の2次元マップを生成する(S4)。S4の処理が終了すると、処理がS1に戻され、S1～S4の処理が繰り返される。

[0052] 図3は、図2のS2に示す探索処理の詳細を示すフローチャートである。まず、推定部13は、変数kに0を代入し、変数kを初期化する(S21)。

[0053] 次に、推定部13は、 $n1$  ( $n1$ は2以上の整数)個の探索候補を生成する。具体的には、推定部13は、オドメトリ算出部15により推定された移動体の自己位置から移動体の位置の事前確率を求め、この事前確率にしたがって、ランダムに $n1$ パターンの回転移動量R及び平行移動量Tを決定し、決定した $n1$ パターンの回転移動量Rと平行移動量Tとを用いて時刻tの位置情報を時刻t-1の位置情報に対してずらし、 $n1$ 個の探索候補を生成する(S22)。

[0054] ここで、事前確率としては、オドメトリ算出部15が推定した自己位置に近い位置ほど探索候補が多くなるような確率を採用することができる。そし

て、この事前確率にしたがった抽選処理によって  $n_1$  個の探索候補が生成される。

[0055] 図9は探索候補が生成される処理を説明する図である。図9では、(A)～(D)に向けて処理が進む。図9の各点は時刻  $t$  の位置情報の回転移動量  $R$  と平行移動量  $T$  との要素をまとめたものを点の位置として現してある。図9(A)では、S22の処理によって  $n_1$  個の探索候補が生成されている。

[0056] 次に、一致度算出部12は、 $n_1$  個の探索候補のそれぞれにつき、式(1)を用いて時刻  $t$  の位置情報との評価値  $E$  を算出する(S23)。

[0057] 次に、推定部13は、変数  $k$  が定数  $K$  未満の場合(S24でNO)、 $n_1$  個の探索候補の評価値  $E$  から  $n_1$  個の探索候補のそれぞれの重み値  $w_j$  を算出する(S25)。ここで、重み値  $w_j$  は式(2)によって規定される。

$$[0058] \quad w_j = \exp((m - E(R, T)) / k) \quad (2)$$

ここで、 $m$ 、 $k$  は定数である。 $m$  としては例えば想定される評価値  $E$  の最大値を採用することができる。 $j$  は探索候補を特定するインデックスである。式(2)に示すように評価値  $E$  が小さくなるほど、重み値  $w_j$  は大きくなる。

[0059] 次に、推定部13は、重み値  $w_j$  に基づき、 $n_1$  個の探索候補の中から  $n_2$  ( $n_2 < n_1$ ) 個の探索候補を抽出する(S26)。この場合、推定部13は、重み値  $w_j$  の値が大きいほど抽選確率が高くなるような抽選処理を行い、 $n_2$  個の探索候補を抽出してもよいし、重み値  $w_j$  が大きい順に  $n_2$  個の探索候補を抽出してもよい。

[0060] S26の処理により、図9(A)に示す  $n_1$  個の探索候補から図9(B)に示すように  $n_2$  個の探索候補が抽出される。図9(B)の例では、 $n_2 = 3$  と設定されているため、3個の探索候補が抽出されていることが分かる。

[0061] 図3に戻り、S27において、推定部13は、 $n_2$  個の探索候補のそれぞれにつき、 $n_3$  個の探索候補を生成する。この場合、推定部13は、 $n_2$  個の探索候補の原点を基準とし、 $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_\theta)$  の正規分布にしたがって、 $n_3$  パターンの回転移動量  $R$  及び平行移動量  $T$  を決定し、 $n_3$  個の探索

候補を生成すればよい。

[0062] 例えば、 $n_2 = 3$ の場合、3個の探索候補の原点を基準として $n_3$ 個の探索候補が生成される。この場合、 $n_2$ 個の探索候補の重み値 $w_j$ の値に応じて $n_3$ 個の個数を変えても良い。例えば、 $n_2 = 3$ の場合の探索候補を $Z_1 \sim Z_3$ とし、探索候補 $Z_1 \sim Z_3$ の重み値が $w_1 \sim w_3$ であったとする。但し、 $w_1 > w_2 > w_3$ である。この場合、探索候補 $Z_1 \sim Z_3$ から生成される探索候補の個数をそれぞれ $n_3(1) \sim n_3(3)$ とすると、重み値 $w_1$ に応じて、 $n_3(1) \sim n_3(3)$ の値を決定し、探索候補を生成すればよい。なお、 $n_3(1) > n_3(2) > n_3(3)$ である。

[0063] 図9(C)に示すように、S27の処理により、 $n_2$ 個の探索候補を基準として $n_3$ 個の探索候補が生成され、合計、 $n_2 \times n_3$ 個の探索候補が生成されていることが分かる。

[0064] 次に、推定部13は変数 $k$ を1インクリメントし(S28)、処理をS23に戻す。S24において、変数 $k$ が定数 $K$ 以上になった場合(S23でNO)、推定部13は、評価値 $E$ が最小の探索候補を特定する(S29)。

[0065] なお、2ループ目以降のS23において、S27で算出された全探索候補に対して評価値 $E$ が算出される。このように、推定部13は、S23~28の処理を $K$ 回繰り返し、評価値 $E$ が最小の探索候補を特定する。そして、探索候補を生成するにあたり、解となる可能性が高い回転移動量 $R$ 及び平行移動量 $T$ を持つ探索候補を重点的に生成する重点的サンプリングを行う。そのため、解となる探索候補を効率良く求めることが可能となる。

[0066] 評価値 $E$ を最小化する解を求める手法として、ベイズ推定を用いる手法が知られている。この手法は、L2ノルムを用いて評価値 $E$ を算出する手法において、位置推定の信頼性が移動物体の影響によって一時的に乏しくなることを防止し、位置推定の頑強性を高めるために用いられる。

[0067] 本実施の形態では、S26に示すように、 $n_1$ 個から $n_2$ 個に探索候補を絞り、以降の処理が行われている。このように、本実施形態ではベイズ推定ではなく、maximum-posteriori (MAP) 推定のように、解を絞り込んで次

のステップに処理を進める手法を採用している。そのため、解の正確性に懸念が残るが、L O ノルムは移動する物体に対して頑健であるため、M A P 推定を適用しても問題はない。その結果、探索候補の個数の増大を抑制し、最小の評価値Eを探索する処理を高速化することができる。

[0068] なお、図3において、S 2 2 が第1処理に相当し、S 2 5, S 2 6 が第2処理に相当し、S 2 7 が第3処理に相当し、S 2 4, S 2 9 が第4処理に相当する。

[0069] 次に、図3のS 2 3 に示す評価値の算出処理の詳細について説明する。ベクトルデータをハッシュ値に変換するアルゴリズムとして、L S H (Locality Sensitive Hashing) が知られている (Alexandr Andoni, Mayur Datar, Nicole Immorlica, Piotr Indyk, and Vahab Mirrokni : “Locality-Sensitive Hashing Scheme Based on p-Stable Distributions” , Nearest Neighbor Methods in Learning and Vision, MIT Press, 2006.)。

[0070] 上記のようにL O ノルムを用いた評価値Eにおいて、最小の評価値Eを探索する処理は最適化が困難であり、総当り法で計算されることが多い。したがって、探索範囲及び解像度によっては計算量が爆発的に増大してしまう。そのため、評価値Eの算出手法としては、可能な限り高速な手法を採用することが好ましい。

[0071] L O ノルムを用いた評価値Eにおいて最小の評価値Eを探索する場合、r 近傍を求める際の計算の負荷が大きい。r 近傍を求める単純なアルゴリズム (例えば、B r u t e f o r c e) の計算量はO (n) であるが、k d - t r e e やボロノイ図を用いれば、計算量をO (l o g n) まで減らすことができる。

[0072] しかしながら、L S H は、近似的ではあるがこれらの手法よりも更に高速であることが知られている。そこで、本実施の形態では、L S H を採用している。L S H は、データの距離が近いほど、高い確率で同じハッシュ値をとる性質を有する。同じハッシュ値に分類されたデータのみが近傍点の候補で

あるとみなすことで、計算量を大幅に削減することができる。

[0073] 図4は、評価値Eの算出処理の詳細を示すフローチャートである。まず、一致度算出部12は、時刻t-1の位置情報から複数のハッシュテーブルを生成する(S41)。ここで、ハッシュテーブルは、時刻t-1の位置情報の各計測点を所定のハッシュ関数を用いて格子空間に投影し、格子空間の各位置における計測点の存在の有無を示すテーブルである。格子空間は、時刻t-1における位置情報のローカル座標空間を距離εに基づき、格子状に区切ることで生成される空間である。ここで、ハッシュ関数hは式(3)により表される。

$$[0074] \quad h(b) = \langle (p \cdot b + q) / \varepsilon \rangle \quad (3)$$

但し、 $\langle \rangle$ は $(p \cdot b + q) / \varepsilon$ 以下の最大の整数を示す。pは1を平均とする正規分布により決定される。qは一様分布により0からεの範囲でランダムに決定される。bは計測点を示している。

[0075] 本実施の形態では、以下に示す2つのハッシュ関数 $h_x$ 、 $h_y$ を採用する。

$$[0076] \quad h_x(b) = \langle (p \cdot b_x + q_x) / \varepsilon \rangle \quad (3-1)$$

$$h_y(b) = \langle (p \cdot b_y + q_y) / \varepsilon \rangle \quad (3-2)$$

なお、 $q_x$ 、 $q_y$ は、qのx、y成分であり、一様分布により0からεの範囲でランダムに決定される。 $b_x$ 、 $b_y$ は計測点bのx、y成分である。

[0077] 計測点bはx軸及びy軸で規定されるローカル座標空間に位置している。したがって、一致度算出部12は、式(3-1)に示すように、 $h_x(b)$ を用いて計測点bの格子空間におけるx座標の値を求め、式(3-2)に示すように、 $h_y(b)$ を用いて計測点bの格子空間におけるy座標の値を求める。

[0078] 図10はハッシュテーブルを示した概念図である。図10(A)は時刻t-1の位置情報のローカル座標空間に設定された格子空間を示している。

[0079] 図10(B)は、図10(A)に示す格子空間に基づいて生成されたハッシュテーブルT1~T3を示している。図10(A)において、計測点bは

式 (3-1), (3-2) の $\langle \rangle$ の演算が施される前の位置にプロットされている。図10(A)において、例えば1行1列目の格子には計測点bが存在している。よって、この計測点bに $\langle \rangle$ の演算を施してハッシュ値 $h_x(b)$ ,  $h_y(b)$ を求めると、図10(B)に示すように、計測点bはハッシュテーブルT1の1行1列目のビンに位置することになる。よって、ハッシュテーブルT1の1行1列目のビンには計測点bの存在を示す、例えば1のラベルが設定される。一方、図10(A)において、例えば1行3列目の格子には計測点bが存在していない。よって、図10(B)に示すように、ハッシュテーブルT1の1行3列目のビンには計測点bの非存在を示す例えば0のラベルが設定される。

[0080] このようにして、計測点bが式(3-1)、(3-2)を用いて格子空間に投影され、ハッシュテーブルT1が生成される。

[0081] ここで、一致度算出部12は、式(3-1)、(3-2)に示すハッシュ関数を複数種類用意して、複数のハッシュテーブルを生成する。図10(B)の例では、3種のハッシュ関数 $h_1(=(h_{1x}(b), h_{1y}(b))) \sim h_3(=(h_{3x}(b), h_{3y}(b)))$ を用いて3個のハッシュテーブルT1~T3が生成されている。

[0082] この場合、一致度算出部12は、式(3-1)、(3-2)に示す、 $p$ ,  $q_x$ ,  $q_y$ の値を異なる値に設定することで複数種類のハッシュ関数を生成すればよい。

[0083] このように、複数のハッシュテーブルT1~T3を採用することで、計測点aが計測点bの距離 $\epsilon$ の範囲内にあるにも関わらず、たまたまハッシュテーブルにはハッシュ値が存在しなかったというような、探索ミスを防止することができる。

[0084] なお、上記では、(3-1)、(3-2)で示すハッシュ関数を用いたが、(3-1')、(3-2')で示すハッシュ関数を採用してもよい。

[0085]  $h_x(b) = \langle (b_x + q_x) / p \epsilon \rangle$  (3-1')

$h_y(b) = \langle (b_y + q_y) / p \epsilon \rangle$  (3-2')

[0086] (3-1)、(3-2)との違いは、 $p$ が分母に移され、 $\varepsilon$ に乘じられている点である。これにより、ローカル座標空間に設定される格子の長さが変わり、ハッシュテーブルにより多くの多様性を持たせることができる。

[0087] 図4に戻り、S42において、一致度算出部12は、時刻 $t$ の位置情報の各計測点 $a$ をハッシュ関数 $h_1 \sim h_3$ を用いて投影空間に投影し、計測点 $a$ のハッシュ値 $h_1(a) \sim h_3(a)$ を求める。

[0088] 次に、一致度算出部12は、求めたハッシュ値 $h_1(a) \sim h_3(a)$ のいずれかが対応するハッシュテーブル $T_1 \sim T_3$ に存在すれば、評価値 $E$ にペナルティを課さずに評価値 $E$ を算出する(S43)。

[0089] 例えば、ハッシュ値 $h_1(a)$ で示されるハッシュテーブル $T_1$ のビンに1のラベルが設定されていれば、ハッシュ値 $h_2(a)$ 、 $h_3(a)$ で示されるハッシュテーブル $T_2$ 、 $T_3$ のビンに0のラベルが設定されていても、計測点 $a$ から距離 $\varepsilon$ 内に計測点 $b$ が位置するとみなされ、評価値 $E$ にペナルティが課されない。

[0090] 一致度算出部12は、このような処理を各計測点 $a$ に対して行い、付与したペナルティの合計値を評価値 $E$ として算出する。このように時刻 $t-1$ の計測点 $b$ に基づいて予めハッシュテーブルを生成しておくことで、ハッシュテーブルの参照にかかる計算量を $O(1)$ にすることができる。

[0091] なお、上記実施の形態では、位置情報は2次元としたが、これに限定されず3次元であってもよい。この場合、位置センサ16として、例えば深度センサを採用すればよい。そして、周辺空間を3次元のグローバル座標空間で表し、推定した移動体の自己位置プロットしていき、3次元マップを採用してもよい。

[0092] <実験例>

次に、本発明の実施の形態による自己位置推定装置が適用された移動体の実験について説明する。

[0093] <実験環境>

本実験では、移動体として、車椅子型移動ロボットEMC-230を採用し、これ

に図8に示す仕様のレーザレンジファインダ(LRF)を取りつけ、センシングを行った。LRFがセンシングした情報は極座標で表現され、角度方向に等間隔である。センサからの距離が増大すると点の密度が疎になるため、セグメンテーションを行い、セグメント内の点の間隔が $\varepsilon$ 以下になるよう補間した。

[0094] 実験場所として、奈良先端科学技術大学院大学情報棟1階を用いた。動的環境をLRFで計測し、時刻 $t$ 、時刻 $t-1$ の位置情報のマッチングを行った。この実験において、移動体は静止した状態で動的環境の計測を行った。動的環境は幅10m程の廊下で奥行き20mの範囲で、25人前後の歩行者が移動していた。

[0095] 図11(A)は実験場所を示した図であり、図11(B)はこの実験場所に人物が行き来する動的環境を示した図である。

[0096] 図12は、実験場所に人物が行き来していない静的環境下で生成した周辺空間の2次元マップを示している。この2次元マップはRBPF-SLAMを用いて生成されたものであり真値とみなせる。

[0097] <実験結果>

この実験では最小の評価値 $E$ を探索する際の探索範囲を、 $x$ 軸方向、 $y$ 軸方向にそれぞれプラスマイナス20[cm]とし、角度をプラスマイナス0.3[rad]と設定した。そして、この探索範囲において、1.0[cm]、0.01[rad](=約0.57[deg])刻みで総当たり法で、回転移動量 $R$ 、平行移動量 $T$ を変化させて、評価値 $E$ の最小値を探索した。

[0098] そして、評価値 $E$ としてL0ノルムを採用した場合、L2ノルムを採用した場合、M-estimatorを採用した場合のマッチングの位置推定精度の比較を行った。この際、M-estimatorにはBiweight法に基づき、距離 $d$ に対し、以下の評価関数 $\rho(d)$ を用いた。

[0099]  $\rho(d) = B^2/2 \quad (d \geq B)$

o r

$$(B^2/2) (1 - (1 - (d/B)^2)^3) \quad (d < B)$$

- [0100] ここで、Bは任意の残差値であり、0.01 [m]とした。図13は、評価値Eとして、L2ノルム、M-estimator、及びL0ノルムを用いた場合の実験結果を示した表である。
- [0101] L2ノルムでは最大14 [cm]のマッチング誤差が発生しており、平均二乗誤差(RMSE)も10 [cm]ほどあった。一方、L0ノルムではマッチング誤差は最大1 [cm]であり、LRFの計測誤差内に収まっていることがわかる。
- [0102] 次に、LRFにより200フレーム分の位置情報を測定し、L2ノルム、M-estimator、及びL0ノルムをそれぞれ用いて隣接するフレーム同士の位置情報のマッチングを行い、2次元マップを生成した。
- [0103] 図14は、L2ノルムを採用した場合に作成した2次元マップである。図15は、M-estimatorを採用した場合に作成した2次元マップである。図16は、L0ノルムを採用した場合に作成した2次元マップである。
- [0104] 図14に示すようにL2ノルムを採用した場合、マッチング誤差により、移動体が移動していると誤認識され、2次元マップの生成に失敗していることが分かる。
- [0105] 図15に示すように、M-estimatorを採用した場合、大きなマッチング誤差はなかったが、累積したマッチング誤差により、移動体が移動していると誤認識され、2次元マップの生成に失敗している。一方、図16に示すように、L0ノルムを採用した場合、フレーム間のマッチング誤差がほとんど発生せず、自己位置推定装置は移動体が静止している状態を計測できている。
- [0106] この実験結果から分かるようにL0ノルムを採用した場合、他の手法を採用した場合に比べ、動的環境下において、高い頑健性を有していることが分かる。
- [0107] 次に、本実施の形態による自己位置推定装置の優位性を検証するため、L

SHを採用した場合、Brute-forceを採用した場合、及びkd-treeを採用した場合の計算時間の比較を行った。なお、評価値EとしてはL0ノルムを採用した。探索範囲は、上記の値と同じである。合計24000通りの評価値Eを計算し、総計算時間(Average calculation time)、1秒あたりに計算できるL0ノルムの数(Frequency of calculation aec.)、及びr近傍点が発見できた計測点の平均個数(Average match points)を求めた。

[0108] 図17は、Brute-force、kd-tree、LSHを用いて計算時間を比較する実験を行った場合の実験結果をまとめた表である。

[0109] 図17に示すように、Brute-force、kd-treeに比べ、LSHを用いた場合、総計算時間が短いことがわかる。しかしながら、Brute-force及びkd-treeに比べ、LSHはr近傍点が発見できた計測点の平均個数(Average match points)が15個ほど少ない。これは、LSHによる近傍点探索が近似であることが原因である。

[0110] この一致点数の差の影響を、複数フレームのマッチングにより2次元マップを生成することで調べる。図18は静的環境下でRBPF-SLAMを用いて生成した2次元マップである。この2次元マップを真値と見なす。

[0111] 図19は、動的環境下で移動体を移動させながら計測した位置情報を利用し、L0ノルムを用いた評価値Eで位置情報同士のマッチングを行って生成した2次元マップである。この2次元マップ内に存在する点は移動する人の軌跡を示している。

[0112] 図20は、L2ノルムを用いた評価値Eで位置情報同士のマッチングを行って生成した2次元マップである。両2次元マップのエッジの形状を比較すると、L0ノルムの方が動的環境下でも比較的正確に2次元マップが生成されていることが分かる。

[0113] 更に、図21に示すような大規模な2次元マップを生成した。図21は、RBPF-SLAMを用いて生成した2次元マップである。この2次元マップを真値と見なす。

[0114] L O ノルムでは、フレーム間のマッチングしか行っていないため、微少なマッチング誤差が累積し、図 2 2 に示すように地図が歪んでしまう。図 2 2 は、L O ノルムを用いて生成された 2 次元マップである。この 2 次元マップは、図 2 1 と同じ環境下で生成されたものである。図 2 2 に現れた歪みは、例えばループクロージング等の手法を適用すれば改善することができる。

[0115] 上記の自己位置推定装置及び移動体の技術的特徴は以下のようにまとめられる。

[0116] (1) 上記の自己位置推定装置は、移動体の自己位置を推定する自己位置推定装置であって、前記移動体の周辺空間に存在する各物体の位置情報を時系列に取得する位置情報取得部と、前記位置情報取得部により第 1 時刻で取得された第 1 位置情報を、前記第 1 時刻と時系列的に前又は後の時刻である第 2 時刻で取得された第 2 位置情報に対して平行移動及び回転移動させたときの前記第 1 位置情報と前記第 2 位置情報との一致度を算出する一致度算出部と、前記第 1 位置情報の平行移動量及び回転移動量を変更させて、前記一致度を最大にする前記平行移動量及び前記回転移動量を探索し、前記自己位置を推定する推定部とを備え、前記一致度算出部は、前記第 1 位置情報を構成するある計測点に対し、一定距離内に前記第 2 位置情報を構成するある計測点が存在すれば、前記一致度に所定のポイントを付与し、付与したポイントの合計値を前記一致度として算出する。

[0117] この構成によれば、第 2 位置情報に対して第 1 位置情報がずらされて一致度を最大とする平行移動量及び回転移動量が探索される。そして、一致度は、第 1 位置情報を構成するある計測点に対し、一定距離内に第 2 位置情報のある計測点が位置すれば所定のポイントが付与される。つまり、本構成では、静止物体のみならず移動物体を含む動的環境下においても頑強な L O ノルムを用いて一致度が算出されている。そのため、移動物体を含む未知環境下において、移動体の自己位置を正確に推定することができる。

[0118] (2) 前記一致度算出部は、前記周辺空間を前記一定距離に基づいて格子状に区切ることで格子空間を生成し、前記第 2 位置情報の各計測点を所定の

ハッシュ関数を用いて前記格子空間に投影し、前記格子空間の各位置における前記計測点の存在の有無を示すハッシュテーブルを生成し、前記第1位置情報の各計測点を前記ハッシュ関数を用いて前記格子空間に投影し、ある計測点の前記格子空間における位置が前記ハッシュテーブルに存在した場合、前記一致度に前記ポイントを付与することが好ましい。

[0119] この構成によれば、第2位置情報の各計測点が所定のハッシュ関数を用いて格子空間に投影され、各計測点の存在の有無を示すハッシュテーブルが生成される。そして、第1位置情報の各計測点もハッシュ関数を用いて格子空間に投影され、投影された計測点の位置がハッシュテーブルに存在すれば、第1位置情報を構成するある計測点の近傍に第2位置情報を構成するある計測点が存在するとみなされ、一致度に所定のポイントが付与される。このように、本構成では、第1、第2位置情報の計測点のハッシュ値同士を比較することで一致度が算出されているため、一致度を最大とする平行移動量及び回転移動量を高速に求めることができる。

[0120] (3) 前記一致度算出部は、種類の異なる複数のハッシュ関数を用いて前記ハッシュテーブルを複数生成し、前記第1位置情報のある計測点を各ハッシュ関数を用いて前記格子空間に投影し、いずれかの位置が対応するハッシュテーブルに存在した場合、前記一致度に前記ポイントを付与することが好ましい。

[0121] この構成によれば、複数のハッシュテーブルが採用されているため、第1位置情報のある計測点が第2位置情報のある計測点に対し、距離 $\varepsilon$ の範囲内にあるにも関わらず、たまたまハッシュテーブルにはハッシュ値が存在しなかったというような、探索ミスを防止することができる。

[0122] (4) 前記推定部は、前記平行移動量及び前記回転移動量をランダムに変化させて前記第1位置情報から $n_1$  ( $n_1$ は正の整数)個の探索候補を生成する第1処理と、各探索候補の前記一致度に基づき、各探索候補の重み値を算出し、算出した重み値に基づいて、 $n_2$  ( $n_2 < n_1$ )個の探索候補を抽出する第2処理と、抽出した $n_2$ 個の探索候補のそれぞれについて、所定の

確率分布に基づいて前記平行移動量及び前記回転移動量を変化させて  $n^3$  ( $n^3$  は正の整数) 個の探索候補を生成する第 3 処理と、前記  $n^3$  個の探索候補のそれぞれに対し、前記重み値を算出し、算出した重み値が最大となる探索候補を探索解として求める第 4 処理とを備えることが好ましい。

[0123] この構成によれば、解となる可能性の高い位置に重点的に第 1 位置情報がずらされて、複数の探索候補が生成されて第 2 位置情報との一致度が求められている。そのため、一致度を最大にする探索候補を効率良く算出することができる。

[0124] (5) 前記第 4 処理は、前記第 2、第 3 処理を所定回数繰り返す、前記重み値が最大となる探索候補を前記探索解として求めることが好ましい。

[0125] この構成によれば、第 2、第 3 処理が繰り返されるため、一致度を最大にする探索候補をより正確に算出することができる。

[0126] (6) 前記移動体のオドメトリを算出するオドメトリ算出部を更に備え、前記第 1 処理は、前記オドメトリから得られる前記移動体の位置の事前確率に基づき、前記平行移動量及び前記回転移動量をランダムに変化させて  $n^1$  個の探索候補を生成することが好ましい。

[0127] この構成によれば、第 1 処理において、解となる可能性の高い位置に重点的に第 1 位置情報をずらして探索候補を生成することができ、探索精度をより高めることができる。

[0128] (7) 上記の移動体は、(1) ~ (6) のいずれかの移動体と、前記位置情報を取得する位置センサとを備える。

[0129] この構成によれば、未知環境下において自己位置を精度良く推定しながら、移動することができる移動体を提供することができる。

## 請求の範囲

[請求項1]

移動体の自己位置を推定する自己位置推定装置であって、

前記移動体の周辺空間に存在する各物体の位置情報を時系列に取得する位置情報取得部と、

前記位置情報取得部により第1時刻で取得された第1位置情報を、前記第1時刻と時系列的に前又は後の時刻である第2時刻で取得された第2位置情報に対して平行移動及び回転移動させたときの前記第1位置情報と前記第2位置情報との一致度を算出する一致度算出部と、

前記第1位置情報の平行移動量及び回転移動量を変更させて、前記一致度を最大にする前記平行移動量及び前記回転移動量を探索し、前記自己位置を推定する推定部とを備え、

前記一致度算出部は、前記第1位置情報を構成するある計測点に対し、一定距離内に前記第2位置情報を構成するある計測点が存在すれば、前記一致度に所定のポイントを付与し、付与したポイントの合計値を前記一致度として算出する自己位置推定装置。

[請求項2]

前記一致度算出部は、前記周辺空間を前記一定距離に基づいて格子状に区切ることで格子空間を生成し、前記第2位置情報の各計測点を所定のハッシュ関数を用いて前記格子空間に投影し、前記格子空間の各位置における前記計測点の存在の有無を示すハッシュテーブルを生成し、前記第1位置情報の各計測点を前記ハッシュ関数を用いて前記格子空間に投影し、ある計測点の前記格子空間における位置が前記ハッシュテーブルに存在した場合、前記一致度に前記ポイントを付与する請求項1記載の自己位置推定装置。

[請求項3]

前記一致度算出部は、種類の異なる複数のハッシュ関数を用いて前記ハッシュテーブルを複数生成し、前記第1位置情報のある計測点を各ハッシュ関数を用いて前記格子空間に投影し、いずれかの位置が対応するハッシュテーブルに存在した場合、前記一致度に前記ポイントを付与する請求項2記載の自己位置推定装置。

- [請求項4] 前記推定部は、  
前記平行移動量及び前記回転移動量をランダムに変化させて前記第1位置情報から $n_1$  ( $n_1$ は正の整数)個の探索候補を生成する第1処理と、  
各探索候補の前記一致度に基づき、各探索候補の重み値を算出し、算出した重み値に基づいて、 $n_2$  ( $n_2 < n_1$ )個の探索候補を抽出する第2処理と、  
抽出した $n_2$ 個の探索候補のそれぞれについて、所定の確率分布に基づいて前記平行移動量及び前記回転移動量を変化させて $n_3$  ( $n_3$ は正の整数)個の探索候補を生成する第3処理と、  
前記 $n_3$ 個の探索候補のそれぞれに対し、前記重み値を算出し、算出した重み値が最大となる探索候補を探索解として求める第4処理とを備える請求項1～3のいずれかに記載の自己位置推定装置。
- [請求項5] 前記第4処理は、前記第2、第3処理を所定回数繰り返し、前記重み値が最大となる探索候補を前記探索解として求める請求項4記載の自己位置推定装置。
- [請求項6] 前記移動体のオドメトリを算出するオドメトリ算出部を更に備え、  
前記第1処理は、前記オドメトリから得られる前記移動体の位置の事前確率に基づき、前記平行移動量及び前記回転移動量をランダムに変化させて $n_1$ 個の探索候補を生成する請求項4又は5記載の自己位置推定装置。
- [請求項7] 請求項1～6のいずれかに記載の自己位置推定装置と、  
前記位置情報を取得する位置センサとを備える移動体。
- [請求項8] 移動体の自己位置を推定する自己位置推定方法であって、  
コンピュータが、前記移動体の周辺空間に存在する各物体の位置情報を時系列に取得する位置情報取得ステップと、  
コンピュータが、前記位置情報取得ステップにより第1時刻で取得された第1位置情報を、前記第1時刻と時系列的に前又は後の時刻で

ある第2時刻で取得された第2位置情報に対して平行移動及び回転移動させたときの前記第1位置情報と前記第2位置情報との一致度を算出する一致度算出ステップと、

コンピュータが、前記第1位置情報の前記平行移動量及び前記回転移動量を変更させて、前記一致度を最大にする前記平行移動量及び前記回転移動量を探索し、前記自己位置を推定する推定ステップとを備え、

前記一致度算出ステップは、前記第1位置情報のある計測点から一定距離内に前記第2位置情報のある計測点が存在すれば、前記一致度に所定のポイントを付与し、前記ポイントの加算値を前記一致度として算出する自己位置推定方法。

[請求項9]

移動体の自己位置を推定する自己位置推定プログラムであって、

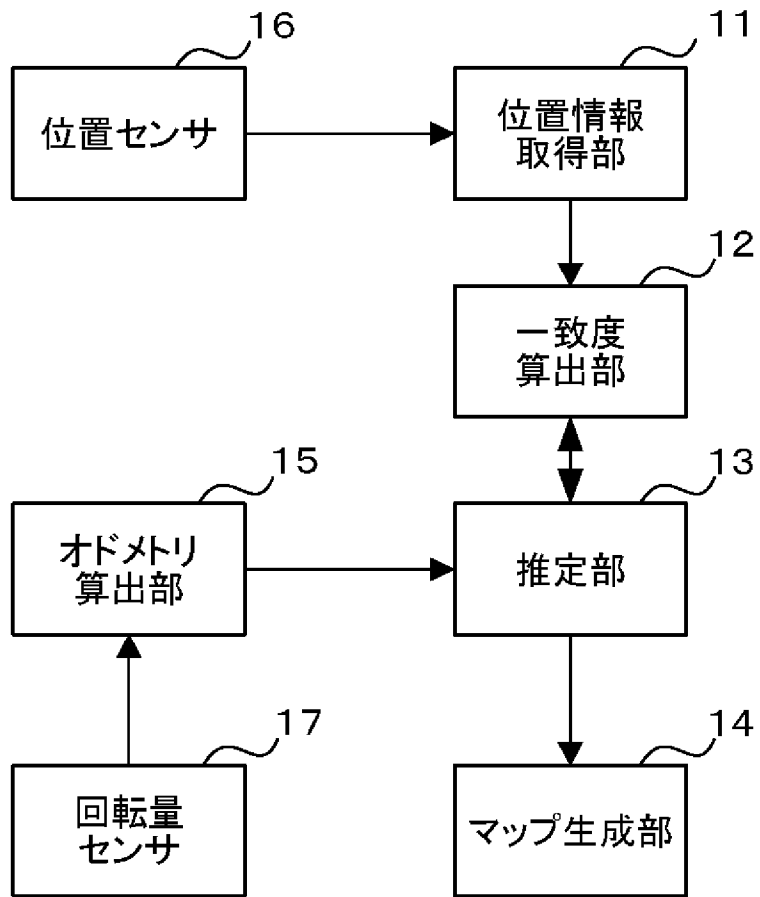
前記移動体の周辺空間に存在する各物体の位置情報を時系列に取得する位置情報取得部と、

前記位置情報取得部により第1時刻で取得された第1位置情報を、前記第1時刻と時系列的に前又は後の時刻である第2時刻で取得された第2位置情報に対して平行移動及び回転移動させたときの前記第1位置情報と前記第2位置情報との一致度を算出する一致度算出部と、

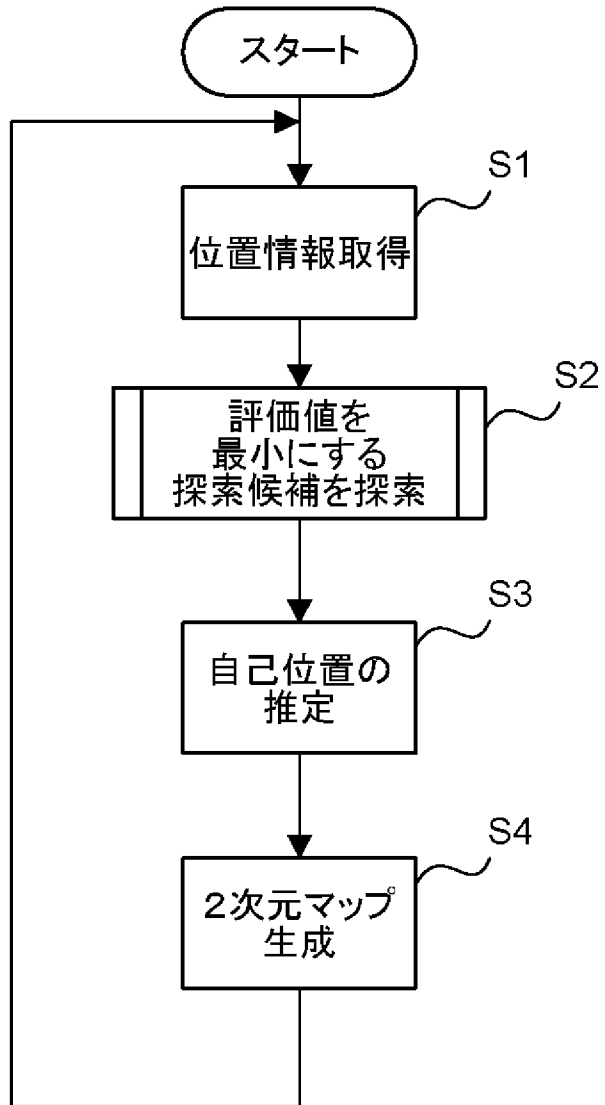
前記第1位置情報の前記平行移動量及び前記回転移動量を変更させて、前記一致度を最大にする前記平行移動量及び前記回転移動量を探索し、前記自己位置を推定する推定部としてコンピュータを機能させ、

前記一致度算出部は、前記第1位置情報のある計測点から一定距離内に前記第2位置情報のある計測点が存在すれば、前記一致度に所定のポイントを付与し、前記ポイントの加算値を前記一致度として算出する自己位置推定プログラム。

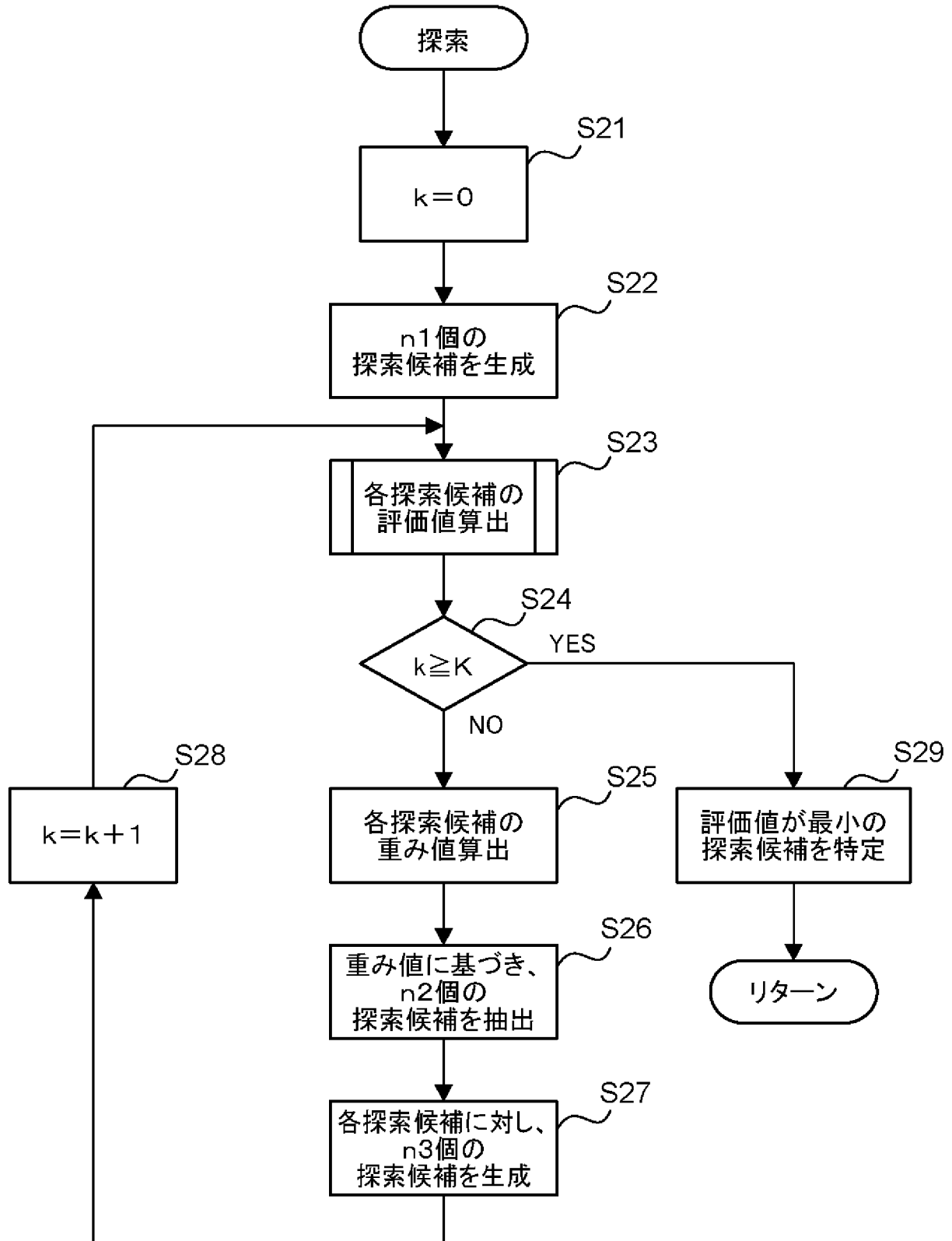
[図1]



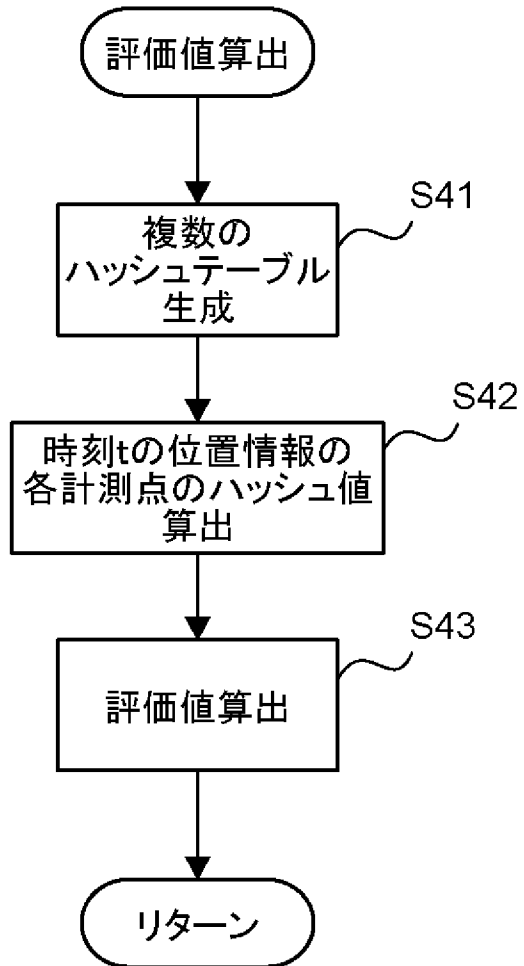
[図2]



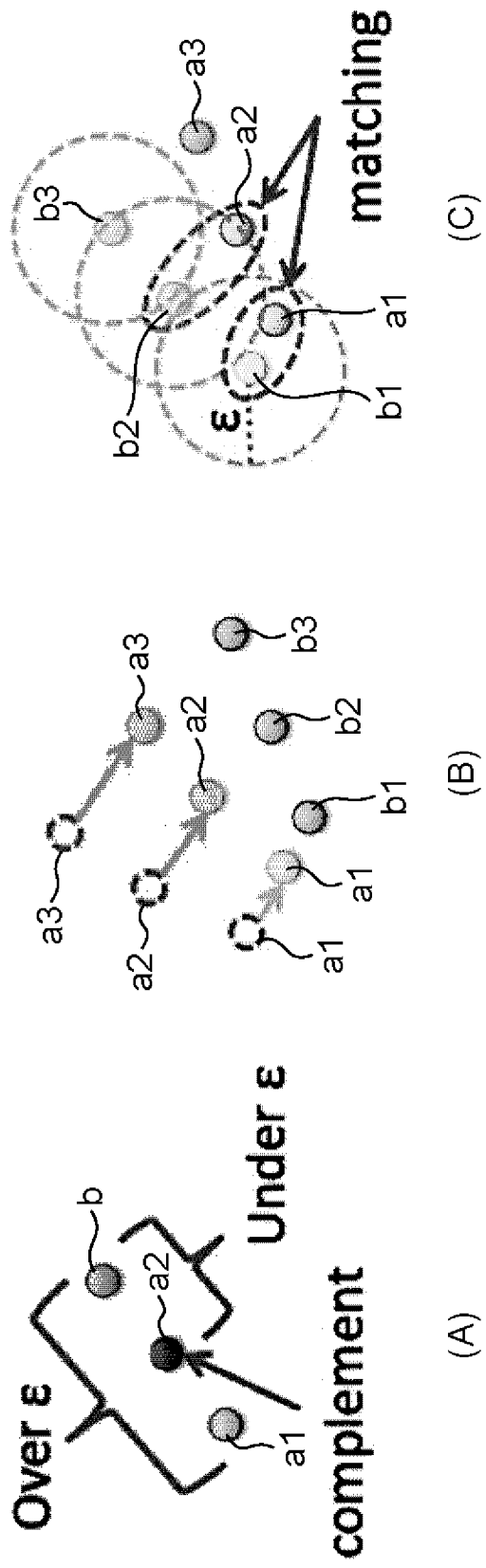
[図3]



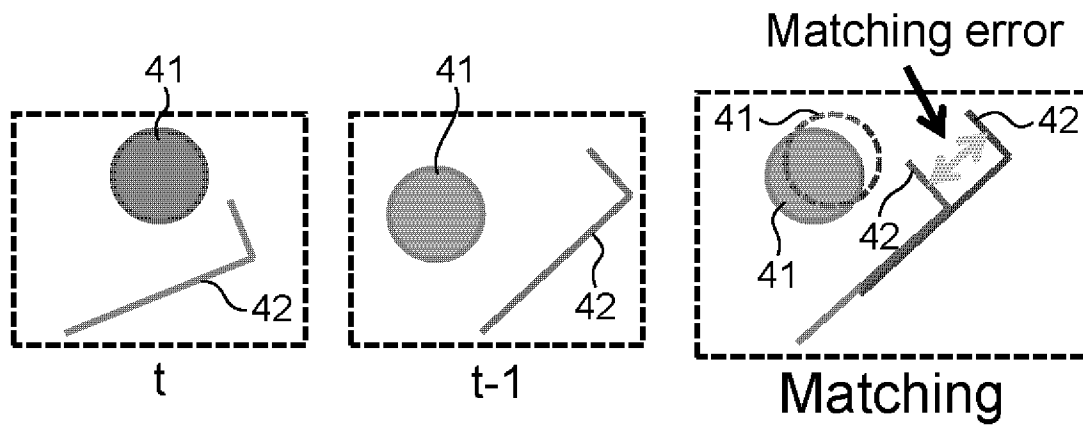
[図4]



[図5]



[図6]

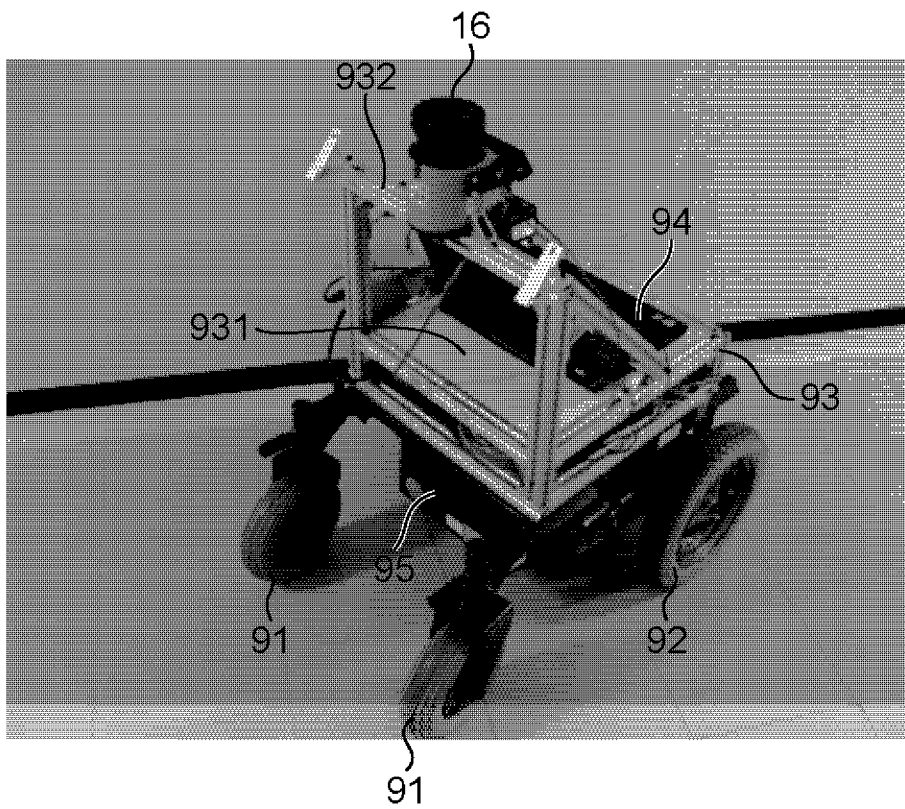


[図7]

(A)



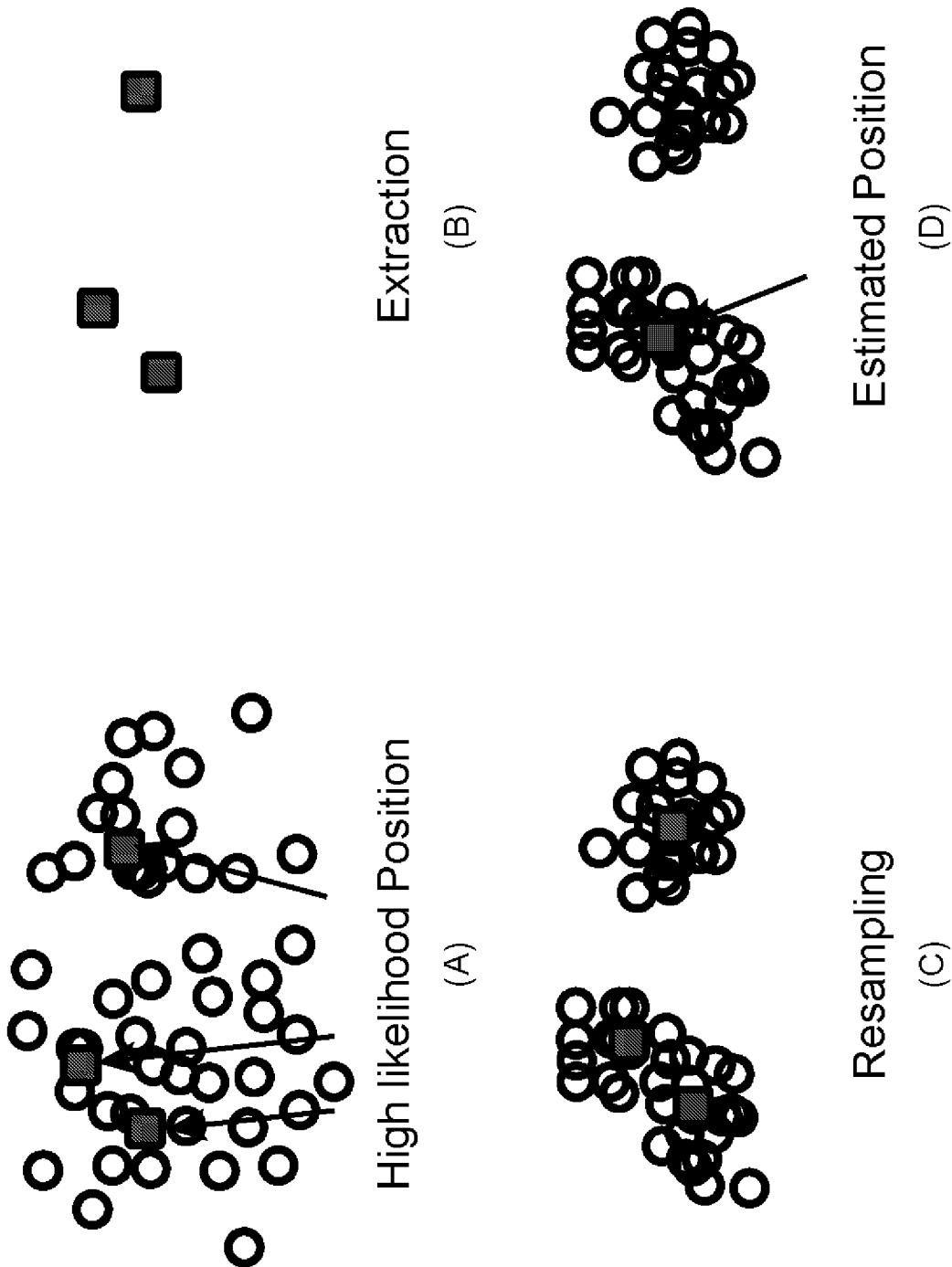
(B)



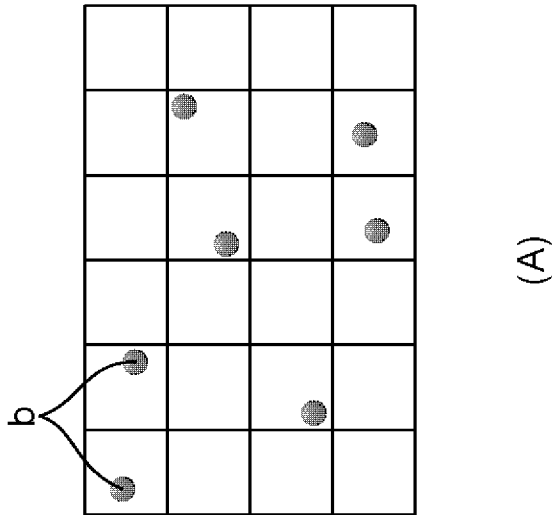
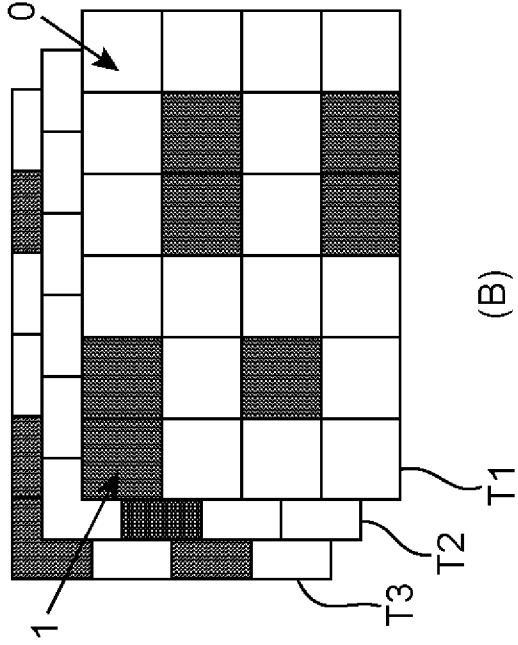
[図8]

View angle	270[deg]
Resolution range	0.5[deg] 20[m]
Frequency	30[Hz]
Num of points	540

[図9]



[図10]



[図11]

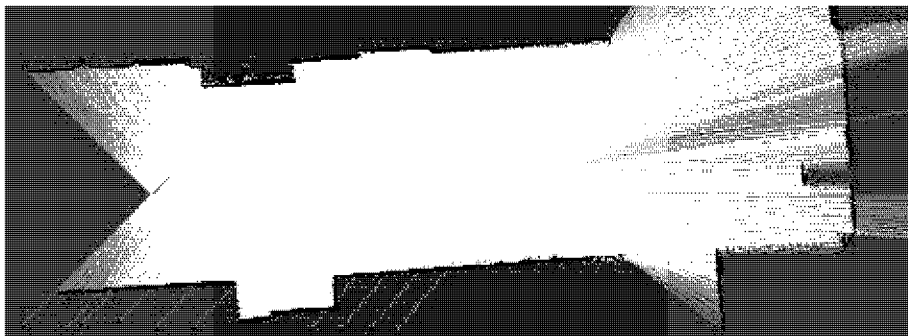
(A)



(B)



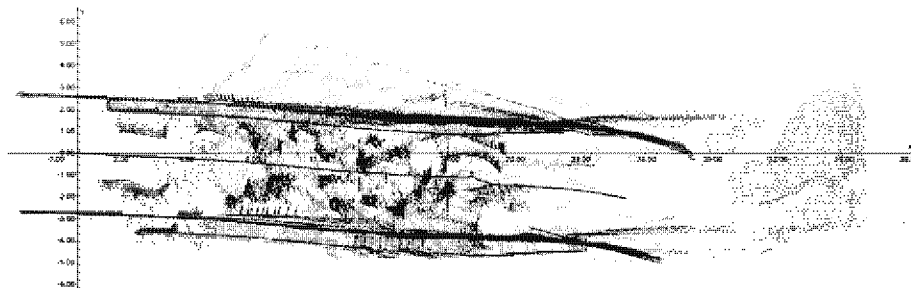
[図12]



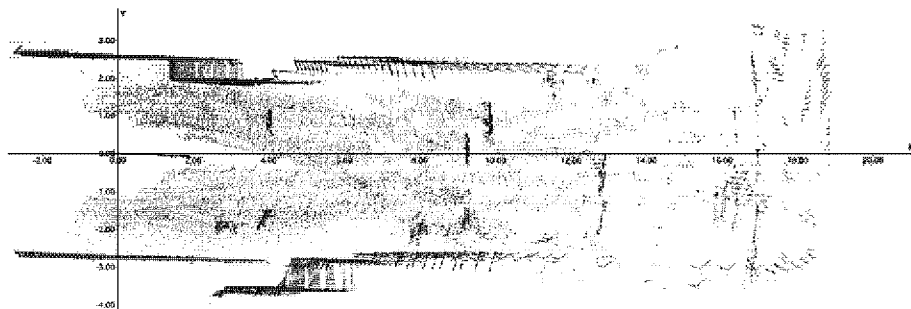
[図13]

Method	RMSE (x[m],y[m], $\phi$ [rad])
L <sub>2</sub> -norm	(0.1001, 0.0039, 0.0013)
M-estimator	(0.0165, 0.0020, 0.0013)
L <sub>0</sub> -norm	(0.0031, 0.0000, 0.0000)

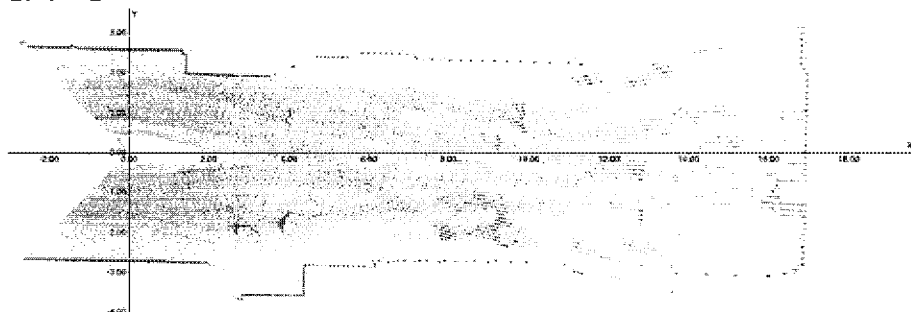
[図14]



[図15]



[図16]

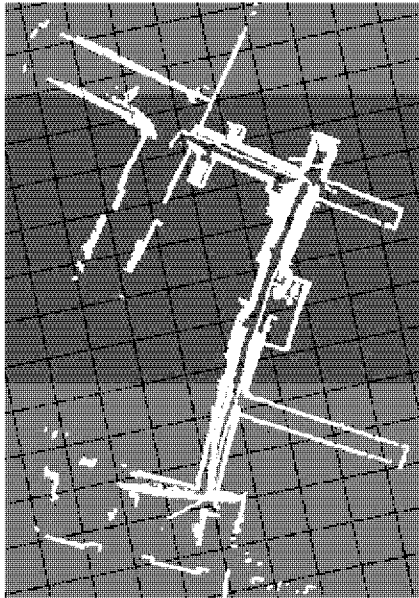


[図17]

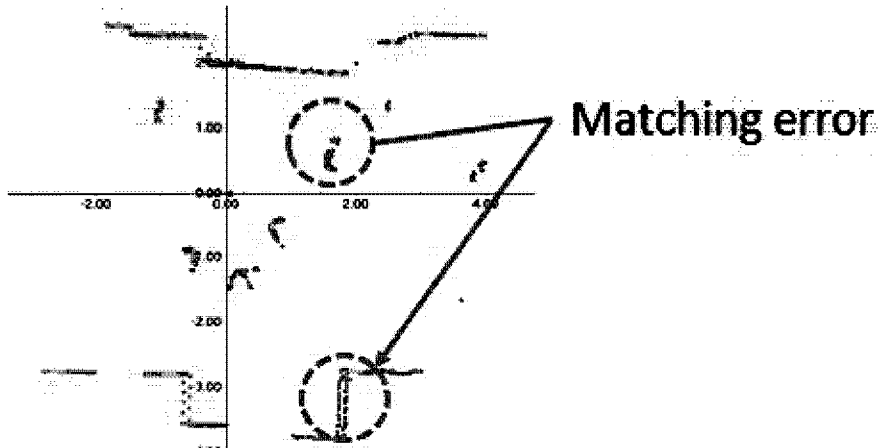
method	Average calculation time	Frequency of calculation a sec.	Average match points
Brute-force	2m6s	190	280.03
kd-tree	24s01	1000	280.03
LSH	12s59	1906	264.83



[図22]



[図23]



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/006846

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01B11/00(2006.01)i, G01C15/00(2006.01)i, G01C21/28(2006.01)i, G05D1/02(2006.01)i, G01S17/89(2006.01)n

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01B11/00-11/30, G01C15/00, G01C21/28, G05D1/02, G01S17/89

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2012
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2012	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2012

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	Yusuke HIEIDA, "Realtime SLAM Using L0-norm Minimization Under Dynamic Crowded Environments", [online], 24 March 2011 (24.03.2011), Nara Institute of Science and Technology, [retrieval date 23 January 2012 (23.01.2012)], Internet <URL:http://hdl.handle.net/10061/6230>	1-9
A	JP 2010-262546 A (National University Corporation University of Fukui), 18 November 2010 (18.11.2010), entire text; all drawings (Family: none)	1-9
A	JP 2011-48706 A (Fujitsu Ltd.), 10 March 2011 (10.03.2011), entire text; all drawings (Family: none)	1-9

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
24 January, 2012 (24.01.12)

Date of mailing of the international search report  
07 February, 2012 (07.02.12)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2011/006846

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 8-261719 A (Toshiba Corp.), 11 October 1996 (11.10.1996), entire text; all drawings (Family: none)	1-9
A	JP 2008-40677 A (Toyota Motor Corp.), 21 February 2008 (21.02.2008), entire text; all drawings (Family: none)	1-9

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G01B11/00(2006.01)i, G01C15/00(2006.01)i, G01C21/28(2006.01)i, G05D1/02(2006.01)i, G01S17/89(2006.01)n

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G01B11/00-11/30, G01C15/00, G01C21/28, G05D1/02, G01S17/89

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2012年
日本国実用新案登録公報	1996-2012年
日本国登録実用新案公報	1994-2012年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	日永田佑介, LO ノルム最小化を利用した動的な混雑環境下に適用可能なリアルタイムSLAM, [online], 2011.03.24, 奈良先端科学技術大学院大学, [検索日 2012.01.23], インターネット <URL:http://hdl.handle.net/10061/6230>	1-9
A	JP 2010-262546 A (国立大学法人福井大学) 2010.11.18, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-9

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

\* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの  
 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの  
 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)  
 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献  
 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの  
 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの  
 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの  
 「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

24.01.2012

国際調査報告の発送日

07.02.2012

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)  
 郵便番号100-8915  
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

丑田 真悟

電話番号 03-3581-1101 内線 3258

2S 3100

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2011-48706 A (富士通株式会社) 2011.03.10, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-9
A	JP 8-261719 A (株式会社東芝) 1996.10.11, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-9
A	JP 2008-40677 A (トヨタ自動車株式会社) 2008.02.21, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-9