

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5959899号
(P5959899)

(45) 発行日 平成28年8月2日(2016.8.2)

(24) 登録日 平成28年7月1日(2016.7.1)

(51) Int. Cl.	F I				
GO 1 B 11/24 (2006.01)	GO 1 B	11/24	K		
GO 1 B 11/245 (2006.01)	GO 1 B	11/245			
GO 1 C 3/06 (2006.01)	GO 1 C	3/06	1 4 O		
GO 6 T 1/00 (2006.01)	GO 1 C	3/06	1 1 O V		
GO 1 B 11/04 (2006.01)	GO 1 C	3/06	1 2 O Q		
請求項の数 8 (全 22 頁) 最終頁に続く					

(21) 出願番号 特願2012-82013 (P2012-82013)
 (22) 出願日 平成24年3月30日 (2012.3.30)
 (65) 公開番号 特開2013-210339 (P2013-210339A)
 (43) 公開日 平成25年10月10日 (2013.10.10)
 審査請求日 平成26年11月27日 (2014.11.27)

(73) 特許権者 000005326
 本田技研工業株式会社
 東京都港区南青山二丁目1番1号
 (74) 代理人 110000800
 特許業務法人創成国際特許事務所
 (72) 発明者 淺谷 南己
 埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会
 社本田技術研究所内
 審査官 神谷 健一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 接触状態推定装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

実物体を撮像することにより指定物理量を画素値として有する複数のピクセルによって構成される一対の画像のそれぞれを取得するように構成されている一対の画像センサと、

前記一対の画像センサのうち一方の画像センサにより取得された一方の画像の対象領域を構成する複数のピクセルのそれぞれに対して割り当てられる、前記実物体までの距離を取得するように構成されている距離画像センサと、を用いて前記実物体の表面と、指定形状の仮想物体の表面である仮想面との接触状態を、前記実物体と前記仮想物体に相当する他の実物体との接触状態として推定する装置であって、

前記対象領域において各ピクセルに割り当てられる第1偏差を主変数とする第1コスト関数の合計を第1コストとして算定するように構成されている第1演算処理要素と、

前記対象領域において各ピクセルに割り当てられる第2偏差又は前記第1及び第2偏差の両方を主変数とする第2コスト関数の合計を第2コストとして算定するように構成されている第2演算処理要素と、

前記第1コストと前記第2コストとの統合コストを最小値又は極小値に近づけるように前記実物体の表面に接触する際の前記仮想面の位置及び姿勢を探索するように構成されている第3演算処理要素とを備え、

前記第1偏差が、前記距離画像センサにより取得された前記実物体までの距離により位置が定まる実点と、当該実点を前記一方の画像センサの視線方向について前記仮想面に投影した結果としての仮想点との間隔の長短に応じて絶対値の大小が定まり、かつ、前記一

10

20

方の画像センサを基準として前記仮想点が前記実点より遠くに位置する場合は正值である一方、前記一方の画像センサを基準として前記仮想点が前記実点より近くに位置する場合は負値である変数として定義され、

前記第2偏差が、前記一方の画像のピクセルが有する前記指定物理量と、前記仮想面の位置及び姿勢に応じた形で当該一方の画像のピクセルに対応する、他方の画像センサにより取得された他方の画像のピクセルが有する前記指定物理量との偏差の大小に応じて大小が定まる変数として定義され、

前記第1及び第2コスト関数のそれぞれが、主変数の値が0である場合に最小値又は極小値を示し、かつ、正の定義域において増加関数となる関数として定義されていることを特徴とする接触状態推定装置。

10

【請求項2】

請求項1記載の接触状態推定装置において、

前記第1コスト関数が、前記第1偏差の絶対値の正の冪乗と、前記第1偏差を主変数とし、かつ、値域が0以上である関数であって、絶対値が同一であっても正の定義域における値が負の定義域における値よりも大きい第1係数関数との積により定義され、

前記第2コスト関数が、前記第2偏差の絶対値の正の冪乗と、前記第1偏差又は前記第2偏差を主変数とし、かつ、値域が0以上である関数であって、絶対値が同一であっても正の定義域における値が負の定義域における値よりも大きい第2係数関数との積により定義されていることを特徴とする接触状態推定装置。

20

【請求項3】

請求項2記載の接触状態推定装置において、

前記第1及び第2係数関数のうち一方又は両方が少なくとも正の定義域において増加関数として定義されていることを特徴とする接触状態推定装置。

【請求項4】

請求項3記載の接触状態推定装置において、

前記第1及び第2係数関数のうち一方又は両方が負の定義域又は負の指定値未満の定義域において0である関数として定義されていることを特徴とする接触状態推定装置。

【請求項5】

請求項2～4のうちいずれか1つに記載の接触状態推定装置において、

前記第2係数関数の主変数としての前記第2偏差が、前記一对の画像センサのそれぞれにより撮像された、実空間における同一箇所の前記指定物理量は同一であるという拘束条件にしたがって、前記指定物理量の偏差が換算された結果としての前記一对の画像センサの視差残差又は当該視差残差に相当する距離残差として定義されていることを特徴とする接触状態推定装置。

30

【請求項6】

請求項1～5のうちいずれか1つに記載の接触状態推定装置において、

前記距離画像センサが、前記実物体までの距離を画素値として有する複数のピクセルによって構成される距離画像を取得するように構成され、

前記第1演算処理要素が、前記一方の画像センサ及び前記距離画像センサの相対的な配置関係に応じて、前記距離画像を構成する各ピクセルの画素値に応じた距離が、前記一方の画像の前記対象領域を構成する複数のピクセルに対して画素値として割り当てるように構成されていることを特徴とする接触状態推定装置。

40

【請求項7】

請求項3記載の接触状態推定装置において、

前記第1及び第2係数関数のうち一方又は両方が負の定義域又は負の指定値未満の定義域において正の指定値である関数として定義されていることを特徴とする接触状態推定装置。

【請求項8】

請求項1～7のうちいずれか1つに記載の接触状態推定装置において、

前記第1演算処理要素は、前記対象領域を前記仮想物体の表面に投影した領域に基準点

50

を定め、該基準点または該基準点に対応した実点から所定の範囲にある実点を選択し、前記第1偏差を定めることを特徴とする接触状態推定装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、距離画像センサ及び2つ以上の画像センサを用いて被写体までの距離等を推定する装置に関する。

【背景技術】

【0002】

距離画像センサを通じて取得された距離画像と、ステレオカメラのそれぞれを通じて取得された距離画像とを融合することにより、3次元画像を取得する手法が提案されている(特許文献1参照)。

【0003】

複数種類の既知形状のパッチのうちいずれか1種のパッチによって床面の複数の散在する局所領域のそれぞれを近似する(パッチマップを作成する)とともに、パッチマップを集め、脚式移動ロボット用空間マップを生成する手法が提案されている(非特許文献1参照)。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開平09-005050号公報

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】“Curved Surface Contact Patches with Quantified Uncertainty”, Marsette Vona and Dimitrios Kanoulas, 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Pages: 1439-1446

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかし、地面から浮いていた足平が接地した直後における、当該足平と地面との接触状態が予測されないため、足平が実際に接地した後における当該接地状態によっては、ロボットの姿勢を安定に制御することが困難となる可能性がある。

【0007】

そこで、本発明は、脚式移動ロボットの足平及び床面など、異なる物体同士の未来の接触状態を高精度で推定しうる装置を提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明は、実物体を撮像することにより指定物理量を画素値として有する複数のピクセルによって構成される一対の画像のそれぞれを取得するように構成されている一対の画像センサと、

前記一対の画像センサのうち一方の画像センサにより取得された一方の画像の対象領域を構成する複数のピクセルのそれぞれに対して割り当てられる、前記実物体までの距離を取得するように構成されている距離画像センサと、を用いて前記実物体の表面と、指定形状の仮想物体の表面である仮想面との接触状態を、前記実物体と前記仮想物体に相当する他の実物体との接触状態として推定する装置に関する。

【0009】

本発明の接触状態推定装置は、前記対象領域において各ピクセルに割り当てられる第1偏差を主変数とする第1コスト関数の合計を第1コストとして算定するように構成されている第1演算処理要素と、前記対象領域において各ピクセルに割り当てられる第2偏差又

10

20

30

40

50

は前記第1及び第2偏差の両方を主変数とする第2コスト関数の合計を第2コストとして算定するように構成されている第2演算処理要素と、前記第1コストと前記第2コストとの統合コストを最小値又は極小値に近づけるように前記実物体の表面に接触する際の前記仮想面の位置及び姿勢を探索するように構成されている第3演算処理要素とを備えていることを特徴とする。

【0010】

「第1偏差」が、前記距離画像センサにより取得された前記実物体までの距離により位置が定まる実点と、当該実点を前記一方の画像センサの視線方向について前記仮想面に投影した結果としての仮想点との間隔の長短に応じて絶対値の大小が定まり、かつ、前記一方の画像センサを基準として前記仮想点が前記実点より遠くに位置する場合は正值である一方、前記一方の画像センサを基準として前記仮想点が前記実点より近くに位置する場合は負値である変数として定義されている。「第2偏差」が、前記一方の画像のピクセルが有する前記指定物理量と、前記仮想面の位置及び姿勢に応じた形で当該一方の画像のピクセルに対応する、他方の画像センサにより取得された他方の画像のピクセルが有する前記指定物理量との偏差の大小に応じて大小が定まる変数として定義されている。

10

【0011】

「第1コスト関数」及び「第2コスト関数」のそれぞれが、主変数の値が0である場合に最小値又は極小値を示し、かつ、正の定義域において増加関数となる関数として定義されている。

【0012】

本発明の接触状態推定装置によれば、仮想物体の少なくとも一部が実物体の内部に入り込んだ状態が設定された場合、第1偏差が正值となる。このため、当該設定によりある仮想点が実物体の表面から離れて内部の深い箇所にあるほど、第1コスト又は第1及び第2コストの両方が高く評価され、統合コストも高く評価される。

20

【0013】

このため、統合コストが最小値又は極小値に近づけられるように仮想面の位置及び姿勢が探索されることにより、仮想点の全部が実物体の内部にはなく、かつ、実物体表面上に位置する仮想点群により定まる仮想面の位置及び姿勢が、当該仮想面の実物体に対する接触状態として推定されうる。

【0014】

これにより、撮像対象となった一の実物体と、仮想物体に相当する他の実物体とのそれぞれにより、共通の実空間が同時に占有されているという実現不可能な状態が両実物体の接触状態として探索される事態が確実に回避される。仮想物体に相当する他の実物体とは、仮想面と形状及びサイズが同じである表面を有する又は当該表面を適応的に形成しうる実物体を意味する。そして、実物体に対する仮想物体の未来における接触状態が高精度で推定されうる。

30

【0015】

本発明の接触状態推定装置において、前記第1コスト関数が、前記第1偏差の絶対値の正の冪乗と、前記第1偏差を主変数とし、かつ、値域が0以上である関数であって、絶対値が同一であっても正の定義域における値が負の定義域における値よりも大きい第1係数関数との積により定義され、前記第2コスト関数が、前記第2偏差の絶対値の正の冪乗と、前記第1偏差又は前記第2偏差を主変数とし、かつ、値域が0以上である関数であって、絶対値が同一であっても正の定義域における値が負の定義域における値よりも大きい第2係数関数との積により定義されていることが好ましい。

40

【0016】

当該構成の接触状態推定装置によれば、正負の定義域で非対称的な第1及び第2コスト関数のうち一方又は両方にしたがって、第1及び第2コストのうち一方又は両方が計算されるように、第1及び第2係数関数が定義されている。第1コストは、一方の画像の対象領域に含まれる各ピクセルにおいて第1係数関数の値をバネ係数とする仮想的なバネ群の、第1偏差を変形量とする弾性エネルギーの合計に相当する。同様に、第2コストは、一

50

方の画像の対象領域に含まれる各ピクセルにおいて第2係数関数の値をバネ係数とする仮想的なバネ群の、第2偏差を変形量とする弾性エネルギーの合計に相当する。

【0017】

このため、実物体の内部にある仮想点を実物体の表面に近づけることが、実物体の外部にある仮想点を実物体の表面に近づけることよりも優先された形で仮想面の位置及び姿勢が探索されうる。これにより、撮像対象となった実物体及び仮想物体に相当する他の実物体のそれぞれにより共通の実空間が同時に占められているような実現不可能な状態が両物体の接触状態として探索される事態が確実に回避される。そして、実物体に対する仮想物体の未来における接触状態が高精度で推定されうる。

【0018】

本発明の接触状態推定装置において前記第1及び第2係数関数のうち一方又は両方が少なくとも正の定義域において増加関数として定義されていることが好ましい。

【0019】

当該構成の接触状態推定装置によれば、前記仮想的なバネのバネ係数の値は、当該バネの変形量が大きいくほど大きい値になる。このため、仮想面の位置及び姿勢の設定により、ある仮想点が実物体の表面から離れて内部の深い箇所に入れられるほど、当該仮想的なバネの弾性エネルギーに相当する第1コスト又は第1及び第2コストの両方がさらに高く評価され、統合コストも高く評価される。

【0020】

その結果、実物体の内部にある仮想点を実物体の表面により迅速又は強力に近づけるように仮想面の位置及び姿勢が探索されうる。そして、実物体に対する仮想物体の未来における接触状態が高精度かつ高速で推定されうる。

【0021】

本発明の接触状態推定装置において、前記第1及び第2係数関数のうち一方又は両方が負の定義域又は負の指定値未満の定義域において0である関数として定義されていることが好ましい。

【0022】

当該構成の接触状態推定装置によれば、実物体の外部にある仮想点又は実物体の表面からある程度離れている仮想点のコストが一律に「0」に評価される。これにより、統合コストを最小値又は極小値に近づけるような仮想点の座標値の組み合わせの探索処理に要する計算負荷が軽減される。

【0023】

本発明の接触状態推定装置において、前記第2係数関数の主変数としての前記第2偏差が、前記一对の画像センサのそれぞれにより撮像された、実空間における同一箇所の前記指定物理量は同一であるという拘束条件にしたがって、前記指定物理量の偏差が換算された結果としての前記一对の画像センサの視差残差又は当該視差残差に相当する距離残差として定義されていてもよい。

【0024】

本発明の接触状態推定装置において、前記距離画像センサが、前記実物体までの距離を画素値として有する複数のピクセルによって構成される距離画像を取得するように構成され、前記第1演算処理要素が、前記一方の画像センサ及び前記距離画像センサの相対的な配置関係に応じて、前記距離画像を構成する各ピクセルの画素値に応じた距離が、前記一方の画像の前記対象領域を構成する複数のピクセルに対して画素値として割り当てられるように構成されていてもよい。

【0025】

本発明の接触状態推定装置において、前記第1及び第2係数関数のうち一方又は両方が負の定義域又は負の指定値未満の定義域において正の指定値である関数として定義されていることが好ましい。

【0026】

本発明の接触状態推定装置において、前記第1演算処理要素は、前記対象領域を前記仮

10

20

30

40

50

想物体の表面に投影した領域に基準点を定め、該基準点または該基準点に対応した実点から所定の範囲にある実点を選択し、前記第1偏差を定めることが好ましい。

【図面の簡単な説明】

【0027】

【図1】本発明の一実施形態としての接触状態推定装置の構成説明図。

【図2】本発明の接触状態推定装置の使用態様に関する説明図。

【図3】本発明の接触状態装置の機能説明図。

【図4】基準画像座標系及び距離画像座標系の相関関係に関する説明図。

【図5】実点、仮想面及び仮想点に関する説明図。

【図6】係数関数に関する説明図。

10

【図7】コスト関数に関する説明図。

【図8】仮想的なバネに関する説明図。

【図9】距離残差及びエピソード拘束条件に関する説明図。

【図10】足平裏面及び床面の接触状態推定結果の説明図（第1実施形態）。

【図11】基準画像座標系における足平裏面及び床面の接触状態推定結果に関する説明図（第1実施形態）。

【図12】マスクを用いた本発明の接触状態推定装置の機能説明図。

【図13】マスクの設定方法に関する説明図。

【図14】マスクに関する説明図。

【図15】足平裏面及び床面の接触状態推定結果の説明図（第2実施形態）。

20

【図16】基準画像座標系における足平裏面及び床面の接触状態推定結果に関する説明図（第2実施形態）。

【発明を実施するための形態】

【0028】

（構成）

図1に示されている接触状態推定装置は、距離画像センサ10と、基準画像センサ11と、参照画像センサ12と、コンピュータ20とを備えている。基準画像センサ11及び参照画像センサ12は「一对の（又は左右一对の）画像センサ」を構成する。基準画像センサ11は「一方の画像センサ」を構成し、参照画像センサ12は「他方の画像センサ」を構成する。接触状態推定装置は、例えば、図2に示されているように脚式移動ロボットに搭載され、その足平等の脚体の一部と床面との接触状態を推定するために利用される。

30

【0029】

接触状態推定装置が、同一の指定物理量を画素値とする画像を取得可能な3つ以上の画像センサを構成要素として備え、コンピュータ20が当該3つ以上の画像センサのうち2つを一对の画像センサとして選択するように構成されていてもよい。

【0030】

脚式移動ロボットの構成としては、特許第3674788号公報等、本出願人が提案している構成が採用されうる。また、接触状態推定装置は、ロボットアームにおいて手の平又はアームの一部と対象物体との接触状態を推定するために利用される。さらに、接触状態推定装置は車両に搭載され、車両のタイヤと路面との接触状態を推定するために利用される。

40

【0031】

距離画像センサ10はたとえばTOF（Time-of-Flight）距離画像センサであり、各ピクセルが距離計測値 D_s' （図4参照）を画素値として有する1次距離画像を取得する。距離画像センサ10の撮像面又は平面上に配列されている撮像素子群により「1次距離画像座標系」が定義される。

【0032】

基準画像センサ11は可視光ステレオカメラの一方のカメラ（例えば右側カメラ）であり、各ピクセルが少なくとも輝度（指定物理量）を画素値として有する基準画像を取得する。基準画像センサ11の光軸方向がZ軸方向として定義されている（図4参照）。基準

50

画像センサ 1 1 の撮像面又は平面上に配列されている撮像素子群により「基準画像座標系」が定義される。基準画像座標系の横方向が X 軸方向として定義され、縦方向が Y 軸方向として定義される。

【 0 0 3 3 】

参照画像センサ 1 2 は可視光ステレオカメラの他方のカメラ（例えば左側カメラ）であり、基準画像と同じく各ピクセルが少なくとも輝度を画素値として有する参照画像を取得する。参照画像センサ 1 2 の撮像面又は平面上に配列されている撮像素子群により「参照画像座標系」が定義される。

【 0 0 3 4 】

距離画像センサ 1 0、基準画像センサ 1 1 及び参照画像センサ 1 2 のそれぞれのカメラパラメータ（内部パラメータ及び外部パラメータ）は既知であり、接触状態推定装置を構成するコンピュータ C C のメモリに保存されている。たとえば、1 次距離画像座標系及び基準画像座標系との座標変換を表わす回転行列及び並進行列又はこれに等価なクォータニオンはメモリに保存されている。同様に、基準画像座標系及び参照画像座標系との座標変換を表わす回転行列及び並進行列又はこれに等価なクォータニオンはメモリに保存されている。

10

【 0 0 3 5 】

接触状態推定装置がロボットに搭載されている場合、1 次距離画像座標系、基準画像座標系及び参照画像座標系のそれぞれのロボット座標系に対する位置及び姿勢は、ロボットの挙動を表わす順キネマティクスモデルにしたがって算出された上でメモリに保存される。

20

【 0 0 3 6 】

ロボット座標系は、ロボットの質量中心（たとえば基体に含まれている。）が原点として定義され、ロボットの上方が + x 方向として定義され、右方向が + y 方向として定義され、前方が + z 方向として定義されている。ロボット座標系の世界座標系における位置及び姿勢は、たとえば、ロボットの行動計画により定義される。

【 0 0 3 7 】

接触状態推定装置を構成するプログラマブルコンピュータ 2 0 は、距離画像センサ 1 0、基準画像センサ 1 1 及び参照画像センサ 1 2 のそれぞれからの画像信号を対象として後述する演算処理を実行するように構成されている第 1 演算処理要素 2 1 と、第 2 演算処理要素 2 2 と、第 3 演算処理要素 2 3 とを備えている。単一のプロセッサ（演算処理装置）が当該 3 つの演算処理要素 2 1 ~ 2 3 として機能してもよいし、複数のプロセッサが相互通信により連携しながら当該 3 つの演算処理要素 2 1 ~ 2 3 として機能してもよい。

30

【 0 0 3 8 】

各演算処理要素が担当演算処理を実行するように「構成されている」とは、各演算処理要素を構成する CPU 等の演算処理装置が、ROM、RAM 等のメモリ又は記録媒体から必要な情報に加えてソフトウェアを読み出し、当該情報に対して当該ソフトウェアにしたがって演算処理を実行するように「プログラムされている」ことを意味する。

【 0 0 3 9 】

（機能）

40

前記構成の接触状態推定装置によって実行される接触状態推定方法について説明する。本実施形態では、ロボットの将来における足平の裏面（仮想面）と床面（実物体表面）との接触状態が推定される。そのほか、ロボットがアームの先端にハンドを有する場合、当該ハンドの手の平面又は指先部分の表面と、当該ロボットが遂行すべきタスクの対象となるコップ等の実物体との接触状態が推定されてもよい。

【 0 0 4 0 】

距離画像センサ 1 0 による距離計測値 $D_s(s)$ を画素値として有する複数のピクセルによって構成される「2 次距離画像」が取得される（図 3 / STEP 0 2）。「s」は基準画像座標系におけるピクセル位置のうち、基準画像における対象領域である ROI（Region of Interest）に含まれ、かつ、距離計測値 D_s が割り当てられたピクセル位置（量

50

子化された点の位置)、正確にはその座標値を意味する。

【0041】

具体的には、距離画像センサ10を通じて「1次距離画像(距離画像)」が取得される。1次距離画像を構成する複数のピクセル s' (図4参照)には、被写体までの距離計測値 Ds' (図5参照)が画素値として割り当てられている。

【0042】

続いて1次距離画像座標系のピクセル位置 s' が、基準画像座標系に座表変換された結果としての点位置 s'' が求められる(図4参照)。1次距離画像座標系を基準とした観測点 Ps の位置は、ベクトル $^p = Ds' \cdot e'(s')$ (s')により表わされる。「 \wedge 」はベクトルを意味する(以下同じ。。「 $e'(s')$ 」は、1次距離画像座標系のピクセル位置 s' を通る距離画像センサ10の視線方向を示す単位ベクトルである。

10

【0043】

1次距離画像座標系から基準画像座標系への座標変換を表わす回転行列 R 及び並進行列 T に基づき、基準画像座標系を基準とした観測点 Ps の位置を表わすベクトル $^p = R \wedge p' + T$ が計算される。回転行列 R 及び並進行列 T は、予めメモリに保存されている。回転行列 R 及び並進行列 T は、数学的にこれと等価なクォータニオンによって定義されていてもよい。

【0044】

当該ベクトル p 及びその奥行き方向成分(X - Y 座標系である基準画像座標系に対して垂直な Z 方向の成分)である Zs'' に基づき、基準画像座標系において観測点 Ps に対応する座標位置 $s'' = (1/Zs'') \wedge p$ が求められる。

20

【0045】

基準画像座標系において当該座標位置 s'' (図4白丸参照)は、一般的にピクセル位置 s (図4黒丸参照)に一致しない。このため、最近傍点補間法、双線形補間法又はバイキュービックスプライン法など、公知の補間方法にしたがって、基準画像座標系の各ピクセル位置 s に対して、座標位置 s'' に対応する距離 Zs'' に基づいて定まる距離(実点距離) Zs が割り当てられる。

【0046】

そして、基準画像座標系の各ピクセル位置 s に対して、2次距離画像座標系を基準とした観測点 Ps の位置を表わすベクトル $^p = Ds \cdot e(s)$ のノルム $Ds(s)$ が画素値として割り当てられる。「 $e(s)$ 」は、2次距離画像座標系のピクセル位置 s を通り観測点 Ps に向かう視線方向を示す単位ベクトルである。

30

【0047】

ただし、距離画像センサ10及び基準画像センサ11のそれぞれの解像度の相違等を考慮して、基準画像座標のすべてのピクセル位置に距離計測値が割り当てられる必要はない。これにより、2次距離画像が取得される。

【0048】

また、基準画像センサ11を通じて、少なくとも輝度(指定物理量)を画素値として有する複数のピクセルにより構成される「基準画像」が取得される(図3/STEP04)。

40

【0049】

さらに、参照画像センサ12を通じて、基準画像と同様に少なくとも輝度を画素値として有する複数のピクセルにより構成される「参照画像」が取得される(図3/STEP06)。

【0050】

同一時刻において取得され、メモリに保存されている同一時刻における2次距離画像、基準画像及び参照画像を対象として次に説明する一連の処理が実行される。なお、距離画像センサ10、基準画像センサ11及び参照画像センサ12が完全に同期していない場合、同一時刻における2次距離画像、基準画像及び参照画像が、若干異なった又は略同一の時刻のそれぞれにおいて取得されてもよい。

50

【 0 0 5 1 】

まず、基準画像座標系のピクセル位置 s についてロボットの足平裏面（仮想物体の表面）が「仮想面」として設定される（図3 / STEP 08）。具体的には、仮想面上にある第 i 仮想点の基準位置（ベクトル） ${}^t q_i$ が設定されることにより、足平裏面の基準座標系における基準位置及び基準姿勢が設定される。足平裏面が平面状である場合、基準位置 ${}^t q_i$ は関係式（0 0 1）によって定義される。

【 0 0 5 2 】

$${}^t q_i = {}^t (x_i, y_i, 1) \dots (001)。$$

【 0 0 5 3 】

ここで「 t 」は転置を表わす。 (x_i, y_i) は2次距離画像座標系において距離計測値 z_i を画素値として有するピクセル位置を表わす。基準位置群 $Q = ({}^t q_1, {}^t q_i, {}^t q_n)$ によって画定される範囲の面積及び形状は、記憶装置に保存されている足平裏面の面積及び形状に加えて、距離に応じて一義的に定められる。

10

【 0 0 5 4 】

一方、足平裏面の基準位置及び基準姿勢は任意に変更されうる。例えば、基準位置 ${}^t q_i$ の x 成分に所定値が一律に加算又は減算されることにより、基準座標系における足平裏面の基準位置が x 方向に当該所定値だけ変更されうる。また、基準位置 ${}^t q_i$ の x 成分及び y 成分のそれぞれに、 z 軸回りの所定角度 θ の回転を表わす因子 $\cos \theta$ 又は $\sin \theta$ が一律に乗算されることにより、基準座標系における足平裏面の xy 平面における基準姿勢が変更されうる。

20

【 0 0 5 5 】

さらに、足平裏面の基準座標系における位置及び姿勢を表わす平面パラメータ ${}^m (s) = {}^t (m_1, m_2, m_3)$ が設定される。平面パラメータ ${}^m (s)$ の初期値は任意であってもよいが、後述するように平面パラメータ ${}^m (s)$ は前回値が修正されることにより今回値が設定される。

【 0 0 5 6 】

2次距離画像座標系（2次元）に対して直交する方向を z 方向とする3次元直交座標系が基準座標系として採用される（図5参照）。基準画像センサ11の光学中心と物体表面との距離 D_s が取得されているので（図3 / STEP 02及び図5参照）、距離画像において光軸に対して角度 θ をなす位置にある画素の画素値 $Z_s (z$ 成分) は $D_s \cos \theta$ と定義される。このため、距離画像センサ10がキャリブレーションされている場合、当該定義にしたがって z 成分 $Z_s (s)$ が計算されうる。

30

【 0 0 5 7 】

基準座標系としては、ロボット座標系又は世界座標系が採用されてもよい。例えば、距離画像センサ10がロボットに搭載されている場合、距離画像座標系のロボット座標系に対する位置及び姿勢は、ロボットの挙動を表わす順キネマティクスモデルにしたがって算出された上で記憶装置に保存される。距離画像座標系のロボット座標系に対する位置及び姿勢は、並進行列及び回転行列又はこれに等価のクォータニオンによって定義される。

【 0 0 5 8 】

ロボット座標系は、ロボットの質量中心（たとえば基体に含まれている。）が原点として定義され、ロボットの上方が $+x$ 方向として定義され、右方向が $+y$ 方向として定義され、前方が $+z$ 方向として定義されている（図2参照）。ロボット座標系の世界座標系における位置及び姿勢は、たとえば、記憶装置に保存されているロボットの行動計画により定義される。

40

【 0 0 5 9 】

2次距離画像座標系を基準とした3次元直交座標系における座標値が、記憶装置に保存されている当該行列を用いて座標変換されることで、ロボット座標系における座標値が算定されうる。2次距離画像座標系を基準とした3次元直交座標系における座標値が、記憶装置に保存されている当該行列及び行動計画を用いて座標変換されることで、世界座標系における座標値が算定されうる。

50

【 0 0 6 0 】

平面パラメータ m は、足平裏面の形状 Q と、実点座標値群 $Z = {}^t(z_1, \dots, z_i, \dots, z_n)$ と、 n 次単位行列 I とに基づき、関係式(002)にしたがって定義される。

【 0 0 6 1 】

$$m = (QI^tQ)^{-1}QIZ \dots (002)。$$

【 0 0 6 2 】

そして、関係式(003)にしたがって算定されるベクトル Z の各成分が、第 i 仮想点座標値 $P_c(s)$ (正確にはその z 成分 $Z_c(s)$)として仮定される(図5参照)。

【 0 0 6 3 】

$$Z = {}^tQm \dots (003)。$$

10

【 0 0 6 4 】

仮想物体の表面形状は、本発明の装置のユーザによって平面のほか任意形状の曲面に変更される。例えば、曲面パラメータ $m = {}^t(m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}, m_3)$ が設定されることにより、関係式(022)によって表現される曲面を表面として有するように仮想物体の形状が設定されてもよい。

【 0 0 6 5 】

$$m_{11}x^2 + m_{12}x + m_{y21}y^2 + m_{22}y + m_3z = \dots (022)。$$

【 0 0 6 6 】

この場合、例えば、曲面パラメータ又は関係式(022)によって表面形状が表現される手の平と、手すりなどの物体との接触状態が推定される。

20

【 0 0 6 7 】

第1演算処理要素21が、実点 $P_s(s)$ と仮想点 $P_c(s)$ との間隔 $|D_s(s) - D_c(s)|$ の広狭に応じて定まる第1偏差 $e_1(s)$ に基づき、第1係数関数 $w_1(e_1)$ にしたがって第1係数 $w_1(s)$ を算定する(図3 / STEP 12)。

【 0 0 6 8 】

例えば、第1偏差 $e_1(s)$ として、実点距離 $Z_s(s)$ と仮想点距離 $Z_c(s)$ との距離残差 $|Z_s(s) - Z_c(s)|$ が採用される(図5参照)。

【 0 0 6 9 】

「実点」とは、2次距離画像座標系(基準画像座標系のうち一部である対象領域に相当する。)におけるピクセル位置 $s = (u, v)$ の画素値 $D_s(s)$ に応じて実空間位置が定まる点 $P_s(s) = Zs^{\wedge}s$ を意味する(図5参照)。 $s^{\wedge} = (u, v, 1)$ は s の位置を表わすベクトルである。また「仮想点」とは、基準画像センサ11の視線方向について実点 $P_s(s)$ を仮想面に投影した点を意味する(図5参照)。

30

【 0 0 7 0 】

距離残差 $|D_s(s) - D_c(s)|$ の大小に応じて幾何学的関係から一義的に定まるさまざまな距離が、第1偏差 $e_1(s)$ として採用されてもよい。例えば、当該間隔 $|D_s(s) - D_c(s)|$ そのもののほか、実点 $P_s(s)$ が Z 方向について仮想面に投影された結果としての点と、仮想点 $P_c(s)$ との指定方向についての間隔が第1偏差 $e_1(s)$ として採用されてもよい。また、仮想点 $P_c(s)$ が Z 方向について被写体に相当する平面に投影された結果としての点と、実点 $P_s(s)$ との指定方向についての間隔が第1偏差 $e_1(s)$ として採用されてもよい。

40

【 0 0 7 1 】

第1係数 $w_1(e_1(s))$ は、第1偏差 e_1 を主変数とし、関係式(101)によって定義されている第1係数関数(従変数) $w_1(e_1)$ にしたがって算定される。この第1係数関数 $w_1(e_1)$ は、図6(a)に示されているように第1偏差 e_1 の増加関数である。第1係数関数 $w_1(e_1)$ は、負の定義域($e_1 < 0$)において0以上かつ正の指定値 θ_1 未満の値域を有する一方、0以上の定義域($e_1 \geq 0$)において正の指定値 θ_1 以上の値域を有する。

【 0 0 7 2 】

$$w_1(e_1) = \log(1 + \exp(-e_1/\theta_1)), (\theta_1 > 0, \theta_2 > 0) \dots (101)。$$

50

【 0 0 7 3 】

第1係数 $w_1(e_1(s))$ が関係式(102)によって定義されている第1係数関数 $w_1(e_1)$ にしたがって算定されてもよい。この第1係数関数 $w_1(e_1)$ は、図6(b)に示されているように、負の定義域において0以上かつ正の指定値 α_1 未満の値域を有する一方、0以上の定義域において正の指定値 α_1 以上の値域を有する。第1係数関数 $w_1(e_1)$ は、負の指定値 $-\alpha_2$ ($\alpha_2 > 0$)以下の定義域において0である一方、負の指定値 $-\alpha_2$ を超えている定義域において増加関数である。

【 0 0 7 4 】

$$w_1(e_1)=0 \text{ (if } e_1 < -\alpha_2), \text{ or } w_1(e_1)=(\alpha_1/\alpha_2)e_1+\alpha_1 \text{ (if } -\alpha_2 < e_1) \text{ ..(102)}.$$

【 0 0 7 5 】

第1係数 $w_1(e_1(s))$ が関係式(103)によって定義されている第1係数関数 $w_1(e_1)$ にしたがって算定されてもよい。この第1係数関数 $w_1(e_1)$ は、図6(c)に示されているように、0未満の定義域において0である一方、0以上の定義域において増加関数である。

【 0 0 7 6 】

$$w_1(e_1)=0 \text{ (if } e_1 < 0), \text{ or } w_1(e_1)=\alpha_0 e_1, \text{ (} 0 < \alpha_0 \text{) (if } 0 < e_1) \text{ ..(103)}.$$

【 0 0 7 7 】

第1演算処理要素21が、第1係数 $w_1(e_1(s))$ 及び第1偏差 $e_1(s)$ に基づき、第1コスト関数 $E_1(e_1)$ (本発明の「第1コスト関数」に相当する。)にしたがって第1コスト E_1 を算定する(図3/STEP12)。

【 0 0 7 8 】

第1コスト関数 $E_1(e_1)$ は、例えば関係式(110)に示されているように、第1係数関数 $w_1(e_1)$ と、第1偏差の絶対値 $|e_1|$ の二乗との積として定義されている。このため、第1コスト E_1 は、第1係数 $w_1(s)$ をバネ係数とし、仮想点を実点に近づけるような、図8に示されている仮想的なバネ群の弾性エネルギーの合計に相当する。当該冪乗数は「2」に限られず、「0.5」「1.5」「3」など、任意の正値に設定されていてもよい。

【 0 0 7 9 】

$$E_1(e_1)=w_1(e_1)|e_1|^2 \text{ ..(110)}.$$

【 0 0 8 0 】

第1偏差 e_1 に基づき、第1係数関数 $w_1(e_1)$ にしたがって第1係数 w_1 が算定され(図3/STEP10参照)、これとは別個に第1偏差の絶対値 $|e_1|$ の冪乗(2乗)の値が算定され、その上で当該算定結果が掛け合わせられることにより第1コスト E_1 が算定される(図3/STEP12参照)。これに代えて、第1偏差 e_1 に基づき、第1コスト関数 $E_1(e_1)$ にしたがって第1コスト E_1 が算定されてもよい。

【 0 0 8 1 】

第1コスト E_1 は、基準画像座標系における対象領域(2次距離画像座標系)に属するピクセル s について、第1コスト関数 $E_1(e_1)$ の値の合計を表わす関係式(120)にしたがって算定される。「 \sum_s 」は、基準画像座標系における対象領域(2次距離画像座標系)に属するピクセル s についての和を意味する。

【 0 0 8 2 】

$$E_1 = \sum_s E_1(e_1(s)) \text{ ..(120)}.$$

【 0 0 8 3 】

第1偏差 $e_1(s)$ は仮想面の平面パラメータ $\alpha^m(s)$ を変数とする関数であるため、第1偏差 $e_1(s)$ に基づいて算出される第1コスト E_1 も仮想面の平面パラメータ $\alpha^m(s)$ を変数とする関数となる。

【 0 0 8 4 】

第1係数関数 $w_1(e_1)$ が関係式(101)にしたがって定義されている場合(図6(a)参照)、第1コスト関数 $E_1(e_1)$ は、図7(a)に示されているように $e_1 = 0$ で極小値0を有し、かつ、正の定義域($e_1 > 0$)において増加関数となる。また、第1コ

10

20

30

40

50

スト関数 $E_1(e_1)$ は、正負の定義域において非対称的な変化特性を示す。すなわち、正の変数値 $e_1 = c (> 0)$ に基づく第 1 コスト関数の値 $E_1(c)$ が、これと絶対値が等しい負の変数値 $-c$ に基づく第 1 コスト関数の値 $E_1(-c)$ よりも大きくなる。

【 0 0 8 5 】

第 1 係数関数 $w_1(e_1)$ が関係式 (1 0 2) にしたがって定義されている場合 (図 6 (b) 参照)、第 1 コスト関数 $E_1(e_1)$ は、図 7 (b) に示されているように $e_1 = 0$ で極小値 0 を有し、かつ、正の定義域において増加関数となる。また、第 1 コスト関数 $E_1(e_1)$ は、正負の定義域 $-e_2 < e_1 < e_2$ において対称的な変化特性を示す。第 1 コスト関数 $E_1(e_1)$ は、負の指定値以下の負の定義域 $e_1 = -e_2$ においては 0 となる。

【 0 0 8 6 】

第 1 係数関数 $w_1(e_1)$ が関係式 (1 0 3) にしたがって定義されている場合 (図 6 (c) 参照)、第 1 コスト関数 $E_1(e_1)$ は、図 7 (c) に示されているように負の定義域において 0 となり、正の定義域において増加関数となる。

【 0 0 8 7 】

第 2 演算処理要素 2 2 が、基準画像センサ 1 1 及び参照画像センサ 1 2 のそれぞれが、同一の仮想面を撮像しているという仮定下で、参照画像を基準画像座標系に座標変換することにより変換画像を生成する (図 3 / S T E P 1 4)。具体的には、基準画像座標系のピクセル位置 s に対して、参照画像座標系のうち当該仮想面の位置及び姿勢に応じた視差が存在する場合におけるピクセル位置 s_{ref} の輝度が割り当てられた画像が変換画像として取得される。

【 0 0 8 8 】

第 2 演算処理要素 2 2 が、第 2 係数 $w_2(e_1(s))$ 及び第 2 偏差 $e_2(s)$ に基づき、第 2 コスト関数 $E_2(e_1, e_2)$ にしたがって第 2 コスト E_2 を算定する (図 3 / S T E P 1 6)。基準画像座標系及び変換画像座標系の同一ピクセル位置 s における画素値である指定物理量の偏差、例えば輝度残差 $I(s)$ が第 2 偏差 $e_2(s)$ として採用される。可視光カメラを通じて取得される色 (R G B 値)、赤外光カメラを通じて取得される温度など、可視光カメラを通じて取得される輝度とは異なる物理量が指定物理量として採用されてもよい。

【 0 0 8 9 】

第 2 コスト関数 $E_2(e_1, e_2)$ は、例えば関係式 (2 1 0) に示されているように、第 2 係数関数 $w_2(e_1)$ と、第 2 偏差の絶対値 $|e_2|$ の二乗との積として定義されている。このため、第 2 コスト E_2 は、第 2 係数 $w_2(e_1)$ をバネ係数とし、「同一時刻において基準画像センサ 1 1 及び参照画像センサ 1 2 のそれぞれにより撮像された同一箇所の指定物理量 (ここでは輝度) が同一である」という拘束条件にしたがって仮想点を実点に近づけるような、仮想的なバネの弾性エネルギーに相当する (図 8 参照)。すなわち、第 2 コスト E_2 は、当該仮想的なバネ群の弾性エネルギーの合計に相当する。当該冪乗数は「 2 」に限られず、「 0 . 5 」 「 1 . 5 」 「 3 」 など、任意の正值に設定されていてもよい。

【 0 0 9 0 】

$$E_2(e_1, e_2) = w_2(e_1) |e_2|^2 \dots (210).$$

【 0 0 9 1 】

第 1 偏差 e_1 に基づき、第 2 係数関数 $w_2(e_1)$ にしたがって第 2 係数 w_2 が算定され (図 3 / S T E P 1 0 参照)、これとは別個に第 2 偏差の絶対値 $|e_2|$ の冪乗 (2 乗) の値が算定され、その上で当該算定結果が掛け合わせられることにより第 1 コスト E_1 が算定される (図 3 / S T E P 1 2 参照)。これに代えて、第 1 偏差 e_1 及び第 2 偏差 e_2 に基づき、第 2 コスト関数 $E_2(e_1, e_2)$ にしたがって第 2 コスト E_2 が算定されてもよい。

【 0 0 9 2 】

第 2 コスト E_2 は、基準画像座標系における対象領域 (2 次距離画像座標系) に属するピクセル s について、第 2 コスト関数 $E_2(e_1, e_2)$ の値の合計を表わす関係式 (2 2 0) にしたがって算定される

10

20

30

40

50

$$E_2 = {}_s E_2(e_1(s), e_2(s)) \dots (220).$$

【 0 0 9 3 】

第 1 偏差 $e_1(s)$ と同様に第 2 偏差 $e_2(s)$ は仮想面の平面パラメータ $^m(s)$ を変数とする関数であるため、第 1 偏差 $e_1(s)$ 及び第 2 偏差 $e_2(s)$ に基づいて算出される第 2 コスト E_2 も仮想面の平面パラメータ $^m(s)$ を変数とする関数となる。

【 0 0 9 4 】

第 2 係数関数 $w_2(e_1)$ は、第 1 係数関数 $w_1(e_1)$ と同一であってもよく、異なってもよい。例えば、第 1 係数関数 $w_1(e_1)$ 及び第 2 係数関数 $w_2(e_1)$ がともに関係式 (101) にしたがって定義されていてもよい。第 1 係数関数 $w_1(e_1)$ が関係式 (101) にしたがって定義される一方、第 2 係数関数 $w_2(e_1)$ が関係式 (102) にしたがって定義されていてもよい。第 2 係数関数 w_2 の主変数として第 1 偏差 e_1 に代えて第 2 偏差 e_2 が用いられてもよい。

10

【 0 0 9 5 】

輝度残差 $I(s)$ は前記拘束条件にしたがって求められる。簡単のため、基準画像センサ 11 及び参照画像センサ 12 が、等しい内部パラメータを持ち互いの光軸が平行になるよう配置された平行ステレオの場合について説明する。

【 0 0 9 6 】

基準画像センサ 11 及び参照画像センサ 12 が平行ステレオの関係にない場合、図 9 (a) に示されているように視差残差 u は、参照画像センサ 12 に距離計測値 $D_s(s)$ 及び距離候補値 $D_c(s)$ のそれぞれを投影した結果としてのピクセル位置の間隔となる。視差残差 u は、実点距離 Z_s と、仮想点距離 Z_c と、両画像センサ 11 及び 12 の基線長 L とに基づき、関係式 (201) にしたがって定義される (図 5 参照)。

20

【 0 0 9 7 】

$$u = L \{ (1/Z_s) - (1/Z_c) \} \dots (201).$$

【 0 0 9 8 】

「 u 」は基準画像座標系 (又は参照画像座標系) における横方向の位置を表わす座標値である。平行ステレオの場合、 u 軸の方向はエピポーラ線と平行になる。基準画像と、視差残差 u が存在するという仮定下での参照画像との輝度残差 I は、エピポーラ拘束条件を考慮に入れて、関係式 (202) により表現される (図 9 (b) 参照)。

【 0 0 9 9 】

$$I = (| / u) ^{e_{ep}} ^ u \dots (202).$$

30

【 0 1 0 0 】

「 $^e_{ep}$ 」は基準画像座標系におけるエピポーラ線の方向を表わす単位ベクトルである。「 $(| / u)$ 」は輝度勾配を表すベクトルである。特に平行ステレオの場合、 u 軸方向のみの輝度勾配が有効となる。

【 0 1 0 1 】

関係式 (202) は、前記拘束条件にしたがって視差残差 $u(s)$ が輝度残差 $I(s)$ に変換されることを表わしている。視差残差 $u(s)$ は、距離計測値 D_s に応じて基準画像座標系 (2次元距離座標系) のピクセル s を参照画像座標系に対して投影した結果としての位置と、距離候補値 D_c に応じて基準画像座標系のピクセル s を参照画像座標系に投影した結果としての位置との間隔である。

40

【 0 1 0 2 】

輝度残差 $I(s)$ のほか、輝度残差 $I(s)$ が関係式 (202) にしたがって換算された視差残差 u 又は輝度残差 $I(s)$ が関係式 (202) (203) にしたがって換算された距離残差 $Z(s)$ が第 2 偏差 $e_2(s)$ として用いられてもよい。関係式 (203) は、 $u = (d u / d Z_c) Z$ 及び $Z = Z_s - Z_c$ という関係式にしたがって関係式 (201) が変形されることにより得られる。

【 0 1 0 3 】

$$u(s) = -(L/Z_c^2) Z(s) \dots (203).$$

【 0 1 0 4 】

50

関係式(202)及び(203)にしたがって、距離残差 $Z(s) = Z_s(s) - Z_c(s)$ が存在する場合の輝度残差 $I(s)$ が計算される。

【0105】

第3演算処理要素23が、関係式(301)又は(302)で表わされている第1コスト E_1 及び第2コスト E_2 の線形和を統合コスト E として算出する。前記のように第1コスト E_1 及び第2コスト E_2 はともに仮想面の平面パラメータ \hat{m} を変数とする関数であるため、統合コスト E も平面パラメータ \hat{m} の関数 $E(\hat{m})$ として定義される。

【0106】

$$E(\hat{m}) = E_1(\hat{m}) + E_2(\hat{m}) \dots (301).$$

【0107】

$$E(\hat{m}) = E_1(\hat{m}) + (1 - \alpha) E_2(\hat{m}), \quad (0 < \alpha < 1) \dots (302).$$

【0108】

そして、第3演算処理要素23は、最小二乗法又は仮想面の平面パラメータを $(E(\hat{m}) / \hat{m})$ に応じた分だけ逐次変動させる勾配法にしたがって、統合コスト E を最小値にする平面パラメータ \hat{m} を探索する(図3 / STEP 18)。これにより、仮想面(足平裏面)の位置及び姿勢が推定される。

【0109】

統合コスト E の前回値と今回値との差が閾値以下になる等、平面パラメータ \hat{q} が一定の収束条件を満足しているか否かに応じて、仮想面の探索が終了したか否かが判定される(図3 / STEP 20)。当該判定結果が否定的である場合(図3 / STEP 20 NO)、前回平面パラメータ $\hat{m}(k)$ (k は平面パラメータの更新回数を表わす指数である。)が勾配法にしたがって更新された結果としての今回平面パラメータ $\hat{m}(k+1)$ が設定される(図3 / STEP 08)。その上で前記した一連の処理が繰り返される(図3 / STEP 10 ~ STEP 20)。

【0110】

その一方、当該判定結果が肯定的である場合(図3 / STEP 20 YES)、第3演算処理要素23が、その時点での平面パラメータ \hat{m} によって定義される仮想面の位置及び姿勢を、足平裏面又は当該足裏面と床面との接合面の位置及び姿勢として推定する(図3 / STEP 22)。

【0111】

これにより、例えば、図10(a)~(d)のそれぞれに示されているように足平裏面が床面に接触している状態が、未来における足平裏面と床面との接触状態として推定される。図11(a)~(d)には、図10(a)~(d)に示されている接触状態(接触箇所格子線が付されている)が表現されている距離画像が示されている。

【0112】

(作用効果)

本発明の接触状態推定装置によれば、第1偏差 $e_1(s)$ が実点 P_c と仮想点 P_s との距離残差 $|Z_c(s) - Z_s(s)|$ の大小に応じて大小が定まるように定義されている(図5参照)。第1偏差 e_1 は、基準画像センサ11を基準として仮想点 P_c が実点 P_s より遠くに位置する場合は正值である一方、これとは逆に仮想点 P_c が実点 P_s より近くに位置する場合は負値である(図8参照)。

【0113】

第2偏差 e_2 が、基準画像のピクセル s と、仮設定された仮想面の位置及び姿勢に応じた形で当該基準画像のピクセル s に対応する、参照画像のピクセルとの輝度残差(指定物理量の偏差)の大小に応じて大小が定まるように定義されている(図9(a)参照)。

【0114】

第1コスト関数(第1コスト関数) $E_1(e_1)$ が、主変数 e_1 の値が0である場合に最小値又は極小値を示し、かつ、正の定義域において増加関数となる従変数として定義されている(関係式(110)及び図7(a)~(c)参照)。第2コスト関数(第2コスト関数) $E_2(e_1, e_2)$ が、主変数 e_2 の値が0である場合に最小値又は極小値を示し、か

10

20

30

40

50

つ、正の定義域において増加関数となる関数として定義されている（関係式（210）及び図7（a）～（c）参照）。

【0115】

第1コスト $E_1(e_1)$ は、基準画像（一方の画像）の対象領域（2次距離画像）に含まれる各ピクセル s において第1係数関数 $w_1(s)$ の値をバネ係数とする仮想的なバネ群の、第1偏差 $e_1(s)$ を変形量とする弾性エネルギーの合計に相当する（図8参照）。同様に、第2コスト $E_2(e_2)$ は、基準画像の対象領域に含まれる各ピクセル s において第2係数関数 $w_2(s)$ の値をバネ係数とする仮想的なバネ群の、第2偏差 e_2 （又は第2偏差 e_2 に基づいて前記拘束条件にしたがって求められる距離残差 Z ）を変形量とする弾性エネルギーの合計に相当する（同）。

10

【0116】

仮想物体の少なくとも一部が実物体の内部に入り込んだ状態が設定された場合、基準画像の対象領域の一部又は全部のピクセル s における第1偏差 $e_1(s)$ が正値となり、第2偏差 $e_2(s)$ は0ではなく正又は負値となる。このため、当該設定によりある仮想点が実物体の表面から離れて内部の深い箇所に置かれるほど、第1コスト E_1 及び第2コスト E_2 が高く評価され、統合コスト E も高く評価される。

【0117】

そして、統合コスト E が最小値又は極小値に近づけられるように仮想面の位置及び姿勢が探索されることにより、仮想面上の仮想点群の全部が実物体の内部にはなく、かつ、当該仮想点群の少なくとも一部が実物体表面に位置するような仮想面の位置及び姿勢が、当該仮想面の実物体の表面に対する接触状態として推定されうる（図10及び図11参照）。

20

【0118】

これにより、撮像対象となった実物体（床）と、仮想物体に相当する他の実物体（足平）とのそれぞれにより共通の実空間が同時に占められているという実現不可能な状態が両物体の接触状態として探索される事態が確実に回避される（図8参照）。そして、一の実物体表面（床面）に対する他実物体表面（足平裏面）の未来における接触状態が高精度で推定されうる。

【0119】

第1係数関数 $w_1(e_1)$ が、主変数 e_1 の絶対値が同一であっても当該主変数 e_1 が正値である場合の値が、当該主変数 e_1 が負値である場合よりも大きくなるように定義されている（関係式（101）～（103）及び図6（a）～（c）参照）。第2係数関数 $w_2(e_1)$ が、主変数 e_1 の絶対値が同一であっても当該主変数 e_1 が正値である場合の値が、当該主変数 e_1 が負値である場合よりも大きくなるように定義されている。

30

【0120】

これにより、正負の定義域で非対称的な第1コスト関数 $E_1(e_1)$ にしたがって第1コスト E_1 が計算され、かつ、正負の定義域で非対称的な第1コスト関数 $E_1(e_1)$ にしたがって第2コスト E_2 が計算される（図7（a）～（c）参照）。前記のように、第1係数関数 $w_1(e_1)$ 及び第2係数関数 $w_2(e_1)$ の値は仮想的なバネのバネ係数に相当する。

40

【0121】

このため、実物体の内部にある仮想点を実物体の表面に近づけることが、実物体の外部にある仮想点を実物体の表面に近づけることよりも優先された形で仮想面の位置及び姿勢が探索されうる。これにより、撮像対象となった一の実物体及び仮想物体に相当する他の物体のそれぞれにより共通の実空間が同時に占められているという実現不可能な状態が両物体の接触状態として探索される事態が確実に回避される。そして、当該一の実物体表面に対する当該他の実物体表面の未来における接触状態が高精度で推定されうる。

【0122】

第1係数関数 $w_1(e_1)$ 及び第2係数関数 $w_2(e_1)$ のうち一方又は両方が少なくとも正の定義域において増加関数として定義されている。これにより、前記仮想的なバネのバ

50

ネ係数が、当該バネの変形量が大きくなるほど大きい値になる。このため、仮想面の位置及び姿勢の設定により、ある仮想点を実物体の表面から離れて内部の深い箇所にかかるほど、当該仮想的なバネの弾性エネルギーに相当する第1コスト E_1 及び第2コスト E_2 の両方がさらに高く評価され、統合コスト E も高く評価される。

【0123】

このため、実物体の内部にある仮想点を実物体の表面により迅速又は強力に近づけるように仮想面の位置及び姿勢が探索されうる。これにより、一の実物体に対する他の実物体の未来における接触状態が高精度かつ高速で推定されうる。

【0124】

第1係数関数 $w_1(e_1)$ 及び第2係数関数 $w_2(e_1)$ のうち一方又は両方が負の定義域又は負の指定値未満の定義域において0である関数として定義されうる(関係式(102)(103)及び図6(b)(c)参照)。この場合、実物体の外部にある仮想点又は実物体の表面からある程度離れている仮想点のコストが一律に「0」に評価される(図7(b)(c)参照)。これにより、統合コスト E を最小値又は極小値に近づけるような仮想点の座標値の組み合わせの探索処理に要する計算負荷が軽減される。

【0125】

(本発明の他の実施形態)

図12に示されているように、ロボットが歩行経路に下降段差部分が存在する場合、距離画像センサ10、基準画像センサ11及び参照画像センサ12のそれぞれにとって、当該段差部分により下段部分の一部が死角となるオクルージョンが発生する場合があります。このようなオクルージョンの影響を軽減又は解消するため、3次元マスク及び必要に応じて外挿補間処理が利用される。

【0126】

具体的には、図13に示されている1次距離画像座標系の一部であるROIの中心又は重心等の代表点の画素値 D_s を与える実点または対応する仮想点が基準点として定義される(図5参照)。

【0127】

そして、仮想面の中心又は重心等の代表点の位置が基準点の位置と一致するように仮想面が設定され、当該仮想面を包含する立体がマスクとして定義される。図14(a)に示されているように基準点を中心とし、実空間における足平裏面に相当する略矩形形状の輪郭(破線参照)を有する仮想面を包含する球状のマスクが定義される。マスクの形状は、図14(b)に示されているように略円柱状又は円盤状であってもよく、図14(c)に示されているように略矩形柱状又は矩形板状であってもよい。

【0128】

図12に示されているように、ROIのうち距離計測値(画素値) D_s が存在する複数の実点(参照)のそれぞれのうち、実空間においてマスクに包含されているもののみが選択される。図13には、ROIのうち、距離計測値が存在し、かつ、マスクに包含される実点に相当する領域に斜線が付されている。

【0129】

そして、外挿補間法にしたがって、マスクに包含されている他の領域における実点(参照)が補完される。その結果、基準点の下段部分に存在し、当該基準点の近傍に段差由来のオクルージョンが発生していても、足平裏面と床面との接触状態が高精度で推定されうる(図15(a)及び図16(a)参照)。別の言い方をすると、外挿補間処理の実行要否に応じて、オクルージョンの発生有無が判定されうる。基準点の上段部分に存在する場合も、前記実施形態と同様に足平裏面と床面との接触状態が高精度で推定される(図15(b)(c)及び図16(b)(c)参照)。また、画素値 D_s を有する複数の実点のうち、マスクに包含されているもののみが選択されるため、計測誤差をの大きい画素値 D_s を有する実点を除くことができ、足平裏面と床面との接触状態が高精度で推定される。

【0130】

関係式(102)により定義されている第1係数関数 $w_1(e_1)$ (図6(b)参照)は

10

20

30

40

50

、負の指定値 $-c_2$ ($c_2 > 0$) 以下の定義域において、0ではなく正の指定値であってもよい。この場合、実物体の外部にあって実物体の表面からある程度離れている仮想点のコストEが一律に「正の指定値」に評価される。これにより、仮想物体の表面が一の実物体の表面から離れている状態でも、統合コストEを最小値又は極小値に近づけるような仮想面の探索処理を促進させることができる。その結果、当該一の実物体と当該他の実物体との、未来における接触状態が高精度かつ迅速に推定される。

【0131】

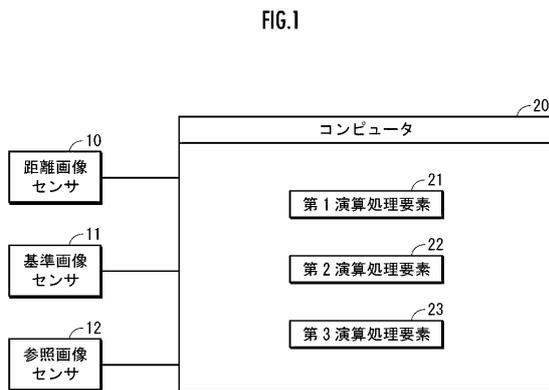
さらに、足平裏面の基準位置及び基準姿勢と、平面パラメータ又は曲面パラメータとの複数の組み合わせが仮定され、当該組み合わせのそれぞれに応じて、実物体と仮想物体に相当する他の実物体との、未来における複数の接触状態が推定されてもよい。

【符号の説明】

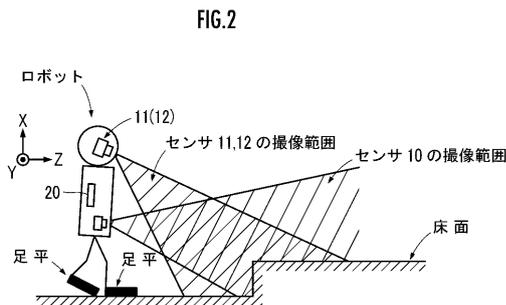
【0132】

10 距離画像センサ、11 基準画像センサ（一方の画像センサ）、12 参照画像センサ（他方の画像センサ）、20 コンピュータ、21 第1演算処理要素、22 第2演算処理要素、23 第3演算処理要素。

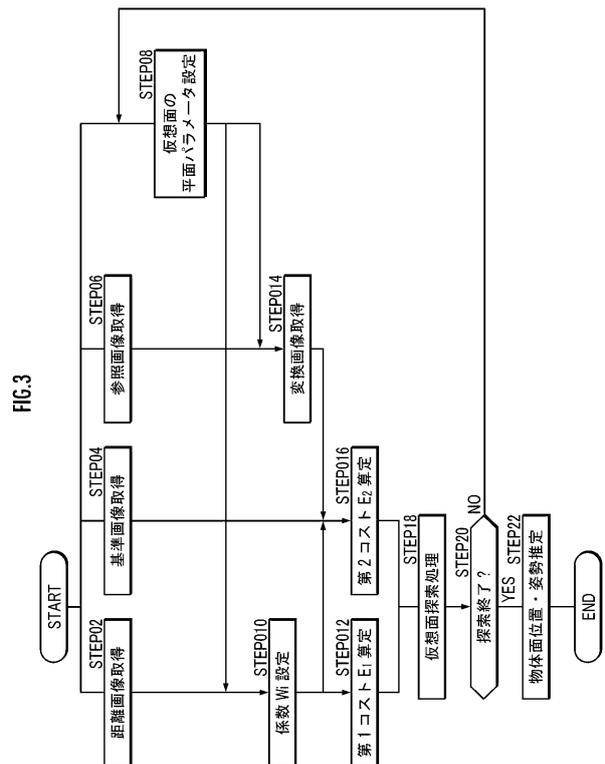
【図1】



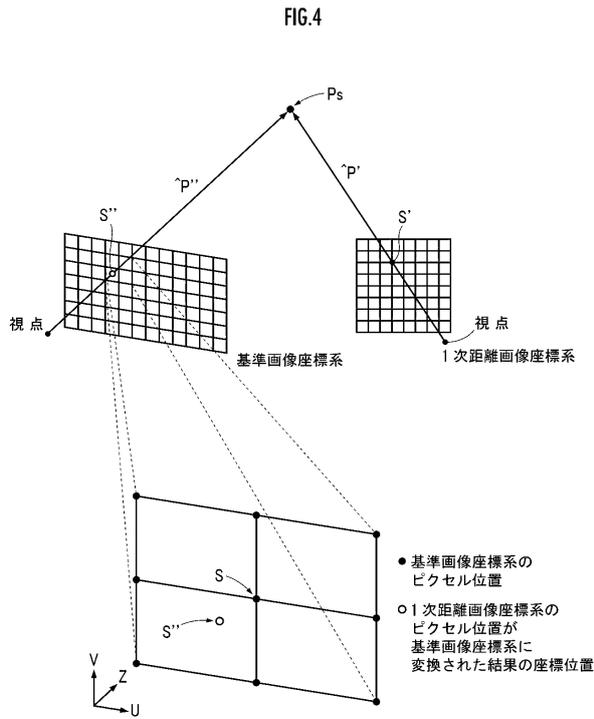
【図2】



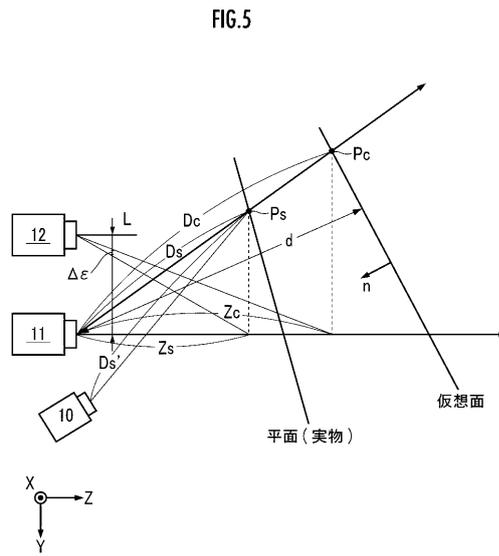
【図3】



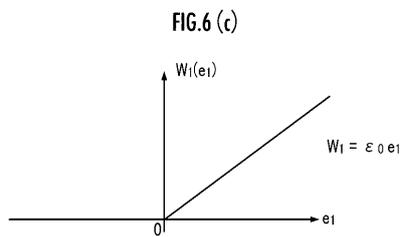
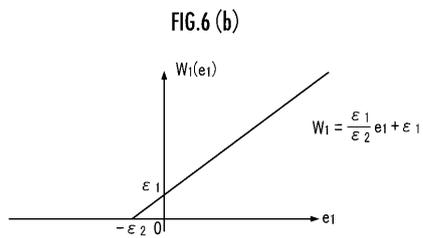
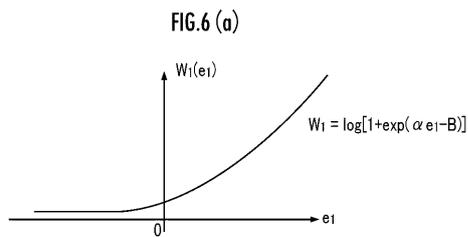
【 図 4 】



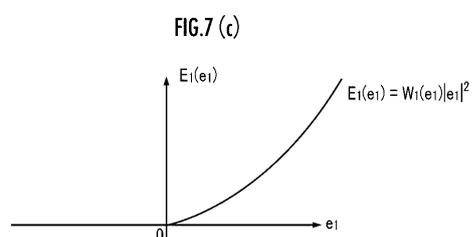
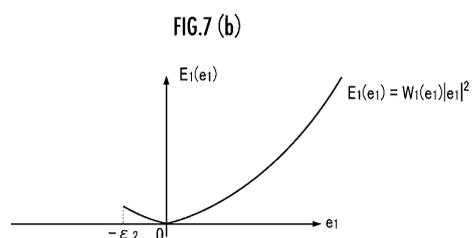
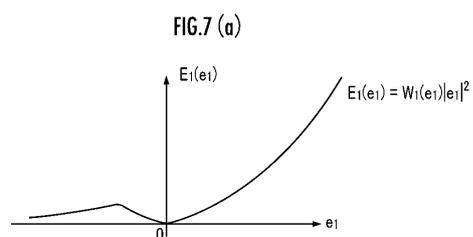
【 図 5 】



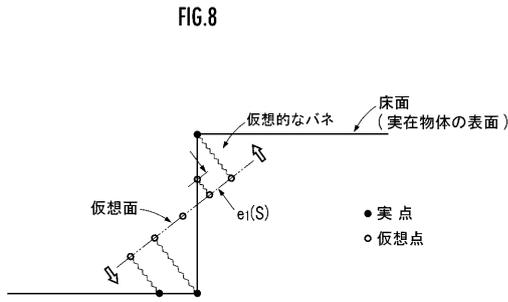
【 図 6 】



【 図 7 】



【 図 8 】



【 図 9 】

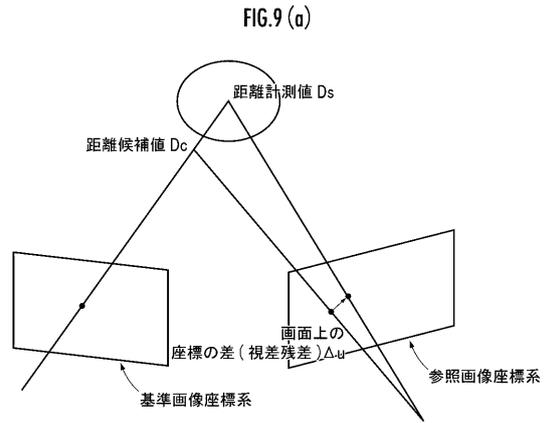
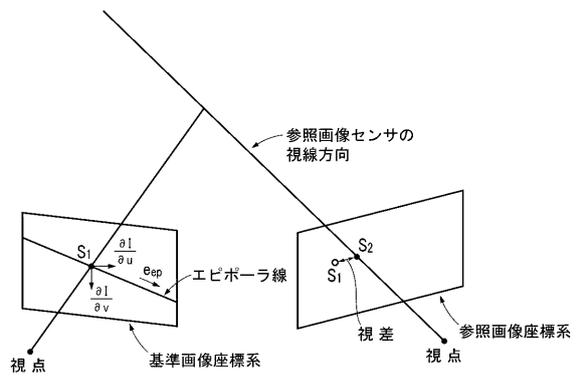
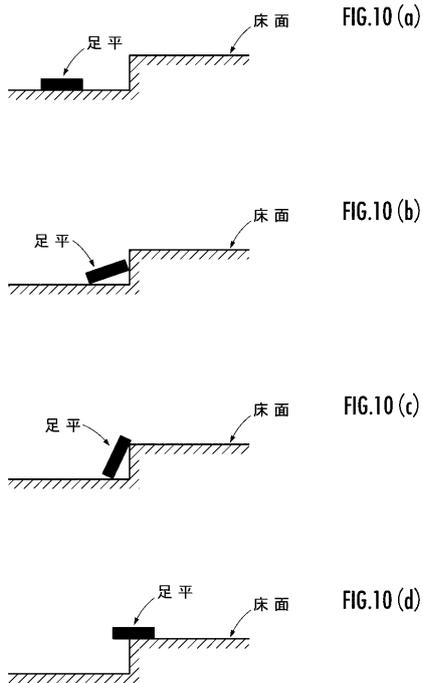


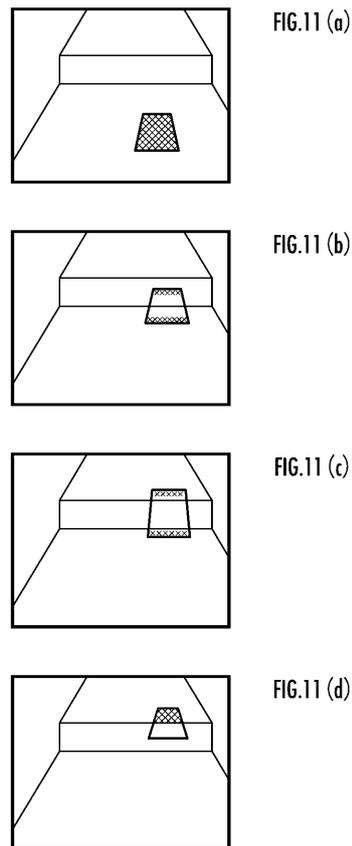
FIG.9 (b)



【 図 10 】

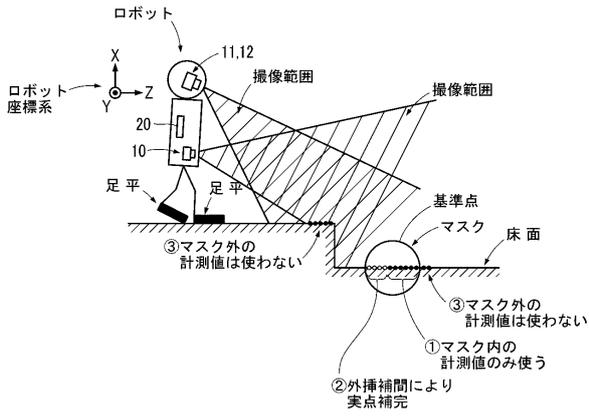


【 図 11 】



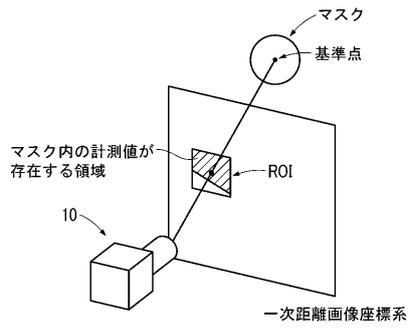
【 図 1 2 】

FIG.12



【 図 1 3 】

FIG.13



【 図 1 4 】

FIG.14 (a)

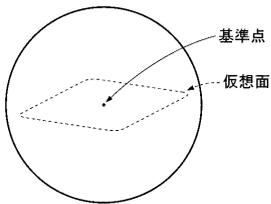


FIG.14 (b)

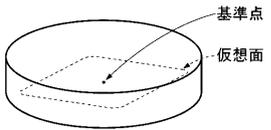
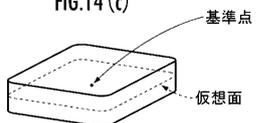


FIG.14 (c)



【 図 1 5 】

FIG.15 (a)

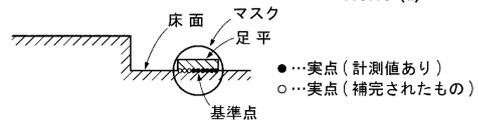


FIG.15 (b)

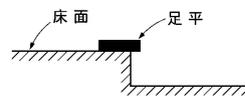
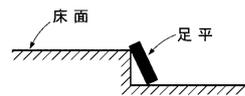


FIG.15 (c)



【 図 16 】

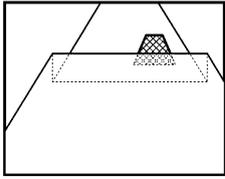


FIG.16 (a)

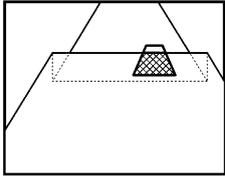


FIG.16 (b)

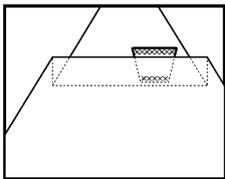


FIG.16 (c)

フロントページの続き

(51) Int.Cl. F I
B 2 5 J 19/04 (2006.01) G 0 6 T 1/00 3 1 5
G 0 1 B 11/04 H
B 2 5 J 19/04

(56) 参考文献 特開 2 0 0 9 - 1 3 6 9 8 7 (J P , A)
特開 2 0 0 3 - 2 5 2 1 4 7 (J P , A)
特開 2 0 0 9 - 1 3 9 9 9 5 (J P , A)
特開平 0 9 - 0 0 5 0 5 0 (J P , A)

(58) 調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 0 1 B 1 1 / 0 0 - 1 1 / 3 0 ,
2 1 / 0 0 - 2 1 / 3 2
G 0 1 C 3 / 0 0 - 3 / 3 2
B 2 5 J 1 / 0 0 - 2 1 / 0 2
G 0 6 T 1 / 0 0 - 1 / 4 0 ,
3 / 0 0 - 5 / 5 0 ,
9 / 0 0 - 9 / 4 0