

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7229095号
(P7229095)

(45)発行日 令和5年2月27日(2023.2.27)

(24)登録日 令和5年2月16日(2023.2.16)

(51)国際特許分類

F I

G 0 1 L 5/00 (2006.01)

G 0 1 L

5/00

1 0 1 Z

G 0 1 L 1/14 (2006.01)

G 0 1 L

1/14

Z

請求項の数 7 (全29頁)

(21)出願番号 特願2019-93192(P2019-93192)
(22)出願日 令和1年5月16日(2019.5.16)
(65)公開番号 特開2020-187069(P2020-187069
A)
(43)公開日 令和2年11月19日(2020.11.19)
審査請求日 令和4年3月8日(2022.3.8)

(73)特許権者 506310865
C Y B E R D Y N E 株式会社
茨城県つくば市学園南二丁目2番地1
(74)代理人 110002365
弁理士法人サンネクスト国際特許事務所
(72)発明者 山海 嘉之
茨城県つくば市学園南二丁目2番地1
C Y B E R D Y N E 株式会社内
審査官 大森 努

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 触力覚検知装置、触力覚検知方法およびロボットアーム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

複数の正極が同一平面上かつアレイ状に配置された第1電極板と単一の負極が配置された第2電極板との間に当該正極と同数の粘弾性体からなる所定形状のシリンダをそれぞれ介挿して複数のコンデンサを形成する静電容量式の荷重センサと、

前記荷重センサの前記第2電極板に加えられる外力に応じて変化する前記各コンデンサの静電容量を検出する静電容量検出部と、

前記静電容量検出部により検出された前記各コンデンサの静電容量の変化量に基づいて、それぞれ前記シリンダに加わる荷重の分布を表す分布荷重を計測する分布荷重計測部と、

前記分布荷重計測部により計測された分布荷重に対する前記各シリンダの伸縮量および当該分布荷重のパターンの関係性に基づいて、前記荷重センサの前記第2電極板に加えられる外力の総荷重および荷重中心位置を算出する荷重情報算出部と

を備え、前記荷重情報算出部は、前記荷重センサの前記第2電極板に加えられる外力の総荷重と、前記第1電極板を平面とするx軸方向の分布荷重の比と、当該第1電極板を平面とするy軸方向の分布荷重の比とに基づいて、荷重中心位置が前記第2電極板の中心外となる不均一荷重に対する誤差補償量を算出し、当該誤差補償量に基づいて荷重中心位置をキャリブレーション補正する

ことを特徴とする触力覚検知装置。

【請求項2】

前記静電容量検出部は、前記各コンデンサについて、荷重印加時から所定時間経過後ま

10

20

での静電容量の増加量に基づいて、対応する前記シリンダの材料特性に応じた当該シリンダに加わる荷重の計測誤差および当該シリンダの硬度に応じた応答遅れをキャリブレーション補正する

ことを特徴とする請求項 1 に記載の触力覚検知装置。

【請求項 3】

前記荷重センサは、非導電性材からなるシールド材を用いて全体が被覆されている

ことを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の触力覚検知装置。

【請求項 4】

複数の正極が同一平面上かつアレイ状に配置された第 1 電極板と単一の負極が配置された第 2 電極板との間に当該正極と同数の粘弾性体からなる所定形状のシリンダをそれぞれ介挿して複数のコンデンサを形成する静電容量式の荷重センサを構成しておき、

前記荷重センサの前記第 2 電極板に加えられる外力に応じて変化する前記各コンデンサの静電容量を検出する第 1 ステップと、

前記第 1 ステップにおいて検出された前記各コンデンサの静電容量の変化量に基づいて、それぞれ前記シリンダに加わる荷重の分布を表す分布荷重を計測する第 2 ステップと、

前記第 2 ステップにより計測された分布荷重に対する前記各シリンダの伸縮量および当該分布荷重のパターンの関係性に基づいて、前記荷重センサの前記第 2 電極板に加えられる外力の総荷重および荷重中心位置を算出する第 3 ステップと

を備え、前記第 3 ステップでは、前記荷重センサの前記第 2 電極板に加えられる外力の総荷重と、前記第 1 電極板を平面とする x 軸方向の分布荷重の比と、当該第 1 電極板を平面とする y 軸方向の分布荷重の比とに基づいて、荷重中心位置が前記第 2 電極板の中心外となる不均一荷重に対する誤差補償量を算出し、当該誤差補償量に基づいて荷重中心位置をキャリブレーション補正する

ことを特徴とする触力覚検知方法。

【請求項 5】

前記第 1 ステップでは、前記各コンデンサについて、荷重印加時から所定時間経過後までの静電容量の増加量に基づいて、対応する前記シリンダの材料特性に応じた当該シリンダに加わる荷重の計測誤差および当該シリンダの硬度に応じた応答遅れをキャリブレーション補正する

ことを特徴とする請求項 4 に記載の触力覚検知方法。

【請求項 6】

前記荷重センサは、非導電性材からなるシールド材を用いて全体が被覆されている

ことを特徴とする請求項 4 または 5 に記載の触力覚検知方法。

【請求項 7】

請求項 1 から 3 までのいずれか一項に記載の触力覚検知装置を、前記荷重センサの前記第 2 電極板が物体を把持する指先の把持面となるように、当該指先に組み込む

ことを特徴とするロボットアーム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、力覚情報をフィードバック可能な触力覚検知装置、触力覚検知方法およびロボットアームに適用して好適なものである。

【背景技術】

【0002】

サービス業や福祉の現場など様々な場面において、ロボットが人と一緒に作業を行うことや、人に代わって作業を行うことが求められている。これらのロボットは、生活現場に存在する様々な日用品をロボットアームを用いてそれぞれの剛性や形状に応じた適切な力と指先位置で把持する必要がある。

【0003】

ロボットアームが適切な力で物体を把持するためには、指先と物体との接触圧を力覚情

10

20

30

40

50

報としてフィードバックを受けながら把持力を制御する必要がある。また、ロボットアームが適切な指先位置で把持できているかを判断するためには、指先と物体との接触位置に基づいて、当該指先のどの位置が物体に触れているかを認識する必要がある。このようにロボットには、ロボットアームの指先における接触圧および接触位置に関する情報を検知可能な触力覚センサを搭載する必要がある。

【0004】

また、ロボットを生活現場などで使用するためには、作業環境に干渉したり、作業領域を狭めたりすることなく、人と同時に同一の環境で作業を行うことが求められる。実際に人が作業を行う場合には、これらの要求は満たされるため、人の腕に近い大きさのロボットアームであれば同様に要求を満たすことになる。このため、触力覚センサは、そのようなロボットアームの指部への組込みが可能な大きさに設計する必要がある。

10

【0005】

従来の触力覚センサには、感圧導電性エラストマーを用いた2次元分布荷重とその中心位置の計測手法に関する研究がある。感圧導電性材料としてエラストマーや樹脂等を用いた手法では、可撓性の高い柔軟なセンサを実現できるというメリットがある。

【0006】

先行技術文献としては、静電容量の変化に基づいて、測定対象物の凹凸形状等を面圧分布として検出可能な静電容量型面圧分布センサが提案されている（特許文献1参照）。また、静電容量検出電極が形成された薄膜樹脂フィルム基盤の任意の位置を押圧したときに、その押圧方向または押圧強度あるいはその両方を、静電容量の変化により検出する入力装置が提案されている（特許文献2参照）。さらに、荷重の大きさを位置ごとに検出することによって荷重の分布を検出することが可能な静電容量式の面圧分布センサを搭載した荷重分布検出装置が提案されている（特許文献2参照）。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【文献】特開2010-43881号公報

特許第4756097号公報

特開2014-142193号公報

【発明の概要】

30

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

ところが、上述の特許文献1から3までのいずれも、エラストマーや樹脂からなる感圧導電性材は圧力と抵抗の関係が線形にならないため、同一荷重であっても荷重が作用する面積が大きくなるほど抵抗値の低下量が大きくなるという特性がある。

【0009】

生活現場に存在する日用品の形状は様々であるため、日用品を把持した際の日用品と指表面の接触面積は一定ではない。このため、生活現場で使用可能なロボットのための触力覚センサは、荷重が作用する面積によらず、加えられた荷重の大きさを正しく計測できることが要求される。

40

【0010】

本発明は以上の点を考慮してなされたもので、荷重が作用する面積によらず、外部から加えられた荷重の大きさを正確に計測することが可能な触力覚検知装置、触力覚検知方法およびロボットアームを提案するものである。

【課題を解決するための手段】

【0011】

かかる課題を解決するため本発明においては、複数の正極が同一平面上かつアレイ状に配置された第1電極板と単一の負極が配置された第2電極板との間に当該正極と同数の粘弾性体からなる所定形状のシリンダをそれぞれ介挿して複数のコンデンサを形成する静電容量式の荷重センサと、荷重センサの第2電極板に加えられる外力に応じて変化する各コ

50

ンデンサの静電容量を検出する静電容量検出部と、静電容量検出部により検出された各コンデンサの静電容量の変化量に基づいて、それぞれシリンダに加わる荷重の分布を表す分布荷重を計測する分布荷重計測部と、分布荷重計測部により計測された分布荷重に対する各シリンダの伸縮量および当該分布荷重のパターンの関係性に基づいて、荷重センサの第2電極板に加えられる外力の総荷重および荷重中心位置を算出する荷重情報算出部とを備える触力覚検知装置を構成するようにした。

【0012】

この結果、荷重センサの第2電極板に加えられる外力の総荷重および荷重中心位置に応じて、各シリンダに加わる分布荷重が一意に定まることにより、当該第2電極板に作用する荷重の面積によらず、外部から加えられた荷重の大きさを正確に計測することができる。

10

【0013】

また本発明においては、静電容量検出部は、各コンデンサについて、荷重印加時から所定時間経過後までの静電容量の増加量に基づいて、対応するシリンダの材料特性に応じた当該シリンダに加わる荷重の計測誤差および当該シリンダの硬度に応じた応答遅れをキャリブレーション補正するようにした。

【0014】

この結果、粘弾性体であるシリンダは、瞬間的な弾性変形後に生じる緩やかな粘性変形に起因して応答遅れが生じるため、硬度の低さに比例して応答遅れが大きくなるとともに、硬度が低くなるほど荷重に対するシリンダの伸縮量が増加し、電極板間の距離が近くなることにより、電極板間の距離と反比例の関係にある静電容量が大きくなるため、硬度の低さに比例して静電容量の増加量が大きくなるが、このような材料特性に基づく要因を解消することができる。

20

【0015】

さらに本発明においては、荷重情報算出部は、荷重センサの第2電極板に加えられる外力の総荷重と、第1電極板を平面とするx軸方向の分布荷重の比と、当該第1電極板を平面とするy軸方向の分布荷重の比とに基づいて、荷重中心位置が第2電極板の中心外となる不均一荷重に対する誤差補償量を算出し、当該誤差補償量に基づいて荷重中心位置をキャリブレーション補正するようにした。

【0016】

この結果、荷重中心位置が第2電極板の中心外となる不均一荷重に対しても、シミュレーションにより誤差補償量を算出して、各第1電極板のサイズ誤差の補正と同時に荷重中心位置をキャリブレーション補正することが可能となる。

30

【0017】

さらに本発明においては、荷重センサは、非導電性材からなるシールド材を用いて全体が被覆されている。この結果、センサ自体と他誘電体とのコンデンサ形成を未然に防いで外来ノイズを除去することが可能となる。

【0018】

さらに本発明においては、複数の正極が同一平面上かつアレイ状に配置された第1電極板と単一の負極が配置された第2電極板との間に当該正極と同数の粘弾性体からなる所定形状のシリンダをそれぞれ介挿して複数のコンデンサを形成する静電容量式の荷重センサを構成しておき、荷重センサの第2電極板に加えられる外力に応じて変化する各コンデンサの静電容量を検出する第1ステップと、第1ステップにおいて検出された各コンデンサの静電容量の変化量に基づいて、それぞれシリンダに加わる荷重の分布を表す分布荷重を計測する第2ステップと、第2ステップにより計測された分布荷重に対する各シリンダの伸縮量および当該分布荷重のパターンの関係性に基づいて、荷重センサの第2電極板に加えられる外力の総荷重および荷重中心位置を算出する第3ステップとを備えるようにした。

40

【0019】

この結果、荷重センサの第2電極板に加えられる外力の総荷重および荷重中心位置に応じて、各シリンダに加わる分布荷重が一意に定まることにより、当該第2電極板に作用する荷重の面積によらず、外部から加えられた荷重の大きさを正確に計測することができる。

50

【0020】

さらに本発明においては、触力覚検知装置を、荷重センサの第2電極板が物体を把持する指先の把持面となるように、当該指先に組み込むようにしてロボットアームを構成するようにした。この結果、ロボットアームにおいて、物体を把持する際に、指先の接触圧および接触位置を正確に認識することが可能となる。

【発明の効果】

【0021】

以上のように本発明によれば、荷重が作用する面積によらず、外部から加えられた荷重の大きさを正確に計測することが可能な触力覚検知装置、触力覚検知方法およびロボットアームを実現できる。

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図1】本実施の形態による触力覚検知装置における荷重センサの構成を示す概念図である。

【図2】図1に示す触力覚検知装置の内部構成を示すブロック図である。

【図3】荷重印加装置の内部構成を示す略線図である。

【図4】3種類の荷重センサの中心位置に荷重印加した際の応答特性の比較を表すグラフである。

【図5】荷重印加から1秒後のセンサ出力と荷重の関係を表すグラフである。

【図6】ゴムシリンダの伸縮量と荷重との関係を表すグラフである。

【図7】第2電極板にx軸方向の傾き δ が生じた場合のコンデンサの断面図を表す略線図である。

【図8】第2電極板の中心間距離と傾きの増加量に応じた静電容量の変動率を表すグラフである。

【図9】不均一荷重が印加された際の荷重センサのシミュレーションモデルを表す概念図である。

【図10】荷重中心をx軸正の方向へ移動した際の荷重センサのシミュレーションモデルを表す概念図である。

【図11】荷重中心をy軸正の方向へ移動した際の荷重センサのシミュレーションモデルを表す概念図である。

【図12】荷重中心をx軸とy軸の両方向に同時に移動した際の荷重センサのシミュレーションモデルを表す概念図である。

【図13】荷重センサにおける荷重印加の該当箇所を表す略線図である。

【図14】荷重中心をx軸正の方向へ移動した際の荷重センサの実モデルを表す概念図である。

【図15】荷重中心をy軸正の方向へ移動した際の荷重センサの実モデルを表す概念図である。

【図16】荷重中心をx軸とy軸の両方向に同時に移動した際の荷重センサの実モデルを表す概念図である。

【図17】荷重中心をx軸正の方向へ移動した際の荷重センサのシミュレーションモデルを表す概念図である。

【図18】荷重中心をy軸正の方向へ移動した際の荷重センサのシミュレーションモデルを表す概念図である。

【図19】x座標の誤差補償反映後のシミュレーションモデルを表す概念図である。

【図20】y座標の誤差補償反映後のシミュレーションモデルを表す概念図である。

【図21】荷重中心をx軸正の方向へ移動した際の荷重センサのシミュレーションモデルを表す概念図である。

【図22】荷重中心をy軸正の方向へ移動した際の荷重センサのシミュレーションモデルを表す概念図である。

【図23】x座標の誤差補償反映後のシミュレーションモデルを表す概念図である。

10

20

30

40

50

【図 2 4】 y 座標の誤差補償反映後のシミュレーションモデルを表す概念図である。

【図 2 5】 荷重センサによる荷重の計測結果を表すグラフである。

【図 2 6】 荷重中心位置の x 座標の計測結果を表すグラフである。

【図 2 7】 荷重中心位置の y 座標の計測結果を表すグラフである。

【図 2 8】 荷重センサの荷重を 10 秒間印加した際の各種計測値の連続データを表すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0023】

以下、図面について、本発明の一実施例を詳細する。

【0024】

(1) 本実施の形態による触力覚検知装置の構成

図 1 (A) ~ (C) に本実施の形態による触力覚検知装置 1 を示す。触力覚検知装置 1 は、複数の正極が同一平面上かつアレイ状に配置された第 1 電極板 10 と単一の負極が配置された第 2 電極板 11 との間に当該正極と同数の粘弾性体からなる所定形状のゴムシリンダ 12 をスペーサとしてそれぞれ介挿して複数のコンデンサを形成する静電容量式の荷重センサ 20 を有する。

【0025】

ロボットアーム (図示せず) の指部を 2 リンク機構とすることを想定して、荷重センサ 20 のサイズを設定した。荷重センサ 20 における第 2 電極板 11 のサイズは、長辺 30 [mm]、短辺 18 [mm]、厚み 2.3 [mm] であり、ゴムシリンダ 12 は直径 2 [mm]、高さ 0.5 [mm] である。

【0026】

荷重センサ 20 の第 2 電極板 11 に荷重が加えられるとスペーサであるゴムシリンダ 12 が縮み、第 1 電極板 10 と第 2 電極板 11 との距離が近づき、第 1 電極板 10 および第 2 電極板 11 間で構成されるコンデンサの静電容量が増加する。このとき、第 1 電極板 10 に加えられた荷重は、荷重が作用する面積によらず、その荷重の大きさと荷重中心位置に応じて各ゴムシリンダ 12 を伸縮させる。各ゴムシリンダ 12 の伸縮量とそのパターンは、加えられた荷重とその荷重中心位置に応じて一意に定まる。

【0027】

したがって、計測された静電容量の増加量を荷重に変換することにより、荷重センサ 20 の第 2 電極板 11 に加えられた荷重をその接触面積によらず、第 1 電極板 10 に対する 4 つの力からなる荷重分布として計測することが可能であり、この荷重分布により、荷重センサ 20 に加えられた総荷重とその荷重中心位置の算出が可能となる。静電容量は電極間の距離が近いほど大きな変化 (増加) として現れるため、高感度で薄型な荷重センサ 20 の実現に適している。

【0028】

また、荷重センサ 20 の四隅に配置したゴムシリンダ 12 に荷重を集中させることにより、ゴムシリンダ 12 の伸縮量を増やし、センサの感度を向上させる構造としている。なお、ゴムシリンダ 12 の材料には、耐候性、耐熱性、耐寒性に優れたシリコンゴムを用いている。

【0029】

ノイズ対策として、荷重センサ 20 の全体をシールドし、その背面に計測回路を搭載・シールドしている。これにより、第 1 電極板 10 および第 2 電極板 11 と他誘電体とのコンデンサ形成を防ぎ、第 1 電極板 10 および第 2 電極板 11 の近傍で A/D 変換された値を出力することにより、外来ノイズの除去が可能な小型触力覚センサモジュールとなっている。

【0030】

なお、荷重センサ 20 の荷重計測範囲を、生活現場での日用品把持に必要な把持力を考慮して設定した。国際生活機能分類 (ICF) を用いた日常生活の分析によると、日常生活における物を持ち上げるという動作において、400 [g] 以上のものを持ち上げるのは約 1 割

10

20

30

40

50

であると報告されている。このため、400[g]の物を持ち上げることができれば日常生活の約9割をカバーできると考えられる。

【0031】

また、人の指の摩擦係数の最低値は0.5であり、人が物を把持する際には、必要最低限の力の1.4倍程度の力を発揮することが報告されている。以上により、荷重センサ20は560[g] (=5.488[N]) までの計測が必要となる。よって、荷重計測範囲はこれを超えるよう0~596.7[g] (=0~5.848[N]) と設定した。

【0032】

(2) 本実施形態による触力覚検知装置1の内部構成

図2において、図1に示す触力覚検知装置1の内部構成について説明する。触力覚検知装置1において、静電容量検出部30は、荷重センサ20の第2電極板11に加えられる外力に応じて変化する各コンデンサの静電容量を検出する。

【0033】

分布荷重計測部31は、静電容量検出部30により検出された各コンデンサの静電容量の変化量に基づいて、それぞれゴムシリンダ12に加わる荷重の分布を表す分布荷重を計測する。荷重情報算出部32は、分布荷重計測部31により計測された分布荷重に対する各ゴムシリンダ12の伸縮量および当該分布荷重のパターンの関係性に基づいて、荷重センサ20の第2電極板11に加えられる外力の総荷重および荷重中心位置を算出する。

【0034】

また後述するように、静電容量検出部30は、各コンデンサについて、荷重印加時から所定時間経過後までの静電容量の増加量に基づいて、対応するゴムシリンダ12の材料特性に応じた当該ゴムシリンダ12に加わる荷重の計測誤差および当該ゴムシリンダ12の硬度に応じた応答遅れをキャリブレーション補正するようになされている。

【0035】

さらに後述するように、荷重情報算出部32は、荷重センサ20の第2電極板11に加えられる外力の総荷重と、第1電極板10を平面とするx軸方向の分布荷重の比と、当該第1電極板10を平面とするy軸方向の分布荷重の比とに基づいて、荷重中心位置が第2電極板11の中心外となる不均一荷重に対する誤差補償量を算出し、当該誤差補償量に基づいて荷重中心位置をキャリブレーション補正するようになされている。

【0036】

(3) 本発明による触力覚検知装置1の基本特性と均一荷重の計測方法

本実施の形態による触力覚検知装置1の基本特性として、硬さの程度を表す硬度が20°、50°、80°のシリコンゴムをゴムシリンダ12に用いて作製した3種類の荷重センサ20に対して、それぞれセンサ中心(第2電極板11の中心)に荷重を印加した際の、応答性とセンサ出力の大きさ(静電容量の増加量)について説明するとともに、均一荷重計測のキャリブレーションについて説明する。

【0037】

図3に荷重印加装置40を示す。この荷重印加装置40は、荷重の受け皿41、当該受け皿41を支える能動リンク機構部42、外殻ガイド43、センサカバー44によって構成されている。荷重の受け皿41の両端を支える能動リンク機構部42の上下動作によって、任意の時間における荷重の印加と除去が可能となる。受け皿41に寄せられた荷重は、外殻ガイド43によって垂直荷重(押下力)のみ触力覚検知装置1の荷重センサ20に伝達される。荷重の作用位置は、センサカバー44の凹部と受け皿軸先の凸部の嵌め合いによって合致される。センサカバー44の凹部位置を調整することにより、荷重センサ20に対して任意の位置に荷重を加えることが可能となる。

【0038】

(3-1) 荷重センサ20におけるセンサ出力の応答性

各荷重センサ20の中心位置に10秒間5.848[N]の荷重を印加した際の荷重センサ20のチャンネル1(4つの第1電極板10の一つ)の出力を正規化したものを図4に示す。これらの結果より、荷重センサ20にはシリコンゴムの硬度に応じた応答遅れが存在するこ

10

20

30

40

50

とが確認された。ここで、ゴムシリンダ 1 2 として用いたシリコンゴムは、粘弾性体であるため、瞬発的な弾性変形後に緩やかな粘性変形が生じる。この粘性変形が、図 4 に示される応答遅れの原因であり、ゴム硬度が低いほど、応答遅れが大きくなっていることがわかる。

【0039】

本実施の形態では、より厳しい条件で評価を行ったために、応答遅れによる単位時間あたりのセンサ出力の変動量が大きくなった。荷重印加から 1 秒後の値を用いて特性検証とキャリブレーションを行うものとする。

【0040】

(3-2) 荷重に対する静電容量の特性

荷重印加から 1 秒後のセンサ出力と荷重の関係を図 5 に示す。なお、荷重は荷重センサ 20 の中心位置に対して、0~596.7[g]までを、荷重印加装置の荷重の受け皿の重さである 96.7[g]以降は 100[g]ずつ分銅を加えて増量させるものとし、荷重ごとに荷重印加を 5 試行実施するものとした。

【0041】

図 5 によれば、ゴムシリンダ 1 2 のゴム硬度が低いほど、荷重センサ 20 の静電容量の増加量が大きくなることがわかる。これは、ゴム硬度が低くなるほど荷重に対するゴムシリンダ 1 2 の伸縮量が増加し、第 1 電極板 10 および第 2 電極板 11 間の距離が近くなることで、当該第 1 電極板 10 および第 2 電極板 11 間の距離と反比例の関係にある静電容量が大きくなるからである。これにより、3 種類の荷重センサ 20 のうち、応答性とセンサ出力の位置付けとなったゴム硬度 50[°]の荷重センサ 20 に着目し、計測特性の確認とキャリブレーションを行っていくものとする。

【0042】

(3-3) 均一荷重計測のキャリブレーション

図 5 に示される荷重とセンサ出力のプロットから相関関係を表す近似式を求め、センサ出力ー荷重変換に用いることにより、荷重センサ 20 のチャンネル 1 の均一荷重計測のためのキャリブレーションを行う。これにより第 1 電極板 10 および第 2 電極板 11 のサイズ誤差の補正も同時に行われる。同様に、その他のチャンネルのキャリブレーションも行う。今回、印加した荷重に対する応答の範囲では、単調増加する 2 次曲線によって高い近似性が確認された。なお、決定係数 R^2 は全てのチャンネルにおいて 0.999 以上となった。

【0043】

センサに加えられた総荷重 F_a は、センサの各チャンネルによって計測された荷重 F_{chn} ($n=1\sim4$) を 4 で割った値の和として次式 (1) にて算出される。

【数 1】

$$F_a = \frac{1}{4}(F_{ch1} + F_{ch2} + F_{ch3} + F_{ch4})$$

…… (1)

【0044】

(4) 不均一荷重に対する計測特性と誤差補償

続いて荷重中心位置が荷重センサ 20 の中心外となる不均一荷重の場合について、当該不均一荷重に対するセンサ出力の特性を確認し、荷重計測における誤差補償の必要性について説明する。その後、不均一荷重計測のためのキャリブレーションとして、シミュレーションによる計測荷重の誤差補償式の導出およびセンサ実機への適用について説明する。

【0045】

(4-1) 不均一荷重に対するセンサ出力の特性

不均一荷重を荷重センサ 20 に印加した際のセンサ出力の特性について、ゴムシリンダ

10

20

30

40

50

1 2 の材料特性とコンデンサの電気的特性の 2 つの観点から検討する。まず、不均一荷重を印加した際のゴムシリンダ 1 2 の材料特性による影響について説明する。

【 0 0 4 6 】

上述したセンサ実機において確認した図 5 に示されるセンサ出力と荷重の関係より、図 6 に示すゴムシリンダ 1 2 の伸縮量と荷重との関係を算出した。なお、センサの中心位置に荷重を印加した場合、1 つのゴムシリンダ 1 2 に加わる荷重は総荷重の 4 分の 1 となる。シリコンゴムを含め一般的なゴム素材は材料特性として、荷重に対する伸縮量の関係が非線形となる。図 6 によれば、今回印加した荷重に対する応答の範囲では、ゴムシリンダ 1 2 の伸縮量と荷重の関係は、単調増加する 2 次曲線によって高い近似性が確認された。なお、決定係数 R^2 は 0.999 以上となった。

10

【 0 0 4 7 】

図 6 によれば、入力変数を伸縮量、出力を荷重としたとき、係数が正の 2 次の非線形項をもつため、荷重が一部のゴムシリンダ 1 2 に集中する不均一荷重では、均一荷重に比べ、荷重に対するゴムシリンダ 1 2 の伸縮量の総和が小さくなる。静電容量は、電極板間の距離に反比例するため、ゴムシリンダ 1 2 の材料特性による影響としては、不均一荷重では、荷重中心がセンサ中心から離れるほど、均一荷重に比べセンサ出力が小さくなる。

【 0 0 4 8 】

次に、不均一荷重を印加した際の電気的特性による影響について説明する。不均一荷重を印加すると、荷重センサ 2 0 の第 2 電極板 1 1 に傾きが生じる。そこで、不均一荷重が印加された際の簡易センサモデルとして、第 2 電極板 1 1 に x 軸方向の傾き δ が生じた場合のコンデンサの断面図を図 7 に示す。ここでは、電気的特性が与える影響のみ確認を行うために、両端のゴムシリンダ 1 2 は線形バネであると仮定した。

20

【 0 0 4 9 】

図 7 において、全体の静電容量は図中の幅 dx 、電極板間距離 z の微小コンデンサの集合と置き換えられる。電極板間距離 z は x 軸方向に直線的に変化するため $z = d - (2\delta / a)x$ となる。このとき、微小コンデンサの静電容量 dC は次式 (2) によって示される。

【数 2】

$$dC = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 b dx}{d - (2\delta / a)x}$$

30

…… (2)

【 0 0 5 0 】

ここで、 ε は空気の比誘電率、 ε_0 は真空中の誘電率、 a はセンサの長辺、 b は短辺である。また、傾きによって減少する電極板端部コンデンサの x 軸方向の長さ x_d は次式 (3) によって示される。

【数 3】

$$x_d = a - \sqrt{a^2 - 4\delta^2}$$

40

…… (3)

よって、全体の静電容量 C は、式 (4) によって求められる。

【数 4】

50

$$C(x) = \int_{-\left(\frac{a}{2} - \frac{x_d}{2}\right)}^{\frac{a}{2} - \frac{x_d}{2}} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 b dx}{d - (2\delta/a)x}$$

..... (4)

【0051】

第2電極板11に傾きが生じた場合の電気的特性による影響は、印加荷重の大きさに関わらず同傾向のものが生じる。以下では、その影響が特に大きく現れる最大荷重を印加した場合について説明する。図6によれば、センサ中心に上述したように定義した荷重の計測範囲における最大荷重5.848[N]を印加した際のゴムシリンダ12の伸縮量は約0.06[m]であった。

【0052】

荷重センサ20において不均一荷重となったとき、最も大きな第2電極板11の傾きが生じる最大荷重を印加した際の応答を図7に示す簡易センサモデルのシミュレーションによって確認した。この結果、第2電極板11の中心間距離dを0.44[mm]、傾きδを0[mm]から0.03[mm]まで増加させたときの静電容量の変動率 $C_{\delta \neq 0} / C_{\delta = 0}$ は図8のように示された。なお、 $C_{\delta = 0}$ は傾きδが0[mm]のときの静電容量であり、 $C_{\delta \neq 0}$ は傾きδが0[mm]でないときの静電容量である。図8により、電気的特性としては、傾きが大きいほどセンサ出力も大きくなることが確認できた。

【0053】

以上より、不均一荷重を正しく計測するためには、ゴムシリンダ12の材料特性とコンデンサの電気的特性による影響を考慮した補償を行う必要がある。そこで、作成したセンサ実機に基づいてシミュレータを作成し、そのシミュレーション結果から荷重計測における誤差補償式を導出し、これをセンサ実機に適用することとした。

【0054】

(4-2) シミュレーションによる誤差補償式の導出

シミュレーションによって、不均一荷重に対する計測特性の確認と荷重計測における誤差補償式の導出を行う。不均一荷重が印加された際の荷重センサ20のモデルとして、第2電極板11に傾きが生じた場合の下側面図を図9(A)に示すとともに、右側面図を図9(B)に示す。なお、 d_0 はゴムシリンダ12の自然長、 l_n ($n=1 \sim 4$) は式(3)にy軸方向の傾きが加わり、次式(5)のように表される。

【数5】

10

20

30

40

50

$$C_n(x) = \iint \frac{\varepsilon \varepsilon_0 dx dy}{d - (2\delta_x/a)x - (2\delta_y/b)y}$$

$$\left(\begin{array}{ll} -\frac{a}{2} + \frac{x_d}{2} \leq x \leq -\frac{a'}{2}, & -\frac{b}{2} + \frac{y_d}{2} \leq y \leq -\frac{b'}{2} \quad (n=1) \\ -\frac{a}{2} + \frac{x_d}{2} \leq x \leq -\frac{a'}{2}, & \frac{b'}{2} \leq y \leq \frac{b}{2} - \frac{y_d}{2} \quad (n=2) \\ \frac{a'}{2} \leq x \leq \frac{a}{2} - \frac{x_d}{2}, & \frac{b'}{2} \leq y \leq \frac{b}{2} - \frac{y_d}{2} \quad (n=3) \\ \frac{a'}{2} \leq x \leq \frac{a}{2} - \frac{x_d}{2}, & -\frac{b}{2} + \frac{y_d}{2} \leq y \leq -\frac{b'}{2} \quad (n=4) \end{array} \right)$$

10

..... (5)

【0055】

20

ここで、 $\delta_x = (l_4 - l_1) = (l_3 - l_4)$ 、 $\delta_y = (l_3 - l_4) = (l_2 - l_1)$ 、 x_d と y_d は傾きによって減少する電極板端部コンデンサの x 軸方向と y 軸方向それぞれの長さであり、 a' は左右の電極板間の距離、 b' は上下の電極板間の距離である。この式(5)と図6により求めたバネ特性を用いることで、各荷重や荷重印加位置に応じたセンサ出力のシミュレーションが可能となる。

【0056】

次に、不均一荷重に対する計測特性の確認と誤差補償式導出の前準備として、分布荷重の比についての定義を行う。荷重センサ20は、加えられた荷重とその中心位置に応じて、計測される荷重分布が一意に定まる。この特性を利用することで、不均一荷重の計測における誤差の推定と補償が可能になる。荷重分布において重要な情報は、総荷重と分布荷重のパターンである。総荷重 F_a の導出方法については上述の通りである。分布荷重のパターンについては、 x 軸方向の分布荷重の比 R_x 、 y 軸方向の分布荷重の比 R_y として扱うものとする。

30

【0057】

R_x と R_y の定義はそれぞれ次式(6)と次式(7)のように表される。

【数6】

$$R_x = \frac{1}{2} \left(\frac{F_{ch4}}{F_{ch1} + F_{ch4}} + \frac{F_{ch3}}{F_{ch2} + F_{ch3}} \right) - 0.5$$

40

..... (6)

【数7】

$$R_y = \frac{1}{2} \left(\frac{F_{ch2}}{F_{ch1} + F_{ch2}} + \frac{F_{ch3}}{F_{ch3} + F_{ch4}} \right) - 0.5$$

50

…… (7)

【0058】

これら式(6)および式(7)により、 R_x はx軸方向に、 R_y はy軸方向に傾きがない場合、それぞれ値が0となる。また、荷重センサ20は加えられた荷重とその荷重中心位置に応じて、計測される荷重分布が一意に定まるため、その総荷重 F_a 、x軸方向の分布荷重の比 R_x 、y軸方向の分布荷重の比 R_y についても同様に一意に定まる。このため、 F_a と R_x 、 R_y から必要な誤差補償量を導出できれば、不均一荷重に対する荷重計測における誤差補償が可能となる。

【0059】

このシミュレーションでは、センサ実機と同様に0～596.7[g]までの荷重を96.7[g]以降は100[g]ずつ加えて増量させるものとし、荷重センサ20の中心位置から荷重中心をx軸上、y軸上にてそれぞれ移動させた場合における F_a および R_x 、 R_y を算出する。

【0060】

さらに印加荷重の真値 F_{true} と F_a との差から必要な誤差補償量を算出し、これを縦軸とし、荷重中心をx軸上にて移動した場合には F_a および R_x を、荷重中心をy軸上にて移動した場合には、 F_a および R_y を底面座標系の各軸として3次元グラフへプロットする。このグラフプロットされたデータ点に対して、入力変換を F_a および R_x 、 R_y 、出力を誤差補償量として求めた近似曲面が不均一荷重に対する荷重計測における誤差補償式となる。なお、x軸とy軸の両方向に同時に荷重中心が移動した場合については、後ほど説明する。

【0061】

(4-2-1) 荷重中心をx軸上にて移動した場合

荷重センサ20において、荷重中心をx軸正方向へ0[mm]から12[mm]まで1[mm]ずつ移動した際の荷重計測における誤差とその補償について検討する。シミュレーションによって算出された F_a 、 R_x 、誤差補償量 F_{ecx} の3次元グラフへのデータ点のプロットを図10に示す。なお、 $F_{ecx} = F_{true} - F_a$ である。

【0062】

図10によると、荷重とその印加位置に応じて F_a 、 R_x 、 F_{ecx} の関係は一意に定まることがわかる。よって、入力変数を F_a と R_x 、出力を F_{ecx} とした近似曲面が荷重中心をx軸正方向へ移動した場合の不均一荷重に対する荷重計測における誤差補償式となる。ここで、誤差補償は上面電極板に傾きが生じた際、すなわち、 R_x が0でない場合に必要となるため、 F_a の関数が単独で誤差補償量に影響を及ぼすことはない。

【0063】

これらを踏まえて近似曲面を求めた結果、今回印加した荷重に対する応答の範囲では、 F_a について2次、 R_x について2次の多項式(8)によって高い近似性が確認された。なお、決定係数 R^2 は、0.987であった。

【数8】

$$F_{ecx}(F_a, R_x) = p_1 F_a^2 R_x^2 + p_2 F_a^2 R_x + p_3 F_a R_x^2 + p_4 F_a R_x + p_5 R_x^2 + p_6 R_x + p_7$$

…… (8)

【0064】

ここで、 p_n ($n = 1 \sim 7$) は導出した誤差補償式の各項の係数であり、荷重中心をx軸負方向へ移動した場合には、これらのパラメータを別途求めることで同様に誤差補償式が求まる。求めた近似曲面を図10に示す。

【 0 0 6 5 】

(4 - 2 - 2) 荷重中心を y 軸上にて移動した場合

荷重センサ 2 0 において、荷重中心を y 軸正の方向で 0 [mm] から 6 [mm] まで 1 [mm] ずつ移動した際の荷重計測における誤差とその補償について検討する。この場合、 R_x の代わりに R_y を用いることにより、x 軸正の方向の場合と同様に誤差補償式を求められる。シミュレーションによって算出された F_a 、 R_y 、誤差補償量 $Fec_y = F_{true} - F_a$ の 3 次元グラフへのデータ点のプロットを図 1 1 に示す。また求めた誤差補償式を次式 (9) に示す。なお、誤差補償式として求めた近似曲面の決定係数 R^2 は 0.986 であった。

【数 9】

$$Fec_y(F_a, R_y) = q_1 F_a^2 R_y^2 + q_2 F_a^2 R_y + q_3 F_a R_y^2 + q_4 F_a R_y + q_5 R_y^2 + q_6 R_y + q_7$$

10

…… (9)

【 0 0 6 6 】

ここで、 q_n ($n = 1 \sim 7$) は導出した誤差補償式の各項の係数であり、荷重中心を y 軸負の方向へ移動した場合には、これらのパラメータを別途求めることで同様に誤差補償式が求まる。求めた近似曲面を図 1 1 に示す。

20

【 0 0 6 7 】

図 1 0 および図 1 1 によれば、荷重中心がセンサ中心から離れ、 R_x または R_y と F_a が増加するほど荷重計測における誤差補償量が増加することがシミュレーションにて確認された。このことから、ゴムシリンダ 1 2 の材料特性による影響が荷重の計測誤差として大きく現れていることがわかる。

【 0 0 6 8 】

(4 - 2 - 3) x 軸 y 軸の両方向に同時に荷重中心が移動した場合

荷重センサ 2 0 において、x 軸と y 軸の両方向に同時に荷重中心が移動した場合として、x 軸 y 軸ともに正方向 (第一象限) のセンサの対角線上にて荷重中心を移動した際に、荷重計測に誤差補償 Fec_x と Fec_y を適用後に残る誤差とその補償について検討する。

30

【 0 0 6 9 】

ここで、残存誤差補償量 $Fec_{xy} = F_{true} - (F_a + Fec_x + Fec_y)$ とする。また、これは x 軸と y 軸の両方向に同時に荷重中心が移動した場合に必要な補償であるため、x 軸方向と y 軸方向の分布荷重の比の代わりにそれらの積 $R_{xy} = R_x R_y$ を用いる。

【 0 0 7 0 】

シミュレーションによって算出された F_a 、 R_{xy} 、 Fec_y の 3 次元グラフへのデータ点のプロットを図 1 2 に示す。近似曲面を求めた結果、 F_a について 2 次、 R_{xy} について 2 次の多項式 (1 0) によって高い近似性が確認された。なお、決定係数 R^2 は 1 であった。求めた多項式 (1 0) を以下に示す。

40

【数 1 0】

$$Fec_{xy}(F_a, R_{xy}) = r_1 F_a^2 R_{xy}^2 + r_2 F_a^2 R_{xy} + r_3 F_a R_{xy}^2 + r_4 F_a R_{xy} + r_5 R_{xy}^2 + r_6 R_{xy} + r_7$$

…… (1 0)

【 0 0 7 1 】

50

ここで、 r_n ($n=1\sim 7$) は導出した残存誤差補償式の各項の係数であり、荷重中心の移動を第二から第四象限まで変えた場合についても、それぞれの場合に対してこれらのパラメータを別途求めることにより、同様に残存誤差補償式を求めることができる。求めた近似曲面を図 1 2 に示す。

【0 0 7 2】

ここでは、 x 軸と y 軸の両方向に同時に荷重中心が移動した場合として、 $F_{ec_{xy}}$ が最も大きくなるセンサの対角線上にて荷重中心を移動した場合の補償について説明した。その他の場合では、荷重中心が x 軸または y 軸に近づくこととなり、必要な $F_{ec_{xy}}$ が減少する。例えば、荷重中心の y 座標が 0 に近づいた場合には、 F_{ec_x} によってほとんどの誤差が補償される。このとき、 R_y は 0 に近づき R_x と R_y の積である R_{xy} もまた 0 に近づく。 $F_{ec_{xy}}$ の全ての項は R_{xy} との積になっているため、 $F_{ec_{xy}}$ もまた 0 に近づく。以上より、本センサの不均一荷重に対する補償を加えた荷重算出式は式 (1 1) となる。

【数 1 1】

$$F = F_a + F_{ec_x} + F_{ec_y} + F_{ec_{xy}}$$

…… (1 1)

【0 0 7 3】

(4-3) センサ実機による誤差補償式の導出

センサ実機における不均一荷重に対する計測特性を確認するために、図 1 3 に示す 29 箇所に対して荷重の印加を行った。なお、荷重は 0 ~ 569.7 [g] までを荷重印加装置の荷重の受け皿の重さである 96.7 [g] 以降は 100 [g] ずつ分銅を用いて加えるものとした。

【0 0 7 4】

それ以降では、シミュレーションとの比較のために荷重センサ 2 0 の第一象限についての結果のみ説明を行うが、不均一荷重計測のためのキャリブレーションとして、第二象限から第四象限についても各種補償式の適用を行った。

【0 0 7 5】

(4-3-1) 荷重中心を x 軸上にて移動した場合

荷重センサ 2 0 において、荷重中心を x 軸正の方向へ 0 [mm] から 12 [mm] まで 3 [mm] ずつ移動した際の計測値における F_a 、 R_{xy} 、 F_{ec_x} の 3 次元グラフへのデータ点のプロットと、シミュレーションから求めた誤差補償式による近似曲面のプロットを図 1 4 に示す。

【0 0 7 6】

図 1 4 と図 1 0 を比較すると、センサ実機での計測値では、 R_x が増加した際のデータ点のプロット差異が見られるものの、 F_a と R_x が増加するほど F_{ec_x} が増加するという特性は一致しており、適用した誤差補償式によってデータ点が存在する近似曲面を求めることができた。なお、決定係数 R^2 は 0.985 であった。

【0 0 7 7】

(4-3-2) 荷重中心を y 軸上にて移動した場合

荷重センサ 2 0 において、荷重中心を y 軸正の方向へ 0 [mm] から 6 [mm] まで 3 [mm] ずつ移動した際の計測値に置ける F_a 、 R_y 、 F_{ec_y} の 3 次元グラフへのデータ点のプロットと、シミュレーションから求めた誤差補償式による近似曲面のプロットを図 1 5 に示す。

【0 0 7 8】

図 1 5 と図 1 1 を比較すると、データ点のプロットはシミュレーションによるものと曲面形状が類似しており、適用した補償式によってデータ点が存在する近似曲面を求めることができた。なお、決定係数 R^2 は 0.979 であった。

【0 0 7 9】

図 1 4 および図 1 5 において、誤差補償量の大きさがシミュレーションのものに比べ小

さい理由は、シミュレーションではゴムシリンダ12の形状を考慮せずバネとしていたためである。実モデルでは、ゴムシリンダ12は円柱であるため、不均一荷重によって電極板が傾いたとき、ゴムシリンダ12の中でも端の断面積が少ない部分に力が集中する。このため、シミュレーションに比べてゴムシリンダ12の伸縮量が大きくなり、必要とされる誤差補償量の大きさが小さくなっている。

【0080】

このように、実モデルでは、ゴムシリンダ12の形状特性によって、荷重計測における誤差補償量がシミュレーションに比べ小さく抑えられるという結果となっている。また、y軸正の方向へ荷重中心を移動した際の低荷重領域におけるシミュレーションとの特性の差異は、電極板の長さに依存するものであり、シミュレーションでは考慮されていない第2電極板11の初期歪みが原因である。

【0081】

そこで、第2電極板11の歪みによる影響を低減し計測精度を向上させるために、荷重中心をx軸正の方向へ移動した際の誤差補償を、移動区間を中間値で区切ったセンサ中心から6[mm]までと6[mm]以上に分けて、式(8)の係数パラメータを求め誤差補償式とすることとした。なお、決定定数 R^2 の最低値は0.946であった。

【0082】

誤差補償式を荷重中心のx座標に関して2区間で分割した後のほうが決定定数は低くなっているが、これは曲面近似に用いたデータ数の差によるものであり、計測誤差の観点では改善がみられた。荷重センサ20の荷重計測における計算コスト削減および計測精度向上のために、今後、電極板の初期歪みへの対策を行っていく必要がある。その1手法として、軽量かつ絶縁体であり、硬度の高いセラミック板を荷重センサ20の第1電極板10および第2電極板11の基材に使用する。

【0083】

(4-3-3) x軸y軸の両方向に同時に荷重中心が移動した場合

荷重センサ20において、x軸y軸ともに正方向のセンサの対角線上にて荷重中心を移動した際の計測値における F_a 、 R_{xy} 、 $F_{ec_{xy}}$ の3次元グラフへのデータ点をプロットし、シミュレーションから求めた残存誤差補償式による近似曲面のプロットを図16に示す。

【0084】

図16と図12を比較すると、データのプロットはシミュレーションによるものとその曲面形状が類似していることが確認された。しかし、近似曲面の決定係数 R^2 は0.258と低い結果となった。この原因としては、グラフ全体の $F_{ec_{xy}}$ の値が小さいため、センサの分解能に由来するデータ点のばらつきが大きな影響力を持っている。

【0085】

また、シミュレーションでは考慮されていない第2電極板11の初期歪みが存在する。そこで、荷重中心をx軸上にて移動した場合と同様に、荷重中心のx座標に関して、センサ中心から6[mm]までと6[mm]以上に分けて、式(10)の係数パラメータを求め残存誤差補償式とすることとした。その結果、決定係数 R^2 の最低値は0.524となり改善がみられた。

【0086】

(5) 荷重中心位置の導出

不均一荷重に対する荷重計測における誤差補償と同様に、荷重中心位置計測のためのキャリブレーションとして、荷重センサ20のセンサモデルによるシミュレーションからの荷重中心位置の算出式の導出およびセンサ実機への適用について述べる。

【0087】

(5-1) シミュレーションによる荷重中心算出式の導出

荷重センサ20は加えられた荷重とその荷重中心位置に応じて、計測される荷重分布が一意に定まるため、その総荷重 F_a 、x軸方向の分布荷重の比 R_x 、y軸方向の分布荷重の比 R_y についても同様に一意に定まる。このため、 F_a と R_x 、 R_y からの荷重中心位置

10

20

30

40

50

の算出が可能となる。シミュレーションによる荷重中心位置の算出式の導出は、上述の荷重計測の誤差補償式の導出において、誤差補償量を荷重中心位置に置き換えることで可能となる。

【0088】

(5-1-1) 荷重中心を x 軸上にて移動した場合

荷重センサ 20 において、荷重中心を x 軸正の方向へ 0 [mm] から 12 [mm] まで 1 [mm] ずつ移動した際の荷重中心位置の x 座標の算出について検討する。シミュレーションによって算出された F_a 、 R_x 、荷重中心位置の x 座標 COF_{mx} の 3 次元グラフへのデータ点のプロットを図 17 に示す。

【0089】

図 17 によれば、荷重とその印加位置に応じて F_a 、 R_x 、 COF_{mx} の関係は一意に定まることがわかる。よって、入力変数を F_a と R_x 、出力を COF_{mx} とした近似曲面が荷重中心の x 座標の算出式となる。ここで、 F_a の関数が単独で荷重中心位置に影響を及ぼすことはない。これらを踏まえて近似曲面を求めた結果、今回、印加した荷重に対する応答の範囲では、 F_a について 2 次、 R_x について 2 次の多項式である式 (12) によって高い近似性が確認された。なお、決定係数 R^2 は 1 であった。

【数 12】

$$COF_{mx}(F_a, R_x) = s_1 F_a^2 R_x^2 + s_2 F_a^2 R_x + s_3 F_a R_x^2 + s_4 F_a R_x + s_5 R_x^2 + s_6 R_x + s_7$$

…… (12)

【0090】

ここで、 s_n ($n=1 \sim 7$) は導出した誤差補償式の各項の係数であり、荷重中心を x 軸負の方向へ移動した場合には、これらのパラメータを別途求めることで同様に COF_{mx} が求まる。求めた近似曲面を図 17 に示す。なお、近似曲面は F_a について 1 次、 R_x について 1 次の多項式によっても比較的高い決定係数にて求めることが可能であるが、本発明では、より高精度な荷重中心位置の計測を実現するために、決定係数がより高い結果となった式 (12) を採用することとした。

【0091】

(5-1-2) 荷重中心を y 軸上にて移動した場合

荷重センサ 20 において、荷重中心を y 軸正の方向へ 0 [mm] から 6 [mm] まで 1 [mm] ずつ移動した際の荷重中心位置の y 座標の算出について検討する。この場合、 R_x の代わりに R_y を用いることで、x 軸正の方向の場合と同様に荷重中心位置の y 座標の算出式を求められる。

【0092】

シミュレーションによって算出された F_a 、 R_y 、荷重中心位置の y 座標の誤差補償量 COF_{my} の 3 次元グラフへのデータ点のプロットを図 18 に、求めた算出式を次式 (13) に示す。なお、算出式として求めた近似曲面の決定係数 R^2 は 0.999 であった。

【数 13】

$$COF_{my}(F_a, R_y) = t_1 F_a^2 R_y^2 + t_2 F_a^2 R_y + t_3 F_a R_y^2 + t_4 F_a R_y + t_5 R_y^2 + t_6 R_y + t_7$$

…… (13)

ここで、 t_n ($n=1 \sim 7$) は導出した誤差補償式の各項の係数であり、荷重中心を y

10

20

30

40

50

軸負の方向へ移動した場合には、これらのパラメータを別途求めることで同様に $COF_{m y}$ が求まる。求めた近似曲面を図 18 に示す。

【0093】

(5-1-3) x 軸 y 軸の両方向に同時に荷重中心が移動した場合

荷重センサ 20 において、x 軸と y 軸の両方向に同時に荷重が移動した場合として、x 軸 y 軸ともに正方向（第一象限）のセンサが対角線上にて荷重中心を移動した際の荷重中心位置の計測誤差とその補償について検討する。

【0094】

ここで、荷重中心位置の誤差量 $COF_{ec}(x, y) = COF_{true}(x, y) - COF_m(x, y)$ とする。また、これは x 軸と y 軸の両方向に同時に荷重中心が移動した場合に必要な補償であるため、x 軸方向と y 軸方向の分布荷重の比の代わりにそれらの積 R_{xy} を用いる。

【0095】

シミュレーションによって算出された F_a 、 R_{xy} 、荷重中心位置の x 座標の誤差補償量 $COF_{ec x}$ の 3 次元グラフへのデータ点のプロットを図 19 に、 F_a 、 R_{xy} 、荷重中心位置 y 座標の誤差補償量 $COF_{ec y}$ の 3 次元グラフへのデータ点のプロットを図 20 に示す。

【0096】

それぞれ近似曲面を求めた結果、 F_a について 2 次、 R_{xy} について 2 次の多項式 (14) および (15) によって高い近似性が確認された。なお、決定係数 R^2 はそれぞれ 0.994 と 0.971 であった。求めた多項式を次式 (14) および (15) に示す。

【数 14】

$$COF_{ec x}(F_a, R_{xy}) = u_1 F_a^2 R_{xy}^2 + u_2 F_a^2 R_{xy} + u_3 F_a R_{xy}^2 + u_4 F_a R_{xy} + u_5 R_{xy}^2 + u_6 R_{xy} + u_7$$

…… (14)

【数 15】

$$COF_{ec y}(F_a, R_{xy}) = v_1 F_a^2 R_{xy}^2 + v_2 F_a^2 R_{xy} + v_3 F_a R_{xy}^2 + v_4 F_a R_{xy} + v_5 R_{xy}^2 + v_6 R_{xy} + v_7$$

…… (15)

【0097】

ここで、 u_n 、 v_n ($n=1 \sim 7$) はそれぞれ導出した荷重中心位置の計測の誤差補償式の各項の係数であり、荷重中心の移動を第二象限から第四象限まで変えた場合についても、それぞれの場合に対してこれらのパラメータを別途求めることで同様に誤差補償式が求まる。求めた近似曲面をそれぞれ図 19 および図 20 に示す。以上により、荷重センサ 20 の荷重中心位置 $COF(x, y)$ の算出式は、次式 (16) となる。

【数 16】

$$COF_{(x,y)} = COF_{m(x,y)} + COF_{ec(x,y)}$$

…… (16)

【0098】

(5-2) センサ実機による荷重中心算出式の導出

(5-2-1) 荷重中心をx軸上にて移動した場合

荷重センサ20において、荷重中心をx軸正の方向へ0[mm]から12[mm]まで3[mm]ずつ移動した際の計測値における F_a 、 R_x 、 COF_{mx} の3次元グラフへのデータ点のプロットと、シミュレーションから求めた COF_{mx} 算出式による近似曲面のプロットを図21に示す。

【0099】

図21と図17を比較すると、データ点のプロットはシミュレーションによるものと類似しており、適用した算出式によってデータ点が存在する近似曲面を求めることができた。なお、決定係数 R^2 は0.998であった。

10

【0100】

(5-2-2) 荷重中心をy軸上にて移動した場合

荷重センサ20において、荷重中心をy軸正の方向へ0[mm]から6[mm]まで3[mm]ずつ移動した際の計測値における F_a 、 R_y 、 COF_{my} の3次元グラフへのデータ点のプロットとし、シミュレーションから求めた COF_{my} 算出式による近似曲面のプロットを図22に示す。

【0101】

図22と図18を比較すると、データ点のプロットはシミュレーションによるものと類似しており、適用した算出式によってデータ点が存在する近似曲面を求めることができた。なお、決定係数 R^2 は0.999であった。

20

【0102】

(5-2-3) x軸y軸の両方向に同時に荷重中心が移動した場合

荷重センサ20において、x軸y軸ともに正方向のセンサの対角線上にて荷重中心を移動した際の計測値における F_a 、 R_{xy} 、 $COF_{ec}(x,y)$ の3次元グラフへのデータ点のプロットとし、シミュレーションから求めた誤差補償式による近似曲面のプロットを図23および図24に示す。

【0103】

図23と図19、図24と図20を比較すると、データ点のプロットはシミュレーションによるものに対して差異が確認された。この原因は、シミュレーションで考慮されていない電極間の初期歪みがゴムシリンダ12のバネモデルとの差異であり、 $COF_{ec}(x,y)$ の値が小さいため、大きな差異として現れたことがわかる。

30

【0104】

なお、近似曲面の決定係数 R^2 はそれぞれ0.290と0.939であった。図23における近似曲面の決定係数は低いが、グラフ全体の COF_{ecx} の値が小さいため、センサの分解能に由来するデータ点のばらつきが大きな影響力を持っていることが原因である。これに対して、 COF_{ecx} に比べ大きな誤差補償量となった COF_{ecy} に対して、決定係数が高い近似曲面となったため、荷重中心位置の誤差補償式として有効である。

【0105】

(6) 計測性能評価実験

本発明による触力覚検知装置1について、実際に荷重センサ20における荷重と荷重中心位置の計測が可能であることを確認するために、荷重印加実験による各種計測精度の評価と連続計測データの応答確認を行った。

40

【0106】

(6-1) 実験方法

図13に示す29箇所に対して、荷重印加装置を用いて荷重の印加を行い、今回キャリブレーションと誤差補償を行った荷重印加から1秒後の計測値を用いて、荷重センサ20の計測精度の評価を行う。なお、荷重は0～596.7[g]までを荷重印加装置の荷重の受け皿の重さである96.7g以降は100gずつ分銅を用いて加えるものとし、各位置・荷重ごとに荷重印加を5試行実施した。

【0107】

50

荷重センサ 20 上の $(x,y) = (12,6)$ mm に荷重の計測範囲のおおよそ中間値である 2.91[N] の荷重を 10 秒間印加した際の各種計測値の連続データをグラフプロットし、その計測データの応答を確認する。

【0108】

(6-2) 実験結果

荷重センサ 20 による荷重の計測結果を図 25 (A) および (B) に示す。図 25 (A) は計測値の標本平均、図 25 (B) は計測誤差の標本平均である。実験結果より、本実施の形態における荷重センサ 20 は、誤差の標本平均が ± 0.030 [N] の範囲内にあることを確認した。なお、標準偏差の最大値は 0.051 [N] であった。

【0109】

続いて、荷重中心位置の x 座標 COF_x 、 y 座標 COF_y それぞれの計測結果を図 26 および図 27 に示す。図 26 によれば、 x 座標の計測誤差の標本平均が ± 0.11 [mm] の範囲内にあることを確認した。なお、最大標準偏差は 0.27 [mm] であった。図 27 によれば、 y 座標の計測誤差の標本平均が ± 0.12 [mm] の範囲内にあることを確認した。なお、最大標準偏差は 0.29 [mm] であった。

【0110】

荷重センサ 20 の $(x,y) = (12,6)$ [mm] に 2.91 [N] の荷重を 10 秒間印加した際の各種計測値の連続データを図 28 (A) ~ (C) に示す。なお、荷重中心位置については、低荷重領域において荷重分布における計測荷重誤差の影響が大きく現れるため、0.196 [N] (= 20 [g]) 以下をフィルタリングしている。図 28 (A) ~ (C) により、計測された荷重と荷重中心位置のそれぞれの応答が印加した荷重と荷重中心位置に対応していることを確認した。

【0111】

(7) 本実施の形態による触力覚検知装置 1 の動作および効果

以上の構成において、触力覚検知装置 1 では、複数の正極が同一平面上かつアレイ状に配置された第 1 電極板 10 と単一の負極が配置された第 2 電極板 11 との間に当該正極と同数の粘弾性体からなる所定形状のシリンダをそれぞれ介挿して複数のコンデンサを形成する静電容量式の荷重センサ 20 と、荷重センサ 20 の第 2 電極板 11 に加えられる外力に応じて変化する各コンデンサの静電容量を検出する静電容量検出部 30 と、静電容量検出部 30 により検出された各コンデンサの静電容量の変化量に基づいて、それぞれゴムシリンダ 12 に加わる荷重の分布を表す分布荷重を計測する分布荷重計測部 31 と、分布荷重計測部 31 により計測された分布荷重に対する各ゴムシリンダ 12 の伸縮量および当該分布荷重のパターンの関係性に基づいて、荷重センサ 20 の第 2 電極板 11 に加えられる外力の総荷重および荷重中心位置を算出する荷重情報算出部 32 とを備えるようにした。

【0112】

この結果、荷重センサ 20 の第 2 電極板 11 に加えられる外力の総荷重および荷重中心位置に応じて、各ゴムシリンダ 12 に加わる分布荷重が一意に定まることにより、当該第 2 電極板 11 に作用する荷重の面積によらず、外部から加えられた荷重の大きさを正確に計測することができる。

【0113】

このように本実施の形態による触力覚検知装置 1 では、上述したセンサ実機による計測精度評価実験より、必要とする荷重計測範囲において、荷重センサ 20 が荷重と荷重中心を実際に計測できることを確認した。ここで、荷重中心の計測に着目すると、人の指表面における刺激位置に対する解像度は 1.6 [mm] 程度であり、本実施の形態による荷重センサ 20 はこれと同等以上の計測精度であることを確認できた。

【0114】

また印加荷重に対する静電容量の増加量については、ゴムシリンダ 12 に用いたシリコンゴムの硬度が低くなるほど大きくなる。このため、より高い計測精度を必要とする場合には、より硬度の低いシリコンゴムを用いることで、分解能の調整および向上が可能となる。

10

20

30

40

50

【0115】

また触力覚検知装置1では、静電容量検出部30は、各コンデンサについて、荷重印加時から所定時間経過後までの静電容量の増加量に基づいて、対応するゴムシリンダ12の材料特性に応じた当該ゴムシリンダ12に加わる荷重の計測誤差および当該ゴムシリンダ12の硬度に応じた応答遅れをキャリブレーション補正するようにした。

【0116】

この結果、粘弾性体であるゴムシリンダ12は、瞬間的な弾性変形後に生じる緩やかな粘性変形に起因して応答遅れが生じるため、硬度の低さに比例して応答遅れが大きくなるとともに、硬度が低くなるほど荷重に対するゴムシリンダ12の伸縮量が増加し、第1電極板10および第2電極板11間の距離が近くなることにより、第1電極板10および第2電極板11間際の距離と反比例の関係にある静電容量が大きくなるため、硬度の低さに比例して静電容量の増加量が大きくなるが、このような材料特性に基づく要因を解消することができる。

10

【0117】

実際に各種計測データの応答確認では、計測荷重には応答遅れが確認されたが、計測された荷重中心位置では応答遅れに改善が確認された。これは、荷重中心の算出式において、荷重分割比の成分が大きな影響力を持っており、各チャンネルの計測荷重の分力から算出される荷重分割比では応答遅れの影響が打ち消し合うからである。

【0118】

また、ゴムシリンダ12に用いたシリコンゴムの硬度が高いほど、センサ出力の応答性が高くなることを確認した。このため、荷重計測についても応答性を重視する場合には、より硬度の高いシリコンゴムを用いることで、より応答性の高い荷重計測が可能となると言い得る。センサの分解能と応答性はトレードオフの関係にあるが、ゴムシリンダ12の直径や高さを小さくすることで、硬度の高いシリコンゴムを用いた場合でも荷重印加による静電容量の増加量を大きくできるため、分解能と応答性の向上の両立が可能となる。

20

【0119】

さらに触力覚検知装置1では、荷重情報算出部32は、荷重センサ20の第2電極板11に加えられる外力の総荷重と、第1電極板10を平面とするx軸方向の分布荷重の比と、当該第1電極板10を平面とするy軸方向の分布荷重の比とに基づいて、荷重中心位置が第2電極板11の中心外となる不均一荷重に対する誤差補償量を算出し、当該誤差補償量に基づいて荷重中心位置をキャリブレーション補正するようにした。

30

【0120】

この結果、荷重中心位置が第2電極板11の中心外となる不均一荷重に対しても、シミュレーションにより誤差補償量を算出して、各第1電極板10のサイズ誤差の補正と同時に荷重中心位置をキャリブレーション補正することが可能となる。

【0121】

さらに触力覚検知装置1では、荷重センサ20は、非導電性材からなるシールド材を用いて全体が被覆されている。この結果、センサ自体と他誘電体とのコンデンサ形成を未然に防いで外来ノイズを除去することが可能となる。

【0122】

40

(8) 他の実施の形態

なお本実施の形態においては、触力覚検知装置1における荷重センサ20を、4個の正極が同一平面上かつアレイ状に配置された第1電極板10と単一の負極が配置された第2電極板11との間に当該正極と同数のゴムシリンダ12をそれぞれ介挿して4個のコンデンサを形成する静電容量式のものを構成するようにした場合について述べたが、本発明はこれに限らず、第1電極板10の数は4個以外にも複数配置するようにしてもよい。

【0123】

また本実施の形態においては、第1電極板10および第2電極板11間に介挿する粘弾性体からなるシリンダとして、シリコンゴムを材料とするゴムシリンダ12を適用した場合について述べたが、本発明はこれに限らず、耐候性、耐熱性、耐寒性に優れるとともに

50

、荷重センサ 20 のセンサ出力の応答性が所定レベル以上確保可能な硬度があれば、シリコンゴム以外の材料のものを適用してもよい。ゴムシリンダ 12 以外にもセンサ分解能および応答性の向上の両立が可能であれば、種々の材料のものに広く適用するようにしてもよい。

【0124】

さらに本実施の形態における触力覚検知装置 1 を、荷重センサ 20 の第 2 電極板 11 が物体を把持する指先の把持面となるように、当該指先に組み込むようにしてロボットアームを構成するようにしてもよい。荷重センサ 20 を、ロボットアームの指部への組込みを想定してサイズを設計して、ゴムシリンダ 12 の硬度や形状を調整することにより、分解能と応答性の調整も実現可能であり、人の生活を支援するロボットの触覚としての活用が期待される。また、このロボットアームでは、物体を把持する際に、指先の接触圧および接触位置を正確に認識することが可能となる。

【符号の説明】

【0125】

1…触力覚検知装置、10…第 1 電極板、11…第 2 電極板、12…ゴムシリンダ、20…荷重センサ、30…静電容量検出部、31…分布荷重計測部、32…荷重情報算出部、40…荷重印加装置、41…受け皿、42…能動リンク機構部、43…外殻ガイド、44…センサカバー。

10

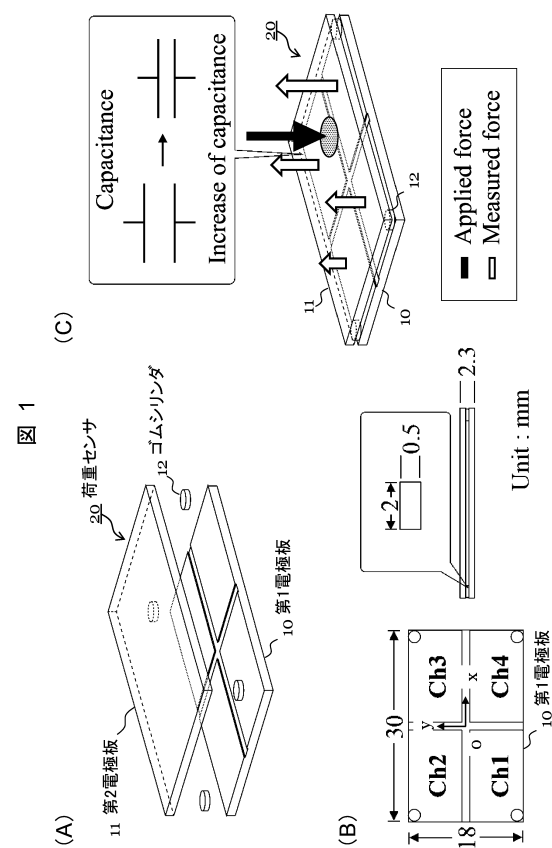
20

30

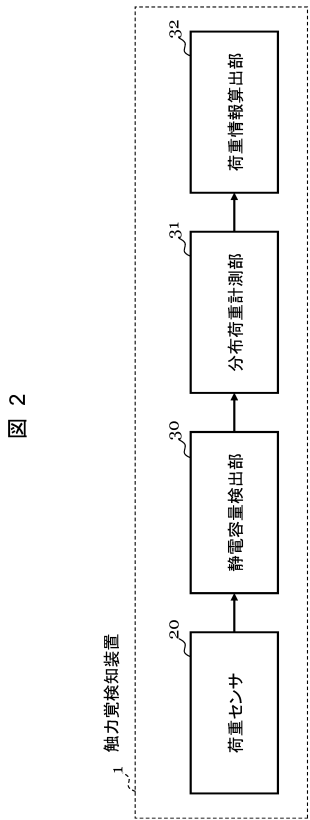
40

50

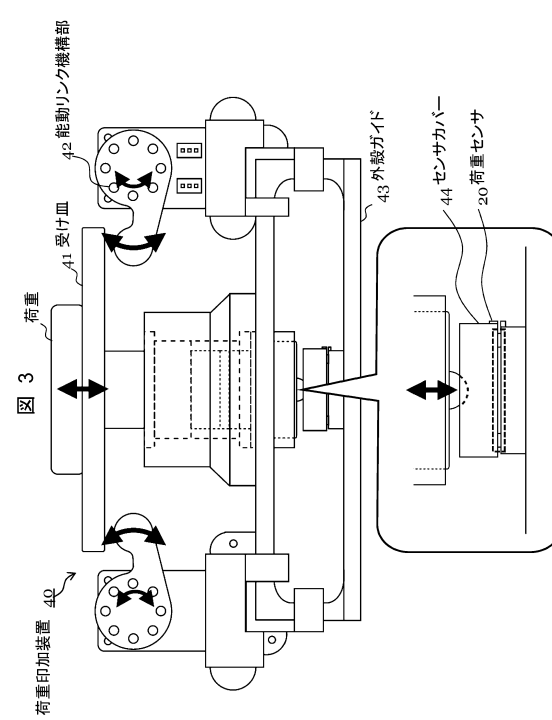
【図面】
【図 1】



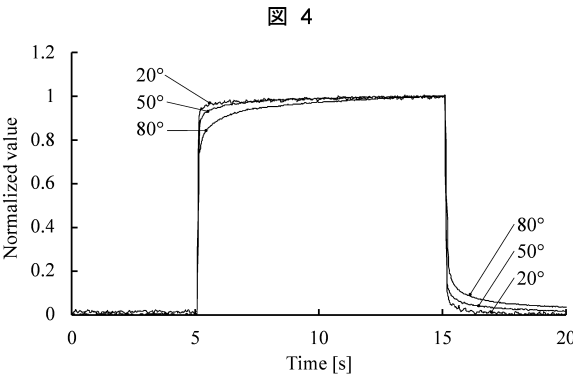
【図 2】



【図 3】



【図 4】



10

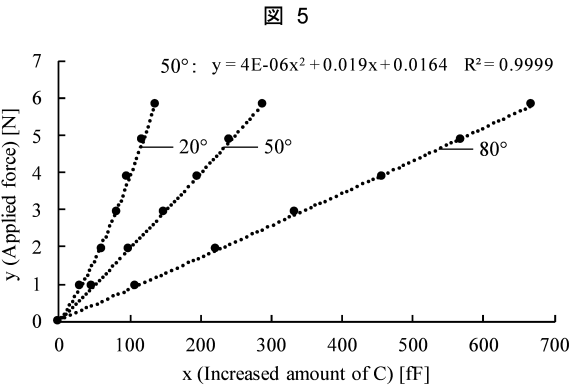
20

30

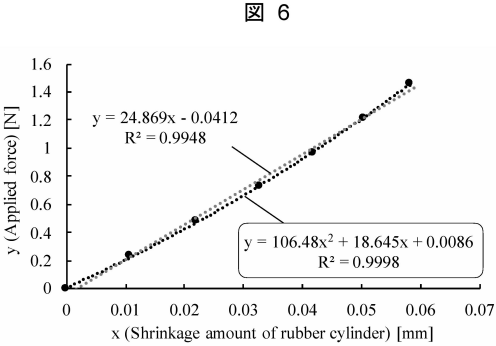
40

50

【図 5】

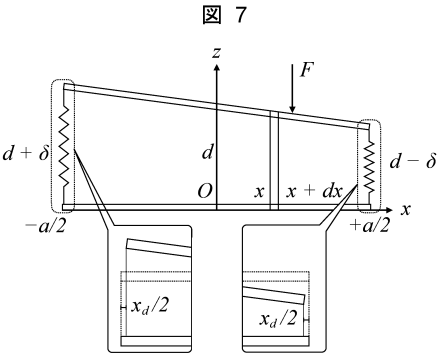


【図 6】

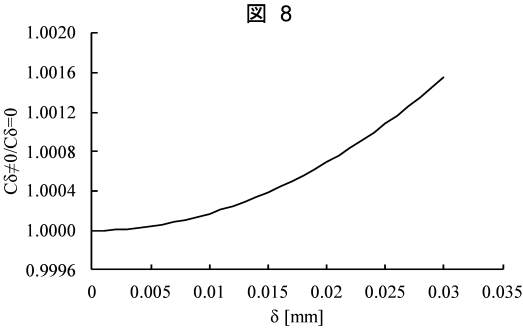


10

【図 7】



【図 8】



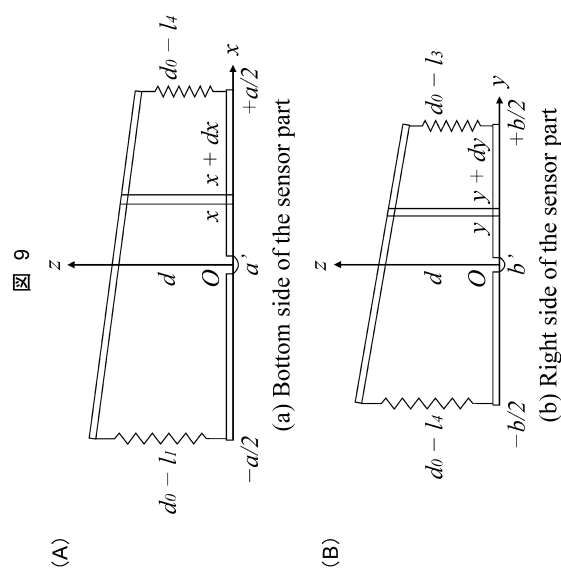
20

30

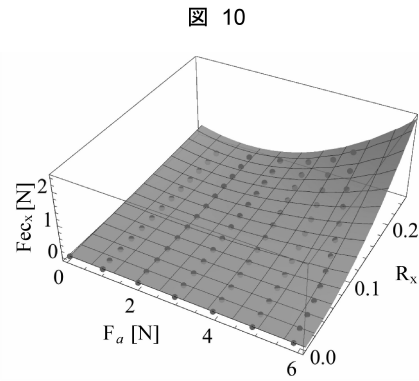
40

50

【図 9】



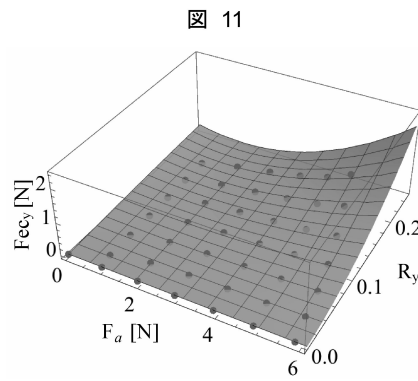
【図 10】



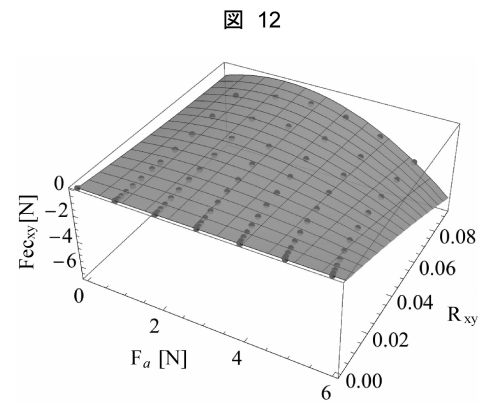
10

20

【図 11】



【図 12】

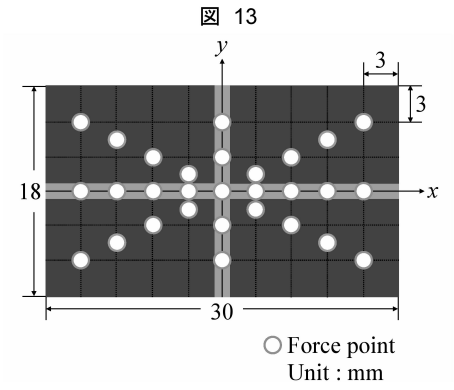


30

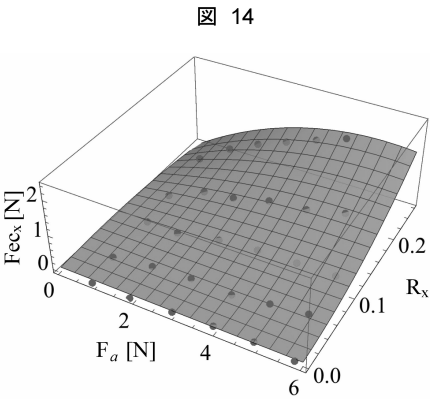
40

50

【図 1 3】

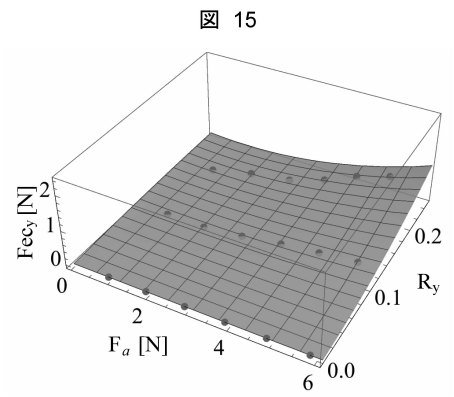


【図 1 4】

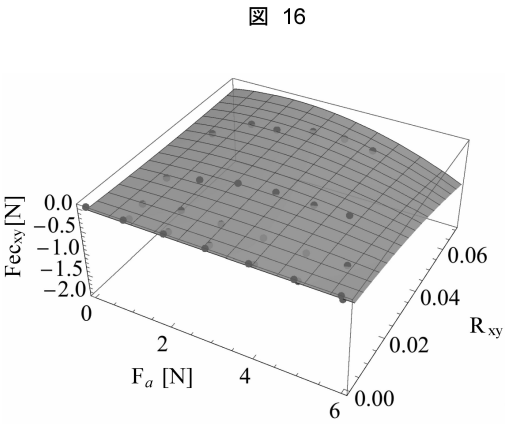


10

【図 1 5】



【図 1 6】



20

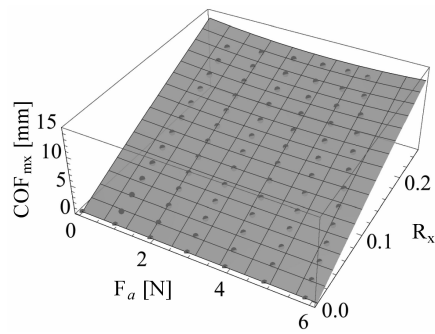
30

40

50

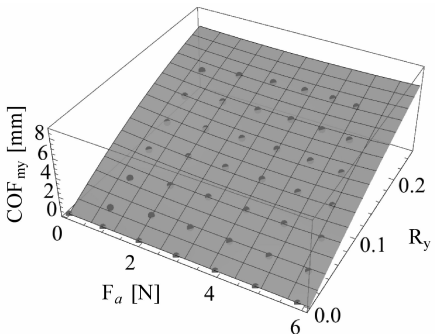
【図 17】

図 17



【図 18】

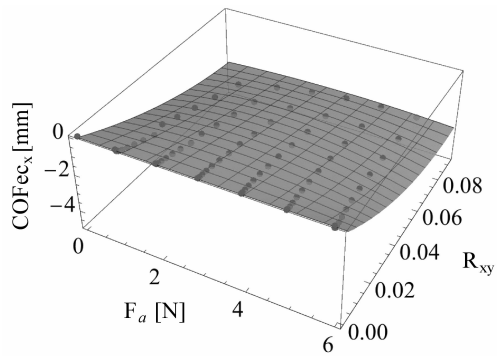
図 18



10

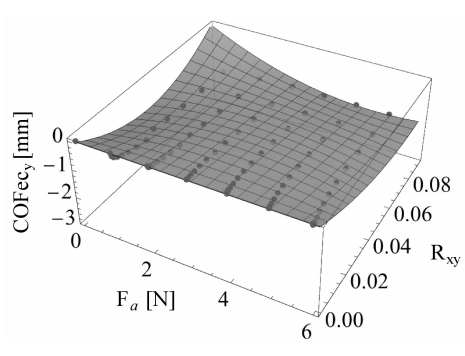
【図 19】

図 19



【図 20】

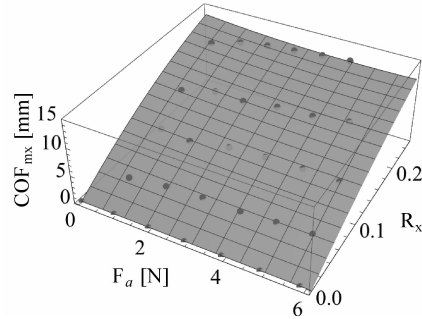
図 20



20

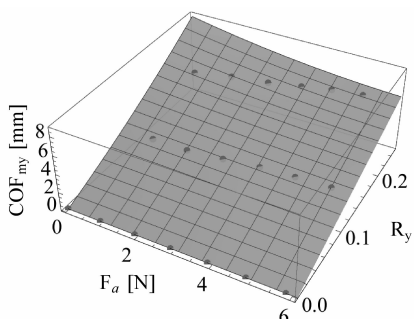
【図 21】

図 21



【図 22】

図 22

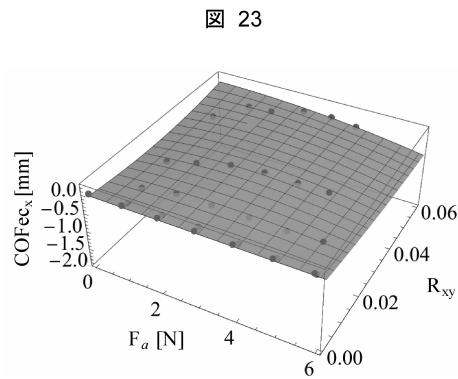


30

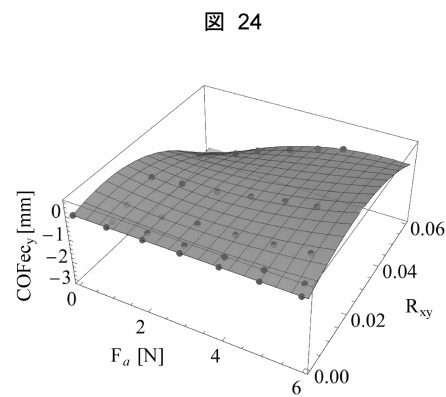
40

50

【図 2 3】



【図 2 4】

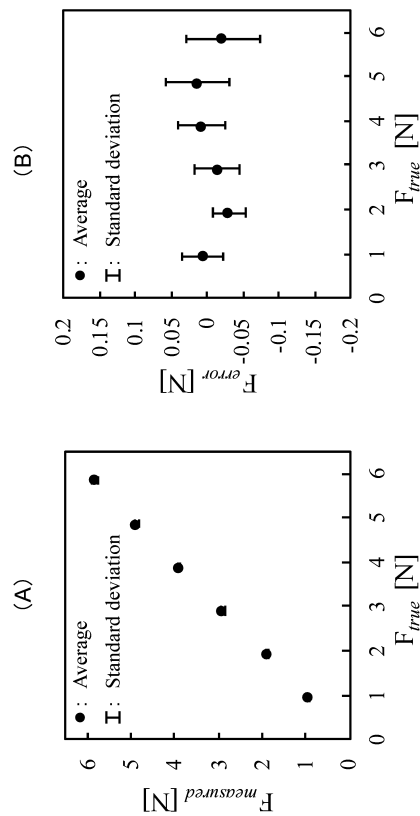


10

20

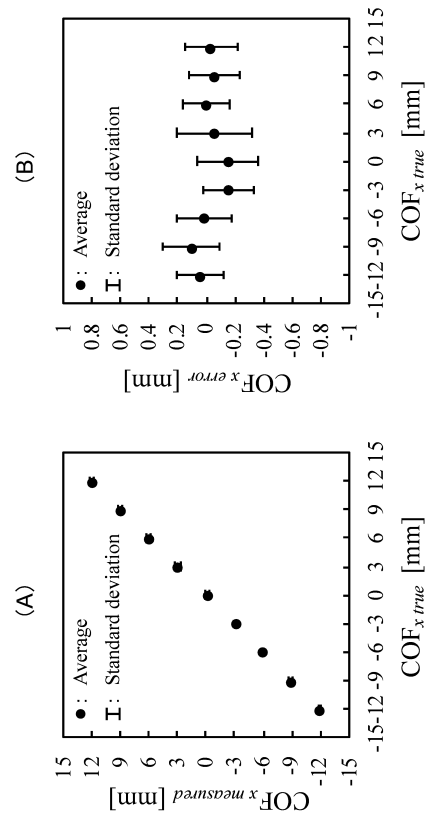
【図 2 5】

図 25



【図 2 6】

図 26



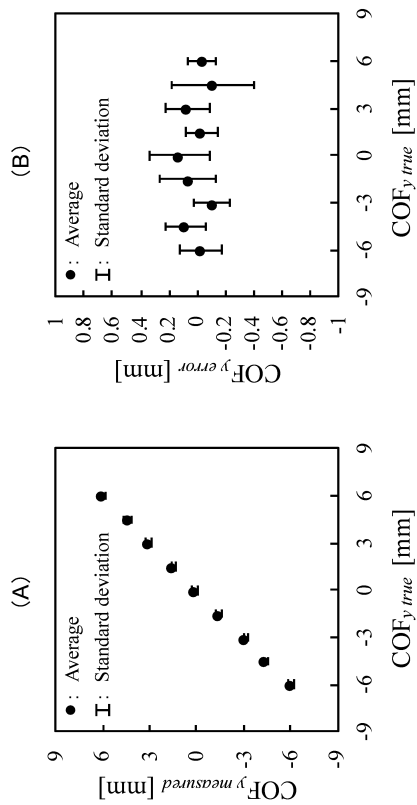
30

40

50

【図 27】

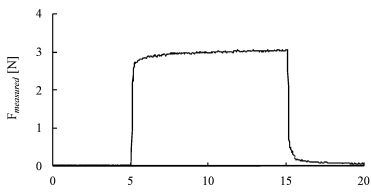
図 27



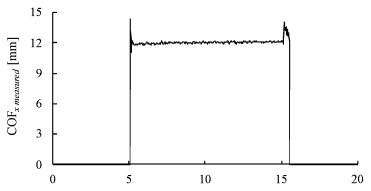
【図 28】

図 28

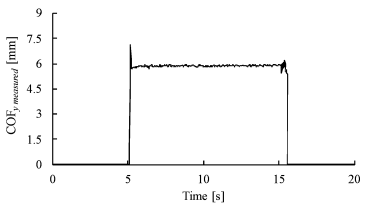
(A)



(B)



(C)



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2009-069028 (JP, A)
特開平05-288619 (JP, A)
特表2013-522588 (JP, A)
特開2017-168107 (JP, A)
特開2018-190278 (JP, A)
特表2018-510427 (JP, A)
米国特許出願公開第2016/0128610 (US, A1)
米国特許出願公開第2018/0067600 (US, A1)
国際公開第2014/068269 (WO, A1)
韓国公開特許第10-2017-0061592 (KR, A)
米国特許出願公開第2017/0066136 (US, A1)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
G01L 5/00, 1/14,
A61B 5/107-5/113,
G06F 3/041, 3/044