

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6685568号
(P6685568)

(45) 発行日 令和2年4月22日 (2020.4.22)

(24) 登録日 令和2年4月3日 (2020.4.3)

(51) Int. Cl.

F I

GO 1 L 5/16 (2020.01)
 GO 1 L 1/14 (2006.01)
 GO 1 L 3/10 (2006.01)
 GO 1 L 3/14 (2006.01)
 GO 1 L 25/00 (2006.01)

GO 1 L 5/16
 GO 1 L 1/14 J
 GO 1 L 3/10 3 1 5
 GO 1 L 3/14 L
 GO 1 L 25/00 A

請求項の数 3 (全 41 頁)

(21) 出願番号 特願2019-117416 (P2019-117416)
 (22) 出願日 令和1年6月25日 (2019.6.25)
 (62) 分割の表示 特願2019-30866 (P2019-30866)
 の分割
 原出願日 平成29年3月6日 (2017.3.6)
 (65) 公開番号 特開2019-179039 (P2019-179039A)
 (43) 公開日 令和1年10月17日 (2019.10.17)
 審査請求日 令和2年2月12日 (2020.2.12)

(73) 特許権者 511071234
 株式会社トライフォース・マネジメント
 埼玉県上尾市菅谷4丁目27番地
 (74) 代理人 100091982
 弁理士 永井 浩之
 (74) 代理人 100091487
 弁理士 中村 行孝
 (74) 代理人 100105153
 弁理士 朝倉 悟
 (74) 代理人 100103263
 弁理士 川崎 康
 (72) 発明者 岡田 和廣
 埼玉県上尾市菅谷4丁目27番地 株式会
 社トライフォース・マネジメント内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 力覚センサ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

X Y Z 三次元座標系における各軸方向の力及び各軸まわりのモーメントのうち少なくとも1つを検出する力覚センサであって、

X Y Z 三次元座標系に対して固定された円環状の固定体、および力ないしモーメントの作用により前記固定体に対して相対移動する円環状の受力体のうちいずれか一方の構成要素と、

前記一方の構成要素を取り囲むと共に当該構成要素に接続され、力ないしモーメントの作用により弾性変形を生じる変形部を含む変形体と、

前記変形体を取り囲むと共に当該変形体に接続され、前記固定体および前記受力体のうち他方の構成要素と、

前記変形体に生じる弾性変形に基づいて、前記受力体に作用した力ないしモーメントを示す電気信号を出力する検出回路と、を備え、

前記固定体、前記変形体及び前記受力体は、互いに同心であるように配置され、

前記変形体は、前記固定体に接続された2つの固定部と、前記受力体に接続され、当該変形体の周方向において前記固定部と交互に位置付けられた2つの受力部と、隣接する前記固定部と前記受力部との間に位置付けられた4つの変形部と、を有し、

前記検出回路は、前記変形部に設けられた少なくとも1つの電極を含む変位電極と、

前記固定体或いは前記受力体に設けられ、前記変位電極に対向するとともに少なくとも1つの電極を有する固定電極とを有し、

10

20

前記変位電極と前記固定電極のいずれか一方は少なくとも２つの電極を有することを特徴とする力覚センサ。

【請求項２】

前記変位電極が少なくとも２つの電極を有する場合、前記変位電極の一の電極と、前記固定電極の電極とにより第１の容量素子が構成され、前記変位電極の他の電極と、前記固定電極の電極とにより第２の容量素子が構成され、

前記固定電極が少なくとも２つの電極を有する場合、前記固定電極の一の電極と、前記変位電極の電極とにより第１の容量素子が構成され、前記固定電極の他の電極と、前記変位電極の電極とにより第２の容量素子が構成され、

前記受力体に作用した力ないしモーメントによって、第１の容量素子が第１電気信号を出力し、第２の容量素子が第２電気信号を出力し、

第１電気信号と第２電気信号の変化に基づいて、前記力覚センサが正常に機能しているか否かを判断することを特徴とする請求項１に記載の力覚センサ

【請求項３】

前記変形部はその両端に配置される前記固定部と前記受力部の中心を結ぶ直線に対して湾曲する湾曲部を有し、

前記変形体の前記固定部、前記受力部、前記湾曲部は同一材料により一体に形成されている、

ことを特徴とする請求項１または２に記載の力覚センサ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

本発明は、力覚センサに関し、特に、所定の軸方向に作用した力及び所定の回転軸まわりに作用したモーメント（トルク）を電気信号として出力する機能をもったセンサに関する。

【背景技術】

【０００２】

所定の軸方向に沿って作用した力及び所定の回転軸まわりに作用したモーメントを電気信号として出力する機能をもった力覚センサが、例えば特許文献１に記載されており、産業用ロボットの力制御に広く利用されている。近年では、生活支援ロボットへも採用されている。力覚センサの市場が拡大するにつれて、力覚センサの低価格化及び高性能化が一層求められるようになった。

【０００３】

ところで、力覚センサとしては、容量素子の静電容量値の変動量に基づいて力ないしモーメントを検出する静電容量タイプの力覚センサや、歪ゲージの電気抵抗値の変動量に基づいて力ないしモーメントを検出する歪ゲージタイプの力覚センサが利用されている。このうち、歪ゲージタイプの力覚センサは、起歪体（弾性体）の構造が複雑であり、また、その製造工程において起歪体に歪ゲージを貼付するという工程が必要である。このように歪ゲージタイプの力覚センサは、製造コストがかかるため、低価格化が困難である。

【０００４】

これに対し、静電容量タイプの力覚センサは、１組の平行平板（容量素子）によって作用した力ないしモーメントを計測することができるため、容量素子を含む起歪体の構造を簡素化することができる。すなわち、静電容量タイプの力覚センサは、相対的に製造コストがかからないため、低価格化が容易である、というメリットを有する。したがって、容量素子を含む起歪体の構造を更に簡素化すれば、静電容量タイプの力覚センサにおいて、一層の低価格化を実現することができる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００５】

【特許文献１】特開２００４－３５４０４９号公報 本発明は、以上のような事情に鑑み

10

20

30

40

50

て創案されたものである。すなわち、本発明の目的は、容量素子を含む起歪体の構造を簡素化することにより、従来よりも安価な静電容量タイプの力覚センサを提供することである。

【発明の開示】

【0006】

本発明による力覚センサは、XYZ三次元座標系における各軸方向の力及び各軸まわりのモーメントのうち少なくとも1つを検出するものであって、

Z軸方向から見て原点Oを取り囲むように配置され、力ないしモーメントの作用によって弾性変形を生じる環状の変形体と、

前記変形体に生じる弾性変形に基づいて、作用した力ないしモーメントを示す電気信号を出力する検出回路と、を備え、

前記変形体は、XYZ三次元座標系に対して固定された2つの固定部と、当該変形体の周方向において前記固定部と交互に位置付けられ、力ないしモーメントの作用を受ける、2つの受力部と、当該変形体の周方向において隣接する前記固定部と前記受力部との間に位置付けられた4つの変形部と、を有し、

各変形部は、Z軸方向に膨出した湾曲部を有し、

前記検出回路は、前記湾曲部に生じる弾性変形に基づいて、前記電気信号を出力するようになっている。

【0007】

本発明によれば、Z軸方向に膨出した湾曲部を有する簡素な変形体によって、検出部位において、作用した力ないしモーメントに対応する変位をZ軸方向に生じさせることができる。このため、容量素子を構成する一対の電極をXY平面と平行に配置することができる。容量素子を構成することが容易である。つまり、従来の静電容量タイプの力覚センサでは、作用した力ないしモーメントに対応する変位がZ軸と直交する方向に生じていたため、固定体の上面にZ軸方向に延在する支持体を設けた上で、この支持体に対して他方の電極（固定電極）を設置しなければならず、構造がやや複雑であった。このような従来の電極の配置例に鑑みると、本発明の効果がより良く理解され得る。本発明によれば、以上のような簡素な構造が採用されていることにより、従来よりも安価な静電容量タイプの力覚センサを提供することができる。とりわけ、複数の容量素子を有する力覚センサにおいて、各一対の電極のうち固定電極（湾曲部に配置される変位電極に対向する電極）を、共通の基板を用いて構成することができる。更には、固定電極を、複数の容量素子に対応する共通の電極として構成することも可能である。

【0008】

このような力覚センサは、XYZ三次元座標系に対して固定された固定体と、

力ないしモーメントの作用によって、前記固定部に対して相対移動する受力体と、を更に備え、

前記変形体の前記固定部は、前記固定体に接続され、

前記変形体の前記受力部は、前記受力体に接続されている

というように構成されていても良い。

【0009】

この場合、変形体に対して力ないしモーメントを作用させることが容易である。

【0010】

前記固定体及び前記受力体には、Z軸が挿通する貫通孔がそれぞれ形成されていて良い。この場合、力覚センサを軽量化することができ、更に、力覚センサの設置の自由度を高めることもできる。

【0011】

前記2つの固定部は、Z軸方向から見て、前記変形体がX軸と重なる部位にY軸に関して対称的に配置されており、

前記2つの受力部は、Z軸方向から見て、前記変形体がY軸と重なる部位にX軸に関して対称的に配置されていて良い。

【 0 0 1 2 】

この場合、作用する力ないしモーメントを変形体に効果的に伝達することができる。

【 0 0 1 3 】

前記変形体は、Z軸方向から見て、原点Oを中心とする円環の形状を有して良い。

【 0 0 1 4 】

あるいは、前記変形体は、Z軸方向から見て、原点Oを中心とする矩形の形状を有して良い。

【 0 0 1 5 】

これらの場合、変形体がX軸及びY軸に関して対称的に配置されるため、作用した力ないしモーメントに起因して、変形体が対称的に変形する。このため、当該変形に基づいて作用した力ないしモーメントを計測することが、容易である。

【 0 0 1 6 】

前記変形体の各湾曲部は、Z軸負方向に膨出しており、

前記検出回路は、各湾曲部に1つずつ配置された合計4つの変位電極と、これらの変位電極に対向配置され、前記固定部に固定された固定電極と、を有し、

各変位電極と前記固定電極とは、4組の容量素子を構成し、

前記検出回路は、前記4組の容量素子の静電容量値の変動量に基づいて、作用した力ないしモーメントを示す電気信号を出力するようになっていて良い。

【 0 0 1 7 】

この場合、個々の容量素子の静電容量値の変動の組合せに着目することによって、XYZ三次元座標系における各軸方向の力及び各軸まわりのモーメントの合計6つの成分のうち、複数の成分を検出することができる。

【 0 0 1 8 】

XY平面上に、原点Oを通りX軸およびY軸に対して45°をなすV軸およびW軸を定義した場合に、前記4組の容量素子は、Z軸方向から見て前記変形体がV軸及びW軸と交わる4つの部位に、1つずつ配置されていて良い。

【 0 0 1 9 】

この場合、容量素子がX軸及びY軸に関して対称的に配置されるため、特にX軸及びY軸に関して対称的な形状の変形体を作用した場合に、高い対称性をもって、各容量素子の静電容量値が変動する。このため、静電容量値の変動量に基づいて、作用した力ないしモーメントを極めて容易に計測することができる。

【 0 0 2 0 】

このような力覚センサにおいて、前記変形体の各湾曲部には、各1つの変形体側支持体が接続されており、

前記4つの変位電極は、それぞれ、対応する前記変形体側支持体によって支持されていて良い。

【 0 0 2 1 】

仮に変位電極が直接的に湾曲部に貼り付けられていれば、当該変位電極には、湾曲部の変形の影響によって反りが生じてしまうが、以上のような構成を採用すれば、変位電極に反りを生じさせることがないため、湾曲部に生じる弾性変形を効率的に容量素子の静電容量値の変動に変換することができる。

【 0 0 2 2 】

以上の力覚センサは、前記変形体の各湾曲部には、最もZ軸負側に位置する部位にそれぞれ検出部位が規定されており、

前記変形体側支持体は、それぞれ、Z軸方向から見て、当該変形体側支持体が接続された前記湾曲部の前記検出部位に重なるように配置された梁と、この梁の一端を前記検出部位とは異なる位置において前記湾曲部に接続する接続体と、を有し、

前記変位電極は、それぞれ、対応する前記変形体側支持体の前記梁によって支持されている

10

20

30

40

50

というように構成されていても良い。

【0023】

この場合、梁が検出部位とは異なる位置において湾曲部に接続されているため、この梁によって支持された変位電極に生じる変位が増幅される。すなわち、ある大きさの力ないしモーメントが作用した場合に、このような力覚センサにおいて変位電極に生じる変位は、湾曲部の検出部位において変位電極が支持されている力覚センサにおいて当該変位電極に生じる変位よりも、大きい。このため、作用した力ないしモーメントに対する感度が高く、より精度の高い計測を行うことができる。

【0024】

あるいは、次のような構成により、単一の力覚センサによって故障診断を行うことができる力覚センサを提供することができる。すなわち、前記変形体の各湾曲部は、Z軸負方向に膨出しており、

10

前記検出回路は、各湾曲部に2つずつ配置された合計8つの変位電極と、これらの変位電極に対向配置され、前記固定部に固定された固定電極と、を有し、

前記変位電極と前記固定電極とは、8組の容量素子を構成し、

前記検出回路は、

前記変形体の各湾曲部に2つずつ配置された容量素子から各1つを選択した合計4つの容量素子の静電容量値の変動量に基づいて、作用した力ないしモーメントを示す第1電気信号を出力し、且つ、残りの各1つを選択した合計4つの容量素子の静電容量値の変動量に基づいて、作用した力ないしモーメントを示す第2電気信号を出力し、

20

前記第1電気信号及び前記第2電気信号に基づいて、前記力覚センサが正常に機能しているか否かを判定するようになっている。

【0025】

このような力覚センサでは、前記検出回路は、前記第1電気信号と前記第2電気信号との差に基づいて、前記力覚センサが正常に機能しているか否かを判定するようになっている。この場合、作用した力ないしモーメントを検出することができ、且つ、故障診断を行うことができる力覚センサを提供することができる。

【0026】

あるいは、各湾曲部は、Z軸負方向に膨出しており、第1バネ定数を有する第1湾曲部と前記第1バネ定数とは異なる第2バネ定数を有する第2湾曲部とが前記変形体の周方向に接続されて構成されており、

30

前記検出回路は、前記第1湾曲部及び前記第2湾曲部に1つずつ配置された合計8つの変位電極と、これらの変位電極に対向配置され、前記固定部に固定された固定電極と、を有し、

各変位電極と前記固定電極とは、8組の容量素子を構成し、

前記検出回路は、

前記第1湾曲部に配置された4つの容量素子の静電容量値の変動量に基づいて、作用した力ないしモーメントを示す第1電気信号を出力し、且つ、前記第2湾曲部に配置された4つの容量素子の静電容量値の変動量に基づいて、作用した力ないしモーメントを示す第2電気信号を出力し、

40

前記第1電気信号と前記第2電気信号との比率の変化に基づいて、前記力覚センサが正常に機能しているか否かを判定するようになっている。良い。

【0027】

具体的には、前記検出回路は、

前記力覚センサが正常に機能している状態における前記第1電気信号と前記第2電気信号との比率を基準比率として記憶しており、

前記第1電気信号と前記第2電気信号との比率と、前記基準比率と、の差、に基づいて前記力覚センサが正常に機能しているか否かを判定するようになっている。良い。

【0028】

この場合、作用した力ないしモーメントを検出することができ、且つ、変形体に発現し

50

た金属疲労による故障をも診断可能な力覚センサを提供することができる。より詳細な故障診断の原理については、後述される。

【0029】

以上の8つの容量素子を有する力覚センサにおいては、XY平面上に、原点Oを通りX軸およびY軸に対して 45° をなすV軸およびW軸を定義した場合に、

XY平面の第1象限に配置された2つの前記変位電極は、正のV軸に関して対称的に配置されており、

XY平面の第2象限に配置された2つの前記変位電極は、正のW軸に関して対称的に配置されており、

XY平面の第3象限に配置された2つの前記変位電極は、負のV軸に関して対称的に配置されており、

XY平面の第4象限に配置された2つの前記変位電極は、負のW軸に関して対称的に配置されており、

【0030】

この場合、8つの容量素子がX、Y、V、Wの各軸に関して対称的に配置されるため、作用した力ないしモーメントによって各容量素子に生じる静電容量値の変動量も対称的となる。このため、作用した力ないしモーメントの計測が容易である。

【0031】

あるいは、本発明は、XYZ三次元座標系における各軸方向の力及び各軸まわりのモーメントのうち少なくとも1つを検出する力覚センサであって、

XYZ三次元座標系に対して固定された円形の固定体と、

前記固定体を取り囲むと共に当該固定体に接続され、力ないしモーメントの作用により弾性変形を生じる円環状の変形体と、

前記変形体を取り囲むと共に当該変形体に接続され、力ないしモーメントの作用により前記固定体に対して相対移動する円環状の受力体と、

前記変形体に生じる弾性変形に基づいて、前記受力体に作用した力ないしモーメントを示す電気信号を出力する検出回路と、を備え、

前記固定体、前記変形体及び前記受力体は、互いに同心であるように配置され、

前記受力体のZ軸正側の端面のZ座標値は、前記変形体のZ軸正側の端面のZ座標値よりも大きく、

前記固定体のZ軸負側の端面のZ座標値は、前記変形体のZ軸負側の端面のZ座標値よりも小さく、

前記変形体は、前記固定体に接続された2つの固定部と、前記受力体に接続され、当該変形体の周方向において前記固定部と交互に位置付けられた2つの受力部と、隣接する前記固定部と前記受力部との間に位置付けられた4つの変形部と、を有している。

【0032】

本発明の力覚センサによれば、容量素子を含む起歪体の構造を簡素化することにより、従来よりも安価な静電容量タイプの力覚センサを提供することである。更に、このような力覚センサは、ロボットの関節部分に装着された際に、当該力覚センサが他の部材と干渉することが無い。

【0033】

各変形部は、Z軸方向に膨出した湾曲部を有し、

前記検出回路は、前記湾曲部に生じる弾性変形に基づいて、前記電気信号を出力するようになっていて良い。

【0034】

この場合、簡易な構成で、作用した力ないしモーメントによって弾性体にZ軸方向の変位を生じさせることができるため、容量素子を構成する一対の電極の配置が容易である。

【0035】

あるいは、各変形部は、前記変形体の径方向に膨出した湾曲部を有し、

前記検出回路は、前記湾曲部に生じる弾性変形に基づいて、前記電気信号を出力するようになっていても良い。

【0036】

この場合、従来の変形体を用いても、ロボットの関節部分に装着された際に、他の部材と干渉することが無い力覚センサを提供することができる。

【0037】

前記2つの固定部は、Z軸方向から見て、前記変形体がX軸と重なる部位にY軸に関して対称的に配置されており、

前記2つの受力部は、Z軸方向から見て、前記変形体がY軸と重なる部位にX軸に関して対称的に配置されていて良い。

10

【0038】

この場合、作用する力ないしモーメントを変形体に効果的に伝達することができる。

【図面の簡単な説明】

【0039】

【図1】本発明の一実施の形態による力覚センサの基本構造を示す概略斜視図である。

【図2】図1の基本構造を示す概略平面図である。

【図3】図2の[3]-[3]線断面図である。

【図4】図1の基本構造に対してX軸正まわりのモーメント+ M_x が作用したときに、各湾曲部に生じる弾性変形を説明するための概略平面図である。

【図5】図4の概略断面図である。図5(a)は、図4の[5a]-[5a]線断面図であり、図5(b)は、図4の[5b]-[5b]線断面図である。

20

【図6】図1の基本構造に対してY軸正まわりのモーメント+ M_y が作用したときに、各湾曲部に生じる弾性変形を説明するための概略平面図である。

【図7】図6の概略断面図である。図7(a)は、図6の[7a]-[7a]線断面図であり、図7(b)は、図6の[7b]-[7b]線断面図である。

【図8】図1の基本構造に対してZ軸正まわりのモーメント+ M_z が作用したときに、各湾曲部に生じる弾性変形を説明するための概略平面図である。

【図9】図8の概略断面図である。図9(a)は、図8の[9a]-[9a]線断面図であり、図9(b)は、図8の[9b]-[9b]線断面図である。

【図10】図1の基本構造に対してZ軸正方向の力+ F_z が作用したときに、各湾曲部に生じる弾性変形を説明するための概略平面図である。

30

【図11】図10の概略断面図である。図11(a)は、図10の[11a]-[11a]線断面図であり、図11(b)は、図10の[11b]-[11b]線断面図である。

【図12】図1の基本構造を利用した力覚センサを示す概略平面図である。

【図13】図12の[13]-[13]線断面図である。

【図14】図12の力覚センサに対して、力ないしモーメントが作用した時に各容量素子に生じる静電容量値の変動を示す図表である。

【図15】本発明の第2の実施の形態による力覚センサの概略平面図である。

【図16】図15の[16]-[16]線断面図である。

【図17】図15の[17]-[17]線断面図である。

40

【図18】図15に示す力覚センサの第1受力部に対してX軸負方向の力が作用したときの第1容量素子C1を示す概略断面図である。

【図19】図15に示す力覚センサの第1受力部に対してX軸正方向の力が作用したときの第1容量素子C1を示す部分的な概略断面図である。

【図20】図15に示す力覚センサの第1受力部に対してZ軸正方向の力が作用したときの第1容量素子C1を示す部分的な概略断面図である。

【図21】図15に示す力覚センサの第1受力部に対してZ軸負方向の力が作用したときの第1容量素子C1を示す部分的な概略断面図である。

【図22】図15に示す力覚センサの第1受力部に対してX軸負方向の力が作用したときの第2容量素子C2を示す部分的な概略断面図である。

50

【図 2 3】図 1 5 に示す力覚センサの第 1 受力部に対して X 軸正方向の力が作用したときの第 2 容量素子 C 2 を示す部分的な概略断面図である。

【図 2 4】図 1 5 に示す力覚センサの第 1 受力部に対して Z 軸正方向の力が作用したときの第 2 容量素子 C 2 を示す部分的な概略断面図である。

【図 2 5】図 1 5 に示す力覚センサの第 1 受力部に対して Z 軸負方向の力が作用したときの第 2 容量素子 C 2 を示す部分的な概略断面図である。

【図 2 6】本発明の第 3 の実施の形態による力覚センサの概略平面図である。

【図 2 7】図 2 6 の [2 7] - [2 7] 線断面図である。

【図 2 8】図 2 6 の [2 8] - [2 8] 線断面図である。

【図 2 9】図 2 6 の力覚センサに対して、力ないしモーメントが作用した時に各容量素子に生じる静電容量値の変動を示す図表である。

10

【図 3 0】本発明の第 4 の実施の形態による力覚センサの概略平面図である。

【図 3 1】図 3 0 の [3 1] - [3 1] 線断面図である。

【図 3 2】図 3 0 の [3 2] - [3 2] 線断面図である。

【図 3 3】図 3 0 の力覚センサに対して、力ないしモーメントが作用した時に各容量素子に生じる静電容量値の変動を示す図表である。

【図 3 4】図 3 0 に示す力覚センサに金属疲労が生じていない状態（初期状態）において、当該力覚センサに作用する X 軸まわりのモーメント M_x の大きさと、当該力覚センサから出力される電気信号と、の関係を示すグラフである。

【図 3 5】図 3 0 の力覚センサに金属疲労が生じている状態において、力覚センサに作用する X 軸まわりのモーメント M_x の大きさと、当該力覚センサから出力される電気信号と、の関係を示すグラフである。

20

【図 3 6】本発明の第 5 の実施の形態による力覚センサの基本構造を示す概略平面図である。

【図 3 7】図 3 6 の [3 7] - [3 7] 線断面図である。

【図 3 8】図 3 6 の基本構造の変形例を示す概略平面図である。

【図 3 9】図 3 8 の [3 9] - [3 9] 線断面図である。

【図 4 0】図 3 8 の基本構造を用いた力覚センサの一例を示す概略平面図である。

【図 4 1】矩形の変形体を示す概略平面図である。

【図 4 2】図 4 1 の概略断面図である。図 4 2 (a) は、図 4 1 の [4 2 a] - [4 2 a] 線断面図であり、図 4 2 (b) は、図 4 1 の [4 2 b] - [4 2 b] 線断面図である。

30

【発明を実施するための形態】

【 0 0 4 0 】

< < < § 1 . 本発明の第 1 の実施の形態による力覚センサ > > >

以下に、添付の図面を参照して、本発明の第 1 の実施の形態による力覚センサについて詳細に説明する。

【 0 0 4 1 】

< 1 - 1 . 基本構造 >

図 1 は、本発明の第 1 の実施の形態による力覚センサの基本構造 1 を示す概略斜視図であり、図 2 は、図 1 の基本構造 1 を示す概略平面図であり、図 3 は、図 2 の [3] - [3] 線断面図である。図 2 においては、左右方向に X 軸が、上下方向に Y 軸が、奥行き方向に Z 軸が、それぞれ定められている。本明細書では、Z 軸正方向を上方向と呼び、Z 軸負方向を下方向と呼ぶこととする。また、本明細書では、X 軸正まわりとは、右ねじを X 軸正方向に前進させるために当該右ねじを回転させる回転方向を意味し、X 軸負まわりとは、その逆の回転方向を意味することとする。このような回転方向の規定の仕方は、Y 軸まわり及び Z 軸まわりについても、同様とする。

40

【 0 0 4 2 】

図 1 乃至図 3 に示すように、基本構造 1 は、X Y 平面と平行な上面を有する円盤状の固定体 1 0 と、力ないしモーメントの作用を受けることにより固定体 1 0 に対して相対移動する円盤状の受力体 2 0 と、固定体 1 0 及び受力体 2 0 に接続され、固定体 1 0 に対する

50

受力体 20 の相対移動によって弾性変形を生じる円環状の変形体 40 と、を備えている。固定体 10、受力体 20 及び変形体 40 は、互いに同心であり、同一の外径を有している。なお、図 2 では、変形体 40 を明確に図示するため、受力体 20 の図示を省略してある。

【0043】

本実施の形態による基本構造 1 は、変形体 40 と固定体 10 との間に形成されている間隙の所定位置に容量素子を配置し、この容量素子に所定の検出回路 50（図 12 参照）を接続することにより、力覚センサとして機能することになる。検出回路 50 は、容量素子の静電容量値の変動量に基づいて、作用した力ないしモーメントを計測するためのものである。容量素子の具体的な配置態様、及び、作用した力ないしモーメントを計測するための具体的な方法は、後述される。

10

【0044】

図 1 及び図 2 に示すように、変形体 40 は、全体として、XYZ 三次元座標系の原点 O を中心とし、XY 平面と平行に配置された円環の形状を有している。ここでは、図 3 に示すように、変形体 40 の Z 軸方向の厚みの半分の位置に XY 平面が存在していることとする。図 3 に示すように、本実施の形態の変形体 40 は、正方形の断面形状を有している。変形体 40 の材質としては、例えば金属が採用され得る。図 2 に示すように、変形体 40 は、正の X 軸上に位置する第 1 固定部 41 と、負の X 軸上に位置する第 2 固定部 42 と、正の Y 軸上に位置する第 1 受力部 43 と、負の Y 軸上に位置する第 2 受力部 44 と、を有している。後述されるように、各固定部 41、42 及び各受力部 43、44 は、変形体 40 のうち固定体 10 及び受力体 20 が接続される領域であって、変形体 40 の他の領域と異なる特性を有する部位ではない。したがって、各固定部 41、42 及び各受力部 43、44 の材質は、変形体 40 の他の領域と同一である。但し、説明の便宜上、図面においては、変形体 40 の他の領域とは異なる色で示してある。

20

【0045】

図 1 乃至図 3 に示すように、変形体 40 は、更に、第 1 固定部 41 と第 1 受力部 43 との間（XY 平面の第 1 象限）に位置する第 1 変形部 45 と、第 1 受力部 43 と第 2 固定部 42 との間（XY 平面の第 2 象限）に位置する第 2 変形部 46 と、第 2 固定部 42 と第 2 受力部 44 との間（XY 平面の第 3 象限）に位置する第 3 変形部 47 と、第 2 受力部 44 と第 1 固定部 41 との間（XY 平面の第 4 象限）に位置する第 4 変形部 48 と、を有している。各変形部 45 ~ 48 の両端は、隣接する固定部 41、42 及び受力部 43、44 にそれぞれ一体的に連結されている。このような構造によって、受力部 43、44 に作用した力ないしモーメントが確実に各変形部 45 ~ 48 に伝達され、これによって、当該作用した力ないしモーメントに応じた弾性変形が各変形部 45 ~ 48 に生じるようになっている。

30

【0046】

図 1 及び図 3 に示すように、基本構造 1 は、固定体 10 と変形体 40 とを接続する第 1 接続部材 31 及び第 2 接続部材 32 と、受力体 20 と変形体 40 とを接続する第 3 接続部材 33 及び第 4 接続部材 34 と、を更に有している。第 1 接続部材 31 は、第 1 固定部 41 の下面（図 3 における下方の面）と固定体 10 の上面とを互いに接続し、第 2 接続部材 32 は、第 2 固定部 42 の下面と固定体 10 の上面とを互いに接続している。第 3 接続部材 33 は、第 1 受力部 43 の上面（図 3 における上方の面）と受力体 20 の下面とを互いに接続し、第 4 接続部材 34 は、第 2 受力部 44 の上面と受力体 20 の下面とを互いに接続している。各接続部材 31 ~ 34 は、実質的に剛体とみなせる程度の剛性を有している。このため、受力体 20 に作用した力ないしモーメントは、効果的に各変形部 45 ~ 48 に弾性変形を生じさせることになる。

40

【0047】

更に、図 1 及び図 3 に示すように、変形体 40 の各変形部 45 ~ 48 は、Z 軸負方向に膨出するように湾曲した湾曲部 45c ~ 48c を有している。図示される例では、各変形部 45 ~ 48 が全体として湾曲部 45c ~ 48c を形成している。このため、図 1 乃至図

50

3では、変形部の符号45～48と湾曲部の符号45c～48cとを併記してある。このことは、後述される他の実施の形態でも同様である。本実施の形態の変形体40では、図3に示すように、第1湾曲部45cのうち最も下方（Z軸負方向）に位置する部位が、第1固定部41から変形体40の周方向に沿って反時計回りに45°だけ周回した位置に存在している。そして、第1湾曲部45cの、第1固定部41から前記最も下方に位置する部位第に至るまでの形状は、第1受力部43から前記最も下方に位置する部位に至るまでの形状と同一である。換言すれば、第1湾曲部45cは、変形体40の周方向において、前記最も下方に位置する部位に関して対称的な形状を有している。

【0048】

このことは、残りの3つの湾曲部46c、47c、48cにおいても、同様である。すなわち、第2湾曲部46cは、最も下方に位置する部位が第1受力部43から変形体40の周方向に沿って反時計回りに45°だけ周回した位置に存在しており、且つ、変形体40の周方向においてこの最も下方に位置する部位に関して対称的な形状を有している。第3湾曲部47cは、最も下方に位置する部位が第2固定部42から変形体40の周方向に沿って反時計回りに45°だけ周回した位置に存在しており、且つ、変形体40の周方向においてこの最も下方に位置する部位に関して対称的な形状を有している。第4湾曲部48cは、最も下方に位置する部位が第2受力部44から変形体40の周方向に沿って反時計回りに45°だけ周回した位置に存在しており、変形体40の周方向においてこの最も下方に位置する部位に関して対称的な形状を有している。

【0049】

結局、図2に示すように、XY平面上に、原点Oを通りX軸およびY軸に対して45°をなすV軸およびW軸を定義すると、第1湾曲部45cは、正のV軸に関して対称的であり、第2湾曲部46cは、正のW軸に関して対称的であり、第3湾曲部47cは、負のV軸に関して対称的であり、第4湾曲部48cは、負のW軸に関して対称的である。

【0050】

図2及び図3に示すように、基本構造1には、各湾曲部45c～48cの最も下方に位置する部位に、すなわちZ軸方向から見て各湾曲部45c～48cがV軸及びW軸と重なる部位に、当該各湾曲部45c～48cに生じる弾性変形を検出するための検出部位A1～A4が規定されている。なお、図2では、検出部位A1～A4が変形体40の上面（手前側の面）に設けられているように示されているが、実際は、変形体40の下面（奥側の面）に設けられている（図3参照）。

【0051】

< 1-2. 基本構造の作用 >

次に、このような基本構造1の作用について説明する。

【0052】

（1-2-1. 基本構造1にX軸まわりのモーメントMxが作用した場合）

図4は、図1の基本構造1に対してX軸正まわりのモーメント+Mxが作用したときに、各湾曲部45c～48cに生じる弾性変形を説明するための概略平面図である。また、図5は、図4の概略断面図である。図5(a)は、図4の[5a] - [5a]線断面図であり、図5(b)は、図4の[5b] - [5b]線断面図である。なお、図4及び図5において、黒塗りの太い矢印は、作用する力ないしモーメントを示しており、白抜きの太い矢印は、検出部位A1～A4の変位の方向を示している。このことは、他の図においても同様である。

【0053】

図4に示すように、受力体20（図1及び図3参照）を介して基本構造1にX軸正まわりのモーメント+Mxが作用すると、変形体40の第1受力部43に対してZ軸正方向（図5(a)における上方向）の力が作用し、第2受力部44に対してZ軸負方向（図5(b)における下方向）の力が作用する。図4において、第1受力部43に付されている、黒点を丸で囲んだ記号は、Z軸負方向からZ軸正方向に向かって力が作用することを示しており、第2受力部44に付されている、x印を丸で囲んだ記号は、Z軸正方向からZ軸

10

20

30

40

50

負方向に向かって力が作用することを示している。これらの記号の意味は、図 6、図 8 及び図 10 においても同様である。

【 0 0 5 4 】

このとき、図 5 (a) 及び図 5 (b) に示すように、第 1 ~ 第 4 湾曲部 4 5 c ~ 4 8 c には次のような弾性変形が生じる。すなわち、第 1 受力部 4 3 に作用する Z 軸正方向の力によって当該第 1 受力部 4 3 が上方に移動するため、第 1 湾曲部 4 5 c 及び第 2 湾曲部 4 6 c のうち第 1 受力部 4 3 に連結されている端部が上方に移動させられる。これにより、図 5 (a) に示すように、第 1 湾曲部 4 5 c 及び第 2 湾曲部 4 6 c は、第 1 及び第 2 固定部 4 1、4 2 に連結されている端部を除き、全体的に上方に移動する。すなわち、第 1 検出部位 A 1 及び第 2 検出部位 A 2 は、共に上方に移動する。他方、第 2 受力部 4 4 に作用する Z 軸負方向の力によって当該第 2 受力部 4 4 が下方に移動するため、第 3 湾曲部 4 7 c 及び第 4 湾曲部 4 8 c のうち第 2 受力部 4 4 に連結されている端部が下方に移動させられる。これにより、図 5 (b) に示すように、第 3 湾曲部 4 7 c 及び第 4 湾曲部 4 8 c は、第 1 及び第 2 固定部 4 1、4 2 に連結されている端部を除き、全体的に下方に移動する。すなわち、第 3 検出部位 A 3 及び第 4 検出部位 A 4 は、共に下方に移動する。

10

【 0 0 5 5 】

このような移動は、図 4 においては、各検出部位 A 1 ~ A 4 の位置に、丸で囲んだ「+」または「-」の記号を付して表されている。すなわち、丸で囲んだ「+」の記号が付された検出部位は、湾曲部の弾性変形によって Z 軸正方向に変位し、丸で囲んだ「-」の記号が付された検出部位は、湾曲部の弾性変形によって Z 軸負方向に変位する。このことは、図 6、図 8 及び図 10 においても同様である。

20

【 0 0 5 6 】

結局、基本構造 1 の受力体 2 0 に対して X 軸正まわりのモーメント + M_x が作用すると、第 1 及び第 2 検出部位 A 1、A 2 と固定体 1 0 (図 3 参照) の上面との離間距離は、共に増大し、第 3 及び第 4 検出部位 A 3、A 4 と固定体 1 0 の上面との離間距離は、共に減少する。

【 0 0 5 7 】

図示されていないが、基本構造 1 の受力体 2 0 に X 軸負まわりのモーメント - M_x が作用した場合には、各検出部位 A 1 ~ A 4 の移動方向は、上述した方向とは逆になる。すなわち、X 軸負まわりのモーメント - M_x の作用によって、第 1 及び第 2 検出部位 A 1、A 2 と固定体 1 0 (図 2 参照) の上面との離間距離は、共に減少し、第 3 及び第 4 検出部位 A 3、A 4 と固定体 1 0 の上面との離間距離は、共に増大する。

30

【 0 0 5 8 】

(1 - 2 - 2 . 基本構造 1 に Y 軸まわりのモーメント M_y が作用した場合)

図 6 は、図 1 の基本構造 1 に対して Y 軸正まわりのモーメント + M_y が作用したときに、各湾曲部 4 5 c ~ 4 8 c に生じる弾性変形を説明するための概略平面図である。また、図 7 は、図 6 の概略断面図である。図 7 (a) は、図 6 の [7 a] - [7 a] 線断面図であり、図 7 (b) は、図 6 の [7 b] - [7 b] 線断面図である。

【 0 0 5 9 】

図 6 及び図 7 に示すように、受力体 2 0 (図 1 及び図 3 参照) を介して基本構造 1 に対して Y 軸正まわりのモーメント + M_y が作用すると、変形体 4 0 の第 1 及び第 2 受力部 4 3、4 4 の X 軸負側の領域には Z 軸正方向の力が作用し、第 1 及び第 2 受力部 4 3、4 4 の X 軸正側の領域には Z 軸負方向の力が作用する。

40

【 0 0 6 0 】

このとき、図 7 (a) 及び図 7 (b) に示すように、第 1 ~ 第 4 湾曲部 4 5 c ~ 4 8 c には次のような弾性変形が生じる。すなわち、第 1 受力部 4 3 の X 軸正側 (図 7 (a) における右側) に作用する Z 軸負方向の力によって当該 X 軸正側の領域が下方に移動するため、第 1 湾曲部 4 5 c のうち第 1 受力部 4 3 に連結されている端部が下方に移動させられる。これにより、図 7 (a) に示すように、第 1 湾曲部 4 5 c は、第 1 固定部 4 1 に連結されている端部を除き、全体的に下方に移動する。すなわち、第 1 検出部位 A 1 は、下方

50

に移動する。他方、第1受力部43のX軸負側(図7(a)における左側)に作用するZ軸正方向の力によって当該X軸負側の領域が上方に移動するため、第2湾曲部46cのうち第1受力部43に連結されている端部が上方に移動する。これにより、図7(a)に示すように、第2湾曲部46cは、第2固定部42に連結されている端部を除き、全体的に上方に移動する。すなわち、第2検出部位A2は、上方に移動する。

【0061】

また、図7(b)に示すように、第2受力部44のX軸負側(図7(b)における右側)に作用するZ軸正方向の力によって当該X軸負側の領域が上方に移動するため、第3湾曲部47cのうち第2受力部44に連結されている端部が上方に移動させられる。これにより、図7(b)に示すように、第3湾曲部47cは、第2固定部42に連結されている端部を除き、全体的に上方に移動する。すなわち、第3検出部位A3は、上方に移動する。

10

【0062】

他方、図7(b)に示すように、第2受力部44のX軸正側(図7(b)における左側)に作用するZ軸負方向の力によって当該X軸正側の領域が下方に移動するため、第4湾曲部48cのうち第2受力部44に連結されている端部が下方に移動させられる。これにより、図7(b)に示すように、第4湾曲部48cは、第1固定部41に連結されている端部を除き、全体的に下方に移動する。すなわち、第4検出部位A4は、下方に移動する。

【0063】

結局、基本構造1の受力体20に対してY軸正まわりのモーメント+Myが作用すると、第1及び第4検出部位A1、A4と固定体10(図3参照)の上面との離間距離は、共に減少し、第2及び第3検出部位A2、A3と固定体10の上面との離間距離は、共に増大する。

20

【0064】

図示されていないが、基本構造1の受力体20にY軸負まわりのモーメント-Myが作用した場合には、各検出部位A1~A4の移動方向は、上述した方向とは逆になる。すなわち、Y軸負まわりのモーメント-Myの作用によって、第1及び第4検出部位A1、A4と固定体10(図3参照)の上面との離間距離は、共に増大し、第2及び第3検出部位A2、A3と固定体10の上面との離間距離は、共に減少する。

30

【0065】

(1-2-3. 基本構造1にZ軸まわりのモーメントMzが作用した場合)

図8は、図1の基本構造1に対してZ軸正まわりのモーメント+Mzが作用したときに、各湾曲部45c~48cに生じる弾性変形を説明するための概略平面図である。また、図9は、図8の概略断面図である。図9(a)は、図8の[9a]-[9a]線断面図であり、図9(b)は、図8の[9b]-[9b]線断面図である。

【0066】

図8に示すように、受力体20(図1及び図3参照)を介して基本構造1に対してZ軸正まわりのモーメント+Mzが作用すると、変形体40の第1受力部43に対してX軸負方向(図8における左方向)の力が作用し、第2受力部44に対してX軸正方向(図8における右方向)の力が作用する。

40

【0067】

このとき、図9(a)及び図9(b)に示すように、第1~第4湾曲部45c~48cには次のような弾性変形が生じる。すなわち、第1受力部43に作用するX軸負方向の力によって当該第1受力部43がX軸負方向に移動するため、第1湾曲部45cには、X軸方向に沿った引張力が作用する。これにより、第1湾曲部45cは、その両端部のZ座標値を維持したまま曲率半径が大きくなるように弾性変形する。すなわち、第1検出部位A1は、上方に移動する。他方、第1受力部43がX軸負方向に移動することにより、第2湾曲部46cには、X軸方向に沿った圧縮力が作用する。これにより、第2湾曲部46cは、その両端部のZ座標値を維持したまま曲率半径が小さくなるように弾性変形する。す

50

なわち、第 2 検出部位 A 2 は、下方に移動する。

【 0 0 6 8 】

また第 2 受力部 4 4 に作用する X 軸正方向の力によって当該第 2 受力部 4 4 が X 軸正方向に移動するため、第 3 湾曲部 4 7 c には、X 軸方向に沿った引張力が作用する。これにより、第 3 湾曲部 4 7 c は、その両端部の Z 座標値を維持したまま曲率半径が大きくなるように弾性変形する。すなわち、第 3 検出部位 A 3 は、上方に移動する。他方、第 2 受力部 4 4 が X 軸正方向に移動することにより、第 4 湾曲部 4 8 c には、X 軸方向に沿った圧縮力が作用する。これにより、第 4 湾曲部 4 8 c は、その両端部の Z 座標値を維持したまま曲率半径が小さくなるように弾性変形する。すなわち、第 4 検出部位 A 4 は、下方に移動する。

10

【 0 0 6 9 】

結局、基本構造 1 の受力体 2 0 に対して Z 軸正まわりのモーメント + M_z が作用すると、第 1 及び第 3 検出部位 A 1、A 3 と固定体 1 0 の上面との離間距離は、共に増大し、第 2 及び第 4 検出部位 A 2、A 4 と固定体 1 0 (図 2 参照) の上面との離間距離は、共に減少する。

【 0 0 7 0 】

図示されていないが、基本構造 1 の受力体 2 0 に Z 軸負まわりのモーメント - M_z が作用した場合には、各検出部位 A 1 ~ A 4 の移動方向は、上述した方向とは逆になる。すなわち、Z 軸負まわりのモーメント - M_z の作用によって、第 1 及び第 3 検出部位 A 1、A 3 と固定体 1 0 の上面との離間距離は、共に減少し、第 2 及び第 4 検出部位 A 2、A 4 と固定体 1 0 (図 2 参照) の上面との離間距離は、共に増大する。

20

【 0 0 7 1 】

(1 - 2 - 4 . 基本構造 1 に Z 方向の力 F_z が作用した場合)

次に、図 1 0 は、図 1 の基本構造 1 に対して Z 軸正方向の力 + F_z が作用したときに、各湾曲部 4 5 c ~ 4 8 c に生じる弾性変形を説明するための概略平面図である。また、図 1 1 は、図 1 0 の概略断面図である。図 1 1 (a) は、図 1 0 の [1 1 a] - [1 1 a] 線断面図であり、図 1 1 (b) は、図 1 0 の [1 1 b] - [1 1 b] 線断面図である。

【 0 0 7 2 】

図 1 0 及び図 1 1 に示すように、受力体 2 0 (図 1 及び図 3 参照) を介して基本構造 1 に対して Z 軸正方向の力 + F_z が作用すると、変形体 4 0 の第 1 及び第 2 受力部 4 3、4 4 には Z 軸正方向の力が作用する。

30

【 0 0 7 3 】

このとき、図 1 1 (a) 及び図 1 1 (b) に示すように、第 1 ~ 第 4 各湾曲部 4 5 c ~ 4 8 c には次のような弾性変形が生じる。すなわち、第 1 及び第 2 受力部 4 3、4 4 に作用する Z 軸正方向の力によって各受力部 4 3、4 4 が上方に移動するため、各湾曲部 4 5 c ~ 4 8 c のうち第 1 及び第 2 受力部 4 3、4 4 に連結されている各端部が上方に移動させられる。これにより、図 1 1 (a) 及び図 1 1 (b) に示すように、各検出部位 A 1 ~ A 4 は、上方に移動する。

【 0 0 7 4 】

結局、基本構造 1 の受力体 2 0 に対して Z 軸正方向の力 + F_z が作用すると、第 1 ~ 第 4 検出部位 A 1 ~ A 4 と固定体 1 0 (図 2 参照) の上面との離間距離は、全て増大する。

40

【 0 0 7 5 】

図示されていないが、基本構造 1 の受力体 2 0 に Z 軸負方向の力 - F_z が作用した場合には、各検出部位 A 1 ~ A 4 の移動方向は、上述した方向とは逆になる。すなわち、Z 軸負方向の力 - F_z の作用によって、第 1 ~ 第 4 検出部位 A 1 ~ A 4 と固定体 1 0 (図 2 参照) の上面との離間距離は、全て減少する。

【 0 0 7 6 】

< 1 - 3 . 容量素子型の力覚センサ >

(1 - 3 - 1 . 力覚センサの構成)

50

§ 1 - 1 . 及び § 1 - 2 . において詳述した基本構造 1 は、容量素子型の力覚センサ 1 c として好適に使用することができる。ここでは、このような力覚センサ 1 c について、以下詳細に説明する。

【 0 0 7 7 】

図 1 2 は、図 1 の基本構造 1 を利用した力覚センサ 1 c を示す概略平面図であり、図 1 3 は、図 1 2 の [1 3] - [1 3] 線断面図である。なお、図 1 3 では、変形体 4 0 を明確に図示するため、受力体 2 0 の図示を省略してある。

【 0 0 7 8 】

図 1 2 及び図 1 3 に示すように、力覚センサ 1 c は、図 1 の基本構造 1 の検出部位 A 1 ~ A 4 に、各 1 つの容量素子 C 1 ~ C 4 が配置されることにより、構成されている。具体的には、図 1 3 に示すように、力覚センサ 1 c は、第 1 検出部位 A 1 に配置された第 1 変位電極 E m 1 と、第 1 変位電極 E m 1 に対向して配置され、固定体 1 0 に対して相対移動しない第 1 固定電極 E f 1 と、を有している。これらの電極 E m 1、E f 1 は、第 1 容量素子 C 1 を構成している。更に、図 1 3 に示すように、力覚センサ 1 c は、第 2 検出部位 A 2 に配置された第 2 変位電極 E m 2 と、第 2 変位電極 E m 2 に対向して配置され、固定体 1 0 に対して相対移動しない第 2 固定電極 E f 2 と、を有している。これらの電極 E m 2、E f 2 は、第 2 容量素子 C 2 を構成している。

【 0 0 7 9 】

図示されていないが、力覚センサ 1 c は、第 3 検出部位 A 3 に配置された第 3 変位電極 E m 3 と、第 3 変位電極 E m 3 に対向して配置され、固定体 1 0 に対して相対移動しない第 3 固定電極 E f 3 と、第 4 検出部位 A 4 に配置された第 4 変位電極 E m 4 と、第 4 変位電極 E m 4 に対向して配置され、固定体 1 0 に対して相対移動しない第 4 固定電極 E f 4 と、を有している。電極 E m 3 及び電極 E f 3 は、第 3 容量素子 C 3 を構成しており、電極 E m 4 及び電極 E f 4 は、第 4 容量素子 C 4 を構成している。

【 0 0 8 0 】

図 1 3 から理解されるように、各変位電極 E m 1 ~ E m 4 は、対応する検出部位 A 1 ~ A 4 に支持された第 1 ~ 第 4 変形体側支持体 6 1 ~ 6 4 の下面に、第 1 ~ 第 4 変位基板 I m 1 ~ I m 4 を介して支持されている。更に、各固定電極 E f 1 ~ E f 4 は、固定体 1 0 の上面に固定された固定体側支持体 7 1 ~ 7 4 の上面に、第 1 ~ 第 4 固定基板 I f 1 ~ I f 4 を介して支持されている。各変位電極 E m 1 ~ E m 4 は、全て同一の面積であり、各固定電極 E f 1 ~ E f 4 も、全て同一の面積である。但し、力ないしモーメントの作用によって各容量素子 C 1 ~ C 4 の実効対向面積が一定の値を維持するようにするための工夫として、変位電極 E m 1 ~ E m 4 の電極面積は、固定電極 E f 1 ~ E f 4 の電極面積よりも大きく構成されている。この点については、後に詳述される。初期状態において、容量素子 C 1 ~ C 4 を構成する各 1 組の電極の実効対向面積及び離間距離は、全て同一である。

【 0 0 8 1 】

更に、図 1 2 及び図 1 3 に示すように、力覚センサ 1 c は、変形体 4 0 の各湾曲部 4 5 c ~ 4 8 c に生じる弾性変形に基づいて、受力体 2 0 に作用した力ないしモーメントを示す電気信号を出力する検出回路 5 0 を有している。図 1 2 及び図 1 3 では、各容量素子 C 1 ~ C 4 と検出回路 5 0 とを電氣的に接続する配線は、図示が省略されている。

【 0 0 8 2 】

固定体 1 0、受力体 2 0 及び変形体 4 0 が金属などの導電材料で構成されている場合、各電極がショートしないように、第 1 ~ 第 4 変位基板 I m 1 ~ I m 4 及び第 1 ~ 第 4 固定基板 I f 1 ~ I f 4 は、絶縁体で構成される必要がある。

【 0 0 8 3 】

(1 - 3 - 2 . 力覚センサ 1 c に X 軸まわりのモーメント M x が作用したときの、各容量素子の静電容量値の変動について)

次に、図 1 4 は、図 1 2 の力覚センサ 1 c に対して、力ないしモーメントが作用した時に各容量素子 C 1 ~ C 4 に生じる静電容量値の変動を示す図表である。

【 0 0 8 4 】

まず、本実施の形態による力覚センサ 1 c に対して、X 軸正まわりのモーメント + M_x が作用すると、§ 1 - 2 - 1 にて説明した各検出部位 A 1 ~ A 4 の挙動から理解されるように、第 1 容量素子 C 1 及び第 2 容量素子 C 2 を構成する電極間の離間距離が、共に増大する。このため、第 1 容量素子 C 1 及び第 2 容量素子 C 2 の静電容量値は、共に減少する。他方、第 3 容量素子 C 3 及び第 4 容量素子 C 4 を構成する電極間の離間距離は、共に減少する。このため、第 3 容量素子 C 3 及び第 4 容量素子 C 4 の静電容量値は、共に増大する。各容量素子 C 1 ~ C 4 の静電容量値の変動は、図 1 4 の「 M_x 」の欄に纏めて示されている。この図表において、「+」は、静電容量値が増大することを示しており、「-」は、静電容量値が減少することを示している。なお、力覚センサ 1 c に X 軸負まわりのモーメント - M_x が作用すると、各容量素子 C 1 ~ C 4 の静電容量値の変動は、上述した変動とは逆になる（図 1 4 の M_x の欄に示す符号が全て逆になる）。

10

【 0 0 8 5 】

（ 1 - 3 - 3 . 力覚センサ 1 c に Y 軸まわりのモーメント M_y が作用したときの、各容量素子の静電容量値の変動について）

次に、本実施の形態による力覚センサ 1 c に対して、Y 軸正まわりのモーメント + M_y が作用すると、§ 1 - 2 - 2 にて説明した各検出部位 A 1 ~ A 4 の挙動から理解されるように、第 1 容量素子 C 1 及び第 4 容量素子 C 4 を構成する電極間の離間距離が、共に減少する。このため、第 1 容量素子 C 1 及び第 4 容量素子 C 4 の静電容量値は、共に増大する。他方、第 2 容量素子 C 2 及び第 3 容量素子 C 3 を構成する電極間の離間距離は、共に増大する。このため、第 2 容量素子 C 2 及び第 3 容量素子 C 3 の静電容量値は、共に減少する。各容量素子 C 1 ~ C 4 の静電容量値の変動は、図 1 4 の「 M_y 」の欄に纏めて示されている。なお、力覚センサ 1 c に Y 軸負まわりのモーメント - M_y が作用すると、各容量素子 C 1 ~ C 4 の静電容量値の変動は、上述した変動とは逆になる（図 1 4 の M_y の欄に示す符号が全て逆になる）。

20

【 0 0 8 6 】

（ 1 - 3 - 4 . 力覚センサ 1 c に Z 軸まわりのモーメント M_z が作用したときの、各容量素子の静電容量値の変動について）

次に、本実施の形態による力覚センサ 1 c に対して、Z 軸正まわりのモーメント + M_z が作用すると、§ 1 - 2 - 3 にて説明した各検出部位 A 1 ~ A 4 の挙動から理解されるように、第 1 容量素子 C 1 及び第 3 容量素子 C 3 を構成する電極間の離間距離は、共に増大する。このため、第 1 容量素子 C 1 及び第 3 容量素子 C 3 の静電容量値は、共に減少する。他方、第 2 容量素子 C 2 及び第 4 容量素子 C 4 を構成する電極間の離間距離は、共に減少する。このため、第 2 容量素子 C 2 及び第 4 容量素子 C 4 の静電容量値は、共に増大する。各容量素子 C 1 ~ C 4 の静電容量値の変動は、図 1 4 の「 M_z 」の欄に纏めて示されている。なお、力覚センサ 1 c に Z 軸負まわりのモーメント - M_z が作用すると、各容量素子 C 1 ~ C 4 の静電容量値の変動は、上述した変動とは逆になる（図 1 4 の M_z の欄に示す符号が全て逆になる）。

30

【 0 0 8 7 】

（ 1 - 3 - 5 . 力覚センサ 1 c に Z 軸方向の力 F_z が作用したときの、各容量素子の静電容量値の変動について）

次に、本実施の形態による力覚センサ 1 c に対して、Z 軸正方向の力 + F_z が作用すると、§ 1 - 2 - 4 にて説明した各検出部位 A 1 ~ A 4 の挙動から理解されるように、各容量素子 C 1 ~ C 4 を構成する電極間の離間距離は、全て増大する。このため、容量素子 C 1 ~ C 4 の静電容量値は、全て減少する。各容量素子 C 1 ~ C 4 の静電容量値の変動は、図 1 4 の「 F_z 」の欄に纏めて示されている。なお、力覚センサ 1 c に Z 軸負方向の力 - F_z が作用すると、各容量素子 C 1 ~ C 4 の静電容量値の変動は、上述した変動とは逆になる（図 1 4 の F_z の欄に示す符号が全て逆になる）。

40

【 0 0 8 8 】

（ 1 - 3 - 6 . 作用した力ないしモーメントの算出方法）

50

以上のような容量素子 $C_1 \sim C_4$ の静電容量値の変動に鑑み、検出回路 50 は、次の [式 1] を用いて力覚センサ 1c に作用したモーメント M_x 、 M_y 、 M_z 及び力 F_z を算出する。[式 1] において、 $C_1 \sim C_4$ は、第 1 ～ 第 4 容量素子 $C_1 \sim C_4$ の静電容量値の変動量を示している。

[式 1]

$$M_x = -C_1 - C_2 + C_3 + C_4$$

$$M_y = C_1 - C_2 - C_3 + C_4$$

$$M_z = -C_1 + C_2 - C_3 + C_4$$

$$F_z = -(C_1 + C_2 + C_3 + C_4)$$

なお、力覚センサ 1c に作用した力ないしモーメントが負方向である場合には、左辺の M_x 、 M_y 、 M_z 及び F_z に代えて、 $-M_x$ 、 $-M_y$ 、 $-M_z$ 及び $-F_z$ とすれば良い。

10

【 0089 】

以上のような本実施の形態による力覚センサ 1c によれば、Z 軸方向に膨出した湾曲部 45c ～ 48c を有する簡素な変形体 40 によって、検出部位 A1 ～ A4 において、作用した力ないしモーメントに対応する変位を Z 軸方向に生じさせることができる。このため、容量素子 $C_1 \sim C_4$ を構成する一対の電極のうち一方を検出部位 A1 ～ A4 に、他方を例えば固定体 10 の上面に、それぞれ配置して良いため、容量素子 $C_1 \sim C_4$ を構成することが容易である。したがって、本実施の形態によれば、このような簡素な構造が採用されていることにより、従来よりも安価な静電容量タイプの力覚センサ 1c を提供することができる。

20

【 0090 】

力覚センサ 1c では、XY 平面上に原点 O を通り X 軸および Y 軸に対して 45° をなす V 軸および W 軸を定義した場合に、4 組の容量素子 $C_1 \sim C_4$ が、Z 軸方向から見て V 軸及び W 軸に重なる 4 つの部位に 1 つずつ配置されている。したがって、容量素子 $C_1 \sim C_4$ が X 軸及び Y 軸に関して対称的に配置されているため、高い対称性をもって各容量素子 $C_1 \sim C_4$ の静電容量値が変動することになる。このため、容量素子 $C_1 \sim C_4$ の静電容量値の変動量に基づいて、作用した力ないしモーメントを極めて容易に計測することができる。

【 0091 】

30

以上の説明においては、4 つの容量素子 $C_1 \sim C_4$ は、個別の固定基板 If1 ～ If4 及び個別の固定電極 Ef1 ～ Ef4 を有していた。しかしながら、他の実施の形態においては、固定基板を 4 つの容量素子で共通となるように構成し、その固定基板上に個別の固定電極を設けても良い。あるいは、固定基板及び固定電極を 4 つの容量素子で共通となるように構成しても良い。これらのような構成によっても、前述した力覚センサ 1c と同様にして、力ないしモーメントを計測することができる。なお、これらの構成は、後述される各実施の形態に対しても適用可能である。

【 0092 】

また、力覚センサ 1c は、変形体 40 の断面形状が変更されることにより、作用する力ないしモーメントに対する感度が変化する。具体的には、次の通りである。すなわち、本実施の形態では、変形体 40 の断面形状が正方形であった (図 3 参照) が、この断面形状を、Z 軸方向に長い縦長の長方形にすると、X、Y 軸まわりのモーメント M_x 、 M_y 及び Z 軸方向の力 F_z に対する感度が、Z 軸まわりのモーメント M_z に対する感度よりも相対的に低くなる。その一方、変形体 40 の断面形状を、当該変形体 40 の径方向に長い横長の長方形にすると、先の場合とは逆に、X、Y 軸まわりのモーメント M_x 、 M_y 及び Z 軸方向の力 F_z に対する感度が、Z 軸まわりのモーメント M_z に対する感度よりも相対的に高くなる。

40

【 0093 】

あるいは、力覚センサ 1c は、湾曲部 45c ～ 48c の曲率半径 (湾曲の度合い) が変更されることによっても、作用する力ないしモーメントに対する感度が変化する。具体的

50

には、湾曲部 45c ~ 48c の曲率半径が小さくされると（湾曲の度合いが大きくなると）、作用する力ないしモーメントに対する感度が高くなる。その一方、湾曲部 45c ~ 48c の曲率半径が大きくなると（湾曲の度合いが小さくなると）、作用する力ないしモーメントに対する感度が低くなる。

【0094】

以上のような変形体 40 の断面形状及び湾曲部 45c ~ 48c の曲率半径と、力ないしモーメントに対する感度と、の関係を考慮することにより、力覚センサ 1c の感度を使用される環境において最適化することができる。もちろん、以上の説明は、後述される各実施の形態においても同様に当てはまる。

【0095】

<<< § 2 . 本発明の第 2 の実施の形態による力覚センサ >>>
< 2 - 1 . 構成 >

次に、本発明の第 2 の実施の形態による力覚センサ 201c について説明する。

【0096】

図 15 は、第 2 の実施の形態による力覚センサ 201c の概略平面図である。また、図 16 は、図 15 の [16] - [16] 線断面図であり、図 17 は、図 15 の [17] - [17] 線断面図である。但し、図 15 では、図面の見やすさのため、受力体 20 の図示を省略してある。

【0097】

図 15 乃至図 17 に示すように、力覚センサ 201c は、次の点で、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1c とは異なる。すなわち、本実施の形態による力覚センサ 201c では、変位電極 Em1 ~ Em4 を支持する変形体側支持体 261 ~ 264 が、各湾曲部 45c ~ 48c の検出部位 A1 ~ A4 とは異なる部位において当該各湾曲部 45c ~ 48c に接続されている。具体的には、図 15 及び図 16 に示すように、第 1 湾曲部 45c に接続されている第 1 変形体側支持体 261 は、Z 軸方向から見て、第 1 湾曲部 45c の第 1 検出部位 A1 に重なるように配置された第 1 梁 261b と、この第 1 梁 261b のうち第 1 固定部 41 側（図 16 における右側）の端部を第 1 湾曲部 45c に接続する第 1 接続体 261s と、を有する片持ち梁構造体となっている。第 1 接続体 261s は、Z 軸と平行に延在しているため、当該第 1 接続体 261s と第 1 湾曲部 45c との接続位置は、第 1 検出部位 A1 よりも第 1 固定部 41 側である。第 1 変位電極 Em1 は、この片持ち梁構造体の第 1 梁 261b の下面に変位基板を介して支持されている。

【0098】

また、第 2 湾曲部 46c に接続されている第 2 変形体側支持体 262 も、片持ち梁構造体として構成されている。すなわち、図 15 及び図 16 に示すように、第 2 変形体側支持体 262 は、Z 軸方向から見て、第 2 湾曲部 46c の第 2 検出部位 A2 に重なるように配置された第 2 梁 262b と、この第 2 梁 262b のうち第 2 固定部 42 側（図 16 における左側）の端部を第 2 湾曲部 46c に接続する第 2 接続体 262s と、を有する片持ち梁構造体となっている。第 2 接続体 262s は、Z 軸と平行に延在しているため、当該第 2 接続体 262s と第 2 湾曲部 46c との接続位置は、第 2 検出部位 A2 よりも第 2 固定部 42 側である。第 2 変位電極 Em2 は、この片持ち梁構造体の第 2 梁 262b の下面に変位基板を介して支持されている。

【0099】

更に、第 3 変形体側支持体 263 及び第 4 変形体側支持体 264 も、同様の片持ち梁構造体として構成されている。すなわち、図 15 及び図 17 に示すように、第 3 変形体側支持体 263 は、Z 軸方向から見て、第 3 湾曲部 47c の第 3 検出部位 A3 に重なるように配置された第 3 梁 263b と、この第 3 梁 263b のうち第 2 固定部 42 側（図 17 における右側）の端部を第 3 湾曲部 47c に接続する第 3 接続体 263s と、を有する片持ち梁構造体となっている。第 3 接続体 263s は、Z 軸と平行に延在しているため、第 3 接続体 263s と第 3 湾曲部 47c との接続位置は、第 3 検出部位 A3 よりも第 2 固定部 42 側である。第 3 変位電極 Em3 は、第 3 梁 263b の下面に変位基板を介して支持されて

10

20

30

40

50

いる。

【0100】

また、第4変形体側支持体264は、Z軸方向から見て、第4湾曲部48cの第4検出部位A4に重なるように配置された第4梁264bと、この第4梁264bのうち第1固定部41側（図17における左側）の端部を第4湾曲部48cに接続する第4接続体264sと、を有する片持ち梁構造体となっている。第4接続体264sは、Z軸と平行に延在しているため、第4接続体264sと第4湾曲部48cとの接続位置は、第4検出部位A4よりも第1固定部41側である。第4変位電極Em34は、第4梁264bの下面に変位基板を介して支持されている。

【0101】

以上のような構成によって、各接続体261s～264sは、検出部位A1～A4とは異なる部位において湾曲部45c～48cに接続されていながら、Z軸方向から見て、第1～第4変位電極Em1～Em4が対応する検出部位A1～A4と重なるように配置されている。

【0102】

なお、図15乃至図25に示されている例では、以上のように、各変形体側支持体261～264は、片持ち梁構造体として構成されているが、他の実施の形態（不図示）では、梁261b～264bの先端が可撓性を有する材料によって固定体10に連結された、両持ち梁構造体として構成されても良い。可撓性を有する材料は、直線状の形状でも湾曲した形状でも良く、例えばZ軸と固定体10の上面とが交わる部位の近傍にて、当該固定体10に接続され得る。このような構成によれば、力覚センサ201cに作用する力ないしモーメントの作用によって生じる梁261b～264bの傾斜の挙動を外部振動から安定化させることができる。

【0103】

< 2-2. 作用 >

（2-2-1. 第1容量素子C1の静電容量値の変動）

本実施の形態による力覚センサ201cに対して力ないしモーメントが作用したときに、各容量素子C1～C4に生じる静電容量値の変動について検討する。ここでは、まず第1容量素子C1の静電容量値の変動について、図18乃至図21を参照して説明する。

【0104】

図18は、図15に示す力覚センサの第1受力部43に対してX軸負方向の力が作用したときの第1容量素子C1を示す概略断面図であり、図19は、図15に示す力覚センサ201cの第1受力部43に対してX軸正方向の力が作用したときの第1容量素子C1を示す部分的な概略断面図である。また、図20は、図15に示す力覚センサ201cの第1受力部43に対してZ軸正方向の力が作用したときの第1容量素子C1を示す部分的な概略断面図であり、図21は、図15に示す力覚センサ201cの第1受力部43に対してZ軸負方向の力が作用したときの第1容量素子C1を示す部分的な概略断面図である。

【0105】

図18に示すように、第1受力部43に対してX軸負方向（図18における左方向）の力が作用すると、第1受力部43は、当該方向に移動する。これに伴って、第1湾曲部45cは、X軸方向に沿った引張力を受けるため、その曲率半径が大きくなるように弾性変形する。図18において、初期状態の第1湾曲部45cが破線で示されており、弾性変形している状態の第1湾曲部45cが実線で示されている。図18に示すように、この弾性変形によって、第1湾曲部45cのうち第1接続体261sが接続されている部位の接線L1がより水平に寝た状態に変化する。図18において、変化後の接線は、L1（X-）で示されている。すると、第1変形体側支持体261の第1梁261bは、この傾きの変化に相当する分だけ、水平の状態から左上がりの状態に変化する。この結果、第1容量素子C1を構成する電極間の離間距離が増大する。その増大の度合いは、X軸正側からX軸負側に向かって（図18における右側から左側に向かって）次第に大きくなる（離間距離

10

20

30

40

50

が次第に大きくなる)。

【0106】

先に説明した第1の実施の形態による力覚センサ1cでは、第1変形体側支持体61と第1湾曲部45cとが第1検出部位A1にて接続されていたため、第1検出部位A1がZ軸方向に沿って変位した量と同じだけ、電極間の離間距離が一様に変化ようになっていた。ところが、図18に示す例では、第1梁261bが左上がりに傾斜することから、とりわけ第1梁261bの左方領域において、第1検出部位A1が上方に変位した量を超えて、電極間の離間距離が増大する。換言すれば、第1変形体側支持体261を片持ち梁構造体とし、この第1変形体側支持体261が第1検出部位A1とは異なる位置において第1湾曲部45cに接続されていることにより、第1検出部位A1に生じるZ軸方向の変位が増幅されることになる。

10

【0107】

このような構成により、第1受力部43に対してX軸負方向の力が作用したとき、本実施の形態による力覚センサ201cの第1容量素子C1は、静電容量値が減少するが、その減少の程度は、第1の実施の形態による力覚センサ1cの第1容量素子C1よりも大きくなる。

【0108】

次に、図19に示すように、第1受力部43に対してX軸正方向(図19における右方向)の力が作用すると、第1受力部43は、当該方向に移動する。これに伴って、第1湾曲部45cは、X軸方向に沿った圧縮力を受けるため、その曲率半径が小さくなるように弾性変形する。図19において、初期状態の第1湾曲部45cが破線で示されており、弾性変形している状態の第1湾曲部45cが実線で示されている。図19に示すように、この弾性変形によって、第1湾曲部45cのうち第1接続体261sが接続されている部位の接線L1がより垂直に立った状態に変化する。図19において、変化後の接線は、L1(X+)で示されている。すると、第1変形体側支持体261の第1梁261bは、この傾きの変化に相当する分だけ、水平の状態から左下がり状態に変化する。この結果、第1容量素子C1を構成する電極間の離間距離が減少する。その減少の度合いは、X軸正側からX軸負側に向かって(図19における右側から左側に向かって)次第に大きくなる(離間距離が次第に小さくなる)。

20

【0109】

図19に示す例では、第1梁261bが左下がりに傾斜することから、とりわけ第1梁261bの左方領域において、第1検出部位A1が下方に変位した量を超えて、電極間の離間距離が減少する。換言すれば、前述したような片持ち梁構造体によって、第1検出部位A1に生じるZ軸方向の変位が増幅されることになる。

30

【0110】

このような構成により、第1受力部43に対してX軸正方向の力が作用したとき、本実施の形態による力覚センサ201cの第1容量素子C1は、静電容量値が増大するが、その増大の程度は、第1の実施の形態による力覚センサ1cの第1容量素子C1よりも大きくなる。

【0111】

次に、図20に示すように、第1受力部43に対してZ軸正方向(図20における上方)の力が作用すると、第1受力部43は、当該方向に移動する。これに伴って、第1湾曲部45cは、第1受力部43に接続されたX軸負側の領域が上方に移動されるため、全体として、上方に移動するように弾性変形する。但し、X軸正側の端部は第1固定部41に固定されているため、移動しない。図20において、初期状態の第1湾曲部45cが破線で示されており、弾性変形している状態の第1湾曲部45cが実線で示されている。図20に示すように、この弾性変形によって、第1湾曲部45cのうち第1接続体261sが接続されている部位の接線L1がより水平に寝た状態に変化する。図20において、変化後の接線は、L1(Z+)で示されている。すると、第1変形体側支持体261の第1梁261bは、この傾きの変化に相当する分だけ、水平の状態から左上がりの状態に変化

40

50

する。この結果、第 1 容量素子 C 1 を構成する電極間の離間距離が増大する。その増大の度合いは、X 軸正側から X 軸負側に向かって（図 2 0 における右側から左側に向かって）次第に大きくなる（離間距離が次第に大きくなる）。

【 0 1 1 2 】

図 2 0 に示す例では、第 1 梁 2 6 1 b が左上がりに傾斜することから、とりわけ第 1 梁 2 6 1 b の左方領域において、第 1 検出部位 A 1 が上方に変位した量を超えて、電極間の離間距離が増大する。換言すれば、前述したような片持ち梁構造体によって、第 1 検出部位 A 1 に生じる Z 軸方向の変位が増幅されることになる。

【 0 1 1 3 】

このような構成により、第 1 受力部 4 3 に対して Z 軸正方向の力が作用したとき、本実施の形態による力覚センサ 2 0 1 c の第 1 容量素子 C 1 は静電容量値が減少するが、その減少の程度は、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1 c の第 1 容量素子 C 1 よりも大きくなる。

10

【 0 1 1 4 】

次に、図 2 1 に示すように、第 1 受力部 4 3 に対して Z 軸負方向（図 2 1 における下方）の力が作用すると、第 1 受力部 4 3 は、当該方向に移動する。これに伴って、第 1 湾曲部 4 5 c は、第 1 受力部 4 3 に接続された X 軸負側の領域が下方に移動されるため、全体として、下方に移動するように弾性変形する。但し、X 軸正側の端部は第 1 固定部 4 1 に固定されているため、移動しない。図 2 1 において、初期状態の第 1 湾曲部 4 5 c が破線で示されており、弾性変形している状態の第 1 湾曲部 4 5 c が実線で示されている。図 2 1 に示すように、この弾性変形によって、第 1 湾曲部 4 5 c のうち第 1 接続体 2 6 1 s が接続されている部位の接線 L 1 がより垂直に立った状態に変化する。図 2 1 において、変化後の接線は、L 1（Z - ）で示されている。このような接線 L 1 の傾きの変化から理解されるように、第 1 変形体側支持体 2 6 1 の第 1 梁 2 6 1 b は、この傾きの変化に相当する分だけ、水平の状態から左下がりの状態に変化する。この結果、第 1 容量素子 C 1 を構成する電極間の離間距離が減少する。その減少の度合いは、X 軸正側から X 軸負側に向かって（図 2 1 における右側から左側に向かって）次第に大きくなる（離間距離が次第に小さくなる）。

20

【 0 1 1 5 】

図 2 1 に示す例では、第 1 梁 2 6 1 b が左下がりに傾斜することから、とりわけ第 1 梁 2 6 1 b の左端領域において、第 1 検出部位 A 1 が下方に変位した量を超えて、電極間の離間距離が減少する。換言すれば、前述したような片持ち梁構造体によって、第 1 検出部位 A 1 に生じる Z 軸方向の変位が増幅されることになる。

30

【 0 1 1 6 】

このような構成により、第 1 受力部 4 3 に対して Z 軸負方向の力が作用したとき、本実施の形態による力覚センサ 2 0 1 c の第 1 容量素子 C 1 は静電容量値が増大するが、その増大の程度は、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1 c の第 1 容量素子 C 1 よりも大きくなる。

【 0 1 1 7 】

（ 2 - 2 - 2 . 第 2 容量素子 C 2 の静電容量値の変動 ）

40

次に、第 2 容量素子 C 2 の静電容量値の変動について、図 2 2 乃至図 2 5 を参照して説明する。

【 0 1 1 8 】

図 2 2 は、図 1 5 に示す力覚センサ 2 0 1 c の第 1 受力部 4 3 に対して X 軸負方向の力が作用したときの第 2 容量素子 C 2 を示す部分的な概略断面図であり、図 2 3 は、図 1 5 に示す力覚センサ 2 0 1 c の第 1 受力部 4 3 に対して X 軸正方向の力が作用したときの第 2 容量素子 C 2 を示す部分的な概略断面図である。また、図 2 4 は、図 1 5 に示す力覚センサ 2 0 1 c の第 1 受力部 4 3 に対して Z 軸正方向の力が作用したときの第 2 容量素子 C 2 を示す部分的な概略断面図であり、図 2 5 は、図 1 5 に示す力覚センサ 2 0 1 c の第 1 受力部に対して Z 軸負方向の力が作用したときの第 2 容量素子 C 2 を示す部分的な概略断

50

面図である。

【0119】

図22に示すように、第1受力部43に対してX軸負方向（図22における左方向）の力が作用すると、第1受力部43は、当該方向に移動する。これに伴って、第2湾曲部46cは、X軸方向に沿った圧縮力を受けるため、その曲率半径が小さくなるように弾性変形する。図22において、初期状態の第2湾曲部46cが破線で示されており、弾性変形している状態の第2湾曲部46cが実線で示されている。図22に示すように、この弾性変形によって、第2湾曲部46cのうち第2接続体262sが接続されている部位の接線L2がより垂直に立った状態に変化する。図22において、変化後の接線は、L2（X-）で示されている。すると、第2変形体側支持体262の第2梁262bは、この傾きの変化に相当する分だけ、水平の状態から右下がりの状態に変化する。この結果、第2容量素子C2を構成する電極間の離間距離が減少する。その減少の度合いは、X軸負側からX軸正側に向かって（図22における左側から右側に向かって）次第に大きくなる（離間距離が次第に小さくなる）。

10

【0120】

先に説明した第1の実施の形態による力覚センサ1cでは、第2変形体側支持体62が第2湾曲部46cの第2検出部位A2にて当該第2湾曲部46c接続されていたため、第2検出部位A2がZ軸方向に沿って変位した量と同じだけ、電極間の離間距離が一様に変化ようになっていた。ところが、図22に示す例では、第2梁262bが右下がりに傾斜することから、とりわけ第2梁262bの右側領域において、第2検出部位A2が下方に変位した量を超えて、電極間の離間距離が減少する。換言すれば、第2変形体側支持体262を片持ち梁構造体とし、この第2変形体側支持体262が第2検出部位A2とは異なる位置において第2湾曲部46cに接続されていることにより、第2検出部位A2に生じるZ軸方向の変位が増幅されることになる。

20

【0121】

このような構成により、第1受力部43に対してX軸負方向の力が作用したとき、本実施の形態による力覚センサ201cの第2容量素子C2は静電容量値が増大するが、その増大の程度は、第1の実施の形態による力覚センサ1cの第2容量素子C2よりも大きくなる。

【0122】

次に、図23に示すように、第1受力部43に対してX軸正方向（図23における右方向）の力が作用すると、第1受力部43は、当該方向に移動する。これに伴って、第2湾曲部46cは、X軸方向に沿った引張力を受けるため、その曲率半径が大きくなるように弾性変形する。図23において、初期状態の第2湾曲部46cが破線で示されており、弾性変形している状態の第2湾曲部46cが実線で示されている。図23に示すように、この弾性変形によって、第2湾曲部46cのうち第2接続体262sが接続されている部位の接線L2がより水平に寝た状態に変化する。変化後の接線は、L2（X+）で示されている。すると、第2変形体側支持体262の第2梁262bは、この傾きの変化に相当する分だけ、水平の状態から右上がりの状態に変化する。この結果、第2容量素子C2を構成する電極間の離間距離が増大する。その増大の度合いは、X軸負側からX軸正側に向かって（図23における左側から右側に向かって）次第に大きくなる（離間距離が次第に大きくなる）。

30

40

【0123】

図23に示す例では、第2梁262bが右上がりに傾斜することから、とりわけ第2梁262bの右方領域において、第2検出部位A2が上方に変位した量を超えて、電極間の離間距離が増大する。換言すれば、前述したような片持ち梁構造体によって、第2検出部位A2に生じるZ軸方向の変位が増幅されることになる。

【0124】

このような構成により、第1受力部43に対してX軸正方向の力が作用したとき、本実施の形態による力覚センサ201cの第2容量素子C2は、静電容量値が減少するが、そ

50

の減少の程度は、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1 c の第 2 容量素子 C 2 よりも大きくなる。

【 0 1 2 5 】

次に、図 2 4 に示すように、第 1 受力部 4 3 に対して Z 軸正方向（図 2 4 における上方）の力が作用すると、第 1 受力部 4 3 は、当該方向に移動する。これに伴って、第 2 湾曲部 4 6 c は、第 1 受力部 4 3 に接続された X 軸正側の端部が上方に移動されるため、全体として、上方に移動するように弾性変形する。但し、X 軸負側の端部は第 2 固定部 4 2 に固定されているため、移動しない。図 2 4 において、初期状態の第 2 湾曲部 4 6 c が破線で示されており、弾性変形している状態の第 2 湾曲部 4 6 c が実線で示されている。図 2 4 に示すように、この弾性変形によって、第 2 湾曲部 4 6 c のうち第 2 接続体 2 6 2 s が接続されている部位の接線 L 2 がより水平に寝た状態に変化する。変化後の接線は、L 2 (Z +) で示されている。すると、第 2 変形体側支持体 2 6 2 の第 2 梁 2 6 2 b は、この傾きの変化に相当する分だけ、水平の状態から右上がりの状態に変化する。この結果、第 2 容量素子 C 2 を構成する電極間の離間距離が増大する。その増大の度合いは、X 軸負側から X 軸正側に向かって（図 2 4 における左側から右側に向かって）次第に大きくなる（離間距離が次第に大きくなる）。

10

【 0 1 2 6 】

図 2 3 に示す例では、第 2 梁 2 6 2 b が右上がりに傾斜することから、とりわけ第 2 梁 2 6 2 b の右方領域において、第 2 検出部位 A 2 が上方に変位した量を超えて、電極間の離間距離が増大する。換言すれば、前述したような片持ち梁構造体によって、第 2 検出部位 A 2 に生じる Z 軸方向の変位が増幅されることになる。

20

【 0 1 2 7 】

このような構成により、第 1 受力部 4 3 に対して Z 軸正方向の力が作用したとき、本実施の形態による力覚センサ 2 0 1 c の第 2 容量素子 C 2 は、静電容量値が減少するが、その減少の程度は、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1 c の第 2 容量素子 C 2 よりも大きくなる。

【 0 1 2 8 】

次に、図 2 5 に示すように、第 1 受力部 4 3 に対して Z 軸負方向（図 2 5 における下方）の力が作用すると、第 1 受力部 4 3 は、当該方向に移動する。これに伴って、第 2 湾曲部 4 6 c は、第 1 受力部 4 3 に接続された X 軸正側の端部が下方に移動されるため、全体として、下方に移動するように弾性変形する。但し、X 軸負側の端部は第 2 固定部 4 2 に固定されているため、移動しない。図 2 5 において、初期状態の第 2 湾曲部 4 6 c が破線で示されており、弾性変形している状態の第 2 湾曲部 4 6 c が実線で示されている。図 2 5 に示すように、この弾性変形によって、第 2 湾曲部 4 6 c のうち第 2 接続体 2 6 2 s が接続されている部位の接線 L 2 がより垂直に立った状態に変化する。変化後の接線は、L 2 (Z -) で示されている。すると、第 2 変形体側支持体 2 6 2 の第 2 梁 2 6 2 b は、この傾きの変化に相当する分だけ、水平の状態から右下がりの状態に変化する。この結果、第 2 容量素子 C 2 を構成する電極間の離間距離が減少する。その減少の度合いは、X 軸負側から X 軸正側に向かって（図 2 5 における左側から右側に向かって）次第に大きくなる（離間距離が次第に小さくなる）。

30

40

【 0 1 2 9 】

図 2 5 に示す例では、第 2 梁 2 6 2 b が右下がりに傾斜することから、とりわけ第 2 梁 2 6 2 b の右方領域において、第 2 検出部位 A 2 が下方に変位した量を超えて、電極間の離間距離が減少する。換言すれば、前述したような片持ち梁構造体によって、第 2 検出部位 A 2 に生じる Z 軸方向の変位が増幅されることになる。

【 0 1 3 0 】

このような構成により、第 1 受力部 4 3 に対して Z 軸負方向の力が作用したとき、本実施の形態による力覚センサ 2 0 1 c の第 2 容量素子 C 2 は、静電容量値が増大するが、その増大の程度は、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1 c の第 2 容量素子 C 2 よりも大きくなる。

50

【 0 1 3 1 】

(2 - 2 - 3 . 第 3 容量素子 C 3 及び第 4 容量素子 C 4 の静電容量値の変動)

本実施の形態による力覚センサ 2 0 1 c は、Y 座標が正である部分 (図 1 6 参照) と Y 座標が負である部分 (図 1 7 参照) とが対称的な構造となっている。このため、第 3 容量素子 C 3 及び第 4 容量素子 C 4 の静電容量値の変動については、§ 2 - 2 - 1 及び § 2 - 2 - 2 の説明に基づいて、類推的に次のように理解され得る。

【 0 1 3 2 】

すなわち、図示されていないが、第 3 湾曲部 4 7 c 及び第 4 湾曲部 4 8 c が X 軸方向に沿って圧縮されたとき、及び、第 3 湾曲部 4 7 c 及び第 4 湾曲部 4 8 c の、第 2 受力部 4 4 に接続された端部が Z 軸負方向に移動されたときには、各容量素子 C 3、C 4 の静電容量値が増大する。その一方、第 3 湾曲部 4 7 c 及び第 4 湾曲部 4 8 c が X 軸方向に沿って引っ張られたとき、及び、第 3 湾曲部 4 7 c 及び第 4 湾曲部 4 8 c の、第 2 受力部 4 4 に接続された端部が Z 軸正方向に移動されたときには、各容量素子 C 3、C 4 の静電容量値が減少する。

【 0 1 3 3 】

第 3 湾曲部 4 7 c 及び / または第 4 湾曲部 4 8 c に弾性変形が生じると、前述したように第 3 及び / または第 4 梁 2 6 3 b、2 6 4 b が傾斜するため、第 3 容量素子 C 3 及び第 4 容量素子 C 4 の静電容量値の変動は、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1 c の第 3 容量素子 C 3 及び第 4 容量素子 C 4 よりも、大きくなる。

【 0 1 3 4 】

結局、本実施の形態による力覚センサ 2 0 1 c では、受力体 2 0 に作用する力ないしモーメントによって各容量素子 C 1 ~ C 4 に生じる静電容量値の変動は、図 1 4 に示す通りであるが、以上の説明から理解されるように、その変動量は、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1 c における変動量よりも大きい。換言すれば、本実施の形態による力覚センサ 2 0 1 c は、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1 c よりも高感度である。

【 0 1 3 5 】

以上のような本実施の形態によれば、梁 2 6 1 b ~ 2 6 4 b が対応する検出部位 A 1 ~ A 4 とは異なる位置において湾曲部 4 5 c ~ 4 8 c に接続されているため、この梁 2 6 1 b ~ 2 6 4 b によって支持された変位電極 E m 1 ~ E m 4 に生じる変位が増幅される。すなわち、ある大きさの力ないしモーメントが作用した場合に、変位電極 E m 1 ~ E m 4 に生じる変位は、湾曲部 4 5 c ~ 4 8 c の検出部位 A 1 ~ A 4 において変位電極 E m 1 ~ E m 4 が支持されている第 1 の実施の形態による力覚センサ 1 c において当該変位電極 E m 1 ~ E m 4 に生じる変位よりも、大きい。このため、作用した力ないしモーメントに対する感度が高く、より精度の高い計測を行うことができる。

【 0 1 3 6 】

< < < § 3 . 本発明の第 3 の実施の形態による力覚センサ > > >

< 3 - 1 . 構成 >

次に、本発明の第 3 の実施の形態による力覚センサ 3 0 1 c について説明する。

【 0 1 3 7 】

図 2 6 は、第 3 の実施の形態による力覚センサ 3 0 1 c の概略平面図である。また、図 2 7 は、図 2 6 の [2 7] - [2 7] 線断面図であり、図 2 8 は、図 2 6 の [2 8] - [2 8] 線断面図である。但し、図 2 6 では、図面の見やすさのため、受力体 2 0 の図示を省略してある。

【 0 1 3 8 】

図 2 6 乃至図 2 8 に示すように、力覚センサ 3 0 1 c は、湾曲部 4 5 c ~ 4 8 c に各 2 つの容量素子が設けられている点で、第 1 及び第 2 の実施の形態による力覚センサ 1 c、2 0 1 c と異なる。具体的には、図 2 6 及び図 2 7 に示すように、第 1 湾曲部 4 5 c の下面には、第 1 検出部位 A 1 を挟んで、変形体 4 0 の周方向に沿って 2 つの容量素子 C 1 1、C 1 2 が配置されている。同様に、第 2 湾曲部 4 6 c の下面には、第 2 検出部位 A 2 を挟んで、変形体 4 0 の周方向に沿って 2 つの容量素子 C 2 1、C 2 2 が配置されている。

また、図 2 6 及び図 2 8 に示すように、第 3 湾曲部 4 7 c の下面には、第 3 検出部位 A 3 を挟んで、変形体 4 0 の周方向に沿って 2 つの容量素子 C 3 1、C 3 2 が配置されており、第 4 湾曲部 4 8 c の下面には、第 4 検出部位 A 4 を挟んで、変形体 4 0 の周方向に沿って 2 つの容量素子 C 4 1、C 4 2 が配置されている。

【 0 1 3 9 】

図示される例において、第 1 - 1 容量素子 C 1 1、第 1 - 2 容量素子 C 1 2、第 2 - 1 容量素子 C 2 1、第 2 - 2 容量素子 C 2 2、第 3 - 1 容量素子 C 3 1、第 3 - 2 容量素子 C 3 2、第 4 - 1 容量素子 C 4 1 及び第 4 - 2 容量素子 C 4 2 は、Z 軸正方向から見て（上方から見て）、変形体 4 0 の周方向に沿って反時計回り（左回り）にこの順序で配置されている。また、図 2 7 及び図 2 8 に示すように、各湾曲部 4 5 c ~ 4 8 c に 2 つずつ配置された容量素子 C 1 1 ~ C 4 2 は、対応する検出部位 A 1 ~ A 4 から等間隔で配置されている。

10

【 0 1 4 0 】

各容量素子 C 1 1 ~ C 4 2 の構成は、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1 c に採用されている容量素子 C 1 ~ C 4 と、同様である。すなわち、図 2 7 に示すように、第 1 - 1 容量素子 C 1 1 は、第 1 湾曲部 4 5 c に支持された第 1 - 1 変位電極 E m 1 1 と、この第 1 - 1 変位電極 E m 1 1 に対向する位置に配置された第 1 - 1 固定電極 E f 1 1 と、によって構成されている。第 1 - 1 変位電極 E m 1 1 は、第 1 湾曲部 4 5 c に接続された第 1 - 1 変形体側支持体 3 6 1 a の下面に、第 1 - 1 変位基板 I m 1 1 を介して支持されている。第 1 - 1 固定電極 E f 1 1 は、固定体 1 0 の上面に固定された第 1 固定体側支持体 3 7 1 上に、第 1 固定基板 I f 1 を介して支持されている。

20

【 0 1 4 1 】

また、図 2 7 に示すように、第 1 - 2 容量素子 C 1 2 は、第 1 湾曲部 4 5 c に支持された第 1 - 2 変位電極 E m 1 2 と、この第 1 - 2 変位電極 E m 1 2 に対向する位置に配置された第 1 - 2 固定電極 E f 1 2 と、によって構成されている。第 1 - 2 変位電極 E m 1 2 は、第 1 湾曲部 4 5 c に接続された第 1 - 2 変形体側支持体 3 6 1 b の下面に、第 1 - 2 変位基板 I m 1 2 を介して支持されている。第 1 - 2 固定電極 E f 1 2 は、第 1 - 1 固定電極 E f 1 1 と同様に、固定体 1 0 の上面に固定された第 1 固定体側支持体 3 7 1 上に、第 1 固定基板 I f 1 を介して支持されている。すなわち、第 1 固定体側支持体 3 7 1 及び第 1 固定基板 I f 1 は、第 1 - 1 容量素子 C 1 1 及び第 1 - 2 容量素子 C 1 2 に対して共通の構成要素である。

30

【 0 1 4 2 】

図 2 7 に示すように、第 2 - 1 容量素子 C 2 1 は、第 2 湾曲部 4 6 c に支持された第 2 - 1 変位電極 E m 2 1 と、この第 2 - 1 変位電極 E m 2 1 に対向する位置に配置された第 2 - 1 固定電極 E f 2 1 と、によって構成されている。第 2 - 1 変位電極 E m 2 1 は、第 2 湾曲部 4 6 c に接続された第 2 - 1 変形体側支持体 3 6 2 a の下面に、第 2 - 1 変位基板 I m 2 1 を介して支持されている。第 2 - 1 固定電極 E f 2 1 は、固定体 1 0 の上面に固定された第 2 固定体側支持体 3 7 2 上に、第 2 固定基板 I f 2 を介して支持されている。

。

【 0 1 4 3 】

また、図 2 7 に示すように、第 2 - 2 容量素子 C 2 2 は、第 2 湾曲部 4 6 c に支持された第 2 - 2 変位電極 E m 2 2 と、この第 2 - 2 変位電極 E m 2 2 に対向する位置に配置された第 2 - 2 固定電極 E f 2 2 と、によって構成されている。第 2 - 2 変位電極 E m 2 2 は、第 2 湾曲部 4 6 c に接続された第 2 - 2 変形体側支持体 3 6 2 b の下面に、第 2 - 2 変位基板 I m 2 2 を介して支持されている。第 2 - 2 固定電極 E f 2 2 は、第 2 - 1 固定電極 E f 2 1 と同様に、固定体 1 0 の上面に固定された第 2 固定体側支持体 3 7 2 上に、第 2 固定基板 I f 2 を介して支持されている。すなわち、第 2 固定体側支持体 3 7 2 及び第 2 固定基板 I f 2 は、第 2 - 1 容量素子 C 2 1 及び第 2 - 2 容量素子 C 2 2 に対して共通の構成要素である。

40

【 0 1 4 4 】

50

図 28 に示すように、第 3 - 1 容量素子 C 3 1 は、第 3 湾曲部 4 7 c に支持された第 3 - 1 変位電極 E m 3 1 と、この第 3 - 1 変位電極 E m 3 1 に対向する位置に配置された第 3 - 1 固定電極 E f 3 1 と、によって構成されている。第 3 - 1 変位電極 E m 3 1 は、第 3 湾曲部 4 7 c に接続された第 3 - 1 変形体側支持体 3 6 3 a の下面に、第 3 - 1 変位基板 I m 3 1 を介して支持されている。第 3 - 1 固定電極 E f 3 1 は、固定体 1 0 の上面に固定された第 3 固定体側支持体 3 7 3 上に、第 3 固定基板 I f 3 を介して支持されている。

【 0 1 4 5 】

また、図 28 に示すように、第 3 - 2 容量素子 C 3 2 は、第 3 湾曲部 4 7 c に支持された第 3 - 2 変位電極 E m 3 2 と、この第 3 - 2 変位電極 E m 3 2 に対向する位置に配置された第 3 - 2 固定電極 E f 3 2 と、によって構成されている。第 3 - 2 変位電極 E m 3 2 は、第 3 湾曲部 4 7 c に接続された第 3 - 2 変形体側支持体 3 6 3 b の下面に、第 3 - 2 変位基板 I m 3 2 を介して支持されている。第 3 - 2 固定電極 E f 3 2 は、第 3 - 1 固定電極 E f 3 1 と同様に、固定体 1 0 の上面に固定された第 3 固定体側支持体 3 7 3 上に、第 3 固定基板 I f 3 を介して支持されている。すなわち、第 3 固定体側支持体 3 7 3 及び第 3 固定基板 I f 3 は、第 3 - 1 容量素子 C 3 1 及び第 3 - 2 容量素子 C 3 2 に対して共通の構成要素である。

【 0 1 4 6 】

更に、図 28 に示すように、第 4 - 1 容量素子 C 4 1 は、第 4 湾曲部 4 8 c に支持された第 4 - 1 変位電極 E m 4 1 と、この第 4 - 1 変位電極 E m 4 1 に対向する位置に配置された第 4 - 1 固定電極 E f 4 1 と、によって構成されている。第 4 - 1 変位電極 E m 4 1 は、第 4 湾曲部 4 8 c に接続された第 4 - 1 変形体側支持体 3 6 4 a の下面に、第 4 - 1 変位基板 I m 4 1 を介して支持されている。第 4 - 1 固定電極 E f 4 1 は、固定体 1 0 の上面に固定された第 3 固定体側支持体 3 7 3 上に、第 4 固定基板 I f 4 を介して支持されている。

【 0 1 4 7 】

また、図 28 に示すように、第 4 - 2 容量素子 C 4 2 は、第 4 湾曲部 4 8 c に支持された第 4 - 2 変位電極 E m 4 2 と、この第 4 - 2 変位電極 E m 4 2 に対向する位置に配置された第 4 - 2 固定電極 E f 4 2 と、によって構成されている。第 4 - 2 変位電極 E m 4 2 は、第 4 湾曲部 4 8 c に接続された第 4 - 2 変形体側支持体 3 6 4 b の下面に、第 4 - 2 変位基板 I m 4 2 を介して支持されている。第 4 - 2 固定電極 E f 4 2 は、第 4 - 1 固定電極 E f 4 1 と同様に、固定体 1 0 の上面に固定された第 4 固定体側支持体 3 7 4 上に、第 4 固定基板 I f 4 を介して支持されている。すなわち、第 4 固定体側支持体 3 7 4 及び第 4 固定基板 I f 4 は、第 4 - 1 容量素子 C 4 1 及び第 4 - 2 容量素子 C 4 2 に対して共通の構成要素である。その他の構成は第 1 の実施の形態による力覚センサ 1 c とほぼ同様であるため、図面において対応する構成要素には同様の符号を付し、その詳細な説明は省略する。

【 0 1 4 8 】

なお、第 1 - 1 ~ 第 2 - 4 容量素子 C 1 1 ~ C 2 4 は、各容量素子 C 1 1 ~ C 2 4 を構成する変位電極 E m 1 1 ~ E m 2 4 及び固定電極 E f 1 1 ~ E f 2 4 の実効対向面積が全て同一であり、電極間の離間距離も全て等しくなるように構成されている。

【 0 1 4 9 】

< 3 - 2 . 作用 >

次に、図 29 は、図 26 の力覚センサ 3 0 1 c に対して、力ないしモーメントが作用した時に各容量素子 C 1 1 ~ C 2 4 に生じる静電容量値の変動を示す図表である。この図表において、「+」は、容量素子の静電容量値が増大することを示しており、「-」は、容量素子の静電容量値が減少することを示している。

【 0 1 5 0 】

本実施の形態による力覚センサ 3 0 1 c に対して、力ないしモーメントが作用すると、各湾曲部 4 5 c ~ 4 8 c には、作用した力ないしモーメントに応じて、図 3 ~ 図 9 で説明

したような弾性変形が生じる。この弾性変形より、容量素子 $C_{11} \sim C_{42}$ の静電容量値は、図 29 に示すように変動する。すなわち、第 1 - 1 容量素子 C_{11} 及び第 1 - 2 容量素子 C_{12} は、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1 c の第 1 容量素子 C_1 と同様の挙動を示す（図 14 の C_1 の列を参照）。また、第 2 - 1 容量素子 C_{21} 及び第 2 - 2 容量素子 C_{22} は、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1 c の第 2 容量素子 C_2 と同様の挙動を示し（図 14 の C_2 の列を参照）、第 3 - 1 容量素子 C_{31} 及び第 3 - 2 容量素子 C_{32} は、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1 c の第 3 容量素子 C_3 と同様の挙動を示し（図 14 の C_3 の列を参照）、第 4 - 1 容量素子 C_{41} 及び第 4 - 2 容量素子 C_{42} は、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1 c の第 4 容量素子 C_4 と同様の挙動を示す（図 14 の C_4 の列を参照）。

10

【0151】

図 29 に示す図表に鑑み、検出回路 250 は、次の [式 2] に基づいて力覚センサ 301 c に作用したモーメント M_x 、 M_y 、 M_z 及び力 F_z を算出する。本明細書に記載された各式において、 $C_{11} \sim C_{24}$ の記号は、第 1 - 1 ~ 第 2 - 4 容量素子 $C_{11} \sim C_{24}$ の静電容量値の変動量をそれぞれ示している。また、 M_x 、 M_y 、 M_z 及び F_z の末尾の符号は、[式 2] を用いて計測された力ないしモーメントと、後述される [式 3] を用いて計測された力ないしモーメントと、を区別するためのものである。

[式 2]

$$\begin{aligned} M_{x1} &= -C_{11} - C_{21} + C_{31} + C_{41} \\ M_{y1} &= C_{11} - C_{21} - C_{31} + C_{41} \\ M_{z1} &= -C_{11} + C_{21} - C_{31} + C_{41} \\ F_{z1} &= -(C_{11} + C_{21} + C_{31} + C_{41}) \end{aligned}$$

20

この [式 2] は、各湾曲部 45 c ~ 48 c に配置されている各 2 つの容量素子のうち、Z 軸正方向から見て（上方から見て）、変形体 40 の右回りの方向により進んでいる方の容量素子を用いて、作用した力ないしモーメントを計測するための式である。

【0152】

あるいは、力覚センサ 301 c に作用したモーメント M_x 、 M_y 、 M_z 及び力 F_z は、次の [式 3] を用いても、算出される。

[式 3]

$$\begin{aligned} M_{x2} &= -C_{12} - C_{22} + C_{32} + C_{42} \\ M_{y2} &= C_{12} - C_{22} - C_{32} + C_{42} \\ M_{z2} &= -C_{12} + C_{22} - C_{32} + C_{42} \\ F_{z2} &= -(C_{12} + C_{22} + C_{32} + C_{42}) \end{aligned}$$

30

この [式 3] は、各湾曲部 45 c ~ 48 c に配置されている各 2 つの容量素子のうち、Z 軸正方向から見て（上方から見て）、変形体 40 の左回りの方向により進んでいる方の容量素子を用いて、作用した力ないしモーメントを計測するための式である。

【0153】

< 3 - 3 . 故障診断 >

本実施の形態による力覚センサ 301 c は、単一の力覚センサ 301 c によって、故障診断を行うことが可能である。ここでは、その診断方法について説明する。

40

【0154】

前述したように、力覚センサ 301 c に配置されている 8 つの容量素子 $C_{11} \sim C_{24}$ は、電極間の実効対向面積及び離間距離が同一である。さらに、[式 2] に用いられる 4 つの容量素子 C_{11} 、 C_{21} 、 C_{31} 、 C_{41} と、[式 3] に用いられる 4 つの容量素子 C_{12} 、 C_{22} 、 C_{32} 、 C_{42} とは、第 1 ~ 第 4 湾曲部 45 c ~ 48 c に規定された検出部位 A1 ~ A4 に対して対称的に配置されている。これらのことから、正常に機能している力覚センサ 301 c では、[式 2] に基づいて計測された力ないしモーメントと [式 3] に基づいて計測された力ないしモーメントとが、一致することになる。すなわち、正常に機能している力覚センサ 301 c では、以下の [式 4] の関係が成立する。

[式 4]

50

$$M \times 1 = M \times 2$$

$$M y 1 = M y 2$$

$$M z 1 = M z 2$$

$$F z 1 = F z 2$$

【 0 1 5 5 】

このことから、次のようにして力覚センサ 3 0 1 c の故障診断を行うことができる。すなわち、検出回路 2 5 0 は、力覚センサ 3 0 1 c に作用した力ないしモーメントを [式 2] 及び [式 3] の両方に基づいて計測し、[式 2] に基づいて計測された値 ($M \times 1$ 、 $M y 1$ 、 $M z 1$ 、 $F z 1$) と、[式 3] に基づいて計測された値 ($M \times 2$ 、 $M y 2$ 、 $M z 2$ 、 $F z 2$) と、の差の絶対値が、全て、所定の閾値 ([式 5] における $C m x$ 、 $C m y$ 、 $C m z$ 、 $C f z$) 以下であれば、当該力覚センサ 3 0 1 c が正常に機能していると判定する。すなわち、次の [式 5] が成立しているとき、検出回路 2 5 0 は、力覚センサ 3 0 1 c が正常に機能していると判定する。なお、本実施の形態では、所定の閾値 $C m x$ 、 $C m y$ 、 $C m z$ 、 $C f z$ は、予め検出回路 2 5 0 内に格納されている。

[式 5]

$$| M \times 1 - M \times 2 | \leq C m x \quad \text{且つ}$$

$$| M y 1 - M y 2 | \leq C m y \quad \text{且つ}$$

$$| M z 1 - M z 2 | \leq C m z \quad \text{且つ}$$

$$| F z 1 - F z 2 | \leq C f z$$

【 0 1 5 6 】

その一方、前記差のうち少なくとも 1 つが、所定の閾値 $C 1$ よりも大きければ、検出回路 2 5 0 は、力覚センサ 3 0 1 c が正常に機能していない (故障している) と判定する。すなわち、次の [式 6] が成立しているとき、検出回路 2 5 0 は、力覚センサ 3 0 1 c が正常に機能していないと判定する。

[式 6]

$$| M \times 1 - M \times 2 | > C m x \quad \text{または}$$

$$| M y 1 - M y 2 | > C m y \quad \text{または}$$

$$| M z 1 - M z 2 | > C m z \quad \text{または}$$

$$| F z 1 - F z 2 | > C f z$$

【 0 1 5 7 】

以上のような本実施の形態による力覚センサ 3 0 1 c によれば、第 1 ~ 第 4 湾曲部 4 5 c ~ 4 8 c に 2 つずつ配置された容量素子のうち、各 1 つ (合計 4 つ) を用いて計測された力ないしモーメントの値と、残りの各 1 つ (合計 4 つ) を用いて計測された力ないしモーメントの値と、の差に基づいて、単一の力覚センサ 3 0 1 c によってその故障を診断することができる。このことにより、力覚センサ 3 0 1 c の安全性及び信頼性が向上される。

【 0 1 5 8 】

以上の説明では、力覚センサ 3 0 1 c の故障診断を行うために、[式 2] に基づいて求められた特定の力ないしモーメントと [式 3] に基づいて求められた当該特定の力ないしモーメントとを比較していたが、このような方法には限定されない。例えば、[式 2] と「式 3」との和に基づいて求められた特定の力ないしモーメント (例 : $M \times 1 + M \times 2$) と、[式 2] または「式 3」のいずれか一方に基づいて求められた当該特定の力ないしモーメント (例 : $M \times 1$ または $M \times 2$) とを比較することによって、故障診断を行っても良い。具体的な診断の方法は、上述した方法と同様である。すなわち、X 軸まわりのモーメント $M x$ に着目して故障診断を行う場合、[式 2] と「式 3」との和である $M \times 1 + M \times 2$ に基づいて求められた特定の力ないしモーメントを $M 1 2$ とすると、 $| M \times 1 2 - M \times 1 |$ または $| M \times 1 2 - M \times 2 |$ が所定の閾値を超えているか否かが評価される。このことは、他の力ないしモーメントに基づいて故障診断を行う場合にも当てはまる。

【 0 1 5 9 】

更に、以上の説明では、力ないしモーメントを測定するために、[式 2] 及び「式 3」

のうちの一方の式を用いたが、[式2]と「式3」との和(例： $M \times 1 + M \times 2$)を用いても良い。

【0160】

<<< §4. 本発明の第4の実施の形態による力覚センサ >>>
< 4-1. 構成 >

次に、本発明の第4の実施の形態による力覚センサ401cについて説明する。

【0161】

図30は、本発明の第4の実施の形態による力覚センサ401cの概略平面図であり、図31は、図30の[31]-[31]線断面図であり、図32は、図30の[32]-[32]線断面図である。但し、図30では、図面の見やすさのため、受力体20の図示を省略してある。

10

【0162】

図30乃至図32に示すように、本実施の形態による力覚センサ401cは、第1～第4湾曲部445c～448cが互いに異なる2つのバネ定数を有する部分から構成されている点で、第3の実施の形態による力覚センサ301cと異なる。具体的には、図30及び図31に示すように、第1湾曲部445cは、正のX軸と正のV軸とで挟まれた領域に位置する、相対的にバネ定数が小さい第1低弾力部445Lと、正のV軸と正のY軸とで挟まれた領域に位置する、相対的にバネ定数大きい第1高弾力部445Hと、によって構成されている。第1低弾力部445Lと第1高弾力部445Hとは、第1検出部位A1において(V軸上において)一体的に接続されている。同様に、第2湾曲部446cは、正のY軸と正のW軸とで挟まれた領域に位置する、相対的にバネ定数が小さい第2低弾力部446Lと、正のW軸と負のX軸とで挟まれた領域に位置する、相対的にバネ定数大きい第2高弾力部446Hと、によって構成されている。第2低弾力部446Lと第2高弾力部446Hとは、第2検出部位A2において(W軸上において)一体的に接続されている。

20

【0163】

また、図30及び図32に示すように、第3湾曲部447cは、負のX軸と負のV軸とで挟まれた領域に位置する、相対的にバネ定数が小さい第3低弾力部447Lと、負のV軸と負のY軸とで挟まれた領域に位置する、相対的にバネ定数大きい第3高弾力部447Hと、によって構成されている。第3低弾力部447Lと第3高弾力部447Hとは、第3検出部位A3において(V軸上において)一体的に接続されている。同様に、第4湾曲部448cは、負のY軸と負のW軸とで挟まれた領域に位置する、相対的にバネ定数が小さい第4低弾力部448Lと、負のW軸と正のX軸とで挟まれた領域に位置する、相対的にバネ定数大きい第4高弾力部448Hと、によって構成されている。第4低弾力部448Lと第4高弾力部448Hとは、第4検出部位A4において(W軸上において)一体的に接続されている。

30

【0164】

図31及び図32に示すように、各低弾力部445L～448Lは、各高弾力部445H～448Hと比較して、Z軸方向(上下方向)の厚みが小さく構成されている。もちろん、このような態様には限定されず、他の実施の形態では、各低弾力部445L～448Lが各高弾力部445H～448Hと比較して、径方向の幅が小さく構成されることによりバネ定数が相違していても良いし、互いに異なる材質で構成されることによりバネ定数が相違していても良い。

40

【0165】

図30乃至図32に示すように、各湾曲部445c～448cには、第3の実施の形態による力覚センサ301cと同様に、各2つの容量素子C11～C42が配置されている。当該各2つの容量素子は、対応する検出部位A1～A4を挟んで、変形体40の周方向に沿って配置されている。具体的には、第1-1容量素子C11は、第1低弾力部445Lの下面に配置されており、第1-2容量素子C12は、第1高弾力部445Hの下面に配置されている。第2-1容量素子C21は、第2低弾力部446Lの下面に配置されて

50

おり、第2-2容量素子C22は、第2高弾力部446Hの下面に配置されている。第3-1容量素子C31は、第3低弾力部447Lの下面に配置されており、第3-2容量素子C32は、第3高弾力部447Hの下面に配置されている。第4-1容量素子C41は、第4低弾力部448Lの下面に配置されており、第4-2容量素子C42は、第4高弾力部448Hの下面に配置されている。その他の構成は第3の実施の形態と同様であるため、図面において対応する構成要素には同様の符号を付し、その詳細な説明は省略する。

【0166】

< 4-2. 作用 >

次に、図33は、図30の力覚センサ401cに対して、力ないしモーメントが作用した時に各容量素子C11～C24に生じる静電容量値の変動を示す図表である。この図表において、「+」は、静電容量値が増大することを示しており、「++」は、静電容量値が大きく増大することを示している。また、「-」は、静電容量値が減少することを示しており、「--」は、静電容量値が大きく減少することを示している。

10

【0167】

本実施の形態による力覚センサ401cに対して、力ないしモーメントが作用すると、各湾曲部445c～448cには、全体として、作用した力ないしモーメントに応じて、図3～図9で説明したような弾性変形が生じる。したがって、この弾性変形により、容量素子C11～C42の静電容量値が変動する。この変動は、第3の実施の形態による力覚センサ301cの各容量素子C11～C42の静電容量値とほぼ同様である。但し、バネ定数の相違から、各湾曲部445c～448cでは、低弾力部444L～448Lにおいて相対的に大きな弾性変形が生じ、高弾力部444H～448Hにおいて相対的に小さな弾性変形が生じる。このため、図33に示すように、低弾力部444L～448Lに配置された容量素子C11、C21、C31、C41において相対的に大きな静電容量値の変動が生じ、高弾力部444H～448Hに配置された容量素子C12、C22、C32、C42において相対的に小さな静電容量値の変動が生じる。

20

【0168】

力覚センサ401cに作用したモーメントMx、My、Mz及び力Fzは、図33に示す図表に基づき、次の[式7]を用いて算出される。Mx、My、Mz及びFzの末尾の符号は、[式7]を用いて算出される力ないしモーメントと、後述される[式8]を用いて算出される力ないしモーメントと、を区別するためのものである。

30

[式7]

$$\begin{aligned} M_{x1} &= -C_{11} - C_{21} + C_{31} + C_{41} \\ M_{y1} &= C_{11} - C_{21} - C_{31} + C_{41} \\ M_{z1} &= -C_{11} + C_{21} - C_{31} + C_{41} \\ F_{z1} &= -(C_{11} + C_{21} + C_{31} + C_{41}) \end{aligned}$$

この[式7]は、第1～第4湾曲部445c～448cに配置されている各2つの容量素子のうち、低弾力部445L～448Lに配置されている方の4つの容量素子C11、C21、C31、C41を用いて、作用した力ないしモーメントを計測するための式である。

40

【0169】

あるいは、力覚センサ401cに作用したモーメントMx、My、Mz及び力Fzは、次の[式8]を用いても算出される。

[式8]

$$\begin{aligned} M_{x2} &= -C_{12} - C_{22} + C_{32} + C_{42} \\ M_{y2} &= C_{12} - C_{22} - C_{32} + C_{42} \\ M_{z2} &= -C_{12} + C_{22} - C_{32} + C_{42} \\ F_{z2} &= -(C_{12} + C_{22} + C_{32} + C_{42}) \end{aligned}$$

この[式8]は、第1～第4湾曲部445c～448cに配置されている各2つの容量素子のうち、高弾力部445H～448Hに配置されている方の4つの容量素子C12、

50

C 2 2、C 3 2、C 4 2を用いて、作用した力ないしモーメントを計測するための式である。

【 0 1 7 0 】

本実施の形態では、図 3 3 に示す図表に鑑み、検出回路 4 5 0 は、低弾力部 4 4 5 L ~ 4 4 8 L に配置されている 4 つの容量素子 C 1 1、C 2 1、C 3 1、C 4 1 の静電容量値の変動に基づく [式 7] を用いて作用した力ないしモーメントを計測する。このことにより、S / N に優れた高感度の計測が可能となる。もちろん、[式 8] を用いて作用した力ないしモーメントを計測しても良い。

【 0 1 7 1 】

< 4 - 3 . 故障診断 >

本実施の形態による力覚センサ 4 0 1 c は、次の点で、第 3 の実施の形態による力覚センサ 3 0 1 c よりも高度な故障診断を行うことができる。すなわち、第 3 の実施の形態による力覚センサ 3 0 1 c は、電極が破損したときや、電極間に異物が混入したときには、故障を検知することが可能である。その一方、変形体 4 0 に金属疲労が生じることによって当該力覚センサ 3 0 1 c が正常に機能しなくなった場合には、[式 2] に基づいて計測された力ないしモーメント ($M_x 1$ 、 $M_y 1$ 、 $M_z 1$ 、 $F_z 1$) と [式 3] に基づいて計測された力ないしモーメント ($M_x 2$ 、 $M_y 2$ 、 $M_z 2$ 、 $F_z 2$) との間に、相違が生じない可能性がある。この場合、力覚センサ 3 0 1 c は、故障診断を適正に行うことができない。変形体 4 0 に金属疲労が生じると、変形体 4 0 を構成する弾性体にクラック等が生じ、最終的には変形体 4 0 が破断してしまう恐れがある。このため、金属疲労による故障をも検知することが可能な力覚センサを提供できれば、信頼性及び安全性を一層高めることができる。

【 0 1 7 2 】

本実施の形態による力覚センサ 4 0 1 c は、このような問題に対処するためのものである。すなわち、力覚センサ 4 0 1 c は、変形体 4 0 に金属疲労が生じることによって正常に機能しなくなった場合にも、適正に故障診断を行うことができるのである。以下、本実施の形態による力覚センサ 4 0 1 c による故障診断について、詳細に説明する。

【 0 1 7 3 】

まず、故障診断の原理について説明する。力覚センサ 4 0 1 c の変形体 4 0 に繰り返しの負荷が作用すると、当該変形体 4 0 には、金属疲労が生じる。この金属疲労が蓄積されると、変形体 4 0 の強度が低下し、最終的には変形体 4 0 が破断することになる。一般的に、金属材料に金属疲労が蓄積すると、当該金属材料が軟化する。このため、第 1 ~ 第 4 湾曲部 4 4 5 c ~ 4 4 8 c のバネ定数が、低下する。換言すれば、変形体 4 0 は、金属疲労の蓄積によって、初期状態と比較して、作用する力ないしモーメントに対する感度が上昇する。

【 0 1 7 4 】

図 3 4 は、図 3 0 に示す力覚センサ 4 0 1 c に金属疲労が生じていない状態 (初期状態) において、当該力覚センサ 4 0 1 c に作用する X 軸まわりのモーメント M_x の大きさと、当該力覚センサ 4 0 1 c から出力される、モーメント M_x を示す電気信号と、の関係を示すグラフであり、図 3 5 は、図 3 0 の力覚センサ 4 0 1 c に金属疲労が生じている状態において、力覚センサ 4 0 1 c に作用する X 軸まわりのモーメント M_x の大きさと、当該力覚センサ 4 0 1 c から出力される、モーメント M_x を示す電気信号と、の関係を示すグラフである。図 3 4 及び図 3 5 の符号「 T 1 」は、低弾力部 4 4 5 L ~ 4 4 8 L に配置された 4 つの容量素子の静電容量値の変動量に基づく電気信号である第 1 電気信号を示しており、符号「 T 2 」は、高弾力部 4 4 5 H ~ 4 4 8 H に配置された 4 つの容量素子の静電容量値の変動量に基づく電気信号である第 2 電気信号を示している。また、「 T 1 」及び「 T 2 」の末尾の符号は、初期状態における電気信号 (末尾に a を付加) と、金属疲労が蓄積している状態における電気信号 (末尾に b を付加) と、を区別するためのものである。

【 0 1 7 5 】

第1電気信号T1及び第2電気信号T2を具体的に書き下すと、次の[式9]のようになる。

[式7]

$$T1(T1a, T1b) = -C11 - C21 + C31 + C41$$

$$T2(T2a, T2b) = -C12 - C22 + C32 + C42$$

【0176】

図34を参照すると、初期状態の第1電気信号T1aを示すグラフ(直線)の傾き(感度)は、2.0であり、初期状態の第2電気信号T2aを示すグラフ(直線)の傾き(感度)は、0.5である。その一方、図35を参照すると、金属疲労が蓄積している状態の第1電気信号T1bを示すグラフ(直線)の傾き(感度)は、3.0であり、金属疲労が蓄積している状態の第2電気信号T2bを示すグラフ(直線)の傾き(感度)は、0.6である。

【0177】

これらのことから、力覚センサ401cは、変形体への金属疲労の蓄積によって、作用するX軸まわりのモーメントMxに対する感度が上昇していることが分かる。とりわけ、低弾力部445L~448Lに配置された4つの容量素子の検出感度が50%も上昇している。その一方、高弾力部445H~448Hに配置された4つの容量素子の検出感度も上昇しているが、その割合は20%にとどまっている。

【0178】

ここで着目すべきは、低弾力部445L~448Lに配置された4つの容量素子C11、C21、C31、C41と高弾力部445H~448Hに配置された4つの容量素子C12、C22、C32、C42とで、感度の変化が異なっているということである。このような差異は、高弾力部445H~448Hに生じる歪よりも低弾力部445L~448Lに生じる歪の方が大きいため、相対的に低弾力部445L~448Lに金属疲労が多く蓄積することに起因している。このような感度の変化を第1電気信号T1と第2電気信号T2との比率に着目して定量的に評価すると、次のとおりである。すなわち、初期状態では、第1電気信号T1aと第2電気信号T2aとの比率(T1a/T2a)は、4.0であったが、金属疲労が蓄積すると、第1電気信号T1bと第2電気信号T2bとの比率(T1b/T2b)は、5.0に上昇した。

【0179】

金属疲労が発現するメカニズムを踏まえれば、この比率T1/T2は、繰り返しの負荷(力ないしモーメント)が作用することに伴って4.0から5.0まで次第に上昇する。本実施の形態による力覚センサ401cは、作用した力ないしモーメントの計測に加え、前記比率T1/T2の変化に着目することによって、力覚センサ1cの故障診断をも行う。故障診断は、検出回路450が、計測時点における第1電気信号T1と第2電気信号T2との比率(T1/T2)と、初期状態における第1電気信号T1aと第2電気信号T2aとの比率(T1a/T2a)との差((T1/T2) - (T1a/T2a))が所定の値(閾値C)を超えているか否かを評価することによって、行われる。すなわち、以下の[式10]が成立しているとき、検出回路450は、力覚センサ401cが正常に機能していると判定する。なお、本実施の形態では、初期状態における第1電気信号T1aと第2電気信号T2aとの比率(T1a/T2a)及び閾値Cは、予め検出回路450内に記憶されている。

[式10]

$$(T1/T2) - (T1a/T2a) > C \quad (C: \text{閾値})$$

【0180】

一方、以下の[式11]が成立しているとき、検出回路450は、力覚センサ401cが正常に機能していない(故障している)と判定する。

[式11]

$$(T1/T2) - (T1a/T2a) < C \quad (C: \text{閾値})$$

【0181】

以上の説明においては、力覚センサ 401c に対して X 軸まわりのモーメント M_x が作用した場合を例に説明を行ったが、その他のモーメント M_y 、 M_z ないし力 F_z が作用した場合も、同様にして故障診断を行うことができる。具体的には、着目する力ないしモーメントについて、[式 7] に記載された式を第 1 電気信号 T1 とし、且つ、[式 8] に記載された式を第 2 電気信号 T2 とする。このとき、力覚センサ 401c に作用する力ないしモーメントと第 1 及び第 2 電気信号 T1、T2 との関係は、初期状態では図 34 に示すグラフと同様であり、変形体 40 に金属疲労が蓄積している状態では図 35 に示すグラフと同様である。但し、Z 軸方向の力 F_z が作用した場合には、横軸の「モーメント」を「力」と読み替えることとする。したがって、いずれの力ないしモーメントが作用した場合であっても、前述した [式 10] 及び [式 11] に基づいて適正に力覚センサ 401c の故障診断が行われる。

10

【0182】

以上のような本実施の形態によれば、力ないしモーメントを計測しつつ、変形体 40 に発現した金属疲労による故障をも検知可能な力覚センサ 401c を提供することができる。これにより、力覚センサ 401c の信頼性及び安全性が一層高められる。

【0183】

<<< § 5 . 本発明の第 5 の実施の形態による力覚センサ >>>

次に、本発明の第 5 の実施の形態による力覚センサ 501c について説明する。

【0184】

図 36 は、本発明の第 5 の実施の形態による力覚センサ 501c の基本構造 501 を示す概略平面図であり、図 37 は、図 36 の [37] - [37] 線断面図である。

20

【0185】

図 36 及び 37 に示すように、基本構造 501 は、固定体 510 及び受力体 520 の構造が第 1 の実施の形態による力覚センサ 1c の基本構造 1 とは異なっている。具体的には、基本構造 501 の固定体 510 及び受力体 520 は、共に円環（円筒）の形状を有している。そして、図 36 及び図 37 に示すように、Z 軸方向から見て、固定体 510 は変形体 40 の内側に配置されており、受力体 520 は、変形体 40 の外側に配置されている。固定体 510、受力体 520 及び変形体 40 は、それらの中心軸線がいずれも Z 軸と重なっており、互いに同心となっている。また、図 37 に示すように、固定体 510 は、その下端の Z 座標値が変形体 40 の下端（検出部位 A1 ~ A4）の Z 座標値よりも小さくなるように配置されている。更に、受力体 520 は、その上端の Z 座標値が変形体 40 の上端の Z 座標値よりも大きくなるように配置されている。

30

【0186】

以上のような固定体 510、受力体 520 及び変形体 40 の配置に伴って、第 1 ~ 第 4 接続部材 531 ~ 534 の配置も、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1c とは異なっている。すなわち、図 36 及び図 37 に示すように、第 1 接続部材 531 は、正の X 軸上にて、固定体 510 の外側面（X 軸正方向に面する側面）と変形体 40 の内側面（X 軸負方向に面する側面）とを接続している。他方、第 2 接続部材 532 は、負の X 軸上にて、固定体 510 の外側面（X 軸負方向に面する側面）と変形体 40 の内側面（X 軸正方向に面する側面）とを接続している。更に、図 36 に示すように、正の Y 軸上において、受力体 520 の内側面（Y 軸負方向に面する側面）と変形体 40 の外側面（Y 軸正方向に面する側面）とが第 3 接続部材 533 によって接続されており、負の Y 軸上において、受力体 520 の内側面（Y 軸正方向に面する側面）と変形体 40 の外側面（Y 軸負方向に面する側面）とが第 4 接続部材 534 によって接続されている。その他の構成は第 1 の実施の形態による力覚センサ 1c の基本構造 1 と同様である。このため、図面において、対応する構成要素には同様の符号を付し、その詳細な説明は省略する。

40

【0187】

図示されていないが、以上のような基本構造 501 に対して、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1c と同様の配置にて 4 つの容量素子を配置することにより、力覚センサ 501c を構成することができる。なお、図 37 には、固定電極を配置するための部材が示さ

50

れていないが、力覚センサ 5 0 1 c が取り付けられる部位に適宜固定電極を配置しても良いし、あるいは固定体 5 1 0 に付加的な部材を固定し、この部材に固定電極を配置しても良い。

【 0 1 8 8 】

以上のような力覚センサ 5 0 1 c は、例えばロボットの関節など、互いに相対移動する第 1 部材及び第 2 部材から構成される機構部に好適に設置され得る。すなわち、第 1 部材に固定体 5 1 0 を連結し、第 2 部材に受力体 5 2 0 を連結すれば、限られたスペースに、他の部材と干渉しないような態様で、力覚センサ 5 0 1 c を配置することができる。

【 0 1 8 9 】

なお、力覚センサ 5 0 1 c に作用した力ないしモーメントを計測するための方法は、第 1 の実施の形態による力覚センサ 1 c と同様であるため、ここでは、その詳細な説明は省略する。

10

【 0 1 9 0 】

以上のような基本構造 5 0 1 の変形例として、次のような基本構造 5 0 2 も考えられる。

【 0 1 9 1 】

図 3 8 は、図 3 6 の基本構造 5 0 1 の変形例を示す概略平面図であり、図 3 9 は、図 3 8 の [3 9] - [3 9] 線断面図である。

【 0 1 9 2 】

図 3 8 及び図 3 9 に示すように、本変形例による基本構造 5 0 2 は、変形体 5 4 0 に湾曲部が設けられていない点で、図 3 6 及び図 3 7 に示す基本構造 5 0 1 と異なる。したがって、本変形例の変形体 5 4 0 は、円環（円筒）の形状を有し、その上面及び下面は、X Y 平面と平行になっている。その他の構成は、前述した基本構造 5 0 1 と同様であるため、図面において、対応する構成部分には同様の符号を付し、その詳細な説明は省略する。

20

【 0 1 9 3 】

図 4 0 は、図 3 8 の基本構造 5 0 2 を用いた力覚センサ 5 0 2 c の一例を示す概略平面図である。図 4 0 に示す力覚センサ 5 0 2 c は、作用した力ないしモーメントによって生じる変形体 4 0 の弾性変形によって、内側面（原点 O に面する側面）に生じる径方向の変位を用いて、当該力ないしモーメントを計測するようになっている。この場合、図 4 0 に示すように、変形体 5 4 0 の内側面のうち、V 軸及び W 軸と重なる 4 つの部位に、それぞれ変位電極 E m 1 ~ E m 4 を設け、固定体 5 1 0 の外側面のうち、各変位電極 E m 1 ~ E m 4 に対向する部位に固定電極 E f 1 ~ E f 4 を設ければよい。このような構成によって、V 軸上及び W 軸上の 4 箇所に、4 つの容量素子 C 1 ~ C 4 が構成される。本変形例による基本構造 5 0 2 を用いた力覚センサ 5 0 2 c では、これら 4 つの容量素子 C 1 ~ C 4 に基づいて作用した力ないしモーメントを検出することになる。

30

【 0 1 9 4 】

以上のような力覚センサ 5 0 2 c を用いて作用した力ないしモーメントを計測するための具体的な原理は、例えば、本件出願人名義の特許第 4 9 4 8 6 3 0 号に記載されているため、ここでは、その詳細な説明は省略する。

40

【 0 1 9 5 】

以上のような基本構造 5 0 1、5 0 2 は、受力体 5 2 0、変形体 4 0、5 4 0、接続部材 5 3 1 ~ 5 3 4 及び固定体 5 1 0 が同心円状に、且つ、X Y 平面に沿って、配置されている。このため、基本構造 5 0 1、5 0 2 の各構成要素を切削加工によって一体的に成形することができる。このような加工により、ヒステリシスの無い力覚センサ 5 0 1 c、5 0 2 c を提供することができる。

【 0 1 9 6 】

< < < § 6 . その他の変形例 > > >

次に、図 4 1 及び図 4 2 を参照して、以上の各実施の形態による力覚センサないし基本構造に対して適用可能な変形体 6 4 0 の変形例について説明する。

50

【 0 1 9 7 】

図 4 1 は、矩形の変形体 6 4 0 を示す概略平面図である。また、図 4 2 は、図 4 1 の概略断面図であり、図 4 2 (a) は、図 4 1 の [4 2 a] - [4 2 a] 線断面図であり、図 4 2 (b) は、図 4 1 の [4 2 b] - [4 2 b] 線断面図である。

【 0 1 9 8 】

本変形例による変形体 6 4 0 は、全体として矩形の形状を有している。ここでは、図 4 1 に示すように、正方形の変形体 6 4 0 を例に挙げて説明する。変形体 6 4 0 は、正の X 軸上に位置する第 1 固定部 6 4 1 と、負の X 軸上に位置する第 2 固定部 6 4 2 と、正の Y 軸上に位置する第 1 受力部 6 4 3 と、負の Y 軸上に位置する第 2 受力部 6 4 4 と、を有している。各固定部 6 4 1、6 4 2 及び各受力部 6 4 3、6 4 4 は、変形体 6 4 0 のうち固定体 1 0 及び受力体 2 0 が接続される領域であって、変形体 6 4 0 の他の領域と異なる特性を有する部位ではない。したがって、各固定部 6 4 1、6 4 2 及び各受力部 6 4 3、6 4 4 の材質は、変形体 6 4 0 の他の領域と同一である。但し、説明の便宜上、図面においては、変形体 6 4 0 の他の領域とは異なる色で示してある。

10

【 0 1 9 9 】

図 4 1 に示すように、変形体 6 4 0 は、更に、第 1 固定部 6 4 1 と第 1 受力部 6 4 3 との間 (X Y 平面の第 1 象限) に位置する第 1 変形部 6 4 5 と、第 1 受力部 6 4 3 と第 2 固定部 6 4 2 との間 (X Y 平面の第 2 象限) に位置する第 2 変形部 6 4 6 と、第 2 固定部 6 4 2 と第 2 受力部 6 4 4 との間 (X Y 平面の第 3 象限) に位置する第 3 変形部 6 4 7 と、第 2 受力部 6 4 4 と第 1 固定部 6 4 1 との間 (X Y 平面の第 4 象限) に位置する第 4 変形部 6 4 8 と、を有している。各変形部 6 4 5 ~ 6 4 8 の両端は、隣接する固定部 6 4 1、6 4 2 及び受力部 6 4 3、6 4 4 にそれぞれ一体的に連結されている。このような構造によって、受力部 4 3、4 4 に作用した力ないしモーメントが確実に各変形部 6 4 5 ~ 6 4 8 に伝達され、これによって、当該作用した力ないしモーメントに応じた弾性変形が各変形部 6 4 5 ~ 6 4 8 に生じるようになっている。

20

【 0 2 0 0 】

図 4 1 に示すように、第 1 ~ 第 4 変形部 6 4 5 ~ 6 4 8 は、Z 軸方向から見て全て直線状に構成されている。また、原点 O から各固定部 6 4 1、6 4 2 及び各受力部 6 4 3、6 4 4 までの距離は全て等しいため、各変形部 6 4 5 ~ 6 4 8 は、それぞれ、正方形の一辺を構成するように配置されている。

30

【 0 2 0 1 】

更に、図 4 2 (a) 及び図 4 2 (b) に示すように、変形体 6 4 0 の各変形部 6 4 5 ~ 6 4 8 は、Z 軸負方向に膨出するように湾曲した湾曲部 6 4 5 c ~ 6 4 8 c を有している。図示される例では、各変形部 6 4 5 ~ 6 4 8 が全体として湾曲部 6 4 5 c ~ 6 4 8 c を形成している。このため、図 4 2 (a) 及び図 4 2 (b) では、変形部の符号と湾曲部の符号とを併記してある。図示されるように、第 1 湾曲部 6 4 5 c のうち最も下方 (Z 軸負方向) に位置する部位は、正の V 軸上に存在している。そして、第 1 湾曲部 6 4 5 c の、第 1 固定部 6 4 1 から前記最も下方に位置する部位第 1 に至るまでの形状は、第 1 受力部 6 4 3 から前記最も下方に位置する部位に至るまでの形状と同一である。換言すれば、第 1 湾曲部 6 4 5 c は、変形体 6 4 0 の長さ方向において、正の V 軸に関して対称的な形状を有している。

40

【 0 2 0 2 】

このことは、残りの 3 つの湾曲部 6 4 6 c、6 4 7 c、6 4 8 c においても、同様である。すなわち、第 2 湾曲部 6 4 6 c は、最も下方に位置する部位が正の W 軸上に存在しており、且つ、正の W 軸に関して対称的な形状を有している。第 3 湾曲部 6 4 7 c は、最も下方に位置する部位が負の V 軸上に存在しており、且つ、負の V 軸に関して対称的な形状を有している。第 4 湾曲部 6 4 8 c は、最も下方に位置する部位が負の W 軸上に存在しており、且つ、負の V 軸に関して対称的な形状を有している。

【 0 2 0 3 】

図 4 2 (a) 及び図 4 2 (b) に示すように、変形体 6 4 0 には、第 1 ~ 第 4 湾曲部 6

50

45c～648cの最も下方に位置する部位に、すなわちZ軸方向から見て各湾曲部645c～648cがV軸及びW軸と重なる部位の下部に、各湾曲部645c～648cに生じる弾性変形を検出するための検出部位A1～A4が規定されている。なお、図41では、検出部位A1～A4が変形体640の上面（手前側の面）に設けられているように示されているが、実際は、変形体640の下面（奥側の面）に設けられている（図42参照）。

【0204】

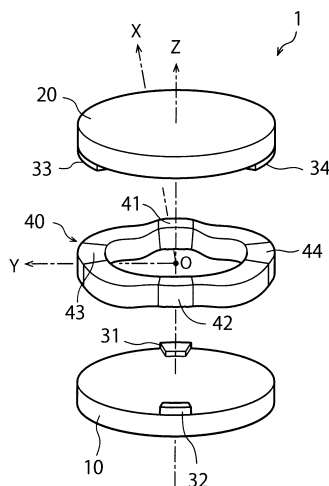
<<< §7. 極板間の実効対向面積を一定に保つための工夫 >>>

以上の各力覚センサでは、各軸方向の力ないし各軸まわりのモーメントが作用した結果、固定電極に対する変位電極の相対位置が変化した場合にも、容量素子を構成する一対の電極の実効対向面積が変化しないように、各容量素子を構成する固定電極および変位電極のうちの一方の面積を他方の面積よりも大きく設定することも考えられる。これは、面積が小さい方の電極（例えば変位電極）の輪郭を、面積が大きい方の電極（例えば固定電極）の表面に当該電極の法線方向に投影して正射影投影像を形成した場合、面積が小さい方の電極の投影像が、面積が大きい方の電極の表面内に完全に含まれるような状態である。この状態が維持されれば、両電極によって構成される容量素子の実効面積は、小さい方の電極の面積に等しくなり、常に一定になる。すなわち、力の検出精度を向上させることができる。

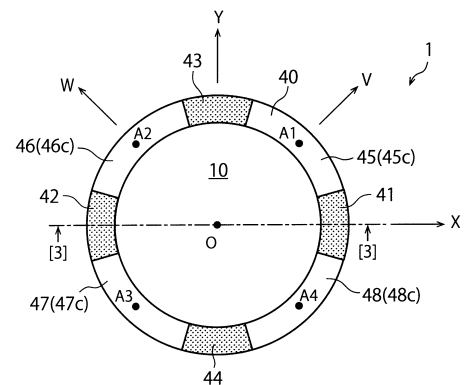
【0205】

これまでに説明してきた各実施の形態及び変形例の各々は、対応する各図面に示されているように、固定電極の面積の方が変位電極の面積よりも大きく構成されている。

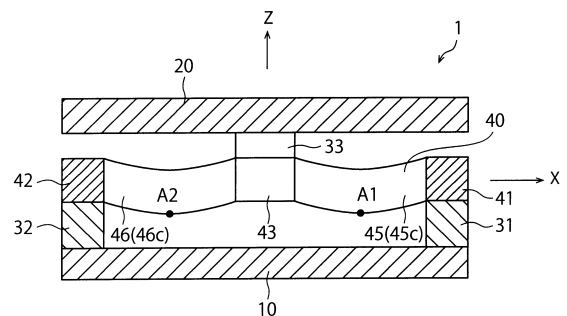
【図1】



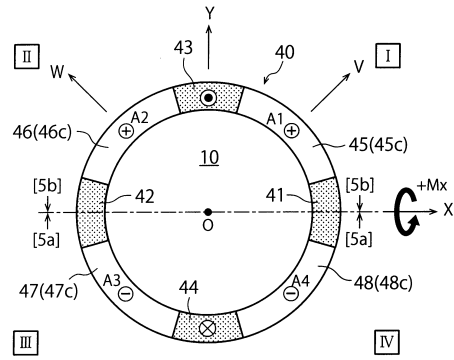
【図2】



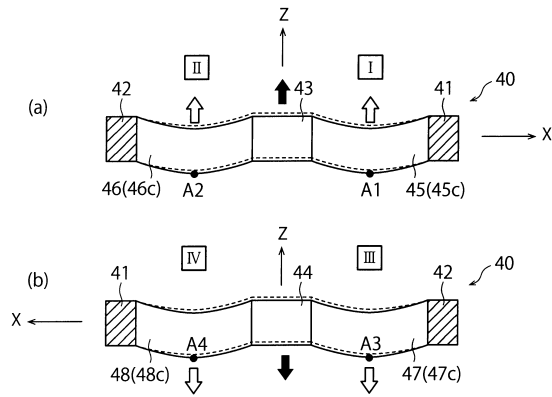
【図3】



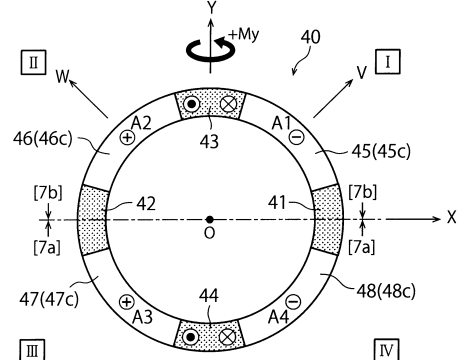
【図 4】



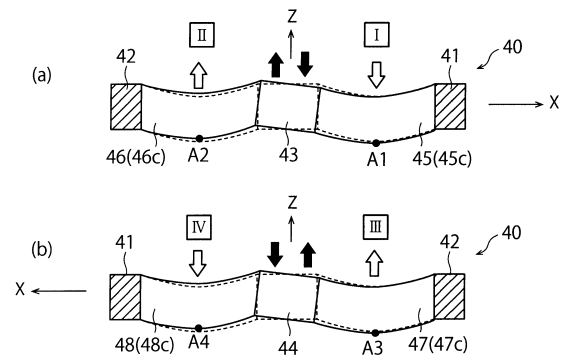
【図 5】



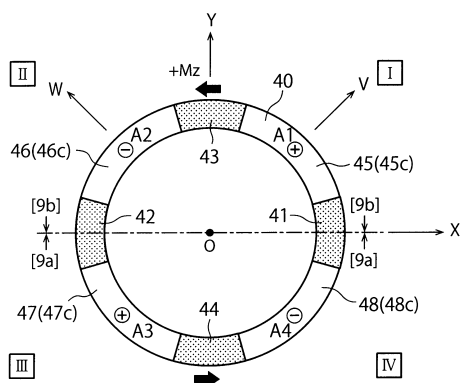
【図 6】



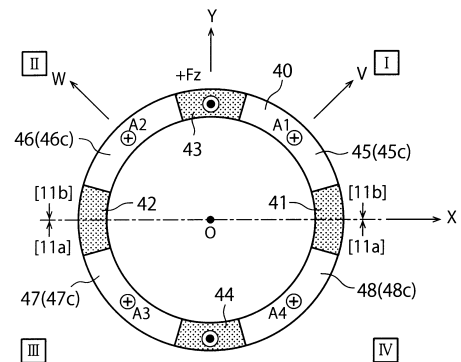
【図 7】



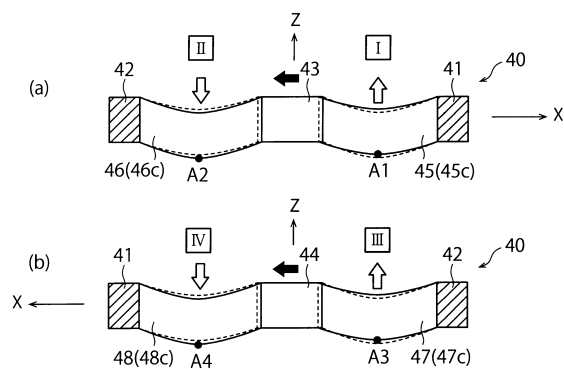
【図 8】



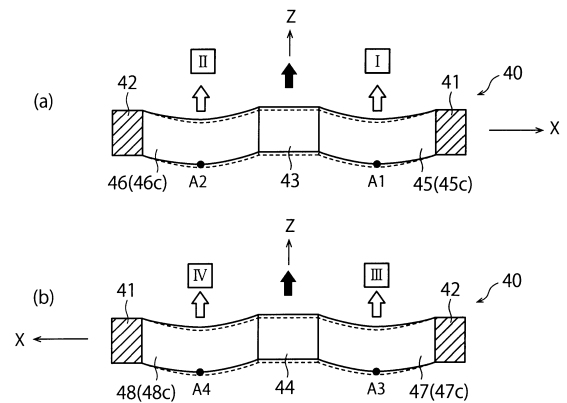
【図 10】



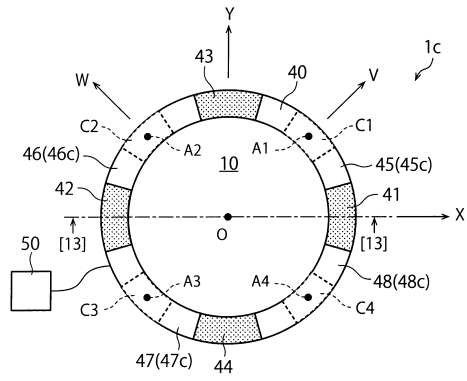
【図 9】



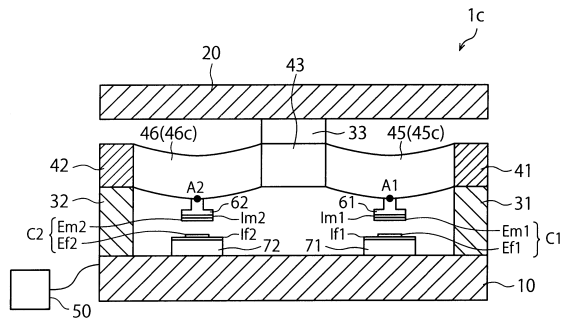
【図 11】



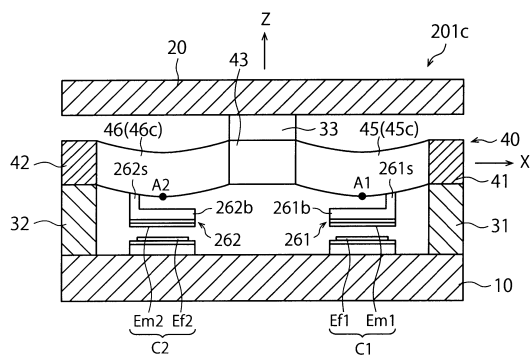
【図 1 2】



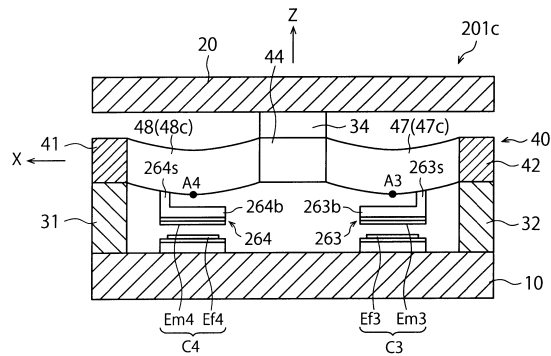
【図 1 3】



【図 1 6】



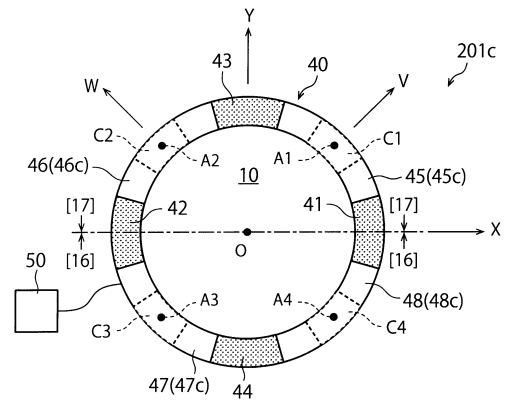
【図 1 7】



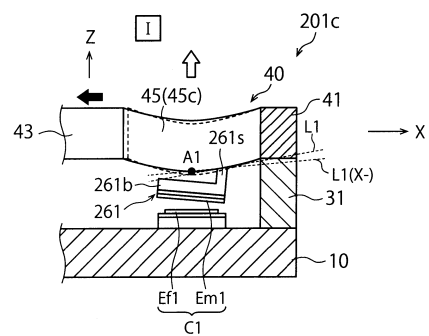
【図 1 4】

	C1	C2	C3	C4
Mx	-	-	+	+
My	+	-	-	+
Mz	-	+	-	+
Fz	-	-	-	-

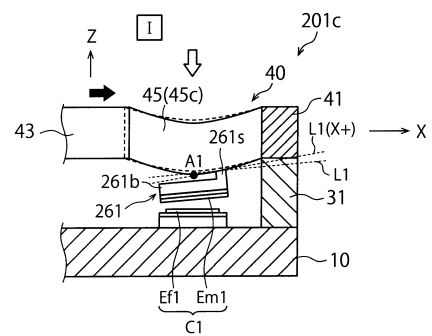
【図 1 5】



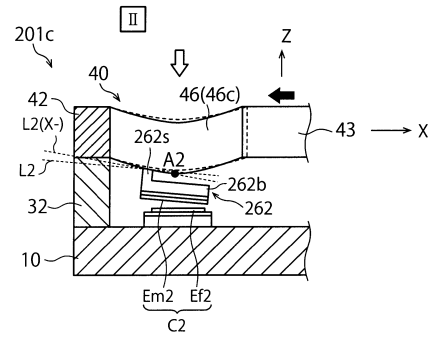
【図 1 8】



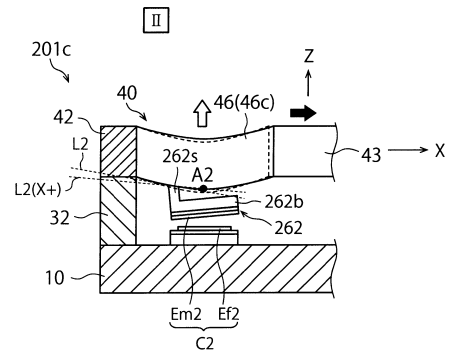
【図 1 9】



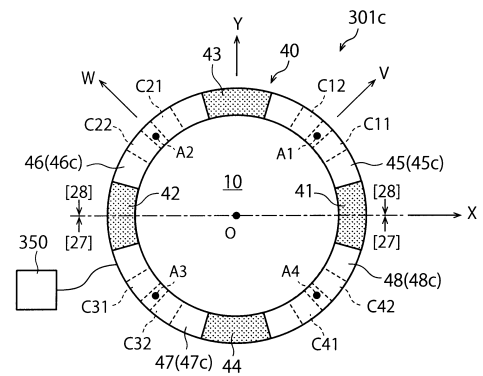
【 図 2 2 】



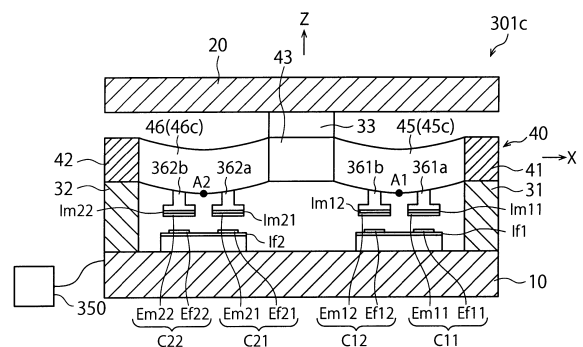
【圖 23】



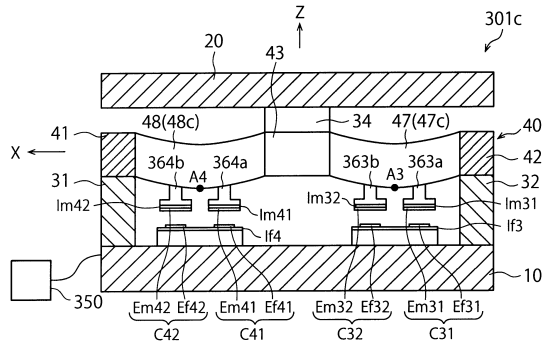
【 図 2 6 】



【圖 27】



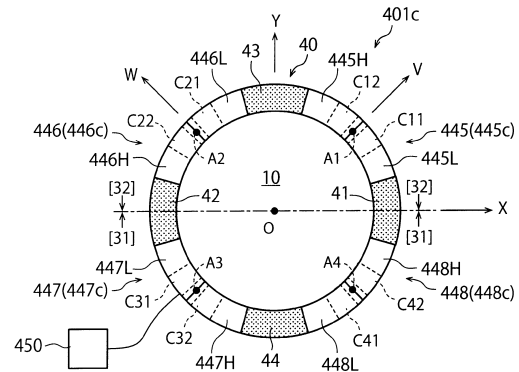
【図 28】



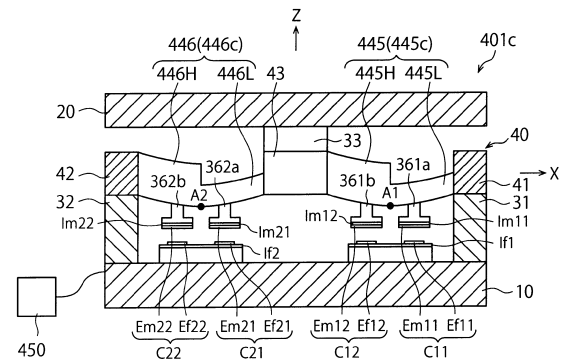
【図 29】

	C11	C12	C21	C22	C31	C32	C41	C42
Mx	-	-	-	-	+	+	+	+
My	+	+	-	-	-	-	+	+
Mz	-	-	+	+	-	-	+	+
Fz	-	-	-	-	-	-	-	-

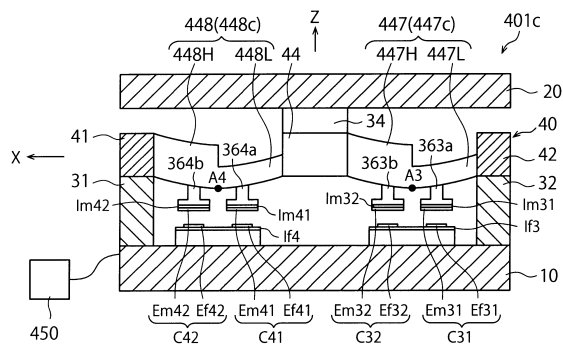
【図 30】



【図 31】



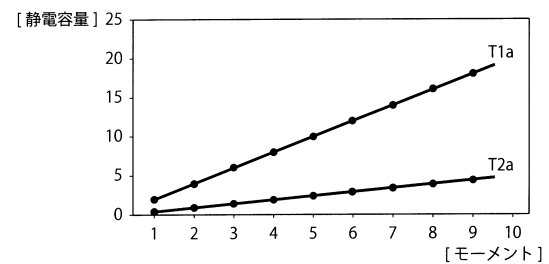
【図 32】



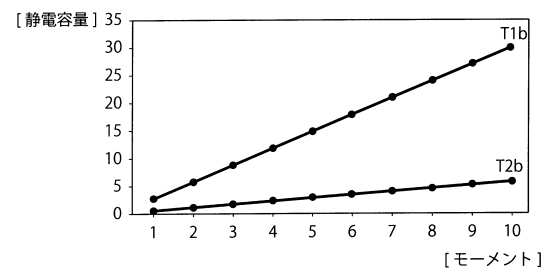
【図 33】

	C11	C12	C21	C22	C31	C32	C41	C42
Mx	--	-	--	--	++	+	++	+
My	++	+	--	-	--	-	++	+
Mz	--	-	++	+	--	-	++	+
Fz	--	-	--	-	--	-	--	-

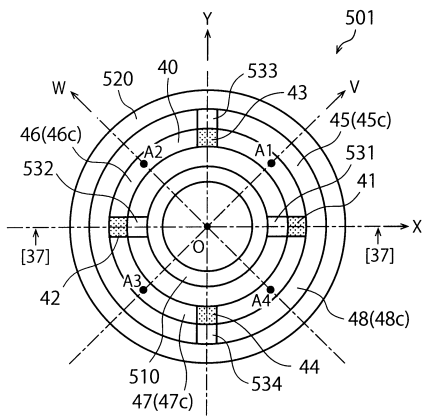
【図 34】



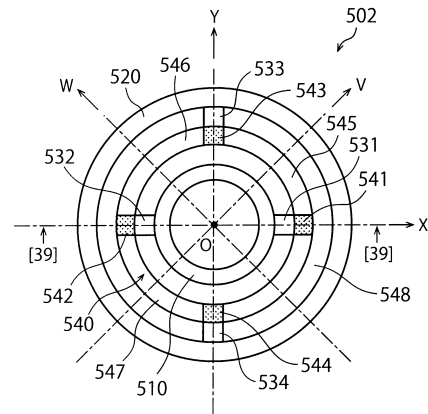
【図 35】



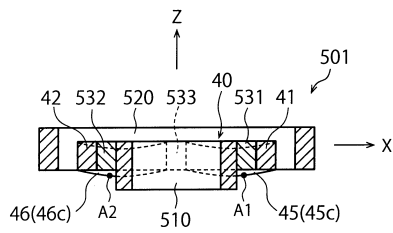
【図 36】



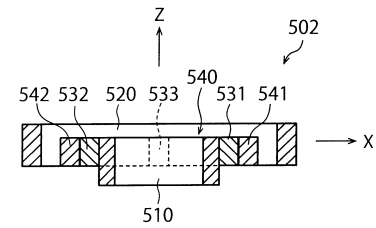
【図 38】



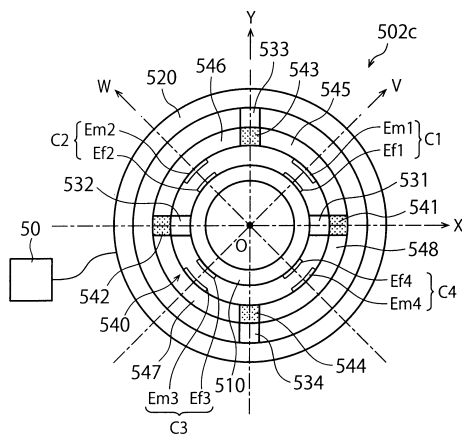
【図 37】



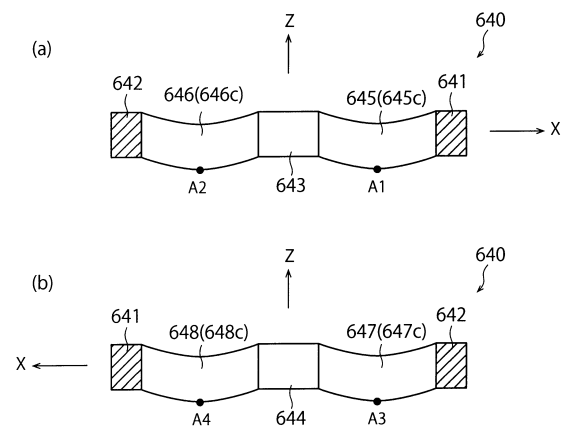
【図 39】



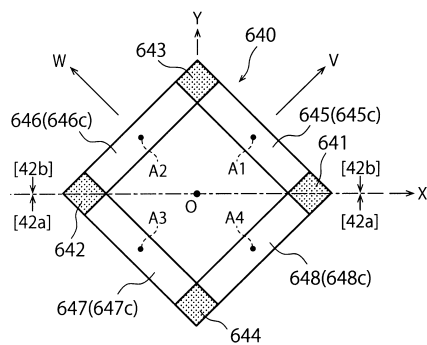
【図 40】



【図 42】



【図 41】



フロントページの続き

(72)発明者 江良 聡

埼玉県上尾市菅谷4丁目27番地 株式会社トライフォース・マネジメント内

審査官 森 雅之

(56)参考文献 特公平7-117470(JP, B2)

特公平6-76933(JP, B2)

特許第5490619(JP, B2)

特表平5-501765(JP, A)

特許第4907050(JP, B2)

特許第5568768(JP, B2)

特許第5568771(JP, B2)

特許第4948630(JP, B2)

特許第4963138(JP, B2)

特許第6092326(JP, B2)

特許第6552026(JP, B2)

特許第6308605(JP, B2)

特許第6404514(JP, B2)

特許第6494056(JP, B2)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01L