接触面積や圧力分布に関わらず荷重と荷重中心位置の計測が可能な
ロボットフィンガー用触力覚センサの開発遠山 弘晃^{*1}, 河本 浩明^{*2,*3}, 山海 嘉之^{*2,*3}Development of tactile force sensor for robot finger that can measure force and its center position
unaffected by the contact area with the object and pressure distributionHiroaki TOYAMA^{*1}, Hiroaki KAWAMOTO^{*2,*3} and Yoshiyuki SANKAI^{*2,*3}^{*1} Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8573, Japan^{*2} Faculty of Engineering, Information and Systems, Center for Cybernetics Research, University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8573, Japan^{*3} CYBERDYNE, INC.
2-2-1 Gakuen-Minami, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0818, Japan

Received: 5 July 2019; Revised: 14 January 2020; Accepted: 24 August 2020

Abstract

As an alternative to the paralyzed arm of hemiplegics, if there is a robot arm and hand that is the same size as a human arm and hand, can grasp daily necessities and work cooperatively with the user's healthy arm, it would help hemiplegics lives. If the weak force on the grasped object and how the grasped object is pulled can be detected on the robot's finger surface, the robot can grasp objects of various hardness with appropriate forces according to the work, prevent dropping the objects and estimate the user's handling intention to the objects. The purpose of this study is to propose and develop a small and thin tactile force sensor and a calibration method for correcting nonlinearity to realize the measurement of force and its center position on the robot's finger surface irrespective of the loading area and pressure distribution, and to confirm the usefulness through an evaluation experiment. Measuring force regardless of the shape of the object is difficult for conventional sensors because they are affected by the loading area and pressure distribution. Therefore, we developed a small and thin sensor whose contact surface is a single plate unaffected by the object shape. And this sensor has a structure that the capacitance distributions in the sensor are uniquely determined from the applied pressure distribution to calculate the force and its center position. Additionally, we developed its calibration method to correcting uncertain elements due to the nonlinear property. Through the evaluation experiment, we confirmed that the developed sensor can measure the force and its center position. In conclusion, we confirmed that the proposed method can realize a small and thin tactile force sensor capable of measuring force and its center position irrespective of the loading area and pressure distribution.

Keywords : Tactile force sensor, Robot finger, Force, Center position of force, Calibration method

1. 緒 言

片麻痺者は、麻痺により使える腕が片腕だけとなることで、両腕であれば容易な作業が困難になるだけでなく、不可能な作業も抱えている。また、片腕への負荷集中によって、1日に可能な作業の幅が狭められている。これらは、片麻痺者の日常生活や社会参加において大きな障壁となる。

これに対し、片麻痺者の麻痺した片腕に代わり、生活現場において、把持など日用品を扱うことができ、片麻痺者の健常な腕と協調作業を行えるロボットアーム・ハンドがあれば、これらの問題を解決できる。ロボットアーム・ハンドは、人の上肢（腕・手）と同程度の大きさであれば、生活現場において、ロボットの大きさが原因

No.19-00272 [DOI:10.1299/transjsme.19-00272], J-STAGE Advance Publication date : 1 September, 2020

^{*1} 正員, 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)^{*2} 正員, 筑波大学システム情報系 筑波大学サイバニクス研究センター^{*3} CYBERDYNE (株) (〒305-0818 茨城県つくば市学園南 2-2-1)

E-mail of corresponding author: toyama@golem.iit.tsukuba.ac.jp

となって、ロボットが作業環境において周囲のものに干渉したり、作業スペースを狭めたりすることを防ぐことができる。また、生活現場での作業支援のために、ロボットは生活現場に存在する様々な日用品を、その柔らかさや作業内容に応じて、適切な力で把持し扱える必要がある。ここで適切な力とは、把持対象物を破壊したり、指と把持対象物の間に滑りが生じたりしない力とする。例えば、ペットボトルを開封するときには、ペットボトルが滑って回転しないように力強い把持が必要となるが、水の入った紙コップを把持するときには、紙コップを握りつぶしてしまわないように優しく把持する必要がある。このように、生活現場では、扱う日用品や作業内容によって適切な把持力は様々である。これに対し、力覚情報のフィードバックによってアクチュエータおよび指リンクを制御・動作させることで、把持力調整が可能なロボットハンドであれば、対象物や作業内容に応じた適切な力での把持を行うことができる。また、適切な把持力が不明な場合には、人がロボットハンドの上から対象物を一緒に把持するなど把持力を直接教示する方法や、ロボットハンドがその対象物の把持に成功した際の把持力を学習するといった方法が考えられる(Toyama et al., 2017)。このような、把持力調整や把持力の学習を行うために、物体との接触圧をロボットハンドの指表面で捉えられるセンサが必要となる。また、本論文で対象とするロボットハンド・フィンガーは人の手・指と同程度の大きさであり、把持力制御が可能なよう指リンク内部にリンク機構やアクチュエータが搭載されている。よって、触力覚センサは、そのようなロボットハンドの指部表面に組込めるよう小型かつ薄型である必要がある。また、物体を滑り落とさないように把持するためには、把持対象物とロボットハンドの指面との滑り検出も重要となる。滑りが生じないように把持力を調整し、必要最低限の力で把持することで、対象物を破壊することなく把持することが可能となる(郡司他, 2007)。薄型触力覚センサを用いる手法では、ロボットハンドの指表面の2次元分布荷重の中心位置(以降、荷重中心位置と呼ぶ)を計測し、その移動や振動をみることで滑りとその発生方向を検出することができる(郡司他, 2006)。また、ロボットアーム・ハンドと片麻痺者の健全な腕(非麻痺腕)との協調作業を実現するためには、非麻痺腕をロボットの操作に拘束しないこと、使用者の意図したタイミングで必要な支援動作を実施することが重要となる。ここで、実際に作業を行う際に計測できる情報を活用し、作業中の非麻痺腕の動作状態および使用者の動作意思を推定し、これに対応する動作をロボットに実施させることができれば、片麻痺者の非麻痺腕とロボットアーム・ハンドとの協調作業を実現できる。このとき、非麻痺腕の動作情報として、ロボットハンドが把持した作業対象物に対して、非麻痺腕がどのような方向に力(外力)を加えているかという情報が重要となる(Toyama et al., 2019)。この把持物に対する外力情報は、薄型触力覚センサでの計測を考えたとき、センサ面にゲルシートなど人の指表面のように柔軟なシートを貼り付けることで、その変形を介して、先に述べたロボットハンドの指表面における荷重中心位置の移動から検出することができる(Toyama et al., 2019)。以上より、ロボットハンドの触力覚を担うセンサとして、把持力(荷重)と荷重中心位置の計測が可能な小型かつ薄型な触力覚センサが必要となる。

荷重と荷重中心位置の計測・算出が可能であり、小型かつ薄型なセンサとしては、2次元分布荷重とその中心位置の計測が可能な感圧ゴムを用いたものや荷重分布の計測が可能な静電容量式のセンサシートがある(石川, 下条, 1982, Lee et al., 2006, 白岡他, 2013)。これらのセンサは、圧力がセンサ部に加わった際に、抵抗値や静電容量といったセンサ出力値が増加する特性を持つ。これらの値の増加量から加わった荷重を計測している。しかし、単位面積あたりの圧力に対するセンサ出力の関係が線形ではないことに加え、センサ自体が柔軟であるため、一定の荷重をセンサに加えたとしても、荷重が作用する面積や圧力分布が変わった場合、センサ出力は一定とならず、正確な荷重計測が困難となる(Lee et al., 2006, 白岡他, 2013, 柿沢, 1985, 下条, 1993, Shimojo et al., 2004)。例えば、一定の大きさの荷重であっても、センサへの加わり方が面荷重と点荷重の場合では、センサ出力値が異なるものになってしまう。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との接触面積や圧力分布は一定ではない。そのためこれらのセンサでは、対象物を把持する力が一定であったとしても、把持対象物の形状によって接触面積や圧力分布が変わると、計測される把持力も変わってしまう。様々な形状や柔らかさの日用品に対して、ロボットが適切な力での把持や把持力の学習を行うためには、把持対象物の形状、すなわち、把持対象物と指表面の接触面積や圧力分布に関わらず、正確な把持力の計測を行える必要がある。また、把持対象物と指表面の摩擦力は、接触面積によらず、垂直荷重に比例するため、対象物を把持や固定できるギリギリの力で扱う場合には、接触面積や圧力分布に関わらず、正確な把持力の計測を行えることは特に重要となる。また、従来手法のうちセンサ素子(セル)がアレイ状に配置されたアレイ型センサでは、点荷重のように荷重が作用する面積がセルのサイズより小さい場合に、荷重分布から算出される荷重中心位置の計測分

解能はセルサイズに依存して低下する(白岡他, 2013). また, 点荷重が電極板の存在しないセンサ素子間の隙間に加わった場合には, 荷重および荷重中心位置の計測が困難となる.

そこで, 本研究では片麻痺者の麻痺した片腕を代替可能なロボットアーム・ハンドのための触力覚センサとして, 接触面積や圧力分布によらず荷重とその荷重中心位置の計測が可能な静電容量式の小型かつ薄型の触力覚センサとそのキャリブレーション手法の提案と研究開発を行い, ロボットの指部への組込みを想定して作成したセンサ実機に対する計測性能評価実験を通して提案手法の有用性を確認することを目的とする. 提案手法では, 接触面が1枚のプレート状になっており, 加えられた荷重とその荷重中心位置に対して, センサ内に実装された静電容量の特性を用いた4つのセンサから得られる静電容量分布が一意に定まる構造により, 荷重が作用する面積や圧力分布によらず荷重と荷重中心位置を静電容量分布から計測可能であるという特徴を持つ. 計測原理の詳細は第2章にて述べる. また, 静電容量は電極間の距離が近いほど大きな変化(増加)として現れるという特性を活かし, 高感度で薄型のセンサとなっている.

本論文の構成は以下のとおりである. 第2章で提案する触力覚センサの概要と計測原理を示す. 第3章でセンサの基本特性と荷重中心位置がセンサの中心となる均一荷重を用いたセンサ実機の電極サイズ誤差の補償とそれによる均一荷重計測のためのキャリブレーションについて述べる. 第4章で荷重中心位置がセンサの中心外となる不均一荷重に対する計測特性の確認と不均一荷重計測のためのキャリブレーションについて述べ, 第5章で荷重中心位置の計測手法について述べる. そして, 第6章でセンサ実機による計測性能の評価実験について述べ, 第7章で本論文の結論を述べる.

2. 提案する静電容量式触力覚センサ

本章では, 提案センサの概要と計測原理について述べる. また, センサの特性検証やキャリブレーション, 計測性能評価実験に向けて, 対象とする荷重の計測範囲および荷重中心位置の目標計測精度について述べる.

2・1 提案センサの概要と計測原理

本論文で対象とするロボットハンドの指部内側には, 動作用のアクチュエータやリンク機構があり, 物体との接触圧や荷重中心位置をロボットハンドの指表面で捉えるために, 触力覚センサは図1に示すようにロボットハンドの指部表面に組込めるよう小型かつ薄型である必要がある. 本研究では, 開発した触力覚センサを今後ロボットの指部へ組込んでいくために, これらの要求を考慮して触力覚センサの提案・研究開発を行う. 提案する静電容量式触力覚センサの概略図を図2に示す. 本センサは, 4つのプラス極が配置された固定電極板, マイナス極が配置された可動電極板, 2つの電極板のスペーサーとして四隅に配置されたゴムシリンダによって構成される(図2(a)). 本論文では, 2リンクで構成される指部への組込みを想定し, センサのサイズを決定した. 作成したセンサのサイズは長辺30 mm, 短辺18 mm, 厚み2.3 mmであり, ゴムシリンダは直径2 mm, 高さ0.5 mmである(図2(b)). なお, 各電極はガラスシート上に実装されており, フィルム型やシート型の柔軟なセンサと違い, センサ全体が変形することはない. 提案センサでは, 対象物との接触面は1枚のプレート状(非アレイ型の

Fig. 1 Application example of tactile force sensor to robot finger.

Fig. 2 Overview of proposed and developed sensor and measurement principle.

接触面) であり, 荷重分布の変化をプレート間の四隅に配置されたゴムシリンダの伸縮という連続的な変化として捉える構造となっている. 本構造において, プレート間の四隅に配置されたゴムシリンダの伸縮量のパターンは, 荷重が作用する面積や圧力分布によらず, 荷重の大きさと荷重中心位置に対して一意に定まることを見出し, この伸縮量を静電容量の増加量として捉えることで, 荷重の大きさと荷重中心位置を逆算することが可能となると発想した. 静電容量は電極間の距離に近いほど大きな変化 (増加) として現れるため, 高感度で薄型なセンサの実現に適している. また, 四隅に配置したゴムシリンダに荷重を集中させることで, ゴムシリンダの伸縮量を増やし, センサの感度を向上させる構造となっている. なお, ゴムシリンダの材料には, 耐候性, 耐熱性, 耐寒性に優れたシリコンゴムを用いた (角野, 1973). また, ノイズ対策として, センサ部全体をシールドし, その背面に計測回路を搭載・シールドしている. これによって, センサ部と他誘電体とのコンデンサ形成を防ぎ, センサ部近傍で A-D 変換した値を出力することで, 外来ノイズが除去可能な小型触力覚センサモジュールとなっている.

本論文では, 把持力としてセンサ面に対して垂直方向の力 (荷重) の計測を対象とする. 物体を持ち上げた際にはせん断方向の力や z 軸周りの回転が生じる場合が想定されるが, 本センサをロボットハンドに組込む際に, センサの側面を囲うハードウェアリミッタを追加し, 垂直荷重以外を除去する構造とすることで対応可能である. また, 把持対象物が板状のものである場合など, 把持対象物に外力が加わったり滑りが生じたりしても, センサ面との接触面積や圧力分布が変わらず, 荷重中心位置も変わらない場合が想定されるが, センサ面にゲルシートなど人の指表面のように柔軟なシートを貼り付けることで, そのせん断方向の変形やスティックスリップ現象により, 荷重中心位置の移動や振動として, 把持対象物に加わった外力や生じた滑りを検出することができる.

センサ部に荷重が加えられるとスペーサーであるゴムシリンダが縮み可動電極板と固定電極板の距離が近づき, 固定電極板に配置された 4 つのプラス極が可動電極板のマイナス極と構成するコンデンサの静電容量が増加する (図 2 (c)). このとき, 可動電極板に加えられた荷重は, 荷重が作用する面積や圧力分布によらず, 可動電極板を介して, 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を伸縮させる. 図 3 に荷重 F がセンサ上の座標 (x, y) に印加された際のセンサモデルの概略図を示す. ここで, a, b はそれぞれセンサの長辺, 短辺の長さであり, F_n と l_n ($n=1\sim4$) はそれぞれ各ゴムシリンダによる反力とその伸縮量である. また, 本モデルでは数式の簡単化のためにゴムシリンダを線形バネとする. このとき, F と F_n は力のつりあいより式 (1) によって示される. また, y 軸および x 軸方向のそれぞれからみた荷重印加点まわりのモーメントのつりあいより式 (2) と式 (3) が求まる. また, センサ中心における電極板間距離の接近量 l_c は式 (4) によって示される.

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (1)$$

$$(F_1 + F_2) \left(\frac{a}{2} + x \right) = (F_3 + F_4) \left(\frac{a}{2} - x \right) \quad (2)$$

$$(F_2 + F_3) \left(\frac{b}{2} - y \right) = (F_1 + F_4) \left(\frac{b}{2} + y \right) \quad (3)$$

$$l_c = \frac{l_1 + l_3}{2} = \frac{l_2 + l_4}{2} \quad (4)$$

ここで, フックの法則より $F=kl$ (k はバネ定数) であり, 式 (1) ~ (3) は F_n に代わり l_n を用いて表すことができる. また, 式 (4) より $l_4=l_1-l_2+l_3$ となるため, 式 (1) ~ (3) を $l_1\sim l_3$ について解き, 行列を用いて表す

Fig. 3 Schematic of sensor model when load F is applied to the position (x, y) on the sensor.

と式 (5) となる. ここで, 式 (5) における正方行列は行基本変形によって式 (6) に示されるように階段行列となるため逆行列が求まる.

$$\begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{4abk} \begin{bmatrix} -2b & -2a & ab \\ -2b & 2a & ab \\ 2b & 2a & ab \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Fx \\ Fy \\ F \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} -2b & -2a & ab \\ -2b & 2a & ab \\ 2b & 2a & ab \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2ab \\ 0 & 4a & 2ab \\ 2b & 2a & ab \end{bmatrix} \quad (6)$$

よって, Fx, Fy, F によって $l_1 \sim l_3$ は一意に定まることとなる. このとき, l_4 も $l_1 \sim l_3$ によって求められる. ここで, $F > 0$ であるため, $[Fx, Fy, F]$ から $[x, y, F]$ も一意に定まるため, F, x, y によって $l_1 \sim l_3$ は一意に定まることとなる. 電極板の四隅の距離が一意に定まるとき, 距離に反比例する静電容量もまた一意に定まる. よって, 加えられた荷重とその荷重中心位置に応じて, 計測される静電容量分布が一意に定まるため, これらの情報から荷重とその荷重中心位置を求めることができる. センサ実機では, ゴムシリンダの材料特性による荷重に対する伸縮量や荷重に対する静電容量の増加量など不確定要素や非線形特性がある. よって, 本論文では, 荷重とその荷重中心位置に対するセンサ出力を実験的に確認して特性を明確化し, 荷重とその荷重中心位置への変換式を求めていく. センサ実機では, 電極サイズ誤差による荷重に対するセンサ出力の各チャンネル間のばらつきを補償する必要がある. そこで本論文では, まず, 荷重中心がセンサ中心となる均一荷重に対するセンサ出力の特性検証を行い, 電極サイズ誤差の補償とそれによる均一荷重計測のためのキャリブレーションを行う. つぎに, 不均一荷重に対するセンサ出力の特性検証を行い, 不均一荷重と荷重中心位置計測のためのキャリブレーションを行う.

2・2 荷重の計測範囲と荷重中心位置の目標計測精度

本センサの荷重計測範囲は, 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する. 白石らによる国際生活機能分類 (ICF) を用いた日常生活の分析(白石他, 2010)によると, 日常生活におけるもの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 割であると報告されている. このため, 400 g のもの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. また, 人の指の摩擦係数の最低値は 0.5 であり, 人がものを把持する際には, 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(嶋田他, 1996, Johansson and Westling, 1984). 以上より, 人が把持力を教示する場合も想定し, センサは 560 g (= 5.488 N) までの計測が可能である必要がある. よって, 荷重計測範囲はこれを超えるよう 0~593.7 g (= 0~5.818 N) と設定する.

荷重中心位置の目標計測精度は, 人の指における触覚特性を考慮して設定する. 刺激位置に対する分解能を示す指標として 2 点弁別閾がある. これは, 2 点に対して刺激を与え, その距離間を狭めていった際に 2 点と感じられる最小距離を示すものである. 人の指先における 2 点弁別閾は 1.6 mm 程度と報告されている(Vallbo and Johansson, 1978). よって, 荷重中心位置の目標計測精度はこれと同等以上と設定する.

3. センサの基本特性と均一荷重の計測手法

本章では, まず, センサのゴムシリンダに用いるシリコンゴムの硬度を決定するために, 硬度が 20°, 40°, 60° のシリコンゴムを用いて作成した 3 つのセンサに対して, センサ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) について述べる. その後, 電極サイズ誤差の補償とそれによる均一荷重計測のためのキャリブレーションについて述べる. なお, 荷重は図 4 に示す荷重印加装置によって加えた. 本装置は, 荷重の受け皿, これを支える能動リンク機構, 外殻ガイド, センサカバーによって構成される (図 4). 荷重の受け皿両端を支えるリンクの上下動作によって, 任意の時間での荷重の印加と除去が可能となる. 受け皿に乗せられた荷重は, 外殻ガイドによって垂直荷重のみセンサに伝達される. 荷重の作用位置は, センサカバーの

凹部と受け皿軸先の凸部のはめ合いによって合致される (図 4)．センサカバーの凹部位置を調整することで、センサに対して任意の位置に荷重を加えることが可能となる．

3・1 センサ出力の応答性

各センサの中心位置に 10 秒間 5.818 N の荷重を印加した際のセンサのチャンネル 1 の出力を正規化したものを図 5 に示す．これらの結果より、本センサ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とが確認された．ここで、ゴムシリンダとして用いたシリコンゴムは、粘弾性体であるため、瞬間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 5 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．本論文では、ロボットが日用品を把持した状態で作業を行なっていくことを想定して、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小さくなる、荷重印加から 10 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．

3・2 荷重に対する静電容量の特性

荷重印加から 10 秒後のセンサ出力と荷重の関係を図 6 に示す．なお、荷重はセンサの中心位置に対して、0~593.7 g まで荷重印加装置の荷重の受け皿の重さである 93.7 g 以降 100 g ずつ分銅を用いて加えるものとし、荷重ごとに荷重印加を 5 試行実施するものとした．図 6 より、ゴム硬度が低いほど静電容量の増加量が大きくなることわかる．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の伸縮量が増加し、電極板間の距離が近くなることで、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からである．

以降では、作成した 3 つのセンサのうち、応答性とセンサ出力の大きさの両方について、他 2 つとの比較において中間の位置付けとなったゴム硬度 40° のセンサに着目し、計測特性の確認とキャリブレーションを行なっていくものとする．

3・3 電極サイズ誤差の補償と均一荷重計測のためのキャリブレーション

図 6 に示される荷重とセンサ出力のプロットから、近似式を求めセンサ出力-荷重変換に用いることで、センサのチャンネル 1 の均一荷重計測のためのキャリブレーションを行う．これにより電極サイズ誤差の補償も同時に

Fig. 4 Overview of load-applying device. This device applies and removes load by vertical movement of links at both ends. The force-applied points are selected by fitting the concave of the sensor cover and the convex of the weighing pan bottom.

Fig. 5 Comparison of responsiveness of three sensor outputs whose rubber cylinder hardness are 20°, 40°, and 60°. Load of 5.818[N] was applied at center position of each sensor at 5[s] and removed at 15[s]. The graph lines are normalized values of the sensor outputs.

Fig. 6 Comparison of relationships of capacitance increment against applied force of three sensors whose rubber cylinder hardness are 20°, 40°, and 60°.

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 次曲線によってよく近似された (図 6)。なお、決定係数 R^2 はすべてのチャンネルにおいて 0.999 以上となった。求めたセンサ出力-荷重変換式は単調増加する 2 次曲線であるため、センサ出力は荷重変換後も荷重とその荷重中心位置に対する一意性を保つ。以降では、静電容量分布の代わりにこの変換式によって求めた荷重分布を用いて必要な関係式を求めていく。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_{cn} ($n=1\sim4$) を 4 で割った値の和として式 (7) にて算出される。

$$F_a = \frac{1}{4}(F_{c1} + F_{c2} + F_{c3} + F_{c4}) \quad (7)$$

4. 不均一荷重に対する計測特性と誤差補償

3 章における荷重計測では、均一荷重の計測手法について述べた。本章では、3 章では考慮されていない荷重中心位置がセンサの中心外となる不均一荷重に対する荷重計測について考える。まず、不均一荷重に対するセンサ出力の特性を確認し、均一荷重の計測式に加えて不均一荷重計測のための誤差補償式が必要な理由について述べる。その後、多数の荷重印加位置におけるセンサ出力のデータによって、計測特性の確認とセンサ出力の特性が反映された誤差補償式を得るために行ったシミュレーションについて述べる。シミュレーションを用いることで、センサ実機に対して一箇所ずつ荷重を印加してデータを取得するよりも、より効率的に数多くの荷重印加位置に対する計測データを得ることが可能となる。そして、シミュレーションより求めた誤差補償式のセンサ実機への適用による不均一荷重計測のためのキャリブレーションについて述べる。

4・1 不均一荷重に対するセンサ出力の特性

不均一荷重をセンサへ印加した際のセンサ出力の特性について、ゴムシリンダの材料特性とコンデンサの電気的特性の 2 つの観点から検討した。

まず、不均一荷重を印加した際のゴムシリンダの材料特性による影響について述べる。3 章にてセンサ実機において確認した図 6 に示されるセンサ出力と荷重の関係より、図 7 に示すゴムシリンダの伸縮量と荷重の関係を算出した。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 7 より、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 次曲線によってよく近似された。なお、決定係数 R^2 は 0.999 以上となった。図 7 より、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、均一荷重にくらべセンサ出力が小さくなる。

つぎに、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述べる。不均一荷重を印加すると、センサの上面電極板に傾きが生じる。そこで、不均一荷重が印加された際のセンサのモデルとして、上面電極板に傾きが生じた場合の下側面図を図 8 (a)に、右側面図を図 8 (b)に示す。なお、 d_0 はゴムシリンダの自然長、 d は電極板間の中心間距離、 l_n ($n=1\sim4$) は各チャンネルのゴムシリンダの伸縮量、 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。図 8 において、全体の静電容量は図中の横幅 dx 、縦幅 dy 、電極板間距離 z の微小コンデンサの集合と考えられる。 z は x 軸および y 軸方向に直線的に変化するため、 $\delta_x = (l_4 - l_1)/2 = (l_3 - l_2)/2$ 、 $\delta_y = (l_3 - l_4)/2 = (l_2 - l_1)/2$ としたとき、 $z = d - (2\delta_x/a)x - (2\delta_y/b)y$ となる。このとき、微小コンデンサの静電容量 dC は式 (8) によって示される。

$$dC = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 dx dy}{d - (2\delta_x/a)x - (2\delta_y/b)y} \quad (8)$$

Fig. 7 Shrinkage amount of rubber cylinder against applied load.

Fig. 8 Sensor model when inclination occurred on the upper electrode plate.

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、図8(a)に示されるように、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 は式(9)によって示される。同様に、傾きによって減少する電極板端部コンデンサの y 軸方向の長さ y_d は式(10)によって示される。

$$x_d = a - \sqrt{a^2 - 4\delta_x^2} \quad (9)$$

$$y_d = b - \sqrt{b^2 - 4\delta_y^2} \quad (10)$$

以上より、センサの各チャンネルによって計測される静電容量 C_n ($n=1\sim 4$) は式(11)によって求められる。

$$C_n(x, y) = \iint \frac{\varepsilon \varepsilon_0 dx dy}{d - (2\delta_x/a)x - (2\delta_y/b)y} \quad (11)$$

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

電極板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、上面電極板に x 軸方向の傾きが生じた際に、その影響が特に大きく現れる最大荷重を印加した場合のセンサ全体の静電容量について述べる。ここでは、電気的特性が与える影響のみの確認を行うために、ゴムシリ

ンダは線形バネであると仮定した。図 7 より、センサ中心に 2 章にて定義した荷重の計測範囲における最大荷重 5.818 N を印加した際の、ゴムシリンダの伸縮量は約 0.075 mm であった。よって、不均一荷重となったとき、最も大きな電極板の傾きが生じる最大荷重を印加した際の応答を図 8 に示すセンサモデルのシミュレーションによって確認するために、電極板の中心間距離 d を 0.425 mm、傾き δ_x を 0 mm から 0.038 mm まで増加させたときの静電容量の変動率 $C_{\delta x \neq 0}/C_{\delta x=0}$ を図 9 に示す。なお、 $C_{\delta x=0}$ は傾き δ_x が 0 mm のときの静電容量であり、 $C_{\delta x \neq 0}$ は傾き δ_x が 0 mm でないときの静電容量である。図 9 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わかった。

以上より、不均一荷重を正しく計測するためには、3 章にて求めた均一荷重の計測式に加え、ゴムシリンダの材料特性と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、センサモデルによるシミュレーション結果から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を導出し、これをセンサ実機に適用することとした。シミュレーションを用いることで、センサ実機に対して一箇所ずつ荷重を印加してデータを取得するよりも、より効率的に数多くの荷重印加位置に対する計測データを得ることが可能となる。しかしながら、シミュレーションモデルでは、ゴムシリンダの形状やその他の材料特性などのセンサ実機が持つ不確定要素までは考慮しないため、シミュレーション結果より求めた誤差補償式の係数パラメータをセンサ実機によるいくらかの計測データによって再設定することで対応する。

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。本シミュレーションでは、式 (11) と図 7 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。

まず、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。本センサは、3 章で述べたように加えられた荷重とその荷重中心位置に応じて、荷重分布 F_{cn} 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となる。 F_{cn} 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 3 章にて述べたとおりである。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。 R_x と R_y の定義はそれぞれ式 (12) と式 (13) のとおりである。

$$R_x = \frac{1}{2} \left(\frac{F_{c4}}{F_{c1} + F_{c4}} + \frac{F_{c3}}{F_{c2} + F_{c3}} \right) - 0.5 \quad (12)$$

$$R_y = \frac{1}{2} \left(\frac{F_{c2}}{F_{c1} + F_{c2}} + \frac{F_{c3}}{F_{c3} + F_{c4}} \right) - 0.5 \quad (13)$$

上式より、 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、本センサ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 F_{cn} 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。よって、 F_a と R_x 、 R_y から必要な

Fig. 9 Ratio of increase in the capacitance against the inclination δ_x of the upper electrode plate.

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。

つぎに、シミュレーションと荷重計測における誤差補償式の導出方法について述べる。なお、以降で行うシミュレーションでは、センサ実機と同様に荷重を 0-593.7 g まで 93.7 g 以降 100 g ずつ加えるものとする。不均一荷重における上面電極板の傾きは x 軸および y 軸まわりの傾きによって構成される。ここで、本論文で作成したセンサ実機は長方形であるため、まず、 x 軸上と y 軸上それぞれに荷重中心位置を移動した場合のシミュレーションを行い、計測特性の確認と誤差補償式の導出を行う。誤差補償式の導出では、各計測データに対して、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、入力変数を F_a および R_x または R_y 、出力を誤差補償量として求めた近似曲面が誤差補償式となる。つぎに、 x 軸および y 軸まわりの傾きが同時に発生した際に、前述の誤差補償式で除去できない残存誤差補償について考える。この残存誤差は、 x 軸と y 軸まわりの傾きが同時に大きく増加するとき、すなわち、荷重中心がセンサ上の対角線を移動するときに極大となることが予測される。このときの計測データから補償式を求め、適用することで、センサ上の全域における残存誤差を低減することができる。そこで、 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、センサの対角線上にて荷重中心を移動した場合のシミュレーションを行い、計測特性の確認と残存誤差補償式の導出を行うこととする。残存誤差補償式の導出の流れは、前述の誤差補償式の導出と同様であり、誤差補償量の代わりに残存誤差補償量を用いる。また、 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。本手法によってどの程度の計測精度を実現できるかについては、後ほどセンサ実機による計測精度評価試験を行い確認する。

(1) 荷重中心を x 軸上にて移動した場合

センサ上において、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計測における誤差とその補償について考える。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 Fec_x 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、 $Fec_x = F_{true} - F_a$ である。図 10 より、荷重とその印加位置に応じて F_a , R_x , Fec_x 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 Fec_x 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。これらをふまえて近似曲面を求めた結果、 F_a について 2 次、 R_x について 2 次の多項式 (14) によってよく近似された。なお、決定係数 R^2 は 0.995 であった。

$$Fec_x(F_a, R_x) = p_1 F_a^2 R_x^2 + p_2 F_a^2 R_x + p_3 F_a R_x^2 + p_4 F_a R_x + p_5 R_x^2 + p_6 R_x + p_7 \quad (14)$$

ここで、 p_n ($n=1\sim7$) 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誤差補償式が求まる。求めた近似曲面を図 10 に示す。

(2) 荷重中心を y 軸上にて移動した場合

センサ上において、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計測における誤差とその補償について考える。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誤差補償式を求めることができる。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 11 に、求めた誤差補償式を以下に示す。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 0.995 であった。

$$Fec_y(F_a, R_y) = q_1 F_a^2 R_y^2 + q_2 F_a^2 R_y + q_3 F_a R_y^2 + q_4 F_a R_y + q_5 R_y^2 + q_6 R_y + q_7 \quad (15)$$

ここで、 q_n ($n=1\sim7$) 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 11 に示す。

図 10, 11 より, 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正の方向へ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.

(3) x 軸と y 軸の両方向に同時に荷重中心が移動した場合

センサ上において, 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考える. ここで, 残存誤差補償量 $Fec_{xy} = F_{true} - (F_a + Fec_x + Fec_y)$ とする. シミュレーションによって算出された F_a , R_{xy} , Fec_{xy} の 3 次元グラフへのデータ点のプロットを図 12 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 次の多項式によってよく近似された. なお, 決定係数 R^2 は 0.999 であった. 求めた多項式を以下に示す.

$$Fec_{xy}(F_a, R_{xy}) = r_1 F_a^2 R_{xy}^2 + r_2 F_a^2 R_{xy} + r_3 F_a R_{xy}^2 + r_4 F_a R_{xy} + r_5 R_{xy}^2 + r_6 R_{xy} + r_7 \quad (16)$$

ここで, r_n ($n=1\sim7$) 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で同様に残存誤差補償式が求まる. 求めた近似曲面を図 12 に示す. 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, Fec_{xy} が極大と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述べた. 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 Fec_{xy} が減少する. たとえば, 荷重中心の y 座標が 0 に近づいた場合には, Fec_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. Fec_{xy} のすべての項は R_{xy} との積となっているため, Fec_{xy} もまた 0 に近く.

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 (17) となる

$$F = F_a + Fec_x + Fec_y + Fec_{xy} \quad (17)$$

Fig. 10 Relationship between F_a , R_x and Fec_x in the simulation results and the calculated approximate surface.

Fig. 11 Relationship between F_a , R_y and Fec_y in the simulation results and the calculated approximate surface.

Fig. 12 Relationship between F_a , R_{xy} and Fec_{xy} in the simulation results and the calculated approximate surface.

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 13 に示す 29 箇所に対して荷重の印加を行った. なお, 荷重は 0~593.7 g まで 93.7 g 以降 100 g 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 試行実施するものとした. 以降では, シミュレーションとの比較のためにセンサ上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.

(1) 荷重中心を x 軸上に移動した場合

センサ上において, 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 , Fec_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

Fig. 13 Force-applied points in developed sensor.

面のプロットを図 14 に示す. 図 14 と図 10 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に差異が見られるものの, F_a と R_x が増加するほど Fec_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 0.990 であった.

(2) 荷重中心を y 軸上にて移動した場合

センサ上において, 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 , Fec_y の 3 次元グラフへのデータ点のプロット, 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 15 に示す. 図 15 と図 11 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同じであり, 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 0.986 であった.

シミュレーションとセンサ実機によるデータ点のプロットおよび近似曲面の比較の結果, x 軸正の方向へ荷重中心を移動した際には, R_x が増加した際の近似曲面の形状にシミュレーションによるものと差異が見られたが, y 軸正の方向へ荷重中心を移動した際には, 求めた近似曲面の形状がシミュレーションによるものと一致する結果となった. このことから, x 軸正の方向へ荷重中心を移動した際の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電極板の歪みが原因であると考えられる. そこで, 電極板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 (14) 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, 決定係数 R^2 の最低値は 0.869 であった. 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係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, 電極板の歪みへの対策を行な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センサ部の電極板基材に使用することが考えられる.

(3) x 軸と y 軸の両方向に同時に荷重中心が移動した場合

センサ上において, x 軸と 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} , Fec_{xy} 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. なお, 近似曲面の決定係数 R^2 は 0.828 であった. 図 16 と図 12 を比較すると, シミュレーションでは F_a と R_{xy} が増加するにつれて Fec_{xy} が負の方向へ増加する結果となっていたが, センサ実機では F_a と R_{xy} が増加しても Fec_{xy} はほとんど増加することがなく, シミュレーションに比べセンサ実機では必要とされる残存誤差補償量が非常に小さくなるという結果となった. この理由は, シミュレーションではゴムシリンダの形状を考慮せずバネとして扱っていたためであると考えられる. センサ実機では, ゴムシリンダは円柱であるため, 不均一荷重によって電極板が傾いたとき, ゴムシリンダの中心部に比べ傾きが発生した方向のゴムシリンダ端部では伸縮量がより大きくなる. 図 7 に示されるように, ゴムシリンダの材料特性として, 伸縮量が大きくなるほど荷重の増加に伴う伸縮量の増加量が小さくなる特性がある. このため, F_a と R_{xy} の増加によって電極板の傾きが大きくなるにつれ, ゴムシリンダの材料特性による影響がより大きく現れ, 荷重に対するゴムシリンダの伸縮量の総和が小さくなり, その結果としてセンサ出力が減少し, 必要とされる荷重計測における誤差補償量が正の方向へ増加する. この増加が Fec_{xy} の負の方向への増加量を減少させるため, センサ実機では必要とされる残存誤差補償量が小さくなったと考えられる. このように, センサ実機ではゴムシリンダの形状特性によって, 荷重計測における残存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.

Fig. 14 Relationship between F_a , R_x and F_{ecx} in the measurement results of the developed sensor and the calculated approximate surface.

Fig. 15 Relationship between F_a , R_y and F_{ecy} in the measurement results of the developed sensor and the calculated approximate surface.

Fig. 16 Relationship between F_a , R_{xy} and F_{ecxy} in the measurement results of the developed sensor and the calculated approximate surface.

5. 荷重中心位置の導出

本章では、荷重中心位置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。

5・1 シミュレーションによる荷重中心位置算出式の導出

4章で述べたように、本センサは加えられた荷重とその荷重中心位置に応じて、荷重分布 F_{cn} 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 から荷重中心位置の算出が可能となる。荷重中心位置の算出式の導出は、4章における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。

(1) 荷重中心を x 軸上に移動した場合

センサ上において、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考える。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。図 17 より、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。これらをふ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 (18) によってよく近似された。なお、決定係数 R^2 は 1 であった。

$$COF_{mx}(F_a, R_x) = s_1 F_a^2 R_x^2 + s_2 F_a^2 R_x + s_3 F_a R_x^2 + s_4 F_a R_x + s_5 R_x^2 + s_6 R_x + s_7 \quad (18)$$

ここで、 s_n ($n=1\sim7$) 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、本論文では、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 (18) を採用することとした。

(2) 荷重中心を y 軸上に移動した場合

センサ上において、荷重中心を y 軸正の方向へ 0 mm から 6 mm まで 1mm 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考える。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ることができる。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 COF_{my} の 3 次元グラフへのデータ点のプロットを図 18 に、求めた算出式を以下に示す。なお、算出式として求めた近似曲面の決定係数 R^2 は 1 であった。

$$COF_{my}(F_a, R_y) = t_1 F_a^2 R_y^2 + t_2 F_a^2 R_y + t_3 F_a R_y^2 + t_4 F_a R_y + t_5 R_y^2 + t_6 R_y + t_7 \quad (19)$$

ここで、 t_n ($n=1\sim7$) 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 COF_{my} が求まる。求めた近似曲面を図 18 に示す。

(3) x 軸と y 軸の両方向に同時に荷重中心が移動した場合

センサ上において、 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の荷重中心位置の計測誤差とその補償について考える。ここで、荷重中心位置の誤差補償量 $COF_{ec(x,y)} = COF_{true(x,y)} - COF_{m(x,y)}$ 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。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 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。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 次の多項式によってよく近似された。なお、決定係数 R^2 はそれぞれ 0.995 と 0.991 であった。求めた多項式を以下に示す。

$$COF_{ec_x}(F_a, R_{xy}) = u_1 F_a^2 R_{xy}^2 + u_2 F_a^2 R_{xy} + u_3 F_a R_{xy}^2 + u_4 F_a R_{xy} + u_5 R_{xy}^2 + u_6 R_{xy} + u_7 \quad (20)$$

$$COF_{ec_y}(F_a, R_{xy}) = v_1 F_a^2 R_{xy}^2 + v_2 F_a^2 R_{xy} + v_3 F_a R_{xy}^2 + v_4 F_a R_{xy} + v_5 R_{xy}^2 + v_6 R_{xy} + v_7 \quad (21)$$

ここで、 u_n , v_n ($n=1\sim7$) はそれぞれ導出した荷重中心位置計測の誤差補償量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, 20 に示す。

以上より、本センサの荷重中心位置 $COF_{(x,y)}$ の算出式は式 (22) となる。

Fig. 17 Relationship between F_a , R_x and COF_{mx} in the simulation results and the calculated approximate surface.

Fig. 18 Relationship between F_a , R_y and COF_{my} in the simulation results and the calculated approximate surface.

Fig. 19 Relationship between F_a , R_{xy} and COF_{ec_x} in the simulation results and the calculated approximate surface.

Fig. 20 Relationship between F_a , R_{xy} and COF_{ec_y} in the simulation results and the calculated approximate surface.

$$COF_{(x,y)} = COF_{m(x,y)} + COFec_{(x,y)} \quad (22)$$

5・2 センサ実機による荷重中心位置算出式の導出

(1) 荷重中心を x 軸上にて移動した場合

センサ上において、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。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 1 であった。

(2) 荷重中心を y 軸上にて移動した場合

センサ上において、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、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。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 1 であった。

(3) x 軸と y 軸の両方向に同時に荷重中心が移動した場合

センサ上において、 x 軸と 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} , $COFec_{(x,y)}$ 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 23, 24 に示す。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が、 R_{xy} が増加するほど荷重中心位置の誤差補償量が負の方向へ増加するという傾向は一致している。確認された差異の原因は、シミュレーションで考慮されていない電極板の歪みやゴムシリンダのバネモデルとの差異であり、 $COFec_{(x,y)}$ の値が小さいため大きな差異として現れたと考えられる。なお、近似局面の決定係数 R^2 はそれぞれ 0.953 と 0.966 であった。

Fig. 21 Relationship between F_a , R_x and COF_{mx} in the measurement results of the developed sensor and the calculated approximate surface.

Fig. 22 Relationship between F_a , R_y and COF_{my} in the measurement results of the developed sensor and the calculated approximate surface.

Fig. 23 Relationship between F_a , R_{xy} and $COFec_x$ in the measurement results of the developed sensor and the calculated approximate surface.

Fig. 24 Relationship between F_a , R_{xy} and $COFec_y$ in the measurement results of the developed sensor and the calculated approximate surface.

6. 計測性能評価実験

開発した触力覚センサによって、実際に荷重と荷重中心位置が計測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なった。

6・1 実験方法

(1) 計測精度の評価

図 25 に示す 53 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 10 秒後の計測値を用いて精度評価を行う。また、荷重の計測精度については、誤差補償（不均一荷重計測のためのキャリブレーション）の効果を確認するために、誤差補償式を適用しない場合の計測精度の確認も行う。図 25 に示される丸記号はキャリブレーションにおいて使用した荷重印加位置であり、三角記号は本実験のために新たに追加した荷重印加位置である。三角記号は、センサ全体の計測精度を評価するために、キャリブレーションに用いた荷重印加位置があるセンサ上の十字方向と対角線方向の直線の間を通る直線上に配置されている。なお、荷重は 0~593.7 g まで 93.7 g 以降 100 g 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。

(2) 計測データの応答確認

センサ上の $(x,y)=(12,6)$ mm に荷重の計測範囲のおおよそ中間値である 2.878 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、その応答を確認する。

6・2 実験結果

(1) 計測精度の評価

荷重の計測結果を図 26 (a)-(b)に示す。図 26 (a)は計測値の標本平均、図 26 (b)は計測誤差の標本平均である。実験結果より、荷重の計測誤差の標本平均が ± 0.046 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 0.092 N であった。また、荷重の計測結果における真値と計測値との決定係数 R^2 は 0.999 以上であった。誤差補償式を適用しない場合の荷重の計測結果を図 27 (a)-(b)に示す。このとき、荷重の計測誤差の標本平均が ± 0.516 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 0.465 N であった。また、荷重の計測結果における真値と計測値との決定係数 R^2 は 0.999 以上であった。

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 28 (a)-(d)に示す。図 28 (b)より、 x 座標の計測誤差の標本平均が ± 0.20 mm の範囲内にあることを確認した。なお、最大標準偏差は 0.35 mm であった。図 28 (d)より、 y 座標の計測誤差の標本平均が ± 0.28 mm の範囲内にあることを確認した。なお、最大標準偏差は 0.30 mm であった。また、荷重中心位置の計測結果における真値と計測値との決定係数 R^2 は COF_x 、 y 座標 COF_y とともに 0.999 以上であった。

(2) 計測データの応答確認

センサ上の $(x,y) = (12,6)$ mm に 2.878 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 29 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、0.245 N (= 25 g) 以下をフィルタリングしている。図 29 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。

Fig. 25 Force-applied points in the developed sensor. Circles are points that are used in calibration, whereas triangles are points that are not used in calibration.

Fig. 26 Results of the evaluation experiment of force measurement accuracy of the developed sensor (with error compensation).

Fig. 27 Results of the evaluation experiment of force measurement accuracy of the developed sensor without error compensation.

 Fig. 28 Results of the evaluation experiment of COF measurement accuracy of the developed sensor. (a) and (b) are the results of COF_x measurements, whereas (c) and (d) are the results of COF_y measurements.

Fig. 29 Responses of force and its center position. A load of 2.878 [N] was applied to the position (12, 6) on the sensor. The load was applied at 5[s] and removed at 15[s].

6・3 考察

センサ実機による計測性能評価実験より、必要とする荷重計測範囲において、荷重と荷重中心位置を実際に計測できることを確認した (図 26, 28, 29). ここで、荷重の計測に着目すると、誤差補償式を適用しなかった場合には、荷重が大きくなるほど、4 章にて述べた不均一荷重に対する計測特性に起因して誤差が増大していることを確認した (図 27 (a)-(b)). これに対し、誤差補償式を適用した場合には、上記のような誤差の増大はなく、計測誤差の標本平均の最大値が約 9 %に、標準偏差の最大値が約 20 %に減少・改善していることが確認された (図 26 (a)-(b)). また、荷重中心位置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 程度であるため、今回評価を行なったセンサはこれと同等以上の計測精度であり、2 章にて定めた目標計測精度となった。ここで、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。

各種計測データの応答確認では、計測荷重で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（図 29）。これは、荷重中心の算出式において、分布荷重の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分布荷重の比では応答遅れの影響が打ち消し合うからである。ロボット制御において、荷重除去後の計測荷重における応答遅れを考慮すると、把持・解放を 1 秒間隔など短い間隔で繰り返し行う場合の把持力制御の精度低下が考えられる。しかしながら、人の近くで動作するロボットの動作速度は、安全面を考慮して遅く設定されているため、手先の移動時間など次の把持までにインターバルがあり、センサの応答遅れによる影響を小さく抑えられると予測される。精度の高い把持力制御を必要とする場合には、一度把持を行った後にはセンサ出力がゼロになるまで必要なだけ時間をあけることで対応可能である。もしくは、応答遅れによる影響であるため、まず把持を行いセンサ出力が安定するまでの一定時間以上把持するという対応が考えられる。また、ゴムシリンダ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 3 章にて確認した（図 5）。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いえる。

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であると考えられる。

開発した触力覚センサは、ロボットの指部表面への組込みを想定してサイズを決定・作成しており、ゴムシリンダの硬度や形状を調整することで、分解能と応答性の調整も実現可能であり、片麻痺者の麻痺した片腕を代替可能なロボットアーム・ハンドの触力覚としての活用が期待される。また、感圧ゴムや静電容量式の従来の薄型センサでは、荷重の大きさが一定であっても、荷重が作用する面積や圧力分布が一定でない場合には、荷重計測値が一定とならない問題があるが、提案手法では、接触面が 1 枚のプレート状となっており、加えられた荷重とその荷重中心位置に応じて、計測されるセンサ内の静電容量分布が一意に定まる構造により、この問題を解決し、荷重が作用する面積や圧力分布によらず荷重計測を可能とするものである。提案手法は、センサ部に柔軟性がないため取付け面にある程度の制約はあるものの、薄型センサによって様々な形状の物体との接触力の計測を必要とする場面での活用が可能である。接触面の柔らかさや形状については、センサ表面にゲルシートなど柔軟素材を貼り付けることで対応可能である。また、荷重中心位置の計測に着目したとき、従来手法のうちアレイ型センサでは、点荷重のように荷重が作用する面積がセンサ素子（セル）のサイズより小さい場合に、荷重分布から算出される荷重中心位置の計測分解能はセルサイズに依存して低下する。また、点荷重が電極板の存在しないセンサ素子間の隙間に加わった場合には、荷重および荷重中心位置の計測が困難となる。このような場合、荷重中心位置の移動など連続的な計測が困難となる。これに対し、提案手法では、荷重中心位置に関しても、荷重が作用する面積や圧力分布によらず計測可能なものとなっており、高分解能な荷重中心位置の計測および荷重中心位置の移動など連続的な計測が可能となる。荷重中心位置を連続的に捉えることができるため、滑り検出や把持物に対する力の加わり方を捉えることができ、本論文が対象とするような滑り検出に基づく把持力調整や片麻痺者とロボットアーム・ハンドとの協調作業実現のための情報計測（ロボットハンドが把持した作業対象物に対して、非麻痺腕がどのような方向に力を加えているかという情報計測）という用途に適用可能となる。

今後の課題として、計測精度の向上とキャリブレーションの簡略化のために、センサの各チャンネルの特性が均一になるようなセンサ実機の作成手法を確立していくことが挙げられる。また、本実験では、センサ上のすべての位置に対して荷重印加を行なったわけではないため、今後より正確な計測精度の確認を行うために、荷重印加位置を x 軸および y 軸方向に 1 mm ずつ移動した場合など、荷重印加位置を増やした評価を行なっていく必要がある。しかし、今回設定した荷重印加位置は、キャリブレーションでは使用していない荷重印加位置を、キャリブレーションに用いた荷重印加位置があるセンサ上の十字方向と対角線方向の直線の間を通る直線上に配置したものを含んでおり、実験結果から、実際に様々な日用品の把持や把持物への外力検出へ適用することが可能な計測精度と提案手法の有用性を示すことができたといえる。今後、開発したセンサを実際にロボットの指部へ組込み、様々な日用品の把持や使用者の腕とロボットとの協調作業時の情報計測へ適用することで、本センサの実現場における実用性を確認していく。

7. 結 論

本研究では片麻痺者の麻痺した片腕を代替可能なロボットアーム・ハンドのための触力覚センサとして、荷重が作用する面積や圧力分布によらず、加えられた荷重とその荷重中心位置の2つの情報が計測可能な静電容量式の小型かつ薄型な触力覚センサとそのキャリブレーション手法の提案と研究開発を行った。提案手法では、接触面が1枚のプレート状になっており、加えられた荷重とその荷重中心位置に対して、センサ内に実装された静電容量の特性を用いた4つのセンサから得られる静電容量分布が一意に定まる構造により、荷重が作用する面積や圧力分布によらず上記2種類の情報を静電容量分布から計測可能であるという特徴を持つ。また、静電容量の特性を活かし、高感度で薄型なロボットの指部表面への組込みが可能なサイズとなっている。提案センサにおける材料特性による不確定要素や非線形特性を補正し、計測される静電容量分布を用いた荷重とその荷重中心位置の計測を実現するために、キャリブレーションとして、センサ出力を実験的に確認して特性を明確化し、各関係式を導出・センサ実機へ適用した。そして、計測性能評価実験により、ロボットの指部表面への組込みを想定して作成したセンサ実機において、実際に荷重とその荷重中心位置が計測可能であることを示し提案手法の有用性を確認した。

謝 辞

本研究の一部は、内閣府 ImPACT 革新的研究開発推進プログラムの支援により行われた。

文 献

- 郡司大輔, 荒木拓真, 並木明夫, 明愛国, 下条誠, 触覚センサによる滑り検出に基づく多指ハンドの把持力制御, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.6 (2007), pp.970-978.
- 郡司大輔, 荒木拓真, 柴崎保則, 下条誠, 触覚センサを用いた把持における滑り検出, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2006 (2006), pp.2P2-B02(1)-2P2-B02(4).
- 石川正俊, 下条誠, 感圧導電性ゴムを用いた 2 次元分布荷重の中心の位置の測定方法, 計測自動制御学会論文集, Vol.18, No.7 (1982), pp.730-735.
- Johansson, R. S. and Westling, G., Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects, Experimental brain research, Vol.56, No.3 (1984), pp.550-564.
- 角野元昭, シリコンゴム, 日本ゴム協会誌, Vol.46, No.4 (1973), pp.295-313.
- 柿沢紀世雄, 特許から見た導電性ゴム, プラスチック, 日本ゴム協会誌, Vol.58, No.9 (1985), pp.553-560.
- Lee, H. K., Chang, S. I. and Yoon, E., A flexible polymer tactile sensor: Fabrication and modular expandability for large area deployment, Journal of microelectromechanical systems, Vol.15, No.6 (2006), pp.1681-1686.
- 嶋田明広, 韓鉉庸, 川村貞夫, 人間の手指の摩擦特性の解析, 計測自動制御学会論文集, Vol.32, No.12 (1996), pp.1581-1587.
- 下条誠, 感圧導電性ゴムの履歴特性, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.59, No.564 (1993), pp.2464-2469.
- Shimojo, M., Namiki, A., Ishikawa, M., Makino, R. and Mabuchi, K., A tactile sensor sheet using pressure conductive rubber with electrical-wires stitched method, IEEE Sensors journal, Vol.4, No.5 (2004), pp.589-596.
- 白石康星, 西田佳史, 本村陽一, 大川弥生, 溝口博, 国際生活機能分類を用いた日常生活プロトコルデータの正規化に基づく生活機能構造のモデル化と理解, 信学技報ニューロコンピューティング, Vol.109, No.461 (2010), pp.431-436.
- 白岡貴久, 郭士傑, 橋本和信, 向井利春, ポリマー材料を用いた静電容量型面状センサの開発 (測定精度と空間分解能両立構造の提案), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.798 (2013), pp.304-313.
- Toyama, H., Kawamoto, H. and Sankai, Y., Basic research of upper limb work support system “My cybernic robot arm” for hemiplegic persons, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) (2017), pp.865-871.
- Toyama, H., Kawamoto, H. and Sankai, Y., Development of cybernic robot arm to realize support action cooperated with hemiplegic person’s arm, 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Vol.41 (2019), pp.1645-1650.
- Vallbo, A. B. and Johansson, R. S., The tactile sensory innervation of the glabrous skin of the human hand, Active touch

(1978), pp.29-54.

References

- Gunji, D., Araki, T., Namiki, A., Ming, A. and Shimojo, M., Grasping force control of multi-fingered robot hand based on slip detection using tactile sensor, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.25, No.6 (2007), pp.970-978(in Japanese).
- Gunji, D., Araki, T., Shibasaki, Y. and Shimojo, M., Slip detection in grasping using tactile sensor, *JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec)* (2006), pp.2P2-B02(1)-2P2-B02(4) (in Japanese).
- Ishikawa, M. and Shimojo, M., A method for measuring the center position of a two dimensional distributed load using pressure-conductive rubber, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.18, No.7 (1982), pp.730-735(in Japanese).
- Johansson, R. S. and Westling, G., Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects, *Experimental brain research*, Vol.56, No.3 (1984), pp.550-564.
- Kadono, M., Shirikongomu, *Journal of the society of rubber science and technology, Japan*, Vol.46, No.4 (1973), pp.295-313 (in Japanese).
- Kakizawa, N., Tokkyo kara mita Doudenseigomu, purasutikku, *Journal of the society of rubber science and technology, Japan*, Vol.58, No.9 (1985), pp.553-560 (in Japanese).
- Lee, H. K., Chang, S. I. and Yoon, E., A flexible polymer tactile sensor: Fabrication and modular expandability for large area deployment, *Journal of microelectromechanical systems*, Vol.15, No.6 (2006), pp.1681-1686.
- Shimada, A., Han, H. and Kawamura, S., Analysis of friction characteristics on human fingers, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.32, No.12 (1996), pp.1581-1587 (in Japanese).
- Shimojo, M. and Ishikawa, M., Hysteresis characteristics of pressure-conductive rubber, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.59, No.564 (1993), pp.2464-2469 (in Japanese).
- Shimojo, M., Namiki, A., Ishikawa, M., Makino, R. and Mabuchi, K., A tactile sensor sheet using pressure conductive rubber with electrical-wires stitched method, *IEEE Sensors journal*, Vol.4, No.5 (2004), pp.589-596.
- Shiraishi, K., Nishida, Y., Motomura, Y., Okawa, Y. and Mizoguchi, H., Modeling and understanding structure of everyday life behavior by normalizing life protocol data using ICF code, *Technical Report of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, Vol.109, No.461 (2010), pp.431-436 (in Japanese).
- Shiraoka, T., Guo, S., Hashimoto, K. and Mukai, T., Development of a polymer-based flexible sensor sheet using electric capacitance (A new structure achieving both high precision and high resolution), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.79, No.798 (2013), pp.304-313 (in Japanese).
- Toyama, H., Kawamoto, H. and Sankai, Y., Basic research of upper limb work support system “My cybernic robot arm” for hemiplegic persons, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (2017), pp.865-871.
- Toyama, H., Kawamoto, H. and Sankai, Y., Development of cybernic robot arm to realize support action cooperated with hemiplegic person’s arm, *41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Vol.41 (2019), pp.1645-1650.
- Vallbo, A. B. and Johansson, R. S., The tactile sensory innervation of the glabrous skin of the human hand, *Active touch* (1978), pp.29-54.