

令和元年6月11日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06184

研究課題名(和文)フレキシブル衝撃力センサの検出原理の構築と一構成案の提示

研究課題名(英文) Construction of detection principle of flexible impact force sensor and proposal of one configuration

研究代表者

藤本 由紀夫 (Fujimoto, Yukio)

広島大学・工学研究科・特任教授

研究者番号：60136140

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、球面のような3次元曲面に設置できるセンサと、身体表皮のように衝撃力を受けて湾曲変形する面に設置できるセンサの2種類のフレキシブルセンサの試作品を提示した。センサの柔軟性向上のために、検出素子を小寸法にしてマトリクス状に配置し、各素子間の接続部分を柔軟接続する構造を採用した。また、電極部材として金属メッシュ、導電布帛、素子間に柔軟部を設けた金属薄板を使用した。これら部材は電気配線の役割とセンサの強度部材の役割とを果たす。センサ内部に電気配線が無いので強靱であり衝撃力に耐える構成である。また、ノイズ除去に新規的手法を採用して、計測精度を大きく改善できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3次元曲面あるいは柔軟素材の表面に設置して衝撃力を精度良く計測できるセンサは、現在のところ国内外の研究を見ても見当たらない。本研究で提案した2種類のフレキシブル衝撃力センサの試作品は、実用センサとして未だ完成度の低い部分もあるが、幾つかの実験を通じて、精度良く衝撃力を計測できると共に強靱さも有していることを明らかにした。すなわち、新規的なフレキシブル衝撃力センサの構成案を提示したことに学術的意義がある。また、将来、身体表面や人型ロボット表面に設置して、各種衝撃力を計測できるセンサに発展できる可能性を含んでいる点に社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：This study presented two prototypes of flexible sensors, a sensor that can be installed on a three-dimensional curved surface such as a spherical surface, and a sensor that can be installed on a surface that is curved and deformed under impact such as a body skin. In order to improve the flexibility of the sensor, the detection elements are arranged in a matrix shape with small dimensions, and a structure is adopted in which connection portions between the elements are flexibly connected. Further, as the electrode member, a metal mesh, a conductive cloth, and a thin metal plate having a plurality of flexible portions were used. They play the role of electrical wiring and the strength members of the sensor. Since there is no electrical wiring inside the sensor, it is strong and resistant to impact. Moreover, the new method was adopted for noise removal and the measurement accuracy could be greatly improved.

研究分野：センサ工学

キーワード：フレキシブルセンサ 衝撃力センサ 分布型センサ 静電気除去 柔軟部材 サンドバッグ叩き 球面叩き

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

筆者は、圧電フィルムを用いた薄型の変動荷重センサの開発を約 20 年行ってきた。そして幾つかのパッド状あるいはシート状センサを開発してきた。しかし、それらは平面で使用できるものに限られていた。開発の途中で、曲面に設置できる圧電型センサはできないか、さらには、身体表皮のような柔軟表面に設置できるセンサはできないかと考えてきた。これらが可能になると、身体安全に関する福祉分野、スポーツの技術・試技向上に関する分野、あるいはロボット工学分野などで役立つフレキシブルセンサが提供できると考えたのが研究背景である。

2. 研究の目的

フレキシブルセンサと名前のつくセンサは幾つか提案されている。しかし、それらは曲面や柔軟部材の表面に設置して、圧力の有無の判定に使用する触覚センサや、圧力の大きさの荒い段階評価に限られている。その理由は、3 次元的曲面や柔軟な表皮部材に無理に密着させるとセンサに皺が生じて、計測精度が極端に悪くなるからである。すなわち、湾曲変形させて精度の得られる検出素子が現在無いことと、湾曲変形に追従するセンサ構造の設計が容易でないためである。

本研究では、どのようなセンサ構造にすれば、センサの柔軟性を確保した上で精度良く衝撃力を計測できるのか、その構成案を見出すことを目的とした。とくに、大荷重で高速度の衝撃力に対して、センサ内部で断線の生じない強靱なセンサを開発することが目的とした。圧力検出素子としては高速応答性に優れ、筆者の研究実績のある圧電フィルムを使用した。具体的には、次の 2 つの設置条件で使用できるフレキシブル衝撃力センサを提示することを目的とした。

- (1) 一つは、3 次元的に湾曲した硬い物体の表面に設置できるフレキシブル衝撃力センサで、例えば金属の球面に設置できるものである。設置にはセンサを湾曲させる必要があるが、一旦設置すると使用中は面外変形しないセンサである。設置面が硬い曲面であるので使用中の湾曲は生じないが、対象が衝撃力であるので強靱さが必要である。
- (2) もう一つは、衝撃力を受けて凹凸変形する物体表面（例えば身体表皮）に設置できるフレキシブル衝撃力センサで、例えば身体表皮やダミー人形に設置できるものである。これらでは、衝撃力を受けて柔軟表面が面外に変形するので、センサが変形に追従できるとともに面外変形に対して誤差信号が侵入しない構成が必要である。

3. 研究の方法

- (1) 3 次元的に湾曲した硬い表面（例えば球面）に設置できるフレキシブル衝撃力センサ
平面使用の薄型センサは円柱面には曲げて設置できるが、3 次元湾曲面には密着させて設置することができない。つまり、3 次元曲面では、センサが湾曲部に沿うように変形しなければならぬ。

図 1 は本研究で開発したセンサの写真と内部の圧電フィルム片の配置例を示す。センサの外形は約 31 × 31 mm で、内部に一辺 10mm 四角の圧電フィルム片が 3 × 3 のマトリクス状に配置されている。また、圧電フィルムは 2 層に重ねてあり合計 18 枚のフィルムを使用している。

フレキシブル衝撃力センサを実現するために工夫した点は次の 4 点である。

- センサを湾曲可能に作製するために表皮と内部の電極材にステンレスメッシュを用いた。ステンレスメッシュは電極の機能だけでなく、センサを一体化する構造部材の役目も果たす。
- 小寸法の圧電フィルム片を内部に分布配置することで、素子と素子の境界部分に自由に変形できる空間が生じる。これによって、湾曲させたときに圧電フィルムに無理な負荷がほとんど生じないようにすることができる。もちろん、設置面の曲率半径にはある程度制限がある。
- 衝撃力で電氣的短絡や断線が生じないようにセンサ内部の電気配線を無くして強靱な構成にした。
- センサ内部に静電気防止対策を施した。

なお、センサに布帛などを貼ると厚くなるが、標準的厚さは 1 ~ 1.2 mm 程度である。2 方向に湾曲させる場合には曲率半径 40 ~ 50 mm 程度が最小の限界であった。それより曲率半径が小さいと皺が発生して完全に密着させるのが困難であった。図 2 は一辺 10mm 四角の圧電フィルム片を 3 × 5 のマトリクスに配置した金属メッシュセンサを、両面テープで木の曲面に張りつけた様子を示す。

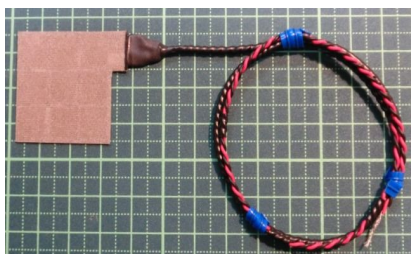


図 1 曲面設置用センサと内部の圧電フィルムの配置状態

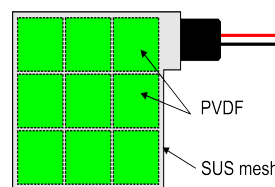


図 2 曲面への設置例

図3は、ロードセル(基準センサ)の上にアルミ合金半球(直径100mm)を置き、半球頂点部に両面テープで約31mm四角のフレキシブル衝撃力センサを貼り付け、フェルト底鉄ハンマで強さを変えて叩いたときの波形を4例示す。最大4.5kN程度まで叩いているが波形はほぼ良好である。衝撃時間は約5msecである。除荷時の荷重の原点への復帰が少し遅れるのは、打撃によって粘着テープが変形するためと考えられる。

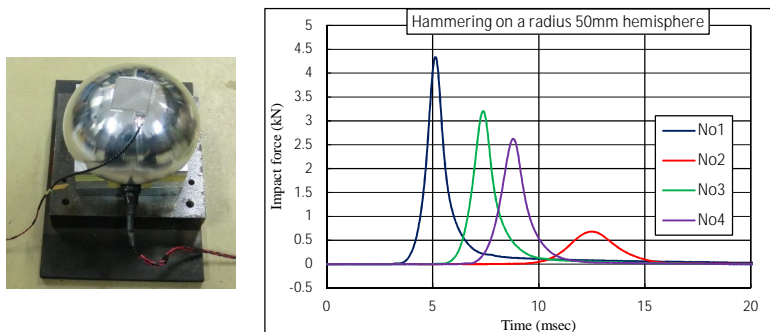


図3 センサを球面に両面テープで止めてハンマ叩きしたときの衝撃力波形

図4は平面にセンサを置いてフェルト底鉄ハンマで叩いた場合と、直径100mm、125mmおよび150mmの3種類の半球面に設置して同じハンマで叩いた実験で得た、センサのピーク出力とロードセルのピーク荷重との関係をプロットしたものである。

平面叩きおよび球面叩きの場合ともに、荷重とセンサ出力関係は良い直線性を示している。また、半球直径が小さくなるにつれて、同じ荷重に対してセンサ出力(出力勾配)が少し大きくなる傾向がみられる。その理由はハンマの圧力が頂点部分で大きく作用し、周囲に行くほど小さくなるため、分布圧力の概略を想定して校正すると、いずれの場合も平面叩きの場合とほぼ同じ出力勾配が得られる。

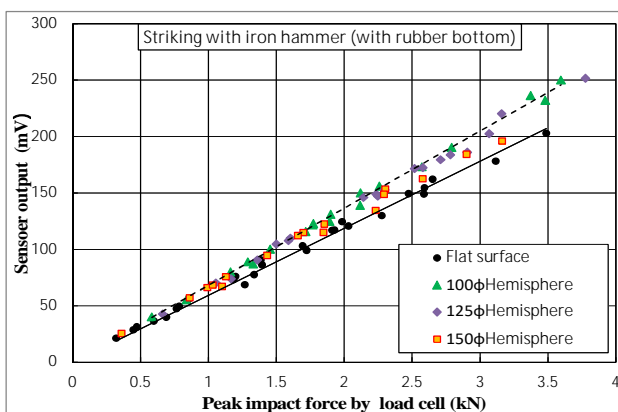


図4 平面および3種類の球面でセンサを叩いた時の出力

(2) 衝撃力を受けて凹凸変形する柔軟表面に設置できるフレキシブル衝撃力センサ

センサの検出素子を小寸法に作製したとしても、検出素子が衝撃力によって面外に湾曲すると曲げによるノイズ成分が圧力による出力に重畳して、大幅に計測精度が低下する。これを防止する方法を長年検討してきたが良い手段が見いだせなかった。そこで本研究では、小寸法の検出素子を面外変形しない剛性板状に作製して、剛性板状素子を分布配置し、素子と素子の接続部分に柔軟性を持たせる構成でフレキシブルセンサを作製することを考えた。

図5(a)は試作した一辺20mm四角の検出素子(1mm厚のステンレスに圧電フィルムを接着したもの)と、表裏各25枚の検出素子を5x5のマトリクス状に分布配置する柔軟金属板(0.08mmのステンレス板)を示す。柔軟金属板は素子と素子間の接続部分が細く作製してあり、この部分で柔軟性を確保すると同時に、全ての素子の出力を取り出す正電極の役目も果たす。

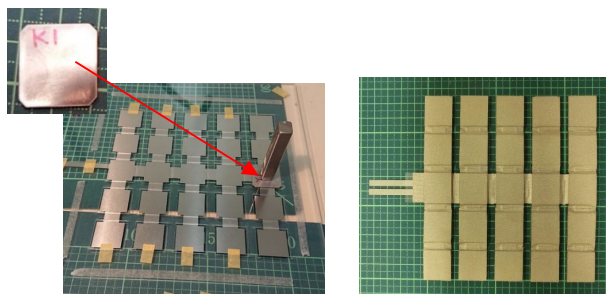


図5 (a) 剛性板状検出素子と柔軟金属板
(b) 導電布による負電極の形成

図5(b)は両面の全ての検出素子を覆う形態に導電布を導電接着した状態である。導電布は柔軟なため、素子と素子の接続部分の面外変形を阻害することなく、センサの負電極の役割を果たす。

図6はセンサに電気配線して全体を布製袋に収めた様子と柔軟に変形する様子を示す。なお、センサは本体厚さが約3mm、布製の袋を入れても4mm程度である。

図7は一個の検出素子をロードセルの上でハンマ叩きしたときの、荷重とセンサ出力の関係の一例を示す。20mm 四角の素子一個で 2kN 以上の耐荷力があるので、25 個配置したセンサ全体としては 50kN の耐荷力があることになる。

図8はセンサをサンドバッグにガムテープで止めてボクシンググラブで打撃試験を行った様子とその衝撃波形例を示す。衝撃時間は 100 ~ 200 msec で、ピーク衝撃力は 2 kN 程度になっている。打撃方法と衝撃力には当然個人差があるが、サンドバッグが打撃によって後方に振れるためか、除荷が緩やかに生じる波形になっている。

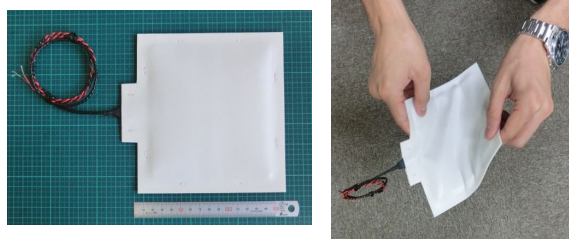


図6 センサ本体を布製袋に収めた状態と柔軟湾曲する様子

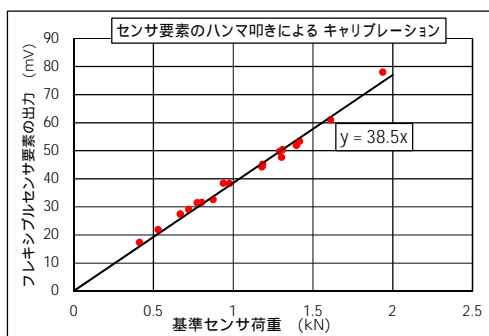


図7 検出素子一個の出力特性

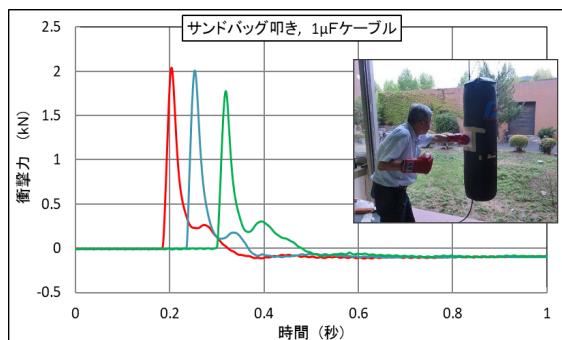


図8 センサをサンドバッグに設置して打撃したときの衝撃力波形

4. 研究成果

フレキシブル衝撃力センサでは、次の2つの使用条件を想定しなければならない。一つは対象物の設置面は曲面であるが表面が硬い対象物の場合、もう一つは衝撃力によって凹凸変形する柔軟な設置面で使用する場合である。本研究の成果は次のようである。

(1)硬い3次元曲面あるいは硬い球面に設置して衝撃力を計測できるセンサの試作品を提示した。このタイプのフレキシブル衝撃力センサは、一辺が10mm 四角の圧電フィルムを用いた場合、直径100mm以上の球面に両面テープで設置することが可能であった。また、1~5kN程度のハンマ叩きの衝撃力をかなり精度よく計測できることが明らかとなった。なお、センサ内部に信号を取り出すための電気配線が無いため、衝撃による断線等の問題は生じなかった。

(2)衝撃力を受けて凹凸変形する柔軟な素材表面に設置できるセンサの試作品を提示した。このタイプのセンサは、一辺20mm 四角の検出素子を5x5に分布配置すると、外形15cm 四角程度のフレキシブル衝撃力センサを作製できた。また、センサをサンドバッグに設置してボクシングの打撃実験を行ったところ、衝撃力波形をかなり精度良く計測できることが明らかとなった。なお、センサ内部に信号を取り出すための電気配線が無いため、衝撃による断線等の問題は生じなかった。さらに、検出素子寸法が一辺10mm 四角と小さく、柔軟性の高いセンサの試作にも成功した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

藤本由紀夫、藤森圭哉、田中義和、新宅英司、フレキシブル衝撃力センサの開発、日本機械学会2018年度年次大会講演論文集、No.18-1、2018。(査読無し)

藤本由紀夫、新宅英司、大型構造システムの信頼性と安全性、日本設計工学会誌、Vol.52、No4、2017、pp.194-198。(査読有)

藤本由紀夫、新宅英司、田中義和、中西敏輝、フレキシブル衝撃力センサのスポーツ工学への適用、日本機械学会スポーツ・ヒューマンダイナミクスシンポジウム講演論文集、B-7、2016、pp.1-9。(査読無し)

[学会発表](計1件)

藤本由紀夫、大型構造物の安全性と維持管理、中国地方非破壊検査技術振興会、2017