

令和元年10月30日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03134

研究課題名(和文) ロボット装着部における創傷発生機序の解明および装着部安全性試験装置の開発

研究課題名(英文) Analysis of the blister generation mechanism at the contact area of the robotic cuff and development for the safety evaluation equipment

研究代表者

山田 陽滋 (Yamada, Yoji)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：90166744

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、主に装着型ロボット-皮膚接触面における皮膚側応力分布を計測するための、接触面直下に配置する新型応力センサを開発した。次に、開発したセンサシステムの周波数特性、応力伝達特性等を計測し、その妥当性を確認した。ゲル素材で製作したダミー皮膚表面に、装着型ロボット使用時を模した変形パターンを与え、その際にダミー皮膚内部に生じる応力を計測し、評価した。これにより、開発したセンサシステムによるロボット装着部安全性評価が可能であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、高齢化社会において今後普及が期待される装着型ロボットにおいて発生する安全上の問題の解決に貢献するものである。ロボットの装着に伴う創傷リスクは製品の接触安全性にかかわるものであり、解決できなければ普及の停滞につながることもありうる。また、創傷の原因となる柔軟な素材上のせん断応力は学術的にも未解決の課題であり、その直接計測方法の開発は、せん断変形時の弾性材料内部の複雑な応力状態を解明することに貢献する重要な成果である。

研究成果の概要(英文)：A novel stress sensing system, which could measure the distribution of stress of elastic material, was developed in this study. This sensor system is capable of observing the tissue burden under the robotic cuff. The characteristics of the sensor system such as frequency property and stress transferring property were validated. Then, this sensor system was embedded in the dummy tissue made of gel and the pattern of deformation, which simulate the relative motion between the human and the wearable robot, was applied to the surface. Under this condition, the pattern of stress distribution exerted to the gel was successfully observed. This, the feasibility of the developed sensor system as an equipment to test the contact safety of the wearable robot was suggested.

研究分野：安全工学

キーワード：装着型ロボット 接触安全 創傷リスク

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

### 1. 研究開始当初の背景

近年普及が進む装着型ロボットは、人体と密着して使用され、装着者も特別な訓練を受けていないため、産業用途の一般機械類よりも高度な安全性が要求される。接触安全性の観点からは、装着者にアシスト力を伝達する装着部(カフ)において皮膚・皮下組織の擦れや変形が生じ、水泡・擦過傷といった創傷を生じることが指摘されている。そのため、申請者が提案を取りまとめた装着型ロボットを対象に含む国際安全規格 ISO-13482 においても接触安全性への配慮が求められている。これに対し、申請者らは商用の装着型ロボットのカフにおける作用力の計測を行い、装着部挙動の解明および接触現象のモデル化に取り組むことで、接触安全性試験において遵守すべき試験法および評価基準の策定に貢献してきた。

水泡は、繰り返しのせん断応力により皮下組織の剥離・破壊が発生することで生じるが、その具体的な挙動は明らかにされていない。そのため、人体皮下組織に類似した性質を持つとされる豚皮膚において繰り返しせん断実験を行い、組織断面観察を行うことで水泡の発生を確認する方法が用いられている。しかしこの方法は、材料である豚皮膚の入手および専門的な後処理が必要であり、工業的な試験法としてはなじまない。さらに、異なる条件で検証を行う際の必要サンプル数が増大し、試験のコストも増大する。安全性検証試験では水泡の再現ではなく水泡発生リスクの多寡の評価のみが求められるが、幅広い接触条件において、生体材料を用いた網羅的な試験に抛らずに接触安全性評価を行うためには、実際の複雑な生体軟組織を模擬した構造について内部の応力・ひずみ分布状態を計測することが有効である。

### 2. 研究の目的

カフ部接触面の挙動および応力分布の計測には、カフ全体の作用力、表面の滑りの計測に加え、接触面のせん断力の分布を直接計測することが必要とされるが、現在一般的な圧力センサでは法線力のみを計測しか行えず、その他の方法も分解能、センサの厚み等を実装上の問題があり、カフ部への適用は困難である。そのため、新たにセンサシステムを開発し、ダミー人体組織に実装する。

### 3. 研究の方法

本研究ではまず、軟組織埋め込み型のせん断力センサ素子を開発し、それを柔軟材料へ埋め込む。そして、表面にせん断変形を与えた際のせん断力分布を計測し、妥当性を検証する。

#### 3.1 センサの開発

本研究で用いたセンサの基本的な構成を図 1(a)に示す。センサ素子である PolyVinylidene DiFluoride (PVDF) フィルムを母材内で直立させ、母材表面付近まで埋め込んだ構造となっている。

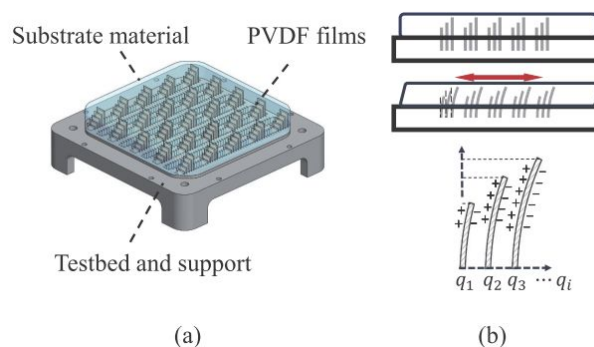


図 1 センサの構造

センサ素子は、母材の物理特性に与える影響を最小化するため、フィルム状の構造が適切である。そのため、PVDF フィルムの両面に電極を蒸着し、保護フィルムで被覆したものをを用いた。PVDF フィルムは母材内でせん断力によって梁のように屈曲する。それによりフィルム内に圧縮力が生じ、圧電特性によって電荷が移動する[6]。母材内に異なる長さのセンサ素子を平行に埋め込むことで、せん断変形の深さ方向分布を計測することが可能となる(図 1(b))。

PVDF フィルムは単体では剛性が低くセンサ構造の製作が困難であるため、シート状の PET によって補強が必要である。一方、母材の変形に影響を与えないためには可能な限り薄くすることが望ましい。そのため、50, 25, and 16  $\mu\text{m}$  のそれぞれの厚さの PET シートを用いてセンサ素子を製作し、比較した。その結果、16  $\mu\text{m}$  のシートであってもセンサの製作が可能であり、機能することが確認された。そのため、以降は 16  $\mu\text{m}$  のシートを用いたセンサ素子を使用した。

センサ素子を埋め込む柔軟母材には、アスカ-C 硬度 0 のゲル素材を使用した。センサ素子を樹脂製の台座に固定し、ゲルを充填することで図 1(a)に示す実験装置を製作した。センサ素子の配線は、土台下面より行った。

### 3.2 実験

ダミー人体組織の概要を図2に示す。ゲル素材は100 mm角、厚さ12 mmで成型し、中に25枚のPVDFフィルムを5枚セットで5組配置した。各組においてフィルムの間隔は10, 8, 6, 4, 2 mmとし、間隔の影響を評価した。また、各組のセンサ長さは、紙面左から10, 8, 6, 4, 2 mmとした。

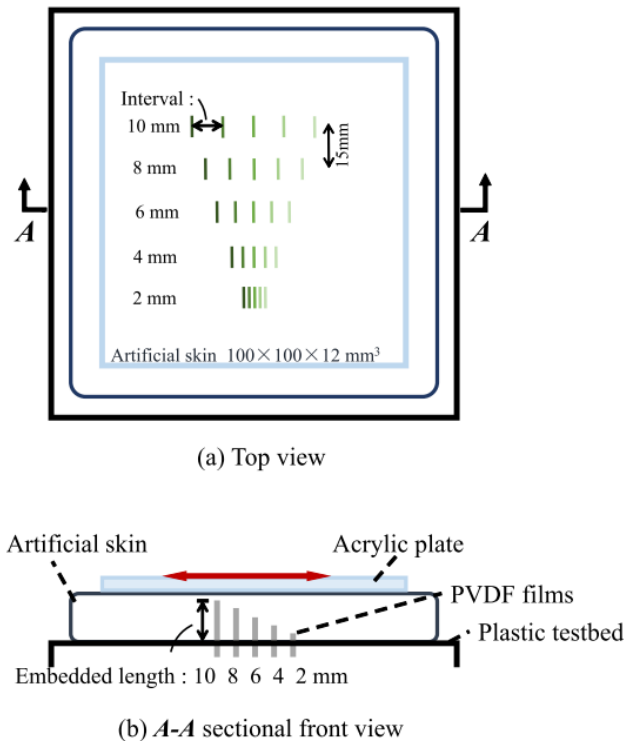


図2 ダミー人体組織におけるセンサの配置

このダミー人体組織を組み込んだ図3に示す装置によってせん断力計測を行った。垂直多関節マニピュレータを用いて、ダミー人体組織に周期的にせん断変形を与えた。マニピュレータのエンドエフェクタには、80 mm角のアクリル板を取り付け、ダミー人体組織に平行に接触させた。アクリル板はすべてのセンサ素子を覆うように配置され、アクリル板はダミー人体組織表面で滑らない。エンドエフェクタは、片側振幅2.5 mm、0.5-5 Hzのサイン波で、センサ素子に垂直な方向に動作し、ダミー人体組織表面にせん断変形を加えた。振幅および周波数は、装着型ロボット使用時の装着者=ロボット接触部の相対変位より決定した[7]。

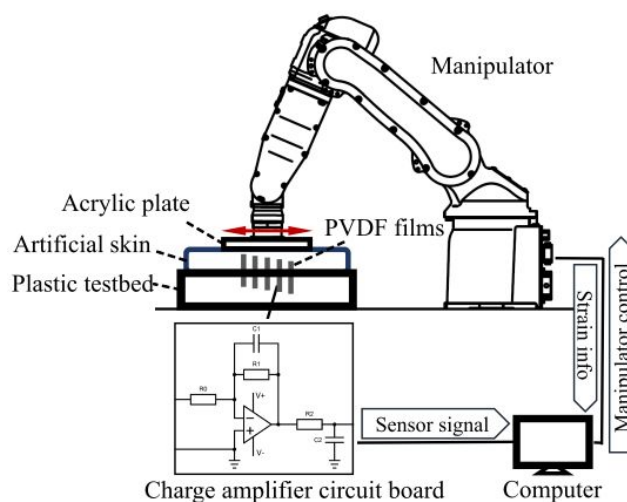


図3 繰り返しせん断負荷装置

### 4. 研究成果

繰り返しせん断の負荷に伴い、各センサ素子からはサイン波形状の出力が計測された。そのため、出力の振幅を変形の指標として用いた。

センサ素子間の間隔を変数とした組間の出力を図4に、素子間間隔2 mmの組において周波数

を変数とした出力を図5に示す。いずれも、横軸はセンサ素子高さであり、縦軸は電荷の振幅である。いずれの条件においても出力は長さ10mmのセンサを除いてセンサ長さに対応して増加しており、弾性体の変形に対応している。10mmのセンサは先端と表面の距離が近く、境界条件の影響を受けた可能性がある。

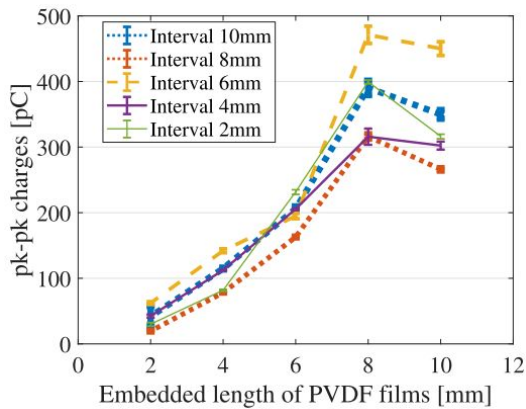


図4 センサ間隔と出力の関係

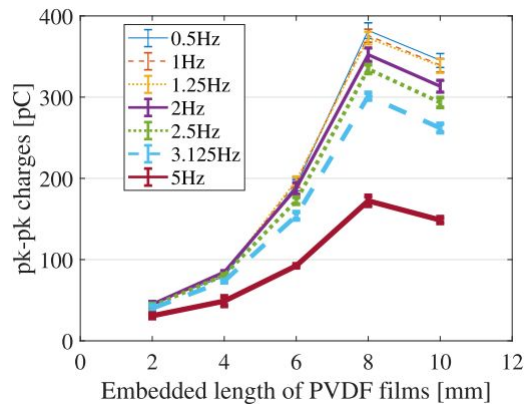


図5 周波数と出力の関係

センサ間隔は可能な限り狭い方がセンサの実装上好ましい。一方、PVDFフィルムが過度に近接すると、物理的、電気的な干渉が発生する懸念がある。しかし、センサ間隔の異なる組を比較した図4の結果では、センサ間隔による出力の変化はセンサ特性に影響を及ぼすようなものではなく、そのような干渉による出力の変化がないことを示すものである。そのため、2mm程度までは近接してセンサを配置できるものと考えられる。センサ間隔の異なる条件で出力に差が生じているが、幾何学的な配置を考慮すると、エンドエフェクタ中心線上の6mm間隔の組が最大の出力であり、中心線から側方に離れるにつれ出力が減少している。そのため、計測された出力の差は、アクリル板により与えられたせん断負荷が不均一であったために生じたと考えられる。

また、変形周波数を変数とした図5からは、高周波において出力が減少する傾向が読み取れる。これは、粘性物体においては高周波の変形が深部で減衰するという傾向[8]を反映したものであり、妥当な結果である。

このように、本研究で開発したセンサは柔軟物体内部におけるせん断変形の分布を計測する機能を有することが確認された。これにより、本センサシステムは2019-179219「計測システム」として出願された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

松原知貴, 伊藤安海, 福岡達也, 山田隆一, 鍵山善之, 根本哲也, “FEM解析用いた骨折解析の法科学的評価 - 幼児頭蓋における損傷評価 -,” 実験力学, vol. 18, pp. 278-282, 2018

〔学会発表〕(計4件)

Tatsuya Fukuoka, Yasumi Ito, Momoko Watanabe, Kaito Shinmura, Tomotaka Matsubara, Yoshiyuki Kagiya and Tetsuya Nemoto, “Study on the Evaluation Method of Fracture Risk by Dynamic Loading Considering Age and Gender - Influence of Bone Strength and Soft Tissue -” The Sixth Japan-US NDT Symposium, 2018

Sota KONDO, Yasumi ITO, Tatsuya FUKUOKA, Kazuya CHIGIRA, Yoshiyuki KAGIYAMA, Ryuichi YAMADA and Tetsuya NEMOTO, “Dynamic Viscoelasticity Properties Evaluation of Skin and Development of Dummy Skin for Safety Evaluation: Analysis of Deformation Behavior in the Depth Direction of the Skin,” 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 2018

Tomotaka Matsubara, Yasumi Ito, Tatsuya Fukuoka, Ryuichi Yamada, Yoshiyuki Kagiya, Tetsuya Nemoto, “Improvement of Human Body Damage Evaluation Method by Computer Simulation - Verification of Infant Bone Properties Compared with Actual Experiment,” American Academy of Forensic Sciences 71st Annual Scientific Meeting, 2019

根本哲也, 富村敦子, 伊藤安海, 磯貝善蔵, 原田敦, “コンピュータシミュレーションを用いた介護作業時の骨損傷程度の推定,” 日本法科学技術学会第24回学術集会, 2018

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：計測システム

発明者：秋山靖博，李豊羽，万象隆，岡本正吾，山田陽滋

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2019-179219

出願年：令和元年

国内外の別：国内

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：秋山靖博

ローマ字氏名：Akiyama Yasuhiro

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：工学研究科

職名：助教

研究者番号（8桁）：00610536

研究分担者氏名：岡本正吾

ローマ字氏名：Okamoto Shogo

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：10579064

研究分担者氏名：伊藤安海

ローマ字氏名：Ito Yasumi

所属研究機関名：山梨大学

部局名：大学院総合研究部

職名：准教授

研究者番号（8桁）：40356184

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。