

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 24 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500643

研究課題名(和文) 電動義手による物体把持向上のためのヒト指尖部 pulp 機能の研究

研究課題名(英文) Study on the structure of fingertip pulp for improving object grasping by electric artificial arm

研究代表者

嶋脇 聡 (Shimawaki, Satoshi)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10344904

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000 円、(間接経費) 1,230,000 円

研究成果の概要(和文)：MRI撮影により、指尖部pulpの構造と指尖部圧迫時におけるpulp変形が計測された。この結果を用いて、電動義手の骨格にpulp部を装着させて、物体把持における接触面積を計測した。その結果、pulpを装着することで接触面積の増加が確認され、把持性能の向上が期待された。指尖部pulpを搭載したヒト指尖部有限要素モデルを構築して、物体接触による変形を解析した。MRI計測と有限要素解析における指尖部変形はよく一致していた。これらの結果が電動義手に応用されれば、片手喪失の障害者にとって生活の質(Quality of Life: QOL)の向上につながり、さらに社会活動への積極性の増加が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Magnetic resonance imaging (MRI) was used to measure the structure of fingertip pulp and pulp deformation when pressure was applied to the fingertip. Using the results obtained, we attached the pulp portion to the frame of an electric artificial arm and measured the contact area during object grasping. We confirmed an increase in the contact area caused by the attachment of pulp, which was anticipated to improve object grasping. A human fingertip finite element model equipped with fingertip pulp was then constructed, and deformation caused by object grasping was analyzed. MRI measurements and fingertip deformation in the finite element analysis were well matched. Application of these results to electric artificial arms could lead to improved quality of life (QOL) of disabled individuals missing an arm, which might increase their initiative to participate in social activities.

研究分野：生体計測

科研費の分科・細目：リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：指尖部pulp 電動義手 MRI 有限要素法 変形解析 接触面積 超低硬度ウレタンゴム ロボットハンド

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、平成17-18年度「とちぎコンソーシアム事業」で分担者および栃木県内企業3社とともに、ヒューマノイド電動義手(宇都宮ハンド)を開発した(図1)。この義手は、装着者(片手喪失障害者)の健全な手より型取りした表皮を有し、さらに健全な手の動作を三次元解析して得られたデータどおりに駆動する骨格部を有している。これらの機能により、ヒトそっくりな触感および動作を備えた義手である。この義手は茶碗などの円形物体を把持することを主な目的に設計されている。そこで、小さい駆動力で安定した物体把持が可能となる機能の具体的方法を模索してきた。

ヒトの指尖部構造を調査すると、末節骨と皮膚との間には pulp と呼ばれる柔軟性に富んだ組織が充填されていることが分かる。物体把持の際に、この pulp は皮膚と共に物体形状に沿って変形し、よって物体との接触面積を増加させることにより、物体の安定した把持を実現させていると考えられる。研究代表者は、平板圧迫時における指尖部変形の計測や、ヒト指尖部のCT画像より構築した有限要素モデルを作成して指尖部変形の数値解析を行ってきた。また、指尖部変形時のMRI撮影を実施し、pulp が指尖部変形において重要な役割を果たしていることを確認した。pulp は単一の組織ではなく、線維組織などによる異方性を有する複合組織であることが知られている。

従来の電動義手として、Otto Bock 社製筋電電動義手が挙げられる。これは、筋電による駆動性能および外見のコスメテックデザインが特徴的な製品であるが、指尖部の柔軟性が乏しく、物体を挟み込むように把持する構造となっている。装着者が義手を自分の手として愛着を持つためには、義手の触感がヒト手のそれに近いことが重要である。この重要性は、装着者および他人が義手に触れた際に感じる違和感(ヒトの手とは異なると感じること)を排除しようとすることである。

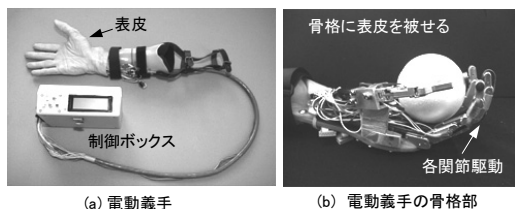


図1 電動義手(宇都宮ハンド)

2. 研究の目的

研究代表者はヒト指尖部における pulp 構造を理解して、その結果より電動義手に pulp 機能を付加させて、電動義手の把持機能と触感の向上を図ることを目的とする。

(1) 指尖部のMRI撮影により指尖部内 pulp の複合構造および形状を計測する。

- (2) その結果をもとに、試作 pulp を製作し電動義手に搭載させて、球体および円筒物体を把持した際の把持力を計測する。把持力の計測には手表面圧力分布測定装置グローブスキャンを使用する。pulp 素材としてウレタンフォーム、ポリエチレンフォーム、ゴムスポンジなどを使用する。pulp の複合構造を再現するため、これらの素材を複合して使用する。
- (3) 数種類の素材にて製作した試作 pulp を搭載した電動義手を健全者に触れてもらい、ヒト手の触感に近いものを感性工学的評価にて決定する。
- (4) 有限要素解析により、試作 pulp を搭載した電動義手の指尖部が物体把持による変形を数値解析する。

3. 研究の方法

(1) MRI による指尖部 pulp 変形計測

被験者として右手に既往歴の無い健康な男性3人を選んだ。年齢は21~22歳、身長は175.0±5.6cm、体重は60.6±8.6kg、体脂肪率は15.9±2.1%であった。全員が右利きであった。

図2に指腹部圧迫装置を示す。この装置は水を入れた容器を垂直に支持できる構造であり、容器を垂直方向へ移動することが可能であった。容器の先端には、指腹部を圧迫するための対象物が設置された。対象物の形状は、①直径4mm半球体、②直径5mm円柱、③25mm四方の面を有する四角柱の3種類であった。直径4mm半球体と容器は直径4mm円柱で接続された。圧迫荷重を1Nと3Nの2条件とした。また、圧迫無しの場合も追加した。

指腹部圧迫装置にて指腹部を変形させた状態で、MRI装置(Intera Achieva 1.5T, Phillips社製)を用いて、指先端から22mm近位までスライス間隔1mmでMR画像を撮影した。指腹部圧迫から撮影開始までの所要時間は約5分間、撮影所要時間は約2分間であった。撮影条件は繰り返し時間TR=1040ミリ秒、エコー時間TE=9ミリ秒であった。スライス断面を指軸に垂直面とした。また、撮像視野は60mm×60mmであった。

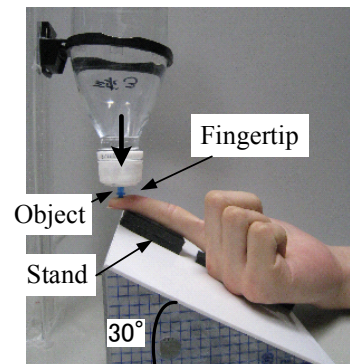


図2 MRIによる指尖部 pulp 変形装置

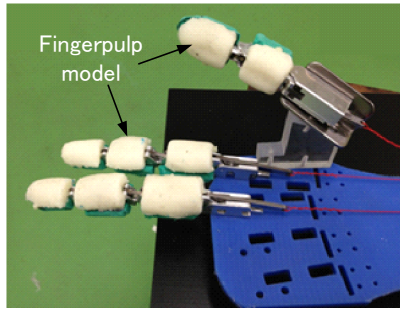


図3 電動義手に装着した試作 pulp

(2) 試作 pulp の製作と接触面積の計測

腹部 pulp モデルの材質を決定するにあたって、加工が困難でなく、繰り返し圧縮による性能の変化がみられないものという選定条件を定めた。硬さを広範囲で調節することが可能で、かつ適度なクッション性を持ち、緩衝材としてよく用いられるゴムスポンジから選定することにした。ゴムスポンジには、天然ゴム(NR系)、クロロプレンゴム(CR系)、エチレンプロピレンゴム(EPDM系)、ニトリルゴム(NBR系)、シリコーンゴム(Si系)、ウレタンゴム(U系)などがあり、どれも気泡構造を有している。ゴムスポンジの中から特性の異なる3種(ウレタン系ゴム、天然ゴム・クロロピレンゴム、エチレンプロピレンゴム)を選定した。さらに、各素材を硬度5~10の低硬度、硬度35~45の高硬度の2種類に分けた。よって、素材および硬度の異なる6種類の素材から指腹部 pulp モデルの製作を作成した。

1. ウレタン系ゴム：
 - (a) 超低硬度ウレタンゴム(硬度5)
 - (b) ポリエステル系ウレタンゴム(硬度45)
2. 天然ゴム・クロロピレンゴム：
 - (c) 天然ゴム N-149(硬度9)
 - (d) クロロピレンゴム C-4500(硬度40)
3. エチレンプロピレンゴム：
 - (e) ラバペルカ EP-101(硬度8)
 - (f) エチレンプロピレンゴム E-4408(硬度35)

図3に代表として、超低硬度ウレタンゴムで作成した指腹部 pulp モデルを電動義手骨格部に接続した状態を示す。

指腹部 pulp モデルを装着した電動義手骨格部に、超軟質ウレタンゴム(硬度15)で作成した皮膚モデル(皮膚厚さ2mm)を装着した。皮膚モデルはヒト外表面三次元データより作成された。電動義手骨格部を板上に設置して、各指モデルにワイヤを接続した。ワイヤの他端には牽引用の重りが接続しており、ワイヤを介して指モデルの機構を駆動するようになっている。指モデルの機構を牽引することで、各指関節が屈曲するようになっている。各指の末節、中節、基節部には把持力分布測定システムグローブスキャンのセンサーシートを貼付した。このシートには16個の感圧部があり、その点における接触圧力

を瞬時に計測することができる。これにより、各シートの接触圧力、接触面積、総荷重を算出できる。

(3) 有限要素法による指尖部 pulp 変形解析

今回の有限要素解析では、ヒト示指の指尖部のモデルを作成した。以下に手順を示す。まずCT・MRI画像撮影を行い、得られたヒト指尖部の断面画像から指骨、皮下組織、皮膚、脂肪部の輪郭をそれぞれ点で抽出した。抽出した点を3次元座標として、有限要素法解析ソフトウェアANSYS/LS-dynaに入力してエリアとボリュームを作成した。

ヒト指尖部の指骨、皮下組織、皮膚モデルは、X線CT(Computed Tomography:コンピュータ断層撮影装置)を使用して三次元ヒト指尖部モデルを作成した。ヒト指尖部の脂肪部モデルは、MRI(Magnetic Resonance Imaging:核磁気共鳴画像法)画像撮影装置を使用して撮影した。2種類の撮影装置を用いた理由は、X線を使用して撮影するCTは骨や皮膚を撮影する場合には問題ないが、皮下組織内の脂肪や腱などを判別しやすい画像を得ることができない。そのため、水素原子に反応するMRIを用いて脂肪の位置を判別した。被験者は、右手示指の近位指節間関節(Proximal Inter Phalangeal、以下PIP関節と略す)より遠位に傷や障害のない健康成人男性である。

まず、tiffファイルを、Illustratorを使ってカラー反転させた。カラー反転させた理由は、境界の識別を容易にするためである。皮膚、皮下組織、脂肪の輪郭抽出では、この反転させたtiffファイルに、7.5deg間隔で区切った放射状の細線を貼り付けて、bitmapファイルとして出力した。次に輪郭選出用ソフトウェアSURF driverを用いて、この

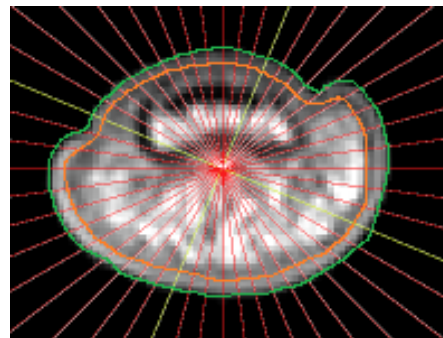


図4 MRI画像から指尖部モデルを構築

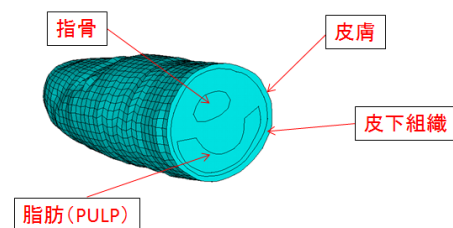


図5 ヒト指尖部有限要素モデル

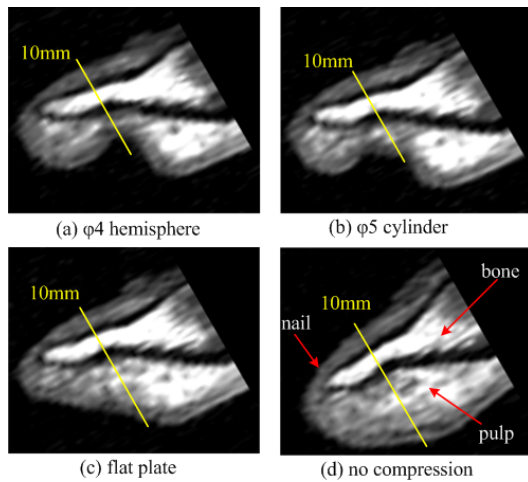


図6 指先部 pulp 変形の MR 画像

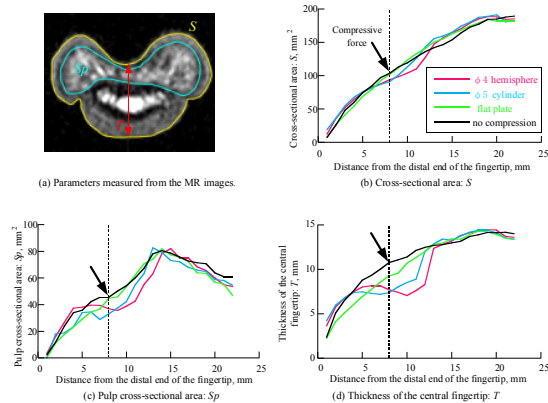


図7 指軸方向における抽出要素の変化に及ぼす圧迫対象物形状の影響

bitmap ファイルにおける放射状の細線と皮膚、皮下組織及び脂肪の輪郭との交点を目視にて決定した。これにより皮膚、皮下組織、脂肪では7.5deg 間隔で48点の交点を選出し、同様に指骨では、カラー反転させた後、22.5deg 間隔で、16点の交点を選出した(図4)。指骨、皮下組織、皮膚モデルのメッシュ化を行い、皮下組織モデルの一部を脂肪組織モデルに置換した後にこれらを統合して、ヒト指先部有限要素モデルとした(図5)。

4. 研究成果

(1) MRI による指先部 pulp 変形計測

図6に、被験者1名(22歳、身長177cm、体重62kg)の各対象物で圧迫した際の指中心軸断面におけるMR画像を示す。他の被験者についても同様な傾向が確認された。圧迫荷重が3Nの場合である。また、比較のため、圧迫無しの条件におけるMR画像も示す。図6(d)より、指中心部に鮮明な白色で見られる部位は末節骨の骨髄であり、その外周に黒色で縁取られている部位が皮質骨である。指腹部において骨と皮膚の間に脂肪で満たされたpulp部が白色で確認できる。圧迫する対象物の形状が異なると指腹部変形が異なるが、pulp内の脂肪分布(白色部の分布)も異なる。球体および円柱で圧迫された場合(図6a, b),

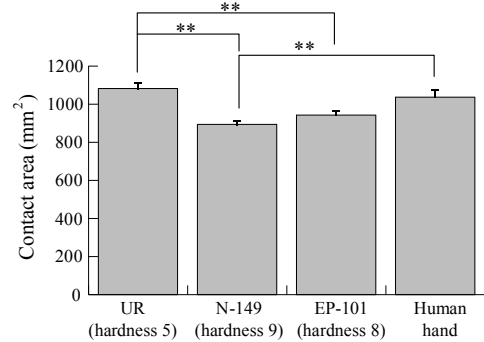


図8 低硬度素材とヒト手による接触面積の比較

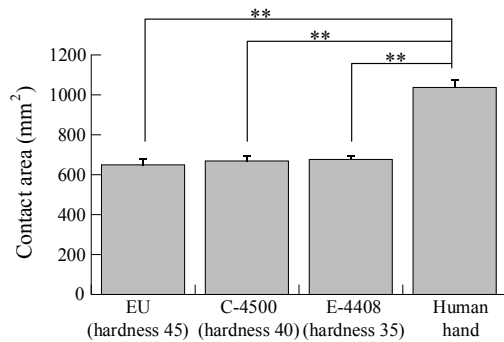


図9 高硬度素材とヒト手による接触面積の比較

pulp内の脂肪は主に圧迫位置より近位へ移動し、圧迫部と骨との間に脂肪が減少するが、平板で圧迫された場合(図6c)、圧迫部と骨との間にほぼ均等に脂肪が分布していることが確認された。

図7(a)に横断面のMR画像から抽出した要素を示す。抽出要素は3つ(指断面面積 S , pulp断面面積 Sp , 指中心軸における指厚さ T)である。画像解析ソフトImageJ(National Institutes of Health, Ver.1.46r)を用いて、同一の解析者により、目視にて各断面の輪郭および厚さの両端を選定してこれらの値を読み取った。pulpは皮膚よりも内側で、脂肪を示す白色部を多く含んだ領域とした。図7(b, c, d)に、指軸方向における抽出要素の変化に及ぼす圧迫対象物形状の影響を示す。圧迫荷重が3Nの場合である。図7(b)において、圧迫無しと平板圧迫の断面面積を比較すると、圧迫位置の遠位部でわずかに平板圧迫の断面面積が減少し、圧迫位置の近位部で平板圧迫の断面面積が増加した。球体および円柱圧迫の結果では、圧迫位置の近傍(指先より8~10mm)において圧迫無しの結果より断面面積の減少が見られたが、圧迫位置より近位部(指先より15mm近位)および遠位部(指先より4mm近位)において、圧迫無しの結果より断面面積の増加が見られた。図7(c)において、圧迫無しの結果と比較して、球体、円柱、平板のpulp断面面積は指先より10mm, 8mm, 5mmの位置において大きな減少が見られた。図7(d)において、圧迫無しの結果と比較して、平板、円柱、球体の順に変形が増加した。

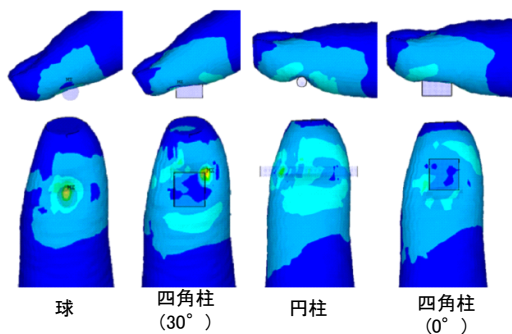
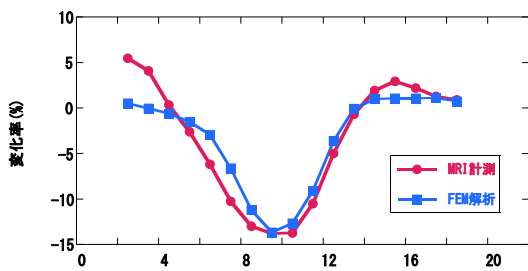
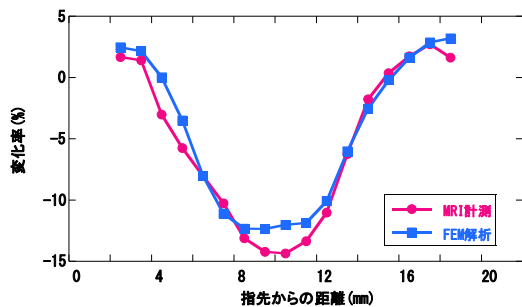


図 10 物体を圧迫した場合の指尖部変形



(a) 球体圧迫



(b) 四角柱(0°)圧迫

図 11 指尖部変形における MRI 計測と FEM 解析との比較

(2) 試作 pulp の製作と接触面積の計測

超低硬度ウレタンゴム (RU と略、硬度 5 度)、天然ゴム N-149 (硬度 9 度)、ラバペルカ EP-101 (硬度 8 度) の低硬度素材とヒト手による接触面積を比較した。図 8 に三指 (母、示、中指) の総接触面積を示す。RU の総接触面積は N-149 及び EP-101 のそれらより有意に高値であった。ヒト手の総接触面積は N-149 のそれより有意に高値であった。

ポリエステル系ウレタンゴム (EU と略、硬度 45)、クロロピレンゴム C-4500 (硬度 40)、エチレンプロピレンゴム E-4408 (硬度 35) の高硬度素材とヒト手による接触面積を比較した。図 9 に三指 (母、示、中指) の総接触面積を示す。ヒト手の総接触面積は EU、C-4500、E-4408 のそれらより有意に高値であった。

(3) 有限要素法による指尖部 pulp 変形解析

図 10 に、球、四角柱 (30°)、円柱、四角柱 (0°) でヒト指尖部モデルに荷重を与えた場合の数値解析結果を示す。物体圧迫により、物体接触部の指尖部が大きく変形した。

球体圧迫の場合、接触部が最も大きな変形となり、接触部から同心円状に変形が拡散していた。四角柱圧迫の場合、指尖部角度 30° では、接触部の遠位部に大きな変形箇所が確認される。円柱圧迫の場合、接触面積が大きいため、指尖部全体で変形している。変形においては、他の物体よりも大きい。四角柱圧迫の場合、指尖部角度 0° では、特に大きく変形している箇所が見られない。一様な変形が見られる。

図 11 に球体および四角柱 (0°) で指尖部を圧迫した場合の MRI 計測と有限要素法解析 (FEM 解析) における体積変化率の比較を示す。局所的に差が見られるが、概ね両者はよく一致している。

(4) 今後の展望

MRI 撮影により指尖部 pulp の構造と、指尖部圧迫時における pulp 変形が計測された。この結果を用いて、電動義手の骨格に pulp 部を装着させて、物体把持における接触面積を計測した。その結果、pulp を装着することで接触面積の増加が確認され、把持性能の向上が期待された。また、指尖部 pulp を搭載したヒト指尖部有限要素モデルを構築して、物体接触による変形を解析した。MRI 計測と有限要素解析における指尖部変形を比較した結果、両者はよく一致していた。

電動義手による物体把持性能をさらに向上させるために爪の重要性が考えられる。多くの電動義手が開発されているが、爪に重点をおいたものはまだ無い。爪は指尖部 pulp に接続していて、指尖部に加わる荷重を負担する役割がある。

研究代表者はこの研究結果を踏まえて平成 26 年度から挑戦的萌芽研究で母指爪変形解析を実施する。指尖部 pulp および爪の構造および役割が解明され、それが電動義手およびロボットハンドなどに応用されれば、片手喪失の障害者にとって生活の質 (Quality of Life: QOL) の向上につながり、さらに社会活動への積極性の増加が期待できる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 嶋脇聡, 酒井直隆, 中林正隆, 磁気共鳴画像 (MRI) を用いた指尖部および pulp の力学的変形解析. 日本機械学会論文集 (C 編), 査読有, 79 巻, 801 号, 2013, 1709-1717.

[学会発表] (計 3 件)

- ① 菊地諒, 酒井直隆, 嶋脇聡: 指尖部変形の有限要素モデルと MRI の比較, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会 -2011 宇都宮-, 207-208, (2011)
- ② 嶋脇聡, 酒井直隆, 中林正隆: MRI による指腹部 pulp の変形解析, 第 25 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集,

173-174、(2013)

- ③ 嶋脇聡、市川貴規、中林正隆、酒井直隆：
電動義手のための指腹部 pulp 素材の研究、第 21 回日本機械学会関東支部茨城
講演会講演論文集、173-174、(2013)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mech.utsunomiya-u.ac.jp/shima/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

嶋脇 聡 (Shimawaki, Satoshi)

研究者番号：10344904

(2) 研究分担者

酒井 直隆 (Sakai, Naotaka)

研究者番号：90235119