

# 手部ダミー作製のためのロボットと人間の接触実験の評価

Evaluation of contact between a human hand and a robot end tip for designing a dummy

○学 伊木 夢奈 (名古屋大) 正 山田 陽滋 (名古屋大) 正 秋山 靖博 (名古屋大)  
 正 岡本正吾 (名古屋大) 非 丹羽邦幸 (知の拠点あいち) 非 劉建 (名古屋大)

Yumena IKI, Nagoya University  
 Yoji YAMADA, Nagoya University  
 Yasuhiro AKIYAMA, Nagoya University  
 Shogo OKAMOTO, Nagoya University  
 Kuniyuki NIWA, Knowledge Hub Aichi  
 Jian Liu, Nagoya University

In the field of robot-human collaboration, while safety verification data are already provided in ISO/TS 15066 as informative data, a testing method for validation is not established. In our study, we design the dummy hand the mechanical property of which is close to that of human to propose the testing method using the dummy. In order to design such dummy, we estimate human physical parameters by conducting dynamic experiment in which three points in each hand of the subjects were clamped as demonstrating the worst case of impacting a hand as the first step. For conducting dynamic experiment, we design impact force measurement device in consideration of safety enough. As a result, we measure transition of impact force, and estimate human physical parameters under various conditions.

**Key Words:** Robot-human collaboration, ISO/TS 15066

## 1 緒言

### 1.1 研究背景と目的

現在、日本の製造業において、労働力不足と中小企業の生産性の低さが大きな問題となっている。このような問題を解決するために、協働作業用ロボットが注目を集めている。協働作業用ロボットとは、人間とロボットが同じ作業空間で作業することができる産業用ロボットのことをいう。この分野は、開発途上の最新の分野であることから、ISO/TS 15066[1]に、協働作業用ロボットと人間の接触について、その安全性を保証する検証データが定義されている一方で、その妥当性を確認するために試験方法は未だ確立されていない。

このような試験方法を確立するためには、倫理面・効率面、様々な面から考えて、内部にセンサを搭載したダミーを用いることが有効であると考えられる。そのため、本研究では、人間と機械特性の近いダミーを作製することを最終的な目標とする。

人間の機械特性の近いダミーを作製するため、本研究では、人間の機械特性を調べる。そのために、協働作業用ロボットと人間の接触において、最悪の状況である挟み込み環境を想定した実験装置を構築し、衝突における接触力の時間推移を計測する。その後、計測した接触力の時間推移に対して、適切な物理モデルを選定し、人間の物理パラメータを推定する。

### 1.2 関連研究

ダミー作製のためにヒトの皮膚の機械的な特性を計測した例として、Asoら[2]は、ISO/TR23482-1(DTR)[3]の中で、水疱発生リスクの見積もり評価試験方法の実験装置の一部として、ダミーの構築方法とともに粘弾性に関する周波数特性を掲げている。

パナソニック株式会社[4]では、Pain-Sensingダミーの開発を目的として、人体に対して機械的刺激による擬似痛みを発生する荷重試験装置の製作を行い、「痛み感/不快感-押圧」の関係データを取得しようとしている。

また、手指の機械特性について、触覚に焦点を当てたものや、静的な柔軟性の非線形性に焦点を当てた研究は数多く存在する。

このように、人間の機械特性やダミー作製について多くの研究がなされているが、機械安全に焦点を当てて、協働作業用ロボットと人間の衝突における動的な力学応答を計測し、それを表現したダミーは存在しない。

## 2 粘弾性モデルによる解析手法

物体の粘弾性挙動を表現する代表的なものにMaxwellモデルとVoigtモデルがある。一般に、Maxwellモデルは、応力緩和現象などのひずみに対する応力応答を、Voigtモデルは、クリープ現象などの応力に対するひずみ応答を表現するのに適している。この2つのモデルを複数個組み合わせることによって、あらゆる物体の粘弾性挙動が表現できるといわれている。

人間の生体組織を表現するのに、よく用いられるのが、図1に示す4要素Voigtモデルである。Nakazawaら[5]は、4要素Voigtモデルを指先組織の3つの主要な層(表皮、真皮、皮下組織)を表現した粘弾性モデルとして示している。

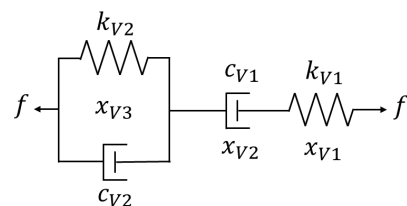


Fig.1 4-elements Voigt model

しかし、本研究は、接触力の時間推移を計測するため、Maxwellモデルのほうが適している。そこで、人間の機械特性を調べるために、4要素Voigtモデルと力学的に等価である[6]4要素Maxwellモデルを適用することとする。4要素Maxwellモデルを図2に示す。

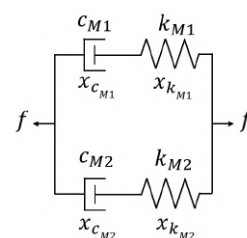


Fig.2 4-elements Maxwell model

4要素 Maxwell モデルにステップ入力  $d$  を与えたときの力応答は、式 (1) で表現できる。

$$f = k_{M1}(d - d_1)\exp\left(-\frac{k_{M1}t}{c_{M1}}\right) + k_{M2}(d - d_1)\exp\left(-\frac{k_{M2}t}{c_{M2}}\right) \quad (1)$$

式 (1) の  $d_1$  は初期条件によって決まる値である。

また、4要素 Maxwell モデルにランプ入力  $vt$  を与えたときの力応答は、式 (2) で表現できる。

$$f = k_{M1}\left(\frac{c_{M1}v}{k_{M1}} - \frac{c_{M1}v}{k_{M1}}\exp\left(-\frac{k_{M1}t}{c_{M1}}\right)\right) + k_{M2}\left(\frac{c_{M2}v}{k_{M2}} - \frac{c_{M2}v}{k_{M2}}\exp\left(-\frac{k_{M2}t}{c_{M2}}\right)\right) \quad (2)$$

本実験でのロボットのアーム端部の入力、ランプ入力  $vt$  とステップ入力  $d$  の組み合わせであり、ランプ入力における  $v$  が非常に大きいため、その後のステップ入力において、 $d_1 \sim 0$  とした式 (1) を適用して、最小近似により、4要素 Maxwell モデルにおける物理パラメータを推定する。

### 3 挟み込み環境における動的接触実験

#### 3.1 実験目的

本実験は、人間と機械特性の近いダミーを作製するために、衝突に対する人間の力学応答を調べることを目的とする。そのために、まず、実際にロボットと被験者の身体部位を衝突させ、接触力の時間推移を計測する。接触部位として、他の身体部位よりもロボットとの接触が起りやすいと考えられる手指を対象とする。その後、得られた接触力の時間推移に対して、4要素 Maxwell モデルを適用し、そのモデルにおける人間の物理パラメータを推定する。

#### 3.2 衝撃力計測装置

本実験は、倫理部会の承認の下行った。本実験は、ロボットと人間の接触において、最悪の状況である挟み込み環境での接触を想定したため、安全に対する配慮を十分に行った衝撃力計測装置を構築した。その実験装置の概略を図 3 に示す。

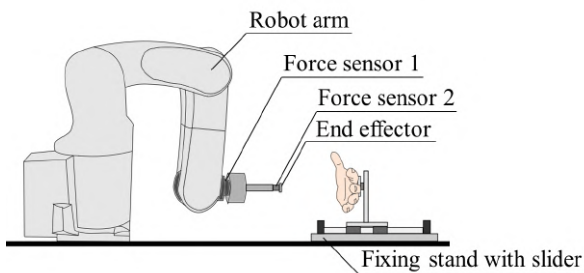


Fig.3 Experimental setup

この装置の安全方策を以下に示す。

#### 力覚センサ

実験中の力は、ロボットに搭載された力覚センサ 1 とアーム端部に取り付けられた力覚センサ 2 の 2 つのセンサによる 2 重系で測定されており、どちらかの力覚センサの値が暴走した場合、つまり、2 つのセンサの値が 10 N 以上になったとき、また、どちらかの力覚センサに 100 N 以上の力が加わった場合に、ロボットが停止するようにプログラミングされている。

#### スライダ付固定台

図 3 のうち、スライダ付固定台を図 4 に示す。スライダ付固定台には、マグネットを取り付け、接触による衝撃力やマグネットに加わる力がマグネットによる吸着力よりも大きくなった場合に、装置が衝撃を受けた方向に移動する機

構になっている。マグネットの吸着力は 100 N に設定した。このため、ロボットが暴走した場合、また、被験者に 100 N 以上の力が加わった場合に、回避できるようになっている。また、スライダ付固定台にも力覚センサ 3 が搭載されており、マグネットによる解放機構が正常に動いているか確認することができる。

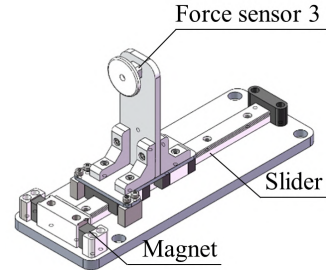


Fig.4 Fixing stand

#### 3.3 実験手順

まず、被験者はスライダ付固定台に接触部位を合わせる。その後、ロボットのアーム端部をごく低速で手指に接触させ、十分時間経過後の接触力と押し込み量の関係を計測する。この試行で計測された接触力を静的接触力といい、この試行を静的接触という。

アーム端部は一旦離れたのち、先ほど測定した静的接触力になるような押し込み量と、接触速度を指定し、再度手指に指定された速度で接触し、指定された押し込み量まで押し込みを行う。一定時間経過後、アーム端部は手指から離れる。この試行中のアーム端部の位置・速度、接触力は常に計測されており、接触力推移を得ることができる。この試行を動的接触といい、複数回繰り返す。

#### 3.4 実験条件

本実験では、5 人の被験者に協力を得た。

接触部位は、図 5 に示す ISO/TS 15066 に記載されている身体モデルのうち、人差し指の腹、拇指球、掌の 3 か所である。

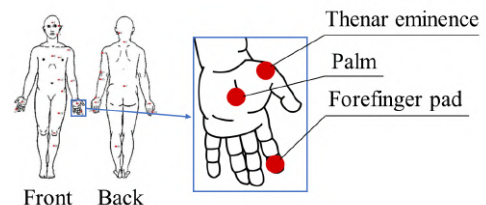


Fig.5 Contact parts

静的接触力は、15 N を最大とし、5, 10, 15 N を想定して実験を行うが、被験者が痛みを感じたらその時点で終了とする。

接触速度は、250 mm/s に設定する。これは、協働作業用ロボットで想定される最大速度である。また、実験で得られた物理パラメータの妥当性を確認するために、接触速度 10 mm/s でも実験を行った。

各条件に対して、3 回の試行を行った。

## 4 結果と考察

#### 4.1 接触力の時間推移

動的接触実験によって得られた接触力の時間推移を図 6 に示す。図 6 は、接触部位：掌、静的接触力：15 N、接触速度 250 mm/s の結果を示す。

図 6 から、ロボットのアーム端部と人間の身体部位が接触後、接触力が発生し、ロボットのアーム端部が指定された速度で、指定された押し込み量に到達した瞬間に、接触力は最大となり、その後、想定された静的接触力へと収束していく。

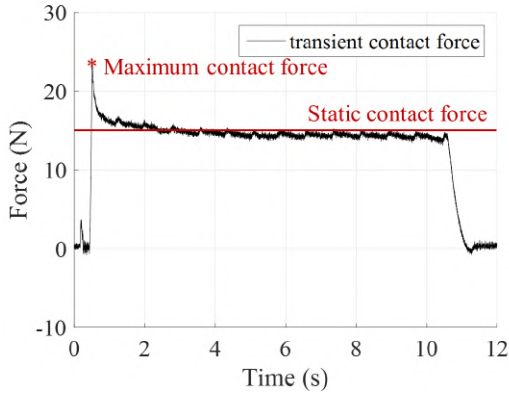


Fig.6 Transition of the contact force

#### 4.2 動的な物理パラメータ

本実験では、実験条件として、押込み量 (静的接触力), 接触部位の 2 つのパラメータを設けた. それぞれの条件によって 4 要素 Maxwell モデルで推定される各物理パラメータがどのように変化するか, またその原因について, 以下で考察を行う.

##### 4.2.1 押込み量 (静的接触力) による違い

接触部位: 掌, 接触速度 250 mm/s における  $k_{M1}$  の押込み量による違い,  $c_{M1}$  の静的接触力による違いを図 7, 図 8 に示す.

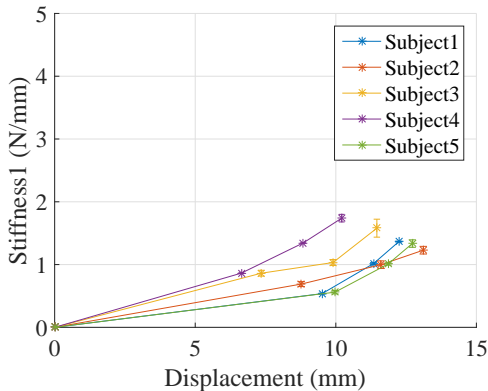


Fig.7 Stiffness1 difference on displacement

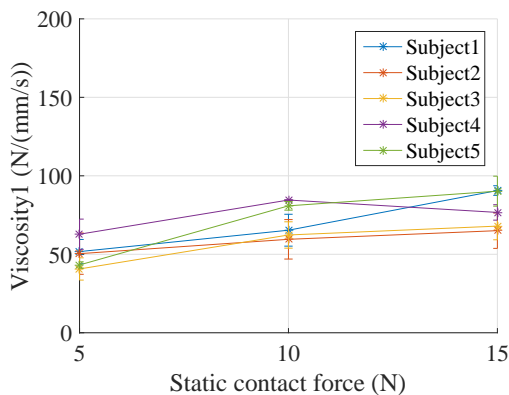


Fig.8 Viscosity1 difference on displacement

図 7 より,  $k_{M1}$  には非線形性があることがわかる. これらの結果を今後, 多項式関数や指数関数などで適切に近似することができれば, 痛みを感じ始める閾値での人間の剛性を推定することができる.  $k_{M2}$  にも同様の結果がみられた.

図 8 より,  $c_{M1}$  には, 静的接触力による違いがみられないことがわかる. このことから, 痛みを感じ始める閾値でも人間の粘性は変わらないと推定できるが, これについては, さらに議論をする必要がある.  $c_{M2}$  にも同様の結果がみられた.

##### 4.2.2 接触部位による違い

接触部位の違いとして, まず挙げられるのが, 違和感を感じ始める閾値である. 静的接触力は, 最大を 15 N とし, 被験者が違和感を感じ始めたら終了としたが, 人差し指の腹, 拇指球については, 静的接触力 15 N で全ての被験者が痛みを感じ始めたため, 10 N までしか実験を行うことができなかった. これに対して, 掌については 15 N まで実験を行うことができた. これによって, 痛みの感じ方は接触力に比例していないことがわかる.

静的接触力 10 N, 接触速度 250 mm/s における  $k_{M1}$ ,  $c_{M1}$  の接触部位による違いを図 9, 図 10 に示す.

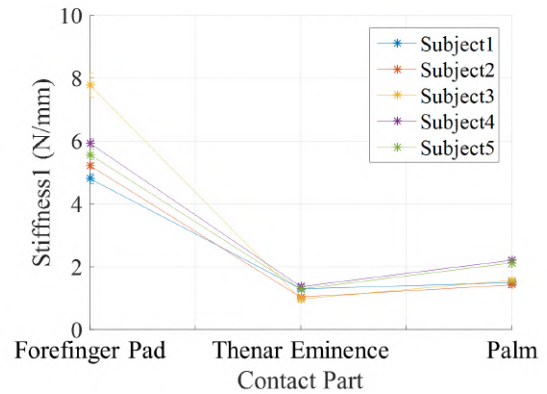


Fig.9 Stiffness1 difference on position

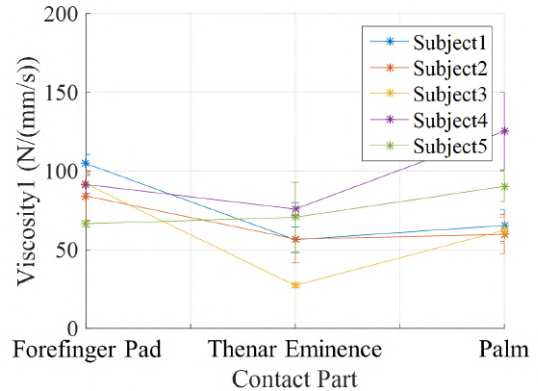


Fig.10 Viscosity1 difference on position

図 9 より, 人差し指の腹の  $k_{M1}$  が他の接触部位と比較して大きいことがわかる. これは, 人差し指の腹は他の接触部位と比較して, 骨までの距離が小さく, 同じ静的接触力に対する押込み量が非常に小さいことが原因であると考えられる.

図 10 より, 拇指球の  $c_{M1}$  が他の接触部位と比較して小さいことがわかる. これは, 拇指球には, 他の接触部位には存在しない拇指球筋という筋肉が存在することが原因であると考えられる.

また, この他にも, 静的接触力 5, 10 N の各物理パラメータを比較すると, 人差し指の腹の  $k_{M1}$ ,  $k_{M2}$ ,  $c_{M1}$  の値が, 押込み量に対する差が非常に大きくなっていった. これらもやはり骨が影響しているのではないかと考えられる.

#### 4.3 シミュレーションによる妥当性確認

今回得られた人間の物理パラメータの妥当性を確認するために, 接触速度 10 mm/s での接触実験結果とシミュレーションによる結果を比較・検討する.

図 11 は, 接触部位: 掌, 静的接触力 15 N, 接触速度 250 mm/s の実験結果から推定された 4 要素 Maxwell モデルのパラメータを

用いて、接触速度 10 mm/s としたときの各被験者のシミュレーション結果である。

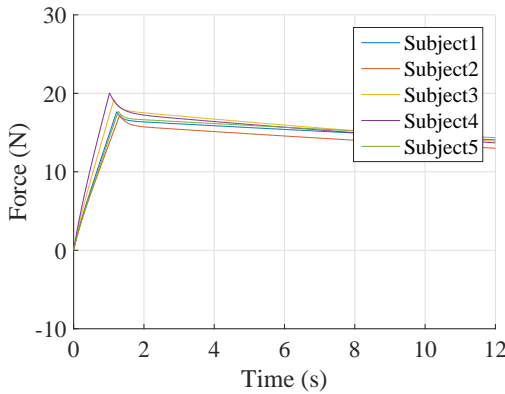


Fig.11 Simulation results

図 11 の各被験者の最大接触力に着目すると、図 12 の静的接触実験で得られた、接触部位：掌における静的な剛性の関係と一致していることがわかる。つまり、同条件で静的な剛性が小さい被験者ほど、衝突実験における最大接触力の値が大きくなっている。

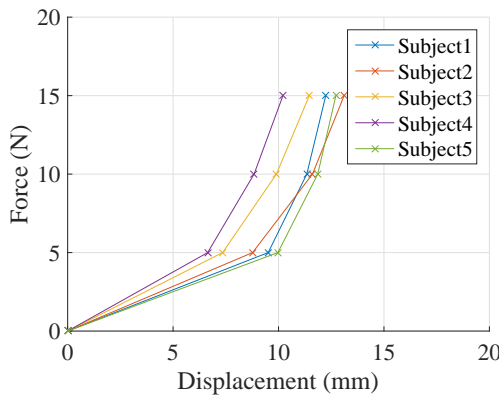


Fig.12 Static stiffness

また、図 13 は、例として被験者 5 の接触部位：掌、静的接触力 15 N、接触速度 10 mm/s の実験で実際に得られた接触力の時間推移を示している。この結果とシミュレーションの結果を比較すると、実際に得られた結果のほうが最大接触力が大きくなっている。安全を保証する検証データの妥当性を確認するには、最悪の値を使用するため、衝突における最大接触力の値は非常に重要になってくる。最大接触力の値は、剛性の値に非常に影響を受けており、今回のシミュレーションでは、剛性を一定値として考えたが、前述したように、多項式関数や指数関数に近似する必要があると考えられる。このことによって、ランプ入力に対する力応答、つまり、押し込み過程におけるシミュレーションもより精度が高くなると考えられる。

## 5 結言と今後の課題

### 5.1 結言

本研究では、今まで存在していなかった、衝突の際の人間の忠実な機械特性を示すダミーを作製することを目的として、協働作業用ロボットと人間の接触において、最悪の状況である挟み込み環境を想定した実験装置を構成し、衝突における接触力の時間推移を計測した。

その後得られた接触力の時間推移から、4 要素 Maxwell モデルの各物理パラメータを求め、その傾向について考察を行った。得られたデータは実際に計測された衝突における人間の物理パラメータとして非常に有益であると考えられる。

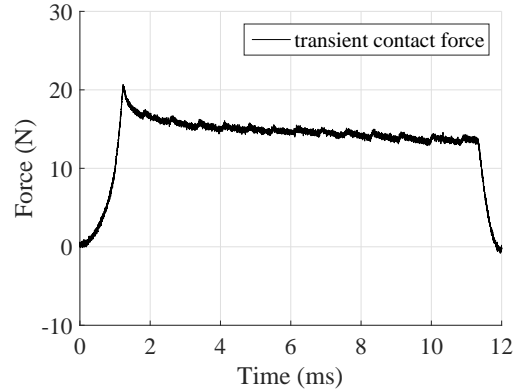


Fig.13 Example of transition of contact force

### 5.2 今後の課題

今後は、今回得られた物理パラメータをダミーに取り入れていく。この際に課題になってくるのが、剛性の非線形性をどうダミーに取り入れるか、本実験では被験者が痛みを感じない範囲で行ったが、ISO/TS 15066 の痛みを感じ始める閾値でのパラメータはどう表現するのか、また、骨や筋肉の身体組織がどのパラメータに影響してくるかも、検討する必要がある。これらを踏まえて、最終的に人間と機械特性の近いダミーを作製していきたい。

## 6 謝辞

本研究は、「知の拠点あいち重点研究プロジェクト期、次世代ロボット社会形成技術開発プロジェクトロボット分野 R7：ロボット実用化のためのリスクアセスメント支援システム構築」事業の支援を受けている。

本研究は、「人共存空間のリスク評価シミュレータに係る基礎的検討」の枠組みで行われ、その枠組みで有益なご助言を頂いたパナソニック株式会社渡邊竜司氏をはじめ他に深謝する。

また、実験にご協力頂いた名古屋大学の金氏に感謝の意を表す。

## 参考文献

- [1] ISO/TS 15066:2016, Robots and robotics devices - Collaborative robots.
- [2] Aso M. Yamada Y. Yoshida K. Akiyama Y. and Ito Y. "Evaluation of the mechanical characteristics of human thighs for developing complex dummy tissues." IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2013. pp.1450-1455.
- [3] ISO/CD TR 23482-1:2016, Robotics - Application of ISO 13482 - Part 1: Safety-related test methods.
- [4] パナソニック株式会社, 「委託研究開発 実施状況報告書 (成果) 平成 29 年度」, バイオニックヒューマノイドが拓く新産業革命
- [5] Nakazawa N. Ikeura R. and Inooka H. 2000. "Characteristics of human fingertips in the shearing direction." Biological cybernetics, 2000, 82(3): 207-214.
- [6] 原 久夫. 一般化 Voigt モデルによる粘土の粘弾性構成式とこの適用性について. 琉球大学工学部紀要, 1993, 46: p85-104.
- [7] Suita K. Yamada Y. Tsuchida N. Imai K. Ikeda H. Sugimoto N. A Failure-to-safety "Kyozon" system with simple contact detection and stop capabilities for safe human-autonomous robot coexistence. IEEE International Conference on Robotics and Automation 0-7803-1965-6/95. 1995
- [8] Yamada Suita, Ikeda Sugimoto, Miura Nakamura. Pain: Evaluation of pain tolerance based on a biomechanical method for human- robot- coexistence. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. No 96-0689. 1997-8
- [9] 韓鉉庸, 入口克己, 川村貞夫. 人間の手指組織の剛性解析と人工指との比較. 日本ロボット学会誌, 1999, 17.8: 1141-1148.