



糸を使った指の縦方向の接触面積変化による 柔らかさ提示機構の検討

Examination of softness presentation mechanism
by changing the area of longitudinal contact of fingers with threads

白川愛深¹⁾, 長谷川晶一¹⁾
Manami Shirakawa, Shoichi Hasegawa

1) 東京工業大学 工学院情報通信系 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4529 R2 棟 624 室 R2-20,info@haselab.net)

概要: 仮想空間で実空間と同様の体験をするには触覚の提示が必要だが、従来の力覚デバイスは触覚により柔らかさの手がかりを提示できず、柔らかさ提示が出来るデバイスでも大掛かりで現実世界での使用に制約がある為改良の余地がある。柔らかさ提示は指先の接触面積変化で可能とされ、糸を使えばデバイスの小型化が期待される。本研究では糸を使った指腹部の縦方向の接触面積変化によって従来と同様の効果が得られるか検証をおこなった。

キーワード: 柔らかさ提示, 触覚フィードバック, ウェアラブルデバイス

1. はじめに

非言語的コミュニケーションにおいて、触覚は感情を伝えたりお互いの存在感を高めたりといった重要な役割がある [1]。仮想空間内でも触覚を提示することでコミュニケーションを円滑にし、さらなる現実感を付与することができると予想され、物体の硬さから人肌等の柔らかさまで幅広く表現できる触覚デバイスはこのような仮想空間内の触覚を伴うコミュニケーションの実現に大きく貢献できると考えられる。また仮想空間でユーザーの自然な行動を阻害しない触覚提示には、使用空間に制限がなく、身体に負荷がかかりにくいデバイスの設計が望ましい。よって使用空間に制限のない装着型の触覚デバイスは小型・軽量であることが望まれ、実空間と仮想空間での作業を並行して行いたい場合、着脱が容易・または着脱の必要がないことが求められる。従来の装着型デバイスは小型・軽量化が進み、実空間と仮想空間の作業が並行して行えるように指腹部に障害が少ないものもある [2] が、質感や弾力、人肌やぬいぐるみなどの柔らかさの提示ができていない。本研究では装着型の柔らかさ提示が出来る小型デバイスに焦点を当てた。

柔らかさ提示は指先への接触面積を変化させることで提示可能とされている [3][4]。接触面積の変化による柔らかさ提示手法を用いた先行研究は様々あるが、空気圧を用いたために装置が大きくて移動可能空間に制限があるもの [3] や、装着型でも装置が指の幅を超えて隣の指に干渉してしまうもの、指腹部に覆い被さる構造のもの [4] が多く、手への負担が大きかったり、現実での操作が並行して行えなかったりといったデメリットがある。

そこで本研究では指腹部に触れる面積が小さく横幅を取らないものとして、糸状のものを考え、接触点から指腹部

分全体にかけての刺激の広がり糸による縦方向の刺激の広がりによって提示できないかと考えた。接触面積変化を糸のみで行えば、指腹部部分に障害が少ないためデバイスの着脱をせずに現実世界と並行して動作が行え、小型軽量化にも期待ができる [2]。本研究では指腹部の糸による接触面積変化だけでも柔らかさ提示ができるのか、検証を行う。

2. 方法

図 1 に示したように、従来の円筒形デバイス [3] による全方向への接触面積の広がり縦方向部分を取り出し、糸で提示する方法を考える。まず使う糸の素材・太さ・強度について、指腹部部分の障害が少なく、糸が指に少し触れている初期状態であるべく存在感がないものとして細い糸が望ましい。また、素材が柔らかく伸縮性があるものは劣化が早い為、耐久性が高く伸びにくい細い糸として PE ライン 0.8 号の釣り糸を採用した。次に糸の配置について考えると、図 1 のように接触点を中心として全方向に刺激が広がっているため、接触点上に配置する糸を中央の糸にし、同じ本数の糸を上下に配置することにした。この時、物体と指の接触点を、指先から第一関節までを指腹部部分とした時の中央部分であると定義した。さらに糸にかける力と指の皮膚変形の関係、糸の本数・間隔、糸を引くタイミングについてそれぞれ硬さ・柔らかさ知覚にどのような違いが生じるのか、またどれが一番柔らかく、提示できる柔らかさの幅が広いのか、以降の実験で検証を行った。

3. 実験

まず糸にかける力と指の皮膚変形と糸の本数・間隔について調査を行った。これらの調査をもとに糸を引くタイミ

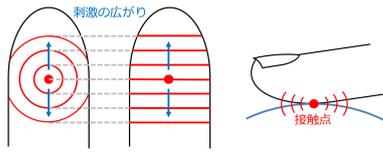


図 1: 刺激の広がり

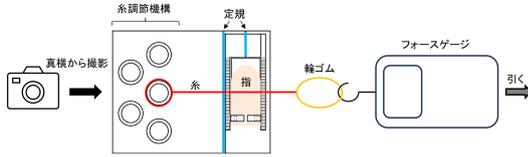


図 2: 予備実験 1 実験装置の構成

ングを変更することで柔らかさ提示が可能であるか、人を対象とした評価実験を行った。

3.1 予備実験 1 糸から指にかかる力と皮膚変形の関係

指腹部分に糸を張った時に指腹部分にかかる抗力による指腹変形の検証によってかけるべき力の範囲を決定した。

3.1.1 実験条件

今回は指先に糸を一本触れさせた状態で糸の張力を調整し、その変化を見た。青木ら [2] はワイヤによる応力ひずみの影響で糸から指先へ伝わる力は実際より大きく知覚されることにより、約 40mN の力があれば接触力が提示できると示している。また糸を強く引っ張ることで指先が強く押し込まれ、痛みや不快感を感じさせないように、糸から指へかかる抗力は 40mN~2N に調整した。予備実験 2 つは筆者の右手人差し指の指腹部分で行われた。

3.1.2 実験装置

装置の構成は図 2 のようになっている。指腹に糸を通す装置の幅は固定されているが、指の高さと糸を張る位置は調整可能である。糸を通す穴は直径 1mm で、穴の部分に摩擦低減のための直径 1mm のテフロンチューブを通し、その中に糸を通した。事前に指の第一関節の幅と高さ、指先から第一関節までの長さを測り、図 3 のように指腹部分の側面と表面に印をつけた。指腹部分を上にした状態で、指の側面につけた印を装置側の糸を通す場所の高さと合わせた状態で固定し、指腹表面の印の上に合わせて糸を張った。また力を測るフォースゲージまでの糸がなるべく一直線になるよう、高さ調節をし、フォースゲージとの間に輪ゴムを挟むことで張力の調節を行いやすくした。

3.1.3 糸により指にかかる抗力の計算方法

図 4 に示すように、糸を真横から引っ張った時の張力による指先への抗力は、指の第一関節の高さと幅の測定により指を楕円に近似し、指の高さの半分の高さから糸が出る

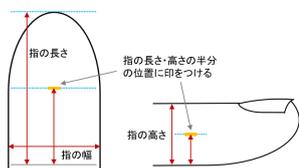


図 3: 指腹部分の印

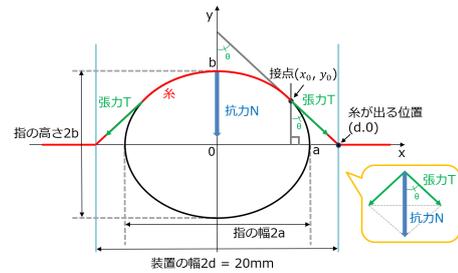


図 4: 糸の張力による指への抗力

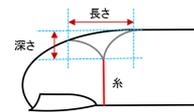


図 5: 指の皮膚変形部の計測部分

ときの楕円の接線と y 軸との角度 θ を求めることで計算を行った。指の幅を $2a$ 、高さを $2b$ とし、指を置く装置の幅を $2d$ 、糸の出る位置を $(d, 0)$ とすると θ は以下のように求められる。これにより糸に張力 T がかかる時の指への抗力 N は以下のように表すことができる。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{d\sqrt{1 - \frac{a^2}{d^2}}}{b} \right), \quad T = \frac{N}{2 \cos \theta} \quad (1)$$

3.1.4 指の皮膚変形の計測方法

指の真横からカメラで撮影を行い、同時に撮影した定規と指の変形部分のピクセル数を比較することにより距離を算出した。算出の際は、Matlab にての指が変形していない画像と変形後の画像の差分をとり、図 5 の 2 つの指の皮膚変形部分 (皮膚変形部の長さ・深さ) の寸法を測った。

3.1.5 結果

指の高さの半分の位置から指腹側を指腹部分と定義し、皮膚変形部の深さとの割合を表したものを、さらに指の長さにおける皮膚変形部の長さの割合を表したものを以下の図 6 に示す。図より 1.2~2N の抗力をかけると指腹部分の半分程度まで沈み込みが発生し、それ以上指に変位が見られづらくなることから、1.2N の抗力かけた時が、おおよそ糸が指に食い込める上限値であることが分かる。また、指腹部分における長さや高さの半分以上が糸一本により変形してしまうと、糸に意識が集中することで糸の存在感が大きくなる為、以降の実験では 1.2N 以上を測定対象から除外した。

3.2 予備実験 2 複数本の糸・間隔

本実験では複数本の糸を用いた時の糸の間隔によって、指の皮膚変形にどのような影響を与えるのか、また刺激の広がり制御にやすさについて検証を行った。

3.2.1 実験条件

物体との接触点から刺激が波紋状に広がる時、接触点を真ん中の糸として奇数本で接触面積の広がりを提示すると偶数本に比べてより簡易的になり、デバイスの小型化に繋がる為、糸の本数は 3 本と 5 本の二種類を採用した。

実験 1 の結果より指への抗力が 1.2N 未満になるよう、糸

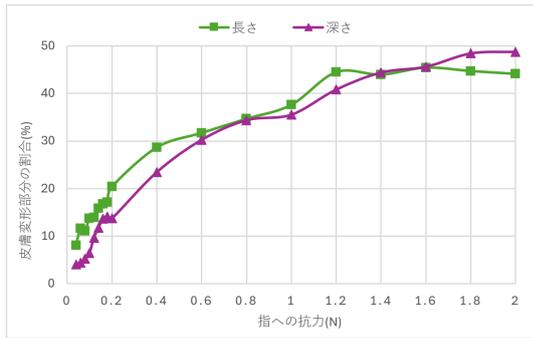


図 6: 一本の糸による指の皮膚変形部の割合計測結果

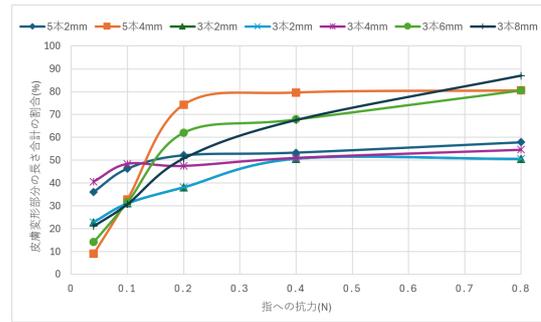


図 8: 複数本の糸による指の皮膚変形部の長さの割合

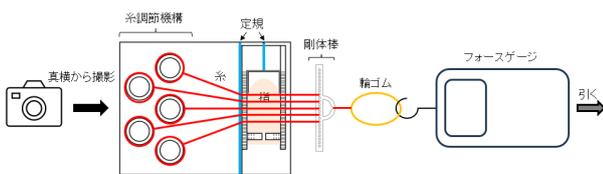


図 7: 予備実験 2 実験装置の構成

一本当たりの抗力の条件は 0.04, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8N の 5 つに設定した。また指先の 2 点弁別能が 2mm 程度であるため [5] 糸同士の最小間隔を 2mm とし、指腹の長さを越えない範囲として、糸の本数が 3 本の時は 2,4,6,8mm の 4 種類、5 本の時は 2,4mm の 2 種類について検証を行った。

3.2.2 実験装置

実験装置は図 7 のようになっている。実験装置とフォースゲージの間に、複数本の糸に同じ張力がかかるよう、糸を剛体棒に括り付けた上でその中心部分をフォースゲージで引っ張った。引っ張る際には傾きが無いよう配慮した。この機構により糸に力が均等にかかるかと仮定して、フォースゲージで引っ張る力は糸一本当たりにかかる力の各本数倍とした。糸が 3 本の時は図 7 の複数本の糸の中心にある糸の場所を変えずに 3 本のみ張った状態となる。

3.2.3 実験方法

予備実験 1 とほぼ同様の手順で行い、複数本ある内の真ん中の糸が指腹表面の印に重なるように糸を張った。

3.2.4 結果

それぞれの糸について皮膚変形部の長さが連続していない場合は長さの和を、連続している場合は連続している場所の端から端までを対象として計測を行い、予備実験 1 と同様に割合で表したものを以下の図 8 に示す。図を見ると長さ合計の割合が 0.2N を超えると変化が見られなくなり、糸が複数本の時は上限を 0.2N 程度とした抗力の提示で指の皮膚変形が提示可能であることが分かる。また今回の実験では指腹部分の局所的な曲率や柔らかさの違いによって糸ごとの力のかかり方に違いが生じたり、指先部分の糸がずれたりすることで、皮膚変形が想定より大きくなる条件があった。刺激の広がりや上手く提示できていた条件に 3 本 4mm と 5 本 2mm の 2 条件が挙げられ、次の実験ではこれらについて検証を行った。

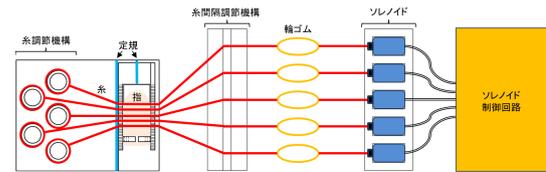


図 9: 実験装置の構成

3.3 糸の制御速度に関する実験

3.3.1 実験目的

本実験では指腹表面の刺激の広がりや糸で提示するために、糸を引き始めるタイミングに差をつけた場合、柔らかさ知覚にどのような影響をもたらすのかについて検証を行った。

3.3.2 実験条件

実験では糸による指への抗力を 40mN~0.2N の間に、糸の本数を 5 本 2mm と 3 本 4mm 間隔に固定し、糸の制御タイミングのみを変化させた。提示刺激が弱いときの指先の時間分解能が 50ms 程度 [6] であるため、制御タイミングの最小間隔を 50ms、最大間隔を 1000ms とし、制御タイミングに差をつけない 0ms 間隔の条件も含めて比較検討を行った。

糸が 3 本と 5 本の場合で中心の糸から外側の糸までの距離が等しく、本数間の比較実験を行う為、事前に 2 人程に体験してもらった際の意見を参考に、糸が 5 本の場合は 0, 50, 500ms の 3 条件、3 本の場合は 0, 100, 1000ms の 3 条件にすることで中心の糸から一番外側の糸が引かれるまでの速度を同一に設定した。

3.3.3 実験装置

図 9 のように、装置は予備実験 2 の装置の糸の制御をソレノイドを使った回路で行った。ソレノイドが引っ張る力は一定であり、0.1~0.3N の張力が発生したため、輪ゴムを途中に挟むことで 0.04~0.1N の張力で固定されるよう、調整した。糸から指にかかる力を個人間で一定にする為に指を置く高さを調整することで、前述の θ と抗力を一定にした。

3.3.4 評価方法

一対比較法とリッカート法による主観評価を行い、一対比較は 5 本の時と 3 本の時の各 3 条件間で順序効果を考慮した 6 通り分の評価を行い、5 本 0ms-3 本 0ms, 5 本 50ms-3 本 100ms, 5 本 500ms-3 本 1000ms の対でも評価を行った。評価は「より柔らかいと感じた方はどちらですか」と 2 つのダミー質問で、回答は「刺激 A(1)」「どちらも変わらない(0)」「刺激 B(-1)」の 3 つの選択肢を設けた。

表 1: 一対比較法による評価得点

①:5本 0ms, ②:3本 0ms, ③:5本 50ms, ④:3本 100ms, ⑤:5本 500ms, ⑥:3本 1000ms

本数	5本			3本		
条件	0ms	50ms	500ms	0ms	100ms	1000ms
得点	-0.11	-0.03	0.14	-0.22	0.17	0.06

条件	①	②	③	④	⑤	⑥
得点	-0.17	0.17	-0.42	0.42	-0.17	0.17

表 2: リッカート法による評価得点平均

本数	5本			3本		
条件	0ms	50ms	500ms	0ms	100ms	1000ms
得点	2.33	3.33	3.67	2.17	3.5	3

リッカート法では「柔らかさを感じますか?」と2つのダミー質問に対し「感じない(1)」「あまり感じない」「どちらでもない」「やや感じる」「感じる(5)」の5つの選択肢を設けた。各条件での刺激提示順は実験参加者間でランダム化した。

3.3.5 実験方法

実験は研究の趣旨を知らない人を対象に行われた。最初に参加者の指の第一関節の長さ・高さ・幅を測り、個人に合わせて指を置く場所の高さを変更した。糸は予備実験2と同様につけた印に合わせて張った上で、指の位置が変わらないよう、爪の上に両面テープを貼って装置に固定した。実験中は上から箱を被せることで視覚を遮断し、ピンクノイズを流したイヤホンの上にヘッドフォンを付けることで聴覚を遮断した。糸を張る際は目をつぶってもらい、実験装置が見えないようにした。実験では2つの刺激の比較(一対比較法)と1つの刺激の評価(リッカート法)の2つについてそれぞれ刺激を3回ずつ提示し、評価を行った。

3.3.6 結果

実験は6名の10~20代の男性及び女性に対して行われた。以下の表1にシェッフエの一対比較法(浦の変法)によって求められた評価得点を、表2にリッカート法による評価得点の平均値をそれぞれ示す。表より、二つの手法とも糸同士の制御タイミングが同じ0ms条件に比べて異なる条件の方が評価得点が高くなっていた。一対比較法では分散分析の結果、5本0ms-3本0ms条件にて個体間効果に有意水準1%で有意差が見られ、5本50ms-3本100ms条件で主効果、個体間効果、順序間効果に有意水準5%で有意差が見られた。これより、一対比較法における評価は個人差が出やすいものであったこと、さらに刺激の提示順序によって評価が異なりやすかったことが分かる。

3.3.7 考察

糸同士の制御タイミングは差をつけないよりつけた方が柔らかさを感じやすい可能性が示唆された。しかしながら、個人差が大きかったり、刺激の提示順序によって柔らかさの感じ方が変わったりした為、今回提示した刺激条件よりもさらに明確な違いが分かる刺激に変更するべきだと考える。またソレノイドの仕様上、糸をゆっくり引っ張ることが出来ず、急な力の変化が指に加わる機構の為、刺激を提示する際に振動も伝わることで柔らかさ知覚に影響が出てしまった可能性がある。従って、次回以降の実験ではソレノイドを用いるのではなく、任意のトルクを出すことが出来るモーター等を使った装置に変更する必要がある。さらに、実験アンケートに「柔らかさが何かよく分からなかった」「刺激を感じるたびに感覚がブレていく気がした」という意見があり、参加者に対して「柔らかさ」の定義を明確に伝えていなかったことや、実験をしていくうちに発生する慣れや疲労が原因として考えられる。

4. まとめと今後の課題

本論文では糸により接触面積の変化を提示することで柔らかさの知覚が可能であるか、糸にかける力・本数や間隔・糸ごとの制御タイミングについてそれぞれ実験による検証を行った。人を対象とした実験では糸の制御タイミングに差をつける方がつけない方に比べて柔らかさを感じやすい可能性が示唆された。今後は実験装置の見直しを行った上で、主観評価法を用いた実験だけではなく、柔らかさサンプルを用いた比較実験や調整法による実験などで柔らかさの定量化を行う実験を行うことが課題である。

参考文献

- [1] Matthew J Hertenstein 1, Dacher Keltner, Betsy App, Brittany A Bulleit, Ariane R Jaskolka : Touch communicates distinct emotions, *Emotion*, Vol 6, No.3, pp.528-533, 2006
- [2] 青木孝文, 三武裕玄, 長谷川晶一, 佐藤誠: ワイヤによる皮膚感覚刺激を用いた指先装着型接触感提示デバイス, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.14, No.3, pp.421-428, 2009.
- [3] A.Bicchi, E.P.Scilingo, D.De Rossi : Haptic discrimination of softness in teleoperation: the role of the contact area spread rate, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.16, Issue 5, pp.496-504, 2000.
- [4] 池田義明, 藤田欣也 : 指先の接触面積と反力の同時制御による柔軟弾性物体の提示, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.9, No.2, pp.187-194, 2017.
- [5] Sidney Weinstein: Intensive and Extensive Aspects of Tactile Sensitivity as a Function of Body Part, Sex and Laterality, the First Int'l symp. on the Skin Senses, pp. 195-222, 1968.
- [6] S.J.LEDERMAN: Skin and Touch, *Encyclopedia of Human Biology*, Vol. 7, pp.51-63, 1991.