

指先の力触覚を前腕に提示する ウェアラブルデバイスの開発 (第 3 報) : 3 本指に対応したデバイスの開発

森山多覇¹⁾, 中村拓人¹⁾²⁾, 梶本裕之¹⁾

- 1) 電気通信大学 情報理工学研究所 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, moriyama@kaji-lab.com)
2) 日本学術振興会特別研究員

概要 : VR 空間中の物体に対する触覚提示デバイスは, 指に直接装着する物が多く存在するが, これらは指の動きを妨げてしまう問題点がある. そこで, 本研究では直接指にデバイスを装着する事無く, 本来指先で知覚する物理的な触覚を, 力の向きも含めて前腕に提示するデバイスを提案する. 本稿では, 親指, 人差し指, 中指の 3 本の指先に加わる力の大きさと方向を, 前腕の 3 箇所にて 5 節リンク機構を用いて提示した. 本稿では, デバイスから提示される 3 つの部位で, 触覚情報がすべて弁別できるかを確認し, 約 90% の確率でそれぞれを区別して知覚できる事が分かった.

キーワード : ウェアラブルデバイス, 触覚ディスプレイ, バーチャルリアリティ

1. はじめに

近年バーチャルリアリティ(VR) 環境中での触覚情報の提示を試みる研究は多数存在する. 特に, 指先をターゲットとした触覚提示デバイスは多く, 様々な形をしたデバイスが提案されている.

人が指で作業を行うとき, 指には様々な触覚情報が提示される. そのため, VR 環境中でも, 作業のための触覚提示という観点では, 「力の強さ及び方向」が特に重要な触覚提示要素であると考えられる. これらは物体を把持する際や変形させる際, すなわち作業の際に必要な情報である.

指に対して「力の強さおよび方向」の情報を提示するデバイスはグローブ形状の物から指先に直接装着する物など数多く提案されている. しかしながら, これらの多くは脱着の手間がかかることや, デバイスのサイズによって各々の指の動きを妨げてしまうという問題が存在する.

こうした問題を解決するために, 我々は指先に加わる力の大きさと方向の情報を, 指先以外の部位に提示することを提案した[1]. この提案では人差し指に対応する部位として手首の背側が適切であることを見出し, また人差し指と親指を用いた試作を行った. 本研究はこの研究の続報であり, VR 空間中の物体に 3 本の指先で触れた際の力と力の向きに関する情報を, 身体他の部位 (前腕) に提示するデバイスを設計, 試作した. 3 本指の理由としては, 物体を安定的に把持したり, 作業するには 3 本の指が最小限の指の数であり, 多くのロボティクスの分野で 3 本指が採用されているためである.

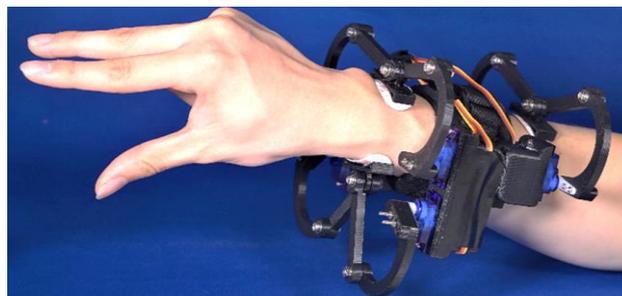


図 1 : 3 本指に対応するデバイス

本論文では 3 つの実験を行った. 1 つ目の実験では, 試作したデバイスから提示される圧覚と横ずれ感の触覚情報をすべて区別して知覚できるかを確認した. 2 つ目と 3 つ目の実験では, バーチャルな物体を親指, 人差し指及び中指で把持する作業の動きに対応できる VR 環境を整え, 指に対応する感覚提示位置が妥当なものであるかを調べた後, バーチャルな物体を把持したり, 持ち上げる時に, 指先で知覚するはずである力や力の向きを前腕に提示する事で, VR 空間内での体験で, どの程度リアリティが向上するか調べた.

2. 関連研究

VR 空間中で物体に触れた時に, 指先に知覚する触覚を手や指先に直接提示する研究は数多く存在する. 指先とは異なる場所に基点が存在するものや[2][3][4], 指先に直接装着するデバイスが存在する[5][6][7]. しかし, 複数本の指に触覚提示を試みる場合には, 触覚提示装置の脱着が大変であったり, 特に指先に力の方向も含めた多自由度の力

提示を行う場合、装置の重みはユーザには大きな負担になり、更にはデバイス同士の干渉も避けられない。

こうした問題に対する現実的な解決策の1つは、指先ではなく体の他の部位に指先の触覚情報を提示することである。これは感覚義手の研究では一般的な方法であり、腕や肩に振動子を配置する試みは数多く存在する[8][9]。他にも、空気圧駆動型デバイスを用いて手が受けた触覚を足裏へ提示する研究**エラー！参照元が見つかりません**。が行われており、これにより、手にデバイスを装着する事無く触覚が提示できる可能性が示唆されている。また、リング状のデバイスを手首に装着する事で、手首に触覚提示を試みるデバイスも存在する[11]。ただし感覚義手の研究も含め、力の方向に関する情報を提示するものではなかった。

作業のために必要最低限の指の本数という観点では、ロボットアームの観点から多く議論されている。コストの面等より、ロボットの指は3本指で開発、3本指ロボットの作業効率の評価などが多くされている。これは3本指でも最低限の作業が可能である事を示唆している[19][20][21]。

そこで、本研究では、VR空間中で物体に触れた時に、ウェアラブルデバイスを用いて親指、人差し指及び中指の3本指に知覚する触覚を、それぞれ異なる前腕の部位にフィードバックさせる事を提案する。直接指や手に装置を装着する事無く体の他部位に提示する事によって、指の動きを妨げる事無く自由に動かすことが可能となり、装置の着脱も容易となる。従来の同様の試みとは異なり、力の方向も提示可能とすることによって把持などの作業にも利用できることを目指す。

3. デバイス設計

3.1 作成したデバイス

図1に作成したデバイスの外観を示す。デバイスの重みは約190gであり、3Dプリンタを用いて作成した。デバイスのマジックテープに手を通すだけで脱着が可能であるため、利便性が高い。触覚提示する部位に粘着ゲルシート(Vitrode F, 日本光電製)を張り付ける。この粘着ゲルシートに付属した突起部にデバイスを接続する事により、上下左右方向の触覚を提示することが可能である。触覚提示可能部位は3か所であり、親指、人差し指及び中指にそれぞれが対応している。

3.2 5節リンク機構

本デバイスでは5節リンク機構を用いている。通常の5節リンク機構とは異なりM字型の構造をとるものであり、Tsetserukouら**エラー！参照元が見つかりません**。によって指先への力覚提示のリンク機構として提案されたものである。この先行研究を参考に、手首や前腕にも装着できる形のデバイスを作成した。5節のうち2節を駆動する事で平面2自由度の制御を実現した。触覚提示部位は上下左右に動く事が可能である。上下の動きでは触覚提示部位に圧覚を、左右の動きでは触覚提示部位に横ずれ感を提示する事ができる。駆動する2節はサーボモータ(Umemoto

LLC Tower Pro SG90 デジタル・マイクロサーボ)を使用した。

このデバイスには5節リンク機構が前面部の上下に2つ、後面部に1つ存在する、マジックテープの位置とデバイスの重み、そしてデジタル・マイクロサーボを前後に設置したため、前面部と後面部の触覚提示位置は100mm離れている。

我々は前報において、人差し指に対応する触覚提示部位の候補として手首背側、手首腹側、前腕背側、前腕腹側の4箇所を選び、生じる感覚の自然さを比較した。その結果、人差し指には、手首背側に対応させた場合が最も自然であるとの結果を得た[引用!]。この結果を踏まえ、今回のデバイスは人差し指を手首背側に対応させ、親指はそれに対向するように手首腹側に、中指は人差し指の隣に配置した。前腕部の二点弁別域は40mmとされており[引用!]、今回は人差し指と中指に対応する部位をこの二点弁別域よりも十分大きく100mm離した。(図4)。

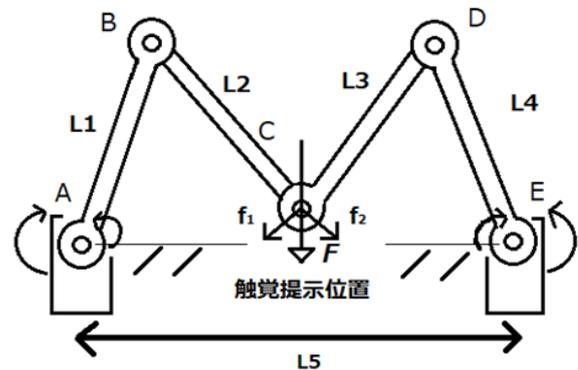


図 3:5 節リンク機構

表 1: デバイスの仕様

サーボモータ	Tower Pro SG90
リンクの長さ L_1, L_2, L_3, L_4 [mm]	50
リンクの長さ L_5 [mm]	180
デバイスの重み [g]	100
下方向への力 F [N]	6.0
左右方向への力 f_1, f_2 [N]	1.2

4. 実験 1

4.1 実験の概要

試作したデバイスを装着した状態で前腕の異なる場所に触覚提示した場所に、これらを区別して知覚できることを確認した。まず、垂直方向の力、すなわち圧覚を提示した際に、3つの触覚提示位置をそれぞれ区別して認識が可能か調べた。次に、水平方向の力、すなわち横ずれ感も含めて提示した際に提示部位および提示方向の異なるものを区別して認識が可能か調べた。

4.2 実験条件及び環境

垂直方向の力(圧覚)の触覚の弁別実験に際しては、人差し指と中指に対応している3か所全てを用いた(図5)。また、水平方向の力も含めた弁別実験に際しては、実験時

間短縮のため、特に区別が難しいと思われる手首背側の二箇所への提示に限定して行った。この二箇所は人差し指と中指に対応している（図6）。



それぞれの触覚提示部位と触覚提示手法は、以下のとおりである。

1. 3本の指に対応した位置のうち2箇所を選び、圧覚を提示した際の弁別。すなわち、{人差し指, 中指}, {中指, 親指}, {親指, 人差し指}のそれぞれのペアを弁別できるかどうかを確認した。

2. 圧覚と横ずれ感（右方向の横ずれ・左方向の横ずれ）を人差し指, 中指の2本の指に対応した位置に提示した際の弁別。例えば {人差し指の圧覚, 中指の左方向横ずれ} や {人差し指の左方向の横ずれ, 人差し指の右方向の横ずれ} などのペアを弁別できるかどうかを確認した。

ペア内の刺激を A,B として、以下の手順で弁別能力を調べた。

- (1) A の刺激を 1 秒行い、1 秒程度休む
- (2) B の刺激を 1 秒行い、2 秒程度休む
- (3) A か B かの刺激をランダムに 1 秒行い、この刺激が先の 2 つの刺激の (1) か (2) かを回答する。

条件 1 では垂直方向の力のみを親指, 人差し指及び中指に対応する合計 3 か所の触覚提示部位で行うため、組み合わせは順序を考慮しなければ 3 通りであり、1 通りあたり 10 回をランダムな順番（AB の順序を 5 回, BA の順序を 5 回）で行った。合計で 30 試行を行い、1 試行ずつ回答してもらい、それぞれの組み合わせの正答率を記録した。

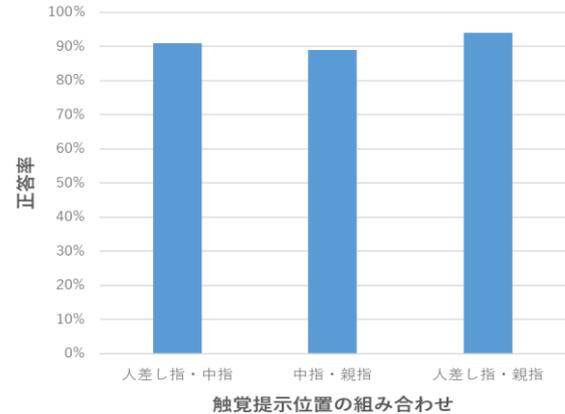
条件 2 では、垂直方向及び水平方向（左方向と右方向）の 3 つの触覚情報を、人差し指及び中指の 2 本に対応する触覚提示部位で行った。条件 1 と同様に、組み合わせは順序を考慮しなければ 15 通りであり、1 通りあたり 10 回をランダムな順番（AB の順序を 5 回, BA の順序を 5 回）で行った。合計で 150 試行を行い、1 試行ずつ回答してもらい、それぞれの組み合わせの正答率を記録した。被験者は 10 名（男性 6 名, 女性 4 名, 21~34 歳）であった。

実験ではデバイスを装着した後、アイマスクをする事で被験者の視界を遮断した。また、ヘッドホンを装着させ、ホワイトノイズを聞かせることでモータの駆動音をマスクした。

4.3 実験 1 の結果

4.3.1 圧覚を全ての指の組み合わせに提示した結果

全ての指の組み合わせにおいて圧覚を提示した場合の正答率を次の図 8 に示す。結果より、全ての指の組み合わせに対し圧覚を提示した場合、89%以上の確率で、どの部位に圧覚が提示されたか識別できる事が分かった。



4.3.2 圧覚を横ずれを 2 本の指の組み合わせに提示した結果

人差し指及び中指に対応する部位の組み合わせにおいて、圧覚及び横ずれ感を提示した場合の正答率を次の図 9 に示す。青色の枠が同じ部位に異なる触覚情報を提示した場合であり、黄色の枠が異なる部位に触覚情報を提示した場合の結果である。

	人差し指・左方向	人差し指・右方向	中指・圧覚	中指・左方向	中指・右方向
人差し指・圧覚	95%	95%	93%	98%	99%
人差し指・左方向	88%	88%	94%	94%	95%
人差し指・右方向		96%	97%	97%	95%
中指・圧覚			97%	97%	95%
中指・左方向				97%	96%

図 9: 2 本の指の組み合わせにおける圧覚と横ずれ感の識別率

図 8 より、全ての部位における圧覚と横ずれ感の識別率は 88%以上であった。また、異なる触覚提示部位であれば、93%以上の正答率を記録した。よって、全ての異なる触覚提示位置と触覚提示情報において、高い確率で識別できる事が分かった。

4.4 考察

条件 1 と条件 2、どちらの条件であっても、非常に高い識別率を得る事ができた。このデバイスが提示している触覚提示部位において、全ての触覚情報を識別できる事を示唆している。

5. 実験 2: 3 本指での把持におけるデバイス装着位置の検討

5.1 実験概要

実験 1 の際には、人差し指, 中指, 親指に対応する触覚

提示部位として、前腕の背側2か所、腹側1か所を対応させた。この配置は我々の先行研究において、人差し指に対応させる提示部位が前腕の背側であるともっとも違和感が少ないとの結果によるものであった。しかしこれまで複数指に対応した状況での配置に関する検討は行っていなかった。

ここでは配置に関する簡便な比較として、デバイスを逆に装着した場合（人差し指、中指に対応する部位が前腕腹側となる）を用意し、圧覚を提示した場合にどちらの配置がより違和感が少ないかを評価した（図10）。

画像

5.2 実験条件

触覚提示位置は以下の2条件を用意した。

1. 触覚提示位置が前腕背側に2か所、腹側に1か所
2. 触覚提示位置が前腕背側に1か所、腹側に2か所

実験では、デバイスから圧覚のみを提示する。視覚提示は、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）としてOculus Riftを使用した。また、LeapMotionを用いて被験者の指をトラッキングし、Unityを用いて提示映像を描画した。

VR空間中の視覚映像には机と石が表示されており、被験者は親指を下から、人差し指と中指を石の上から掴んでもらう。指の動きとデバイスの動きは連動していた。被験者は石を掴み、離す動作を5回行う。実験では、違和感が無いを7、違和感を感じたを1とした7段階のリッカートスケールで回答させた。被験者は8名（男性4名、女性4名、21~24歳）であった。

5.3 実験結果

違和感に対する回答結果を箱ひげ図で表したグラフを図12に示す。ノンパラメトリック分析のフリードマン検定を行ったところ、条件の間に有意差が見られた($p < 0.05$)。この結果から少なくとも今回比較した2つの条件間では、人差し指と中指を前腕の背側に、親指を前腕の腹側に対応させた場合のほうがその逆の場合に比べて違和感が少ないことがわかった。

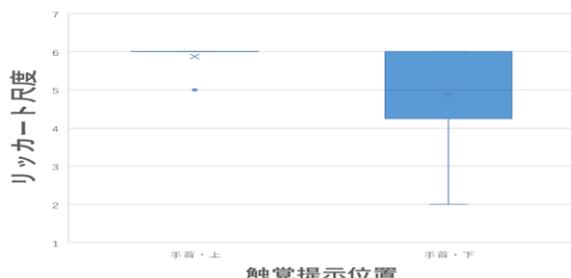


図12：圧覚を提示した時の違和感

5.4 考察

VR空間において物体を把持する時、圧覚を提示する際は、人差し指と中指に対応した部位として前腕の背側に2か所、親指に対応した部位として前腕の腹側に提示する方が、その逆よりも違和感が少ないという結果になった。これは我々の先行研究で人差し指一本に対して行った実験結果と符合する[引用]。例えば中指の場合、物体から指に加わる力が上向きであり、前腕の表で皮膚を圧迫する力の向きが下向きであることを考えると、人体に加わる力の向きとしては逆である。しかし指が対象にかける力の向きとデバイスから提示される力の向きが同じであることから、デバイスの方に自己投射した（デバイスを自己の指と解釈した）可能性が考えられる。

6. おわりに

本研究では、VR空間内で物体に触れた際に、本来指先に生じる触覚情報を、前腕といった体の他の部位に提示することを提案し、特に人差し指、親指、中指の三本に加わる水平、垂直方向の力を提示するデバイスを作成した。提示部位および提示の方向に関する検討の結果、全ての部位に対して異なる触覚情報を提示しても、十分に識別できる事が分かった。また、物体を把持し持ち上げる場合にも、体験のリアリズムの向上に繋がる可能性も示唆された。

また、このデバイスは現段階では2自由度しかないため、実験で行った圧覚（上下方向）と横ずれ感（左右方向）を2次元でしか提示する事ができなかった。将来的に3自由度にする事で様々な感覚を作り出す事を試みる。

謝辞 本研究はJST-ACCEL身体性メディアプロジェクト（JPMJAC1404）の一環として行われた。またリンク機構に関してDr.Dzmitry Tsetserukouの助言を得た。

参考文献

- [1] E. R. Kandel, J. H. Schwartz, and T. M. Jessell, *Principles of Neural Science*, Fourth Edition, A Division of The McGraw-Hill Companies, 2000.
- [2] Science, Fourth Edition, A Division of The McGraw-Hill Companies, 2000.
- [3] CybaerGloveSystems,
- [4] K. Minamizawa, S. Kamuro, S. Fukamachi, N. Kawakami, and S. Tachi, "GhostGlove: Haptic Existence of the Virtual World", *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2008*, new tech demos, pp. 18.
- [5] J. Iqbal, N. G. Tsagarakis, and D. G. Caldwell, "Four-Fingered Lightweight Exoskeleton Robotic Device Accommodating Different Hand Sizes", *Electronics Letters*, Vol. 51, No. 12, pp. 888–890, 11th June 2015.
- [6] M. Gabardi, M. Solazzi, D. Leonardis, and A. Frisoli. "A

- New Wearable Fingertip Haptic Interface for the Rendering of Virtual Shapes and Surface Features”, in Proceedings of Haptic Symposium, 2016.
- [7] K. Minamizawa, S. Kamuro, N. Kawakami, and S. Tachi, “Haptic Interaction with Virtual Objects in Midair Using a Finger-worn Haptic Display”, Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, Vol. 13, No. 4, pp. 415–420, 2008.
- [8] K. Minamizawa, S. Fukamachi, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi, “A Haptic Display Displaying Gravity Sensation by the Shearing Stress in Grasping”, Proceedings of the Virtual Reality Society of Japan, Annual Conference, 2006.
- [9] S. B. Schorr and A. M. Okamura, “Fingertip Tactile Devices for Virtual Object Manipulation and Exploration”, Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 3115–3119.
- [10] D. Mochizuki, T. Nakamura, R. Kato, S. Morishita, and H. Yokoi, “Tactile Sensory Prosthetic Hand”, Proceedings of the Mechanical Engineering Congress, Japan, 2012.
- [11] C. Antfolk, M. D’Alonzo, M. Controzzi, G. Lundborg, B. Rosen, F. Sebelius, and C. Cipriani, “Artificial Redirection of Sensation from Prosthetic Fingers to the Phantom Hand Map on Transradial Amputees: Vibrotactile versus Mechanotactile Sensory Feedback”, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 21, pp. 112–120, 2012.
- [12] T. Okano, K. Hirota, T. Nojima, M. Kitazaki, and Y. Ikei, “Haptic Feedback for Foot Sole Using Pneumatic Pressure Device”, Proceedings of ASIAGRAPH, 2016.
- [13] Y. L. Freng, C. L. Fernando, J. Rod, and K. Minamizawa, “Submerged Haptics: A 3-DOF Fingertip Haptic Display Using Miniature 3D Printed Airbags”, Proceedings of the ACM SIGGRAPH Emerging Technologies, 2017.
- [14] T. Nakamura, N. Nishimura, M. Sato, and H. Kajimoto, “Development of a Wrist-twisting Haptic Display Using the Hanger Reflex”, Proceedings of the 11th Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, No. 33, 2014.
- [15] A. A. Stanley and K. J. Kuchenbecker, “Evaluation of Tactile Feedback Methods for Wrist Rotation Guidance”, IEEE Trans Haptics, Vol. 5, No. 3, pp. 240–251, 2012.
- [16] Y. Kuniyasu, M. Sato, S. Fukushima, and H. Kajimoto, “Transmission of Forearm Motion by Tangential Deformation of the Skin”, Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference, No. 16, 2012.
- [17] F. Chinello, C. Pacchierotti, and N. G. Tsagarakis, “Design of a Wearable Skin Stretch Cutaneous Device for the Upper Limb”, Proceedings of Haptics Symposium (HAPTICS), pp. 14–20, 2016
- [18] V. Yem, H. Kuzuoka, N. Yamashita, R. Shibusawa, H. Yano, and J. Yamashita, “Assisting Hand Skill Transfer of Tracheal Intubation Using Outer-covering Haptic Display”, Proceedings of the 30th Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 3177–3180, 2012.
- [19] S. Casini, M. Morvidoni, M. Bianchi, M. Catalano, G. Grioli, and A. Bicchi, “Design and Realization of the CUFF-Clenching Upper-Limb Force Feedback Wearable Device for Distributed Mechano-Tactile Stimulation of Normal and Tangential Skin Forces”, Proceedings of the IEEE International Conference of Intelligent Robots and Systems, pp. 1186–1193, 2015.
- [20] J. Felip, and A. Morales “Robust sensor-based grasp primitive for a three-finger robot hand,” Proceedings of the IEEE/RSJ international Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009.
- [21] E. Chinellato, R. B. Fisher, A. Morales, and A. P. del Pobil, “Ranking Planar Grasp Configurations for a Three-Finger Hand”, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003.
- [22] A. D. Deshpande, Z. Xu, M. J. Vande Weghe, B. H. Brown, J. Ko, L. Y. Chang, D. D. Wilkinson, S. M. Bidic, and Y. Matsuoka, “Mechanisms of the Anatomically Correct Testbed Hand”, Proceedings of the IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 19, No. 1, 2013.
- [23] A. Namiki, Y. Imai, M. Ishikawa, and M. Kaneko, “Development of a High-speed Multifingered Hand System and its Application to Catching”, Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003.
- [24] D. Tsetserukou, S. Hosokawa, and K. Terashima, “LinkTouch: A Wearable Haptic Device with Five-Bar Linkage Mechanism for Presentation of Two-DOF Force Feedback at the Fingerpad”, Proceedings of IEEE Haptic Symposium, pp. 307–312, 2014 .
- [25] S. Weinstein, “Intensive and Extensive Aspects of Tactile Sensitivity as a Function of Body Part, Sex, and Laterality”, D. R. Kenshalo (Ed.) The Skin Senses, Thomas, Springfield, IL, 1968.
- [26] Y. Kuniyasu, M. Sato, S. Fukushima, and H. Kajimoto, “Transmission of Forearm Motion by Tangential Deformation of the Skin,” Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference, Article No. 16, 2012.