



空中触覚フィードバックを用いた遠隔ロボットの移動制御

森崎汰雄¹⁾, 藤原正浩¹⁾, 牧野泰才¹⁾, 篠田裕之¹⁾

- 1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒277-8561 千葉県 柏市 柏の葉 5-1-5, morisaki@hapis.k.u-tokyo.ac.jp, Masahiro_Fujiwara@ipc.i.u-tokyo.ac.jp, yasutoshi_makino@k.u-tokyo.ac.jp, hiroyuki_shinoda@k.u-tokyo.ac.jp)

概要：本研究では、ハンドジェスチャによるロボットの移動制御に非接触な触覚フィードバックを付加することで、操作している実感を向上させる試みを行った。非接触触覚刺激によって (A) 手がロボットの認識範囲内に存在する (B) ロボットを操作できる状態にある (C) ロボットの操作を行っている、という 3 つの状況をユーザに対し直感的に提示し、誤入力の軽減など、操作感の向上を試みた。評価実験の結果、操作感の向上に触覚フィードバックは有効であること、システムが提示する触覚の変化をさらに知覚し易く工夫する必要があることが分かった。

キーワード：触覚フィードバック, ロボットの移動制御, ハンドジェスチャ, 非接触

1. 緒言

1.1 背景と目的

現在、様々な家庭向けロボットが発売/発表されており、各家庭にロボットの存在する生活が現実味を帯びている。家庭向けロボットの中にも様々な種類があり、例えば、日常生活をサポートするコンパニオンロボット、癒しを与えるペットロボット、家事を代行するロボットなどが挙げられる。

このような変性を遂げる社会においては、ロボットを誰もが直感的に操作できるインターフェースが肝要である。例えば、コンパニオンロボットらのほとんどは、音声での会話やインタラクションなどを介すことで直感的に操作することができる。

一方で、ラジコンのような、移動するロボットの直感的な操作についても長らく議論が行われており、これまでにリードをコントローラとし犬を散歩させるように操作できるもの[1]やレーザーポインタのジェスチャで動作を入力するもの[2]が開発されている。

上記のものはデバイスを用いた操作だが、一切のデバイスを持つ必要がない点から、ジェスチャ操作もまた有効かつ直感的である。更に、ジェスチャ操作は 3 次元的な入力も容易であるという利点も持つ。実際に、ジェスチャ操作は、ロボットの動作方向を指さして指示するもの[3]など、多くの研究が行われてきた。

しかし、現在ロボットの操作はコントローラを用いるものが主流であり、ジェスチャ操作は実用に至っていないと考えられる。この理由は、ジェスチャ操作の欠点である、①入力している実感が低いこと、②体の動きをシステムが入力と誤認識してしまうこと、の二点が考えられる。

このうち、欠点①の原因としては、入力時のフィードバックが視覚のみになってしまっているということが考え

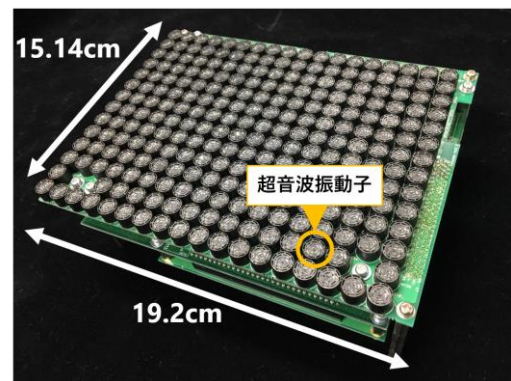


図 1: 空中超音波触覚ディスプレイ

られる[4]。例えばジョイスティックでロボットを操作することを考えると、この際ユーザは、ジョイスティックを押し込むという「触覚的なフィードバック」とロボットが動くという「視覚的なフィードバック」を受けることになる。しかし、これをジェスチャ操作で行うと、ロボットが動くという「視覚的なフィードバック」のみになり、このため操作している実感が損なわれてしまう[4]。

欠点②の原因としては、ユーザはジェスチャ操作の際、一切のデバイスに触れないため、自分が今ロボットを操作できる状態にあるのか直感的に理解できないことが考えられる。例えば、ユーザはジョイスティックに触れ、その触覚を感じることで自分が今ロボットを操作できる状態にあると知覚する。しかし、ジェスチャ操作においては、ユーザは一切のデバイスに触れないため、このような判断基準が存在しない。

以上より、ジェスチャ操作の実用性を向上させるには、①操作に対する「触覚的なフィードバック」を用意する②ユーザが自分の状態を知覚できるように、適切な触覚を提示する、という二点を実装する必要があると考えられる。

これより、本研究では、ロボットのジェスチャ操作に適切な触覚を付与することで、ジェスチャ操作の使用感を向上させることを目的とする。

1.2 触覚フィードバックの選定

本研究では、ジェスチャ操作との相性を考慮すると、非接触な触覚フィードバックを選定する必要がある。

非接触に使用できるデバイスとしては、空気砲を利用したもの[5]や、超音波を利用した空中超音波触覚ディスプレイ (Airborne Ultrasound Tactile Display: AUTD, 図 1)[6]が挙げられる。このうち、今回は比較的高い空間解像度で圧力点を作ることができる点から、空中超音波による触覚提示を選択した。

1.3 空中超音波触覚ディスプレイ (AUTD)

本項では、非接触な触覚フィードバックに採用した、空中超音波による触覚提示の原理について説明する。

AUTD は、個別に位相制御が可能な超音波発振素子をアレー上に並べ、超音波の音響放射圧を利用して非接触に力を提示するデバイスである。音響放射圧とは、空气中を伝搬する超音波が物体によって遮られたとき、その遮った物体の表面に生まれる圧力のことである。この時の圧力 P [pa]は、

$$P = \alpha E = \alpha \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (1)$$

で表される。ここで、 p [Pa]は超音波の音圧の実効値、 ρ [kg/m³]は空気の体積密度、 c [m/s]は空気中の音速、 α [-]は超音波の反射条件によって決定され、物体によって異なる定数である。

AUTD は各素子の位相を個別に制御することができる。これより、各素子の波がある一点で強め合うよう位相を制御すれば、圧力の高い単一焦点を形成することができる。

本研究では、この高い圧力を持つという特徴から単一焦点を、また素子の特性から超音波の周波数は 40 kHz を使用している。

2. 空中触覚フィードバックを伴うロボットのジェスチャ操作システム

2.1 システムの概要

本研究では、まず空中触覚フィードバックを伴うロボットのジェスチャ操作システムを開発した。このシステムの外観を図 2 に示す。

このシステムは、ロボット部とコントローラ部の二つに分けられる。このうちロボット部は、Nexus Robot 社により販売されている 3WD オムニホイールロボット[7]をベースに開発している。このロボットは、コントローラからの入力に応じて等速で前後左右の 4 方向に動作する。また、無線通信モジュールである XBee を搭載しているため、コントローラからの入力は無線で行うことができる。

コントローラ部は、手の動きをトラッキングできる Leap Motion, 超音波を用いて空中に触覚を感じる点を生み出すことができる AUTD, 無線通信モジュールの XBee, そしてこれらを制御するための Windows 10 PC (Let's Note CF-

-インタフェース部-

-ロボット部-

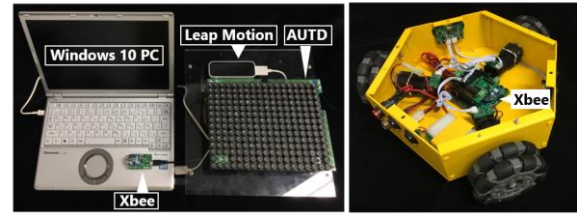


図 2: 空中触覚フィードバックを伴うロボットのジェスチャ操作システム

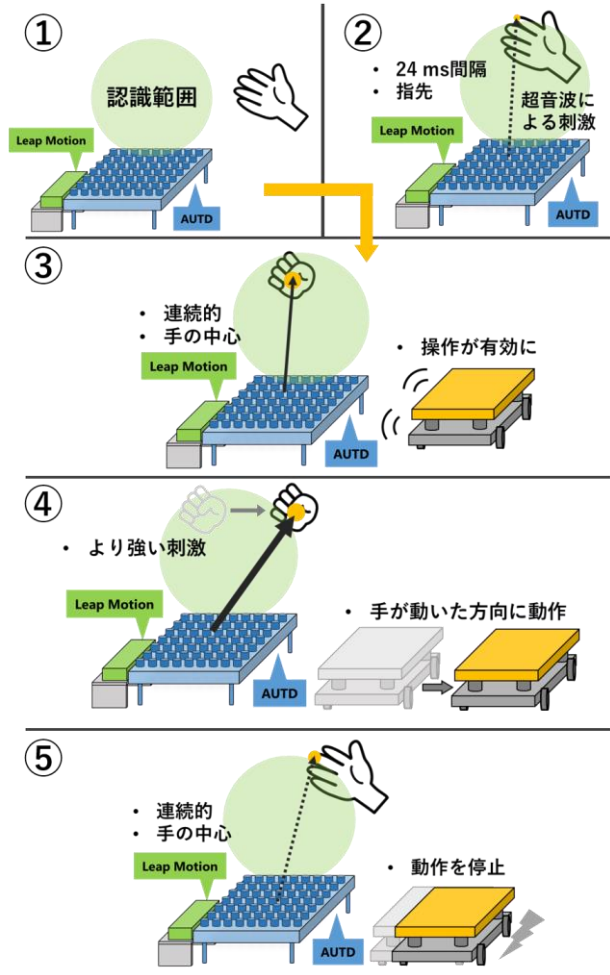


図 3: 動作の流れ

SZ6) より構成される。

このジェスチャ操作システムは、ユーザの手の動きを Leap Motion で検知し、検知した動きに応じて、適切にロボットの動作や AUTD からの触覚提示を行う。具体的な操作方法など、インタフェースの詳細については、2.2 節で述べる。

2.2 インタフェースのデザイン

2.2.1 デザインの背景

緒言で述べたように、ジェスチャ操作の実用性を向上させるには、①操作に対する「触覚的なフィードバック」②ユーザが自分の状態を知覚できるように、適切な触覚を提示する、という二点を実装する必要がある。

そこで、本インタフェースでは、ジェスチャ操作におけ

るユーザの状態を、(A)手がロボットの認識範囲内に存在する (B) ロボットを操作できる状態にある(C)ロボットの操作を行っている、の三種類に分類する。そして、触覚刺激を用いることでユーザに A~C の違いを提示し、①触覚的なフィードバックと②状態提示の両者を実装する。

2.2.2 動作の流れ

このシステムにおいて、システムは次のような流れ (図 3) で動作する。

①ユーザの手が認識範囲外であるときは何もしない。②ユーザの手が認識範囲に入ったことを触覚刺激で伝える (状態 A)。この時の刺激は、人差し指の先に 24 ms 間隔で断続的に行う。ユーザはこの状態においてはロボットを操作することができず、この断続的な刺激を頼りにシステムの認識範囲を探索する。③ユーザが認識範囲内で手を握ると、ロボットの操作が有効になる (状態 B)。これは、「ロボット操作を有効にする、直感的なジェスチャ」として「操作デバイスを握んだ」かのような動作が考えられるためである。また、操作が有効になったことを触覚刺激のパターンと場所を変化させることでユーザに伝える。具体的には、刺激は連続的なものに、刺激する場所は指先→手のひらの中心、とそれぞれ変化する。④ユーザが握った手を動かした方向にロボットは移動する (状態 C)。実際には、ユーザが手を握った時点での位置を原点とし、そこからの移動距離が 10 cm を超えたとき、ロボットは手の移動方向へと動作を開始する。この移動距離が 10 cm を超えている間、ロボットは等速で移動し続けるため、手の変位が 10 cm を超えてさえいればそれ以上手を動かす必要はない (ジョイスティックを倒すような動作をイメージ)。⑤ユーザが手の変位を 10cm 以下となる場所に戻すか、握っていた手を開くことでロボットは動作を停止する (①に戻る)

3. 実験

3.1 実験目的

今回開発した「空中触覚フィードバックを伴うロボットのジェスチャ操作システム」について、次のような観点からそれぞれ実験を行った。

実験 1: 今回実装した、触覚の変化は、ユーザが十分に感じ取ることができるか確かめる。

実験 2: 触覚の有無がロボットのジェスチャ操作にどのような影響を及ぼすか質的に調査する。

3.2 実験方法

今回は 3 名の被検者を対象に実験を行った。年齢は 22~25 歳で、すべて男性である。また、すべての実験において被験者はヘッドホンを付け、システムの動作音を聞くことができない状態であった。実験の様子を図 4 に示す。

3.2.1 実験 1

まず被検者に対して、図 3 を見せながらシステムの説明を行った。次に、システムの認識範囲に手を入れ (図 3 の②) 触覚を感じるか質問し、その後手を握ったとき (③) と手を動かしたとき (④) で、それぞれ触覚の変化を感じ

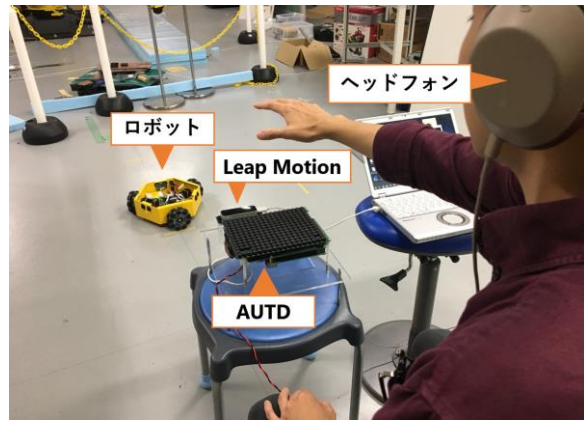


図 4: 実験の様子

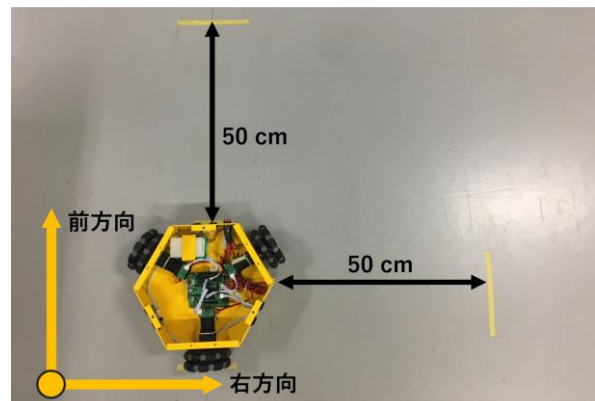


図 5: ロボットの動作タスク

表 1: 実験結果 (図中の番号は図 3 におけるもの)

被検者	A	B	C
状態②	感じる	感じる	感じる
状態③	わからない	少しわかる	わかる
状態④	少しわかる	よくわかる	わからない

たか質問した。

3.2.2 実験 2

実験 1 終了後に連続して行った。被験者にはまず、ロボット操作を 1 分間練習してもらい、その後、簡単なタスクをこなしてもらった。タスクの内容は、前方に 50 cm、後方に 50 cm、右方向に 50 cm、左方向に 50 cm ずつロボットを動作させるというものである。この時、距離はあらかじめマスキングテープを地面に貼ることで明示した (図 5)。被験者にはこののち、触覚フィードバックなしで同様に練習とタスクを行ってもらい、これらの比較についてヒアリングを行った。ヒアリングは、「操作感に変化したか」、「操作ミス時のストレスに差はあったか」という質問を中心に行った。

3.3 実験結果

3.3.1 実験 1

実験 1 の結果を表 1 に示す。この結果より、超音波による刺激は全員が感じることができたが、その後の触覚刺激

の変化を感じられるかどうかはばらつきがあったことがわかる。

3.3.2 実験 2

実験 2 はヒアリング形式で行った。まず、被験者 A, B, C の全員が、触覚を付与することで操作感が上がっていると答えた。被験者間でそれぞれ感じ方に差があり、C, B, A の順に触覚の効果を強く感じていた。特に、B は「触覚がないと操作し辛かった」、C は「触角がないと何を操作しているのかわからなくなる」とそれぞれ回答した。

また、操作に失敗したときのストレスについて尋ねたところ、3 名とも触覚の有無で大きな変化はないと回答した。

3.4 考察

3.4.1 実験 1

実験 1 の結果より、超音波による触覚刺激の強度は十分知覚できる値であったと考えられる。しかし、触覚刺激を変化させた場合には知覚にばらつきがあった。

まず、被験者 A が状態③(手のひらに向けた連続的な刺激)への遷移を知覚できなかった理由としては、この時被験者は手を握りしめているため、指の背が邪魔して十分に手のひらを刺激できなかったことが考えられる。一般に人間は手のひら側のほうが触覚刺激に敏感であるため、手のひらをうまく刺激できなかったことで、触覚刺激の変化が十分に伝わらなかったと考えられる。この解決策としては、刺激の感覚を 24 ms よりも大きくすることで、より変化分をはっきりさせることがある。

次に、状態④について、C が変化を知覚できなかった理由としては、AUTD の作ることができる触覚刺激の強さに上限があり、十分に知覚できるほど大きな圧力の差が用意できていなかったということが考えられる。この解決策としては、AUTD を複数台連携させ、触覚刺激の上限をより高くすることがある。

3.4.2 実験 2

実験結果より、触覚の付与は操作感の向上に寄与するものの、その程度には個人差があることが分かった。しかし、現状では知覚の度合い自体に大きな差があるため、触覚刺激の方法と強さを見直したのちに再度検討が必要である。

また、操作に失敗した際のストレスには変化がなかったが、これより認識範囲の提示は、タスクを行う場所が固定の場合ロボットの使用感にあまり寄与しないと考えられる。

認識範囲の提示は、場所を移動するなど、いったんコントローラを離れたり、その場でタスクを中断したりする際に使用感に対し大きく貢献できると考えられる。このため、次回実験の際には、これを考慮した新たなタスクを考案する必要がある。

4. 結言

本論文では、ロボットのジェスチャ操作システムに空中触覚フィードバックを組み合わせることで、操作感が向上するか検討した。

評価実験より、現状の触覚提示法では被験者が十分に触覚の変化を感じ取れていないことがわかった。しかし、今の十分変化を感じ取れない状態においても被験者は触覚フィードバックの優位性を感じており、触覚提示法を工夫していくことで、操作している実感を大きく向上させることができると考えられる。

今後は触覚提示法の改善や、場所の移動などによる操作の中断を取り入れたタスクの考案を行い、より正確に仮説の検証をおこなっていく必要がある。

参考文献

- [1] J. E. Young, Y. Kamiyama, J. Reichenbach, T. Igarashi, and E. Sharlin, "How to walk a robot: A dog-leash human-robot interface," Proc. - IEEE Int. Work. Robot Hum. Interact. Commun., pp. 376–382, 2011.
- [2] K. Ishii, S. Zhao, M. Inami, T. Igarashi, and M. Imai, "Designing laser gesture interface for robot control," Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics), vol. 5727 LNCS, no. PART 2, pp. 479–492, 2009.
- [3] J. Richarz, A. Scheidig, C. Martin, S. Müller, and H. M. Gross, "A monocular pointing pose estimator for gestural instruction of a mobile robot," Int. J. Adv. Robot. Syst., vol. 4, no. 1 SPEC. ISS., pp. 139–150, 2007.
- [4] P. I. Cornelio Martinez, S. De Pirro, C. T. Vi, and S. Subramanian, "Agency in Mid-air Interfaces," Proc. 2017 CHI Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - CHI '17, pp. 2426–2439, 2017.
- [5] R. Sodhi, Poupyrev, M. Glisson, and a Israr, "AIREAL: interactive tactile experiences in free air," ACM Trans. Graph., vol. 32, no. 4, p. 134, 2013.
- [6] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, "Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound," IEEE Trans. Haptics, vol. 3, no. 3, pp. 155–165, 2010.
- [7] 「3WD オムニホイールロボット(三角タイプ)」
<http://www.vstone.co.jp/products/nexusrobot/download/nexus_10003.pdf> 018/7/26アクセス