

はじめに

車載機器の操作に空中ジェスチャが使われるようになると、次に求められるのは操作がシステムに受け付けられたかどうかをユーザに通知するための触覚フィードバックである（図1）。これに空中映像を組み合わせ、空中タッチパネルを実現することも考えられる。最近、空中において触覚を提示する方法として超音波による方法が注目を集めており、その研究開発を行うという報道発表やデモ展示を行う自動車関連メーカーも増えつつある。本節では、車載分野における動向を紹介し、超音波による触覚提示法の特徴を説明する。そして事例として、筆者が試作した空中入出力インタフェースを紹介する。（サイエンス&テクノロジー社「車載用ディスプレイ・操作インターフェース ～自動運転・高度情報化時代のHMIとその要素技術～」掲載・未編集原稿）

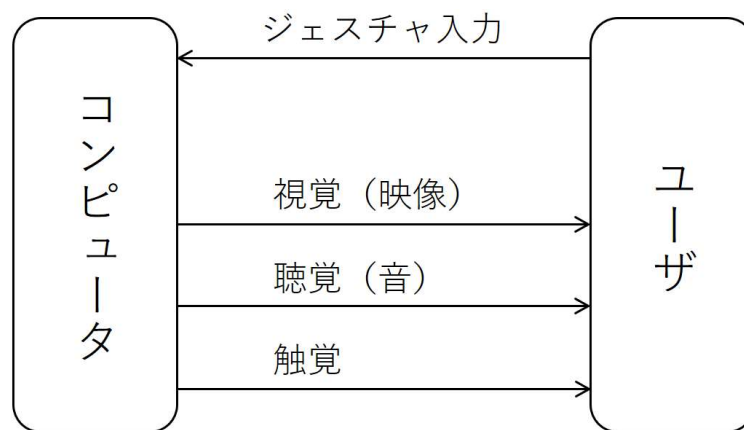


図1 ジェスチャ入力と視覚・聴覚・触覚フィードバック。

1. 車載分野における超音波触覚

空中入力の操作性や空中映像の存在感を向上させることを目的として、空中における触覚提示法が研究されている¹⁾。振動デバイスや磁石などを指に装着する方法の他、空気砲やレーザーなどを指に当てることで触覚刺激を与える方法も考案されている。それらの中で時空間解像度と安全性のバランスを考慮すると、超音波による方法²⁾が有力な候補として挙げられる（図2）。これは2008年に基礎原理³⁾、続いてスキャン機能を搭載したシステム⁴⁾がデモ展示され、この10年間で急速に注目を集めた方法である。数百個の超音波振動子の位相を個別に制御し、空間中の任意の位置に焦点を形成する。この焦点に手をかざすと、音響放射圧により皮膚が押され、何にも触れることなく触覚を感じることができる。筆者も初期からその開発および応用の研究に携わっている。



図2 空中超音波触覚ディスプレイ。超音波焦点により紙片の一部が押し上げられている。

車載分野においてもこの数年、手をかざして操作するカーナビ⁵⁾ (2012) や、ジェスチャ入力を搭載した自動車⁶⁾ (2015) が発売されるなど、空中入力が実際に取り入れられつつある。さらに次の段階として、超音波による触覚提示を導入するという発表が各社から相次いでいる。ここでは、各社からの発表を時系列順に並べて概観する。

筆者が知る限り、自動車関係のメーカーで超音波触覚を採用したのはトヨタのスーパーカーメーカーW motors が世界初である。英語のプレスリリース⁷⁾ (2013) から、そのことに言及した部分を引用する。

It also features a one of a kind holographic display with interactive motion and tactile interaction, an advanced ID4Motion dashboard and a uniquely developed reverse mechanical doors system.

「空中映像が表示され、空中ジェスチャ入力ができ、触覚を感じることができる」と言うにとどまっており、これだけではどのような原理で触覚が提示されるのか不明である。しかし空中映像システムの提供元であるアスカネットのウェブサイト⁸⁾に次のような記載があり、超音波触覚であることが分かる。

15cm 角の AI プレートに超音波触覚を組み合わせたものも別途展示され、何もない空中での接触感覚に驚きの声が上がっていた。

これを開発した東京大学の篠田・牧野研究室は、同システムについて学会発表も行っている⁹⁾。

次に発表されたのは、英国 Jaguar Land Rover のプレスリリース¹⁰⁾であった。

The system could also use mid-air touch to provide the driver with a sensation, otherwise known as haptic feedback, that their button selection has been successful. Mid-air touch uses

ultrasonics to create a touch sensation in mid-air without the skin needing to be in contact with any surface.

このプレスリリースは日本語版¹¹⁾も公開されている。

空中操作が成功したかどうかは、システムから指先に送られる感触で知ることができます。これは「触覚フィードバック」と呼ばれる技術で、肌がシステムの表面に触れていなくても、超音波によって触れている感覚を与えます。

ステアリングからの脳波計測、脈拍・呼吸をモニタリングする座席シート、カメラで手の動きを検出することによる空中操作入力、アクチュエータ搭載の触覚アクセルペダルなど次世代自動車プロジェクトの一環として超音波触覚も含まれているとのこと。プレスリリースでは触れられていないが、この超音波触覚は英国スタートアップ Ultrahaptics が提供している¹²⁾。

2017年の Consumer Electronics Show (CES2017) では、三社 (BOSCH、BMW、デンソー) がそれぞれ独立に超音波触覚のデモを行うという、シンクロシティとも言える事態が発生した。BOSCH の発表¹³⁾によると、上述の Jaguar Land Rover と同様に Ultrahaptics の超音波触覚を使用している。

Developed with Ultra Haptics, a start-up from Bristol in the UK, the technology uses ultrasound sensors that sense whether the driver's hand is in the correct place, and then provides feedback on the gesture being executed.

また BMW¹⁴⁾、デンソー¹⁵⁾の発表から該当箇所を引用する。

(BMW)

The system is operated directly by finger movements, while an ultrasound source provides tactile confirmation of the driver's commands.

(デンソー)

もう1台のデモ機では、超音波を用いて空間上に触覚を作り出す技術を紹介します

どちらも詳細は不明だが、他の構成は考えにくく、やはり位相制御により超音波を集束する方式と思われる。

2. 超音波触覚の特徴

超音波による空中での触覚提示は、強力な超音波がその進行方向に物体表面を押す現象 (音響放射圧) を利用している。その強力な超音波を得るため、ひとつひとつはそれほど強力でない超音波振動子を数百個使用し、それらの位相を個別に制御して狙った位置に焦点を形成する方法 (電子フォーカス) が採用されている。理論的背景は他の文献¹⁾²⁾に譲り、ここでは車載用に超音波装置の設計をするにあたって理解しておくべき超音波触覚の特徴について述べる。

超音波によって皮膚表面を押し方向に生じる音響放射圧 P [Pa]は次式で表される。

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

ここで E [J/m³]は入射波の音響エネルギー密度、 p [Pa]は実効値で表された超音波の音圧、 ρ [kg/m³]は空気の密度、 c [m/s]は空気中での音速である。 α は物体表面の特性に依存する係数であり、全反射のとき $\alpha=2$ となる。皮膚表面は超音波をほぼ全反射するためこの場合に当たる。放射圧 P を大きくするには音圧 p を大きくする必要がある。音圧 p は振動子の駆動電圧と個数で決まる。駆動電圧は耐圧を超えて大きくすることができないため、実用上は個数を増やすことで放射圧 P を大きくする。単純計算で、 N 個の振動子を用いれば放射圧 P は N^2 倍になることが期待される。

振動子のサイズは決まっている（現在使用しているものは直径 10 mm）ため、個数を増やすことは振動子アレイのサイズ D [m]を大きくすることを意味する。アレイサイズ D は、形成される焦点の直径 w [m]と次式のような関係にある（図3）。

$$w = \frac{2\lambda R}{D} \quad (2)$$

ここで λ [m]は超音波の波長、 R [m]は焦点距離である。すなわち波長程度の焦点を形成したいとき、距離が遠いほど、同程度の大きなアレイを用意する必要がある。一方、車載用途では他の機器との兼ね合いから、振動子アレイはできるだけ小さく抑えることが求められる。したがって設計の際には、操作者が手をかざす高さ、提示すべき力の大きさ、望ましい焦点径、許容されるアレイサイズ、アレイの設置場所、などを総合的に考慮する必要がある。

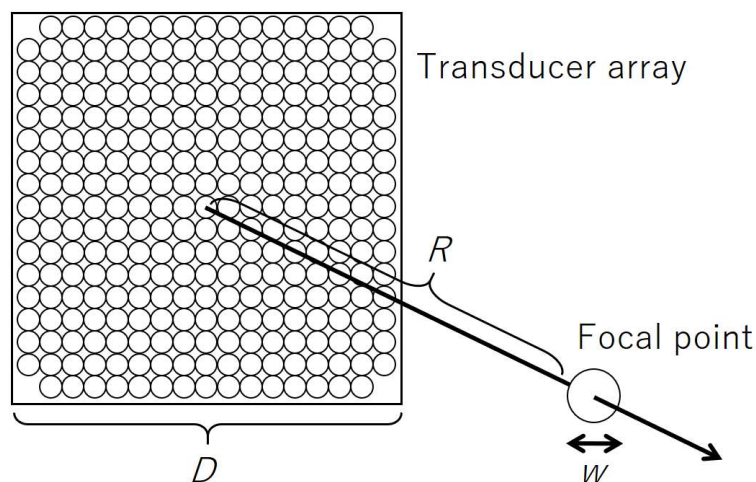


図3 振動子アレイのサイズ D 、焦点距離 R 、焦点径 w の関係。

振動子アレイから鉛直下向きに電子秤に向けて超音波を照射し、焦点において生じる力を測定した。振動子を91個³⁾使用した場合には8 mN、285個²⁾使用した場合には16 mNであった。3倍の個数だからといって9倍の出力が得られるわけではないことが分かった。これは振動子そのものの指向性(正面がもっとも強く、射出角 $\theta = 50^\circ$ で振幅が半減する)と、皮膚表面への斜め入射(入射角 ϕ [rad]のとき振幅は $\cos \phi$ 倍になる)のため、周辺部の振動子は焦点に寄与しにくいことに起因している。これらの角度がとりうる値の範囲も焦点距離 R に依存する。すなわち、焦点距離 R が小さくなると射出角 θ と入射角 ϕ は大きくなる。一方で、焦点距離 R が大きくなると焦点がぼやけて(焦点径 w が大きくなって)いき、最終的には集束しなくなりビーム(平面波)として伝搬するようになる。これらの影響が許容範囲内に収まる焦点距離 R が超音波触覚の有効距離と言える。

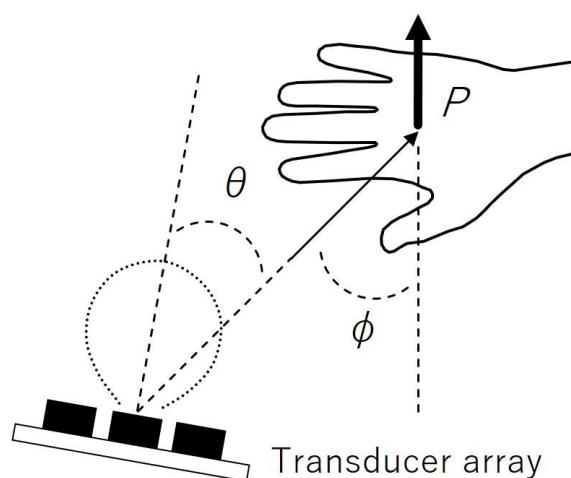


図4 振動子からの射出角 θ と皮膚表面への入射角 ϕ 。

3. 空中インタフェース

筆者は2011年に、空中で手を動かすことでPC画面内のカーソルを操作し、クリックすると触覚が提示されるシステムを構築した(図5)。空中入力はKinect (Microsoft社)により実現した。これは2010年11月に国内販売が開始された、手に何も持たずに全身の動きでゲームをプレイするためのコントローラであり、初めて数万円台という低価格で購入できる深度カメラでもあった。その原理は赤外Structured Lightであった。簡単なアルゴリズムとして、最も近い距離にある物体を手として認識することとした。手にマーカを装着する必要がないことが大きな利点である。

触覚フィードバックは、PC画面の両側に設置した2枚の超音波振動子アレイ(10×20 cm)の焦点を重ね合わせて提示した。アレイが長方形である理由は、システム全体が幅を取りすぎないように配慮したためである。結果として焦点距離 $R=300$ mmにおいて焦点径 51×26 mmと横に細長い楕円形の焦点が形成された。このため指一本一本を狙う用途には適さず、複数本の指を並べて受け止めるものとした。触覚刺激は200 Hzの振動刺激とした。

これは手に何も装着することなく空中操作と空中触覚の両方が実現される世界初のシステムであった。IEEE World Haptics 2011¹⁶⁾にて実演展示を行った。

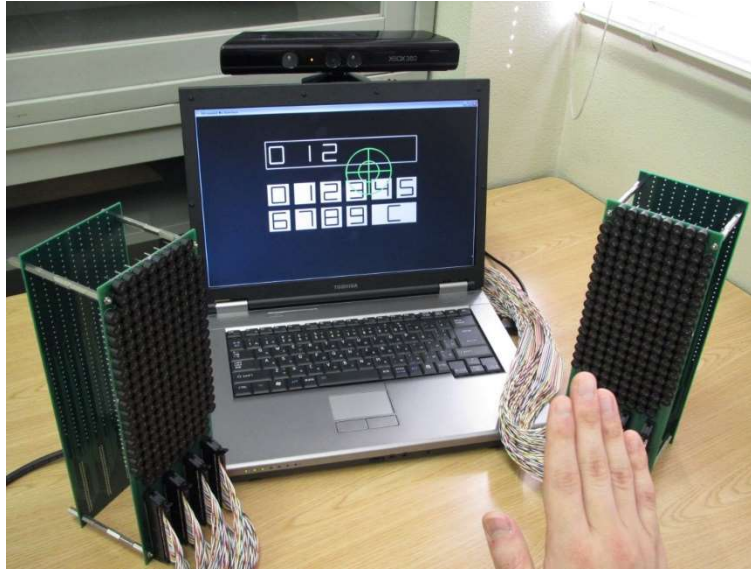


図5 深度カメラ Kinect と超音波触覚による空中インタフェースシステム。

おわりに

本節では、空中ジェスチャ入力に超音波で触覚フィードバックを付与する方法について、近年の車載分野における動向と、設計にあたっての注意点を述べた。そして事例として筆者が過去に発表したシステムについて紹介した。実用化に向けては、触覚提示に必要な数十ワットのパワーを供給するためバッテリーの大容量化が求められるなどの技術的課題も残されている。

参考文献

- 1) 星貴之, 「触覚を伴う空中入力システム」, 『五感インタフェース技術と製品開発 事例集 ～ヒトの知覚メカニズムと感覚間の相互作用～』, 技術情報協会, 2016.
- 2) 星貴之, 「非接触作用力を発生する小型超音波集束装置の開発」, 計測自動制御学会論文集, vol. 50, no. 7, 2014, pp. 543-552.
- 3) T. Iwamoto, M. Tatezono, and H. Shinoda, “Non-contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound”, *Proc. Eurohaptics*, 2008, pp. 504-513.
- 4) T. Iwamoto, M. Tatezono, T. Hoshi, and H. Shinoda, “Airborne Ultrasound Tactile Display”, *Proc. ACM SIGGRAPH*, New Tech Demos, 2008, article no. 1.
- 5) パイオニア 楽ナビ, URL: http://pioneer.jp/carrozzeria/rakunavi/avic-mrz009_avic-mrz007/

- 6) BMW 7 シリーズ , URL: <http://www.bmw.co.jp/ja/all-models/7-series/sedan/2015/innovative-functionality.html>
- 7) Unveiled at the Dubai International Motor Show, the first Arabian Hypercar “Lykan HyperSport 2014” is all set to conquer the world, Dubai PR Network, URL: <http://www.dubaiprnetwork.com/pr.asp?pr=82025>
- 8) AI プレートが自動車に搭載され好評を得る ～ アラブ首長国連邦ドバイ市で開催された Dubai International Motor Show 2013 レポート ～ , ASKANET ニュース , URL: <https://www.asukanet.co.jp/contents/news/2013/20131121.html>
- 9) Y. Monnai, K. Hasegawa, M. Fujiwara, K. Yoshino, S. Inoue, and H. Shinoda, “HaptoMime: Mid-Air Haptic Interaction with a Floating Virtual Screen”, *Proc. ACM UIST*, 2014, pp. 663-667.
- 10) Jaguar Land Rover Road Safety Research Includes Brain Wave Monitoring To Improve Driver Concentration And Reduce Accidents, Jaguar Land Rover News, Web archive, URL: https://web.archive.org/web/20150622040703/http://newsroom.jaguarlandrover.com/en-in/jlr-corp/news/2015/06/jlr_road_safety_research_brain_wave_monitoring_170615/
- 11) ジャガー・ランドローバーが、開発中の画期的な安全技術を発表, ジャガー・ランドローバー プレスリリース, <https://pr.jlr.jp/attachments/1746/attachment1s/download>
- 12) Ultrahaptics to support Jaguar Land Rover with Mid Air Touch, Ultrahaptics Announcements, URL: <https://www.ultrahaptics.com/ultrahaptics-support-jaguar-land-rover-mid-air-touch/>
- 13) Bosch at CES 2017: New concept car with Ultra Haptics, Bosch Media Service, URL: <http://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/bosch-at-ces-2017-new-concept-car-with-ultra-haptics-84051.html>
- 14) BMW at the Consumer Electronics Show (CES) 2017 in Las Vegas, BMW Press Kit, URL: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0266962EN/bmw-at-the-consumer-electronics-show-ces-2017-in-las-vegas>
- 15) デンソー、2017 International CES 国際家電ショーに出展, DENSO Japan ニュースリリース, URL: <http://www.densocorp-na.com/wp-content/uploads/DENSO-to-Exhibit-at-CES.pdf>
- 16) T. Hoshi, “Development of Aerial-Input and Aerial-Tactile-Feedback System”, *Proc. IEEE World Haptics*, 2011, pp. 569-573.

(URL resources last accessed on 17 July 2017.)