

第5節 触覚を伴う空中入力システム

東京大学 星 貴之

はじめに

空中で手指を動かすことによってコンピュータに指令を与える技術は、もはやフィクションではなく日常生活に入り込もうとしている。しかし空中では指に触れるものがなく、ユーザは入力した結果としての触覚が得られない。コンピュータが入力を認識したことやそのタイミングをユーザに知らせるため視覚（光）や聴覚（音）によるフィードバックがよく用いられるが、使用感を向上させるためには触覚でも感じられることが望ましい。空中という、そもそも非接触な状況において触覚を感じさせる技術は、研究段階のものがこれまでにいくつか報告されている。本節ではそれらの技術を概観したあと、実装例として、筆者が開発した超音波によって触覚フィードバックを行う空中入力システムについて説明する。その後、最近の動向についてまとめる。

（技術情報協会「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～」掲載・未編集原稿）

1. 空中操作と空中触覚

ここでは空中操作および空中触覚（図1）のために開発されてきた技術について紹介する。空中操作には、光や超音波などにもとづき接近を検知してスイッチとして働くもの、市販のウェブカメラなどによって得られる二次元画像データを用いるもの、深度センサによって得られる三次元画像データを用いるもの、超音波や電磁波の反射によりジェスチャを認識するもの、などがある。空中触覚には、エアジェットや空気砲など空気を手にぶつけるもの、磁力を利用するもの、超音波により圧力を発生させるもの、レーザーによって皮膚を刺激するもの、などがある。以下、それぞれの項目について詳しく述べる。

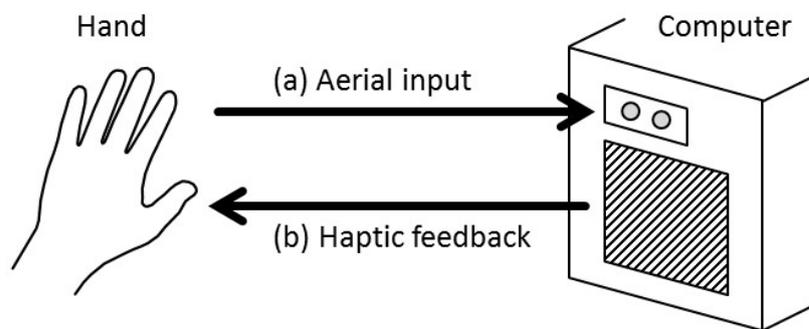


図1 空中操作(a)と空中触覚(b)。

1.1 空中操作

従来、ユーザはコンピュータに手で直接触れることにより入力を行っていた。スイッチから始まり、キーボード、マウス、ペンタブレット、タッチパネル、などである。コンピュータが研究所など限られた場所で使われるものであるうちは触れることによる操作で問題なかった。しかし近年コンピュータは日常生活の中で使われるものへと変容してきており、手で触れることが困難、あるいは好ましくない状況が現れてきた。例えば、街中に設置されるデジタルサイネージやデジタル案内板では、タッチパネルを操作するためわざわざ画面に近寄るよりも、離れた場所から操作できるほうが効果的である。エアコンやオーディオなど車載機器は、スイッチに手を伸ばす動作や視線を向けることが運転の妨げとなるため、自然な位置に手をかざして操作できることが望ましい。食品工場や医療現場などで清潔さを保つためには、ものに触れることは極力避けるべきである。ヘッドマウントディスプレイ（HMD）を装着して歩き回るようなバーチャルリアリティ体験では、コントローラを始めから持っておくことはできるが、持たずに済む方が体験の質が向上する。

これらの要望に応えるため、コンピュータに直接触れることなく、空中で手を動かすことで操作する技術が生み出されてきている。これは CUI（Console User Interface）、GUI（Graphical-）に次ぐインタフェースとして、NUI（Natural-）と呼ばれることもある。ここでそれらを概観する。なお、指先の一連の動きによってコマンドとするジェスチャ入力と、指先の位置に応じて画面内のカーソルを動かすような入力とがあるが、ここでは区別しないものとする。

- ・ 焦電センサは、人間の接近を検知してスイッチを切り替える最もシンプルなものである。自動蛇口、自動ドア、自動照明などに使われる。
- ・ フォトリフレクタや超音波測距計、静電容量計などを用いると、距離（一次元）の情報が得られる。スレッシュホールドを設けてスイッチとしても使えるが、距離を何らかのパラメータ（音量など）と対応付けて操作することもできる。
- ・ 単眼カメラを用いると平面（二次元）の情報が取得でき、ジェスチャ入力やカーソル操作などが可能となる。ただしこの場合、一枚の画像から指先を抽出するための画像処理（背景差分や肌色検出、時間方向のフィルタリングなど）が必要である。カメラを二台用いる（ステレオカメラ）と三次元の情報が得られるようになる。
- ・ 深度カメラと呼ばれる、一台で三次元情報を得るカメラもある。これには、人間の目に見えない赤外光パターンを投影してその歪みから物体の起伏を算出するもの（Structured Light 方式）¹⁾ と、画素ごとに赤外光の往復時間を調べることで距離の二次元パターンを得るもの（Time of Flight 方式）²⁾ とがある。
- ・ 超音波のドップラー効果にもとづいてジェスチャ認識する研究が報告されている³⁾。PC に内蔵

されているスピーカとマイクを利用することで、部品を付け加える必要がない利点がある。また、電磁波の反射にもとづいてジェスチャ認識をする研究開発（Project Soli）も行われている⁴⁾。スマートウォッチなどに搭載可能な微小なチップで実現され、指同士をすり合わせるような細かな動きも認識できる。

1.2 空中触覚

空中操作には、コンピュータに直接触れることなく操作できるというメリットがある一方で、直接触れないため指先に何も感じられないというデメリットも存在する。「触れなければならない」という制約から解放されると同時に、「触れることが出来ない」という不便にも見舞われるのである。このため、空中にかざした手がコンピュータから見えているかどうか（スイッチやタッチパネルの場合はセンサ部に触れて操作するので明らか）や、操作が受け付けられたタイミング（スイッチの場合はクリック感、タッチパネルの場合は振動で分かる）などが分かりづらい。これに対して、手を検出するとランプが点灯したり、操作を受け付けるとサイン音が鳴ったり、視覚や聴覚のフィードバックを与えることが一般的である。しかし自動車の運転中や騒音のある環境など、目や耳の注意を向けられない状況では不十分である。また指先に何も感じないまま指先を動かし続けることは不安感に繋がる。さらにバーチャルリアリティ体験において、触覚フィードバックは現実感を損ねないためにも重要である。

これらの要望に応えるため、空中において触覚フィードバックを与える技術が開発されている。ここでそれらを概観する。なお、触れた瞬間の接触の通知、文字や図形などの記号、リアリティのある触り心地、のうちどれを提示可能かはそれぞれの技術により異なるが、ここでは区別しないものとする。

- ・振動デバイス⁵⁾やモータ駆動されたベルト⁶⁾、直動ピン⁷⁾などを小型化したユニットを指先に装着する方式は多く試みられている。これらは装着の手間がかかったり、常に皮膚に密着していることが不要な触感に繋がったりする。

- ・指先には何も付けず、腕に装着するデバイスもある⁸⁾。これは指を駆動する筋肉への機能的電気刺激により触覚を生じさせるものである。

- ・ロボットアームにより、指先に触覚を与えるべきタイミングで物体を差し出して指先に触れさせる方法もある^{9) 10)}。装備は大型になるが、必要な時だけ触覚を生じさせられるのが利点である。

- ・電磁石アレイと、指先に取り付けた磁石による方法もある^{11) 12)}。斥力だけでなく引力も生じさせられる利点があるが、アレイから 10 cm 程度までの比較的近い範囲に限られる。

- ・空気を手にぶつけることにより、何も装着することなく、また遠隔で触覚を与えることができ

る。ファンで風を送る¹³⁾、エアジェットを噴出する¹⁴⁾、空気砲で渦輪を飛ばす^{15) 16)}などの方法がある。空気の移動であるため時空間解像度は比較的粗い。

・強力な超音波が物体を押し効果（音響放射圧）を利用することもできる^{17) 18) 19)}。多数の超音波振動子の位相制御によって焦点を結ぶ方式をとることで、空中の任意の位置で触覚を感じさせることが可能である。時空間解像度は比較的高い（音速と波長で決まる）。

・レーザーによる触覚提示も試みられている。ナノ秒パルスレーザーにより指に巻いたカバーの熱膨張による弾性波による方式²⁰⁾と、フェムト秒パルスレーザーを皮膚に直接当てて角質に微小な穴が掘られる（アブレーション）際の衝撃波による方式²¹⁾がある。

2. 超音波によって触覚フィードバックを行う空中入力システム

筆者は2008年から、超音波による非接触触覚提示の研究を行っている²²⁾。空中操作のために計測した手の三次元位置データにもとづき、その位置で焦点を結ぶよう超音波を照射する。焦点における強力な超音波は、音響放射圧により皮膚表面を押し、その結果として触覚が感じられる。ここでは、この原理について説明する。また、手の三次元位置を計測するため2009年には赤外ステレオカメラ、2011年には深度カメラを採用した。それぞれの試作システムについて紹介する。

2.1 超音波による空中触覚提示の原理

2.1.1 音響放射圧

一般的な音響学では、波動方程式に従う音波を考える。これはナビエ・ストークス方程式（非圧縮流体の動きを記述する基礎方程式）から、粘性や渦がないことを仮定し、線形化（音圧などの変動が微小であり二乗以上の項が無視できると仮定して近似すること）によって導出されたものである。波動方程式に従う音波は直流成分を持たない。すなわち、この音波が物体に遮られたとき、物体表面に加わる音圧の時間平均はプラスとマイナスがちょうど打ち消し合ってゼロとなる。

音圧がその二乗を無視できないほど大きくなると、線形の範囲では見られなかった非線形の効果が顕在化してくる（非線形音響学²³⁾）。例えば、進行波が物体表面に遮られたとき定常的な力が生じる音響放射圧、定在波の音圧の節に物体が捕捉される音響浮揚、超音波にかけた変調成分が空中に放射される自己復調、などがある。これらを記述する式は音圧の二乗を含んでおり、すなわち音響エネルギー密度に依存する効果であることを示している。

超音波による空中触覚提示は、これらの非線形効果のひとつ、音響放射圧^{24) 25)}を利用するものである。超音波の進行波が物体表面に対して垂直に入射する場合、平面波を仮定すると音響放射圧 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 (図 2) 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。また、透過あるいは吸収がある素材表面では α は小さくなる。極端な場合を考えると、反射も透過も起こらない (すべて吸収される) とき $\alpha=1$ 、反射も吸収も起こらない (すべて透過する) とき $\alpha=0$ となる。

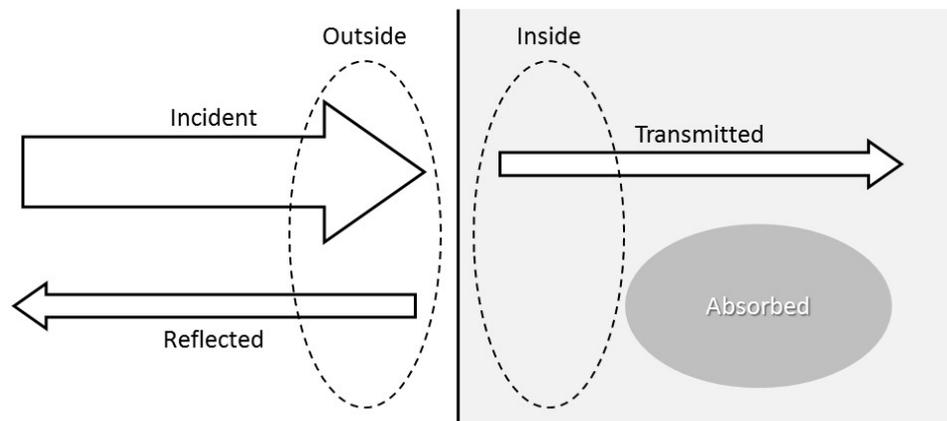


図 2 物体表面における入射、反射、透過、吸収。放射圧は表面の内側と外側における音響エネルギー密度の差に比例する。

ここで音響放射圧の大きさを試算してみる。市販の超音波振動子の仕様書^{2,6)}を見ると、30 cm の距離で 120.9 dB SPL と記載されている。基準音圧 20 μ Pa RMS (RMS、Root Mean Square、実効値) であることから、音圧に換算すると $p=22.2$ Pa RMS である。常温における空気の密度 $\rho=1.2$ kg/m³、音速 $c=340$ m/s とすると、この音圧による音響放射圧は $P=0.007$ Pa である。1 cm 四方の範囲内にこの圧力がかかるとき、その空間積分としての力は 7×10^{-7} N (7×10^{-5} g 重)。触覚としては到底感じられない、ごく微小な力である。しかしここで P が p の二乗に比例することを思い出すと、もしも p を 100 倍にすることができれば、 P は 10,000 倍の 7×10^{-3} N (0.7 g 重) になることが予測される。この程度の力であれば触覚として感じられる可能性がある。

では、どうやって p を 100 倍にするか。ひとつの方法としては駆動電圧を大きくすることが考えられるが、上述の 120.9 dB SPL は定格電圧 10 V RMS で駆動したときの値であり、これ以上大きくすることは超音波振動子の破損につながる。他の選択肢として、複数の超音波振動子が発する超音波を重ね合わせる方法が考えられる。単純計算で、振動子を 100 個用いれば音圧も 100 倍になると期待される。超音波の重ね合わせ方としては超音波振動子の球面配列によって中心に焦

点を作る方法もあるが、平面配列にして位相制御によって焦点を結ぶほうが、製作が容易であり焦点の移動という自由度も得られる。次節では、その方法を説明する。

2.1.2 フェーズドアレイ（電子フォーカス）

平面状の超音波振動子アレイを考える。振動子間の位相差（時間差）を適宜ずらすことによって単一の焦点を結ぶ。例えばアレイ正面中央に焦点を結ぶ場合、周辺部の振動子が先に超音波を発生し、その内側、そして中央の振動子が順に超音波を発生していく。すると、それらが同時に辿り着いた位置で最もよく強め合って焦点が形成され、それ以外の位置では強め合いが不十分だったり打ち消し合ったりする。これは、虫眼鏡（レンズ）で太陽光を集めるのと同じことを電子的に実現したとすることができる。また電子制御であることの利点として、位相差を適宜変えることによって焦点位置を動かすことができる。このように超音波を集束させる方法は、エコー診断やがん治療などの医療目的でも用いられる。また可聴音への適用も報告されている²⁷⁾。

焦点周辺の音圧分布と焦点径を導出する^{17) 28)}。ある振動子の位相 θ [rad]は、振動子から焦点までの距離 l [m]にもとづいて次のように算出される。

$$\theta = kl \quad (2)$$

ここで k [rad/m]は超音波の波数である。振動子アレイが x 軸方向に N 個、 y 軸方向に M 個並んでいるとき（図3）、各振動子から球面波が放射されていると仮定すると、位相制御の結果として焦点面における超音波分布 $p(x_0, y_0)$ は次のように計算される。

$$p(x_0, y_0) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \frac{p_0}{r} e^{j(kr - \omega t)} e^{-j\theta_{n,m}} \quad (3)$$

ここで r [m]は (n, m) 番目の振動子から点 (x_0, y_0) までの距離、 p_0/r [Pa]は距離 r における音圧の実効値、 j は虚数単位、 ω [rad/s]は超音波の角周波数、 t [s]は時間である。焦点までの距離 l と焦点面上の点 (x_0, y_0) までの距離 r の内容を以下に併記する。

$$l = \sqrt{(x_n - x_f)^2 + (y_m - y_f)^2 + z_f^2} \quad (4)$$

$$r = \sqrt{(x_n - x_0)^2 + (y_m - y_0)^2 + z_f^2} \quad (5)$$

ここで焦点座標 (x_f, y_f, z_f) である。また $(x_n, y_m) = (nd + \zeta_x, md + \zeta_y)$ と表される。ここで ζ_x [m]、 ζ_y [m]は座標値の補正值（原点でゼロを取るようにするため）、 d [m]は振動子の間隔である。近軸近似とフレネル近似を施すことにより、 $p(x_0, y_0)$ は次のように式変形される。

$$p(x_0, y_0) = \frac{P_0}{z_f} NM \frac{\text{sinc}\left(\frac{Nd v_x}{2}, \frac{Mdv_y}{2}\right)}{\text{sinc}\left(\frac{dv_x}{2}, \frac{dv_y}{2}\right)} e^{j\{\phi(x_0, y_0) - \omega t\}} \quad (6)$$

焦点の中心において NM 倍（使用した振動子の個数分）の音圧が得られることが示された。ここで (v_x, v_y) は座標 (x_0, y_0) に平行移動とスケール変換を施したものである。また $\phi(x_0, y_0)$ は位置によって位相が異なることを表すが、振幅のみ考える場合は考慮しなくてよい。

$$v_x \equiv \frac{k}{z_f} (x_0 - x_f) \quad (7)$$

$$v_y \equiv \frac{k}{z_f} (y_0 - y_f) \quad (8)$$

$$\phi(x_0, y_0) \equiv \frac{k}{2z_f} (x_0^2 + y_0^2 - x_f^2 - y_f^2) - \left\{ \xi v_x + \frac{(N-1)dv_x}{2} \right\} - \left\{ \xi v_y + \frac{(M-1)dv_y}{2} \right\} \quad (9)$$

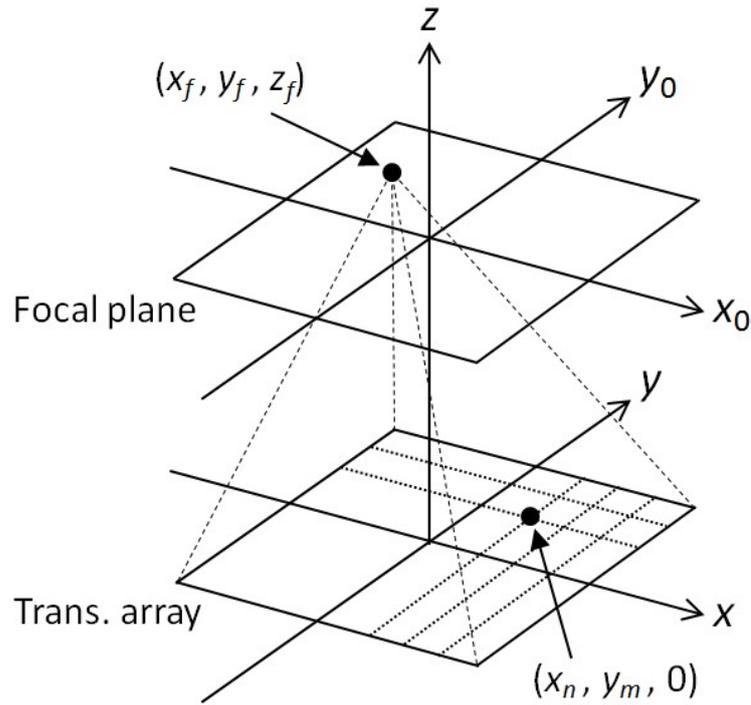


図3 座標系。各振動子 $(x_n, y_m, 0)$ から焦点 (x_f, y_f, z_f) までの経路を考える。

$p(x_0, y_0)$ の式変形結果において、分子の sinc 関数が空間分布を支配的に決定する。この sinc 関数のメインローブの直径（焦点径） w_x [m]、 w_y [m] は次式で与えられる。なお λ [m] は超音波の波長である。また Nd 、 Md はそれぞれ x 軸方向、 y 軸方向の振動子アレイの大きさを与える。

$$w_x = \frac{2\lambda z_f}{Nd} \quad (10)$$

$$w_y = \frac{2\lambda z_f}{Md} \quad (11)$$

すなわち焦点径は、波長と焦点距離に比例し、振動子アレイの大きさに反比例する。例えば 40 kHz 超音波の波長 $\lambda=8.5$ mm、焦点距離 $z_f=200$ mm、振動子アレイの大きさ $Nd=170$ mm のとき、焦点径 $w_x=20$ mm となる。

実際に製作した超音波装置 ($N=M=17$ 、 $d=10$ mm) において、ほぼ試算通りの超音波分布 (図 4) となることが確認されている²⁸⁾。ただし中心音圧は 2585 Pa RMS であった。これはひとつの振動子の 116 倍でしかなく、期待される $NM=285$ 倍よりも大幅に小さい。これは、実際の超音波振動子は等方性の球面波を発するのではなく、指向性 (半減半角 50°) をもつため、周辺部の振動子からの中心部への寄与が小さいことの影響である。焦点がものを押す力を実測したところ 16 mN であった。これは一円玉 1.5 枚の重さ程度であり、皮膚に照射してもすぐに順応して感じられなくなってしまう。継続的に触覚を提示するためには、AM 変調により振動感覚として提示するか、焦点を移動させて常に新たな部位を刺激するかする必要がある。

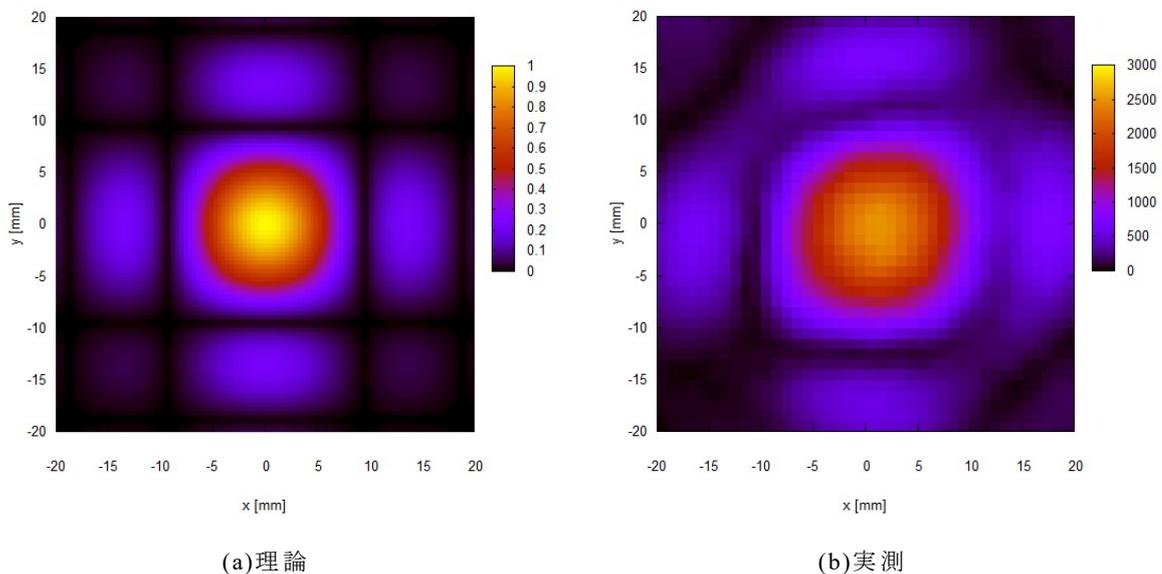


図 4 焦点周辺の音圧分布。二次元 sinc 関数が見られる。

2.2 空中入力システムの実装例

2.2.1 赤外ステレオカメラとの組み合わせ

2009 年に、空中に投影された映像に触った感触が得られるシステムを構築した (図 5)。構成要素は空中映像、空中操作、空中触覚である。以下、それぞれについて説明する。

空中映像は HoloVision^{2 9)} (Holo17T、Provision 社) により提示した。これは液晶ディスプレイの映像を、凹面鏡の反射を利用して空中に投影する装置である。装置から 300 mm 離れた位置に平面の映像が浮いているように見える。あたかも目の前に浮いているように見えるため手を差し出して触ってみたいくなるが、そのままでは手に何も感じられない。

空中操作は赤外ステレオカメラを構成することにより実現した。赤外カメラとして Wii リモコン^{3 0)} (任天堂) を採用した。これはゲーム用コントローラであるが、先端に赤外カメラを搭載しており、画像中の輝点の座標値を取得し、無線 (Bluetooth) で送信する機能を持つため、位置検出用の赤外カメラとしても使い勝手が良い。赤外カメラの周辺部に赤外 LED 照明を設置し、指先に装着した再帰性反射マーカを照らす。赤外カメラ 2 台でこれを観察し、三角測量によりマーカの三次元位置を算出する。

空中触覚は当時の試作機 ($N=M=18$ 、 $d=10$ mm) により提示した。上から落ちてくるものの触感を手のひらに感じさせるため、超音波放射面を下向きに設置した。触覚刺激は 200 Hz の振動刺激とした。

これらの構成要素の組み合わせにより、上から落ちてくる水滴の感触や、歩き回る小さな動物の動きを手のひらに提示した。このシステムは ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies^{3 1)}、IEEE RO-MAN 2009^{3 2)} にて実演展示された。

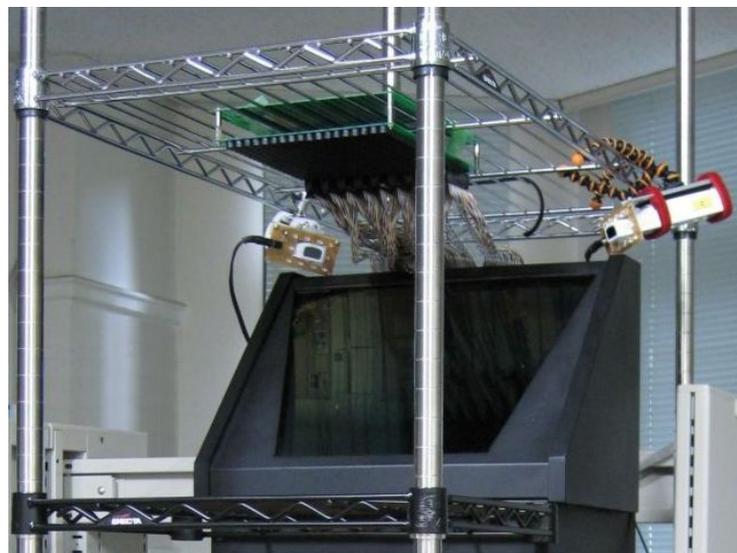


図 5 触れる空中映像システム。

2.2.2 深度カメラとの組み合わせ

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 6)。構成要素は空中操作と空中触覚である。以下、それぞれに

ついて説明する。

空中操作は Kinect¹⁾ (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、また初めての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。上述の赤外ステレオカメラの場合と異なり、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。

空中触覚は PC 画面の両側に設置した 2 枚の振動子アレイ ($N=10$ 、 $M=20$ 、 $d=10$ mm) 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 $z_f=300$ mm において焦点径 $w_x=51$ mm、 $w_y=26$ mm と横に細長い楕円形になった。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 2011^{3,3)} にて実演展示された。

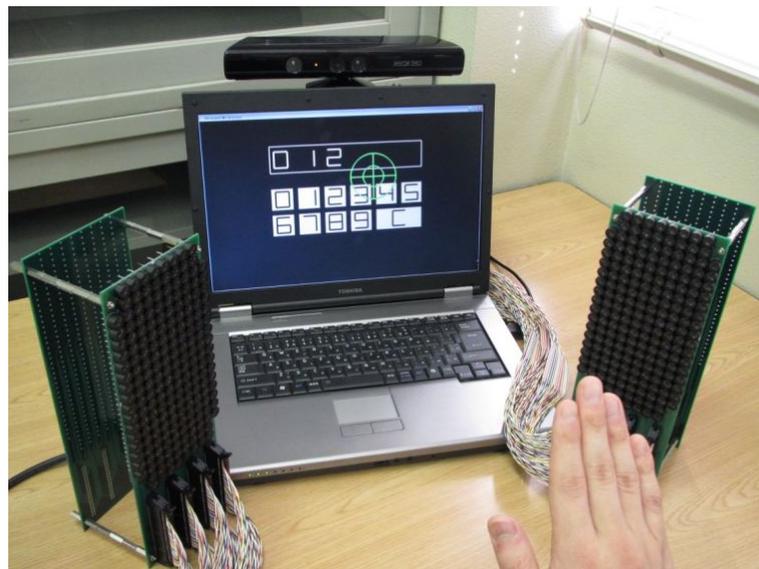


図 6 触覚を伴う空中入力システム。

3. 最近の動向

3.1 空中操作

2010 年の Kinect 以降、低価格な深度カメラがいくつか発売された。赤外 Structured Light あるいは赤外 Time of Flight によるものである。また手の形状取得に特化した Leap Motion (Leap Motion 社) もある^{3,4)}。これは赤外ステレオカメラである。これらはどれも赤外線を含む照明 (太陽光

や発熱電球)に弱く、使用時には注意が必要である。

深度カメラ単体ではなく、内蔵 PC も販売され始めている。Intel RealSense 搭載のデスクトップ (富士通、FMV ESPRIMO WH77/S) が 2014 年 11 月に、ラップトップ (NEC、LaVie Hybrid Advance HA850AAS) が 2015 年 2 月に発売された。これによってタッチパネル PC にジェスチャ入力のほか、顔認証や 3D モデリングなどの機能が付与される。

自動車へも搭載されつつある。手を近づけるとランチャーが表示され、左右に振ると画面が切り替わるカーナビ (パイオニア、楽ナビ AVIC-MRZ009) が 2012 年 10 月に発売された。BMW からは、音量調節や電話操作などのジェスチャ入力を搭載した自動車 (7 シリーズ) が 2015 年 10 月に発売された。また、超音波空中触覚と組み合わせたジェスチャ入力を搭載するというプレスリリースが、ジャガー・ランドローバーから 2015 年 6 月に出されている³⁶⁾。

3.2 空中触覚

上述のジャガー・ランドローバーのプレスリリースにも見られるように、超音波による空中触覚が期待を集めている。とはいえ、この技術の研究開発を推進しているグループはまだ多くはない。ひとつは筆者の出身研究室、篠田・牧野研究室 (東京大学) である。超音波空中触覚システムの大型化と作り込みを進めており、視触覚プロジェクタ³⁷⁾、全周囲触覚システム Horn³⁸⁾、空中タッチパネル³⁹⁾、視触覚クローン⁴⁰⁾、などを次々と発表している。もうひとつは、英国 Bristol 大学の研究グループと、そこでの成果をもとに起業した Ultrahaptics 社⁴¹⁾ である。単一焦点ではなく多点同時に形成することによる形状提示をはじめ、グラフィクスと連動させた開発を進めている。

今年 2016 年 5 月の ACM CHI 2016 において、空中触覚に関するワークショップ⁴²⁾ が初めて開かれた。上述のグループ関係者や空中映像などの研究者が集まり、それぞれの活動や今後の展望についての議論が行われた。研究分野としての成立および発展が期待される。

おわりに

本節では「触覚を伴う空中入力システム」と題して、その構成要素である空中操作と空中触覚について述べた。これらの意義と実現手法について最初に整理した。そして筆者が研究している超音波による非接触触覚提示の原理 (音響放射圧、フェーズドアレイ) を説明し、2009 年と 2011 年の実装例を紹介した。最後に空中操作および空中触覚の最近 5 年程度の動向についてまとめた。

参考文献

1) Kinect, <http://www.xbox.com/kinect/>

- 2) Kinect v2, <http://www.xbox.com/xbox-one/accessories/kinect-for-xbox-one/>
- 3) S. Gupta, D. Morris, S. Patel, and D. Tan, SoundWave: Using the Doppler Effect to Sense Gestures, Proc. ACM CHI 2012, pp. 1911-1914 (2012)
- 4) Project Soli, <https://atap.google.com/soli/>
- 5) CyberTouch, <http://www.est-kl.com/products/data-gloves/cyberglove-systems/cybertouch.html>
- 6) K. Minamizawa, S. Kamuro, S. Fukamachi, N. Kawakami, and S. Tachi, GhostGlove: Haptic Existence of the Virtual World, Proc. ACM SIGGRAPH 2008, New Tech Demos, article no. 18 (2008)
- 7) S.-C. Kim, C.-H. Kim, T.-H. Yang, G.-H. Yang, S.-C. Kang, and D.-S. Kwon, SaLT: Small and Lightweight Tactile Display Using Ultrasonic Actuators, Proc. IEEE RO-MAN 2008, pp. 430-435 (2008)
- 8) UnlimitedHand, <http://unlimitedhand.com/>
- 9) 平田亮吉, 星野洋, 前田太郎, 舘暲, 人工現実感システムにおける物体形状を提示する力触覚ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, vol. 1, no. 1, pp. 23-32 (1996)
- 1 0) K. Sato, K. Minamizawa, N. Kawakami, and S. Tachi, Haptic Telexistence, Proc. ACM SIGGRAPH 2007, Emerging Technologies, article no. 10 (2007)
- 1 1) M. Weiss, C. Wacharamanotham, S. Voelker, and J. Borchers, FingerFlux: Near-Surface Haptic Feedback on Tabletops, Proc. ACM UIST 2011, pp. 615-620 (2011)
- 1 2) Q. Zhang, H. Dong, and A.E. Saddik, Magnetic Field Control for Haptic Display: System Design and Simulation, IEEE Access, vol. 4, pp. 299-311 (2016)
- 1 3) 澤田枝里香, 淡路達人, 森下圭介, 古川正紘, 有賀友恒, 木村秀俊, 藤井智子, 武市隆太, 清水紀芳, 井田信也, 新居英明, 常盤拓司, 杉本麻樹, 稲見昌彦, ビュー・ビュー・View: 風を情報媒体とするインタフェース, WISS 2007 論文集 (2007)
- 1 4) Y. Suzuki and M. Kobayashi: Air Jet Driven Force Feedback in Virtual Reality, IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 25, pp. 44-47 (2005)
- 1 5) R. Sodhi, I. Poupyrev, M. Glisson, and A. Israr, AIREAL: Interactive Tactile Experiences in Free Air, ACM Trans. Graphics, vol. 32, article no. 134 (2013)
- 1 6) S. Gupta, D. Morris, S.N. Patel, and D. Tan, AirWave: Non-Contact Haptic Feedback Using Air Vortex Rings, Proc. ACM UbiComp 2013, pp. 419-428 (2013)
- 1 7) 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)
- 1 8) K. Hasegawa and H. Shinoda, Aerial Display of Vibrotactile Sensation with High

Spatial-Temporal Resolution using Large-Aperture Airborne Ultrasound Phased Array, Proc. IEEE World Haptics Conference 2013, pp. 31-36 (2013)

- 1 9) T. Carter, S.A. Seah, B. Long, B. Drinkwater, S. Subramanian, UltraHaptics: Multi-Point Mid-Air Haptic Feedback for Touch Surfaces, Proc. ACM UIST 2013, pp. 505-514 (2013)
- 2 0) H. Lee, J.S. Kim, S. Choi, J.H. Jun, J.R. Park, A.H. Kim, H.B. Oh, H.S. Kim, and S.C. Chung, Mid-air Tactile Stimulation Using Laser-Induced Thermoelastic Effects: The First Study for Indirect Radiation. Proc. IEEE World Haptics Conference 2015, pp. 374-380 (2015)
- 2 1) Y. Ochiai, K. Kumagai, T. Hoshi, J. Rekimoto, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki, Fairy Lights in Femtoseconds: Aerial and Volumetric Graphics Rendered by Focused Femtosecond Laser Combined with Computational Holographic Fields, ACM Trans. Graphics, vol. 35, article no. 17 (2016)
- 2 2) T. Iwamoto, M. Tatzono, T. Hoshi, and H. Shinoda, Airborne Ultrasound Tactile Display, Proc. ACM SIGGRAPH 2008, New Tech Demos, article no. 1 (2008)
- 2 3) 鎌倉友男, 非線形音響学の基礎, 愛智出版 (1996)
- 2 4) J. Awatani, Studies on Acoustic Radiation Pressure. I. (General Considerations), J. Acoustical Society of America, vol. 27, pp. 278-281 (1955)
- 2 5) T. Hasegawa, T. Kido, T. Iizuka, and C. Matsuoka, A General Theory of Rayleigh and Langevin Radiation Pressures, Acoustical Science and Technology, vol. 21, no. 3, pp. 145-152 (2000)
- 2 6) T4010B4, [http://www.nicera.co.jp/pro/ut/pdf/T4010B4\(ENG\).pdf](http://www.nicera.co.jp/pro/ut/pdf/T4010B4(ENG).pdf)
- 2 7) K. Shinagawa, Y. Amemiya, H. Takemura, S. Kagami, and H. Mizoguchi, Three Dimensional Simulation and Measurement of Sound Pressure Distribution Generated by 120 ch Plane Loudspeaker Array, Proc. IEEE SMC 2007, pp. 278-283 (2007)
- 2 8) 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, pp. 543-552 (2014)
- 2 9) HoloVision HL17T, http://provision.tv/3d_display_types_item/r/id=3
- 3 0) Wii リモコン, <https://www.nintendo.co.jp/wii/controllers/wiiRemote.html>
- 3 1) T. Hoshi, M. Takahashi, K. Nakatsuma, and H. Shinoda, Touchable Holography, Proc. ACM SIGGRAPH 2009, Emerging Technologies, article no. 23 (2009)
- 3 2) T. Hoshi, D. Abe, and H. Shinoda, Adding Tactile Reaction to Hologram, Proc. IEEE RO-MAN 2009, pp. 7-11 (2009)
- 3 3) T. Hoshi, Development of Aerial-Input and Aerial-Tactile-Feedback System, Proc. IEEE World Haptics 2011, pp. 569-573 (2011)

- 3 4) Leap Motion, <https://www.leapmotion.com/>
- 3 5) BMW 7 シリーズ,
<http://www.bmw.co.jp/ja/all-models/7-series/sedan/2015/innovative-functionality.html>
- 3 6) 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、プレスリリース,
<https://pr.jlrj.jp/attachments/1746/attachment1s/download>
- 3 7) K. Yoshino, K. Hasegawa, and H. Shinoda, Measuring Visio-Tactile threshold for Visio-Tactile Projector, Proc. SICE Annual Conference 2012, pp.1996-2000 (2012)
- 3 8) S. Inoue, K.J. Kobayashi-Kirschvink, Y. Monnai, K. Hasegawa, Y. Makino, and H. Shinoda, HORN: The Haptic-Optic Reconstruction, Proc. SIGGRAPH 2014, Emerging Technologies, article no. 11 (2014)
- 3 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 (2014)
- 4 0) Y. Makino, Y. Furuyama, S. Inoue, and H. Shinoda, HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback, Proc. ACM CHI 2016, pp. 1980-1990 (2016)
- 4 1) Ultrahaptics, <http://ultrahaptics.com/>
- 4 2) CHI 2016 Workshop on Mid-Air Haptics and Displays: Systems for Un-instrumented Mid-Air Interactions, <http://interact-lab.com/mid-air/>

(URL resources last accessed on 20 June 2016.)