

触覚ディスプレイと拡張現実感 Haptic Display and Augmented Reality

梶本裕之 電気通信大学総合情報学専攻

Hiroyuki Kajimoto, Department of Informatics, the University of Electro-Communications

1. はじめに

我々は感覚器という狭い窓によってのみこの世界を把握することができる。生物の進化とは一つにはこの窓の改良の歩みであり、例えばヒトに知覚可能な光の波長が太陽光エネルギー最大の領域と一致しているという事実は、進化による最適化の奥深さを感じさせる。しかし、いかに我々の感覚が最適化されていようと、むしろそのために、実世界には知覚不可能な物理現象の領域が多く存在する。これを知覚可能とすることは最も直接的なヒトの能力拡張であるといえる。

Augmented Reality (以後 AR) とは、こうした知覚能力の拡張技術の一種であり、現実感を損なわないままに、すなわち自分自身の能力として実現する点に特徴がある。本稿はこうした AR の、特に触覚に関する近年の研究の概説である。

近年急速に話題となることが増えた視覚 AR に対し、触覚 AR(Haptic AR)は一般にはまだ耳慣れないかもしれない。しかしそもそも 1965 年に開発された Hardiman [1]に端を発する外骨格型パワーアシスト装置自体、実世界の重さという触覚を変換する AR 装置であったといえる。また 1982 年に開発された TELESAR [2]などに代表される Telexistence 技術は、ロボットというインタフェースを介して遠隔地を眼前にある風景と等価にする技術であるから、それ自体が AR であるともいえるし、触覚 AR と見なせる技術要素が数多く含まれている。さらに触覚研究の分野では AR という用語はすでに多用されており、いくつかの総説も書かれている[3][4]。

本稿で扱う範囲は、特にユーザが自身の触覚的能力を拡張されたと感じられるものに限る。触覚 AR の定義があいまいであった時期には、視覚 AR に触覚手がかりを付与したものや、実世界で触覚呈示をするものを触覚 AR と呼ぶ場合もあったが、本稿では範囲外とする。

本稿は実現される「機能」に着目して触覚 AR を分類して紹介する。第 2 章では触覚 AR の代表例として取り上げられることの多い、力覚による物性変化について述べる。力覚による AR は操作性向上を狙ったものも多いため、そうした操作性の AR について第 3 章で述べる。第 4 章では皮膚感覚に着目し、表面の材質感を変化させる試みについて述べる。第 5 章ではこれまでのものと技術的共通点は多いものの変換元の情報が触覚以外であるものを、可触化の

AR として紹介する。

2. 物性の AR

本章では力覚によって接触対象の物性を主観的に変化させる試みについて述べる。ここで言う物性とは、粘弾性や質量など、対象の振る舞いを決める特性を指す。

最も代表的な物性の AR として、力覚呈示装置を用いて対象の粘弾性を変化させるものが挙げられる[8][9]。システムは力覚呈示装置と把持ツール先端に取り付けた力センサから構成される(図 1)。ユーザがツールによって対象に接触すると、力センサによって反力が計測される。このとき反力に応じた適切な変位と速度を呈示すれば、対象とは異なる粘弾性を呈示することができる。同様の枠組みで摩擦感と重量感についても呈示できる[10]

こうした物性の AR の利点の一つは、作業に合わせて最適なインピーダンスを設定できる点である。例えば柔らかいスポンジの表面に文字を書くことは通常困難であるが、硬いブロックのように振舞わせることで容易となる。

図 1 力覚呈示装置を用いた実物体の粘弾性感変化[9]

同様に力覚呈示装置を用いた指先への触覚 AR も提案されている[11]。触診トレーニングへの応用を想定したもので、平面状のシリコンゴムと指を吊り上げる力覚呈示装置によって構成される。シリコンゴムを触っている間に指を吊り上げることで、ゴムの固さを主観的に変化させ、「しこり」を表現することができる。

力覚呈示装置を指先に装着する別の試みでは、平面への手指の接触と掌内側からの力覚呈示の組み合わせによってボタンやスライダを押している感覚を再現する提案がある[26]。各指への力呈示を力覚呈示装置だけで実現するには大掛かりな機構が必要となるが、外力の大半を現実の反発力によって生じさせ、力覚呈示装置は補助的な力覚を返すという設計方針を採用している。

皮膚感覚の変化によって把持物体の重量感を変化させる試みも行われている[12][13]。ベルトで指を締め付けることによって実際に重量物を把持する際と同等の皮膚変形を生じさせる(図 2)。軽い実物体(例えば図ではアクリル製の箱)を把持することで現実の力覚が生じ、皮膚変形による

擬似的な重量感を重畳する。例えば箱の中のボールの動きや液体の流動を呈示することができる。

図 2 皮膚感覚呈示による重量感呈示[12]

3. 操作性の AR

前章で述べた物性の AR の利点の一つは、行う作業に対して対象のインピーダンスを最適化することであった。この延長線上で、操作性向上という目的に限定した AR を考えることができる。技術的には物性の AR と違うところはないが、実現する触覚的表現は現実の物性を表していなくても良い。

操作性の AR の代表的な例は、空間に「定規」を作り出すものである。例えば糸による牽引で微小領域の描画作業をサポートするものや、脳外科手術において事前に取得した CT 画像によって器具の進入不可領域を設定するものが提案されている[14][15]。

最近の例では、彫刻刀を力覚ディスプレイに取り付けた木彫システムが提案されている[16]。事前に用意したモデルデータによって彫刻刀の進入不可領域を設定することによるハンドクラフト支援が試みられている。これはまさに、夏目漱石が作品「夢十夜」で述べた「埋まっている仏像を掘り出す仏師」の喩えを具現化したものといえるかもしれない[17]。

操作性の AR は対象が動的に変化する状況にも適用できる。例えば心臓外科手術において心拍を止めることなく施術するため、器具先端を心拍と同期して動かすことで相対的に静止させる試みがある[18]。

4. 材質の AR

これまでに紹介した触覚 AR は主に力覚呈示装置を用いたものであった。触覚のもう一つの要素である皮膚感覚に着目すると、対象の表面材質や細かな凸凹を変化させる AR 技術を考えることができる。

皮膚感覚 AR の一例として、タッチパネル表面を振動させる試みが挙げられる[19][20][21]。タッチパネル表面に触れた際にパネル全体を振動させることによって、クリック感に近い感覚を出すことができる。この機能は現在多くのタッチパネルインタフェースに採用されている。

振動するタッチパネルはパネル自体が情報呈示装置であり、さらに振動付与の目的が材質感などの再現ではないため、AR の一種とみなされることは少ない。しかし生じている現象に着目すると、タッチパネルという実物体の触感を振動によって変化させるということであるから AR 的状況であることは間違いない。

このような平面に対する触感の付与は現在、クリック感

にとどまらず数多く提案されている。例えば平面と指先の間に生じる摩擦力を制御することにより、より精緻な表面材質感を呈示することができる[22][23][24][25]。さらに材質感の重要な要素である温度感覚についても、接触から数秒以内の温度変化を再現することによって正確な材質の表現が可能であることが示されている[27]。

平面の材質感を変化させる別の試みとして、床面を振動させて足に感覚呈示するものが提案されている[28]。床面パネルにスピーカ型アクチュエータとフィルム状力センサが取り付けられている。ユーザが床面を踏んだ瞬間にアクチュエータが振動することで、例えば霜柱や薄氷を踏んだ感触がリアルに再現できる。

材質の AR ととらえられる別の試みとして、ペンを用いたものが数多く提案されている[29][30][31][32]。ペンにアクチュエータが搭載されており、描画の瞬間に振動することにより書き味が変化する。例えば滑らかな紙をザラザラした紙やすりのように変化させることができる。

同様の単純なツールを介した材質感の AR としては、ペンによる「なぞり」ではなくスティックによる「叩き」に着目した提案もなされている[33] (図 3)。ヒトはスティックによってモノを叩いた時、ごく短時間の振動によって対象の材質を知覚できることが知られている[34]。この提案では、叩いた瞬間にスティックに内蔵された振動子で振動を生成することで、例えば木琴か鉄琴かを識別させることができる。

図 3 叩いた瞬間の振動重畳による材質感呈示[33]

以上の材質の AR は、元々材質感の無い接触対象に材質感を付与するものであった。これに対して、対象に接触した際の実際の振動を検出・増幅することで、対象の材質感をより明りように感じるといった試みがいくつか存在する。

MicroTactus はスティック先端でピックアップした振動を増幅して本体を振動させる[35]。Dayon は同様の触覚増強機能を用いたコミュニケーション玩具である[36]。これらは共に強調された振動によって現実よりも明りような材質感を呈示することができる。一方で単純に記録した振動を再生すると触覚可能な周波数領域を超えてしまうため、数十分の一の再生速度にすることで触覚のスローモーション再生を実現した例も挙げられる[37]。

以上の試みは全て振動によって材質感を付与するものであったが、対象の微細な凹凸を機械的に増幅する試みも幾つか存在する。

乳がんの自己検診に用いられる Touch Enhancing Pad は薄いビニル製の袋に微量の潤滑油と空気が封入されている[38] (図 4)。腫瘍が存在すると思われる体部位上の皮膚に

シートを乗せて触診を行うと、潤滑油の働きにより皮膚表面の摩擦が無くなり、結果として深部のしこり感が強調される。AR システムと見るには単純に過ぎると思えるかもしれないが、人工的に触覚を増強していること、それを物理現象によって行っていることは特筆に値する。

図 4 摩擦の低減による腫瘍の探索[38]より再構成

同様に物理現象を用いて対象の凹凸感を増幅する試みとして触覚コンタクトレンズ(Touch Lens)が挙げられる[39]。触覚コンタクトレンズは柔軟性のあるプラスチックで作成された微細な剣山構造をもつシートである。これを介して対象を撫でると、剣山底面が対象に沿って変形し、その変形が剣山の微小なテコ機能によって増幅されて皮膚に伝えられる。例えば 5mm 程度のゴムシートの下においた紙片を明りょうに知覚することができる。

図 5 微小な変位拡大機構による凹凸感の増幅[39]

5. 可触化の AR

これまでに紹介した触覚 AR の多くは、対象の触覚的性質(固さ、材質)を知覚容易な領域に「移動させる」試みといえる。これに対して本来触覚としてはとらえられない実世界情報を触覚に変換する試みも数多く存在する。本章ではこれを可触化(Haptization)の AR として紹介する。

福祉分野における感覚代行技術は最も重要な可触化の AR である。例えば視覚障害者に対して、カメラでとらえた画像情報を触覚的パターンとして呈示する試みが数多く提案されている[40][41][42]。呈示部位は指先、背や腹、額などが用いられる(図 6)。また聴覚障害者に対して、マイクでとらえた音声情報を触覚的パターンで呈示することも行われている[44][45][46]。呈示部位は腕や指先が用いられる。

図 6 額への画像情報の触覚呈示[42]

福祉機器以外で実世界情報をリアルタイムに可触化した例として SmartTool が挙げられる[47]。SmartTool はツール末端のセンサおよびツールに接続された力覚呈示装置から構成されている(図 7)。センサを取り替えることによってあらゆる情報を可触化することができる。例えばセンサとして色センサ、ツールとしてメスを用いることで、ゆで卵の黄身を傷つけること無く白身を切ることができる。また例えば水と油の界面という本来触りえない情報を、ツール

末端の導電センサによって触覚的な壁に変換できる。

図 7 センサ情報の可触化[47]

同様のセンサ情報の可触化としては、指先への振動を呈示する SmartFinger [48]や指腹表面にパターンを呈示する SmartTouch [49]が提案されている(図 8)。これらの試みでも光センサを用いている場合が多いため、福祉分野における感覚代行技術と技術的な共通点が多い。ただし「実世界情報そのものを触っている」という主観的状况を作るために、センサと触覚呈示部の位置を極力近接させる工夫がなされている。

なお可触化というキーワードからは Tangible-Bit に関する数多くの研究が思い起こされる[50]。ただし Tangible-Bit は情報とヒトの関わりに関する概念であるため、Reality を Augment するという今回の枠組みでは議論しなかった。

図 8 皮膚表面での光-触覚変換[49]

6. おわりに

本稿では現在盛んに研究が行われている触覚 AR に関して分類を試みた。触覚 AR が実現する「機能」に着目すると、「物性の AR」、「操作性の AR」、「材質の AR」、「可触化の AR」があるように思われた。ただし例えば操作性と可触化には大きな重なりが存在し、物性と材質に関しても、力覚と皮膚感覚は通常同時に生じるものであるから明確な切り分けはむづかしい。より明確な別の軸による分類が必要かもしれない。

触覚 AR の別の分類方法の一つは、「目的」による分類であろう。第一の目的は、物性や材質感、異種感覚を知覚する事、すなわち「知覚能力の Augmentation」であり、第二の目的は操作性の AR でみられる「技能の Augmentation」である。この二つの目的を持つこと自体、触覚 AR の重要な特徴であると考えられる。触覚 AR は実際に対象に接するために、対象自体に変形などの作用を及ぼさざるを得ない。このため、対象を知覚することと、操作することの二つが同時に目的となる。

一方でこれまでに概観した触覚 AR には第三の目的が散見された。それは現在の非力な触覚ディスプレイの呈示能力を「補完」するために、現実の物理現象を利用するというものである。例えば基本的な物性の呈示は現実の物理現象に任せ、触覚呈示装置には感覚の微細な修飾に専念させる手法が提案されてきた。こうした例では AR を、目的ではなく技術的手段としてとらえている。これも触覚 AR の一つの特徴であるといえる。

触覚呈示自体が広い分野であるが、その応用先は実は何

らかの形で AR 的な状況がほとんどであり、AR でない状況（コンピュータシミュレーションで閉じている状況）の方が少ないともいえる。よってこれまでに述べてきた分類はあまり意味がないかもしれないのだが、AR を研究分野の一部の名称としてではなく研究分野全体を見る角度の一つと考えれば、こうした分類も何らかの気づき、新しい視点の提供につながるかもしれない。

参考文献

- [1] Research and development prototype for machine augmentation of human strength and endurance – HARDIMAN I project. Specialty Materials Handling Products Operation, General Electric (1971)
- [2] Tachi, S., Arai, H., Maeda, T.: Development of an anthropomorphic tele-existence slave robot. In: Proceedings of the International Conference on Advanced Mechatronics, pp.385-390 (1989)
- [3] Bayart, B., Kheddar, A.: Haptic augmented reality taxonomy: Haptic enhancing and enhanced haptics. In Proceedings of EuroHaptics, pp. 641–644 (2006)
- [4] Jeon, S., Choi, S.: Haptic augmented reality: taxonomy and an example of stiffness modulation, Presence, vol. 18, pp. 387-408 (2009)
- [5] 「タッチ」岩村, 医学書院 (2001)
- [6] 「新編感覚・知覚心理学ハンドブック」大山, 今井, 和気, 誠信書房 (1994)
- [7] Principles of Neural Science, Kandel E. R., Schwartz J. H., Jessel T. M., McGraw-Hill (2000)
- [8] Jeon, S., Choi, S.: Modulating real object stiffness for haptic augmented reality. In: Proceedings of EuroHaptics 2008. LNCS, vol. 5024, pp. 609-618. Springer, Heidelberg (2008)
- [9] Kurita, Y., Ikeda, A., Tamaki, T., Nagata, K., Ogasawara, T.: Haptic augmented reality interface using the real force response of an object. In: Proceedings of 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, pp. 83-86 (2009)
- [10] Jeon, S., Metzger, J. C., Choi, S., Harders, M.: Extensions to haptic augmented reality: Modulating friction and weight. In: Proceedings of World Haptics Conference (WHC) 2011, pp. 227-232 (2011)
- [11] Solanki, M., Raja, V.: Haptic based augmented reality simulator for training clinical breast examination. In: Proceedings of Biomedical Engineering and Sciences (IECBES) 2010, pp. 265-269 (2010)
- [12] Minamizawa, K., Kajimoto, H., Kawakami, N., Tachi, S.: A wearable haptic display to present the gravity sensation - preliminary observations and device design. In: Proceedings of EuroHaptics 2007, pp. 133–138 (2007)
- [13] Scheggi, S., Salviettiand, G., Prattichizzo D.: Shape and weight rendering for haptic augmented reality. In Proceedings of 19th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp. 44-49 (2010)
- [14] Furukawa, M., Ohta, M., Miyajima, S., Sugimoto, M., Hasegawa, S., Inami, M.: Support system for micro operation using a haptic display device. In Proceedings of 17th International Conference on Artificial Reality and Telexistence, pp.310-311 (2007)
- [15] 野嶋, 稲見, 苗村, 川俣, 伊関, 館: 力覚のオーグメンテッドリアリティを用いた手術支援システムの研究, 日本 VR 医学会論文誌, vol. 1, pp.78-82 (2002)
- [16] Zoran, A., Paradiso, J.: FreeD (2012)
<https://www.youtube.com/watch?v=TxHiTjapTqg>
- [17] 「夢十夜」夏目漱石 (1908)
- [18] Yuen, S.G., Dubec, K. A., Howe, R. D.: Haptic noise cancellation: restoring force perception in robotically-assisted beating heart surgery. In: proceedings of Haptics Symposium 2010, pp. 387-392 (2010)
- [19] Fukumoto, M., Sugimura T.: Active click; tactile feedback for touch panels. In: Extended abstracts on Human factors in computing systems (CHI), pp.121-122 (2001)
- [20] Poupyrev, I., Maruyama, S.: Tactile interfaces for small touch screens. In: Proceedings of Symposium on User Interface Software and Technology (UIST), pp.217-220, (2003)
- [21] Lylykangas, J. Surakka, V., Salminen,K., Raisamo,J., Laitinen, P., Rönning, K., Raisamo, R.: Designing tactile feedback for piezo buttons: In: Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems (CHI), pp. 3281-3284 (2011)
- [22] Nara, T., Takasaki, M., Maeda, T., Higuchi, T., Ando, S., Tachi, S.: Surface acoustic wave tactile display. IEEE Computer Graphics and Applications Magazine, vol.21, pp. 56-63 (2001)
- [23] Takasaki, M., Kotani, H., Mizuno, T., Nara, T.: Transparent surface acoustic wave tactile display. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.3354-3359 (2005)
- [24] Winfield, L., Glassmire, J., Colgate, J. E., Peshkin, M.: TPAD: tactile pattern display through variable friction reduction. In: Proceedings of World Haptics Conference (WHC) 2007, pp. 421-426 (2007)

- [25] Bau, B. O., Poupyrev, I., Israr A., Harrison., C.: TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces. In: Proceedings of Symposium on User Interface Software and Technology (UIST) 2010.
- [26] Borst, C. W., Volz, R. A.: Evaluation of a haptic mixed reality system for interactions with a virtual control panel. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, vol. 14, pp. 677–696 (2005)
- [27] Yamamoto A., Yamamoto H., Cros B., Hashimoto H., Higuchi T., “Thermal Tactile Presentation Based on Prediction of Contact Temperature,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 18, No. 3, pp. 226-234 (2006)
- [28] Visell, Y., Law, A., Cooperstock, J.R.: Touch is everywhere: floor surfaces as ambient haptic interfaces. IEEE Transactions on Haptics, vol.2, pp. 148-159 (2009)
- [29] Poupyrev, I., Maruyama, S.: Drawing with feeling: designing tactile display for pen. In: Proceedings of SIGGRAPH2002, Technical Sketch. Page 173 (2002)
- [30] Lee, J. C., Dietz, P. H., Leigh, D., Yerazunis, W. S., Hudson, S. E.: Haptic pen: a tactile feedback stylus for touch screens. In: Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST), pp. 291-294 (2004)
- [31] Kyung, K. U., Lee, J. Y.: Ubi-pen: a haptic interface with texture and vibrotactile display. IEEE Computer Graphics and Applications, vol 29, pp. 24–32 (2009)
- [32] Wintergerst, G., Jagodzinski, R., Hemmert, F., Müller, A., Joost, G. 2010. Reflective haptics: enhancing stylus-based interactions on touch screens. In: Proceedings of EuroHaptics 2010, pp. 360-366 (2010)
- [33] Hachisu, T., Sato, M., Fukushima, S., Kajimoto, H.: HaCHIStick: simulating haptic sensation on tablet pc for musical instruments application. In: Proceedings of the 24th annual ACM symposium adjunct on User interface software and technology (2011)
- [34] Okamura, A. M., Cutkosky, M. R., Dennerlein, J. T.: Reality-based models for vibration feedback in virtual environments. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol 6, pp. 245–252 (2001)
- [35] Yao, H. Y., Hayward, V., Ellis, R. E.: A tactile magnification instrument for minimally invasive surgery. Lecture Notes on Computer Science (MICCAI), vol. 3217, pp. 89–96 (2004)
- [36] Dayon (2012)
<http://www.otokinoko.com/dayon/index.html>
- [37] Hashimoto, Y., Kajimoto, H.: Slow motion replay of tactile sensation. In: Proceedings of International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT) pp.51-56 (2010)
- [38] Perry, D. A., Wright, H. E.: Touch enhancing pad, In: US Patent 4657021, 4793354 (1985)
- [39] Kikuuwe, R., Sano, A., Mochiyama, H., Takesue, N., Tsunekawa, K., Suzuki, S., Fujimoto, H.: The tactile contact lens. In: Proceedings of the 3rd IEEE Conference on Sensors, pp.535-539 (2004)
- [40] Bliss, J. C., Katcher, M. H., Rogers, C. H., Shepard R. P.: Optical-to-tactile image conversion for the blind. IEEE Transactions on Man-Machine Systems, vol. MMS-11, pp.58-65 (1970)
- [41] Collins, C.C.: Tactile television: mechanical electrical image projection. IEEE Transactions on Man-Machine Systems, vol. MMS-11, pp.65-71 (1970)
- [42] Kajimoto, H., Kanno, Y., Tachi, S.: Forehead electro-tactile display for vision substitution. In: Proceedings of EuroHaptics (2006)
- [43] Tachi, S., Tanie, K., Komiyama, K., Abe, M.: Electrocutaneous communication in a guide dog robot (MELDOG). IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. BME-32, pp. 461-469 (1985)
- [44] Békésy, G.V.: Human skin perception of travelling waves similar to those on the cochlea. Journal of Acoustical Society of America, vol. 27, pp. 830-841 (1955)
- [45] 伊福部, 湊, 吉本: 心理物理実験によるタクタイル・ボコーダーの基礎的研究. 日本音響学会誌, vol. 31, pp. 170-178 (1975)
- [46] Sherrick, C.E.: Basic and applied research on tactile aids for deaf people: Progress and prospects. Journal of Acoustical Society of America, vol. 75, pp. 1325-1342 (1984)
- [47] Nojima, T., Sekiguchi, D., Inami, M., Tachi, S.: The SmartTool: a system for augmented reality of haptics. In: Proceedings of IEEE Virtual Reality, pp. 67-72 (2002)
- [48] Ando, H., Miki, T., Inami, M., Maeda, T.: The nail-mounted tactile display for the behavior modeling. In: ACM SIGGRAPH 2002 Conference Abstracts and Applications, p264 (2002)
- [49] Kajimoto, H., Inami, M., Kawakami, N., Tachi, S.: SmartTouch: electric skin to touch the untouchable. IEEE Computer Graphics and Applications Magazine, vol. 24, pp. 36-43 (2004)
- [50] Ishii, H., Ullmer, B.: Tangible Bits: Towards seamless interfaces between people, bits, and atoms. In: Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI), pp.234-241 (1997)