

## AI が支える 6G 通信と触覚フィードバック技術

味戸 克裕<sup>† a)</sup> 鮫島 朋龍<sup>††</sup>

### AI-Supprted 6G Communication and Haptic Feedback Technology

Katsuhiro AJITO<sup>† a)</sup>, and Houryu SAMEJIMA<sup>††</sup>

**あらまし** 第 6 世代移動通信システムである 6G は毎秒 100G ビット以上の通信速度と超低遅延を実現し、AI 技術を活用することでネットワークの効率性を向上させる。これにより、4K や 8K の映像データや VR、AR コンテンツのリアルタイム配信が可能となり、遠隔医療や無人車両の安全性も向上できる。また、6G は製造業、農業、物流などの産業分野においても効率的かつ持続可能な生産体制を実現し、新しい技術の導入と標準化が進行中である。そして、触覚通信も 6G の進展により実現し、遠隔手術や教育分野での応用が期待される。また、最新のゲームコントローラーに触覚フィードバック技術が導入され、よりリアルな体験を提供できる。

**キーワード** 6G 通信、触覚通信、人工知能、ゲーム、触覚フィードバック

**Abstract** 6G, the sixth-generation mobile communication system, will achieve communication speeds of over 100Gbps and ultra-low latency, and will improve network efficiency through the use of AI technology. This will enable real-time delivery of 4K and 8K video data, VR, and AR content, and improve the safety of telemedicine and unmanned vehicles. 6G will also enable efficient and sustainable production systems in manufacturing, agriculture, logistics, and other industrial sectors, where new technologies are being introduced and standardized. Furthermore tactile communication will also be realized with the advancement of 6G, and is expected to be applied in the fields of tele-surgery and education. In addition, haptic feedback technology will be introduced into the latest game controllers to provide a more realistic experience.

**Keywords** 6G communication, Tactile Communication, Artificial Intelligence, Games, Haptic Feedback

### 1. まえがき

第 6 世代移動通信システム (6th Generation Mobile Communication System : 6G) は、2030 年頃の商用化を目指し、5G を超える性能と新たなユースケースを提供することを目的としている [1-3].

<sup>†</sup> 大阪国際工科専門職大学工科学部情報工学科, 大阪市  
Department of Information Technology, Faculty of Technology,  
International Professional University of Technology in Osaka, 3-3-1  
Umeda, Kita-ku, Osaka 530-0001 Japan

<sup>††</sup> 大阪国際工科専門職大学工科学部デジタルエンタテインメント学科, 大阪市

Department of Digital Entertainment, Faculty of Technology,  
International Professional University of Technology in Osaka, 3-3-1  
Umeda, Kita-ku, Osaka 530-0001 Japan

a) E-mail: ajito.katsuhiro@iput.ac.jp

6G 通信は、超高帯域幅、低遅延、高信頼性、柔軟な接続性を特徴としており、これにより、さまざまな産業で新しい価値を創出することが期待されている。本論文では 6G 通信の基本的な要素(通信技術、AI や IoT との関係など)について解説する。触覚通信は、物理空間と仮想空間を融合させる 6G の重要な応用領域の一つとして注目されており、6G における触覚通信の意義、技術的課題、および潜在的な応用についても説明する。また、ゲームなどエンターテインメントにおける触覚フィードバック技術についても解説する。

### 2. 6G の技術的進展と特徴

#### 2.1 通信速度と帯域幅の向上

6G は、毎秒 100G ビット以上のデータ伝送速

度や0.1ミリ秒未満の遅延を実現することが目指されている。これにより、4Kや8Kの映像データ、さらには仮想現実（VR）、拡張現実（AR）、複合現実（MR）の超高品質コンテンツがリアルタイムで配信されることが可能となる[4]。また、遅延が非常に小さなため、遠隔医療、インダストリアルオートメーション、無人車両などの安全性が飛躍的に向上する。さらに、機械学習などAI技術は、ネットワーク管理や最適化、セキュリティ、予測保守などに活用され、6Gの実現において中心的な役割を果たす[5]。AI技術を活用することで、通信インフラの効率性が大幅に向上する。加えて、マルチアクセスエッジコンピューティング（MEC）とネットワークスライシング技術は、6Gの柔軟なネットワークアーキテクチャの基盤となる。これにより、ユーザーの需要に応じたカスタマイズ可能な通信環境を提供することが可能となる[6]。

## 2.2 6G と産業分野

6G通信は、製造業、農業、物流、エネルギー管理など、さまざまな産業に革命的な変化をもたらす。特に、産業用IoTや自動化技術が進展することで、効率的で持続可能な生産体制が実現可能となる[7]。6Gが普及することで、個人のプライバシーやセキュリティに関する問題が新たに浮上する可能性がある。また、デジタルデバイドを解消し、全世界で均等に通信インフラを提供するための取り組みが求められる[6]。さらに、6G通信は、量子通信、テラヘルツ帯通信、衛星通信などの新しい技術を駆使することが必要となる可能性があり、無線通信の新しいアーキテクチャの開発が求められている[8–10]。商用化については、国際電気通信連合無線通信部門（ITU-R）などで国際的な規制と標準化の議論が進んでいる[11, 12]。

## 3. 6G と触覚技術

### 3.1 触覚通信と6G

触覚通信とは、人間の触覚を遠隔地に伝送し、受信者にリアルタイムで触覚情報を提供する技術である。この技術は、通信速度、遅延、信頼性といっ



図1 6Gが実現する触覚通信とゲームコントローラーの概念図  
ChatGPT-4（OPEN AI 社）により作図。

Figure 1 Conceptual diagram of haptic communication and game controller enabled by 6G. The figure was created by ChatGPT (OPEN AI).

た要件が厳しいため、5Gでは十分に対応できなかった領域であり、6Gの技術的進歩により遅延が0.1ミリ秒未満と非常に小さくリアルタイム性が飛躍的に向上し、さらに、機械学習などAI技術による伝送経路の最適化によって初めて実現可能となる[1, 2]。触覚通信が実現することで、遠隔操作や仮想環境での触覚再現が可能となり、新たな体験やソリューションを提供することができる。例えば、医療分野における遠隔手術では、触覚フィードバックにより医師が手術器具の感触をリアルタイムで感じることができるようになる。6Gは、テラヘルツ帯の通信やAIを活用したネットワーク管理などの新技术を導入し、高速通信、低遅延、高信頼性の性能をもち、このような性能は触覚通信にとって必須の条件であることから、6Gの発展とともに触覚通信の可能性も広がっていくと考えられる[3, 4]。

### 3.2 触覚通信における超低遅延と高スループットの両立

触覚通信では、遅延がミリ秒以下でなければ、リアルタイム性が失われてしまう。これを達成

するためには、6Gでのテラヘルツ通信、大規模MIMO (Multi Input Multi Output)、アンテナビームフォーミング技術などの導入が必要である[1, 2, 10]。また、ネットワークの端から端までの遅延を最小化するために、エッジコンピューティングの活用も重要である。触覚データは音声データに比べてデータ量が大きいため、効率的なデータ圧縮技術が求められる。視覚信号のように触覚信号でもエンコーディング方式を改善することで、帯域幅の節約とリアルタイム性の両立が可能となる。また、触覚通信では、解像度にもよるがセンサやデバイスが大量に必要となるため、これらのエネルギー消費を抑える技術が不可欠である。特に、デバイス間の通信におけるエネルギー効率向上は、持続可能な触覚通信の鍵となる。触覚データも個人情報となる可能性があるので、不正アクセスやデータ漏洩を防ぐための高度なセキュリティ対策が必要である。

### 3.3 触覚通信と産業分野

遠隔手術やリハビリテーション支援において、触覚通信は大きな可能性を秘めている。例えば、触覚フィードバックを通じて手術中の微細な操作を遠隔地から正確に行うことが可能となる。また、患者の状態をリアルタイムで触覚的に把握することで、治療の質を向上させることができる[4]。教育においては、触覚フィードバックを活用した実験やトレーニングが可能となる。例えば、化学実験の仮想シミュレーションで触覚を提供することで、実験設備が限られた環境でも高度な教育を提供できるようになる。また、遠隔操作ロボットを利用した危険環境での作業や精密な製造工程のモニタリングにおいて、触覚通信は重要な役割を果たす。また、物流や倉庫管理におけるロボットの操作効率を向上させるためにも応用が期待されている。

### 3.4 ゲームコントローラーにおける触覚フィードバック技術の権利化

触覚フィードバック技術（ハプティクスともいう）は、ゲームコントローラーにおいてユーザー

体験を強化する重要な要素となっている。触覚フィードバック技術は、ユーザーがデバイスとのインタラクション中に感じる振動、力、温度変化などを利用した技術である。ゲームコントローラーにおいては、現在では特に、振動技術が一般的に使用されており、ユーザーに感覚的な反応を与えるために、コントローラー内のモーターや圧力センサが使われている。触覚フィードバック技術をゲーム内のアクションやイベントと連動させることで、没入感を高めることができる。

触覚フィードバック技術とゲームコントローラーの歴史は古く、1970年代の遊興施設向け射撃ゲームなどに始まりを見ることができる。1980年代末にはレーザータグ式光線銃玩具の射撃演出やターゲットの被弾演出に振動機構が導入されており、家庭用ゲーム機向けの光線銃型コントローラーにも激しい振動を伴う射撃ギミックを搭載した物もあった。最近ではVRやARにおいて触覚をフィードバックすることで、映画やゲームの世界に物理的な実感を加えることが可能となる。

任天堂株式会社は、2001年、ゲームコントローラーにおける可変周波数振動を利用した触覚フィードバックシステムに関して、ユーザーがゲーム内で遭遇する異なるシチュエーション、例えば、車が障害物に衝突するシーンやキャラクターが特定のアクションを実行する際などに応じて、振動の周波数と強度を変更する技術の特許を公開した[13]。この技術は、ゲーム内でのアクションにより強化された感覚的なフィードバックを提供できる。2005年、株式会社ソニー・コンピュータエンタテインメント（現 株式会社ソニー・インタラクティブエンタテインメント）は、ゲームコントローラーにおけるハプティクス（触覚フィードバック）システム、具体的には、ユーザーがコントローラーを操作する際に発生する力や振動をリアルタイムでフィードバックする方法の特許を公開した[14]。この方法によって振動や力の強弱をゲームの進行状況に基づいて制御することで、ゲーム内でのインタラクションがよりリアルに感じられるようになる。

また、2018年、マイクロソフト社（Microsoft®）



はゲームコントローラーに搭載されたフォースフィードバックモーターを用いた触覚フィードバック技術に関する特許を公開した [15]. ユーザーがコントローラーを操作した際の振動の強さやパターンを調整するために、モーターをリアルタイムで制御し、さらに、異なるゲームシナリオに応じて触覚フィードバックを動的に変更することにより、ユーザーの没入感を向上させることができる. さらに、2021 年、株式会社ソニー・インタラクティブエンタテインメントは複数のアクチュエータ（振動モーター）を使用して、より精密で多様な触覚フィードバックを実現する技術の特許を公開した [16]. ゲーム内で発生するさまざまな効果、例えば、射撃音、歩行音、風の音などに応じて、振動の強さや方向を変化させることが可能となり、プレイヤーはよりリアルな感覚を得ることができる. この技術は、最新のゲームコントローラーに採用されている.

### 3.5 触覚や聴覚を取り入れたゲームコントローラー

初期のゲームコントローラーでは単純な振動が主流だったが、現在では、触覚フィードバックがゲーム内のシナリオに合わせて非常に精密に調整されている. 例えば、PlayStation<sup>®</sup> 5 の DualSense<sup>™</sup> コントローラーは、複数のアクチュエータを使用して、プレイヤーが異なるシーンやアクションに応じて異なる感覚、振動、抵抗感、トリガーの反応などを感じることができる. フィードバックの一つとして効果音をコントローラーから鳴らす実装を標準で備えたハードとして 2006 年の任天堂 (Nintendo<sup>®</sup>) Wii<sup>®</sup>, 2012 年の任天堂 Wii U<sup>®</sup>, 2020 年の SIE (Sony Interactive Entertainment<sup>®</sup>) の PlayStation<sup>®</sup> 5 がある. 特に任天堂 Wii<sup>®</sup> はコントローラー自体を従来のボタン入力だけでなく、棒状にして振りやすくした上でジャイロと加速度センサを搭載する事で振り回す事自体を入力と出来る触覚を重視したユーザーインターフェースになっている. この思想は 2017 年の任天堂 SWITCH<sup>®</sup> のコントローラーにも引き継がれている.

こういった触覚フィードバック機構と各種センサ、アクチュエータ、バッテリー、さらには無線通信インタフェース等を備えた現在のゲームコントローラーは複雑化し、コントローラー単体が内部のファームウェアアップデートもある小さなコンピューターとなっている. 販売価格もそれにあわせて上昇しており前述の 2006 年発売の Wii<sup>®</sup> 用標準コントローラーは 3800 円 (税込) だったが 2017 年発売の SWITCH<sup>®</sup> に付属するコントローラーは 4114 円 (税込) と単体でも価格が上昇しているが SWITCH<sup>®</sup> のコントローラーは左用と右用の二機一対なので実質 8228 円 (税込) と倍以上の価格になっている.

多機能なコントローラーはバッテリー管理も必要なため単なる入力信号制御を越えた実装をアプリケーション側に求められるが、コントローラー形状の最適化や通信規格の統一が進んだ事に加え Unity<sup>®</sup> や UnrealEngine<sup>®</sup> に代表されるミドルウェアを利用した開発が主流になった影響で動作させるまでの実装コスト自体は下がっている. しかし、触覚フィードバックの有用性が高い VR/MR を利用するゲームタイトルでは積極的に利用される傾向があるが、従来のゲーム特にボタン入力を利用する形式のゲームでは単純な振動機能だけで細かな触覚フィードバックは利用しないタイトルが多い. これは触覚フィードバックが従来のゲームではあまり効果的に作用しない部分もあるが実装コストの問題が切り離せない.

単純な振動ではない触覚フィードバックを利用するには振動波形をコントローラーにアップロードする必要がある. 事前に波形がアップロード出来ない状況だとアクション発生からフィードバックまでのレイテンシーが大きくなるので、メモリの節約も含めて、重要なものだけを個別波形にしてその他は汎用の振動波形の強弱で済ませるような工夫も必要になり触覚デザインという新しい開発コストが生まれる.

VR/MR 機器のコントローラーはそれぞれ独自のコントローラーではあるが本体機器 (HMD) の多くが Android<sup>™</sup> 端末であるため共通部分も多く、大きく仕様が変わらないため共通化された

APIが用意されており触覚フィードバックの実装も流用出来る範囲が大きいですが、ゲーム用のハードウェアはプラットフォームごとのカスタム設計で実行バイナリにもコントローラーにもプラットフォームを越えた互換性はほぼない。サードパーティとしてプラットフォームに参加する場合は昨今の開発コスト増大もあり販売本数を確保するために複数のプラットフォームで同時に展開を行う必要がある。ゲームの内容的に必須ではない上にハードウェアごとに個別の実装コストが発生する触覚フィードバックの利用はどうしても外されやすい傾向にある。しかし触覚フィードバック自体に可能性を感じている開発者は少なくないので実装コストが下がれば活用例は増えると思われる。

#### 4. むすび

6Gによる触覚通信は、物理的な距離を超えた新たな体験や価値を提供する可能性を秘めている。医療、教育、エンターテインメント、産業といったさまざまな分野での応用が期待される一方で、実現に向けては技術的、規制的な課題を解決する必要がある。触覚通信は、6G技術の進展とともに、私たちの生活や社会を根本的に変革する可能性を持つ。また、触覚フィードバック技術は最新のゲームコントローラーに取り入れられ、よりリアルで没入感のある体験を提供している。

#### 文 献

- [1] H. Tataria, S. Michal, F. M. Andreas, D. Mischa, H. Sjöland, and Fredrik Tufvesson, “6G wireless systems: Vision, requirements, challenges, insights, and opportunities.” *Proceedings of the IEEE*, vol.109, no.7, pp.1166–1199, 2021.
- [2] F. Tariq, M. R. A. Khandaker, K.-K. Wong, M. A. Imran, M. Bennis, and M. Debbah, “A speculative study on 6G,” *IEEE Wireless Communications*, vol.27, no.4, pp.118–125, 2020.
- [3] W. Tong and P. Zhu, ed., “6G: The next horizon: From connected people and things to connected intelligence” pp. 490, Cambridge University Press, 2021.
- [4] M. Awais, F. U. Khan, M. Zafar, M. Mudassar, Muhammad Z. Zaheer, K. M. Cheema, M. Kamran, and W.-S. Jung, “Towards enabling haptic communications over 6G: Issues and challenges.” *Electronics*, vol.12, no.13, pp.2955, 2023.
- [5] S. Saju, S. Priyadharsini, and A. Sriram, “Review of 6G communication in haptic technology.” *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, vol.17, no.1, pp.243–252, 2022.
- [6] Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, and P. Fan, “6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol.14, no.3, pp.28–41, 2019.
- [7] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, and M. S. Alouini, “What should 6G be?” *Nature Electronics*, vol.3, no.1, pp.20–29, 2020.
- [8] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, “A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems,” *IEEE network*, vol.34, no.3, pp.134–142, 2020.
- [9] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “Toward 6G networks: Use cases and technologies,” *IEEE Communications Magazine*, vol.58, no.3, pp.55–61, 2020.
- [10] T. Kürner, D. M. Mittleman, and T. Nagatsuma, ed., “THz communications: Paving the way towards wireless Tbps,” p.490, Springer, 2021.
- [11] ITU-R, IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Recommendation ITU-R M.2083-0, 2020.
- [12] ITU-R, Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020. Report ITU-R M.2412-0, 2021.
- [13] Nintendo Co., Ltd., “Controller pack,” Patent US6200253, issued March 13, 2001.
- [14] Sony Computer Entertainment Inc., “Input device and method, and character input method,” Patent WO2005116802, issued December 8, 2005.
- [15] Microsoft Corporation, “Motor-driven adjustable-tension” Patent US20180345135, issued December 6, 2018.
- [16] Sony Interactive Entertainment Inc., “Game controller with vibration actuators,” Patent US20220331838, issued November 11, 2021.



味戸 克裕

1995年東京大学 大学院工学系研究科 応用化学専攻 博士課程修了。博士（工学）。同年 NTT 研究所に入所。総務省テラヘルツ波プロジェクトに参画し、6G次世代ICTの国際標準化に従事。その後、現職にて6Gによる現実空間と仮想空間を融合したサービスを研究。



鮫島 朋龍

2000年、大阪工業大学 情報科学部 情報システム学科 卒業。ゲーム音楽作曲家、プログラマーとして活躍、ゲーム制作のチーフエンジニアも務める。作曲した楽曲への評価が高い。主な作品に、世界中にファンを持つ2D探索アクションゲーム「LA-MULANA®」シリーズがある。



この記事は Creative Commons 4.0 に基づきライセンスされます  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>)

