

### 3-3 自律型モビリティ活躍社会におけるテラヘルツ×時空間同期活用サイバーフィジカルシステム基盤の研究開発

#### 3-3 *R&D on Cyber-Physical-System by utilizing Terahertz × Space & Time Synchronization Technology in Active Autonomous Mobilites Society*

荘司 洋三

SHOJI Yozo

本稿では、Beyond 5G 社会をサイバー空間も活用した自律型モビリティ活躍社会と見なし、これを形成するうえでの重要な要素技術となるテラヘルツ技術及び時空間同期技術の重要性について概説する。次に、これら双方の技術の特性を活かすことで構築可能となるサイバーフィジカルシステム (CPS) 活用サービスの可能性について議論する。最後に、上記議論にも関連するサービス実証としてソーシャル ICT システム研究室が実施した、高精度な時刻同期技術にもとづく複数ドローンを使った同期撮影実験の内容や結果について紹介する。

This paper considers the Beyond 5G society as an active autonomous mobility society that utilises cyberspace, and outlines the importance of terahertz technology and space-time synchronisation technology as the key elemental technologies to form the society. Next, the potential of services utilising cyber-physical systems (CPS), which can be built by utilising the characteristics of both technologies, is discussed. Finally, this paper introduces and discusses some results obtained by a synchronised video-recording experiment, in which two cameras mounted on two drones in flight are precisely time synchronized and recorded the same object.

## 1 はじめに

およそ10年後の2030年代頃とされるBeyond 5G社会とはどのような社会であろうか？色々な側面からの見解があるかと思うが、昨今ニュース等で取りざたされる話題等から自動運転車両・ロボット・ドローンといった人・物を運ぶ移動体が極めて一般的になり、これら移動体は人工知能によって様々な状況を適切に認識し、自律的な判断に基づいて活動を行う社会、すなわち自律型モビリティ活躍社会が到来することは想像に難しくないと思う。

このような自律型モビリティ活躍社会を支える基盤技術としても有効な、Beyond 5G 社会を構成する要素としてデジタルツインないしはサイバー空間がある。膨大なデジタル化されたセンシングデータ等によって現実社会の写像が活用可能な形でデジタル空間として形成されている状態を意味するが、このデジタルツインないしはサイバー空間を活用することで、人の能力では直接見つけたり気づいたりすることが難しい事象を高い確度で推定したり、また未来に発生しそうな事象を高い確度で予測することができる。このような現実社会のセンシングによって形成されたデジタルツイ

ンないしはサイバー空間を活用して、更に我々の少し未来の暮らしがより安心・安全・豊かななるように、現実社会における「何か」を積極的に駆動する(アクチュエートする)循環システムをサイバーフィジカルシステムと呼ぶ。

目下、我々研究者に強く求められている事は、上述した自律型モビリティ活躍社会、そしてサイバーフィジカルシステム活用社会を前提とした地域社会のグランドデザインであろう。ただし、COVID19によるパンデミックに翻弄された日々がまだ記憶に新しく、やはり非常時や事故は必ずと言って良いほど発生することを前提としたロバストかつレジリエントな平時のシステムのグランドデザインが求められることは言うまでも無い。

本稿では、グランドデザインの手がかりとなる新たな気付きがあることを願い、自律型モビリティ活躍社会及びサイバーフィジカルシステム活用社会の到来を見据えたうえでの、自律型モビリティ、テラヘルツ、時空間同期の重要性について考察する。またテラヘルツ技術の利用、時空間同期技術の利用に関わる、筆者が率いるソーシャル ICT システム研究室での実証的研究開発の成果の一部を紹介する。

## 2 Beyond 5G 社会におけるテラヘルツ、 時空間同期の重要性

前節で述べた自律型モビリティ活躍社会とサイバーフィジカルシステム活用社会の到来によって我々の暮らしはどのように変わるであろうか。NICT ホワイトペーパー [1] においても関連する様々な議論が紹介されているので参照いただきたいが、自律型モビリティという点にフォーカスして議論するとすれば、現在のように細かく自らの移動計画の立案に時間を削がれたり、予定や約束に遅れやしないかと気を使ったりする機会が激減すると思われる。これは我々の物理的な肉体そのものの移動についても、所有物などモノの移動についても同様であろう。また、住居空間やオフィス空間は動かないという常識が常識でなくなることもあり得る。その場合には、我々自身の肉体に加え、我々の暮らす環境や作業空間そのものが知らず知らずのうちに次の目的地に向けて都合良く移動してくれているようなサービスの出現もあるかもしれない。

関連する話題として、今のところ大きく我々の暮らしに変革をもたらすほどのサービス領域まで成長していないように感じられるが、MaaS (Mobility as a service) と呼ばれる、複数の公共交通機関や移動サービスを最適に組み合わせて検索・予約・決済等を一括で行うサービス概念が提唱され、関連する実証実験や議論が2020年前後には盛んであった。このようなサービスは2030年代に向けて人のマニュアル運転に頼らない、サイバー空間による緻密な移動計画の立案自動化技術が発展すると同時に、移動そのものも完全自律的な移動制御に頼る時代が到来すれば、より当たり前のサービス思想となるであろう。

また、自律型モビリティ活躍社会を支える資源もサイバーフィジカルシステム活用社会を支える資源も有限であることは自明である。一方で、人・モノの移動サービスに対するニーズの多様化が更に進むこともまた自明であるので、例えば移動の重要性や緊急性を考慮した細やかなサービスの分類化と差別化が進み、最短での到着時間を保証する一方で高コストな移動サービスがあれば、到着時間についてはベストエフォート型ではあるが低コストの移動サービスといったサービスの多様化が現在以上に進むことが容易に想像できる。

上述したような2030年代の自律型モビリティ活躍社会とサイバーフィジカルシステム活用社会の到来を想定して、筆者は自律型モビリティを単なる人・モノを運ぶ手段としてなく、環境をセンシングし、さらにはそれによって生じたセンシングデータを運ぶネットワーク基盤 (Piggyback Network 基盤) を概念として描いてきた。

従来モビリティとデータの関係といえは、まずはモビリティ自身ないしはモビリティによって移動する人・モノ等がデータを消費する形態であった。乗車している人が楽しむためのコンテンツ配信のためであったり、ナビゲーションシステムを支援する情報配信のためであったり、ETCに見られるように車がスムーズな移動を達成するための決済手段のためであったり、といった応用である。

このようなデータの消費欲求や消費ニーズを満たすためには、モビリティは何らかの手段で通信ネットワークを介してインターネットや他のデバイス、データサーバー等とつながっている必要がある。コネクティッドカーという言葉が一般的に利用されているが、基本的にはネットワークに常時つながっていることを意味する概念として捉えられており、後述の議論とも関連するが、「コネクティッド=ネットワークと常につながっていないと価値がない」という暗黙かつ共通認識があるようだ。

一方で、近年はモビリティがデータを生成し発信する形態も価値を創出するサービスになるとして議論されている。特にモビリティ自身のメンテナンスに有益な、自らの内部状態等を示すセンシングデータをサイバー空間に収容し、部品等の故障の予兆を早期に自動検出するといった応用である。対象はモビリティだけに限らないがCBM (Condition Based Maintenance) と呼ばれる、機械や設備の状態を“リアルタイム”監視し、その状態に応じてメンテナンスを行うことで、故障を未然に防ぐサービスの有用性が議論されている。

ところで、筆者は、この“リアルタイム (=低遅延)”であればあるほど良いという、際限なきユーザの欲望に応える形で低遅延と即時性を満たす通信サービスの提供を追い求めるネットワーク構築方針、すなわち超大容量ネットワークならば低遅延でなくてはならないという概念に長年ある種のアンチテーゼを唱えてきた。緊急事態を報せる通報や、センシング情報に基づいて移動体や機器の停止・加速等の制御を行うといった応用、人と人やモノとモノが会話したり協調活動するために互いの状態を共有しあうような協調制御のためのネットワークであれば、言うまでもなく数十ミリ秒であったり、場合によっては数ミリ秒を下回るような遅延性能で情報が伝達されるべきである。

他方で、例えば上述したCBMのようなメンテナンスサービスでは、鉄道・列車・道路・車両の状態や、橋梁・トンネル・建築物等の状態をセンシングした結果の伝達については、現状人手によって現場を撮影等して取得したデータを事務所等に持ち帰り、分析・検証してメンテナンス方針をきめたうえで、どのような対策を行うべきかのリアクションを行っている状況があ

る。多くの場合、発見された問題に対して即時対応できないのが現実であることから、センシングデータのサイバー空間収容部分についてだけリアルタイム性を満足する通信インフラ設備に多大な投資をすることは得策ではないと思われる。

ただし、データの転送遅延のみでなく、センシング時刻の精確性や信頼性に関わる議論は重要であり、特にそのセンシングが「いつ」のセンシング結果なのかについての性能要件を定め、議論することは重要と思われる。また、転送遅延については、低遅延であればあるほど良いばかりではなく、正確にいつそのデータが届くかを保証する、いわばジャストインタイム到着性能における達成可能精度を議論することも重要と思われる。

ネットワークの大容量性能に関わる要件の議論としては、サイバー空間ないしはデジタルツインを構成すべきセンシングデータ量について増大の一途をたどる傾向からの考察が重要であろう。分かりやすい例として、カメラセンサーによって撮像した動画像をもって状況を判断するケースを考える。低解像度の画像よりも高解像度の画像であればあるほど、より微細な撮像対象の状態や変化を識別できることは言うまでもない。ただし、解像度を2倍にするとセンシングデータ量は4倍になる。更には時間的な状況変化をより高分解能に確認するための撮影フレームレートについても議論が必要である。我々がスマートフォンなどで動画を撮影する場合の一般的なフレームレートは60 fps程度である。この場合、約16ミリ秒毎に静止画として状況を捉えデータ化していることになる。仮に時速100 km (秒速約28 m) で移動する移動体の位置変化を確認するセンサーとして60 fpsのフレームレートを用いた場合、空間的には約46 cm分解能で位置を確認していることになる。したがって、例えばその移動体と他の何らかの物体との衝突の瞬間を捉えるうえでは、検証・特定し得ない空白の46 cmないしは分解能の限界が生じるわけである。このような空白ないしは分解能の問題を改善するためには、フレームレートをあげるしかなく、それと比例してネットワークに求められるデータ転送容量も増大する。

さらにより極端な想定としては、いつか・どこかで発生するかもしれない爆発事象の常時モニタリングや監視サービスなども考えられる。爆発事象は一般的に数千 m/s の爆速で変化が生じる事象であるから、このような変化を数十 cm レベルで捉えるための時間分化能としては、数万 fps 程度のフレームレートを必要とする。すなわち必要なセンサーデータ量は数十 fps の動画撮像の場合と比較して数千倍になり、自ずとネットワーク環境に求められるデータ転送容量も数千倍の

能力を求められる。

このような動くものを捉えたセンシングデータ、若しくは自らが動いている最中に捉えたセンシングデータは極めて膨大な量となるため、そのデータが有用かどうか判断つかない状況であった場合に、現状のネットワーク利用コストを鑑みると一時的には保持していても廃棄するしかない。分かりやすい事例として、日本全国における車両のドライブレコーダー搭載率は既に50%を上回り、数千万台規模となるが、これら車両がドライブレコーダーによって撮像したデータのほぼ100%に近いデータは基本消費されずに廃棄されている。このようなモビリティの活動によって大量に生成され、一時保持される大容量センシングデータを、社会課題の解決などを目的として二次利用することの有効性が提案されたプロジェクトも過去にはあったが、その社会実装は進む気配を見せない。

その本質的な原因は、やはり大容量データをサイバー空間に収容(一般的にはクラウドやサーバーにアップロード)するための通信回線が低速であると同時に、特にアップロードしたデータが価値に変換されることが保証されていない状況下では、現状の大容量データのサイバー空間収容手段の利用コストが高価すぎるのが主要因である。

このような状況を背景に、筆者が率いるソーシャルICTシステム研究室では、ミリ波・テラヘルツを活用した超スポット(通信サービスエリアとしては極めて狭いが、そのエリア内では超高速なデータ転送を可能とするスポット)を活用して、高速移動中の移動体からデータを極めて低コストかつ瞬間的に転送する大容量データ無線回収システムの実証的な研究開発を推進している。なお、単一のセンシングシステムとミリ波・テラヘルツ技術を活用した超スポット基盤だけに頼ることにはどうしても設備投資に無理が出ると同時に、収集可能なデータ範囲が十分にスケールしないこととセンシングデータの信頼性を十分に担保できない可能性が生じることが心配される。そこで多数の移動デバイス群によるセンシングデータをサイバー空間内で合成することで、実質的に極めて高精細かつ高分解な社会事象のセンシングデータとして扱うことを可能とする技術として時空間同期技術に着目している。例えば、複数のカメラセンサー等によって得られたセンシングデータに超高精度な時空間同期スタンプを付与しておくことで、サイバー空間内における高度な後処理によって異なるデバイスが観測した事象であってもより高分解能に同じ時刻かつ同じ場所のセンシングデータを特定して合成できるため、結果的により低コストかつ効率的に信頼性の高い高分解なセンシングデータからなるデジタルツインの構成が可能となる。

### 3 Beyond 5G に向けた概念実証 (Proof of Concept)

以下では、その一部成果を紹介する。

#### 3 移動体による超スポットを活用したすれ違いデータ転送実験

筆者が率いるソーシャル ICT システム研究室では、ソニーセミコンダクターソリューションズ社の協力を得て、国際無線通信規格 IEEE802.15.3e に準拠した、超瞬間的なリンク確立プロトコル技術が搭載された 60 GHz 帯システムチップ (SoC: System on Chip) を活用して、トラック車両と固定局間のすれ違い時における大容量データ転送実験や、飛翔中ドローン間のすれ違い時における大容量データ転送実験を実施した (2023 年 11 月～2024 年 3 月)。

図 1 はドローンに搭載された状態での無線機器及び実証事件の様子である。図 2 には、様々な速度で飛翔中のドローンがすれ違った場合のデータ転送性能に関

わる実証実験結果を示しており、一例としては、5 m/s ですれ違った場合には、わずか 0.5 秒の間に、120 MB のデータ転送に成功していることがわかる。

#### 4 時空間同期した複数移動体による協調センシング実証の事例

筆者が率いるソーシャル ICT システム研究室では、複数ドローンを用いた多視点同期空撮応用において、時間的・空間的なトレーサビリティを確保した同期空撮手法を提案しており予備実証も行っている。比較的動きの速い被写体や変化の激しい被写体を様々な視点から撮影する場合、撮影の同期、タイムスタンプの記録、位置や姿勢などの視点状態の追跡など、多視点間の時間的・空間的な同期が不可欠となる。

2024 年 3 月に行ったフィールド実証実験では、NICT が開発した無線双方向時刻同期技術 (Wi-Wi) と



図 1 ドローン間すれ違い通信実験で使ったドローンの外観

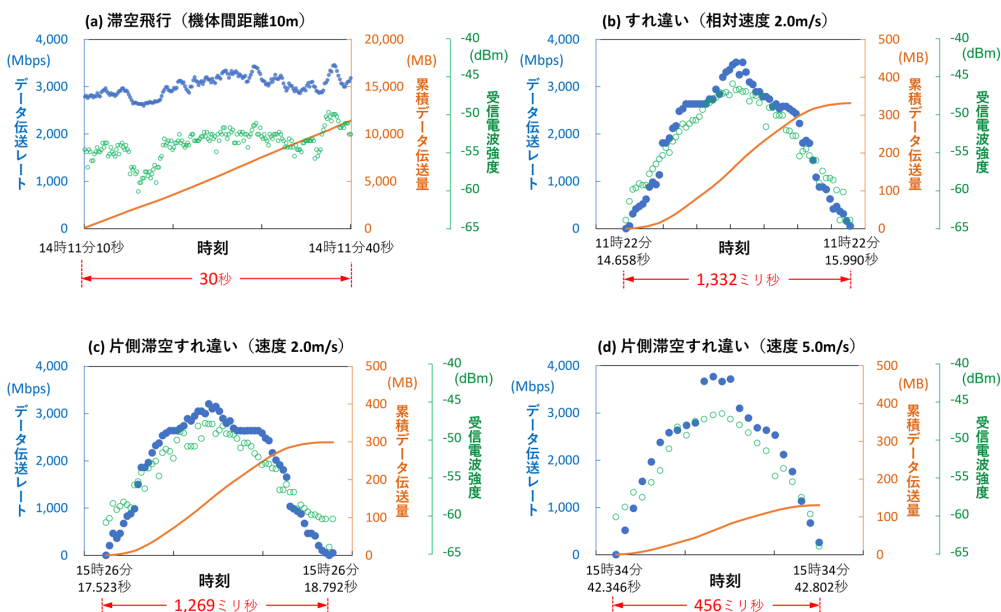


図 2 飛翔中ドローン間すれ違いデータ転送実験の結果例

カメラを搭載した2台のドローンを用意し、飛行中にこの2台のカメラのシャッターを高精度に時刻同期制御すると同時に、撮像した各画像フレームにはタイムスタンプと位置を記録することに成功した。詳細は割愛するが、記録された動画ファイルはドローンを着陸させることなく、連続的に撮像を繰り返しながら、地上に配備された3局のミリ波帯地上無線局の上空を通過する際に全て転送することにも成功している。

本実証実験によって、撮影された動画像におけるす

べての画像フレームに、マイクロ秒級かつセンチメートル級の精度で時空間スタンプを付与することで、各画像フレームがいつどこで撮影されたものを正確に事後検証可能であることが確認された。なお本実証実験で得られた動画データ構成する各画像フレーム間の時間誤差は3.5マイクロ秒以下であったことが事後検証によって判明し、一般的な多視点動画撮像応用としては十分に実用性の高いレベルに達していることが実証できた。

## 5 まとめ

Beyond 5G 社会を自律型モビリティ活躍社会、サイバーフィジカルシステム活用社会として捉え、テラヘルツや時空間同期といった技術の重要性を応用面から考察した。また、これに関連する筆者が率いるソーシャル ICT システム研究室の活動成果として、トラック車両やドローンを用いた実証実験成果を紹介した。

### 【参考文献】

- 1 Beyond 5G / 6G ホワイトペーパー 3.0 版 (2023 年 3 月公開) [https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT\\_B5G6G\\_WhitePaper\\_JP\\_v3\\_0.pdf](https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT_B5G6G_WhitePaper_JP_v3_0.pdf)

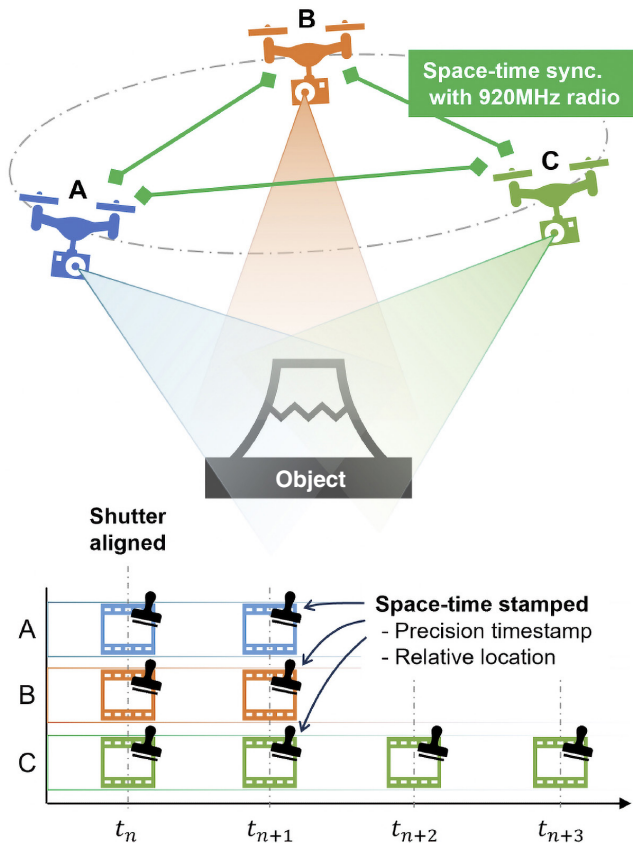


図3 複数ドローンを用いた多視点同期空撮システムのイメージ



荘司 洋三 (しょうじょうぞう)

ソーシャルイノベーションユニット  
総合テストベッド研究開発推進センター  
ソーシャル ICT システム研究室  
室長  
博士(工学)  
ミリ波・テラヘルツ通信システム、光空間通信システム

### 【受賞歴】

- 2008年 平成20年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞
- 2007年 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ賞
- 2000年 電子情報通信学会学術奨励賞

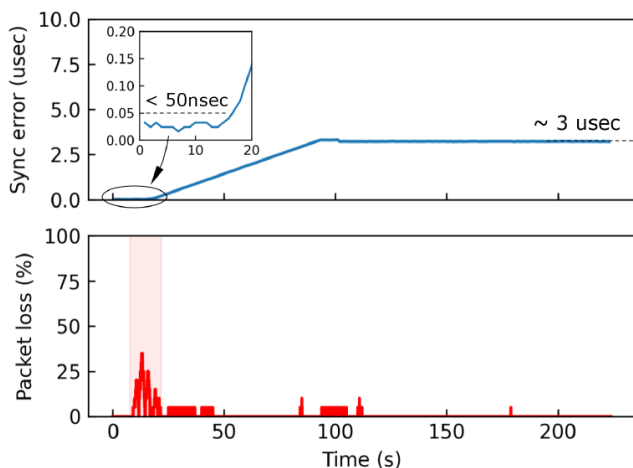


図4 飛行開始からの時空間同期システム Wi-Wi におけるパケット損失状況の変化(下)と撮像フレーム間の時刻同期誤差の変化(上)