



5G-ACIA ホワイトペーパー

産業用IoT(IIoT)における 5Gの技術的能力、機能、将来性

5G Alliance for Connected Industries and Automation

目次

1	概要	3
2	はじめに	4
3	導入モデル: ノンパブリックネットワーク (NPNs)	4
4	周波数アクセス	6
5	5G の性能	8
5.1	概況	8
5.2	容量、信頼性、遅延	9
5.3	モビリティとカバレッジ	9
5.4	5Gシステム時間とのUE同期	10
6	外部連携機能(エクスポートジャーナル機能)	11
7	イーサーネットベースの産業ネットワークへの対応	12
7.1	ロジカルEthernetブリッジとしての5Gシステム	12
7.2	QoS と TSNへの対応	13
7.2.1	サービス品質	13
7.2.2	タイムセンシティブネットワーキング(TSN)への対応	13
7.3	時間同期への対応	14
8	位置情報機能	15
9	セキュリティ	17
10	標準化、適合性、テスト	18
11	結論	19
12	主要用語と定義	19
13	略語一覧	20
14	参考文献	21

1 概要

5Gが産業用IoT(IIoT)にもたらす影響は、現在非常に注目されています。スマートファクトリーやインダストリー4.0において、無線通信は不可欠な要素であり、機械、人、センサー、モバイルロボット、AGV(自動搬送車)、ドローン、作業者などの間でシームレスかつ拡張性のある接続を可能にします。また、固定された機器や回転する装置、限られた可動性の装置からケーブルを排除することで、多くの利点をもたらします。

5Gの大きな貢献のひとつは、極めて信頼性の高い通信の実現です。これにより、無線による時間同期型リアルタイムモーション制御、重要プロセスの監視用センサーシステム、AR/VRアプリケーションなどが実現できます。しかも、これらすべてが単一の無線通信システムで提供されるのです。しかし、これだけが5GがIIoTアプリケーションに適している理由ではありません。5G-ACIAが公開しているユースケースにより、5G技術はリリースを重ねるごとに進化し、これらのアプリケーションへの対応範囲を大きく広げてきました。本ホワイトペーパーでは、無線通信機能に加えて、IIoTアプリケーションに関連する5Gの機能についても説明します。具体的には、Ethernet統合への対応、タイムセンシティブネットワーキング(TSN)、ノンパブリックネットワークにおけるセキュリティなどが含まれます。

さらに、産業分野(バーティカル)が5G技術にアクセスし、導入モデルや周波数アクセスの観点からIIoTの進化を推進する方法についても解説します。

5G-ACIAについて

5G-ACIA(5G Alliance for Connected Industries and Automation)は、産業分野における5Gの技術的、規制的、ビジネス的な側面を扱い、議論し、評価するための主要な国際フォーラムとして設立されました。このアライアンスは、産業用5Gの最適な活用を促進し、5G技術および5Gネットワークの産業分野における有用性を最大限に高めることを目的としています。5G-ACIAは、以下を含む幅広いエコシステムと関係者を対象としています(ただし、これらに限定されません)。

OT(オペレーションナル・テクノロジー)業界:産業オートメーション企業、エンジニアリング企業、生産システムメーカー、エンドユーザーなど。

ICT(情報通信技術)業界:チップメーカー、ネットワークインフラベンダー、モバイルネットワーク事業者など。大学、政府機関、研究施設、業界団体。

また、5Gの標準化や規制に関する活動において、産業界の利害や要件が十分に考慮されるようにし、5Gの新たな技術的進展が製造業者に効果的に伝達され、理解されるようにすることも含まれます。

2 はじめに

通信ソリューションを選定する際には、想定される用途においてどの程度の性能が期待できるかを把握することが重要です。これは、既存の有線または無線システムから5Gのようなまったく新しい方式へ移行する場合、基準や用語が大きく異なるため、困難を伴うことがあります。

本ホワイトペーパーは、産業用IoT(IIoT)のユースケースにおいて無線システムを評価する際に重要となる技術的な評価基準を明らかにし、それぞれの基準の関連性や重要となるユースケースを説明することで、移行を円滑にすることを目的としています。さらに、各評価基準に対して5Gのベンチマークを提示し、標準でサポートされている機能や選択肢を説明するとともに、5Gソリューションにおいて注目すべき機能についての指針も提供しています。主な焦点は、複数の標準化団体が参加する共同事業体である3GPP(第3世代パートナーシッププロジェクト)によって定義されたRelease16の5G機能に置かれており、一部Release 17の機能も紹介されています。

本ホワイトペーパーは以下の技術トピックで構成されています:
第3章:多様なユースケースに対応可能であり、特定の用途に合わせて調整することも可能な5Gの柔軟性について説明します。

第4章:5Gで利用可能な周波数アクセスの選択肢(国・地域単位のライセンス、ローカルライセンス、非ライセンス帯域)と、それぞれがシステム性能に与える影響を説明します。

第5章:5Gが厳格なIIoT性能要件に準拠しつつ、モビリティなど無線システムの利点を提供するための主要機能について記述します。

第6章:5Gシステムがユーザーに対してどのように機能を提供できるかについて説明します。

第7章:QoS(サービス品質)やTSN(タイムセンシティブネットワーキング)への対応、その他の産業用イーサネットプロトコルへの汎用的な対応機能を紹介します。

第8章:5Gの位置情報機能の概要を説明します。

第9章:5Gの無線インターフェースを通じた産業通信を保護するセキュリティ機能について説明します。

第10章:無線システムの構成要素が適切かつ規格に準拠した性能を確保するために、5Gの仕様がどのように定義・テストされるか説明します。

3 導入モデル: ノンパブリックネットワーク (NPNs)

5Gシステムのアーキテクチャは、さまざまなカバレッジ領域やユーザー数に柔軟に対応できるよう設計されています。物理的なネットワークは、複数の論理ネットワークを同時にホストすることができ、それぞれが必要に応じて異なる機能を提供します。これにより、産業用IoT(IIoT)の多様なユースケースに対応するネットワークソリューションが実現されます。たとえば、ほぼグローバルなサービスを提供する通常の携帯データ契約から、工場敷地内のすべての無線通信要件をローカルで満たす専用の5GIIoTネットワークの所有・運用まで、幅広い選択肢があります。

製造業を中心とした多くのIIoTユースケースでは、特定のIIoTユーザーグループ向けにカスタマイズされ、公共(パブリック)ネットワークや他のIIoTユーザーから隔離されたネ

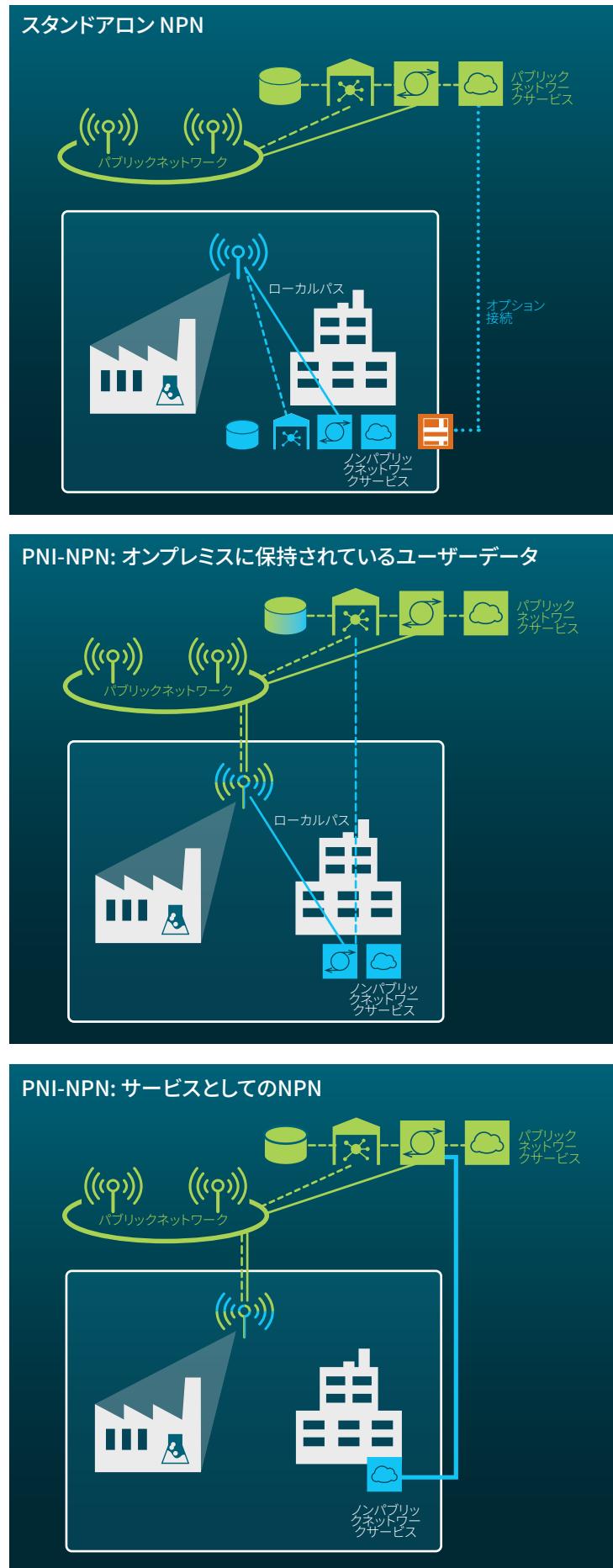
ットワークが求められます。このような5Gネットワークは「ノンパブリックネットワーク(NPN: Non-Public Network)」と呼ばれます。5Gの標準では、主に以下の2種類のNPNがサポートされています:

スタンドアロンNPN(SNPN): IIoT運用専用に構築された、独立した5Gネットワーク。

パブリックネットワーク統合型NPN(PNI-NPN): パブリックネットワーク内に展開されるが、論理的には分離されたネットワーク。

PNI-NPNでは、ネットワークスライシングと呼ばれる5G特有のアーキテクチャを使用して、論理ネットワークを構築す

図1: SNPNおよびPNI-NPNの導入シナリオ例



ることができます。これらのNPNは、さまざまな構成で展開可能です。一般的な構成例は、別の5G-ACIAホワイトペーパー([1]を参照)で紹介されており、図1に要約されています。

スタンドアロンNPN(SNPN)は、IIoT運用専用に構築された完全な5Gネットワークであり、ユーザー自身が所有・運用することも、第三者から完全または部分的にサービスとして提供を受けることも可能です。SNPNは、通常ローカルネットワークを対象としており、その目的に応じて適切に拡張できます。運用や利用を容易にするための高度な自動化機能や自己最適化機能も利用可能です。一方、パブリックネットワーク統合型NPN(PNI-NPN)の場合、少なくとも一部はパブリックネットワークに属しており、責任を持つ通信事業者からサービスとしてライセンス供与されます。こ

れにより、より広いサービス提供エリアへのアクセスが容易になります。PNI-NPNでは、重要なユーザーデータを産業施設の敷地内で完全に所有者の管理下に置く構成も可能です。

これらすべてのシナリオにおいて、5Gエッジコンピューティング機能を組み込むことができます。ネットワークを利用するデバイスの物理的な近接地にエッジクラウドインフラをホストすることで、低遅延の応答を実現し、リソースや帯域幅を効率的に活用できます。分散型エッジコンピューティングの枠組みにより、複数のソースから集約された入力を活用した高度なサービスの構築が可能になります。これにより、個々のデバイスから重い計算処理や調整作業をより中央集約型の場所へ移行させ、応答時間の短縮と帯域幅の拡張の両方を実現できます。

4 周波数

5Gは、利用する周波数(スペクトラム)に関して、様々な認可方式を柔軟にサポートしています。表1には、プライベートな5GベースのIIoT展開に利用可能な各種スペクトラムライセンスモデルが示されており、それぞれの主な特徴と一般的なパラメータが記載されています。

個々の5G展開では複数の種類のスペクトラムを併用することも可能です。ここで「ローバンド」は1GHzまでの展開スペクトラム、「ミッドバンド」は7GHzまで、「ハイバンド」は7GHz以上の周波数帯を指します。

表1: スペクトラムライセンスモデル

必要となる認可

	全国・地方ライセンス	地域ライセンス	免許不要
定義	特定の事業者(例:モバイルネットワーク事業者)に対して、全国または地方単位で周波数帯域のブロックがライセンスされます(つまり、全国または地方でそのブロックを使用できるのは1社のみ)。	特定の地理的エリア内で、異なるライセンサーが個別かつ排他的に周波数帯域のブロックを使用することができます。	適切なチャネルアクセス手順に従う限り、誰でもその周波数帯域を使用できます
ネットワークごとの利用可能な帯域幅(典型的な値、国による規制によって異なる)	<ul style="list-style-type: none"> 周波数分割複信(FDD):複数の2×10~2×20 MHz(ロー~ミッドバンド) 時分割複信(TDD):20~100 MHz以上(ミッドバンド) 200~1000 MHz以上(ハイバンド) 例:24~47 GHzの範囲	TDD: 40~100 MHz以上(ミッドバンド) 200~1000 MHz以上(ハイバンド)	TDD:最大500 MHz(ミッドバンド)、複数GHzまで(ハイバンド) 例:Release 17で定義された52.7~71 GHzの範囲

(*) 一部の規制領域においては、既存の利用者(例:固定衛星サービスの地球局、バックホール用の固定リンク)との共存を確保するために、周波数の使用権を共有ベースで割り当てることが可能です。

各スペクトラムライセンスモデルは、プライベートなIIoT展開における性能・能力や考慮しなければならない事項が異なります。

全国・地方ライセンススペクトラム:このスペクトラムは通常、モバイルネットワーク事業者(MNO)にライセンス供与されており、特定の業界(バーティカル:特定分野で活動する企業、産業、公共機関など)は、PNI-NPNまたはSNPNモデル(直接または第三者経由)を通じて、あるいはパブリック5Gネットワークを介してアクセスすることができます。該当する規制が許可している場合、バーティカルはMNOからスペクトラムを借りることも可能ですが(日本では未認可)。

5G NR (New Radio)においてライセンススペクトラムを使用することで、遅延や信頼性の面で優れた性能が得られます。これは、展開されたシステムがチャネルへのアクセスを保証しており、他のネットワークからの意図しない干渉によって遅延が発生するリスクがないためです。

地域ライセンススペクトラム:規制当局は、特定の地域内で排他的にスペクトラムを使用するためのライセンスを組織に付与します。ドイツで3.7～3.8GHz帯の使用に対して付与されたローカルライセンスがその一例です。日本ではローカル5Gとして4.6-4.9 GHz、及び28.2-29.1 GHzが割り当てられています。スペクトラムは、隣接するライセンス保有者からの有害な干渉を防ぐため規制当局によって管理されます。特定の場所においてスペクトラム資源への排他的アクセスが保証されるため、5G NR (New Radio)は遅延、容量、信頼性の面で最適な性能を発揮すると期待されます。排他的でないスペクトラム共有モデルも存在します。たとえば、米国では3550～3700MHz帯に

おいて「Citizens Broadband Radio Service (CBRS)」と呼ばれる制度があり、これは主に既存ユーザーの保護を目的としています。このような帯域で運用されるIIoTシステムは、通信の中断を受ける可能性があります。

免許不要スペクトラム:5G NR-U (New Radio Unlicensed)という技術を用いることで、免許不要スペクトラムの利用が可能ですが。現在、以下のような複数のGHz帯の免許不要スペクトラムが利用可能です：

5GHz帯 6GHz帯

Release 17で定義された52.7～71GHz帯

ただし、免許不要スペクトラムでは、非常に低いパケット遅延が保証されないという欠点があります。多くの場合、「Listen Before Talk (LBT)」というチャネルアクセス方式が使われるため、環境が完全に制御されていない限り、遅延が発生する可能性があります。

「完全に制御された環境」とは、同一ネットワークのNR-U機器のみが特定の周波数キャリアを使用し、すべての干渉を最小限に抑えることを意味します。港湾施設や大学キャンパスなどの開放的な環境では、これを実現するのは困難です。高い周波数帯におけるチャネルアクセスルールは、現在も評価段階にあります。

5 5Gの性能

5.1 はじめに

本章では、超高信頼・低遅延通信 (URLLC) および産業用通信向けのIIoTサービスを支えるために必要な5Gの無線アクセスネットワーク (RAN) の主な機能と無線性能について説明します。5G RANの標準は継続的に進化しており、産業用通信向けに特化した新機能や強化機能も含まれています。

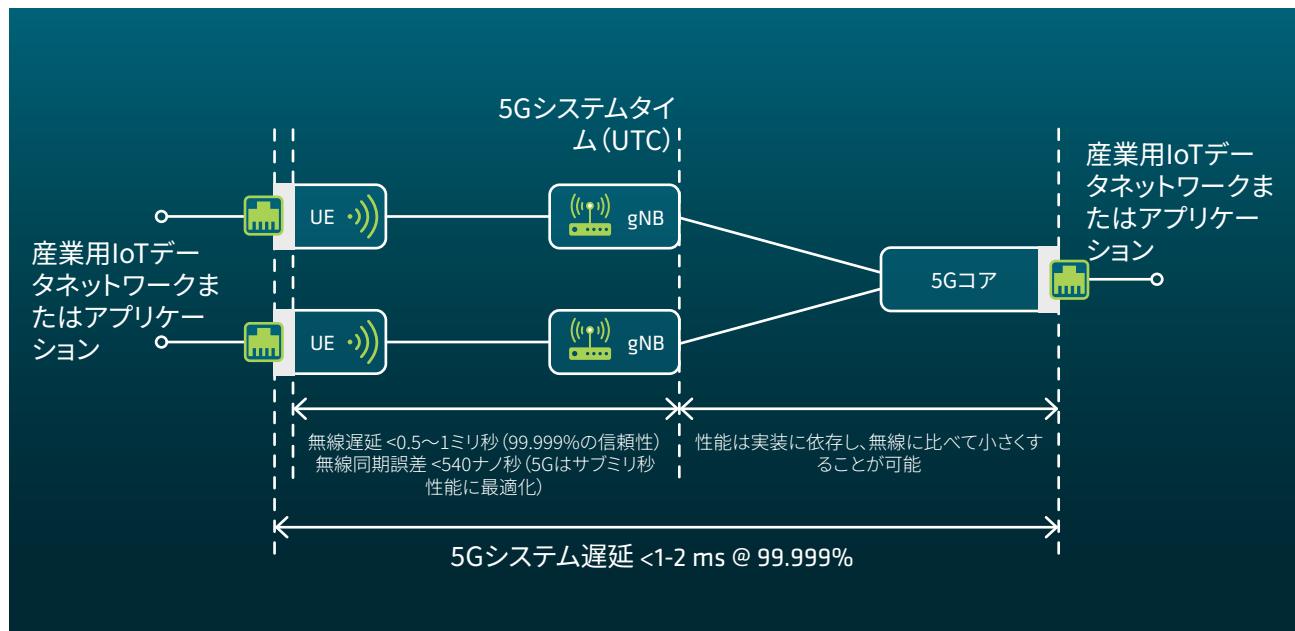
図2では、サブミリ秒レベルのURLLC性能を求めるIIoTユースケース向けに最適化された、5Gの主要な性能指標を示しています。ここで「gNB」は基地局、「UE (User Equipment)」は端末を指します。5Gシステム全体の性能を議論する際には、トランスポートネットワークやコアネット

ワークの処理によって生じる遅延も考慮することが重要です。ユーザープレーンのコアネットワーク機能が工場などのローカル環境に展開されている場合、無線インターフェースに比べて遅延が少なくなります。

URLLCの機能が有効化され、適切に構成されている場合、5Gシステムはエンドツーエンド (E2E) で1~2ミリ秒の遅延と99.999%の信頼性を達成することが可能です。

システムの容量と性能は、使用されるスペクトラムやTDDパターンなどのさまざまなパラメータにも依存します。システム容量と達成可能な性能 (遅延と信頼性) の間には常にトレードオフがありますが、5Gはより緩い要件にも対応可能です。

図2: IIoTユースケースにおいて、サブミリ秒のURLLC性能に最適化された5Gシステムの主要性能指標 (無線側の指標と5Gシステム側の指標の寄与を個別に示す場合)



5.2 容量、信頼性、遅延

5GはURLLC(超高信頼・低遅延通信)サービスをサポートしており、無線接続による新たなIIoTユースケースへの対応において大きな進歩をもたらしています。URLLCは、無線インターフェース上で許容される最大パケット遅延が1ミリ秒未満であり、パケットの信頼性が99.999%以上、特定の展開では99.9999%以上を必要とするサービスフローに対して、無線によるサポートを可能にします。5Gはこの要件を満たす、あるいはそれを上回るレベルでのパケット信頼性を保証します。5GのURLLCは、ITU-R M.2083の要件に対応するためにRelease 15以降で導入された多数の5G機能に基づいています(参考文献 [2] および [3] を参照)。

URLLCは5Gシステムの柱の一つであり、3GPPはこの種の通信サービスを5Gシステム全体で実現するために、無線アクセสนットワーク(RAN)およびコアネットワーク向けの新機能を多数開発しています。これには、高度なマルチアンテナ技術や、ユーザートラフィックをRAN上で動的にスケジューリングするための柔軟なフレームワークが含まれており、極めて低い遅延と高い信頼性を実現します。

信頼性と可用性を最大化するために、5Gはユーザー通信を複数の送受信ポイント(multi-TRP)経由で経路制御します。機械が多数存在する工場環境では、RANおよびコアネットワーク上のパケット複製機能によって空間的な多様性に対応できます。5G-ACIAが定義したIIoTユースケースに基づくシミュレーション評価(参考文献 [4])では、高度なセミスタティックまたは動的な5G RANリソース調整メカニズムが、性能要件を満たしつつリソースを効率的に使用するUE(ユーザー端末)の数において、達成可能な容量を大幅に向上させることができました。特に、自動化された産業環境における決定論的通信に対しては、隣接するRANノード間でリソース使用を調整するセミスタティック方式が性能向上に大きく貢献します。

実証試験では、5Gシステムが現実のシナリオにおいて超低遅延通信を可能にすることが示されています(参考文献 [5])。また、5G-ACIAによるIIoTシナリオにおいて、データパケットサイズ48バイト、URLLC性能目標1ミリ秒という厳しい条件下での5Gの性能もシミュレーションで分析されており(参考文献 [4])、適切に構成された5Gシステムが要件を満たすことが確認されています。さらに調整や最適化された構成によって、空間インターフェース上で0.5ミリ秒の遅延と99.999%のパケット信頼性を達成することも可能です(参考文献 [6])。アップリンク(デバイスからネットワークへの通信)で非常に高速な通信を実現するには、無線リソースを事前に予約しておく必要があります。

このような高速通信を実現するには、ネットワークが決定論的通信の時間特性などを把握している必要があります。これを可能にするのが、5G Release 16で導入されたTSC(Time-Sensitive Communications)フレームワークです。利用可能なスペクトラム1MHzあたりの性能は、高度なMIMO(多入力多出力)アンテナ技術、ビームフォーミング、高出力送信などの5G機能を活用することで、絶対的にさらに向上させることができます。

5Gのもう一つの重要な特徴は、QoS(サービス品質)フレームの高度なサポートです。これにより、QoS要件が低い通信と、URLLC(超高信頼・低遅延通信)のような高い要件を持つ通信が共存できるようになり、リソースの利用効率を最大化することが可能になります。この仕組みをURLLCの性能を損なうことなく機能させるために、5Gではプリエンプティブ・スケジューリング(優先的なスケジュール制御)が導入されています([7]参照)。この技術により、高速モバイルプロードバンド(MBB)通信と低遅延が求められる通信の下り方向の多重化(同時伝送)が改善されます。gNB(gNodeBの略で、3GPP準拠の5G NR基地局を指します)は、進行中の低優先度の通信を部分的に上書き(すなわちプリエンプト)し、より短く、しかし緊急性の高いURLLCデータパケットを送信することができます。一般的に、超低遅延を要求する通信が大量に発生すると、無線ネットワーク全体の容量が低下する傾向があります。

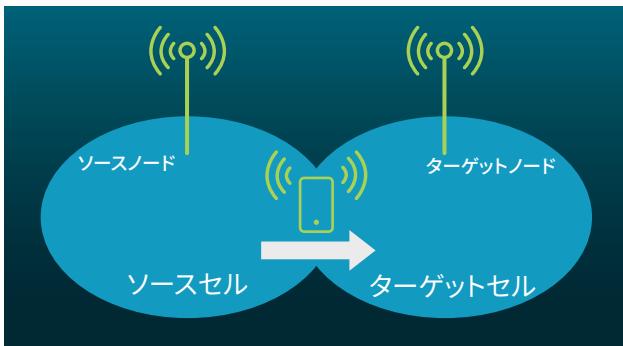
5.3 モビリティとカバレッジ

多くのIIoTアプリケーションでは、モビリティのサポートが必須です。ここでは2つの状況が区別されます: 同じgNBに接続したまま自由に移動するケース

gNB間または同一gNBの異なるセル間でシームレスなハンドオーバーを伴う移動で、サービスが途切れることなく継続されるケース

モビリティのサポートは、カバレッジの制限や容量要件により、複数のgNBを展開する必要がある場合に不可欠です。なお、ハンドオーバーは、無線デバイスが物理的にセル間を移動する場合だけでなく、展開環境内で大きな散乱(たとえば、移動する機械や車両によって引き起こされる)によっても生じる可能性があります。図3に示されているように、シームレスなハンドオーバーとは、デバイスが進行中の通信を送信元ノード(gNB)からターゲットノード(gNB)へ切り替えることを指します。ハンドオーバーは、QoSの劣化を防ぐために迅速かつ効率的に行われる必要があります。

図3: モバイル端末のソースセルからターゲットセルへのハンドオーバー



5Gでは、ネットワークがハンドオーバーを制御することで、高速かつ安定したモビリティを実現しています。これには、端末側の対応も当然必要です。端末は測定レポートを送信し、ネットワークはそれを評価して、端末を現在のセルから隣接セルへ切り替えるタイミングを判断します。5Gには、4Gと比べてハンドオーバーを改善する複数の機能が含まれています。たとえば、「条件付きハンドオーバー」が導入されており、不要な切り替えを避けながら、より安定したモビリティを実現します(参考文献[8])。また、「DAPS(Dual-active protocol stacks)」という機能では、端末(UE)がターゲットセルへの接続が完了するまで、元のセルとの接続を維持します。このシームレスな接続により、ハンドオーバー時の一時的な通信の途切れを防ぎます(参考文献[9])。さらに、複数のTRP(送信受信ポイント)による空間的多様性を活用した送信方法も、5Gの重要な強化点です。これにより、移動や物体の動きによって端末の接続が途切れるのを防ぎます。全体として、5Gはビームやキャリアの切り替え時、また同一周波数キャリア上で動作するgNB間の切り替え時にも、URLLC(超高信頼・低遅延通信)を含むシームレスなモビリティを保証します(参考文献[19]および[11])。NR-U(免許不要周波数でのNR)も、NRと同様のシームレスなハンドオーバー機能を継承していますが、主な違いは、免許不要帯域でのチャネルアクセスの信頼性が低下する点です。

サービス要件を満たすために完全かつシームレスなモビリティを前提とすると、無線システムの最大の全体カバレッジは、すべてのgNBのカバレッジ領域の合計となります。この考え方を拡張すれば、5Gは理論的にはほぼ無制限のカバレッジにスケールアップ可能です。ただし、用途によっては、单一のgNBで達成可能な最大カバレッジも重要な場

合があります。たとえば、定義されたカバレッジゾーンの端で必要な最小限の容量と遅延に合わせてシステム設計を行う方が簡単な場合です。これにより、インフラの必要量が減り、設置コストの削減につながります。端末とアクセスポイントのアンテナ間でサポートされる最大距離(またはパス損失)は、送信出力レベルと受信感度によって制限されます。これらは、使用する周波数帯の規制や機器の性能に依存します。5Gネットワークのカバレッジは、gNBのセクタ化、高度なアンテナ技術の導入(gNBおよび端末側)、より高い場所へのアンテナ設置、さまざまなリンク適応メカニズムの統合によってさらに向上させることができます。

5.4 UE(ユーザー機器)と5Gシステム時刻の同期

エアインターフェース(無線通信)を通じた絶対時刻の同期は、5GのRelease16からサポートされています。これは、IEEEのTime Sensitive Networking(TSN)やIEEE 802.1ASをサポートするための重要な要素であるだけでなく、スタンドアロンの5G端末を5Gシステムの時間領域(通常は協定世界時 UTC)と同期させるためにも使用できます。

UE(ユーザー機器)の時刻を5Gシステム時刻とどれだけ正確に同期できるかは、チャネル環境、セルサイズ、移動性など複数の要因に依存します。IIoT環境では、通常セルの幅が100メートル未満であるため、現在達成可能な性能は、単一の無線インターフェース上で540ナノ秒未満の精度(伝搬遅延を補償した上で)となっています([12]参照)。Release 16対応デバイスのメーカーは、伝搬遅延を補償するための独自のソリューションを自由に実装可能ですが、Release 17では、数キロメートル規模の大きなセルに対応するための標準的にサポートされる予定です。3GPPによる伝搬遅延補償のための想定されたソリューションが利用可能になるまでの間は、大規模なマクロセルにおいても、通常5マイクロ秒未満の同期精度が達成可能です。

6 外部連携機能（エクスポート機能）

産業アプリケーションは、いわゆるエクスポート機能インターフェース(exposure interfaces)を通じて、5Gネットワークの機能にアクセスすることができます。5Gシステムによって「公開(exposed)」されるネットワーク機能の例としては、通信サービスのモニタリングやネットワーク管理機能などがあります。別の5G-ACIAホワイトペーパー(詳細は参考文献[13])では、産業アプリケーションの観点から見たエクスポート機能の概要がまとめられています。5Gのエクスポート機能は、以下の2つのグループに分類されます：

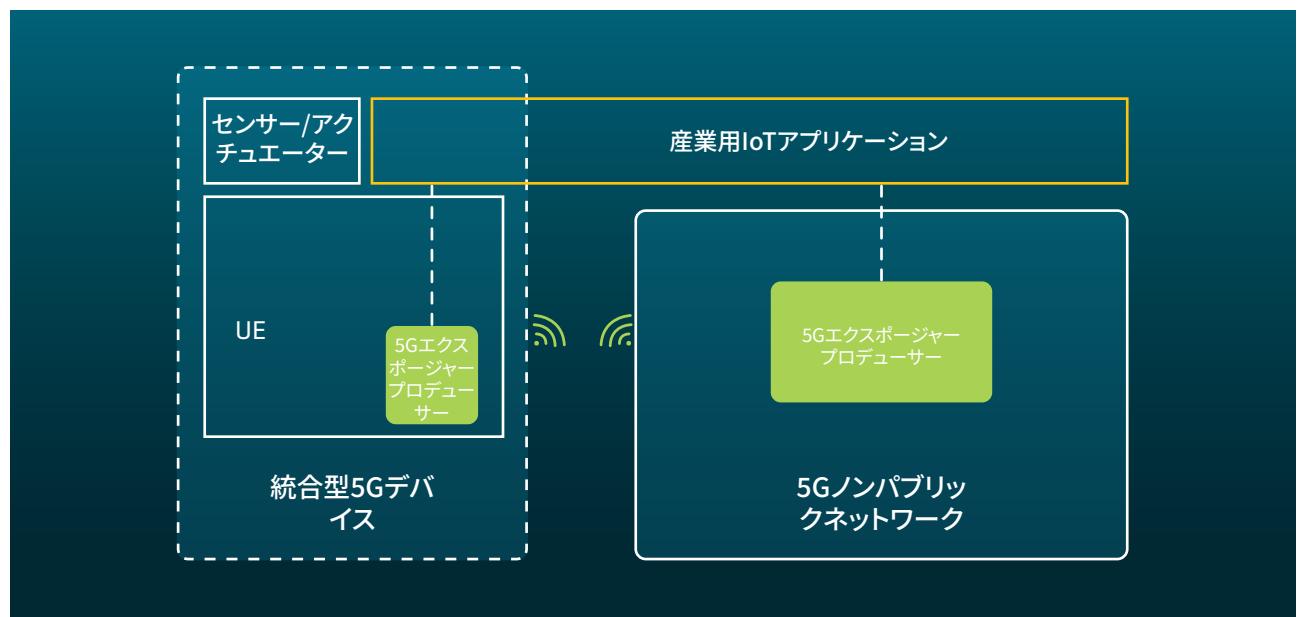
1. エンドデバイスの通信サービスの管理
2. ネットワークのモニタリング

5Gシステムは、ノースバウンドAPI(Northbound APIs)と呼ばれるアプリケーションプログラマブルインターフェースを提供しており、OT(オペレーションナル・テクノロジー)アプリケーションとの統合が可能です(図4参照)。これらの機能は、5Gネットワークにネイティブに組み込まれたネットワークエクスポート機能(NEF)を使用して直接実装すること

ができます。NEFは他の5Gコアネットワーク機能と連携しながら、5Gの機能やイベントを安全にサードパーティのアプリケーション機能へ公開します。また、サードパーティのアプリケーション機能が5Gネットワーク内部と情報を交換することも可能にします。Release 16では、3GPPがサービスイネーブルメントアーキテクチャ層(SEAL)を導入しており、RESTful APIを提供しています。これらのAPIは、5Gの複雑さを隠し、5Gネットワークや5Gデバイスとの迅速かつ容易な統合を可能にします。SEALによって提供される主な機能は以下の通りです：

3. グループ管理サービス
4. UE(ユーザー機器)の構成やユーザープロファイルのための構成管理サービス
5. セル、サービスエリア、地理座標のための位置管理サービス
6. ユーザー認証および認可のためのID・鍵管理サービス
7. 接続性およびQoSモニタリングのためのネットワークリソース管理サービス

図4: 5G機能の公開 (参考文献: [13])



7 イーサネットベース産業ネットワークへの対応

7.1 論理的イーサネットブリッジとしての5Gシステム

イーサネットは、産業分野を含むさまざまな領域で広く使用されているコンピュータネットワーク技術の一群です。フィールドレベルのアプリケーションでは、複数のフィールドバス通信技術によって補完されることがあります(参考文献 [14])。リアルタイム通信の要件に応じて、イーサネットは標準仕様からある程度逸脱した新しいバリエーションを次々と生み出しており、それらは広く採用されています(参考文献 [15])。

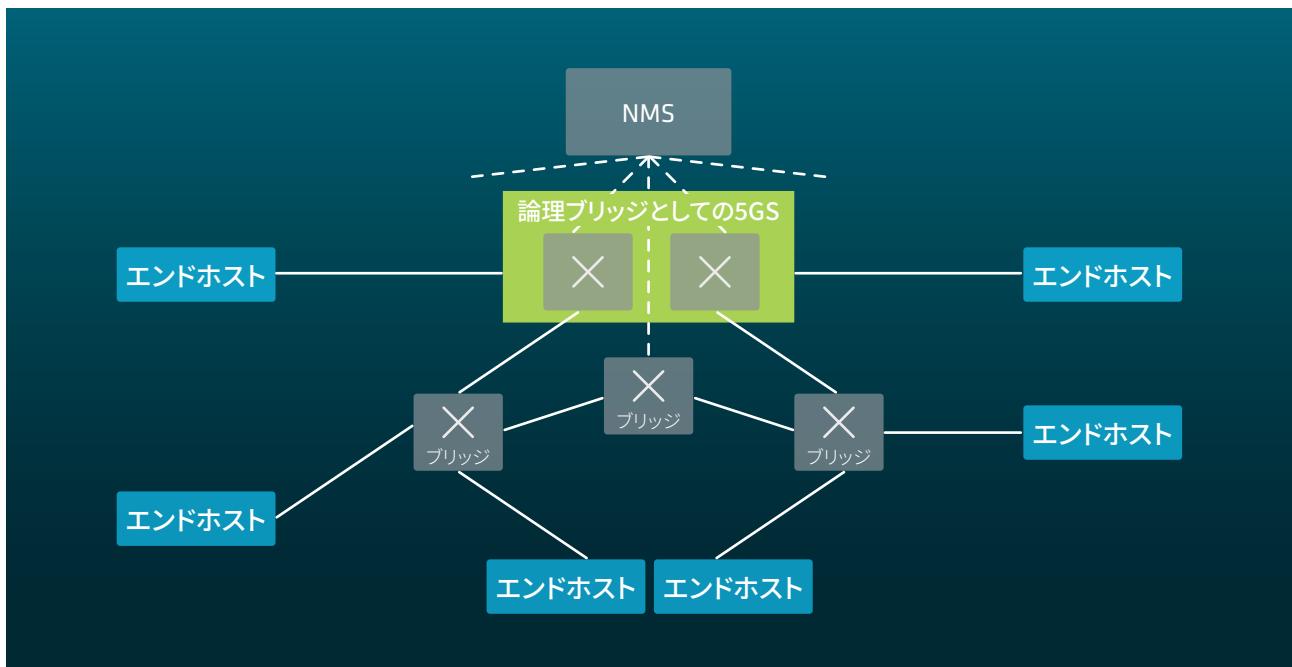
5G技術が提供するイーサネット対応機能は、産業オートメーションに関連するIEEE標準の機能と互換性があり、既存のイーサネット展開(LANやTSNなど)とのシームレスな統合を可能にします。

5Gは、IEEE 802.3標準に準拠したイーサネットトラフィックの転送をサポートしており、この目的のために、5Gシステムは仮想ブリッジとして機能し、既存のネットワーク管理システム(NMS)との統合が可能です。

これらのNMSは、SNMP(Simple Network Management Protocol)やMIB(Management Information Base)などのネットワーク管理プロトコルを使用します(図5参照)。統合されたイーサネットネットワークアーキテクチャに展開された5Gシステムは、複数の5G論理イーサネットブリッジを持つことができ、フラッディングやMACアドレス学習などの標準的なイーサネット転送メカニズムもサポートしています。

5Gの論理ブリッジは、LLDP(Link Layer Discovery Protocol)やVLAN(Virtual LAN)などのブリッジおよびポート管理情報を公開することができ、NMSから構成情報を取得することができます。特に、IEEE 802.1Qで定義されている情報に対応しています。5Gシステムは、イーサネットトラフィックを転送するためのイーサネットPDU(プロトコルデータユニット)セッションを生成します。これらのセッションは、リアルタイムイーサネット通信システムをサポートし、イーサネットフレームの転送やリアルタイムイーサネットデバイスの相互接続を可能にします。

図5: 5G-統合イーサネットアーキテクチャ



5Gシステムは論理的なイーサネットブリッジとして構成されているため、既存のイーサネットネットワーク管理システムと統合することが可能です。5Gは、IEC/IEEE 60802産業オートメーション向けTSNプロファイルに基づいてTSN (Time-Sensitive Networking) をサポートしており、これによりOPC UA (OPC統一アーキテクチャ)などの上位層の産業用プロトコルにも対応可能です。

7.2 QoS と TSNのサポート

7.2.1 サービス品質

多くの産業ユースケースでは、優先トラフィックに対して保証されたサービス品質 (QoS) レベルが求められます。TSN やイーサネットベースの産業ネットワークでは、これを確保するために複数の技術が使用されています。同様に、5GシステムにもQoSフローを設定するためのQoSフレームワークが含まれています。可能な限り細かい粒度でQoSフローを設定することにより、5Gシステム内で非常に精密なQoSレベルの差別化が可能になります。QoSフローは、IP通信フローまたはイーサネット通信フローに対して設定でき、特定のフローの各パケットが、スケジューリングや接続制御などにおいて、5Gシステム内で一貫した方法で転送されるように構成されます。これらのフローには、異なる優先度レベル、パケット遅延予算、許容されるパケット誤り率などを関連付けることができます。

7.2.2 TSN (Time-Sensitive Networking) のサポート

TSN (Time-Sensitive Networking) は、IEEE 802.1Q LANにおいて、信頼性が高く、決定論的な低遅延ネットワーク通信を実現するためのオープンなIEEE標準群です。3GPPは、Release 16で有線TSNとの統合に向けた初期サポートを導入しており、Release 17ではさらなる機能追加が予定されています。つまり、標準イーサネット上でのリアルタイムTSN機能が5Gに追加されたということです。5GシステムはTSN対応のイーサネットブリッジとして構成されており、これにより産業オートメーションに関連するユースケースに対応するために、TSNと5Gの統合が可能になります（詳細は5G-ACIAホワイトペーパー [17] を参照）。

5Gシステムは、イーサネットネットワークに対して、論理的なTSN対応イーサネットブリッジの集合体として提示されます。これらのブリッジは、モバイルデバイス側 (UE) とネットワーク側 (UPF: ユーザープレーン機能) にイーサネットポートを提供します（図6参照）。5Gシステムのモバイルデバイス側とネットワーク側のイーサネットポート間では、イーサネットおよびTSN通信が可能です。異なるモバイルデバイス間でのTSN通信のサポートは、Release 17で追加される予定です¹。5Gには、TSNアプリケーション機能 (TSN AF) という制御プレーン機能があり、IEEE 802.1Qccで定義されるTSN集中型ネットワーク構成 (CNC) と連携します。

5GブリッジのプロパティやTSN機能は、TSNAFを通じて構成されます。イーサネット/TSNトラフィックストリームは、IEEE 802.1Qで定義されたPriority Code Point (優先度コード) を使用して、5G固有のQoSフローにマッピングされます。5Gは、異なるQoSフローに対してサービス固有の処理を構成することが可能です。たとえば、時間クリティカルなトラフィックに対しては、5Gで定義されたURLLC機能を用いて、超高信頼・超低遅延通信のQoSフローを構成できます。5GがサポートするTSNの関連機能には、以下が含まれます：

- ストリームごとのフィルタリングとポリシング (IEEE 802.1Qciで定義)：異常なトラフィックを防止するために使用
- 時間スケジューリング (IEEE 802.1Qbvで定義)：重要なトラフィックフローに対して差別化された処理を行うために使用

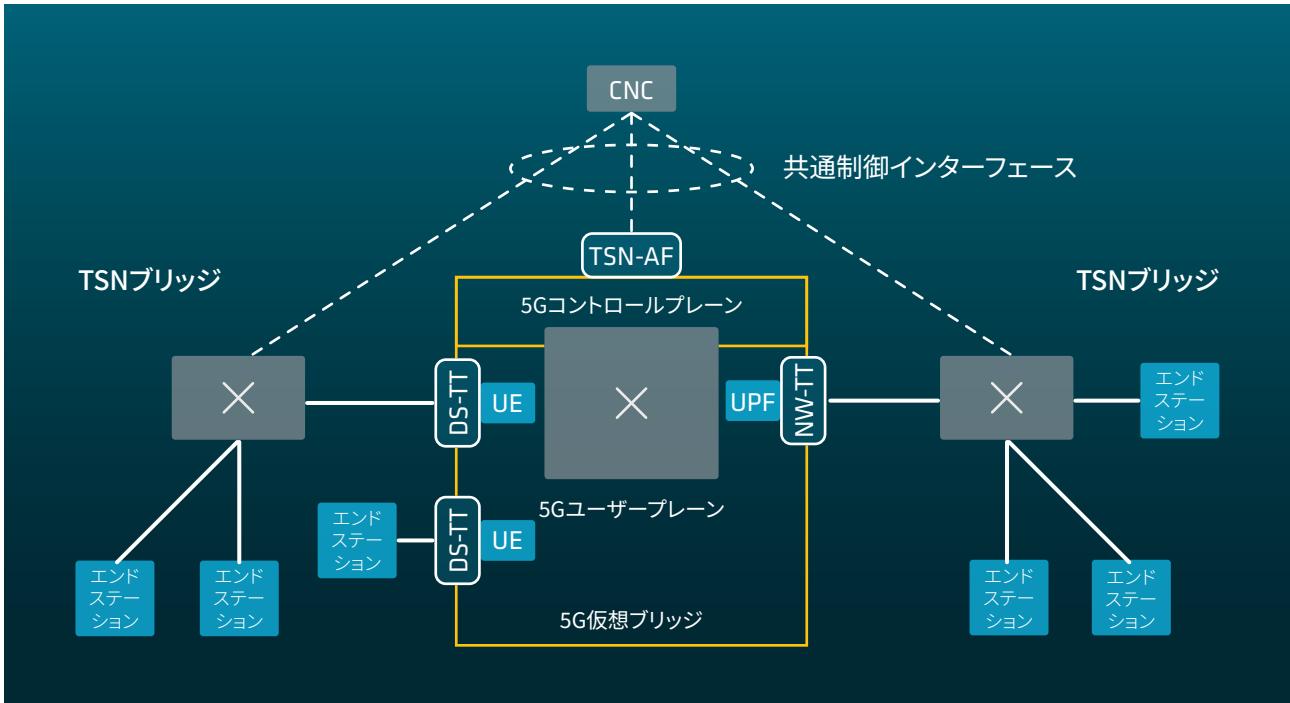
これらの機能には、コアネットワークとデバイスの両方が3GPPのTSC (Time-Sensitive Communications) 機能をサポートしている必要があります。そのため、TSNトラフィックを5Gで解釈するために、ネットワーク側TSNトランスレータ (NW-TT) とデバイス側TSNトランスレータ (DS-TT) の機能を含める必要があります（図6参照）。

TSNAFは、IEEE 802.1ABのリンク層探索プロトコル (LLDP) で定義されるトポロジー情報も提供しており、標準化されたインターフェースを通じて、5Gシステムに接続されたデバイスやブリッジの情報取得が可能です。

さらに、5Gシステムを通じた冗長通信の構成もサポートされています。

1 原文通りの翻訳。本ホワイトペーパー英語版出版当時はRelease 17は策定中であったが、日本語版出版時には標準化が完了している。

図6: 5G TSNインテグレーション



7.3 時刻同期のサポート

時刻同期はTSN (Time-Sensitive Networking) の基本機能であり、TSN対応アプリケーションは、時間認識型スケジューリングなどの他のTSN機能を活用するために、時刻同期に依存しています。5GのRelease 16では、IEEE 802.1ASで定義されたGeneralized Precision Time Protocol (gPTP) を適用することで、グランドマスタークロックと他のノード間の同期を、5Gシステムを介してイーサネット上で実現できます。これにより、5GシステムはIEEE 802.1ASで定義される時間認識型システムとして動作するようになります。

5Gシステムは、gPTPのタイミング情報を中継し、5Gデバイス、5G基地局、5Gユーザープレーン機能 (UPF) ゲートウェイを共通の5Gクロックで同期させるために、内部プロセスでレジデンスタイム (滞在時間) を計算します (参考文献 [18])。Release 16では、gPTPのグランドマスタークロックは

ネットワーク側に配置する必要がありますが、Release 17では、5Gデバイスに接続して他のモバイルデバイスやネットワーク側の宛先を同期させることも可能になります。5Gシステムにおける最大の時刻誤差は900ナノ秒に制限されます。Release 17では、さらに時刻同期が拡張され、UDP/IP上のPrecision Time Protocol (PTP) がサポートされます。

5Gは、広範なドメインにわたる時刻同期をサポートしています。たとえば、2つの独立したノンパブリック5Gネットワークが同じ5G無線アクセスネットワークを共有するようなネットワーク共有シナリオも含まれます (参考文献 [18])。

このような環境では、グランドマスタークロックから機器へ送信される同期メッセージの安全な保護が重要です。これは、ネットワーク上で送信される他のプライベートデータと同様に扱われます。PTPメッセージは暗号化されており、認証されたデバイスのみが読み取ることができます。

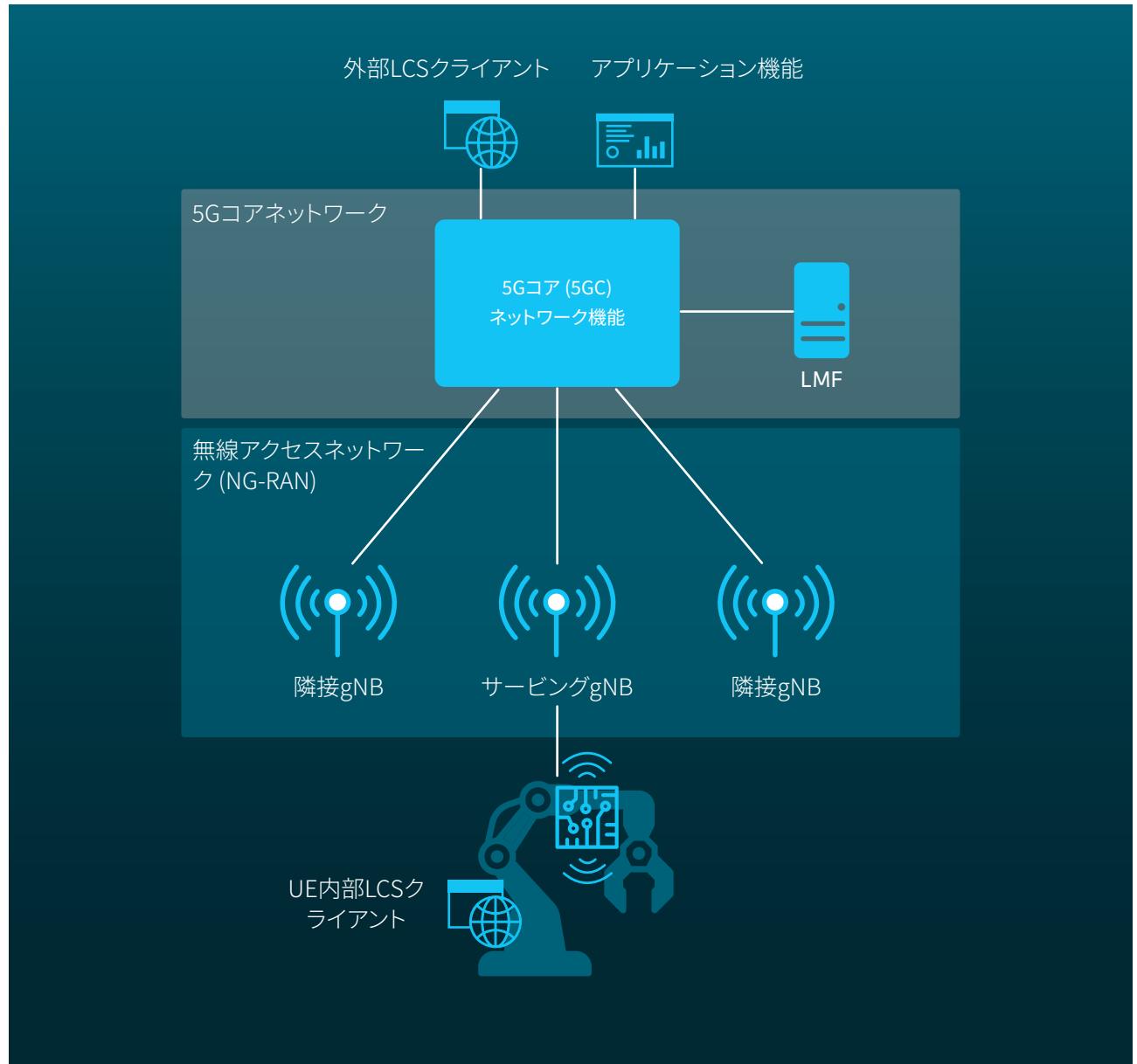
8 位置情報機能

三次元測位は、多くの産業分野において重要な機能です。これは、人員や資産の追跡、安全確保、製造・組立施設における工具の位置特定、サプライチェーンの最適化、自動搬送車(AGV)の制御など、さまざまな用途の前提条件となります。

必要とされる精度(詳細は参考文献 [19] を参照)や、測位が行われる環境条件や電波状況は、用途によって大きく異なる可能性があります。

5G NR(New Radio)における測位の基本原理は、3GPP Release 16で規定されており、Dwivediら(参考文献 [20])は、4G(LTE)以降に加えられた主な改善点の概要を示しています。図7には、5G位置情報サービス(LCS)アーキテクチャの概要が示されており、これはコアネットワーク(CN)機能と5G RAN(NG-RAN)機能に分けて説明することができます。

図7: 簡略化した5G LCSアーキテクチャ



LCS(位置情報サービス) クライアント機能またはアプリケーション機能は、QoS測位パラメータのセットを指定して位置情報リクエストを開始することができます。LCSクライアントは、5Gコアネットワーク(CN)側またはモバイルデバイス(UE)側のいずれにも存在する可能性があります。LMF(ロケーション管理機能)と呼ばれるエンティティが中心的な役割を果たします。LMFは、サービス中および近隣のgNB(基地局)やUEと連携し、アップリンク(UL)およびダウンリンク(DL)の測位測定値を受信・処理して、UEの位置を算出します。次世代無線アクセスネットワーク(NG-RAN)側では、測位技術によって要件が異なります。たとえば、DL-TDOA(ダウンリンク到着時間差)のような技術では複数セルの測定が必要ですが、DL-AoD(ダウンリンク出発角)のような技術では単一のサービスセルのみでUEの位置を特定することができます。LMFは、UEに対して測位を支援するためのデータを提供することもあります(詳細は参考文献[21]を参照)。

5Gにおける高精度測位の鍵となる技術は、広帯域信号、ビームフォーミング、複数アンテナによる正確な角度推定が可能となるミリ波(mmWave)帯域(24~40GHz)の利用です。

広帯域信号は、優れた時間分解能と測位精度(数十センチメートルレベル)を実現でき、基地局(gNB)間の完全な同期(最大同期誤差1ナノ秒未満)が前提となります。

一方、角度の高精度推定は基地局の同期を必要としないため、到着時間差(TDoA)測定に基づくソリューションを補完する技術として非常に有効です。

性能シミュレーション(参考文献[20])では、現在の5G標準が屋外で数メートル、屋内で数十センチメートルの測位精度を達成可能であることが示されていますが、産業用途に求められる信頼性にはまだ達していないとされています。

Release 16の測位検討におけるスタディ項目フェーズで得られたシミュレーション結果(参考文献[22])では、商用屋内ユースケースにおいて、UEの80%に対して水平測位誤差3m未満という目標が、基地局間の完全同期という理想条件下で達成可能であることが示されました。

これにより、5G測位は多くのユースケースに適していると考えられます。ただし、5G測位技術は、少なくとも1つの基

地局とUE間に見通し(LoS: Line of Sight)が得られることを前提としています。機械、金属物体、棚などの障害物が多い産業環境では、LoSを確保するためにgNBの高密度配置が必要となる場合があります。これにより、高信頼かつ数十センチメートルレベルの測位精度が実現可能になります。

障害物の多い環境では、gNB(基地局)の密度を高めるよりも、センサーを統合したデバイスを使用することで位置精度を向上させることができます。例えば、慣性計測ユニット(IMU)は加速度計、ジャイロスコープ、場合によっては磁力計の測定値を提供し、デバイスの動きを追跡するのに利用できます。

多くの製造業のユースケースは屋内で行われるため、全地球測位システム(GNSS)に基づくソリューションは、非常に低い信号レベルやそれに伴う不十分なカバレッジにより課題があります。一方、GNSSの使用が容易な屋外ユースケースでは、5GはGNSS-RTK(リアルタイムキネマティクス)で使用されるような測位支援データのブロードキャストを含んでおり、センチメートル単位の測位精度を達成できる可能性があります([23]参照)。GNSS-RTKを使用しなくとも、現行の5G Release 16規格では、全国または地域規模で展開された屋外ネットワークにおいて、約10メートルの測位精度を提供できる可能性があります。5G規格はまた、Terrestrial Beacon Systems(TBS)、センサー(例:気圧計、IMU)、WLAN/Bluetoothベースの測位など、非3GPPの測位技術もサポートしています([24]参照)。さらに、屋内のローカル展開による高精度な測位と、屋外のマクロ展開による低精度な測位を組み合わせることも可能であり、これは産業キャンパス内の建物間の移動や物流ユースケースなどに有用です。非3GPPの測位技術は、無線ベースの3GPP 5Gハイブリッド測位手法と組み合わせることで、精度をさらに向上させることができます。

Release 17における測位の標準化作業は現在も進行中で、2022年に完了する予定です²。発表された目標では、特にIIoT(産業用IoT)のユースケースが強調されています。現在進められている5G規格の改善の目的は、90%のUE(ユーザー機器)に対して20センチ未満の屋内測位精度を達成することです([25]参照)。現在議論されているもう一つの強化点は、エンドツーエンドの測位遅延を100ミリ秒未満に短縮することで、位置情報の初期取得時間(TTFF: Time to First Fix)を最小化することです。TTFFとは、関連データを取得し、位置を計算するまでに要する時

2 原文通りの翻訳。本ホワイトペーパー英語版出版当時はRelease 17は策定中であったが、日本語版出版時には標準化が完了している

間の指標です。Release 17の改善点は、3GPPの「NR測位強化に関する調査(reference [25])」に記載されており、以下の内容が含まれています：

- UE(ユーザー機器)の受信/送信(Rx/Tx)およびgNB(基地局)のRx/Txタイミング遅延の短縮
- 上り(UL)の到着角(AoA)および下り(DL)の出発角(AoD)の測定と報告の精度向上

5Gの測位フレームワークには、エネルギー効率の向上や、ネットワーク内の他のデバイスとの相対的な位置関係に基づいて機器の位置を特定するような新たなシナリオを統合する可能性もあります。

将来的な5Gの強化では、低消費電力かつ高精度な絶対および相対測位アプリケーションへの対応が追加される可能性があり、例えば、長寿命バッテリーが求められるツールの追跡など、IIoT(産業用IoT)ユースケースに不可欠な機能が含まれると考えられます。

9 セキュリティ

接続に物理的な配線が使われなくなると、通信の安全性を確保するための対策は、物理的な保護手段だけに依存すべきではなくなります。5Gは、無線インターフェースおよび5Gシステム全体にわたる通信の保護のために、セキュリティ機能を統合しています。

5Gでは、産業用5Gデバイスのモデムと5Gネットワーク間で、無線インターフェースを介した相互認証が提供されます。これにより、許可されていないデバイスがネットワークにアクセスすることを防ぎ、正規のデバイスが偽のネットワークに接続することも防止されます。相互認証は、5Gの鍵階層を使用してデバイスとネットワーク間のすべての通信を暗号化し、無線リンクの完全性と機密性を確保するための前提条件です。これらの仕組みにより、無線インターフェース上を通過する通信は安全に暗号化され、たとえ傍受されたとしても内容が判読されることはありません。通信内容は改ざんされることなく保護され、送信者と受信者の身元も秘匿されます。セキュリティ要件に応じて、IPSec(インターネットプロトコルセキュリティ)、TLS(トランスポートレイヤーセキュリティ)、DTLS(データグラムトランスポートレイヤーセキュリティ)などの適切なプロトコルを用いて、OT(オーバー・ザ・トップ)アプリケーションのレベルでも追加の保護を施すことが可能です。

相互認証と関連するセキュリティ機能を実行する方法は2つあります：

- PNI-NPN(パブリックネットワーク統合型ノンパブリックネットワーク)またはパブリックネットワークへの直接アクセスの場合：USIM(ユニバーサル加入者識別

モジュール)に基づく相互認証が必要です。USIMには、5G加入者の識別情報と、それに対応する長期的な秘密暗号鍵が含まれています。USIMの標準的な導入方法は、取り外し可能なUICC(一般に「SIMカード」と呼ばれる)を使用することですが、USIMは埋め込み型または統合型UICC上にプロファイル(esIM)として実装することも可能です。UICCを使用する利点は、長期鍵がUICCから外部に出ることがなく、USIMの複製を効果的に防止できる点です。

- SNP(スタンダードアロン型ノンパブリックネットワーク)の場合：USIMの使用は必須ではありません。これにより、産業用デバイス上で5G認証機能を実装するための展開オプションを開発・導入することが可能となり、産業領域との統合に最適化できます。このような非USIMモデルでは、ハードウェアベースのセキュリティも利用可能であり、産業用デバイスがセキュアエレメントを使用して産業プロトコル層の保護の基盤とすることができます。これにより、5G認証の信頼できるストレージおよび実行環境としても活用できる可能性があります。

相互認証と無線リンクの保護に加えて、トラフィック制御機能も提供されており、産業ネットワークの保護に活用できます。これらの機能は、上記の5G相互認証に直接依存しているわけではないため、USIM/UICCや他の認証メカニズムが使用されているかどうかに関係なく利用可能です。特に、産業ネットワークプロトコルのレベルでセキュリティを提供できない場合に有効です。このような(レガシーな)産業ネットワークのセキュリティは物理的な隔離に依存しており、ネットワークに無線アクセス機能を追加することで、そ

の隔離が破られる可能性があります。幸いにも、5Gシステムには、有効なUSIMを持っていたとしても、特定のデバイスが産業ネットワークと通信するのを防ぐ機能も備わっています。

ハイレベルにおいては、5GネットワークスライスやCAG (Closed Access Group:閉域アクセスグループ) を使用することで、産業ネットワークのメンバーにのみアクセスを制限することが可能です。5GコアネットワークのUPF (ユーザプレーン機能) は、産業ネットワークの特定のセグメント (データネットワーク、DNと呼ばれる) へのアクセスを制限したり、個々の通信ストリームに対してポリシーを適用することもできます。これにより、アプリケーション、送信元／

宛先アドレス、VLAN IDなどに基づいてトラフィックをフィルタリングすることが可能となり、産業ネットワーク内の通信に対して非常に細かい制御を行い、QoS要件を満たしつつ、トラフィックを分離してネットワークの安全性を確保できます。

3GPPは、OT (オペレーションナル・テクノロジー) ユースケースの運用ニーズに対応するため、5Gセキュリティの改善を継続しており、Network Slice-Specific Authentication and Authorization (NSSAA) や、データネットワーク固有の「セカンダリ認証」(それぞれ3GPP Release 16および15で導入) といったアプローチを採用しています。

10 標準化、適合性、テスト

5Gのような通信システムが安定して動作するためには、すべての構成要素がシームレスかつ確実に連携して機能する必要があります。5Gは、過去数十年にわたり成功を収めてきた従来のセルラー通信システムの流れを継承しています。

5Gの標準仕様には、システム構成要素の機能仕様だけでなく、それらが準拠すべき標準および適合性試験仕様に関する要件も含まれています。5Gの認証プログラムは広範囲にわたり、システムの標準化された機能のほとんど、さらには性能に関する試験も含まれています。これにより、どのベンダーの5Gデバイスでも、あらゆる5Gネットワークで使用できることが保証されます。ただし、すべての産業用IoT(IIoT)機能が現時点で網羅されているわけではありません。

3GPPの無線アクセスネットワーク作業部会 (RAN WG1、WG2、WG3、WG4) は、基地局およびデバイスにおける標準準拠の無線機能に関する要件を定義する責任を担っています (参考文献[26]、[27])。RAN WG4は、基地局の適合性試験仕様を定義しており、無線送信機および受信機の

特性、無線周波数性能などを対象としています (参考文献[28]、[29])。

デバイスの適合性試験仕様はRAN WG5によって定義されており、無線送受信機の特性、RF性能、無線リソース管理 (RRM)、およびRAN・コアネットワーク・IMS (IPマルチメディアサービス) サービス層におけるすべてのプロトコル層の機能が対象となります (参考文献[30])。

デバイスの適合性仕様は、Global Certification Forum (GCF) (参考文献[31]) やPTCRB (参考文献[32]) などによって認証に使用されます。デバイス側では、5Gで標準化されたさまざまなUE (ユーザー機器) の無線アクセス機能に関する適合要件が定められています (参考文献[33])。

これらすべての取り組みは、認証された5Gデバイスが試験された仕様に従って動作し、定義されたUE機能を確実に提供できるようにすることを目的としています。製造業者は、自社のデバイスが認定ラボによって試験され、認証を取得できるようにする責任を負っています。

11 結論

5Gは、単一の無線通信システム上で、高度な産業用途(時間同期型のリアルタイムのモーション制御、重要なプロセスを監視するセンサーシステム、AR/VRアプリケーションなど)の展開を可能にする多くの機能を提供します。これらの機能には、厳格な通信要件と、既存および進化中のイーサネット技術とシームレスに統合・共存するための能力が含まれています。5G-ACIAは、IIoT分野における高度なユースケースに対応するため、5G仕様の適応において豊富な実績を有しています。本ホワイトペーパーでは、5G-ACIAによる詳細な分析に基づき、5GのIIoT対応機能を紹介とともに、IIoTシナリオに5G通信を追加するさまざまな方法についても解説しています。これには、周波数スペクトラムへのアクセスおよび利用方法の選択肢も含まれます。

IIoTにおける5Gの機能に関する詳細情報については、以下の関連資料をご参考ください。

- Key 5G Use Cases and Requirements

- 5G for Automation in Industry
- 5G for Connected Industries and Automation (Second Edition)
- 5G Non-Public Networks for Industrial Scenarios
- Performance Testing of 5G Systems for Industrial Automation
- Integration of 5G with Time-Sensitive Networking for Industrial Communications
- Integration of Industrial Ethernet Networks with 5G Networks
- Security Aspects of 5G for Industrial Networks
- Exposure of 5G Capabilities for Connected Industries and Automation Applications

5G-ACIAは、産業ネットワークのコミュニティが5G技術を理解し、活用できるよう支援することに尽力しています。新しい出版物は「Publications – 5G-ACIA」で公開されています。

12 主要用語と定義

3GPP

3rd Generation Partnership Project (3GPP) は、世界中の複数の標準化団体が協力して、モバイル通信のための国際的に受け入れられるプロトコルを開発するためのコンソーシアムを指す包括的な名称です。その名称が示す通り、もともとは第3世代(3G)モバイル通信システムの仕様を策定するために設立されました。その後も活動を継続し、現在取り上げられている第5世代(5G)を含む、以降の世代の通信技術の標準化にも取り組んでいます。

5G-ACIA

5G-ACIAは、産業5Gの形成と推進において世界をリードする組織です

13 略語一覧

3GPP	NW-TT
3rd Generation Partnership Project	Network-side TSN translator
5G-ACIA	PNI-NPN
5G Alliance for Connected Industries and Automation	Public network integrated nonpublic network
AR/VR	QoS
Augmented reality/virtual reality	Quality of service
CN	RAN
Core network	Radio access network
DS-TT	SNPN
Device-side TSN translator	Standalone NPN
gNb	SIM
5G base station	Subscriber identity module
IEEE	TSC
Institute of Electrical and Electronics Engineers	Time-sensitive communications
LAN	TSN
Local area network	Time-sensitive networking
LCS	UE
Location services	User equipment
LMF	UICC
Location management function	Universal integrated circuit card (a physically secure device for storing USIM applications)
NG-RAN	UPF
5G radio access network	User plane function
NMS	URLLC
Network management system	Ultra-reliable low latency communications
NPN	USIM
Nonpublic network (private network)	Universal subscriber identity module
NR	
New Radio (5G radio)	

14 参考文献

- [1] 5G-ACIA, “5G-ACIA whitepaper: 5G Non-Public Networks for Industrial Scenarios,” 2020. [Online]. Available at: https://5g-acia.org/wp-content/uploads/2021/04/WP_5G_NPN_2019_01.pdf.
- [2] 3GPP, “TS38.300 - NR and NG-RAN Overall description; Stage-2,” 2020. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.300/38300-g30.zip.
- [3] T.-K. Le, U. Salim and F. Kaltenberger, “An overview of physical layer design for Ultra-Reliable Low-Latency Communications in 3GPP Release 15 and Release 16,” February 2020. [Online]. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2002.03713.pdf>.
- [4] 3GPP, “RP-210490 - Report on Evaluations for 5G-ACIA,” March 2021. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_91e/Docs/RP-210490.zip.
- [5] Ericsson, “5G URLLC - Achieving industrial automation,” 2021. [Online]. Available at: <https://www.ericsson.com/en/cases/2020/accelerate-factory-automation-with-5g-urllc>.
- [6] 3GPP, “R1-1901470 Reply LS on TSN requirements evaluation,” January 2019. [Online]. Available at: ftp://ftp.3gpp.org/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_AH/NR_AH_1901/Docs/R1-1901470.zip.
- [7] K. I. Pedersen, G. Pocovi and J. Steiner, “Preemptive Scheduling of Latency Critical Traffic and Its Impact on Mobile Broadband Performance,” in IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Porto, 2018.
- [8] I. Leonardo Da Silva, C. Eklöf, J. Muller and R. Zhohov, “This is the key to mobility robustness in 5G networks,” Ericsson, May 2020. [Online]. Available at: <https://www.ericsson.com/en/blog/2020/5/the-key-to-mobility-robustness-5g-networks>.
- [9] O. Ohlsson, P. Wallentin and C.-G. Persson, “Reducing mobility interruption time in 5G networks,” Ericsson, April 2020. [Online]. Available at: <https://www.ericsson.com/en/blog/2020/4/reducing-mobility-interruption-time-5g-networks>.
- [10] 3GPP, “TR37.910 - Study on self evaluation towards IMT-2020 submission,” 2019. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/37_series/37.910/37910-g10.zip.
- [11] I. Viering, H. Martikainen, A. Lobinger and B. Wegmann, “Zero-Zero Mobility: Intra-Frequency Handovers with Zero Interruption and Zero Failures,” IEEE Network Magazine, no. April, 2018.
- [12] 3GPP, “TR38.825 - Study on NR industrial Internet of Things (IoT),” 2019. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.825/38825-g00.zip.
- [13] 5G-ACIA, “Exposure of 5G Capabilities for Connected Industries and Automation Applications,” February 2021. [Online]. Available: https://5g-acia.org/5g-acia_exposure_of_5g-capabilities_for_connected-industries_and_automation_applications_single-pages/. [Accessed on 23 June 2021].
- [14] IEC, “61784-1:2019 Industrial communication networks - Profiles Part 1: Fieldbus profiles,” April 2019. [Online]. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/59887>.
- [15] IEC, “61784-2:2019 Industrial communication networks - Profiles - Part 2: Additional fieldbus profiles for real-time networks based on ISO/IEC/IEEE 8802-3,” April 2019. [Online].
- [16] Patel et al., “5G-SMART deliverable D5.1, “First Report on 5G network architecture options and its assesements”,” November 2020. [Online]. Available at: <https://5gsmart.eu/wp-content/uploads/5G-SMART-D5.1.pdf>. [Accessed Sept 2021].

- [17] 5G-ACIA, “Integration of 5G with Time-Sensitive Networking for Industrial Communications,” 2021. [Online]. Available: https://5g-acia.org/5g-acia_integration_of_5g_with_time-sensitive_networking_for_industrial_comunicatins_single-pages/. [Accessed 23 June 2021].
- [18] Godor et al., “A Look Inside 5G Standards to Support Time Synchronization for Smart Manufacturing,” IEEE Communications Standards Magazine, vol. 04, no. 03, 2020.
- [19] 3GPP, “TS22.261 - Service requirements for the 5G system,” 2021. [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.261/22261-i30.zip. [Accessed 30 June 2021].
- [20] Dwivedi et al., “Positioning in 5G networks,” 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2102.03361.pdf>. [Accessed 23 June 2021].
- [21] 3GPP, “TS23.271 - Functional stage 2 description of Location Services (LCS),” 2021. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.271/23271-g00.zip.
- [22] 3GPP, “TR38.855 - Study on NR positioning support,” 2019. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.855/38855-g00.zip. [Accessed 2 July 2021].
- [23] Ericsson, “LTE Positioning and RTK: Precision down to the centimeter,” [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/blog/2018/11/lte-positioning-and-rtk-precision-down-to-the-centimeter>.
- [24] 3GPP, “TS38.305 - Functional stage 2 description of Location Services (LCS),” [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.305/38305-g50.zip. [Accessed 9 Sept 2021].
- [25] 3GPP, “TR38.857 - Study on NR Positioning Enhancements,” 2021. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.857/38857-h00.zip. [Accessed 23 June 2021].
- [26] 3GPP, “List of RAN1 Technical Specifications and Technical Reports,” [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/DynaReport/TSG-WG--r1.htm>.
- [27] 3GPP, “List of RAN4 Technical Specifications and Technical Reports,” [Online]. Available at: <https://www.3gpp.org/DynaReport/TSG-WG--R4.htm>.
- [28] 3GPP, “TS38.141-1 - NR; Base Station (BS) conformance testing Part 1: Conducted conformance testing,” 2020. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.141-1/.
- [29] 3GPP, “TS38.141-2 - NR; Base Station (BS) conformance testing Part 2: Radiated conformance testing,” 2020. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.141-2/.
- [30] 3GPP, “RAN5 - Mobile terminal conformance testing,” [Online]. Available at: <https://www.3gpp.org/Specifications-groups/ran-plenary/49-ran5-mobile-terminal-conformance>.
- [31] “Global Certification Forum,” [Online]. Available at: <https://www.globalcertificationforum.org/>.
- [32] “PTCRB,” [Online]. Available: <https://www.ptcrb.com/>.
- [33] 3GPP, “TS 38.306 NR; User Equipment (UE) radio access capabilities (Release 16),” 2021. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.306/38306-g60.zip
- [34] NTT Docomo, “Field Experiments on 5G Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC),” July 2018. [Online]. Available at: https://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol20_1/vol20_1_003en.pdf.

[35] Nokia, “5G and Wi-Fi6 radio: options for operational technology,” 2020. [Online]. Available at: <https://onestore.nokia.com/asset/207850>.

[36] Nokia, “5G New Radio Unlicensed,” 2021. [Online]. Available at: https://onestore.nokia.com/asset/210366?_ga=2.63841071.1842850492.1620807913-36346702.1583570076.

5G-ACIA White Paper

5G for Industrial Internet of Things (IIoT):
Capabilities, Features, and Potential

Contact

5G-ACIA
Amelia-Mary-Earhart-Str. 12
60549 Frankfurt am Main
Germany
Phone: +49 69 6302-209
Email: info@5g-acia.org
www.5g-acia.org

Published by

ZVEI – German Electro and Digital Industry Association,
5G-ACIA – 5G Alliance for Connected Industries and
Automation, a Working Party of ZVEI
www.zvei.org

Originally published in November 2021

Translated into Japanese in November 2025

© ZVEI e. V.

This work, including all of its parts, is protected by copyright. Any use outside the strict limits of copyright law without the consent of the publisher is prohibited. This applies in particular to reproduction, translation, microfilming, storage, and processing in electronic systems. Although ZVEI has taken the greatest possible care in preparing this document, it accepts no liability for the content.



5G-ACIA.org