

# Time-Sensitive Networking : 産業用オートメーションの 理論から実装まで



著者

Simon Brooks

TTTech

オーストリア、ウィーン

simon.brooks@tttech.com

Ecehan Uludag

Intel Corporation

プログラマブル・ソリューションズ事業本部

米国、サンノゼ

ecehan.uludag@intel.com

目次

- はじめに ..... 1
- 産業用アプリケーションにおける  
接続の課題 ..... 2
- TSNの利点 ..... 2
  - IEEE規格 ..... 2
  - コンバージド・ネットワーク ..... 2
- SoC FPGA ベースの TSN を  
導入する利点 ..... 3
- TSNの機能 ..... 3
- OPC UA over TSN ..... 4
- TSNをシステムレベルで考える  
重要性 ..... 4
- TSNのカスタマイズ ..... 5
  - FPGAのカスタマイズ ..... 5
  - Linux\*のカスタマイズ ..... 6
- TSNの構成 ..... 6
  - リモート構成 ..... 6
  - ネットワーク・スケジューリング ..... 6
  - OPC UAによるネットワーク・  
スケジューリング ..... 6
- まとめ ..... 6
- 付録 A ..... 7

はじめに

Time-Sensitive Networking (TSN) によって、産業用通信環境を再構築し、情報技術 (IT) と産業用運用技術 (OT) を融合する基盤を構築しようとする動きが進んでいます。TSN が実現するのは、イーサネットに産業用レベルの安定性と信頼性を確保することで、ベンダーを問わず標準準拠の産業用デバイス間で相互運用を可能にする IEEE 標準通信テクノロジーです。また、TSN により、重要度の高い通信ネットワークと重要度の低い通信ネットワークを物理的に分離する必要がなくなるため、運用環境と企業の IT 環境間でのオープンなデータ交換が可能になります。これは、インダストリアル IoT (IIoT) の中核となる概念です。

TSN は、スイッチング機能を備えたエンドポイントとスイッチの組み合わせとして産業用デバイスに実装できますが、関連ソフトウェアが必要です。プロセッサと FPGA サブシステムの両方を単一のデバイスに統合できる SoC FPGA に実装することで、柔軟性が向上し、TSN ハードウェアと関連する組み込みソフトウェアとの緊密な統合が実現されます。TSN は IEEE 802.1 規格の拡張機能の集合であることから、FPGA に固有の再構成可能という特長が、TSN を実装するうえで極めて重要なアドバンテージとなります。規格の追加や変更があっても、すべての TSN 規格に対応するように短期間で FPGA を再構成でき、コストのかかるハードウェア開発作業も必要ありません。

ネットワーク・システムのレベルでは、標準の構成インターフェイスを介してデバイスに分配されるネットワーク・スケジュールに従った確定的な通信をサポートします。TTTech は、TSN をデバイスレベルで実装しやすくするだけでなく、システムレベルでも使いやすい製品ポートフォリオを提供しています。このエンドツーエンドのアプローチにより、柔軟性とパフォーマンスに優れた独自の統合された TSN 実装が実現されます。

このホワイトペーパーでは、TSN テクノロジーの特長とメリットを紹介し、また FPGA のカスタマイズ性、設定や構成を任意に変更可能な機能を活かして用途に合わせて最適化された TSN デバイス / システムを開発する方法について説明します。

## 産業用アプリケーションにおける接続の課題

市場で利用できる産業用イーサネット・プロトコルは複数ありますが、ほとんどの場合、産業用デバイスで採用される産業用イーサネット・プロトコルはベンダーごとに異なります。つまり、各デバイスが共通のプロトコルを使用する同一ベンダーの機器としか互換性がないということです。これはベンダーロックインと呼ばれ、顧客環境は(性能効率や価格効率が最も高いというわけではなくても)社内の産業機器をすべて単一ベンダーから購入するか、異なる産業用イーサネット・プロトコル間にプロトコル変換ゲートウェイを導入して、複数ベンダーの機器を統合するという難題を余儀なくされています。どちらを選んでも、工場現場での長年にわたる不要な出費やイノベーションの制限は避けられず、産業用オートメーションが特定の目的に限定された、柔軟性の低い、階層型のアーキテクチャーから抜け出せない要因となっていました。

しかし、IIoTの登場により、この構造が劇的に変化しつつあり、製造における完全自動化と有用な洞察が求められるインダストリー 4.0の要件により、産業用オートメーション・アーキテクチャーの本質的な相互運用性、柔軟性、シームレス性の向上が推進されています。ますます集約されたこれらのアーキテクチャーでは、重要なプロセスの実行にも、マシンから収集したデータの分析にも、リアルタイムの接続性が不可欠です。TSNでは、現状の産業用イーサネット・プロトコルと同等、またはそのレベルを上回るリアルタイムの接続性能をIEEE規格の柔軟性をもって、実現します。こういった理由から、TSNイーサネットは企業のIT環境と同様に製造環境でも、さまざまなベンダーの機器を相互に接続すると同時に、産業用アプリケーションの厳しい要件を満たす共通の通信プロトコルとして使用できるのです。

## TSNの利点

### IEEE規格

TSNの圧倒的な強みは、どの組織や企業にも属さないオープンな標準テクノロジーを使用していることです。互換性のない独自仕様の通信プロトコルの数々に長年悩まされてきた産業用オートメーション市場では、TSNによって次のような多くの利点をもたらされます。

- TSNでは、ベンダーが異なるデバイス間でもネットワーク・レベルでの互換性が保証されます。これにより、ベンダーロックインが解消され、システム間の接続が可能となるため、顧客は各社のシステムに適したデバイスをこれまでよりはるかに幅広い選択肢の中から選べるようになります。
- TSNはイーサネット規格の一部に含まれるため、当然ながらイーサネットの拡張にも対応します。つまり、帯域幅やその他のパフォーマンス基準の面でこのテクノロジーが制限されることはなく、新しいノードをネットワークに追加した場合も、標準プロトコルで容易に認識することができます。
- TSNは、機器間の通信にも、機器からエンタープライズ・システムへの通信にも使用できます。ミッション・クリティカルなTSNベースのシステムと重要度の低いイーサネット・ベースの既存システム間の通信も、既存ネットワーク・インフラストラクチャーを変更せずに持続可能です。

標準テクノロジーへの準拠は、全体的なシステムコストの大幅な削減につながります。消費者の選択肢が広がれば競争が生まれ、デバイスの価格は低下します。独自仕様のさまざまなソリューションではなく、1つの標準テクノロジーに顧客が注目することで、研究、開発、メンテナンスのコストをすべて抑えることができます。

### コンバージド・ネットワーク

TSNを導入すると、これまでは運用の一貫性、リアルタイムのパフォーマンス、安全性、セキュリティが理由で分離されていたネットワークやシステムの集約が可能になります。IIoTとインダストリー 4.0の基本概念は、重要度の高いシステムと重要度の低いシステム間の通信を隔てる障壁を取り除くことです。

- 重要度の高いトラフィックが優先度の低いトラフィックに影響されることなく、さまざまなトラフィック・クラスがネットワーク上で共存できます。TSNでは、重要なメッセージをほかのイーサネット・トラフィックすべてと同一の通信回線を介して送信でき、割り込みや遅延が発生することはありません。
- TSN対応のイーサネットならば、要件の厳しいモーション制御や安全性アプリケーションも集約でき、トラフィック負荷が高い状況でもエンドツーエンドのレイテンシーが保証され、標準メカニズムがメッセージ転送を高速化し、高速通信を実現します。
- 集約により、産業用システムからデータへのアクセスが簡単になります。同一ネットワーク上に配置されるシステムが増えても、異種のソースからデータを収集するタスクは簡素化されるため、産業用システムのデータを標準イーサネット経由でエンタープライズ・システムに送信でき、ゲートウェイも必要ありません。
- 既存のトラフィックを妨げるリスクや、ネットワーク全体を再構成する必要性を伴わずに、新しいデータストリームをネットワークに追加できます。
- TSNはデータリンク層(OSIモデルのレイヤー2)で完全に実装されるため、上位層プロトコルと組み合わせることができます。これには、オープンかつ標準規格のOpen Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) プロトコルのほか、さまざまなプロトコルが含まれます。

異なるトラフィック・クラスを1つのネットワーク・インフラストラクチャーに集約することによって、全体的なシステムコストが大幅に削減されます。ネットワークに必要なデバイスとケーブルの数が減り、ハードウェア・コストとメンテナンス・コストを削減できるというのがその理由です。

## SoC FPGA ベースの TSN を導入する利点

TSN は適用範囲が広く、機能が充実しているため、TSN の利点は SoC FPGA ベースのデバイスで最大限に効果が発揮されます。TSN を実装する場合、再プログラム可能という固有の特長を備えた FPGA ならば、ほかのタイプのシリコン (ASIC など) と比べてアドバンテージは絶大です。産業機器メーカーは、インテル® FPGA を使用することで、製品をいち早く市場に投入することが可能となり、投資収益率を高め、製品を IIoT 対応にすることができます。

インテル® FPGA は再プログラムが可能のため、どんな構成にも最新規格を実装できます。TSN に新しい規格が追加されても、既存の規格が変更された場合でも、デバイスで最新の TSN 機能をサポートし、エンドユーザーが TSN の機能の最大限に活用できるように、インテル® FPGA を短期間で再構成することが可能です。

産業用システムでの TSN 導入に FPGA が適している理由は次のとおりです。

- 再プログラム可能 : 産業機器メーカーは、FPGA ベースの設計により、従来の産業用イーサネット・プロトコルだけでなく、TSN 規格にも準拠できるようになります。常に化するワークロードと進化を続ける規格に対処するには、デバイスを再プログラムできることが重要な要素となります。この再プログラム可能という特長が、デバイスの効率性と拡張性を高める、製品イノベーションのカギです。
- ワークロードの統合とアクセラレーション : ネットワーク・トラフィックの増加により、データの転送、管理、同期、拡張にさまざまな課題が生じています。エッジでのワークロードの統合は、インダストリー 4.0 に対応する工場にとって不可欠です。FPGA は、イーサネット・プロトコルのアクセラレーションを実装する基盤となります。FPGA は、ワークロードをオフロードし、プロトコルの接続とデータ交換を高速化することで、パフォーマンスの向上を実現します。
- I/O の柔軟性 : FPGA を使用すると、別の産業用イーサネット・プロトコルと TSN を一つのデバイスに実装できます。
- 機能安全とセキュリティ : TSN では、これまで接続されていなかった重要なシステムも接続するため、機能面での安全性とセキュリティも検討する必要があります。インテルの FPGA、ツール、IP は、IEC61508 安全規格の認定を取得しているため、セキュアブート、ネットワークに対するデバイス認証、ネットワークを介したデータ交換のための安全な通信チャネル、暗号化アクセラレーション、デバイスの安全なアップデートなどのセキュリティ・ソリューションを、インテル® FPGA で実装することが可能です。

## TSN の機能

TSN は、標準のイーサネットに追加された拡張機能の集合を表す規格です。これらの機能は、タイミング、同期、転送、キューイング、シームレスな冗長性、ストリーム予約などの項目に適用する IEEE 802.1 規格の拡張機能で定義され、公開されています。個々の機能は、イーサネットの機能とサービス品質 (QoS) を拡張して、スイッチド・ネットワークを介したメッセージ送信を保証し、産業用通信テクノロジーに求められる本質的な安定性、信頼性、確定性を確保します。

IEEE 802.1 規格	機能
802.1AS	時刻同期
802.1Qbv	トラフィック・スケジューリング
802.1CB	シームレスな冗長性、ストリームの識別
802.1Qcc	SRP の強化
802.1Qbu	フレーム・プリエンブション
802.1Qci	フィルタリングとポリシング
802.1Qca	経路の制御と予約
802.1Qch	サイクリック・キューイング / フォワーディング
802.1Qcr	非同期トラフィック・シェーピング
802.1Qcp	ブリッジング用 YANG モデル
802.1Qcw	Qbv, Qbu, Qci 用 YANG モデル
802.1CBcv	CB 用 YANG モデル

各規格の詳細については、「付録 A」を参照してください。

表 1. IEEE 802.1 TSN 規格

メッセージ配信のタイミングを保証する TSN の主要機能は、時刻同期とトラフィック・スケジューリングです。この 2 つの機能には、それぞれ 802.1AS 規格と 802.1Qbv 規格が対応しています。TSN ネットワークに接続しているすべてのデバイスは、グローバルタイムで同期され、優先順位付けされたメッセージが各スイッチから転送されるタイミングを示すネットワーク・スケジュールを認識しています。TSN では、スイッチの出口でポートごとに割り当てられた複数のキューを使用します。このスイッチの出口でメッセージは保持され、(スケジュールで指定されたタイムスロットで)ゲートが開くと、キューに並んだメッセージが解放されて送信されます。指定されたタイミングでメッセージが解放されるので、ネットワークの遅延を確定的に予測、管理でき、この仕組みにより、重要度の高いトラフィックと重要度の低いトラフィックを同一ネットワークに集約可能になっています。

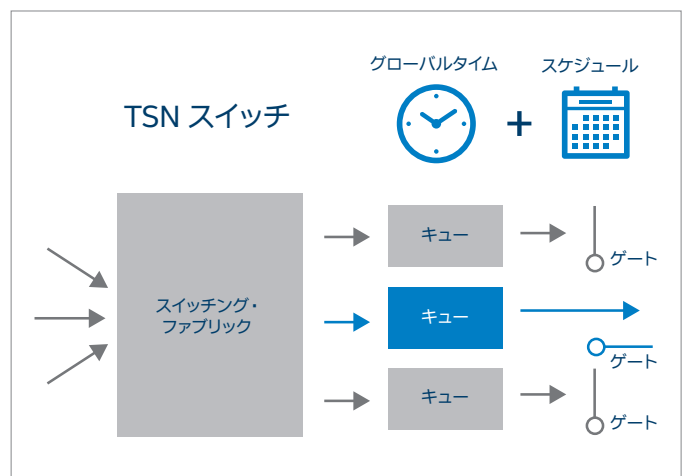


図 1. IEEE 802.1AS/802.1Qbv イーサネット規格で定義された、TSN のメッセージ転送スケジューリング

TSNでは、802.1CB規格によって、イーサネット経由の産業用通信でシームレスな冗長性を確保する標準方式を提供します。この機能により、メッセージの複製コピーをネットワーク内の異なる経路へ同時に送信できるようになり、最初のメッセージコピーが時間内に受信されて処理されると、その他のコピーは破棄されるため、コンバインド・ネットワークにおける重要なメッセージの配信に確実性が高まります。TSN 802.1Qbu規格で定義されているプリエンブション機能は、重要度の低いメッセージで帯域幅の使用効率を高めるために使用されます。高度に集約されたネットワークの場合、優先度の高いトラフィックによって、同一ネットワーク上で優先度の低い大きなフレームが遅延したり、破棄されたりすることがありますが、プリエンブション機能により、大きなフレームの送信を中断し、小さなフラグメントに分割して送信し、次のリンクで組み立て直すことができるようになるため、TSNネットワーク上のすべてのトラフィック・タイプで帯域幅の使用率を最大化できます。メッセージ・プリエンブションのもう1つの重要な利点は、通常のイーサネット・パケットをプリエンブトすることにより、いわゆるエクスプレス・トラフィックの送信レイテンシーを低減させることです。特に、最大1,500バイトを超える大容量イーサネット・パケットを10Mbpsや100Mbpsの低速ネットワークで定期的送信するケースでは、エクスプレス・トラフィックのレイテンシーを低減することにより、コンバインド・ネットワークを構築しやすくなります。

TSNの重要な要素として、ベンダーに依存しないオープンなネットワーク構成に対応できるという特長があります。これは、個々のTSN規格を記述するYANGモデルをIEEEで標準化することで実現され、XMLやJSONといったエンコード形式を使用するNETCONFプロトコルで構成できます。ブリッジング、トラフィック・スケジューリング、フレーム・プリエンブション、シームレスな冗長性、ポリングを定義するYANGモデルにより、標準方式に準拠するTSNの主要機能を確実に構成することができるため、標準に準拠していれば、どのデバイスでも、どのネットワーク設定ソフトウェアでも、ベンダーに依存せずTSNネットワークを構成できるようになります。

## OPC UA over TSN

TSNと組み合わせ可能な産業用通信の上位層プロトコルは複数ありますが、最も理にかなった選択肢はOPC UAです。TSNとほぼ同様に、OPC UAはベンダーに依存しないオープンな標準テクノロジーであり、さまざまな産業用アプリケーションに有効です。したがって、OPC UAとTSNを組み合わせれば、産業用通信で求められる要件の大半を満たす、完全にオープンで相互運用可能な標準ソリューションを実現できます。

OPC UAは、統一された方法でデータを表すことによって、これまでデータを共有できなかったデバイス間での相互運用が可能になり、豊富な情報につながる新たな洞察を抽出します。主要な産業用オートメーションに取り組む主要ベンダーのほとんどがOPC UAを採用し、製品に組み込んでいるのはこういった理由からです。当初OPC UAはクライアント/サーバー・アーキテクチャーに限定されていましたが、最近リリースされたパブリッシュ/サブスクライブ (PubSub) 拡張機能により、マルチキャスト通信が可能になりました。OPC UAのPubSub拡張をTSNと組み合わせると、正確なタイミングでデータを送信できるため、リアルタイムの産業用アプリケーションにも適用できます。

## TSNをシステムレベルで考える重要性

TSN規格は幅広い機能に対応しているため、スイッチIPコア、組込みソフトウェア、標準インターフェイス、ルーティング・アルゴリズム、構成ツールなど、その実装も同様に広範囲に処理します。TSNで最高レベルのパフォーマンスを確保するには、各要素を計算に入れ、要素間にシームレスなインターフェイスを提供できる、システムレベルのソリューションが不可欠です。TTTechは、同社の確定的イーサネット製品ポートフォリオと、インテル® SoC FPGAベースのハードウェアのリファレンス・デザインに、このアプローチを採用しています。

TTTechのTSN製品の特長は次のとおりです。

- エンドツーエンドでシームレスに動作するように設計
- 標準準拠の相互運用性
- カスタマイズ可能なシステム構成

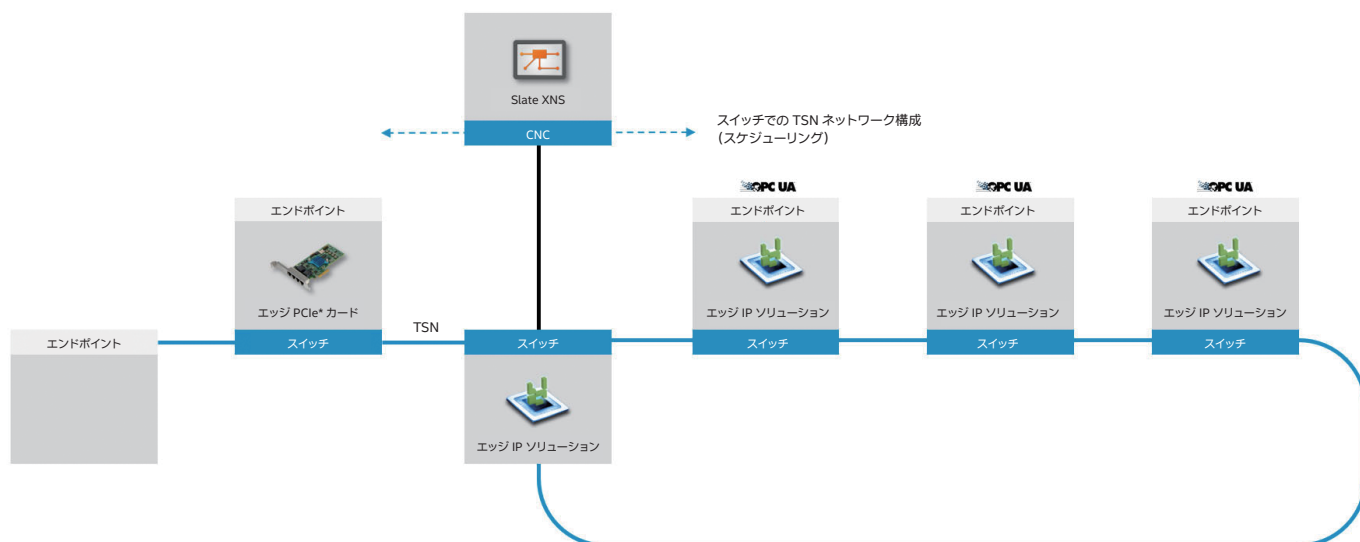


図2. TTTechのTSN製品によるシステムレベル・デザイン (現在利用可能)



DEIP Solution Edge は IP コアとして、FPGA ベースのデバイスに TSN エンドポイントのスイッチング機能を実装する、組み込みソフトウェア・パッケージです。時刻同期、トラフィック・スケジューリング、フレーム・プリエンブション、シームレスな冗長性、ポリシングなど、TSN の標準機能をサポートする 10/100/1000Mbps のスイッチポートを最大 5 つ利用できます。組み込みソフトウェアには、NETCONF サーバー、802.1AS スタック、YANG モジュール、Linux\* オペレーティング・システム用のスイッチドライバが含まれています。

DEPCIle Card Edge は、DEIP Solution Edge の定義済み機能セットとソフトウェア設計を、すぐに導入可能な Cyclone® V SoC ベースのハードウェアに統合する、ネットワーク・インターフェイス・カードです。このカードにより、PCI Express\* (PCIe\*) インターフェイスを備えた既存デバイスに、スイッチング対応のエンドポイント機能をスムーズに追加できます。

Slate ツールは、TSN ネットワークでのトポロジーのモデル化、スケジュールの作成、構成の配置に使用できるネットワーク構成製品ファミリーとして提供されます。Slate ソフトウェア製品には、NETCONF クライアント、REST サーバー、YANG モジュール、TTTech の強力なスケジューリング・エンジンが含まれています。Slate ツールは標準インターフェイスに対応しているため、標準規格に準拠する TSN デバイスのスケジューリングと構成設計に使用できます。Slate XNS バリエーションには、システム・パラメータを入力するためのグラフィカル・ユーザー・インターフェイス (GUI) が含まれています。今後 Slate YNS バリエーションには、OPC UA からシステム・パラメータを収集する PubSub ブローカーが追加される予定です。

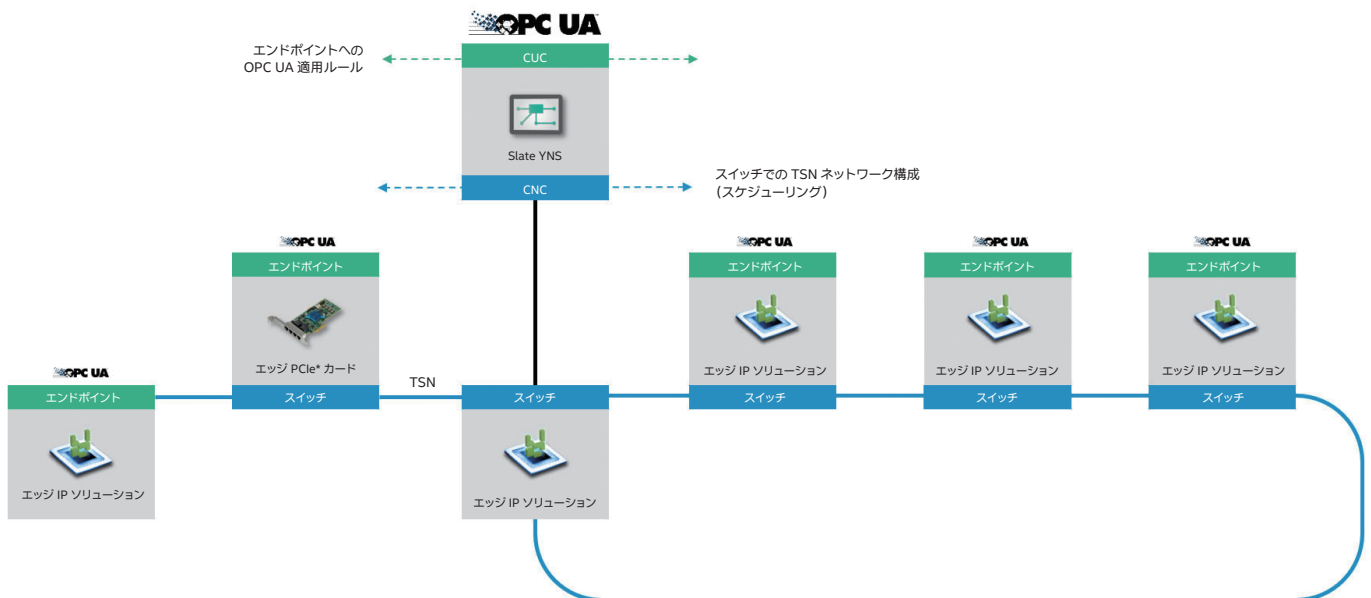


図 3. TTTech の TSN 製品を使用したシステムレベル・デザイン (2019 年から利用可能)

## TSN のカスタマイズ

### FPGA のカスタマイズ

DEIP Solution Edge を使用すると、TSN とその他のスイッチ機能をカスタマイズして、FPGA への統合を最適化できます。DEIP Solution Edge 用にインテル® プラットフォーム・デザイナーのコンポーネントとして開発され、インテル® FPGA へ TSN の IP 機能を実装しやすくなりました。このコンポーネントを使用すると、インテル® Quartus® Prime 開発ソフトウェアでさまざまなスイッチ機能をカスタマイズでき、IP 機能とサブシステムを接続するインターコネクト・ロジックが自動的に生成されるので、FPGA デザインのプロセスにかかる時間と労力を大幅に節約できます。

IP をカスタマイズできるということは、スイッチ機能の有効化 / 無効化、スイッチ機能の拡張、媒体独立メディア・インターフェイスの選択が可能になるということです。特定の FPGA デバイスのリソース容量やデバイス要件に合わせて IP 機能をカスタマイズできるため、これらの制約に応じてパラメータを設定し、有効にするポートの数を減らしたり、TSN 機能のサブセットを制限することも可能です。

例えば、このツールを使用してポートやインターフェイスを以下のように定義できます。

- 時刻同期でタイムスタンプされたメッセージを転送するポート (IEEE 802.1AS)
- ネットワーク・スケジュールに従って重要なメッセージを転送するポート (IEEE 802.1Qbv)
- プリエンブションで重要度の低いフレームを転送するポート (IEEE 802.1Qbu)
- ポートごとの優先キューの数 (最大 8 キュー) (IEEE 802.1Q)
- メッセージをカットスルー方式で転送するポート (例: メッセージを転送してからフレーム全体を受信)
- 各ポートの物理層に接続する媒体独立メディア・インターフェイス (MII, GMII, RMII, RGMII, SGMII)

## Linux\*のカスタマイズ

DEIP Solution Edge は、デバイスごとのソフトウェア・イメージのカスタマイズにも対応しているため、この製品に含まれる Yocto Project\*ビルドシステムを使用して、組み込みデバイス用の Linux\* イメージを作成できます。Yocto Project\* では、組み込み CPU アーキテクチャーを定義し、アプリケーション向けに Linux\* 機能を追加することも可能です。Yocto Project\* の標準ツールを使用して、仮想ローカル・エリア・ネットワーク (VLAN)、転送、ポート状態判定といったさまざまなスイッチ機能を構成できます。

DEIP Solution Edge は、インテル® FPGA ベースの評価ハードウェア用の Linux\* リファレンス・アーキテクチャーとともに提供され、ソフトウェア・カスタマイズの基盤として使用することもできます。Linux\* スイッチドライバーはカーネル 4.9 LTS に最適化されており、産業用デバイスの実装に長期的な安定性を提供します。

## TSN の構成

### リモート構成

スイッチデバイスをセットアップしたら、通常、これをより広範なデバイス・ネットワークの一部として構成する必要があります。リモート構成が可能であるため、TSN ネットワークをセットアップする際の柔軟性がさらに高まります。DEIP Solution Edge では、ネットワーク接続されたデバイスの TSN 機能やその他のスイッチ機能をリモートから構成できます。この製品では、NETCONF ネットワーク構成プロトコルサーバーをサポートしており、NETCONF でのデータモデリング言語として YANG が使用されます。DEIP Solution Edge でサポートされている YANG モデルを使用すれば、VLAN、転送、ポート状態判定などのさまざまなスイッチ機能の構成も可能です。

- IEEE 802.1Qcp : ブリッジング用 YANG モデルは、NETCONF と組み合わせて、ブリッジ間での基本的なブリッジング構成データを送受信できるようにします。
- IEEE 802.1Qcw : Qbv、Qbu、Qci 用 YANG モデルは、802.1Qcp の機能を拡張し、NETCONF と組み合わせて、ブリッジ間でスケジューリング/プリエンブション/ポリシング構成データを送受信できるようにします。
- IEEE 802.1CBcv : CB 用 YANG モデルは、802.1Qcp の機能を拡張し、NETCONF と組み合わせて、ブリッジ間で冗長性構成データを送受信できるようにします。

### ネットワーク・スケジューリング

ネットワーク・スケジューリングはキューイングされたメッセージの転送を特定の時点に起動させる TSN のメカニズムで、ネットワークで予期しない遅延や衝突を発生させないようにします。スケジューリングでは、アプリケーションのレイテンシー、ジッター、バッファの要件に着目して、ネットワーク全体でデータの確定的通信を保証します。

IEEE 802.1Qbv 規格では、エンドノードからのメッセージの送信時間と、後続の各スイッチからの転送時間を定義する方式を明示し、メッセージが指定された時間枠内に受信側へ到着するようにしています。ネットワーク内の各デバイスは、IEEE 802.1AS プロトコルを使用して同じクロックに同期されます。

802.1Qbv 規格を使用した TSN ネットワーク・スケジューリングは手動でも記述できますが、少し複雑なネットワークやデバイスが徐々に追加されるネットワークではあまり実用的ではありません。この解決策として TTTech は Slate ネットワーク構成ソフトウェアを提供しています。このソフトウェアでは、アプリケーションのパラメーターを入力として受け取り、一致する TSN ネットワーク・スケジューリングを計算して構成データを作成できるため、標準の NETCONF/YANG インターフェイスを介してネットワーク・スイッチにいつでも展開できます。Slate ソフトウェアは複雑な問題を解決し、ネットワーク・エンジニアからネットワークの構成とテストの負担を取り除きます。

Slate XNS ソフトウェアには、ネットワーク・トポロジーのモデル化とシステム・パラメーターの入力に使用する GUI が用意されています。今後のリリースでは、ネットワーク・トポロジーを自動的に認識し、システム・パラメーターを OPC UA アプリケーションから直接入力できるようになるため、設計プロセスがさらに効率化されます。

### OPC UA によるネットワーク・スケジューリング

OPC UA と TSN の組み合わせが実現するのは、オープンかつ標準準拠のリアルタイム・データ通信だけではありません。TSN ネットワークをオンラインで動的に構成する標準手法も提供されます。これが可能になれば、スケジューラーのシステム・パラメーターはすべて、各デバイス内の OPC UA アプリケーション・パラメーターから取得されるため、手動で入力する必要はありません。OPC Foundation で定義されたブローカー機能により、OPC UA アプリケーションと TSN スケジューリング・ソフトウェア間のインターフェイスが提供されます。

TTTech では、強力なスケジューリング・エンジンと OPC UA の PubSub ブローカーを組み合わせたネットワーク構成ソフトウェアである Slate YNS の開発を進めています。このソフトウェアにより、OPC UA のデバイス・パラメーターが TSN スケジュール要件に変換され、計算されたスケジュールがデバイスにフィードバックされます。Slate YNS ソフトウェアは、産業用 PC やスマートスイッチ、サーバーでのホスティングが可能です。

### まとめ

TSN は、個々のコンポーネントから複雑な大規模ネットワークまで、さまざまなユースケースに対応する、IEEE イーサネット規格の集合で構成されます。適用範囲が広いため、1つの機能やコンポーネントだけに焦点を合わせるよりも、システムを包括的な視点で捉えて TSN の実装を計画し、実行することが重要です。オープン性と融合性がもたらす TSN の利点を完全に実現するには、標準に準拠し、標準インターフェイスを提供できる TSN 実装を設計することも重要になります。

こういった理由から、TTTech では、IEEE 規格に従って設計された TSN 実装の要素すべてを網羅する製品ポートフォリオを展開しています。これにより、TTTech 製品はより広範なシステムに統合されても、標準準拠の他社製 TSN 製品との相互運用性が確保されます。TTTech 製品は、インテル® FPGA テクノロジーとの組み合わせによるカスタマイズ性と設定や構成を任意に変更可能な機能を活かし、産業用アプリケーションに最適化された TSN デバイス/システムを開発する柔軟性を提供しています。

## 付録 A

### 802.1AS

タイミングと同期は、確定的通信の実現に不可欠なメカニズムです。802.1ASは、IEEE 1588 PTP同期プロトコルのプロファイルの1つとして、異なるTSNデバイス間の同期互換性を実現します。これは、ネットワークに関連付けられているデバイスすべてを介するトラフィックのスケジューリングのための基礎となる仕組みです。フォールトトレランス障害許容と複数のアクティブ同期マスターに対応するために、802.1ASrevも定義されています。

### 802.1Qbv

トラフィックのスケジューリングはTSNの中心概念です。802.1ASが定義する共通グローバルタイムに基づいてスケジュールが作成され、ネットワークに関連付けられているデバイスに分配されます。802.1Qbvでは、TSNスイッチの出口でゲートを経由する、キューイングされたトラフィックのフローを制御するメカニズムを定義しています。キューからのメッセージ送信は、スケジュールされた時間枠内に実行されます。この時間枠の間は、通常ほかのキューのメッセージ送信はブロックされるため、スケジュール済みのトラフィックがスケジュール以外のトラフィックに妨害される可能性が排除されます。つまり、各スイッチで発生する遅延は確定的であり、TSN対応コンポーネントのネットワークにおけるメッセージ遅延が保証されることとなります。

### 802.1Qbu

802.1Qbvのメカニズムは、ほかネットワークのトラフィックによる干渉から重要なメッセージを保護しますが、最適な帯域使用率や最小の通信遅延が必ずしも保証されるとは限りません。これらの要素が重要な場合は、802.1Qbuで定義されているプリエンブション・メカニズムを使用できます。802.1Qbuでは、標準的なイーサネット・フレームや大容量フレームの送信を中断し、優先度の高いフレームを送信してから、中断前に送信済みの部分を破棄することなくメッセージの送信を再開できます。

### 802.1CB

802.1CBに実装される冗長性管理では、IEC 62439-3 第5節の高可用シームレス冗長性(HSR)とIEC 62439-3 第4節の平行冗長化プロトコル (PRP) で知られる類似のアプローチに従います。可用性を高めるために、同一メッセージの冗長コピーがネットワークの別々の経路で並行して伝送されます。経路の制御と予約に関する802.1Qca規格では、このような経路の設定方法が定義されています。冗長性管理メカニズムでは、これらの冗長メッセージを組み合わせ、受信側に送信する情報の単一ストリームを生成します。

### 802.1Qcc

ストリーム予約プロトコル (802.1Qat) の拡張機能には、ストリーム数の増加、ストリーム予約クラスとストリームの構成、ストリーム特性の詳細記述、レイヤー3ストリーミング、確定的ストリーム予約コンバージェンス、ルーティングと予約用のユーザー・ネットワーク・インターフェイス (UNI) が含まれます。802.1Qccは、TSNネットワーク・スケジューリングのオフライン/オンライン構成に対応しています。

### 802.1Qci

不正または悪意のあるエンドポイントやスイッチから保護し、不正フレームをネットワークの特定の領域に隔離します。スイッチ (転送エンジン) の入口で機能し、送信キューのフレームあふれを回避します。

### 802.1Qca

不正または悪意のあるエンドポイントやスイッチから保護し、不正フレームをネットワークの特定の領域に隔離します。

### 802.1Qch

キューイングされたトラフィックの転送周期を定義し、802.1Qciでバッファを割り当て、802.1Qbvでトラフィックをシェーピングします。

### IEEE 802.1Qcr

時刻同期なしで、遅延とジッターの境界 (パフォーマンス・レベルの下限) を指定します。



† テストでは、特定のシステムにおいて、決められたテスト内容によってコンポーネントの性能を測定しています。ハードウェア、ソフトウェア、システム構成などの違いにより、実際の性能は掲載された性能テストや評価とは異なる場合があります。購入を検討される場合は、ほかの情報も参考にして、パフォーマンスを総合的に評価することをお勧めします。性能とベンチマーク結果の詳細については、<http://www.intel.com/benchmarks/> (英語) を参照してください。

OpenCL および OpenCL ロゴは Apple Inc. の商標であり、Khronos の許可を得て使用しています。

インテルは、製品やサービスの内容を、いつでも予告なく変更できるものとします。本資料に記載した情報、製品、サービスの適用や使用により生じた損害について、インテルは、書面で明示的に合意した場合を除き、一切の責任や義務を負いません。公開された情報を利用する場合や、製品やサービスをご注文の場合は、事前に最新バージョンのデバイス仕様を入手されることをお勧めします。

Intel、インテル、Intel ロゴ、Cyclone、Quartus は、アメリカ合衆国および/またはその他の国における Intel Corporation またはその子会社の商標です。

\* その他の社名、製品名などは、一般に各社の表示、商標または登録商標です。

©2020 Intel Corporation. 無断での引用、転載を禁じます。

WP-01279-1.0/JP