

## Application Note

ロボット向けの確定的でスケーラブルなイーサネット バックボーン  
設計

Shaunak Deshpande, Surbhi Kapoor, Ranga Rakesh Jonnalagadda, Pradeep HN, Nilabh Anand,  
Sriramakrishnan Govindarajan, Pratheesh Gangadhar TK

## 概要

最新のヒューマノイド ロボットは、性能、安全性、そして商業的な実現可能性を制限する可能性のある、通信の深刻なボトルネックに直面しています。通信インフラは、もはやセンサとコントローラ間のトランスポート層であるだけでなく、制御システム自体の一部になりつつあります。これらの複雑なシステムは、バランス、移動、操作を実現するために、複数のモータードライブ、複数のセンサ (IMU、カメラ、触覚アレイ)、およびコントローラを厳密に同期させて調整する必要があります。このアプリケーション ノートでは、AM261x-LP (LaunchPad) を使用して、デバイスに内蔵されている CPSW (Common Platform Switch: 共通プラットフォーム スイッチ) ペリフェラルを活用したデジタイズチェーン イーサネット ソリューションの実装について説明します。このアーキテクチャは、TSN 規格の IEEE 802.1AS (gPTP)、IEEE 802.1Qbu/Qbr (フレーム プリエンプション) IEEE 802.1 Qbv (拡張トラフィック スケジューリング、CPSW ベースのハードウェア VLAN 間ルーティングおよびカットスルー スwitching) を使用して、シリアル接続ノード間で確定的な通信を実現します。この実装は、集中型イーサネット スwitching が実用的ではなく、確定的で低レイテンシの通信が必要なシステムを設計するエンジニアのリファレンスとして活用できます。

## 目次

1 はじめに.....	3
1.1 ロボティクスにおける確定性の課題.....	3
1.2 標準イーサネットがリアルタイム通信に適さない理由.....	3
1.3 タイム センシティブ ネットワーキング (TSN) ベースの提案ソリューション.....	4
2 サンプル使用事例: ロボットの分散型モーション制御.....	7
2.1 代表的なシナリオ.....	7
2.2 ネットワークトポロジーの要件.....	7
2.3 通信要件.....	8
2.4 テストの実装.....	8
3 システムの概要とアーキテクチャ.....	10
3.1 ハードウェアアーキテクチャ.....	10
3.2 ソフトウェア アーキテクチャ.....	13
4 実装例.....	15
4.1 標準イーサネット + CPSW VLAN 間ルーティング.....	15
4.2 gPTP 時刻同期の統合 (IEEE802.1AS).....	17
4.3 VLAN の統合 (IEEE802.1Q).....	18
4.4 IET フレーム プリエンプションの統合 (IEEE802.1Qbu/Qbr).....	19
4.5 EST スケジューリングの統合 (IEEE802.1Qbv).....	21
5 まとめ.....	22
6 課題とデバッグに関する検討事項.....	23
6.1 ネットワークトポロジーの検証.....	23
6.2 トラフィック フロー分析.....	23
6.3 ホスト ポートトラフィック モニタリング.....	23
6.4 PHY リンク管理.....	23
6.5 パケットが次のノードに転送されません.....	23
6.6 エラー処理と再試行.....	23
6.7 優先度の高いパケットのレイテンシまたはジッタが大きい.....	24

6.8 gPTP が同期していません.....	24
7 参考資料.....	25

## 商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 1 はじめに

### 1.1 ロボティクスにおける確定性の課題

産業用ロボットアプリケーションでは、センサ、アクチュエータ、制御ロジックが構造内の複数のポイントに分散されている分散型インテリジェンスがますます必要になっています。たとえば、多軸ロボットアームの場合、各関節に位置エンコーダ、トルクセンサ、モーターコントローラ、安全監視が搭載されていることがあり、これらは中央モーションコントローラと通信する必要があります。同様に、モジュール式生産ラインは、リアルタイムのメッセージ交換を通じて連携する独立した処理ステーションで構成されています。従来のネットワークトポロジでは、集中型イーサネットスイッチを備えたスター構成を使用していましたが、ノードが線形構造または連結構造に沿って物理的に分散している場合、このアプローチは実用的ではありません。各ノードから中央のスイッチに個別のケーブルを接続すると、ケーブルの重量、コスト、機械的複雑さが増します。特に、ケーブルが可動ジョイントや回転軸を横切る必要があるロボットアームでは問題となります。デジチェーン接続されたトポロジでは、ノードを直列に接続することでこれらの制約に対応します。各デバイスには 2 つのイーサネットポートがあり、1 つはアップストリームデバイスからの受信、もう 1 つはダウンストリームデバイスへの送信です。これにより、隣接するノード間の単一リンクへのケーブル配線が減り、集中型スイッチが不要になります。ただし、デジチェーン構成を採用すると、累積的なレイテンシなど、他の根本的な課題が発生します。モーションコントロールパケットは、境界があるレイテンシと非常に小さいジッタを必要とする場合があります。一方で、テレメトリや診断トラフィックは、ある程度の遅延に耐えられます。

各パケットは、宛先に到達するために複数のホップを通過する必要があり、処理遅延はすべての中間ノードで蓄積されます。1 ミリ秒のサイクル時間 (1kHz の制御ループ) で動作するモーションコントロールシステムの場合、パケットが 4 または 5 台のデバイスを通る必要がある場合には、ホップあたりの遅延は小さくても重大になる可能性があります。したがって、根本的な課題は、相反する 3 つの設計要件を同時に満たすことです

1. キロヘルツ周波数で動作するリアルタイム制御ループにおける、確定的なサブミリ秒のレイテンシ
2. 複数のカメラと LIDAR センサから取得した高分解能の認識データに対応できる、ギガビット規模の帯域幅
3. ベンダーロックインやライセンス料なしで、手頃な価格の部品を使用したコスト効率の高い拡張性
4. 重要度が異なるトラフィックの効率的な処理。

従来のフィールドバスプロトコル (CAN、EtherCAT、PROFINET) は確定性を提供するものの、帯域幅が限られている (CAN の場合は 1Mbps) ことや、ベンダーロックインを引き起こす独自のスタックといった欠点があります。ロボット向けの既存の通信ソリューションは、以下のカテゴリに分類されます。CAN は帯域幅の制約 (1Mbps) と高いレイテンシの両方に悩まされており、典型的な往復時間はバスの負荷とノード数に応じて 2 ~ 10 ミリ秒の範囲で、動的バランス制御に必要なサブミリ秒の要件をはるかに超えています。EtherCAT はマスタスレーブ構成において 250 ~ 500 マイクロ秒のサイクルタイムで性能を向上させますが、デジチェーン接続されたスレーブを介したマルチホップ転送では、ノードあたり 20 ~ 50 マイクロ秒が追加されます。AM26x マイコンへの EtherCAT の実装は、100M に制限されています。PROFINET IRT は 1 ~ 2 ミリ秒のサイクル時間を達成していますが、専用のハードウェアとライセンスが必要です。さらに重要なことに、これらのプロトコルは、厳格なトポロジ (トランスミッタレシーバ、スター) と独自のスタックに依存しています。以下の表は、既存のソリューションと、このアプリケーションノートの一部として提案されているソリューションをまとめたものです。

表 1-1. 既存のソリューションと提案されたソリューションの比較

プロトコル	優れたコスト効率	帯域幅	確定性
CAN	あり	なし	なし
PROFINET	なし	あり	あり
EtherCAT	なし	あり	あり
標準イーサネット	あり	あり	なし
提案されたイーサネット + TSN ソリューション	あり	あり	あり

### 1.2 標準イーサネットがリアルタイム通信に適さない理由

標準イーサネットはベストエフォート型プロトコルです。複数のトラフィックストリームが帯域幅を競合する場合、優先度の高いトラフィックが送信される間に、優先度の低いパケットが予測不能な遅延を起こす可能性があります。デジチェーン産業用ネットワークに影響を及ぼす 3 つの具体的な問題:

### 1.2.1 ヘッドオブライン ブロッキング

優先度の高いパケットが、すでに大きな低優先度フレームが送信されている最中にスイッチに到着した場合、優先度の高いパケットは低優先度フレーム全体が完了するまで待機する必要があり、100Mbps の最大サイズのイーサネット フレームの場合、数百マイクロ秒かかる可能性があります。この遅延はヘッドオブライン ブロッキングとして知られており、デイズチェーンの各ホップで発生し、累積的な予測不可能性を引き起こします。

### 1.2.2 時刻同期の欠如

閉ループ制御アルゴリズムには、複数のノード間で時刻同期したセンサ サンプリングが必要です。共通の時間基準がなければ、協調動作は不可能になります。

### 1.2.3 トラフィック スケジューリングがない

標準イーサネットには、定期的な制御トラフィック用に帯域幅を確保するメカニズムはありません。バックグラウンドトラフィック (診断、ロギング、パラメータの更新) がタイムクリティカルなメッセージに干渉し、期限の遅延や制御の不安定性を引き起こす可能性があります。

TSN のない標準イーサネットは、レイテンシが非常に変動しやすく、確定性や信頼性を保証せず、ジッタが大きく、パケット損失も大きいです。車載および産業用ロボットにおける最近の TSN の実装でさえ、組込みマイコンではなく産業用 PC で動作する集中型スイッチを備えたスター型トポロジに焦点を当てており、3 ~ 5 ノードを超えるマルチホップ デイズチェーン構成で性能を報告することはほとんどありません。本研究では、標準イーサネットへのタイム センシティブ ネットワーキング (TSN) 拡張と、最適化済みのデイズチェーン アーキテクチャや、コスト効率の優れた組込みマイコンに実装されたハイブリッド プロトコルスタック設計を組み合わせて、次世代ロボットの使用事例に適した確定的レイテンシ、高帯域幅、商用レベルの拡張性、信頼性を同時に実現できる方法を示すことで、この多次元の課題に取り組んでいます。

## 1.3 タイム センシティブ ネットワーキング (TSN) ベースの提案ソリューション

### 1.3.1 TSN とは

タイム センシティブ ネットワーキング (TSN) とは、最新のイーサネット スイッチで実現できる独自プロトコルや専用ハードウェアを必要とせずに、標準的なイーサネットに確定性を追加する IEEE 802.1 規格の集合体です。このソリューションは、ロボット システム全体にイーサネット ベースの通信バックボーンを推奨し、厳格な閉ループ レイテンシ要件を満たすように設計された確定的で信頼性が高い優れた性能を実現します。このバックボーンは、既存のソリューションの能力を上回る、短いサイクル時間と高い帯域幅を必要とする複数のシステム コンポーネントを相互接続します。実際には、TSN によってイーサネットはベストエフォート型のパケット伝送から確定的な通信ファブリックへと進化することが可能になります。ロボット システムは帯域幅以上の帯域を必要とするため、これは重要なことです。重要なアーキテクチャ上のポイントは、TSN が時間、優先度、スケジュールをネットワーク設計における第一級の要素とすることで、イーサネットを強化するという点です。これこそが、ロボティクスに求められるものです。TSN 対応ネットワークは、送信を共通の時間軸に合わせて、送信ウィンドウを確保し、トラフィック クラスを分離し、輻輳や競合によって生じる不確実性を低減させることができます。

以下の表は、TI AM261x デバイスでサポートされている TSN 規格をまとめたものです。

表 1-2. AM261x の TSN サポートの概要

TSN 標準規格	説明	HW/SW でのサポート	
		CPSW 3G	無償の RTOS サポート
802.1Q	VLAN	あり	あり
802.1AS-2020	時刻同期 (AS-Rev)	あり	あり
802.1Qbv	時間認識シェーピング機能 (TAS) / スケジュールされたトラフィックの拡張 (EST)	あり	あり
802.1Qbu	分散した高速トラフィック (IET): フレーム プリエンプション	あり	あり
802.1Qav	eAVB (イーサネット オーディオ ビデオ ブリッジング) と呼ばれる、時間に敏感なストリームの転送 / キューイング (FQTSS)	あり	あり
802.1Qci	ストリーム単位のフィルタリングとポリシング (PSFP)	オン / オフなし ゲート サポート	部分的
802.1CB	信頼性のためのフレーム複製と排除 (FRER)	なし	該当なし
802.1Qch	サイクリック キューイングおよび転送	なし	該当なし

表 1-2. AM261x の TSN サポートの概要 (続き)

TSN 標準規格	説明	HW/SW でのサポート	
		CPSW 3G	無償の RTOS サポート
802.1Qcr	非同期トラフィック シェーピング	なし	該当なし
802.1Qat	ストリーム予約プロトコル (SRP)	なし	該当なし
802.1Qcc	SRP の機能拡張		
802.1BA	オーディオ ビデオ ブリッジ (AVB) システム	あり	あり
カットスルー スイッチング	承認された IEEE 規格なし	あり	あり
VLAN 間 / VLAN 内ルーティング	承認された IEEE 規格なし	あり	あり

このアプリケーション ノートでは、ロボットの使用事例に必要な決定性、堅牢性、および保証された性能を実現するために、上記の規格の一部を標準イーサネット アプリケーションに統合することを提案しています。

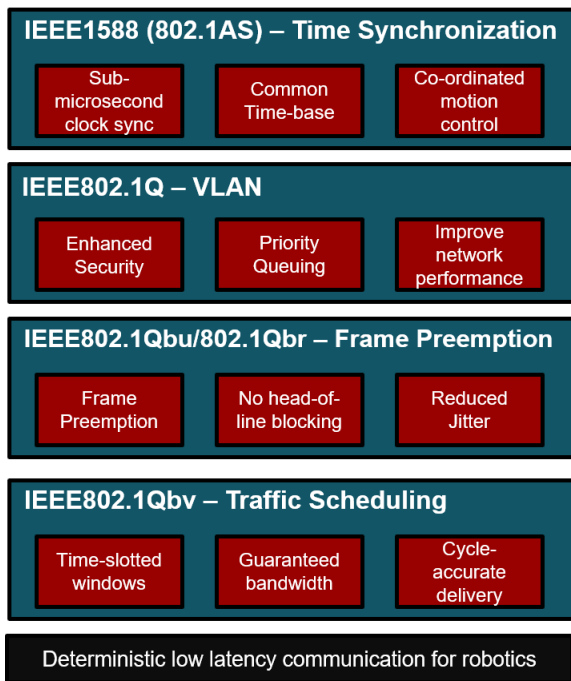


図 1-1. 推奨の標準的なイーサネット + TSN ソリューション

### 1.3.2 IEEE 1588 (802.1AS gPTP - 汎用高精度時刻プロトコル)

最初のステップは、IEEE802.1AS 高精度時刻プロトコルを統合することです。PTP 同期だけでは確定的なフレーム送信タイミングを保証することはできませんが、すべてのネットワーク ノード間でナノ秒単位の高精度時刻同期を確立することで、確定的な通信の重要な基盤となります。gPTP は、イーサネット ネットワーク上のすべてのデバイス間で、1 マイクロ秒未満の時刻同期を実現します。各デバイスは、タイムスタンプ付きメッセージを定期的に変換することにより、グランドマスター クロックと同期したローカル クロックを維持します。MAC 層でのハードウェア タイムスタンプ機能により、ソフトウェア処理のジッタが排除され、対応可能なハードウェアでは 40 ナノ秒未満の精度を実現できます。AM261x マイコンは、ハードウェア ブロックとソフトウェア ブロックの組み合わせによって、2 段階の PTP 時刻同期をサポートしています。同期型のクロックを使用すると、複数のノードにまたがるセンサの協調的なサンプリング、時刻ベースのトラフィック スケジューリング、高精度のレイテンシ測定が可能になります。モーション コントロールでは、これにより、中央コントローラが位置コマンドにタイムスタンプを付け、すべての関節が同時に動作を開始するようにすることができます。

PTP の重要な基盤となる役割:

- PTP は、ネットワーク スケジューリングの調整に必要な同期された時刻ベースを提供します
- PTP 同期がなければ、スケジュールされた送信は無効になり、予測不可能になります

- ナノ秒のタイミング精度により、トラフィック管理の決定を正確に調整できます

### 1.3.3 IEEE 802.1Q (VLAN)

次に統合するコンポーネントは、IEEE 802.1Q (VLAN) です。VLAN は、フレーム ヘッダのプライオリティコード ポイント フィールドを使用して仮想ネットワーク セグメントを作成します。重要なロボット制御パケットには優先度 7 が割り当てられますが、バックグラウンドトラフィックでは優先度が低くなります。スイッチ キューは、制御ループのレイテンシを低減するために、優先度の低いトラフィックよりも優先度の高いフレームを先に処理します。

VLAN プロトコルの制限事項:

- プライオリティキューイングでは、現在進行中の大規模フレーム送信を中断できません
- 優先度の高いフレームでも、バックグラウンドトラフィックによるシリアル化遅延が発生します
- ネットワーク ノード間で時刻同期が行われないため、タイミングの不整合が発生します

### 1.3.4 IEEE 802.1Qbu/Qbr (IET - 分散した高速トラフィック/ フレーム プリエンプション)

IET は、優先度の高いフレームが、すでに送信中の優先度の低いフレームをプリエンプトすることを可能にします。大きなバックグラウンド フレームの送信中にタイムクリティカルなパケットが MAC 層に到着すると、スイッチはバックグラウンド フレームを中断し、優先度の高いパケットを直ちに送信してから、割り込みが発生したバックグラウンド フレームを再開します。

プリエンプションにより、デ이지チェーン ネットワークにおけるレイテンシの変動の主な原因であるヘッドオブライン ブロッキングが不要になります。プリエンプションがない場合、100Mbps の 1500 バイト フレームは送信に 120 マイクロ秒かかり、その間にタイムクリティカルなパケットが待機する必要があります。プリエンプションでは、この遅延は数マイクロ秒に短縮されます。

### 1.3.5 IEEE 802.1Qbv (EST - スケジュールされたトラフィックの拡張)

EST は時間認識型スケジューリングを提供し、スイッチが gPTP 時間ドメインに同期した繰り返しスケジュールに従って、異なるトラフィック クラスの送信ゲートを開閉します。これにより、タイムクリティカルなトラフィックの時間枠が保証され、優先度の低いストリームからの干渉が防止されます。

EST は、すべてのノードが制御パケットを予測するタイミングを正確に把握するサイクルベースの通信を可能にします。gPTP と組み合わせることで、複数のホップにわたって、確定的なエンドツーエンドのレイテンシ制限を実現できます。

### 1.3.6 CPSW 固有のハードウェア機能

上記の IEEE TSN 仕様に加えて、この設計は CPSW サブシステムからのハードウェア VLAN 間スイッチングとカットスルー スイッチングも活用しています。VLAN 間スイッチングでは、ソフトウェアに依存することなく、ハードウェア内のイーサネット パケットの一部のパラメータを変更できます。変更可能なフィールドは、送信元および宛先 MAC アドレス、送信元および宛先 IP アドレス、ALE の TTL (Time to live)、VLAN タグです。

この場合、パケットがアドレス指定されたノードにある場合、アプリケーションは送信元および宛先 MAC アドレスをスワップしてループ バックします。ループ バックしない場合は、宛先ノードに到達するまでパケットを次のノードに転送します。

セクション 4. では、実装と性能ベンチマークについて詳しく説明します。

## 2 サンプル使用事例: ロボットの分散型モーション制御

### 2.1 代表的なシナリオ

各関節に以下のものを格納している産業用ロボット アームについて考えてみましょう。

- エンコーダ付きブラシレス DC モーター (位置フィードバック)
- トルク センサ (適合動作のための力フィードバック)
- ブレーキ アクチュエータ (安全機能)
- ローカル コントローラ (関節レベルのモーション補間)

中央モーション コントローラは 1kHz (1 ミリ秒のサイクル時間) で軌道コマンドを生成し、次の制御出力を計算するには、すべての関節からの位置フィードバックが必要です。要件では、サイクル期限内に関節が応答しなかった場合、すべての関節は安全なブレーキ状態に入る必要があることが規定されています。このためには、堅牢で確定的な通信バックボーンが必要で、この場合は標準的なイーサネット経由で実装されています。

### 2.2 ネットワークトポロジーの要件

#### 2.2.1 デイジーチェーンを使用する理由

ロボットアームの機械構造は、デイジーチェーン接続を自然に行えるようになっています。関節はベースからエンドエフェクタまで直列に配置されており、各関節からベースまで個々のケーブルを配線するには、回転部や関節部を通す必要があります。ケーブルを追加するたびに、以下の点が増加します。

- 可動部品の機械的摩耗
- ケーブル ハーネスの重量 (ペイロード容量の低減)
- 設置とメンテナンスの複雑さ

デイジーチェーントポロジーは、物理的な構造を反映しています。中央コントローラは関節 1 に接続され、それが関節 2 に接続され、それが関節 3 に接続される、といった具合にエンドエフェクタまで接続されます。

#### 2.2.2 デイジーチェーン イーサネット ソリューションの実践的なアプリケーション

デイジーチェーン型イーサネットトポロジーは、構造化された線形展開環境を持つ組み込みシステムで特に有利です。以下に、関連する産業用途および組み込み用途の事例をいくつか示します。

##### 1. モジュール式工場機器

モジュール式生産ラインでは、各製造モジュール (ピックアンドプレース ユニット、溶接ステーション、検査ブロックなど) に独立して電力を供給し、ネットワーク化することができます。これらのモジュールをデイジーチェーン接続することで、配線の複雑さが低減され、柔軟な製造ラインを構築するためのスケーラブルな方法が提供されます。AM26x ベースのコントローラを搭載した各モジュールは、集中型イーサネット スイッチを必要とせず、隣接モジュールや中央制御ユニットと通信できます。センサ読み取り、制御コマンド、診断などのリアルタイム データは、チェーン全体で伝搬されます。

##### 2. ロボティクス: 関節式アームとモバイル スwarm

産業用ロボットや協働ロボット (コボット) の場合、各関節やアクチュエータの段に独自の組込みコントローラが搭載されている場合があります。デイジーチェーン接続を採用すると、ロボットのベース (コントローラ) から中間関節を経由してエンドエフェクタに効率的に通信できます。レイテンシに制約のある制御信号は、内部 CPSW スイッチをカットスルー モードで使用して確定的に配線できます。スワーム ロボティクスでは、複数のモバイル プラットフォームを再充電中やドッキング中にチェーン接続させ、ワイヤレス バックボーンを必要とせずにログ、センサ データ、またはミッション パラメータを交換することができます。

##### 3. 分散型センサ ネットワーク

構造的健全性監視 (ブリッジ、トンネル、オイル リグなど) のようなシステムでは、センサ モジュールは長距離にわたって直線的に配置されます。デイジーチェーン接続により、各センサ ノードがローカル パラメータをサンプリングしてアップストリームに転送する、シンプルで堅牢な導入が可能です。AM26x デバイスは、このようなエッジ分析に適した、小型で低消費電力の処理ユニットを提供します。

##### 4. ビル オートメーション

大規模なビルの直線状またはフロアごとのネットワークトポロジ (HVAC 制御、アクセス パネル、照明制御など) は、多くの場合、デジチェーン配線と自然に合致します。各制御ユニットは、隣接するパネルや中央サーバーと通信し、ケーブル配線とスイッチ インフラストラクチャを最小限に抑えます。

## 5.EV 充電およびバッテリー管理

複数の充電コンセントを備えた電気自動車の充電ステーション、または、複数のモジュールが情報を交換する必要があるバッテリー管理システム (温度、充電レベル、電流フロー) において、リニア イーサネット接続により、CAN または RS485 でよく見られるバス アービトレーションの問題を回避でき、より高い帯域幅で確定的なレイテンシを実現します。

## 2.3 通信要件

サイクル時間: 1 ミリ秒 (1kHz の制御ループ)

トラフィックのタイプ:

### 1. タイムクリティカルな制御トラフィック (優先度 7)

- 位置コマンド: 中央コントローラ → 各関節 (64 バイト パケット)
- 位置フィードバック: 各関節 → 中央コントローラ (64 バイト パケット)
- レイテンシ要件: 往復時間が 150 マイクロ秒未満、低ジッタ
- 確定性: バックグラウンドトラフィックによって遅延してはならない

### 2. バックグラウンドトラフィック (優先度 0 ~ 3)

- パラメータの更新 (調整ゲイン、動作制限)
- 診断データ (温度、電流消費、エラー カウンタ、ログなど)
- ファイル転送 (新しいモーション プログラム)
- レイテンシ要件: 最善を尽くす。遅延は許容できる

同期処理の要件:

すべての関節で位置をサンプリングし、1ms 以内に同期してフィードバックを送信する必要があります。これにより、時間のずれによる制御アーチファクトを回避できます。

## 2.4 テストの実装

テスト システムでは、次のような 5 つの AM261x LaunchPad をデジチェーン接続しています。

- Spirent/TI の AM64x プロセッサ: 中央モーション コントローラ (またはコントローラへのゲートウェイ)
- TI AM261x LaunchPad ノード 1 ~ 5: ロボット アーム内の関節
- このセットアップでは、100M RGMII 全二重リンクを使用します。

外部 PC/Spirent/TI の AM64x プロセッサは中央モーション コントローラとして動作し、ネットワーク内の各ノードにパケットをサイクルごとに生成します。したがって、1ms サイクルの開始時に、パケットが生成されて 5 番目のノード (最も遠いノード) に送信され、次に 4 番目のノードに送信され、最後のパケットは 1 番目のノード (最も近いノード) に送信されます。

最初のパケットを最後のノードに送信する理由は、外部 PC とノード - 1 の間のネットワーク輻輳を回避するためです。ネットワーク内のトラフィック:

1. **高優先度トラフィック (優先度 = 7): 64B** 1ms サイクルの開始時に、すべてのノードにユニキャスト パケットが送信されます (5 つの AM261x-LP に対して 5 つのパケットのバースト)。5 つのパケットが送信されるとすぐに、バックグラウンドトラフィックが開始されます。
2. **バックグラウンドトラフィック (優先度 = 0): 512B** バックグラウンドトラフィックは、パケット ジェネレータからノードへ、1ms サイクルの残り時間の間送信されます (最も遠いノードが最初に、最も近いノードが最後に送信されます)。

高優先度トラフィックとバックグラウンドトラフィックの間の標準 IPG ギャップ (12B)。

3. **AM261x で生成されたトラフィック:** 各ノードは 1 ミリ秒ごとにユニキャスト パケットをパケット ジェネレータに送信します。 (516B)

表 2-1. パケットの優先順位

パケットの優先度 (VLAN PCP ベース)	パケット サイズ	パケット送信元	パケットの宛先
P-7 (最高) – 高優先度制御トラフィック	64B	パケット ジェネレータ	AM261x ノード
P-5 – ノードが生成したトラフィック	512B	AM261x ノード	パケット ジェネレータ
P-0 (最低) – バックグラウンドトラフィック	64B または 512B	パケット ジェネレータ	AM261x ノード

高精度のタイムスタンプを取得するには、ProfiShark やその他のハードウェア ネットワーク タップのような特別なタイムスタンプ ハードウェアを使用することもできます。ここで注意すべき点は、Wireshark を Windows で使用する場合、観測されるタイムスタンプはマイクロ秒単位の精度ではなく、表示される結果が異なる可能性があるということです。AM261x は、アプリケーションの要件に応じて最大 8 つの優先度をサポートできます。

デージーチェーン ネットワークへのパケットの流れを以下に示します。

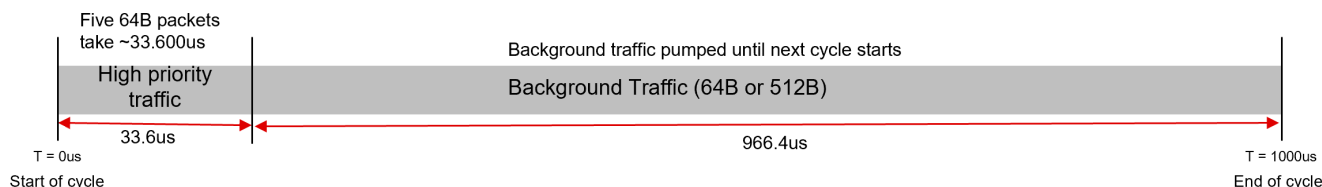


図 2-1. 1 サイクルのイーサネットトラフィック

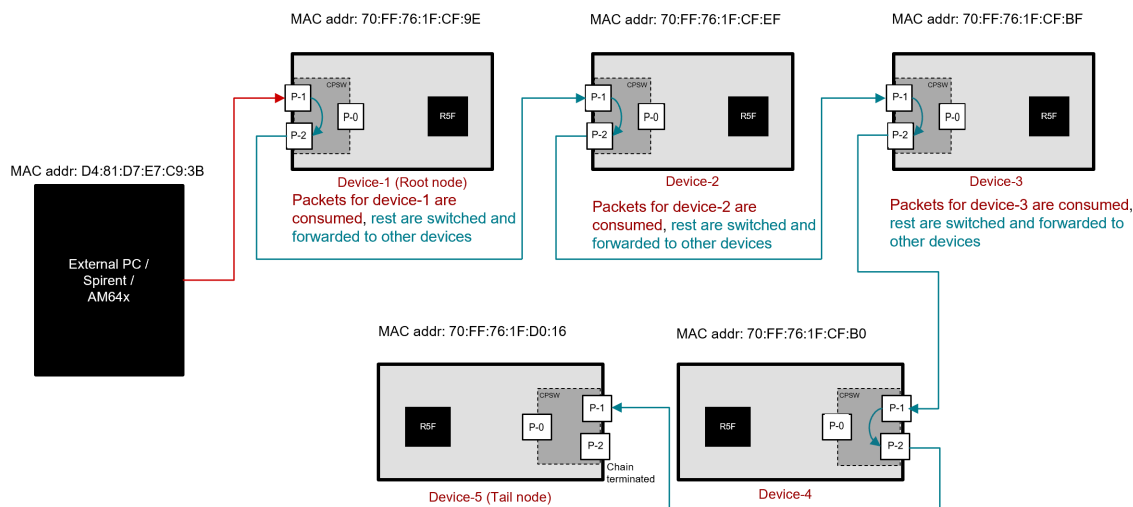


図 2-2. デージーチェーン ネットワークでのパケット伝搬の例

このサイクルは、まず優先度の高い P0 フレームを 5 つのデージーチェーン ネットワークに送信することから始まり、その後、サイクルの終了まで優先度の低いバックグラウンドトラフィックがネットワークに送信されます。

優先度の高いトラフィックについては、各ノードごとに往復時間が計算されます。この往復時間には、配線伝搬時間、CPSW の処理時間、両方のスイッチング時間、外部パケット ジェネレータからデージーチェーン ネットワークへのパケット送信、パケット ジェネレータへのパケット送信が含まれます。この設定は、次のことを確認するのに役立ちます。

- TSN が最も遠いノード (ノード 5) までのレイテンシを 150 マイクロ秒未満に維持できるかどうか
- ホップ数に応じてレイテンシがどのようにスケールされるか
- フレーム プリエンプションが、優先度の高いトラフィックをバックグラウンド負荷から効果的に分離できるかどうか
- gPTP が十分な同期精度を維持するかどうか。

実際のロボット アームは 5 つ以上の関節を持つことができますが、5 つのノードからなるテスト チェーンは、スケール動作を十分に検証し、エンジニアがより長いチェーンの性能を外挿するための基準を確立します。

## 3 システムの概要とアーキテクチャ

### 3.1 ハードウェアアーキテクチャ

テキサス インストルメンツの AM261x は、産業用オートメーション アプリケーション向けのマイコンです。この実装に関連する主な特長:

- **Arm Cortex-R5F CPU:**

500MHz で動作し、リアルタイム処理能力とネットワーク スタックおよびアプリケーション ロジックに十分な演算能力を備え、コアあたり 256KB の TCM メモリと 1.5MB の SRAM を搭載しています。これにより、gPTP ソフトウェア スタックの性能が最適化され、高い同期精度を実現するのに役立ちます。

- **CPSW3G イーサネット スイッチ:**

3 ポート ギガビット イーサネット スイッチ (ホスト ポート 1 つ、外部ポート 2 つ)、ハードウェア アクセラレーションによる層 2 スイッチングおよびルーティング、TSN 対応スイッチ (gPTP、IET (フレーム プリエンプション)、EST (時間認識スケジューリング)、VLAN をサポート)、ラインレートでのカットスルー スイッチング サポート、MAC アドレス フィルタリングおよび VLAN 管理用のアドレス ルックアップ エンジン (ALE)、構成可能なルーティング ルールによるハードウェア VLAN 間ルーティング、10/100/1000M をサポートする MII、RMII、RGMII インターフェイスをサポート。

この実装では、2 つの DP83869HM オンボード LaunchPad PHY を使用して、単一の ARM R5F コアと 100Mbps RGMII インターフェイスを使用します。

#### 3.1.1 AM261x LaunchPad

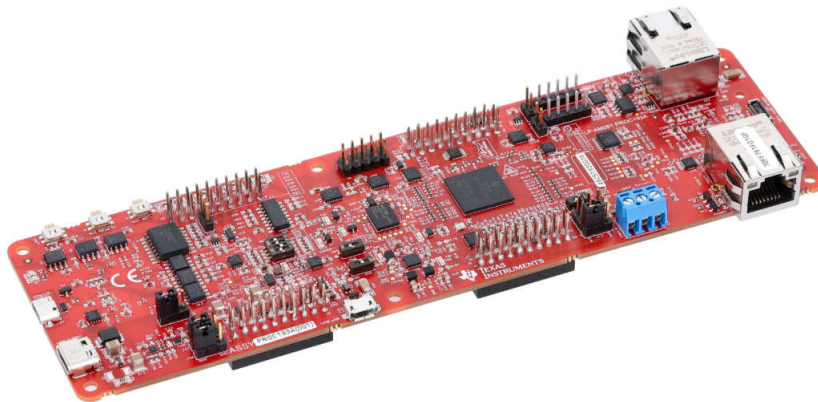


図 3-1. AM261x LaunchPad

テスト用ハードウェア プラットフォームは、AM261x LaunchPad 開発ボードです。イーサネット構成:

- 2 つの外部イーサネット ポート (ポート 1 およびポート 2)
- DP83869HM ギガビット イーサネット PHY トランシーバ
- リンク/アクティビティ LED を備えた RJ45 コネクタ
- AM261x MAC と PHY 間の RGMII インターフェイス

電源とデバッグ:

- XDS110 を経由する USB ベースの JTAG デバッグ インターフェイス
- 5V DC の外部電源

基板の変更点:この実装では必要ありません。LaunchPad は、ストック構成で使用されます。

注:このドキュメントでは AM261x について説明していますが、CPSW インターフェイスを備えた TI の他のマイクロコントローラ/マイクロプロセッサを使用して、同様の設計を実装できます。

### 3.1.2 CPSW サブシステムの概要:

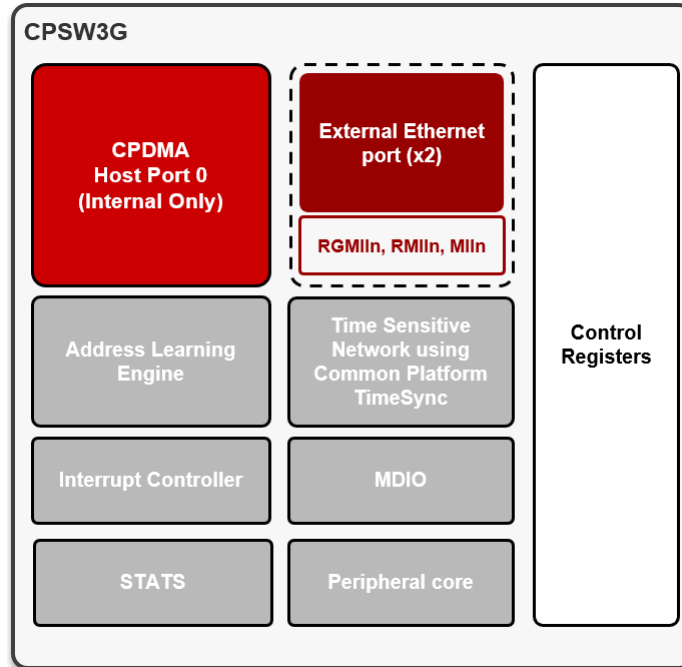


図 3-2. CPSW サブシステムのブロック図

CPSW または共通プラットフォーム スイッチは、TI 独自の HW IP であり、AM26x デバイス上でネットワーク機能を実現できます。CPSW サブシステムは、デバイス向けに IEEE 802.3 規格のイーサネット ギガビット速度パケット通信を提供し、イーサネット スイッチとして構成することもできます。CPSW3G は、10/100/1000 イーサネット ポートをサポートしており、MII、RMII、RGMII の各インターフェイスを選択可能です。AM26x デバイスは、3 ポートのギガビット CPSW3G サブシステムを搭載しています。3 ポートのギガビット イーサネット サブシステムは、2 つの外部 MAC ポートと、1 つの内部 CPPI ポート (通信ポートプログラミング インターフェイス)、またはホスト ポートをサポートしています。

内部ポート - 1 ポート (ポート - 0) は、CPU と CPSW ペリフェラル コアとの間でデータを転送する CPPI ホスト ポート (CPDMA ポート) として常に予約されています。ホスト ポートのみが CPDMA または R5F と通信できます。すべての受信データまたは送信データは、ホスト ポートを通過します。

外部ポート - CPSWNG の他の (n-1) ポートは外部 MAC ポートです。たとえば、CPSW3G には 2 つの MAC ポート (ポート - 1 とポート - 2) と 1 つのホスト ポート (ポート - 0) があります。外部ポートは、メディア独立インターフェイス (MII)、ギガビットメディア独立インターフェイス (GMII)、リデュースド メディア独立インターフェイス (RMII)、リデュースド ギガビットメディア独立インターフェイス (RGMII)、シリアル ギガビットメディア独立インターフェイス (SGMII)、クワッド シリアル ギガビットメディア独立インターフェイス (QSGMII) などの MII をサポートする MAC ポートです。

上記のサブブロックのソフトウェア構成は、Syscfg 自動生成コードと Enet-LLD ドライバによって処理されます。アプリケーションの要件に基づき、これらのサブブロックはアプリケーション層でさらに構成できます。

- **CPDMA:** 簡単に言うと、CPDMA はホスト ポートと R5F コアとの間でデータの転送を行います。CPDMA サブモジュールは、パケット DMA 転送コントローラです。ホスト CPPI 受信および送信インターフェイスは、イーサネット ポートでラインレート帯域幅をサポートできます。ホストソフトウェアは、CPDMA CPPI 3.0 および CBA 3.1 準拠パケット DMA 転送コントローラ ホスト インターフェイスと呼ばれるものを介してネットワークフレームと通信します。
- **ALE (アドレス ラーニング エンジン):** ALE は、(ALE および着信パケットの構成に基づいて) すべてのパケットを処理し、パケットの転送方法および転送先を決定します。ALE は、受信パケットの受信ポート番号、宛先アドレス、送信元アドレス、長さ/タイプ、および VLAN 情報を使用して、パケットの転送方法を決定します。ALE の出力はポートマスクで、パケットの転送先ポートを示すために使用されます。
- **割り込みコントローラ:** CPSW は 6 つの異なるソースからの割り込みを起動できます。このソースは、Enet-LLD ドライバ (ソフトウェア) 内のパケットを処理するために使用されます。いくつかの例として、THost (イーサネットからホストへ)

のペースなしレベル割り込み、ポートごとの統計情報を更新するための割り込み、リンクステータスの変更、ECC エラー条件、構成変更、ALE イベントなどのイベントに使用されるその他のレベルの割り込みがあります。

- **統計モジュール:** CPSW には、ポートごとの統計情報を保存できる組み込みの統計モジュールが搭載されています。このモジュールは、アプリケーションの性能評価とデバッグに役立ちます。CPSW 統計モジュールは、良好なフレームと不良フレームのフレーム数、ALE オーバーラン、FIFO オーバーラン、フラグメンテーション エラー、ポートマスクドロップ、オーバーサイズ / アンダーサイズのフレーム、CRC および整列エラーといったさまざまな場合のフレームドロップ数などの重要なデータをキャプチャします。
- **CPTS (Common Platform TimeSync: 共通プラットフォーム時刻同期):** CPTS サブモジュールは、デバイス上で時刻同期機能を有効にします。これにより、CPSW から受信または送信されるすべてのパケットにイベントタイムスタンプを付与できます。TimeSync イベントは CPSW FIFO にプッシュされます
- **MDIO (Management Data Input/Output: 管理データ入出力):** 管理インターフェイス モジュールは、2 線式バスを使用して外部イーサネット PHY を問い合わせ、制御するための 802.3 シリアル管理インターフェイスを実装します。MDIO モジュールの主な機能は次のとおりです。
  - MDIO は CPSW と PHY の間のブリッジとして機能します
  - MDIO モジュールを使用すると、CPSW はリンク速度、デュプレックス方式、パワー マネージメントなど、PHY デバイスのさまざまな要素の構成と制御を行うことができます。
  - また、MDIO は各 PHY のステータスを監視し、リンクアップ / ダウン イベントを検出するためにも使用されます。
  - MDIO は CPSW と PHY の間の自動ネゴシエーションも行います

上記以外に、CPSW は、このアプリケーション ノートに関連するパケット分類、VLAN サポート、ポリシング / レート制限などの機能も備えています。特定のアプリケーションでは、イーサネット パケットを処理する前に、イーサネット パケットを分類する機能が必要です。パケット クラスによって処理ロジックが異なる場合、またはより迅速なターンアラウンド時間が必要な場合があります。CPSW は、次のパラメータに基づいてパケット分類を実行できます。

- 宛先 MAC アドレス
- VLAN ID
- 優先度 (VLAN ID に基づく)
- イーサタイプ
- IP ヘッダ フィールド
- 上記のいずれかの組み合わせ

## VLAN サポート

仮想 LAN (VLAN) のサポートは、ダイジーチェーン接続されたトポロジ内でネットワークトラフィックを論理的に分割するメカニズムを提供します。特定のノードや機能ブロックから生成されるトラフィック、または特定のノードや機能ブロックへ送信されるトラフィックに異なる VLAN ID を割り当てることで、開発者は制御トラフィックをデータストリームから分離し、安全性が重要なメッセージの優先順位を設定し、同じ物理ネットワークを介したマルチテナント通信を可能にしたりできます。これは、産業オートメーションやモジュール式ロボット システムにおいて特に有用です。これらのシステムでは、異なるサブシステムが互いのデータドメインに干渉することなく、共通のイーサネット バックボーンを安全に共有する必要があります。VLAN タギングは、ブロードキャストドメインの管理や、チェーン全体での不必要なトラフィック伝搬の削減にも役立ち、確実性と帯域幅使用率が向上します。CPSW および Enet-LLD ドライバは、VLAN タグを持つイーサネット パケット、さらには VLAN タグに基づくハードウェア分類をサポートします

CPSW は、ハードウェアでの VLAN 間ルーティングと VLAN 内ルーティングもサポートしています。つまり、イーサネット パケットの VLAN タグに基づいて、CPSW はパケットを転送する必要がある VLAN を決定できます。

## レート制限

ポリサーおよびレート制限メカニズムにより、イーサネットトラフィックをきめ細かく制御することが可能になり、特にダイジーチェーン接続されたトポロジにおいて重要となります。ポリサーは、着信または発信パケットのレートを監視し、設定されたしきい値を超えるパケットをドロップまたは再マーキングすることで、定義された帯域幅制限を適用します。これにより、単一のデバイスやアプリケーションが共有ネットワーク メディアを圧倒することがなく、公平性を維持し、チェーン全体の輻輳を防止できます。レート制限は、各 MAC ポートの入力または出力に適用して、特定のトラフィック クラスまたはフローで使用される帯域幅を制限できます。ダイジーチェーン接続された構成では、これにより予測可能なレイテンシを維持し、優先度の低いトラフィックや重要度の低いトラフィックが、時間的に重要な制御パケットや同期パケットを阻害しないようにするこ

とができます。ポリサーとレート制限を QoS および VLAN のタグ付けと組み合わせて使用すると、堅牢なトラフィック管理フレームワークが提供され、マルチノード産業用イーサネットシステムの信頼性と確実性が向上します。

各 AM261x ノードは、ブート時に CPSW を初期化し、ポート VLAN ID を設定し、ALE テーブルに MAC からポートへのマッピングを入力して、チェーン位置に基づいてネットワーク アプリケーション ロジックを実行するように構成されています。

CPSW の詳細については、[こちら](#)を参照してください。

### 3.2 ソフトウェア アーキテクチャ

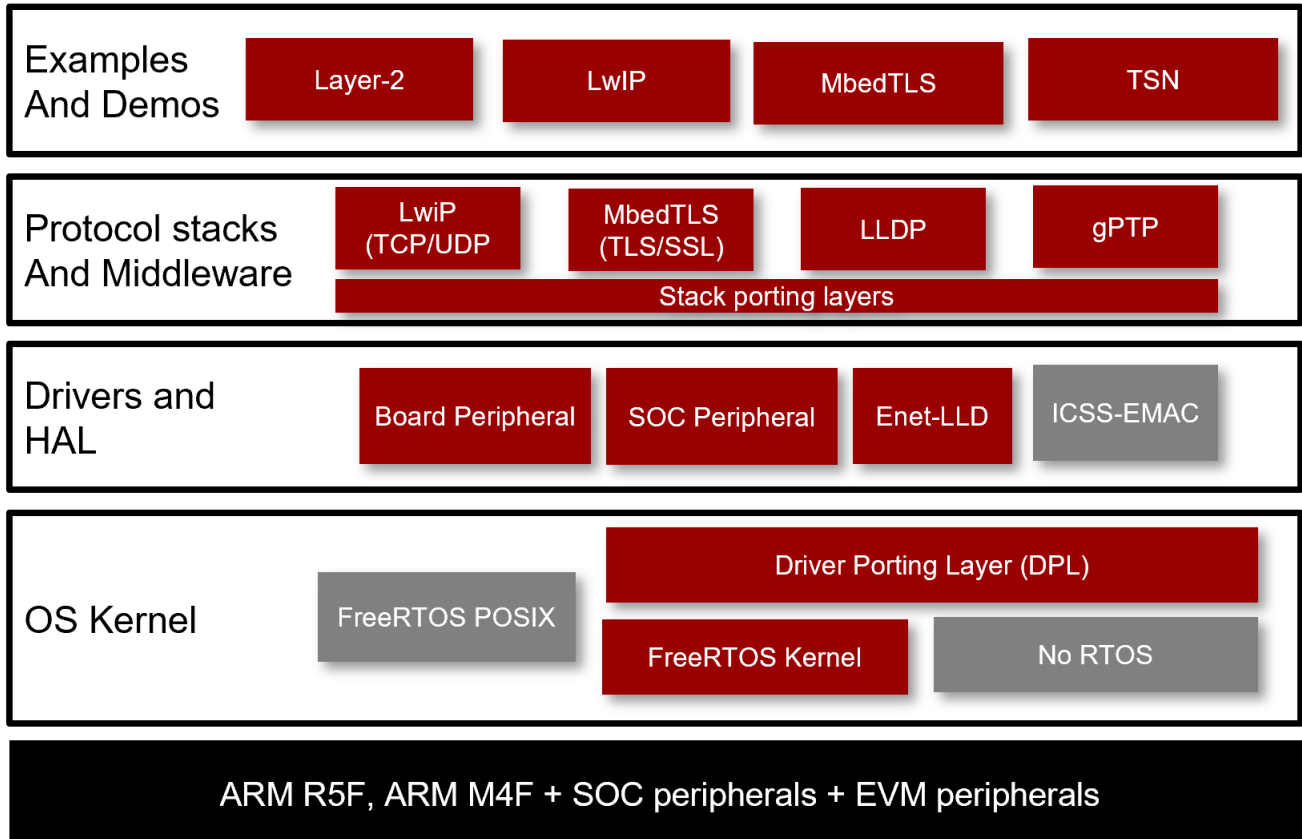


図 3-3. MCU\_PLUS\_SDK のブロック図

AM261x で動作する一般的なイーサネット アプリケーションの場合、ソフトウェアは次の層で構成されています。

1. **ボードおよびペリフェラルの初期化:**これは通常、自動生成された syscfg コードによって処理されます。example.syscfg は、ペリフェラルを構成するための GUI インターフェイスを提供しています。その後、syscfg は、アプリケーションのピン多重化、クロック供給、初期化を処理するコードを自動生成します。
2. **CPSW 構成レイヤ (Enet LLD):**Enet-LLD コードは CPSW3G を初期化し、PHY と MAC が正しく構成され、起動していることを確認します。これには設定が含まれます
  - ポート制御レジスタ
  - ALE エントリ
  - ポートの状態 (転送中 / ブロック済み)
  - 適切な PHY ドライバとリンク監視機能を使用した外部 MAC ポートの起動。
  - ALE でダイナミック ラーニングを回避するための静的転送ルールの設定。
  - バッファ管理と DMA 構成
  - ホスト ポートの TX/RX ディスクリプタの設定。
  - リンク変更などのランタイム イベントを処理するための割り込みの設定

3. **オペレーティング システム:**FreeRTOS または NoRTOS (BareMetal) 層。この層は、CPU スタートアップ コード、割り込み処理、メモリ保護ユニット API、キャッシュ、セマフォ、タイマ、キュー関連の API などの機能を提供します。FreeRTOS の場合、この層はタスク スケジューリングなどの OS 機能も提供します。Enet-LLD ドライバはこの層には依存しませんが、ミドルウェア スタックの構成は使用している OS によって異なります。このアプリケーションは、FreeRTOS ベースのアプリケーションを使用します。
4. **ミドルウェア スタック (LwIP、MbedTLS、TSN など):**この場合、この層には TSN GPTP スタックが格納されています。加えて、アプリケーションは LwIP/MbedTLS スタックを使用することもできます。
5. **アプリケーション インターフェイス:**アプリケーションは、イーサネット パケットの Rx および Tx のタスク作成を処理し、可能な場合はゼロコピー戦略 (LwIP スタック) を使用して、パケットのアロケーション、解放、およびバッファリサイクルを処理します。ALE は確定的なスイッチング動作を保証するために、非学習モードでプログラムされています。アプリケーションは、特定の基準に基づいてパケット マッチングのための CPSW 分類子の作成を処理します。アプリケーションは、スタックとインターフェイス層の初期化を行います。この層には、IET、EST、および VLAN 間構成がありますが、実際のハードウェア構成は Enet-LLD 層で行われます。

次の図は、このアプリケーション ノートで説明したアプリケーションがどのようなものかを示しています。このアプリケーション ノートの一部として実装されたアプリケーション全体は、[https://github.com/TexasInstruments/AM26x-add-on-SDK/tree/main/MCU\\_PLUS\\_SDK/reference\\_applications/AM261x\\_TSN\\_daisychain\\_app](https://github.com/TexasInstruments/AM26x-add-on-SDK/tree/main/MCU_PLUS_SDK/reference_applications/AM261x_TSN_daisychain_app) から入手できます。このアプリケーションは、AM261x LaunchPad 上で AM261x MCU\_PLUS\_SDK の v11.01.00.19 バージョンでテストされています。

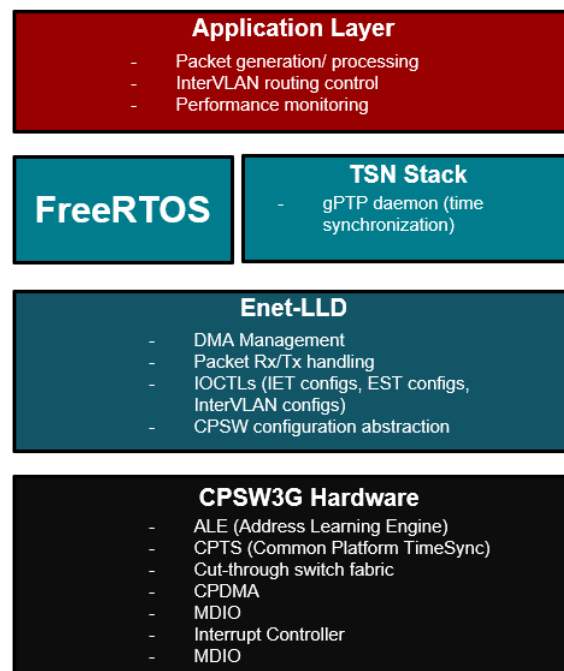


図 3-4. アプリケーション ブロック図

## 4 実装例

このセクションでは、往復時間を短縮するために段階的に改善された実装について説明します。

デフォルトでは、CPSW はカットスルー スイッチングを有効にしています。つまり、パケット全体が到着するまでパケット転送はブロックされないため、システムが高速になります。

下の図は、100M および 1G リンクでの CPSW のカットスルー スイッチング レイテンシ (単位:  $\mu\text{s}$ ) を示しています。

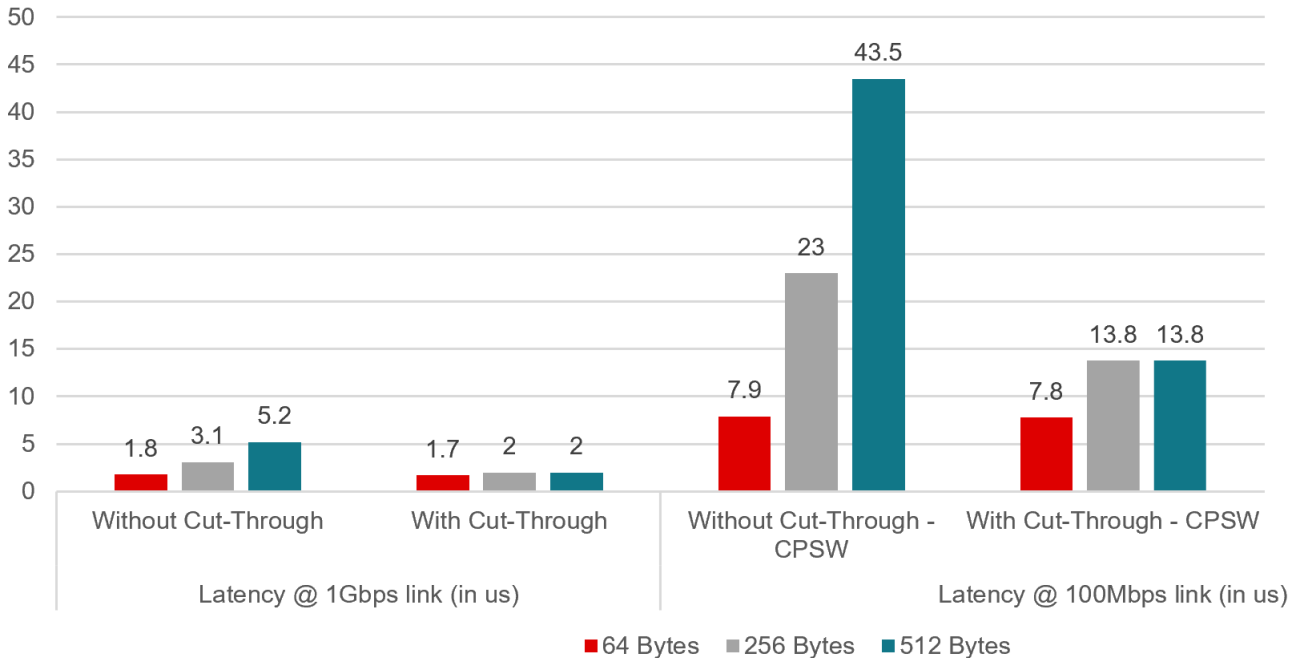


図 4-1. AM261x CPSW スイッチのレイテンシ

### 4.1 標準イーサネット + CPSW VLAN 間ルーティング

これはベースライン テストであり、実装では CPSW3G スイッチのハードウェア VLAN 間ルーティングを使用します。

#### 4.1.1 VLAN 間ルーティングとは

CPSW は VLAN 間ルーティングに対応しており、アドレス ルックアップ エンジン (ALE) が、ルートに設定された分類子 / ポリサーを介して VLAN ルーティングされる各パケットに対して VLAN 間出力オペコードを決定します。ALE 分類子 / ポリサーは、入力パケットの宛先アドレス、送信元アドレス、VLAN、IPDA、および / または IPSA を使用して、パケットが VLAN ルーティングされるかどうかを判断できます。パケットがルーティングされる場合は、イーサネット パケットの出力で VLAN 間オペコードが使用されます。ルーティングには、VLAN ID、IP アドレス、MAC アドレスなどのパケット パラメータの一部を変更する機能が含まれます。

#### 4.1.2 この実装での VLAN 間ルーティングの活用方法:

このデジタイゼーション システムでは、すべてのトラフィックが単一の VLAN (VLAN 255) を使用します。VLAN 間ルーティング機能は、実際の VLAN 間転送には使用されませんが、送信元 / 宛先 MAC アドレス スワップ機能を交換するために使用され、効率的なパケット ループバックが可能になります。受信パケットの宛先 MAC アドレスがチェックされます。現在のノードの MAC アドレスと一致しない場合、パケットは単純にスイッチングされ、MAC ポート - 2 を介して次のノードに転送されます。MAC アドレスが一致すると、送信元アドレスと宛先アドレスが交換され、パケットがループ バックされます。

パケットフローの例:

テスト PC はノード 3 にパケットを送信します

- パケットはノード 1 およびノード 2 を経由してノード 3 に送信されます。

- CPSW3G ALE (アドレス ルックアップ エンジン) がルックアップを実行します。
- 1.宛先 MAC = ノード 3 MAC を一致させます
  - 2.Match VLAN = 255 を一致させます
  - 3.構成された ALE ルーティング ルール:VLAN 255 上の私の MAC アドレス宛の packets は、SA/DA スワップを実行してポート 1 に送信します。
- ノード 3 のポート 1 からの送信 packets は、ノード 2、ノード 1 を経由して伝搬され、テスト PC に到着します。

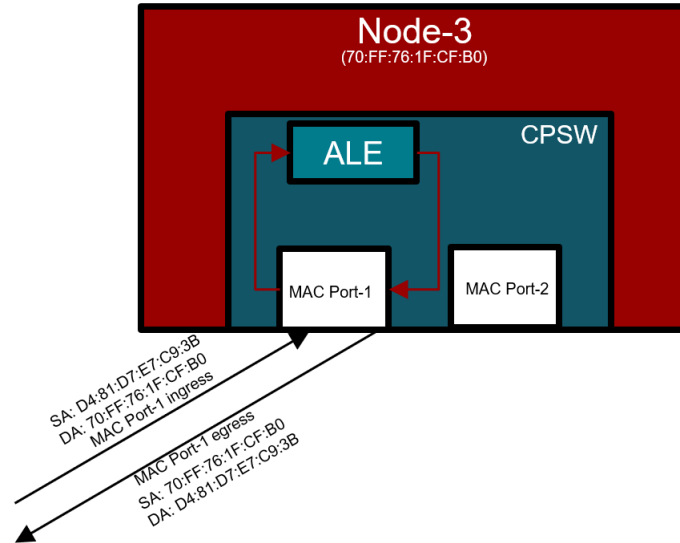


図 4-2. VLAN 間ルーティングを使用したパケット ループバック

#### 4.1.3 テスト-1 ベンチマーク

標準イーサネットを使用して得られたベースライン テスト番号については、表 4 を参照してください。各ノードにおける往復レイテンシとは、パケットがパケット ジェネレータからダイジーチェーン ネットワーク内のノードまで移動し、パケット ジェネレータにループ バックされるまでにかかる時間を指します (スイッチング遅延、ワイヤ遅延、PHY 遅延、CPSW 処理時間を含む)。

このテストには、バックグラウンドトラフィックは含まれません。このテストの CPSW は、GPTP、EST、または IET を組み込むように構成されていません。

表 4-1. ベースライン結果

ノード	往復時間 (μs) - (バックグラウンドトラフィックなし)
ノード - 1 (最も近い)	最小値: 8.42 最大値: 528.81 平均値: 511.96
ノード - 2	最小値: 23.60 最大値: 803.47 平均値: 656.64
ノード - 3	最小値: 37.776 最大値: 816.82 平均値: 671.89
ノード - 4	最小値: 53.88 最大値: 830.17 平均値: 686.91

表 4-1. ベースライン結果 (続き)

ノード	往復時間 (μs) - (バックグラウンドトラフィックなし)
ノード - 5 (最も遠い)	最小値: 69.128 最大値: 844.96 平均値: 702.20

主な所見:

- トラフィックの注入が始まったばかり (最小値) の頃は、往復レイテンシが理想的です。「最小値」は、100M RGMII 全二重リンクで実現可能なデジタイゼーション構成における最良のケースの数値です。
- 最も遠いノードから最も近いノードに 1ms ごとに送信される 5 つのパケットのバースト。550,000 パケット (12B IPG) の周期的なバーストでテストした場合、CPSW パケットドロップは観測されませんでした。上記の数値は、10 回のテスト反復の平均値です。
- しばらくすると、ネットワークがパケットで輻輳している場合、平均時間と最大時間が限界を超えるため、この実装は私たちのユースケースには理想的ではありません。
- 理想的な場合の ノード-2 レイテンシと ノード - 1 レイテンシの差は (23.60μs ~ 8.42μs = 15.18μs) です。ノード "n" (n >= 1) の場合、最良の場合のレイテンシは次のように算出できます。

$$\text{レイテンシ}(n) = \text{ノードの処理レイテンシ} + 2 * (n-1) * (\text{カットスルー レイテンシ}) + \text{ワイヤの伝搬時間}$$

- 100M でのカットスルー レイテンシを 7.6μs、CAT5 イーサネット ケーブルの伝搬時間を 5ns/m とすると、ノードあたりの平均レイテンシは 8.4244μs になります。

概算すると、

$$\text{レイテンシ}(n) = 8.4224\mu\text{s} + 2 * (n-1) * (7.6) + \text{ワイヤ伝搬時間}$$

- テスト - 1 の平均往復遅延は、ネットワーク内で確定性やスケジューリング、同期がないため、非常に大きくなります。

## 4.2 gPTP 時刻同期の統合 (IEEE802.1AS)

分散型の確定的システムでは、同期状態で動作するには、共有の時刻ベースが必要です。同期がない場合、各ノードは独立したローカル クロックドメインを使用して動作するため、協調的なスケジューリングや同期したアクチュエーションは極めて困難になります。GPTP は、チェーン内のすべてのノード間で共通のネットワーク時刻基準を確立します。

### 4.2.1 PTP 時刻同期とは

IEEE 1588 規格で定義されている高精度時刻プロトコル (PTP) は、コンピュータ ネットワーク全体でクロックをマイクロ秒未満の精度で同期させるために使用されるネットワーク プロトコルです。

このプロトコルはマスター スレーブ アーキテクチャを使用して動作します。グランドマスターと呼ばれる高精度のリファレンス クロックは、タイムスタンプ付きメッセージをネットワーク経由で下位デバイスに送信します。受信ノードは、これらのパケットの正確な出発時刻と到着時刻を測定することで、ネットワーク パスの遅延を数学的に計算し、除去することができます。このようにハードウェア レベルのタイムスタンプ機能に依存することで、ソフトウェア処理の遅延が最小限に抑えられ、PTP はネットワーク タイム プロトコル (NTP) などの従来のソフトウェア ベースの手法よりもはるかに正確になります。そのため、モバイル通信、電力グリッド、自動製造、高頻度金融取引など、タイムクリティカルな産業にとって不可欠な技術となっています。

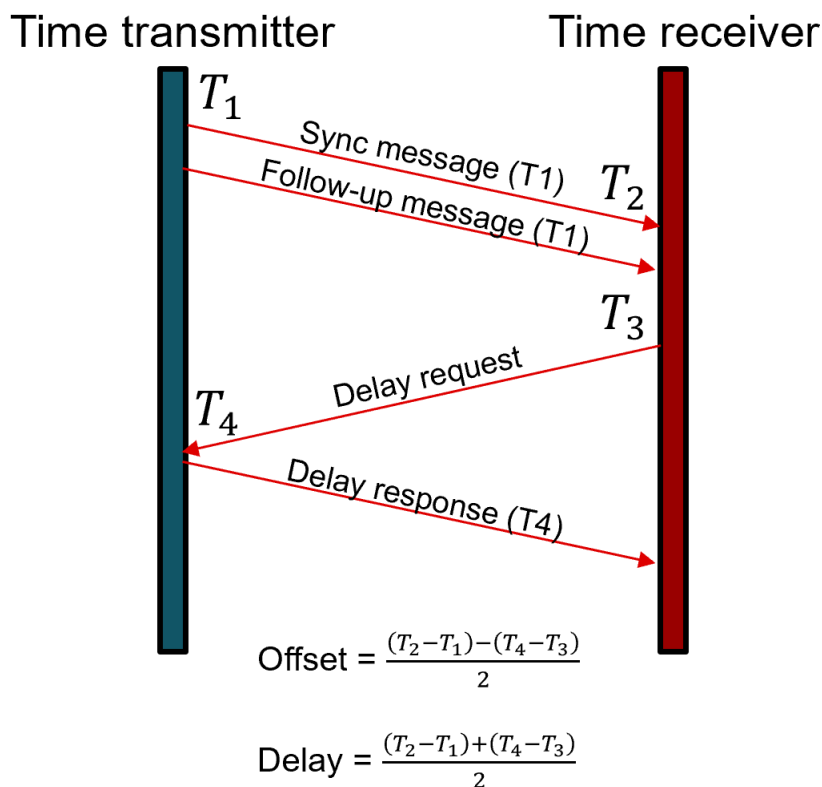


図 4-3. 2 段階の PTP 時刻同期

TI AM261x デバイスには 2 段階の PTP メカニズムが搭載されています。このメカニズムでは、時間トランスミッタ (PTP マスター) がタイムスタンプ T1 で同期 (SYNC) メッセージを共有し、T1 でフォロー アップ (FOLLOW UP) メッセージを送信します。同期 (SYNC) メッセージは T2 の受信側に到着します。その後、コントローラはタイムスタンプ T3 に遅延リクエスト (DELAY REQ) を送信します。コントローラはこれを T4 で受信します。

PTP レシーバで使用可能なこれら 4 つのタイムスタンプを使用して、遅延とオフセットが計算され、オフセットが CPSW の CPTS ブロックを介して PPM クロックを調整するために使用されます。

ベンチマークでは、2 つのノード間で TimeSync ジッタが 40ns 未満であることが示されています。したがって、同期後の任意の時点で、2 ピア TI AM261x デバイスのクロックは 40ns を超えるオフセットにはなりません。

#### 4.2.2 この実装での GPTP 時刻同期の使用方法

この実装によって往復レイテンシの改善は見られないものの、この実装では GPTP 時刻同期を使用してデジタイゼーションネットワーク内のすべてのノードのクロックを同期します。これにより、ネットワーク スケジューリングの調整に必要な同期された時刻ベースを提供します。PTP 同期がないと、スケジュールされた送信は無効になり、予測不可能になります。ナノ秒のタイミング精度により、トラフィック管理の決定を正確に調整できます。

#### 4.2.3 テスト - 2 ベンチマーク

時刻同期を有効にしても、往復レイテンシの低減には役立たないため、結果はセクション 4.1.3 と同じです。

### 4.3 VLAN の統合 (IEEE802.1Q)

#### 4.3.1 VLAN とは

VLAN は、フレーム ヘッダのプライオリティコード ポイント フィールドを使用して仮想ネットワーク セグメントを作成するのに役立ちます。これにより、パケットの優先順位を 8 段階に設定できます。IEEE 802.1Q 規格は、仮想ローカル エリア ネットワークがイーサネット インフラストラクチャ上でどのように動作するかを定義するネットワーク仕様です。このプロトコルは、イーサネット フレームのヘッダに 4 バイトの識別タグを挿入することによって動作します。このタグには一意の VLAN ID が含まれており、単一のネットワーク スイッチで物理トラフィックを分離して、分離された仮想ネットワークにすることがで

きます。この論理的な分離により、設計者はセキュリティと性能を強化し、ブロードキャストの輻輳を軽減できます。データが共有トランクリンクを介してスイッチ間を移動すると、スイッチはこれらのタグを読み取り、フレーム プリエンプション ロジックと連携することで、目的の優先順位で目的の仮想ネットワークにパケットを配信します

#### 4.3.2 この実装での VLAN の活用方法

この設計では、セクション 2.4 で説明したように、異なるパケット優先度を使用します。すべてのパケットは VLAN タグ 255 を使用しますが、アプリケーションの要件に応じて変更できます。CPSW は、VLAN タグに基づくパケットのフィルタリングと、VLAN タグのハードウェアによる変更もサポートしています。このアプリケーションは、ハードウェアで VLAN パケットの優先順位付けとフレーム プリエンプション ロジックを活用して、往復レイテンシを大幅に改善します

#### 4.3.3 テスト - 3 ベンチマーク

表 4-2. IEEE802.1Q を使用するベンチマーク

ノード	往復時間 (μs) (バックグラウンドトラフィック 512B)	テスト - 1 との平均改善度
ノード - 1 (最も近い)	最小値:13.83 最大値:67.00 平均値:44.89	91.23%
ノード - 2	最小値:27.18 最大値:194.79 平均値:125.71	80.86%
ノード - 3	最小値:40.77 最大値:194.76 平均値:190.02	71.72%
ノード - 4	最小値:61.27 最大値:399.11 平均値:251.20	63.43%
ノード - 5 (最も遠い)	最小値:74.63 最大値:453.00 平均値:303.64	58.76%

### 4.4 IET フレーム プリエンプションの統合 (IEEE802.1Qbu/Qbr)

#### 4.4.1 IET (分散した高速トラフィック) とは

IEEE 802.1Qbu および IEEE 802.3br 規格は連携して、分散した高速トラフィック (IET) フレームのプリエンブション メカニズムを定義します。この技術は、タイム センシティブ ネットワーキング (TSN) アプリケーションでタイムクリティカルなデータのレイテンシを短縮します。優先度の高いエクスプレス パケットがネットワーク スイッチに到着した際に、優先度の低いベストエフォート型のパケットがすでに送信されている場合、スイッチは優先度の低いフレームの送信を一時的に停止します。緊急のトラフィックは直ちに回線を通じて送信されます。タイムクリティカルなデータがキューから完全に解放されると、スイッチは断片化された優先度の低いフレームの送信を中断した箇所から再開します。このハードウェア レベルの最適化により、大量のデータ フレームが時間制約のある制御通信を妨げることを防ぎます。この結果、産業用ロボットや車載ネットワークのような自動化環境で、大規模で非効率的なガード バンドが不要になり、確定的な性能を確保できます。

#### 4.4.2 この実装での IET の活用方法

CPSW スイッチがすでに優先度の低いパケットを送信している最中に、優先度の高いパケットが CPSW 出力 FIFO に到着した場合、優先度の低いパケットの送信はプリエンブトされ、優先度の高いパケットが送信されます。これにより、ネットワークにおける重要な情報のタイムリーな配信が保証されます。このアプリケーションでは、P0 は高速トラフィックとしてマークされ、その他の 7 つの優先順位はすべてプリエンブト可能なトラフィックとしてマークされます。IET は、トラフィックの優先順位設定も含め、アプリケーションの `example.syscfg` ファイルから完全に構成できます。

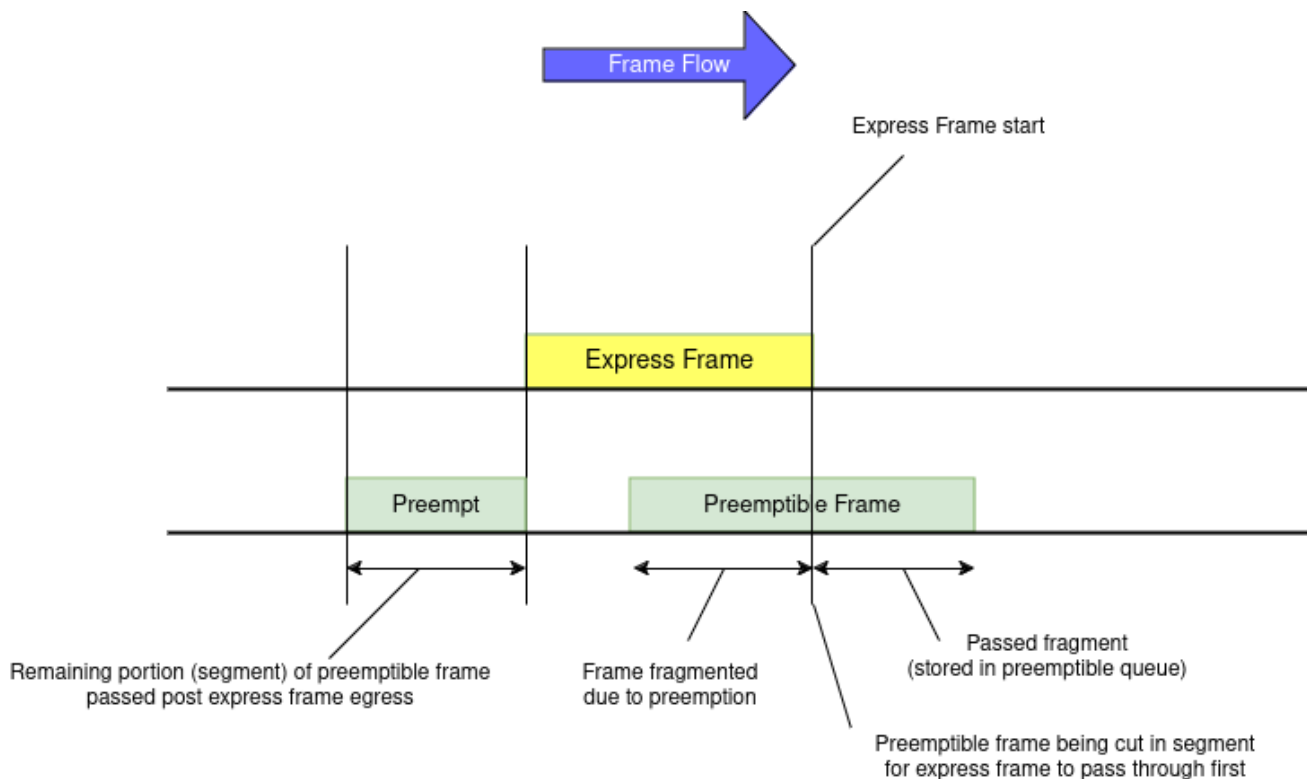


図 4-4. IET フレーム プリエンプション

4.4.3 テスト-4 ベンチマーク

IEEE802.1Q、IEEE802.1AS、IEEE802.1Qbu/Qbr を統合した後、全体的な往復レイテンシが大幅に改善されることが確認されました。

表 4-3. IEEE802.1AS、IEEE802.1Q、IEEE802.1Qbu/Qbr を使用したベンチマーク

ノード	往復時間 (μs) (バックグラウンドトラフィック 512B)	テスト-1 との平均改善度
ノード-1 (最も近い)	最小値: 8.44 最大値: 51.50 平均値: 29.74	94.19%
ノード-2	最小値: 23.60 最大値: 75.82 平均値: 49.82	92.41%
ノード-3	最小値: 40.05 最大値: 96.08 平均値: 69.10	89.72%
ノード-4	最小値: 57.13 最大値: 115.87 平均値: 85.86	87.50%
ノード-5 (最も遠い)	最小値: 70.67 最大値: 135.90 平均値: 101.95	85.48%

## 4.5 EST スケジューリングの統合 (IEEE802.1Qbv)

### 4.5.1 EST とは

スケジュールされたトラフィックの拡張 (EST) として知られる IEEE 802.1Qbv 規格は、時間認識シェーピング機 (TAS) を介してイーサネット ネットワークに時分割多重化メカニズムを導入します。

このプロトコルは、ネットワーク スイッチの出力送信キューに時間制御ゲート機構を実装することによって動作します。中央スケジューリングによって、これらのキューゲートの開閉タイミングが正確に制御され、ネットワークトラフィックが個別の繰り返しタイム スロットに分割されます。標準ベストエフォートトラフィックを特定の区間でブロックすることにより、優先度の高いタイムクリティカルなフレーム専用のワイヤ上に、競合のない明確なウィンドウが作成されます。この確定的なルーティングにより、キューイング遅延と緊急データのバケット ジッタが排除されます。その結果、航空宇宙通信や産業オートメーションなどの高度に調整された環境で、正確で予測可能な納期を保証します。

下の図は、ゲートがパケットの優先順位をマスクし、サイクル内の特定の時間帯において、構成された優先順位のパケットのみが送受信されるようにする方法を示しています。

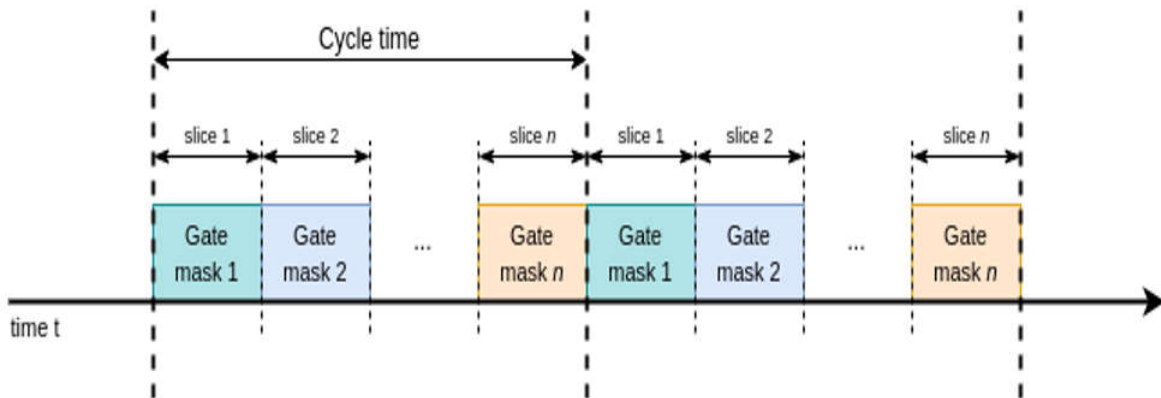


図 4-5. トラフィック スケジューリングの拡張

アプリケーションのこの部分はまだ実装およびテストされていません。これは今後の作業として予定されていますが、これを実装するためのソフトウェアとハードウェアのサポートはすでに存在します。

- EST ゲートのスケジューリングについては、すぐに使用できる SDK の例である [https://software-dl.ti.com/mcu-plus-sdk/esd/AM261X/latest/exports/docs/api\\_guide\\_am261x/EXAMPLES\\_ENET\\_CPSW\\_EST.html](https://software-dl.ti.com/mcu-plus-sdk/esd/AM261X/latest/exports/docs/api_guide_am261x/EXAMPLES_ENET_CPSW_EST.html) を参照してください

上記の例は、異なる優先度のトラフィックをスケジューリングするための CPSW の構成を示しています。

- すべてのノード間で時刻同期が完了すると同時に、テスト設定がパケットの挿入を開始することを確認します。これにより、ゲートの開閉がサイクル全体ですべてのノードで確実に一致します。
- EST トラフィック スケジューリングの統合後に期待できる結果は、セクション 4.3.3 で説明した結果よりもわずかに優れています。

## 5 まとめ

このアプリケーション ノートでは、AM26x デバイスを使用したデジチェーン型イーサネットトポロジの実装について詳しく説明し、そのようなシステムの構築、構成、およびベンチマーク測定に関する包括的なガイドを提供します。さまざまな IEEE TSN 規格について説明し、AM261x LaunchPad と CPSW サブシステムを組み合わせることで作成されたシミュレーションされたレイテンシ制限環境において、それぞれの統合が往復レイテンシにどのような影響を及ぼすかを説明しています。提案された設計は、標準イーサネットと比較して **90% 以上の改善**を実現し、性能、帯域幅、確定性を確保するとともに、特定のベンダ ロックインや専用のハードウェア / ソフトウェアの必要性を排除します。

**表 5-1. ベンチマークの概要**

ノード	標準フレームワーク (μs)	+ GPTP + VLAN (μs)	+ GPTP + VLAN + IET (μs)	+ GPTP + VLAN + IET + EST (μs)	全体的な改善 (%)
ノード - 1 (最も近い)	最小値: 8.42 最大値: 528.81 平均値: 511.96	最小値: 13.83 最大値: 67.00 平均値: 44.89	最小値: 8.44 最大値: 51.50 平均値: 29.74	将来の範囲	94.19%
ノード - 2	最小値: 23.60 最大値: 803.47 平均値: 656.64	最小値: 27.18 最大値: 194.79 平均値: 125.71	最小値: 23.60 最大値: 75.82 平均値: 49.82	将来の範囲	92.41%
ノード - 3	最小値: 37.776 最大値: 816.82 平均値: 671.89	最小値: 40.77 最大値: 194.76 平均値: 190.02	最小値: 40.05 最大値: 96.08 平均値: 69.10	将来の範囲	89.72%
ノード - 4	最小値: 53.88 最大値: 830.17 平均値: 686.91	最小値: 61.27 最大値: 399.11 平均値: 251.20	最小値: 57.13 最大値: 115.87 平均値: 85.86	将来の範囲	87.50%
ノード - 5 (最も遠い)	最小値: 69.128 最大値: 844.96 平均値: 702.20	最小値: 74.63 最大値: 453.00 平均値: 303.64	最小値: 70.67 最大値: 135.90 平均値: 101.95	将来の範囲	85.48%

- 予測可能なレイテンシ スケーリング: CPSW3G スイッチのハードウェア アクセラレーションによる VLAN 間ルーティングは、カットスルー スイッチングにおいて、ホップあたり 7.6 マイクロ秒の一貫した一方向レイテンシを実現します。この線形スケーリングにより、一般的なモーション コントロール要件 (片道 < 200μs) の範囲内で、10 ~ 15 ノードのチェーンに対して正確なレイテンシ バジレットを実現できます。
- フレーム プリエンプションによりヘッドオブライン ブロッキングを排除: IET (IEEE 802.1Qbu) は、バックグラウンドトラフィック負荷が大きい場合、ワーストケースのレイテンシを約 85% 短縮します。プリエンプションを使用しない場合、512 バイトのフレームによって、5 番目のノードに最大 473 マイクロ秒の最悪の往復レイテンシが発生します。プリエンプションを使用すると、これは約 136 マイクロ秒に低下し、337 マイクロ秒の短縮になります。これにより、同じ物理ネットワーク上で、異なる重要度のトラフィック (タイムクリティカルな制御トラフィック + ベストエフォート型の診断トラフィック) を同時に処理することが可能になります。
- 40 ナノ秒未満の時刻同期: ハードウェアタイムスタンプ付き gPTP (IEEE 802.1AS) は、すべてのノード間で 40 ナノ秒未満の同期精度を実現し、協調的なセンサ サンプリングと時間ベースのトラフィック スケジューリングを可能にします。この精度は、ソフトウェアベースの NTP より 3 桁優れており、最も要求の厳しいモーション コントロール アプリケーションにも十分対応できます。
- トランジット パケットの CPU オーバーヘッドはゼロ: CPSW3G スイッチは、すべてのパケット転送、SA/DA スワップ、およびプリエンプションをハードウェアで完全に実行します。CPU 使用率はトラフィックが多い場合でも 12% 未満に抑えられ、処理能力の 88% がアプリケーション ロジック、センサ フュージョン、および制御アルゴリズムに利用できるようになります。
- 性能は、各サイクルの終わりに小さなガード バンドを使用することでさらに向上させることができます (たとえば、新しいパケットが送信されず、ネットワークにすでに存在するパケットが伝搬を完了する時間を与え、新たな輻輳を回避する約 100μs の時間)。
- ハードウェア タイムスタンプをサポートする PHY を使用することで、時刻同期の精度をさらに向上できます。PHY のタイムスタンプを取得し、T1、T2、T3、T4 の値を取得すると、GPTP ソフトウェア スタックは、パケットが CPSW サブシステムに入ったときにタイムスタンプを割り当てるのではなく、PHY 境界からこれらの値をフェッチするため、オフセット計算の精度が向上します。

## 6 課題とデバッグに関する検討事項

このセクションでは、システムの堅牢性と信頼性を保証するための一般的なデバッグ戦略、アーキテクチャの制限、およびベストプラクティスについて取り上げます。

### 6.1 ネットワークトポロジの検証

- **リンクの整合性チェック:** 各ノードが物理的に接続されており、イーサネット PHY が正しくリンクされていることを確認します。これは、LED または PHY の応答ログおよび MAC ポートのリンクアップログを監視するなどのソフトウェア方式を使用して検証できます。デジチェーン接続されたトポロジでは、各ノードの外部 MAC ポートが次のノードに接続されているため、すべてのアップストリームおよびダウンストリーム接続が適切に確立され、安定していることを確認します。
- **スイッチ構成の確認:** CPSW3G のアドレスルックアップエンジン (ALE) エントリが、トラフィックの静的転送用に正しく設定されていることを確認します。転送ルールを設定を誤ると、フレーム損失や不適切なルーティングにつながる可能性があります。アプリケーションの `example.syscfg` ファイルに、MAC ポートとホストポートのすべての設定が正しく行われていることを確認します。
- **ループ防止:** デジチェーン接続されたイーサネットネットワークは、ノード間に複数のパスが誤って確立されている場合、ネットワークループの影響を受けやすくなります。これにより、ブロードキャストストームやネットワークの輻輳が発生する可能性があります。正しいパスのみがアクティブであることを確認し、必要に応じてループ検出のソフトウェアチェックを実装します。

### 6.2 トラフィックフロー分析

- **パケットキャプチャ:** ネットワークアナライザ (Wireshark など) を使用して、各ノードの外部 MAC ポートでパケットをキャプチャし、適切な転送と正しいペイロードを確認します。
- **トラフィックパターン:** ノード間のトラフィックパターンを観察し、転送が意図したとおりに動作していることを確認します。ドロップされたパケットや誤ルーティングされたパケットを検索し、すべての特定用途向けのプロトコル (UDP、未加工イーサネットなど) が適切に処理されていることを確認することが重要です。AM26x 側でパケットのドロップが発生した場合は、CPSW 統計情報を使用してドロップとその根本原因を確認します。詳細については、『[AM26x Academy - イーサネットデバッグガイド](#)』を参照してください。

### 6.3 ホストポートトラフィックモニタリング

- **割り込みとイベントの監視:** パケットの割り込みペース調整 (バッチ処理) を無効にし、統計割り込み優先度を下げます

### 6.4 PHY リンク管理

- AM261x-LP にはオンボード PHY が搭載されていません。使用する PHY が正しく構成されていることを確認します。ブートストラップ設定を使用する場合は、必ず、ストラップされた PHY 設定を操作するようにアプリケーションが構成されていることを確認してください。TI 以外の PHY を内蔵している場合は、PHY ドライバ統合ガイドに従って PHY を正しく設定してください ([https://software-dl.ti.com/mcu-plus-sdk/esd/AM261X/latest/exports/docs/api\\_guide\\_am261x/enetphy\\_guide\\_top.html](https://software-dl.ti.com/mcu-plus-sdk/esd/AM261X/latest/exports/docs/api_guide_am261x/enetphy_guide_top.html))
- リンクネゴシエーションが不適切である、二重設定の不一致、速度が不適切であるなどの PHY 関連の問題によって、不安定になる可能性があります。リンクステータス、自動ネゴシエーションプロセス、速度 (10/100/1000Mbps)、二重 (半二重 / 全二重) などの設定を確認します。詳細については、[https://software-dl.ti.com/mcu-plus-sdk/esd/AM261X/latest/exports/docs/api\\_guide\\_am261x/enetphy\\_link\\_config\\_top.html](https://software-dl.ti.com/mcu-plus-sdk/esd/AM261X/latest/exports/docs/api_guide_am261x/enetphy_link_config_top.html) を参照してください

### 6.5 パケットが次のノードに転送されません

ALE テーブルに、構成された VLAN タグのエントリが正しいメンバーシップマスクとともに存在することを確認します。ポートメンバーシップマスクは、パケットがその後どのように送信されるかを決定します。

### 6.6 エラー処理と再試行

上記のテストで使用されたアプリケーションは再試行メカニズムを実装していませんが、マルチホップのデジチェーンネットワークでは、ノードが送信障害 (タイムアウトやチェックサム障害など) を検出した場合にパケット再送信方式を採用する必要があります。

## 6.7 優先度の高いパケットのレイテンシまたはジッタが大きい

MAC ポートの CPSW 統計情報の IET 統計情報を確認します。パケットが断片化されてステッチ バックされており、IET が正しく構成されていることを確認します。CPSW ゼロ以外の統計には CCS gel スクリプトを使用するか、CCS 式ウィンドウに式 (CSL\_Xge\_cpswRegs \*) 0x52820000 を手動で追加し、統計を監視します。

## 6.8 gPTP が同期していません

リンク ステータス確認します。両方のポートでリンクがアップになっていることを確認してから、ポートの状態を確認します。クロック オフセットを確認します。オフセットが大きい場合 (>100 $\mu$ s)、タイムスタンプの問題を示している可能性があります。gPTP マルチキャストが転送されていることを確認します。ALE テーブルで 01:80:C2:00:00:0E エントリを確認します。

## 7 参考資料

- [アプリケーションリンク](#)
- [AM26x Academy](#)
- [AM26x デバイスでのネットワーク接続の導入](#)
- [MCU+SDK の Enet-LLD ドライバ](#)
- [Enet-LLD API ガイド](#)
- [PHY 統合ガイド](#)
- [PHY リンク ガイド](#)
- [LwIP ガイド](#)
- [MCU+SDK イーサネット資料](#)
- [IEEE802.1AS-20205](#)
- [IEEE802.1Qbu-2016](#)
- [IEEE802.1Qbv-2015](#)
- [IEEE802.1Q](#)

## 重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日 : 2025 年 10 月