

屋内測位 WLAN システム用のサブナノ秒時間同期プロトコル

研究代表者 トラン ティ タオ グェン九州工業大学大学院情報工学研究院 研究職員

1 はじめに

無線システムは、その有用な応用により、ますます重要になっています。これらのドメインの重要な課題の1つは、時刻の同期です。より最近では、さらに正確な時刻の同期が必要であるという屋内測位無線 LAN システムのアイデアが、世界中の研究者から注目を集めています。

全地球測位システム (GPS) は、スレーブ (SL) が GPS 衛星を介して同期情報を受信できる技術です [1]。しかしながら、GPS 衛星への厳密な見通し環境が必要となるため、GPS は常に信頼できる時刻源とは限りません。さらに、見通し外環境での GPS の導入は、コストが高すぎます。Network Time Protocol (NTP) [2] は、ネットワークを介したコンピュータ同期のための一般的なプロトコルです。30 年以上にわたって開発され、広く採用されています。NTP は、ユーザーデータグラムプロトコル (UDP) メッセージに基づく階層化されたマスタースレーブ型 (MS-SL) 技術であり、MS と SL のクロックを階層順に同期することで、多くの SL クロックが1つの MS クロックに同時にアクセスするのを防ぎます。NTP 同期は、ミリ秒レベルの時刻同期精度を提供します。NTP の新しい代替手段は、IEEE 1588 としても知られる PTP です。PTP では、タイムスタンプ情報を運ぶメッセージがネットワーク内の MS と SL の間で交換され、クロックが同期されます。IEEE 1588 PTP は、サブマイクロ秒レベルの時刻同期精度を提供します。さらに、PTP メソッドの実装は GPS メソッドの実装よりも単純であるため、コスト効率が向上します。ただし、PTP 手法は、サブナノ秒レベルの同期が必要とされる測位システムの要件を満たしていません。したがって、このプロジェクトでは、測位システムに必要な1ナノ秒の高精度の時刻同期を提案します。

「Internet of Things」時代の到来により、キーテクノロジーとしてのワイヤレスロケーションテクノロジーは業界全体の注目を集め、国内および国際的に様々な研究が行われています。ワイヤレスロケーションテクノロジーは、軍事防衛、交通管理、災害救助、自動化ワークショップ、および物流管理などの多くの分野での利用が期待されています。高精度のワイヤレスロケーションテクノロジーの需要性は、今後数年間、広域におけるデシメートル (10cm) 精度のリアルタイムロケーションまたはリアルタイムセンチメートル精度の精密測位技術は、都市部において急速な成長が期待されています。既存の WLAN ポジショニングテクノロジーは、主に信号強度 (RSSI) ポジショニングに基づいています。この技術は、信号伝搬環境に大きく影響されます。本技術の測位精度は高くなく、誤差は通常 20 メートルを超えてしまいます [3]。これは、多くの高精度位置測位の実用化のニーズを大きく上回っています。Ekahau 2009 は、業界をリードする WLAN 測位精度を得るために信号フィンガープリント法を使用しましたが、測位精度のメートルレベルの改善は、理想的な状況に限られています。英国の Ubisense とドイツの Nanotron は、デシメートルまたはセンチメートルレベルの高精度無線測位ソリューションを提供しています [4]。ただし、両社ともソリューションは一般的な WLAN 信号に基づいてではなく、UWB (超広帯域) やスペクトラム拡散チャープ (線形周波数変調スペクトラム拡散) などの産業用無線通信技術に基づいています。

一方、現在の商用 WLAN デバイスまたは WLAN チップは、信号到着時間に基づく時刻同期の高精度化はサポートしていないため、通常の無線端末では使用できません。したがって、提案されている高精度時刻同期は、産業用 WLAN 向けの高精度測位システムをサポートするためにも必要です。

このプロジェクトでは、位置推定システムに広く使用されている PTP 同期の精度を 30 センチメートルの位置誤差の推定に必要な1ナノ秒に高めるプロトコルを提案します。

2 時刻同期と位置推定

2-1 時刻同期

(1) IEEE1588

この IEEE1588PTP はマルチキャスト対応ネットワークを介して接続されるクロックを同期させるための時刻同期プロトコルである。その際、Master と Slave 間で時刻情報を相互に通信し、Slave 内で集められた時刻情報からオフセット値(Slave から見た Master の時刻のずれ)を算出する。このオフセット値分だけ Slave の時刻を補正することによって、Slave の時刻を Master の時刻へと同期させることができる。図 1 に PTP の基本的なプロトコルを示す。SYNC, Follow up, Delay Request, Delay Response メッセージの交換によって、時刻情報 t_0 , t_1 , t_2 , t_3 を Slave が受け取り、式(1),(2)を計算することによって Master と Slave 間の伝搬遅延 (Delay) とオフセット値(Offset)を求め Slave の時刻の補正を行う。ここで、時刻情報 $t_0 \sim t_3$ の説明を行う。時刻 t_0 は Master が SYNC を送信した時刻であり、時刻 t_1 は Slave が SYNC を受け取った時刻である。また、時刻 t_2 は Slave が Delay Request を送信した時刻であり、時刻 t_3 は Master が Delay Request を受信した時刻である。

$$Offset = \frac{(t_0 - t_1) - (t_2 - t_3)}{2} \quad (1)$$

$$Delay = \frac{(t_0 - t_1) + (t_2 - t_3)}{2} \quad (2)$$

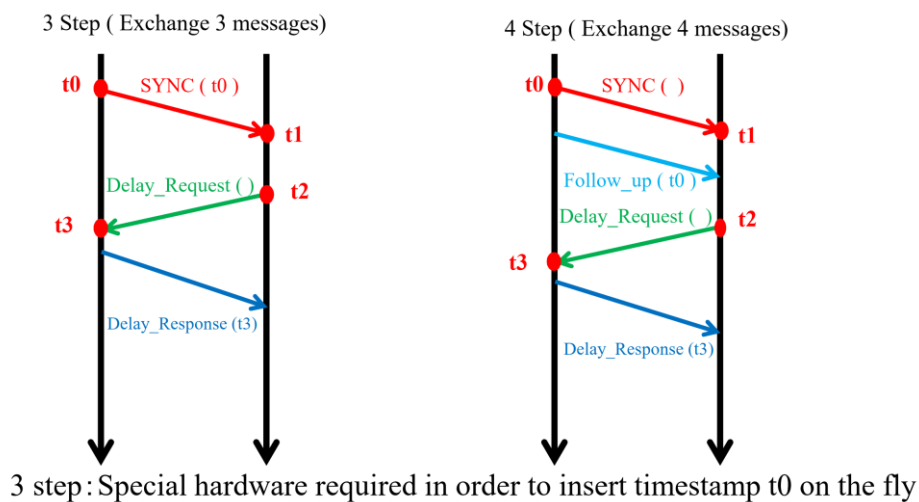


図 1 IEEE1588PTP の基本プロトコル

(2) 産業用無線向けの時刻同期プロトコル

2-1(1)において説明した PTP の基本プロトコルはタイムスタンプ t_0 を SYNC メッセージに乗せる 3step 方式と SYNC を送った後に Follow up メッセージで Slave に送る 4step 方式の 2 つの方式が存在する。これら 2 つを比較すると 4step 方式においてはタイムスタンプ t_0 を送るために Follow up メッセージが必要となるために、通信周期の延長および通信プロトコルの変更が必要となる。通信周期は時刻同期精度に大きく影響を与えるため、産業用無線 LAN においては 3step 方式が適している。そのため、以前専用のハードウェア処理や産業用無線の通信プロトコルに依存しない、IEEE1588 を基にした Factory Automation (FA) 向けの時刻同期プロトコルが提案されている。

FA 向けの時刻同期プロトコルの通信フローを下の図 2 に示す。図 2 で示した 4step 方式での PTP の通信フローでの SYNC メッセージと Delay Response メッセージを一つのフレームに集約したものである。これによって、4step 方式の通信フローであるが 3step 方式と同様のメッセージのやり取りを行うことができる。そのため、専用のハードウェアの実装が必要なく産業用無線での通信プロトコルの実装が可能である。また、時刻同期のために利用するフレームが 3 つに削減できるため通信エラーによる同期エラーが起きる確率の減少が可能である。

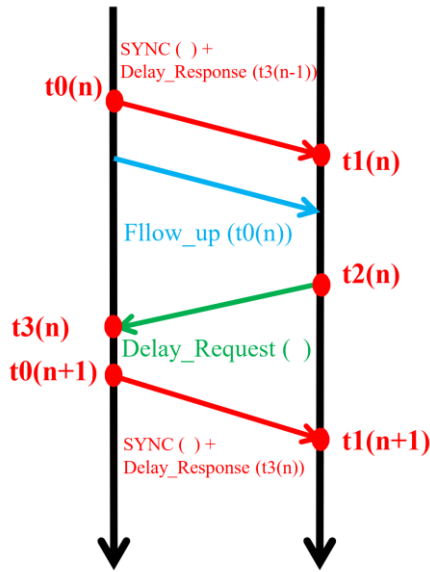


図2 FA 向けの時刻同期プロトコル

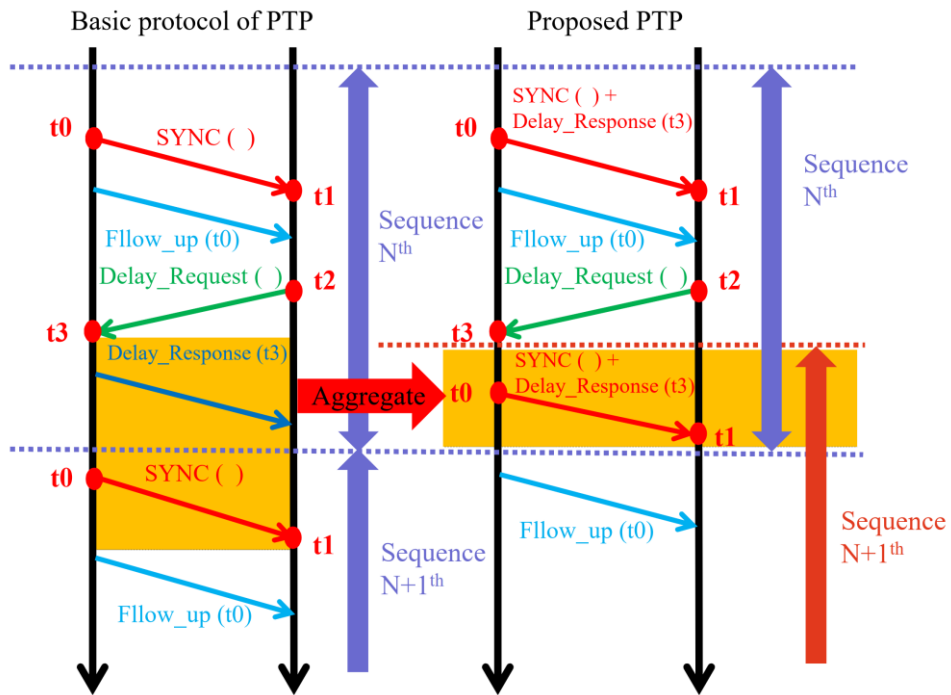


図3 IEEE1588PTP と FA 向けの時刻同期プロトコルの通信フローの比較

2-2 位置推定

(1) 信号到来時間

下の表 1 は端末間の距離を測定する手法に対する測定精度，ハードウェアコスト，計算コストの評価を示したものである [5]．信号到来時間 (Time of Arrival, ToA) [6] は各ノード間の距離を信号到来時間 (信号伝搬時間) によって測定する手法である．表 1 から，ハードウェアコストや計算コストのデメリットがあるものの，測定手法として ToA が最も高い精度が得られる．提案システムにおいては高精度の位置推定が求められることからこの ToA による端末間の距離の測定を採用している．

ToA における測定手順についての説明を行う。ToA においては送信端末と各受信端末の一方向の信号伝搬時間を用いる。送信端末の信号の発信時刻を t_s 、受信端末が信号を受信した時刻を t_r 、光速を c 、送信端末と受信端末間の距離を d としたとき下の式 (3) から端末間の距離を計算によって求めることができる。この式は信号伝搬時間を $t_r - t_s$ 求め、この時間の間に信号が進む速さ (光速 c) を乗算することによって信号が進んだ距離 (端末間の距離 d) が求まる。しかし、式 (3) では送信端末と受信端末間で時刻が完全に同期されている理想条件のもとの式である。現実においては時刻同期のずれが端末間に存在するため、実際には式 (4) のように時刻同期のずれによる誤差を含んだ推定距離 d' が算出される。式(4)における項 $c\Delta t$ から端末間の時刻同期誤差が推定距離に与える誤差は計算によって求めることができる。端末間の時刻同期誤差が $1[\text{ns}]$ の時に、時刻同期誤差が推定距離に与える誤差は計算により約 $3[\text{m}]$ と求まる。わずかに $1[\text{ns}]$ の時刻同期誤差においても、推定距離に与える影響は大きく $[\text{m}]$ オーダでの誤差が生じる。そのために、ToA 方式を用いる際には送信端末、受信端末間で高精度の時刻同期を行わなければ高精度の距離推定を行うことは不可能である。

$$d = c(t_r - t_s) \quad (3)$$

$$d' = c(t_r - t_s) + c\Delta t \quad (4)$$

表 1: 物理的測定手法の比較

物理的測定手法	精度	ハードウェアのコスト	計算コスト
RSS (Distance)	Median	Low	Low
ToA (Distance)	High	High	Low
Single Neighbor	Low	Low	Low
Multiple Neighbor	Low	Low	Low

(2) 多変測量

多変測量 [7]は固定された受信端末の座標と被測位端末である送信端末間の信号の伝搬時間から得られる距離を用いて、位置推定を行う手法である。提案システムにおいては第 2.2.1 節において説明した ToA による距離推定を基にして多変測量を行い位置推定を行う。

下の図 4 を使い、多変測量を用いた位置推定の説明を行う。各固定端末の座標 $(x_0; y_0)$, $(x_1; y_1)$, $(x_2; y_2)$, $(x_3; y_3)$ はの座標は既知であるため、各固定端末からの被測位端末の距離 d_0, d_1, d_2, d_3 を ToA の式 (5)~(8) により求めることにより各端末ごとに存在が推定されるエリアが座標上に求まる。図 4 では各端末ごとの存在が推定されるエリアが重なったところに被測位端末の位置を推定している。現実においては、三次元空間であるので、 z 軸座標も合わせて被測位端末の推定位置座標 $(x_p; y_p; z_p)$ を用いた式 (9) から位置推定を行う。

$$d_0 = c(t - t_0) + c\Delta t \quad (5)$$

$$d_1 = c(t - t_1) + c\Delta t \quad (6)$$

$$d_2 = c(t - t_2) + c\Delta t \quad (7)$$

$$d_3 = c(t - t_3) + c\Delta t \quad (8)$$

$$d_0 = \sqrt{(x_n - x_p)^2 + (y_n - y_p)^2 + (z_n - z_p)^2} \quad (9)$$

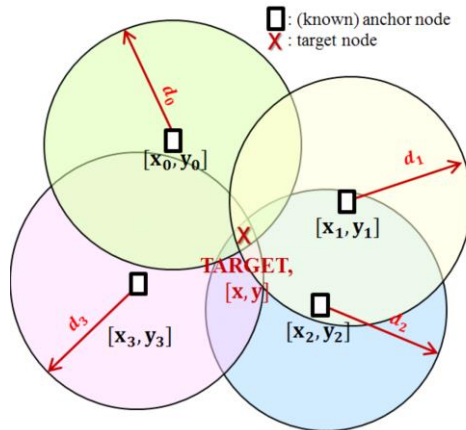


図4 ToA を用いた多変測量

2-3 平均化

まず、時間情報を使用して各ノードのクロックを同期します。これらの時間情報は、PTP プロトコルに基づいて MS と SL の間で送受信されます。PTP 同期は、図 5 のように SL のハードウェアで処理されます。このプロセスの後、ソフトウェア計算によって平均化が行われます。最小二乗法 (LSM) を使用した平均化は、以下の式を使用します。

$$Average_Offset = \alpha \times (t_3^{MS})_N + Offset_{initial}$$

ここでは、平均オフセットは MS と SL の間の時間差、時間オフセットとも呼ばれ、N は 1 つの平均化方法で使用される PTP シーケンスの数、 $(t_3^{MS})_N$ は N 番目の PTP シーケンスのタイムスタンプ $(t_3^{MS})_N$ 、 α は時間領域でのクロックドリフトを示す。

次に、平均オフセットを取得できるように、同期プロセス (期間) が多数のシーケンスで繰り返されます。推定時刻同期オフセットの平均は、PTP シーケンスの数を増やすことでナノオーダーの精度を達成できますが、時間あたりの平均の数は減少します。

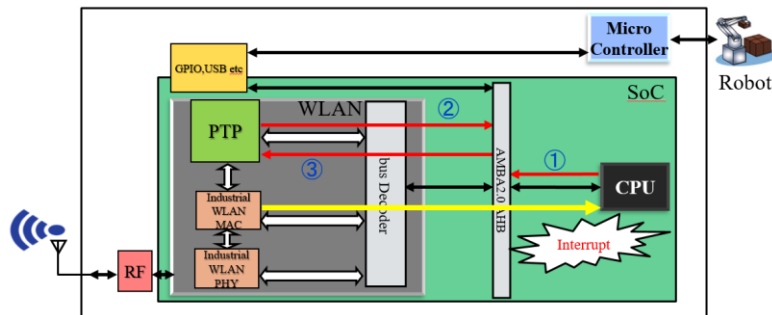


図5 ハードウェア/ソフトウェアの共同設計

3 提案する高精度時刻同期手法 - ソフトウェアによるアベレージング処理

2.1.(2) において説明した FA 向けの時刻同期プロトコルはハードウェアでのみの処理である。このハードウェアのみで行われている時刻同期にソフトウェアによる最適化処理を加えることでより時刻同期精度を高める。本論文においては最適化処理手法として近似モデル関数を一次関数とした最小二乗法を用いる。また、近似によって、下の図 6 で示される高精度時刻オフセットを得ることによって高精度時刻同期を実現する。

図 7 にはソフトウェアによる最適化処理の流れを示している。図 7 中の t_3, T_{offset} は図 2, 図 3 内のものと共通であり、 t_3 は Master からの Delay Response メッセージを Slave が受け取った時刻、 T_{offset} は PTP により式 2.1 から算出されたオフセット値である。

ハードウェアで実装された PTP が 1 シーケンス行われるごとに式 2.1 からオフセット値が算出される。オフセット値が算出後、その時点で行われているシーケンスでのタイムスタンプ t_3 とオフセット値 T_{offset} は CPU へ送られる。PTP のシーケンスを N 回行い、ソフトウェア内で時刻同期情報 (t_3, T_{offset}) が N 個集まることでソフトウェアの最適化処理が始まる。ソフトウェアでの N 個の時刻同期情報をもとに最適化することで、新しくオフセット値が算出される。ソフトウェア処理によって算出された新しいオフセット値はハードウェアに送られ、ハードウェアによって時刻情報のアップデートが行われる。

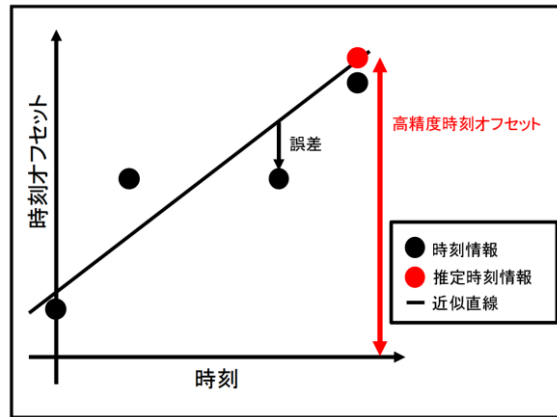


図 6 近似によって得られる高精度時刻オフセット

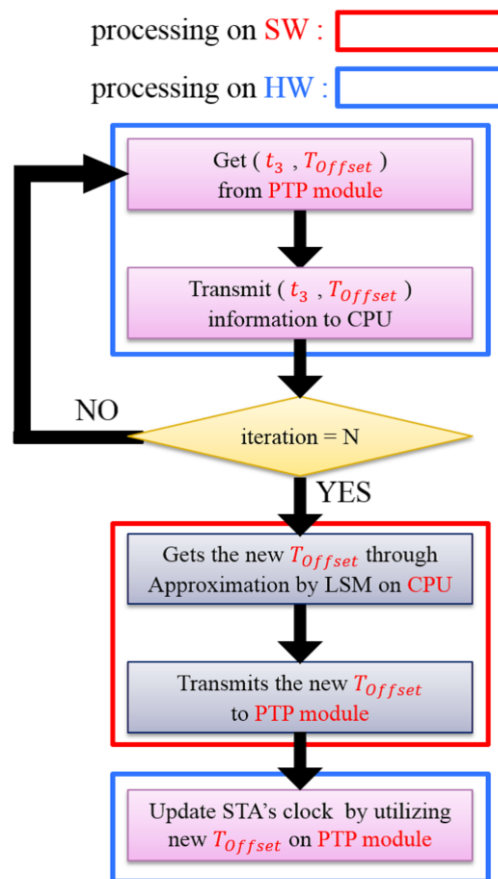


図 7 時刻同期のための最適化の流れ

4 検証結果

4-1 最小二乗を用いた時刻同期精度向上手法とその結果

シミュレーションを行い、平均化による高精度時刻同期を実現します。

図8に平均化による高精度時刻同期の概念図を示します。1つ1つのサンプルはハードウェア実装されるPTPモジュールから得られるオフセット推定値で、数十ns～数百nsの誤差を含むことを想定しています。（実際のハードウェア実装は第2のフェーズで行います。）1つ1つのサンプルが数十ns～数百nsの誤差を含んでいたとしても、それらをまとめてソフトウェアにて多項式近似処理（これを平均化と呼びます）を行うことで数nsにまで追い込むことが可能です。

図9に平均化による高精度時刻同期のシミュレーション結果を示します。シミュレーション上では目標とする数値が得られました。単位はnsです。

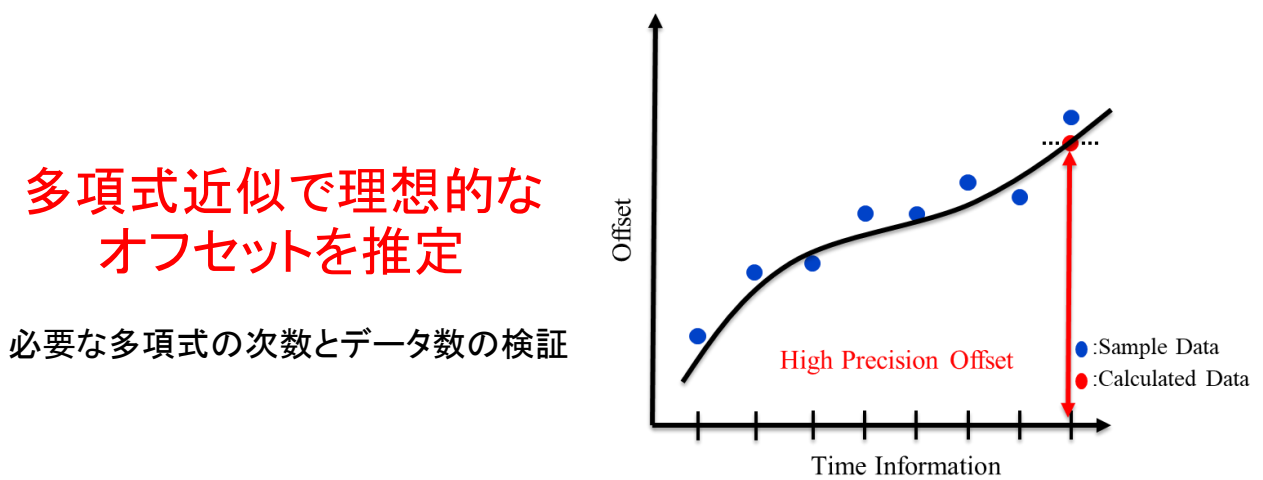


図8 平均化による高精度時刻同期の概念図

近似方法	100点	200点	500点
一次近似 最大誤差	0.56066	0.37367	0.22837
二次近似 最大誤差	0.62367	0.38931	0.26888
三次近似 最大誤差	0.76968	0.38614	0.32968

図9 平均化による高精度時刻同期の結果

4-2 FPGA ハードウェアでプロトコル

本章では、提案システムのFPGA実装検証を行うために使用するFPGAボードや提案システムの検証対象となるロボットについて述べ、その検証結果について述べる。

使用するボードは以下の図10に示すように、提案システムの実装を行うFPGAボードとなるZC706と無線システムの実装を行うSDRボードであるADRV9371からなる。

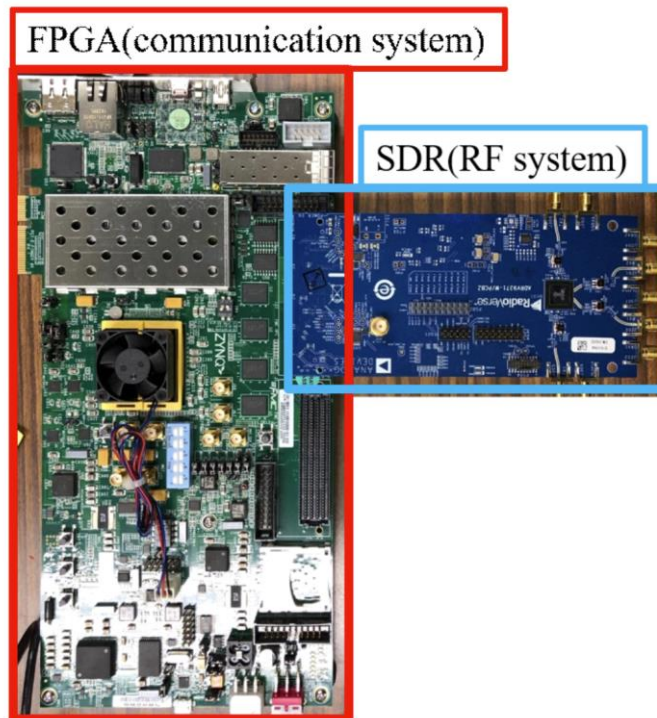


図 10 実装検証に使用したボード

FPGA ボードを使用した提案システムの実装を図 11 のように検証します。検証の最初のステップとして、AP と STA をワイヤで接続し、PHY 層の出力である波形信号を送信します。

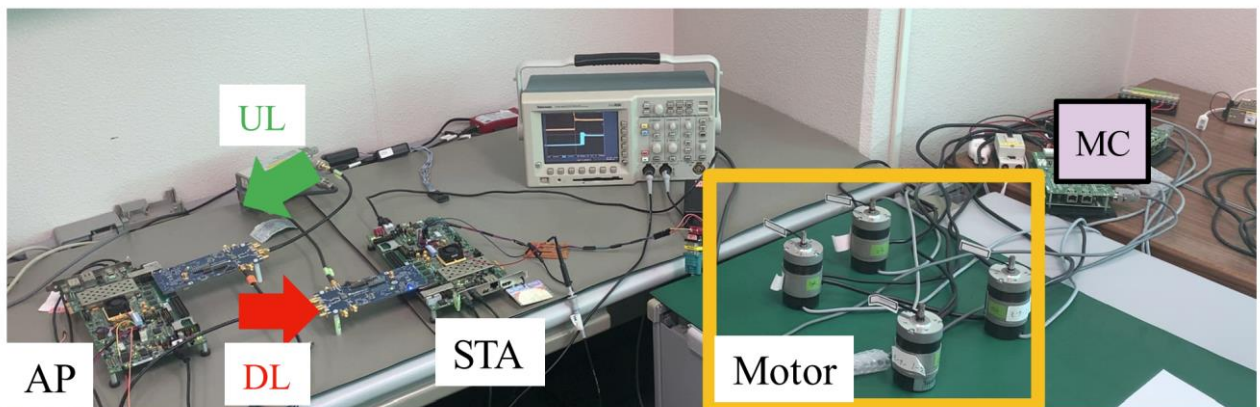


図 11 実装検証に使用したボード

PTP 評価では、AP と STA が SYNC、DL、および UL 通信プロトコルの送受信中に時間を同期できることを確認するために、パルスが一定の間隔で出力されます。オシロスコープは、図 12 のように AP と STA のこれらのパルス出力を実行します。この PTP 検証結果では、SDR プラットフォーム上の実際の PHY と MAC を含むシステム全体で PTP 時間同期が評価されます。

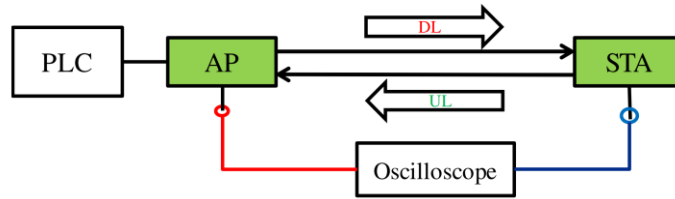


図 12 実装検証に使用したボード

図 13 では、時間遅延は 80 ns であり、ジッタは 120ns 未満です。したがって、時間同期は 80ns から 200ns です。この結果はナノ秒レベルの目標を達成することができ、実際の無線システムのためにシステムを改善するための重要なステップです。さらに、4-1 の結果から、提案された平均化方法を実行すると、時間同期を 1ns 未満に達成できます。

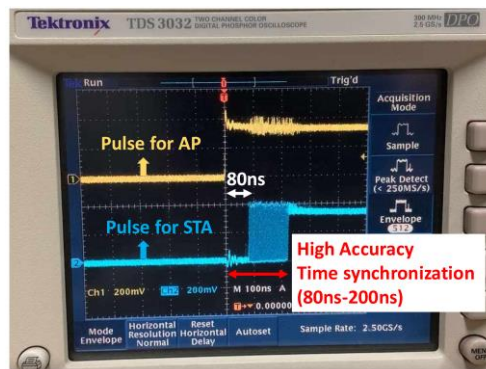


図 13 実装検証に使用したボード

5 まとめ

このプロジェクトでは、精度を向上させるために、平均化プロセスを使用した時間同期方法が提案されています。提案手法は無線 LAN システムで検証済みです。時間同期の精度は、平均化プロセスの PTP の時間オフセットによって計算されます。結果から、時間同期の平均誤差は 1ns 未満を達成できます。産業用無線 LAN システムの AP と STA の PTP 同期は FPGA で検証されています。オシロスコープでの PTP の結果は 80ns から 200ns です。PTP の結果は、提案された方法で平均化を使用することによって改善できます。アンテナによる検証も今後の作業と考えています。

【参考文献】

- [1] Z. Li, J. Hao, J. Li, and Q. Zhao, “High precision clock synchronization and control based on GPS,” in Proc. ICECE, pp.1125–1128, June. 2010.
- [2] D.L. Mills, U. Delaware, *et al.*, “Network time protocol version 4: protocol and algorithms specification,” Network Working Group Request for Comments: 5905, June 2010.
- [3] O.S. Oguejiofor, *et. al.*, “Outdoor localization system using RSSI measurement of wireless sensor network,” IJITEE, vol. 2, Issue 2, pp. 1–6, Jan. 2013.
- [4] Sensera 3D IoT sensor positioning solution, Sept. 2019, <https://nanotron.com/EN/2019/09/16/sensera-partners-with-autodesk-to-exhibit-3d-iot-positioning-solution/>
- [5] Y. Liu and Z. Yang, “Chapter 2: Physical Measurement,” in Location, Localization, and Localizability: Location-awareness technology for Wireless networks, pp. 9–25.

- [6] Chen Chen, Yi Han, Yan Chen, and K. J. Ray Liu, “Applications Corner: Indoor Global Positioning System with Centimeter Accuracy Using Wi-Fi” IEEE Signal Processing Magazine, pp. 128–134, November 2016.
- [7] 徳永 雄一, ” 無線センサネットワークにおける Multilateration 位置推定法の精度向上手法”, 平成 19 年 10 月 2 日

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Software Defined Radio Development of Accurate Time Synchronization for Industrial WLAN Systems	46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2020)	2020 年 10 月
Design of WLAN System for Industrial Communication	2020 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA 2020)	2020 年 12 月
Null Beamforming to Self in Cooperative MIMO for Full-Duplex System	2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2021)	2021 年 5 月
Live Demonstration: Null Beamforming to Self in Cooperative MIMO for Full-Duplex System	2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2021)	2021 年 5 月
Industrial WLAN System with Accurate Time Synchronization on Software Defined Radio	2021 IEEE International Conference on Communications (ICC WS 2021)	2021 年 6 月