

次世代のM2M通信(CPS)を支える時空間同期技術

井戸哲也 (NICT)

プロジェクトリーダー
XGMF 時空間同期プロジェクト

時空間同期プロジェクト

Project Leader 井戸 哲也 (NICT)



•目的

な産業分野（縦断的セクター）でモバイル通信の応用を拡大するため、イベントの「時刻」と「位置」を正確に取得・共有・記録する

•役割:

- 技術議論の場を提供
- ユーザーのニーズに合わせた精度・更新頻度の仕様検討
- 技術発展の促進

Outlook:

- フィジカル空間とサイバー空間の両方で活用
→ CPS（サイバーフィジカルシステム）の実現に貢献

Sub leader



原 基揚
(NICT)



野村 忠之
(村田製作所)



西山 公太
(NTT)



志賀信泰
(NICT)

- Aging
- Shortage of labor

労働力不足が著しい分野例

	ソリューション	
運輸 	ロードサイドインフラも利用した自動運転	物理空間でのセンシングとアクチュエーション アクチュエーションはセンシングデータに基づいてマシンが意思決定
建設 	自動建設機械	
ケアサービス (高齢者, 子供, 医療) 	24時間365日の状態モニタリングと注意喚起	

5Gではセンサーとアクチュエーターの間で判断するのにまだ人間が大きく介在
(例: リモートにいる人が判断)

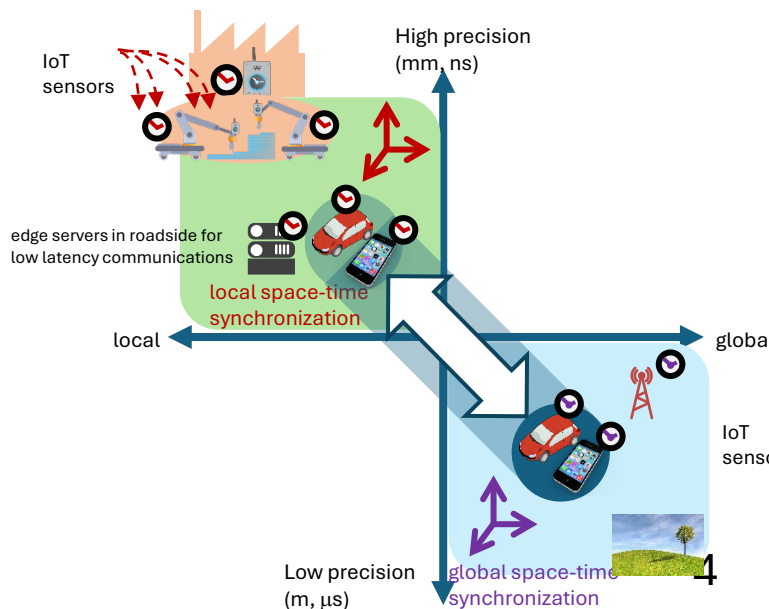
6Gでは機械が判断。現場に近いエッジコンピューティングによる判断が理想

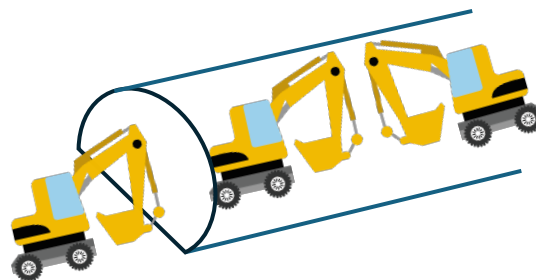
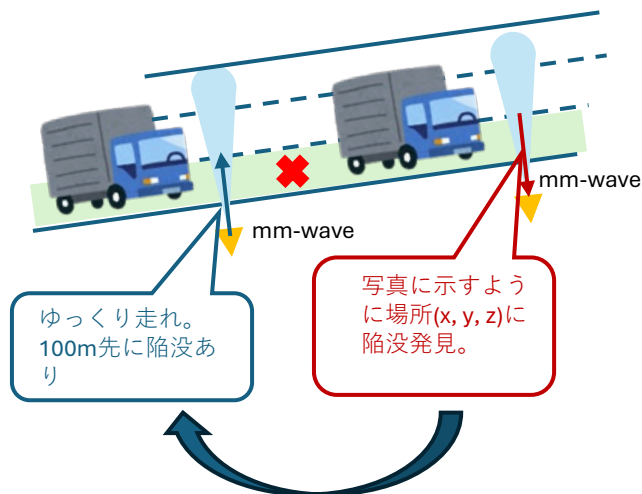
	センサー	判断	アクチュエーター
5G	機械	人間	機械
6G	機械	機械	機械

What is necessary for machines to make decisions autonomously? XGMF

- 5Gでは人間がセンシングと制御の「通訳」だった
- **信頼出来る時刻と場所をセンサーとアクチュエーターが共有出来ることが自律的な判断や動作には必要**

UTCやGNSSだけでなく、柔軟・可用・高精度なローカルな時空間情報も必要
→ 時空間同期の共通フレームワークの実現





トンネルの中で複数の建設機械が干渉せず。協調作業



時間と空間の把握のために必要な技術的イネーブラー

- 小型・低価格な原子時計（安定なクロック）
 - 双方向無線干渉法（同期＆測距）
- を活用したクラスタークロックシステム（レジリエンスと信頼性の向上）

分散型時刻同期アーキテクチャ

従来型：

リーダー・フォロワー方式

(リーダーに依存、遅延誤差積算、単一障害点)

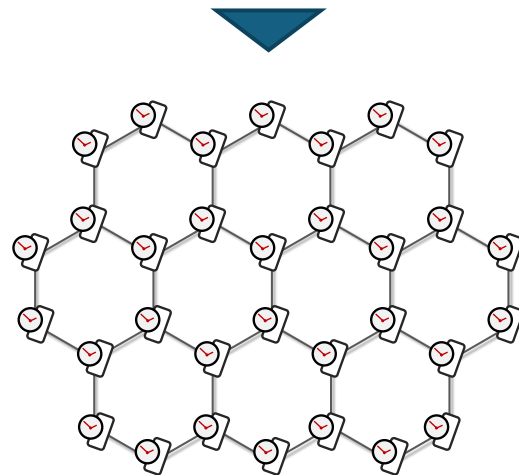
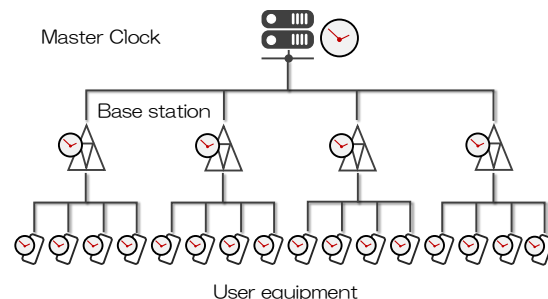
提案：

分散同期方式同期

参照は柔軟に切替可能／仮想的平均値でもよい

必要条件：

- **そこそこ高性能な「振り子」**
(小型原子時計レベル)
- **隣接クロック差分を測定可能**
(常時でなくても可)
- **高信頼・耐災害共有クロックの生成**
(リアルタイムでなくても可)



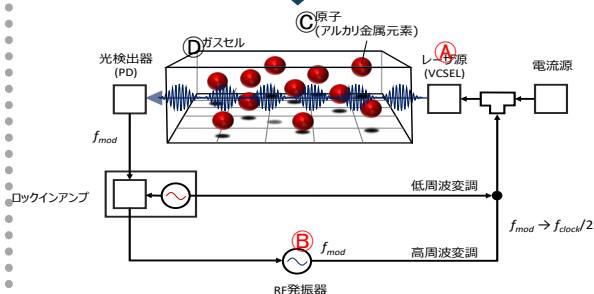
時空間同期の3つのコア技術（開発中）

■ 原子時計チップ(CLIFS) Chip Level Integrated Frequency Standard

- 原子時計チップは、携帯モジュールへの搭載により、移動体通信の機能を飛躍させることが可能。
- NICTはMEMS(*1)技術導入により、課題解決の原理検証を過去5年間でほぼ終了、量産化への具体的プロセスを提唱。



- 民間企業を巻き込んで低コスト量産化の実現へ

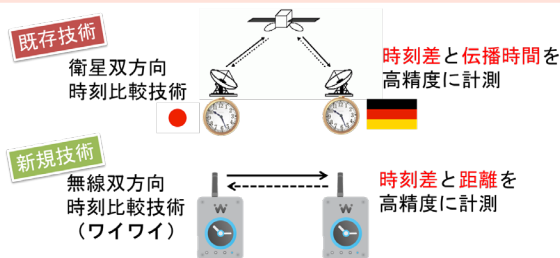


- ①～④全てで低コスト量産化に向けた新しい製造法を提案

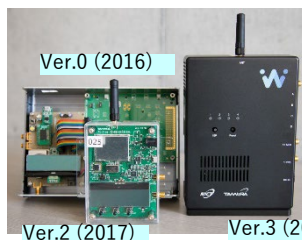
(*1) MEMS: Micro Electro Mechanical Systems

・微小な電気要素と機械要素を一つの基板上に組み込んだセンサー、アクチュエーターなどのデバイス

■ ワイワイ (Wi-Wi) Wireless two-Way Interferometry



標準時の比較で実績のある時刻比較技術を転用して
時刻同期 (～10ns) と距離計測
の同時計測を安価、簡便、高精度に実現する技術



Wi-Wi 通信モジュール
(プロトタイプ)

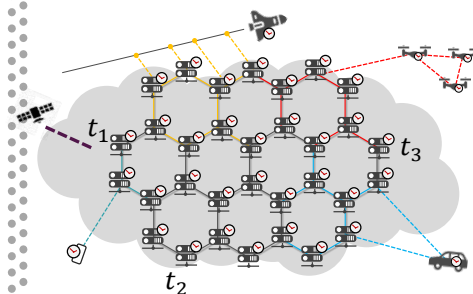
Carrier: 920MHz,
IEEE802.15.4
Range: 500m(ver.2),
5km(ver.3)
* in ideal condition

- 最新の確認性能:

- ・ 時刻同期精度: 35 ns
- ・ タイミングジッタ: 16 ps
- ・ 最大同期モジュール数: 15 modules

■ クラスタ時計

- 隣接するデバイス間で相互の時刻差を共有することにより、分散する時計群の平均時刻をローカル基準時刻として共有することができる。
- クラスタ時刻同期システムにより、自律的で、堅牢で柔軟なクラスタ時刻運用を目指す。基盤となる時刻同期網にアクセスすることで時刻校正が容易に可能。



現在

$t_1 \neq t_2 \neq t_3$



同期網構築後

$t_1 = t_2 = t_3$

- 理論的アプローチ(時計のふるまいのモデル化、シミュレーション)とテストベッドやハードウェアモジュールによる実証実験の両輪で開発を進める。

小型原子時計を大量精算可能にするために開発したMEMS技術 XGMF

Our approach

Impact
clock dev

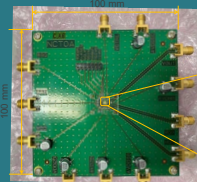
LSI

ing point of
MS/NEMS

R&D

原子時計向けの
MEMS/NEMS技術

SIZE re

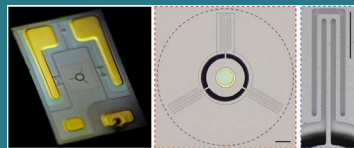


small

3 GHz band MEMS OSC.

MEMS/NEMS デバ
イス開発のための
工業化支援技術

COST r



波長可変 VCSEL

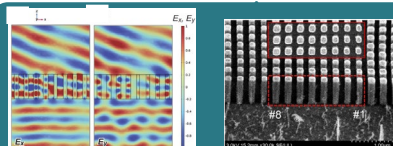
C-compatibility

Frequency digital controller
for MEMS OSC.

tunability

MEMS-tunable VCSEL

LEAD TI



メタマテリアル

fabrication

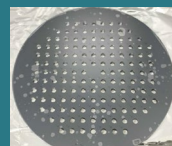
Low-height gas cell

RbN₃ patterned wafer

Evaluation system for
MEMS components



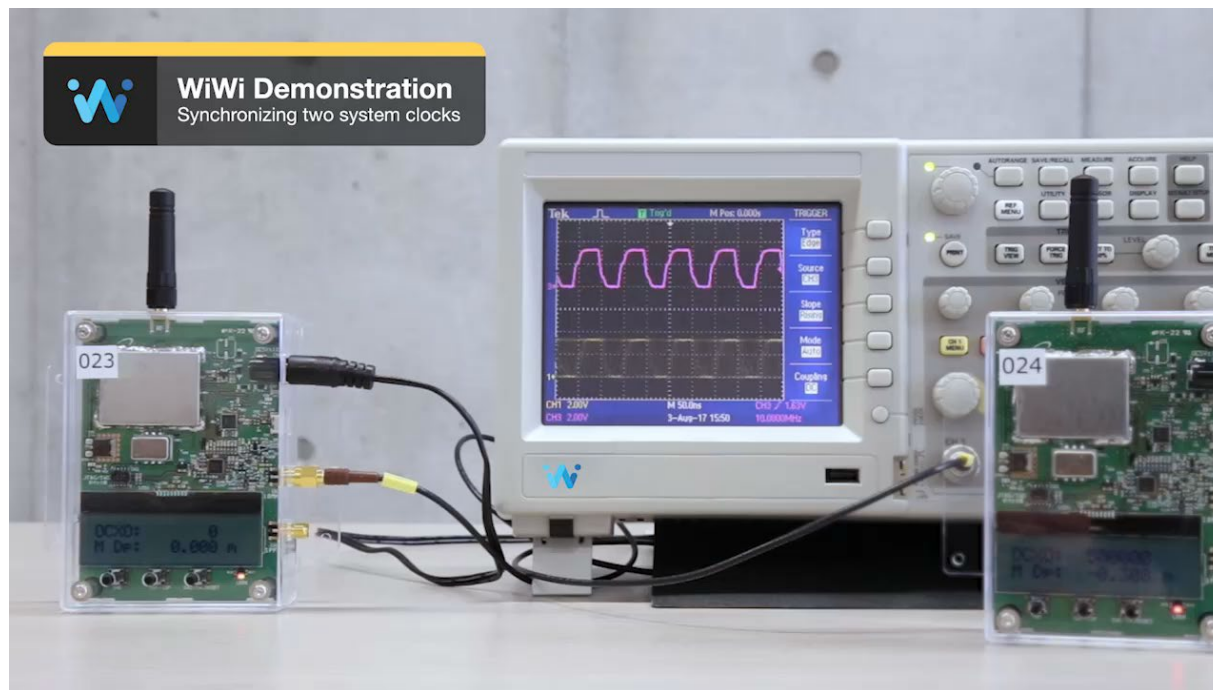
RbN₃ printer



バッチ生産原子セル

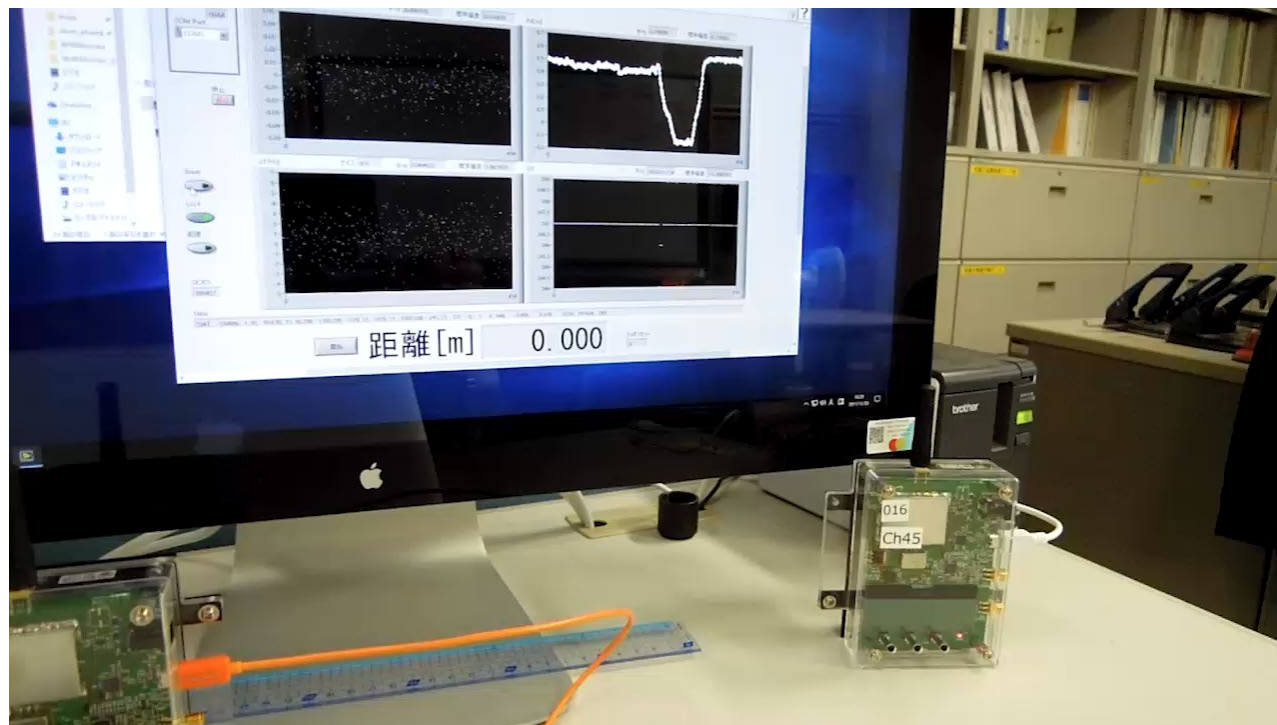
ワイワイデモ (時刻同期)

1 DIV = 50 ns



2017年作成

ワイワイコア（位置計測）



1対1で時刻同期（ピコ秒）と
距離変動計測（mm）を実現

2018年作成

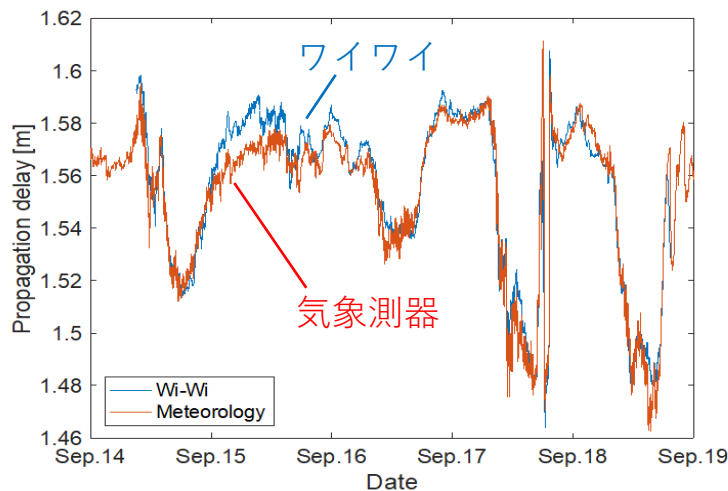


大気の屈折率変動の計測



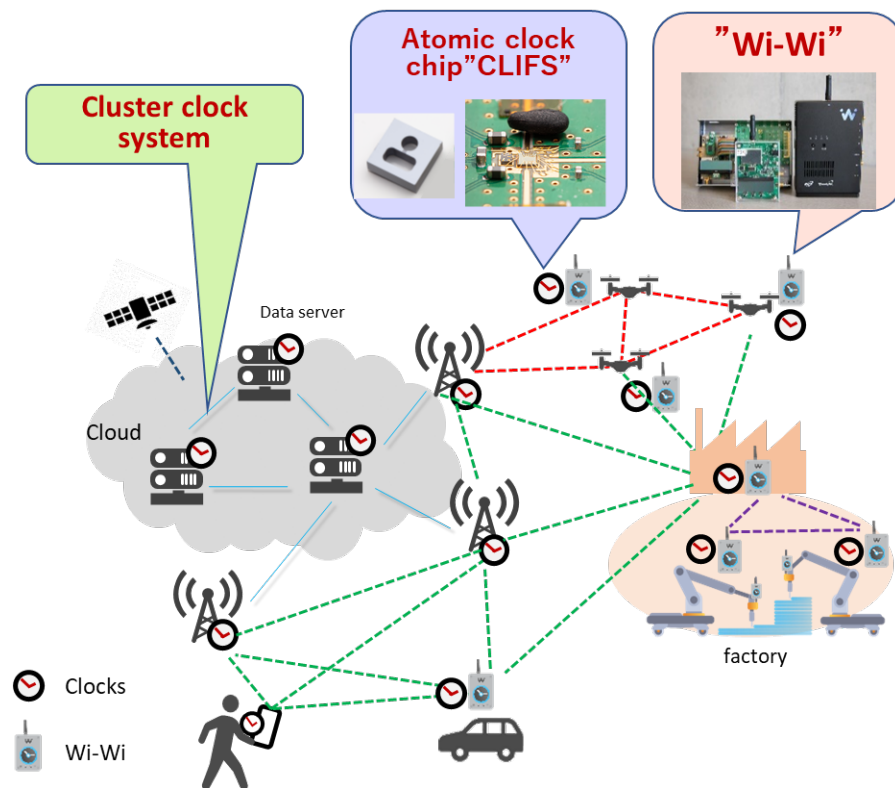
ハイパワー版
ワイワイモジュール
@NICT

伝搬遅延 (=屈折率 $\times$ 距離) の変動

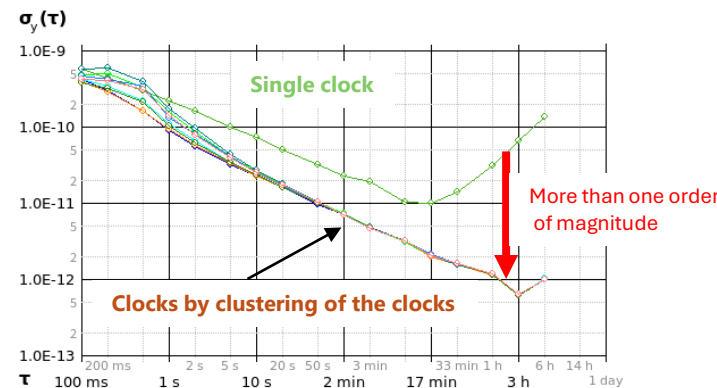


- 1日のうちに4.3kmの距離が10cm程度変動する様子を観測した（青線）。
- NICTで計測した気象測器から計算した伝搬遅延（赤線）と一致した結果が得られた。
- 同じ技術のインフラの変位計測への応用も準備中。

クラスタクロックネットワーク

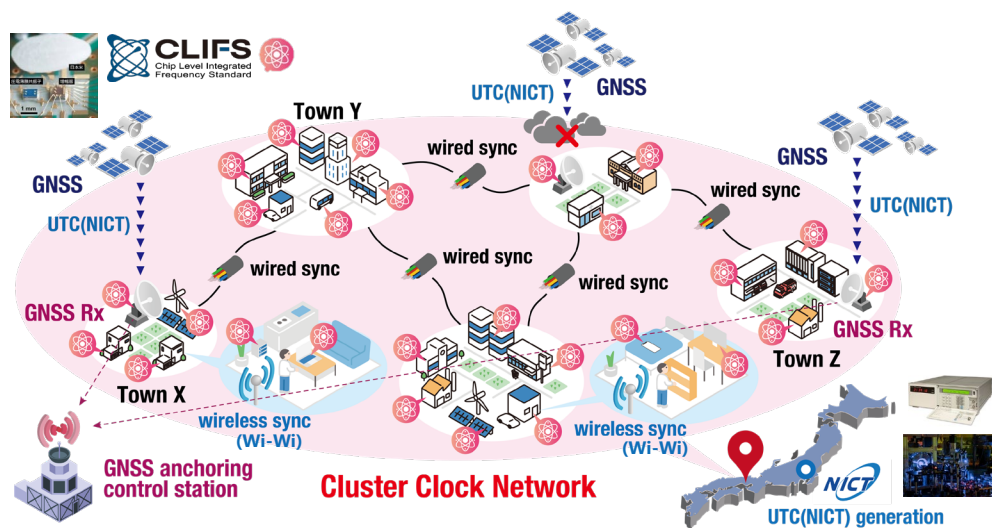


POC:
10ヶのCSACをつ
ないだシステム

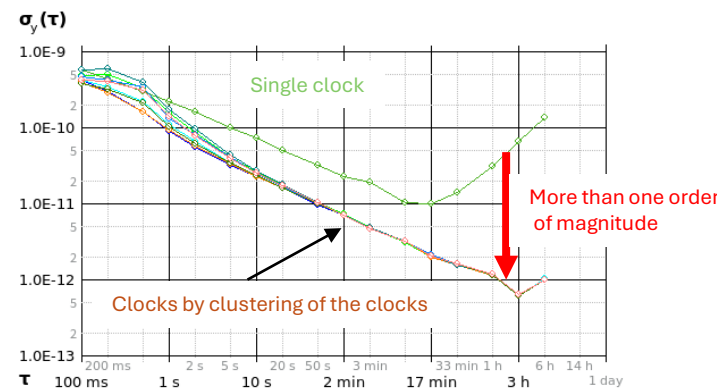


アカデミアの数理科学研究室の強力なコラ
レーションによって、数の力で安定なクロ
ックを生成するアルゴリズムを開発

Cluster clock network



POC:
10 CSACs connected



3つの技術「**時空間同期三本の矢**」はITU-R WP5Dで編纂された**IMT-2030 Future Technology Trend (FTT)**でも言及されている

Wi-Wiの応用技術である位置出しについてはIMT-2030 Framework文書において6Gの new capabilities の一つとして認識されている



5. Emerging technology trends & enablers

5.7 Technologies to natively support real-time service/communications

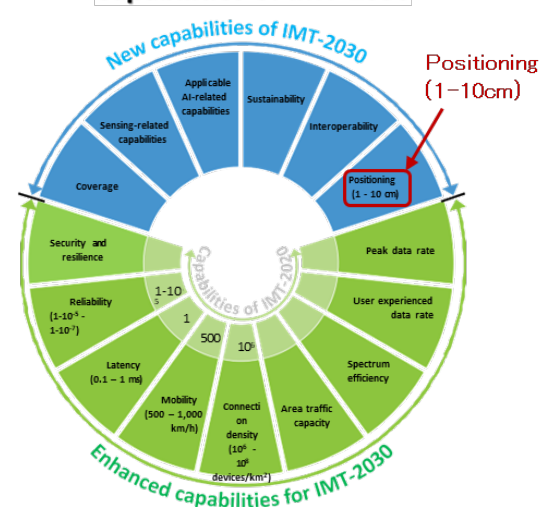
Two technology components are considered to achieve real-time communications with extremely low latency. The first one is accurate time and frequency information shared in the terrestrial network. When network nodes are equipped with **compact atomic clocks**, their high holdover performance can dramatically reduce synchronization iterations. The high frequency accuracy obtained from the atomic clocks also reduces the frequency offset between transmitter and receiver, leading to the low bit error ratio particularly in high carrier frequency. **The collection of the time differences among node clocks** facilitates the estimation of more stable and robust time using the maximum likelihood method, and the result can be delivered back to each node for their self-corrections. **Wireless space-time synchronization**, where clocks are **synchronized at pico-second level together with the determination of positions**, is another method on which low latency communication protocol can be built with a capability of autonomous and distributed operations. Such synchronized network supports the schedule management in edge processing in mobile backhubs. The common time and frequency can be traceable to the standard time or frequency by linking one node to the precision time/frequency source.

6. Technologies to enhance the radio interface

6.6 Technologies to support ultra-high accuracy positioning

As the synchronization technology matures better toward 2030, it is conceivable that **wireless space-time synchronization** in future IMT to be available by around 2030, enabling Location Based Services to fully equipped with higher precision localization capability.

Capabilities of IMT-2030



- 3GPPにおける6Gの議論がWG-SA1のユースケース文書作成から開始したところ
- 時空間同期技術を活用するUse caseとして3つ採択済
 - 歩行者（交通弱者） 向けの安全支援
Use case on Safety Assistance for Vulnerable Pedestrians (S1-244875)
 - 重要インフラの位置変動モニタリング
Use Case on Critical Infrastructure Monitoring (S1-252629)
 - 遠隔自動建設
Use case on Remote and Automatic Construction (S1-252630)

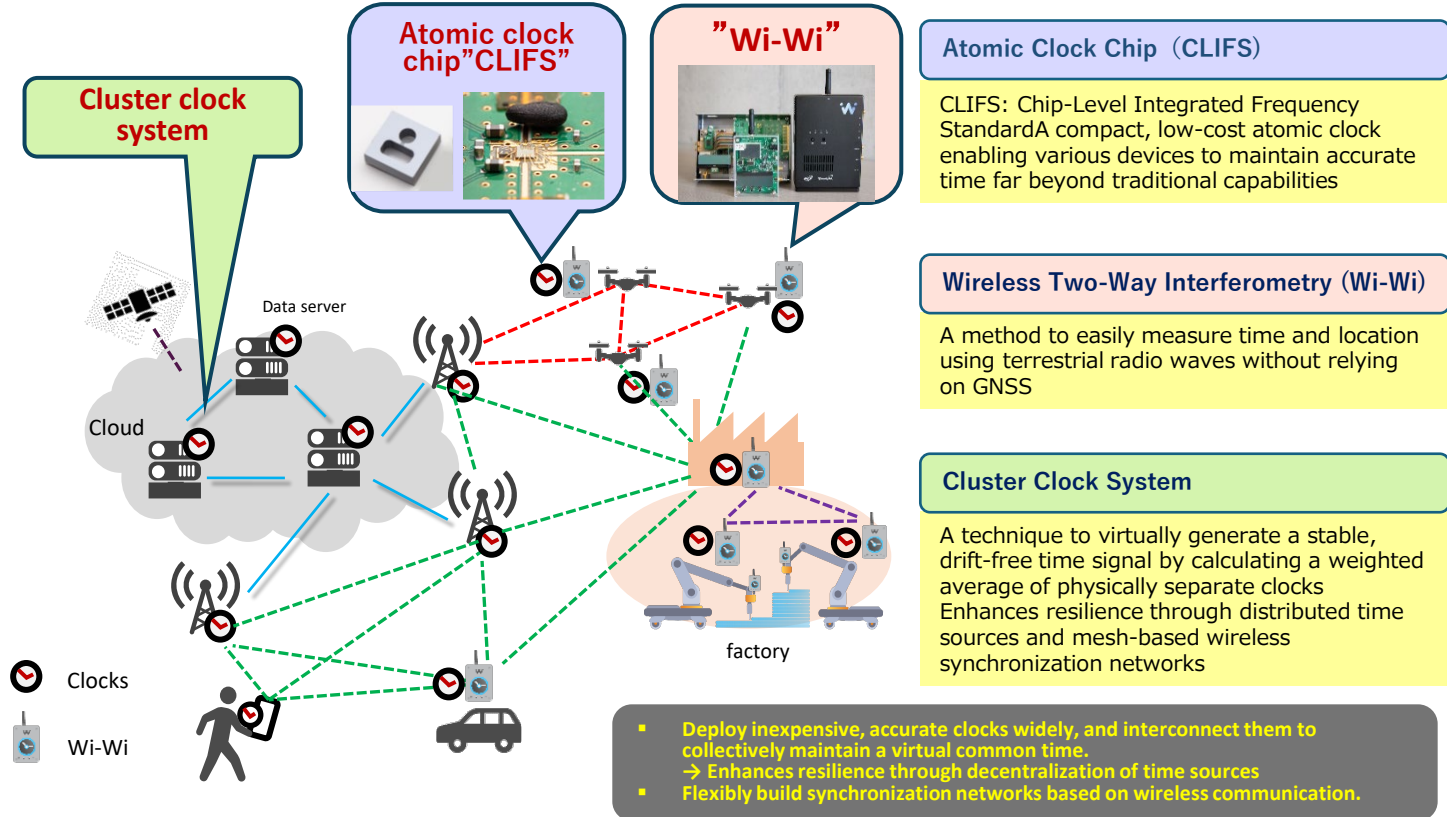
Thank you for your attention



Space-Time Synchronization Project

Definition: Space-Time Synchronization

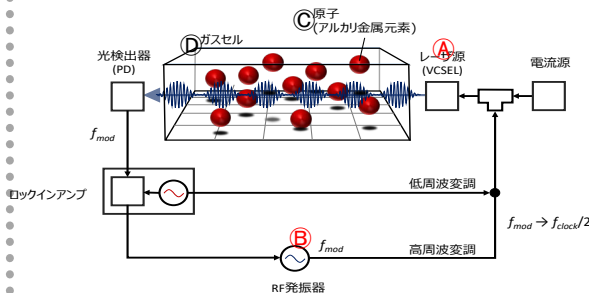
- A state where the internal clocks of devices are synchronized
- And the positions of devices are mutually recognized within a local area (spatial synchronization)



Atomic Clock Chip (CLIFS)

Chip Level Integrated Frequency Standard

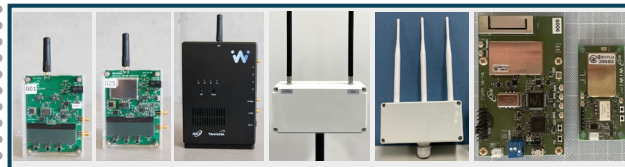
- Aims to enhance mobile communication by integrating into portable modules
- NICT has completed principle demonstrations using MEMS over the past 5 years
- Proposes a concrete roadmap toward mass production in collaboration with private industry



- (*)1 MEMS: Micro Electro Mechanical Systems
- devices that integrate miniaturized electrical and mechanical components on a single chip)

Wireless two-Way Interferometry (Wi-Wi)

- A technology that exchanges radio waves bidirectionally and derives the clock time offset, phase difference, and propagation delay from the differences between transmission and reception times observed at both ends.

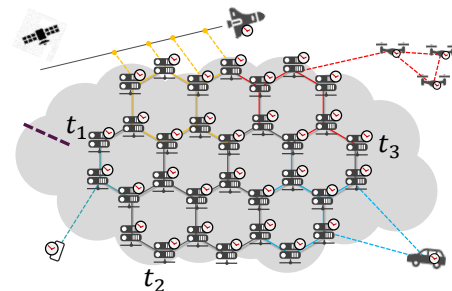


Wi-Wi module

Specs: Time synchronization precision: **35 ns**
 Timing jitter: **16 ps**
 Max number of sync modules: **15**
 Carrier frequency: 920 MHz (IEEE 802.15.4)
 Range: 500 m (ver.2), 5 km (ver.3)
 under ideal conditions

Cluster clock system

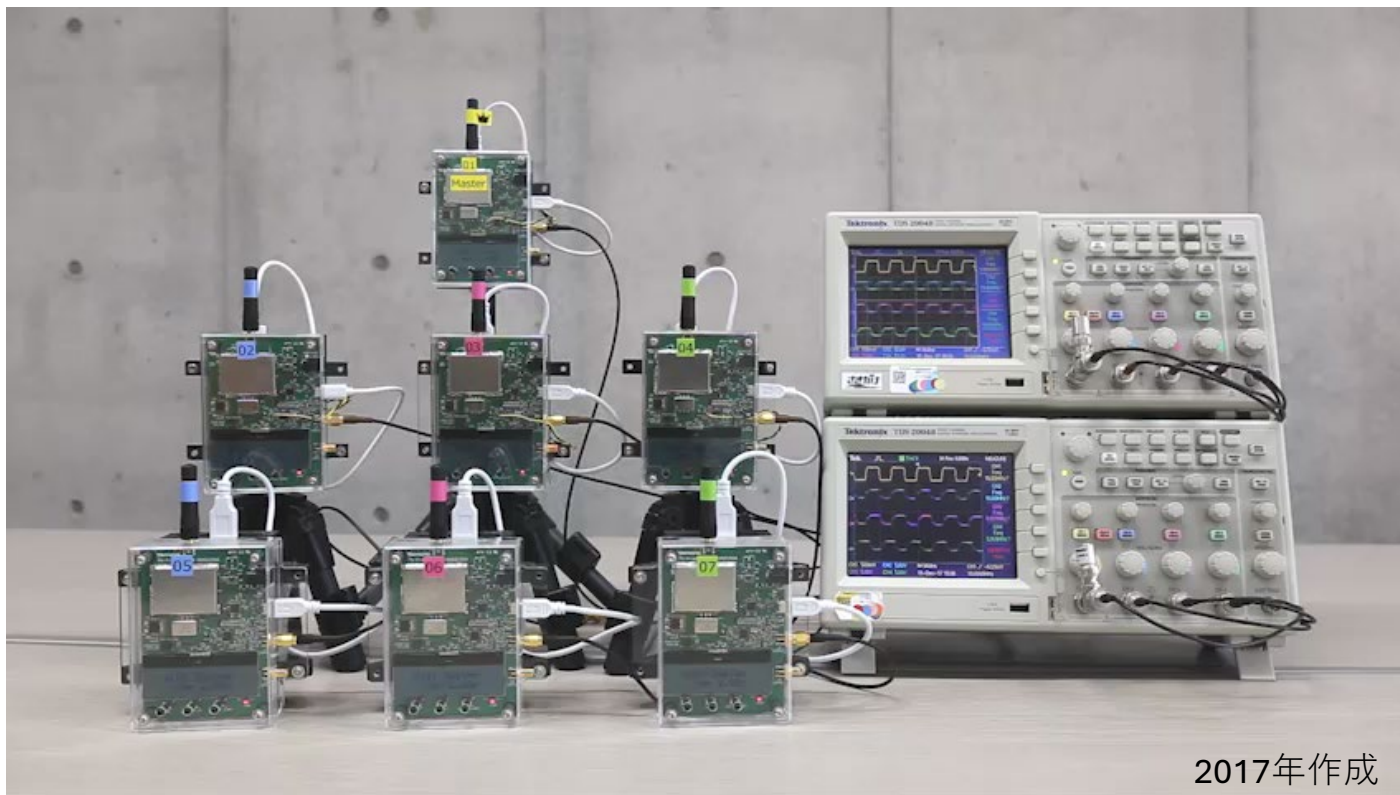
- Clock comparison against adjacent devices allows sharing of a local reference time as an average of distributed clocks
- Targeting autonomous, robust, and flexible cluster time operation
- Can easily access synchronization infrastructure for calibration



$$t_1 \neq t_2 \neq t_3 \rightarrow t_1 = t_2 = t_3$$

- **Regular Meetings**
Two types: internal XGMF project meetings and combined meetings with other communities such as data centers, clock business, and components manufacturers
- **Collaboration Planning**
Coordinate with active researchers to define concrete collaborative activities and schedules
- **International Exchange**
Engage with international 6G developers and projects in clock, positioning, and sensing to identify the needs relevant to Space-time synchronization
- **Standards Monitoring**
Track and share international standardization developments (e.g., ITU-R WP5D, 3GPP)
- **External Communication**
Collaborate with domestic and international industry consortia and study groups to create and publish technical documents
Disseminate outcomes at academic conferences, international events, and exhibitions

7台の時刻同期デモ動画



- When you hear the word “synchronization”, do you wonder what is master and what is slave?

Having one follow to another is not all methods of synchronization.

Then, what is the synchronization in general?

Time can be synchronized, but how can we synchronize space?

Essence of synchronization:

Sharing common coordinate axis

Time synchronization



^B Clock A and B have its own axis of time, respectively.
If the two axes are identical, A and B is synchronized.

Space synchronization



A and B have its own axis of **space**, respectively.
If the two axes are same, A and B is spatially synchronized

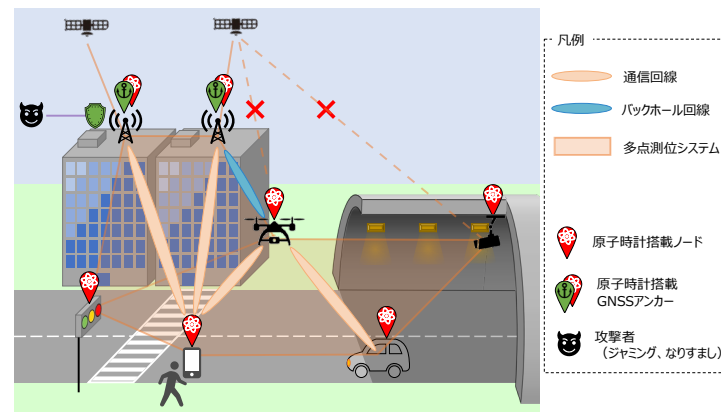
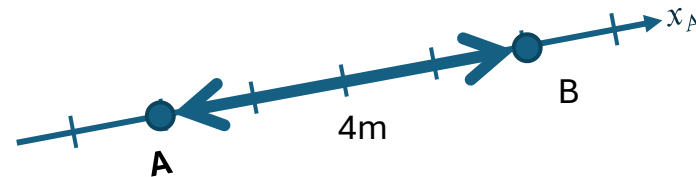
- The communication under space-time synchronization equips mutual recognition of time and position in simple digital data, enabling efficient M2M communications
- GNSS system is a sample of space-time synchronization using global axes.
- **But we can realize it by defining local axes of space and time.**

When time synchronization is achieved, distance can be measured by the propagation time of radio wave (unless there are multipath).

This is a sort of space-time synchronization, where the dimension is 1. We can define 1D coordinated axis which connects the two.

As long as anyone is on the axis, he/she knows where they are by communicating with A & B.

In 3D space, 4 anchor points allow us to build a spatial axes of 3D.



Requirement to achieve time synchronization

Conventional (or legacy) way: Leader-follower structure

But some drawbacks...

- The leader is the **single point of failure**.
- The **error is piled up** as down to lower layers.
- Delay between nodes are often not considered, leading to errors.

Our proposal for the accuracy and resiliency:

Distributed synchronization structure

Reference for the synchronization can be either one (easily switchable) or **virtual one as a mean of all clocks**.
But three things are necessary for the latter.

- 1) **Good pendulum**
- 2) **capability to measure clock differences, but does not need to be all time**
- 3) **Reliable and resilient clock reference, but which does not need to be real-time signal**

