

ムーンショット目標1

「2050年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」

第17回テストベッド分科会

「サイバネティック・アバターのインタラクティブな遠隔操作を持続させる信頼性確保基盤」

国立研究開発法人情報通信研究機構
ネットワーク研究所
ワイヤレスネットワーク研究センター
ワイヤレスシステム研究室

松村 武



第17回テストベッド分科会
2025/2/28, UDXカンファレンス／秋葉原, 東京

本検討の一部は、JST【ムーンショット型研究開発事業】
グラント番号【JPMJMS2216】の支援を受けたものである。

- サイバネティック・アバター(CA)とは？
- ムーンショット目標1の取り組み
- 信頼性確保基盤の開発とJGNを用いた実証

- サイバネティック・アバター (CA, Cybernetic Avatar)

- ▶ サイバネティック・アバターは、身代わりとしてのロボットや 3D 映像等を示すアバターに加えて、人の身体的能力、認知能力及び知覚能力を拡張する ICT 技術やロボット技術を含む概念。Society 5.0 時代のサイバー・フィジカル空間で自由自在に活躍するものを目指している。

研究開発構想 (<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/concept1.pdf>) より



MOONSHOT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



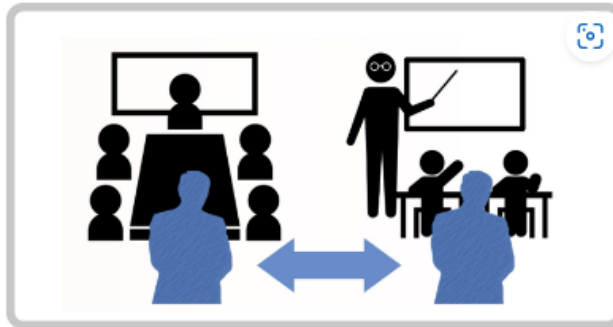
JST

アバターを活用したXR会議により、臨場感のある製品デモや迅速な承認を遠隔で実現

遠隔会議



遠隔分身



複数のアバターで仕事の会議や家族のイベントに同時に参加することで仕事と家庭を両立

Cybernetic Avatar Society

ICT技術で
仕事も、
家庭も、
プライベートも

NICTが描く未来像

<https://beyond5g.nict.go.jp/future/diary/index.html>

アバターが日常の介護をサポートし、高いホスピタリティで遠隔から高齢の家族を支援

遠隔介護



遠隔登山



アバターによるXR技術を活用した登山体験で、リラックスできる没入型の体験を提供

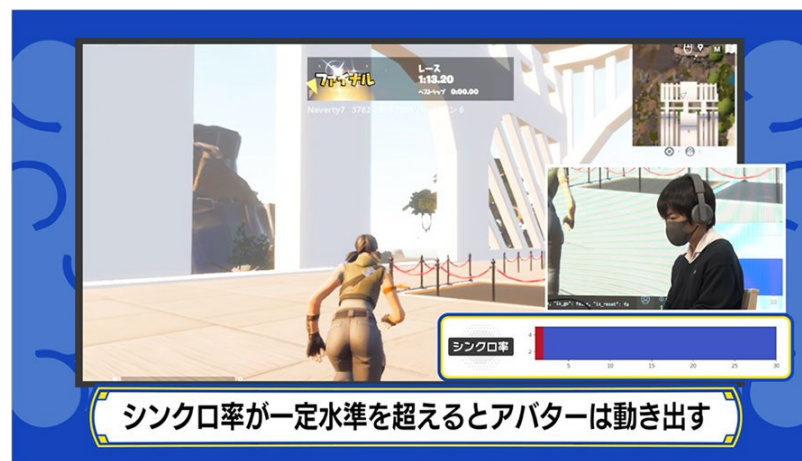
● サイバネティック・アバター (CA, Cybernetic Avatar)

- ▶ サイバネティック・アバターは、身代わりとしてのロボットや 3D 映像等を示すアバターに加えて、**人の身体的能力、認知能力及び知覚能力を拡張する** ICT 技術やロボット技術を含む概念。Society 5.0 時代のサイバー・フィジカル空間で自由自在に活躍するものを目指している。

研究開発構想 (<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/concept1.pdf>) より



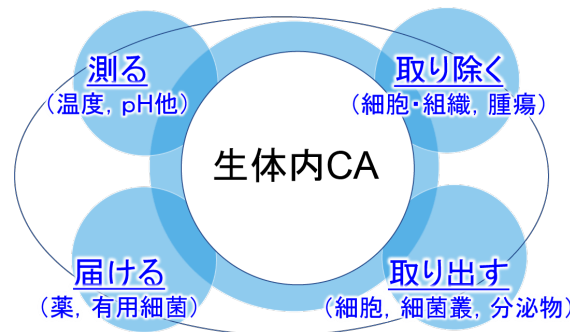
「誰もが自在に活躍できるアバター共生社会の実現」(石黒PJ)



「身体的能力と知覚能力の拡張による身体からの解放」(金井PJ)










「身体的共創を生み出すサイバネティック・アバター技術と社会基盤の開発」(南澤PJ)



「生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化」(新井PJ)

https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal1/appeal/11_ishiguro_ap01.html
https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal1/appeal/12_kanai_ap01.html
https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal1/appeal/13_minamizawa_ap02.html
https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal1/appeal/13_minamizawa_ap05.html
<https://in-body-ca.org/about.html>

少子高齢化などの社会課題	時間、空間の制約からの解放	身体の制約からの解放	脳の制約からの解放	社会受容基盤
1 生産性向上	<p>ソシオCA: ホスピタリティとモラルある対話・行動CA (石黒PM)</p> 	<p>ソシオCA: 技能合体CAで新しい体験共有 (南澤PM)</p> 	<p>ソシオCA: Trusted BMI-CAで思い通りに操作 (金井PM)</p> 	<p>安全・安心確保基盤 (新保PM)</p>  <p>信頼性確保基盤 (松村PM)</p> 
2 強靱な生産性維持	<p>体内CA:</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="522 899 980 1285"> <p>生体内CA (新井PM)</p>  </div> <div data-bbox="980 899 1465 1285"> <p>細胞内CA (山西PM)</p>  </div> </div>			
3 安全安心とゆとり				

ソシオCA: 個人や集団に対してサービスを提供するCA、体内CA: 生体や細胞内を遠隔から見守るCA

<https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal1/index.html>



1つのタスクに対して、1人で10体以上のアバターを、アバター1体の場合と同等の速度、精度で操作できる技術を開発し、その運用等に必要な基盤を構築

複数の人が遠隔操作する多数のアバターとロボットを組み合わせて、大規模で複雑なタスクを実行するための技術を開発し、その運用等に必要な基盤を構築

人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現

2025

- ・万博や商業施設等の人の多い環境でも複数の操作者が自分に合う複数CAを用いても、遠隔制御の信頼性を確保する
- ・通信困難環境である体内で確率的な通信の成立によって体内CAを遠隔制御できる

2030

- ・緊急性等を考慮したネットワーク適応制御や一部のCAを介した集団制御により、災害現場や体内などの通信困難環境でも遠隔制御の信頼性を確保する

2050

- ・体内・海中・宇宙のような通信困難環境でも、誰もが思い通りにCAを協調遠隔制御できる信頼性確保基盤を実現する

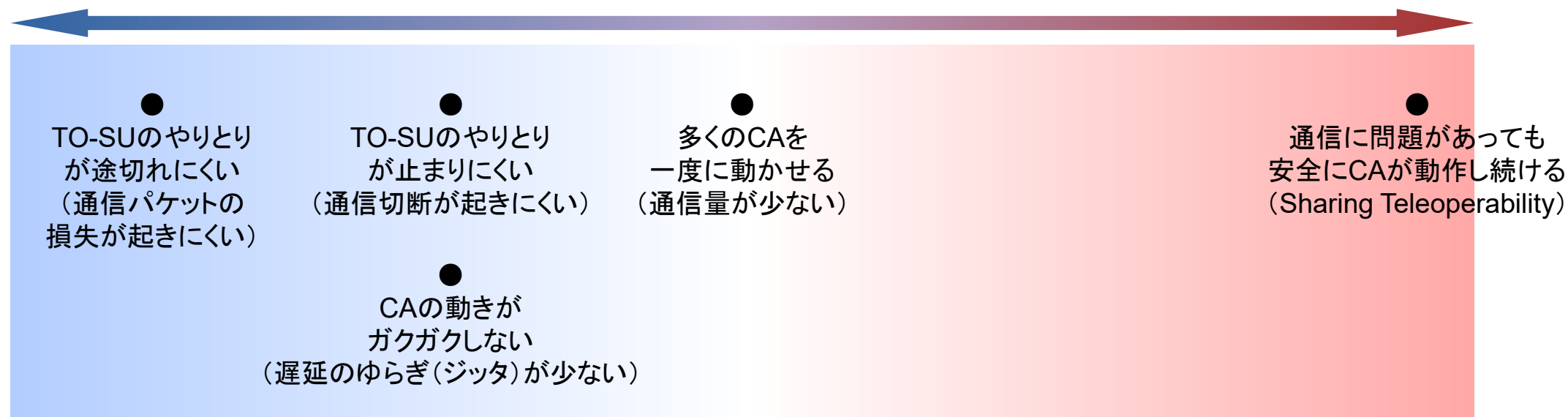
● CAを介してTOとSUのインタラクションを持続させるための信頼性を確保する

- ▶ 多くのCAやSUが行き交う場所でも、TOとSUのやりとりが途切れたり止まったりしないようにする
- ▶ 多くのCAが動き回っても、CAの動きが止まったりガクガクしたりしないようにする

CA: サイバネティック・アバター、TO: 遠隔操作者、SU: サービスユーザ

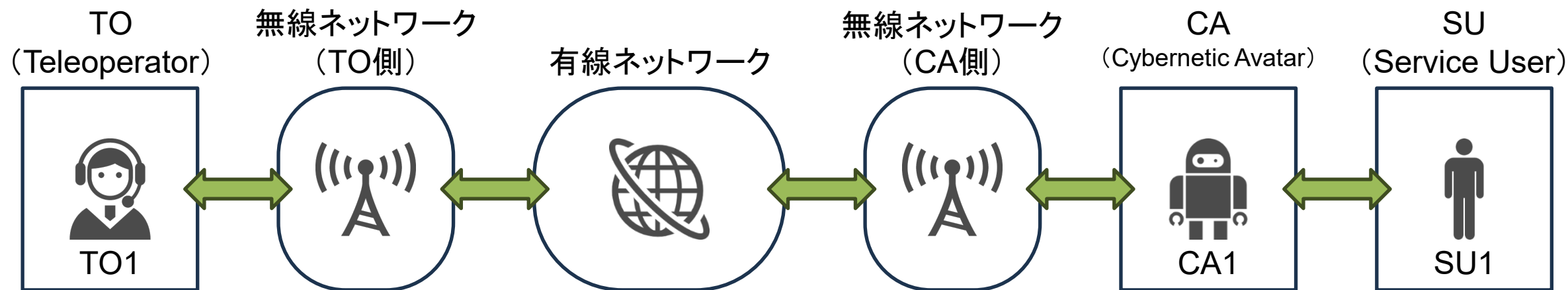
通信による信頼性確保

CAによる信頼性確保



- 遠隔操作の遅延、ジッタ、パケットロスを低減してCAサービスを安定にする

- ▶ 通信経路で発生する遅延のゆらぎ(ジッタ)を吸収し、遅延を揃えてCAサービスを安定に維持
- ▶ 吸収できないジッタが発生しても、別の経路に切り替えてCAサービスを継続
- ▶ それでもジッタが変動許容範囲を超える場合は、CAを自律動作に切り替えてCAサービスを継続



CA遠隔操作データ

TO→CA

TO←CA

CAからのフィードバック

$(\tau_1, \Delta t_1)$

$(\tau_2, \Delta t_2)$

$(\tau_3, \Delta t_3)$

$(\tau'_1, \Delta t'_1)$

$(\tau'_2, \Delta t'_2)$

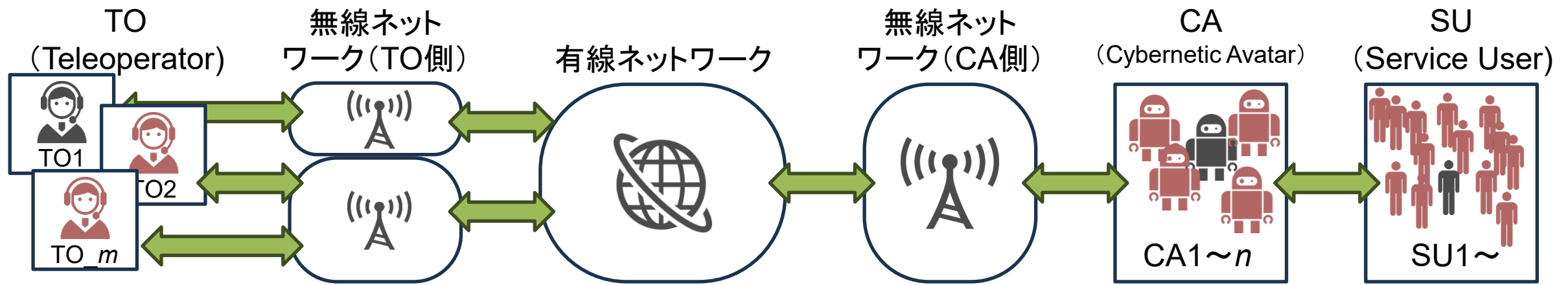
$(\tau'_3, \Delta t'_3)$

CAとSUの
インタラクション

通信 (TO→CA→TO) の遅延とジッタを最小化

τ_i : 経路*i*の遅延
 Δt_i : 経路*i*のジッタ

- 多くのCAやSUが行き交う混雑した環境でもCAサービスが途切れないようにする
 - ▶ 通信品質の変化予測と最適化によりパケットロスやジッタを防ぎ、CAサービスを安定に維持
 - ▶ 通信量を低減できる新しいネットワーク技術により、より多くのCAサービスを収容

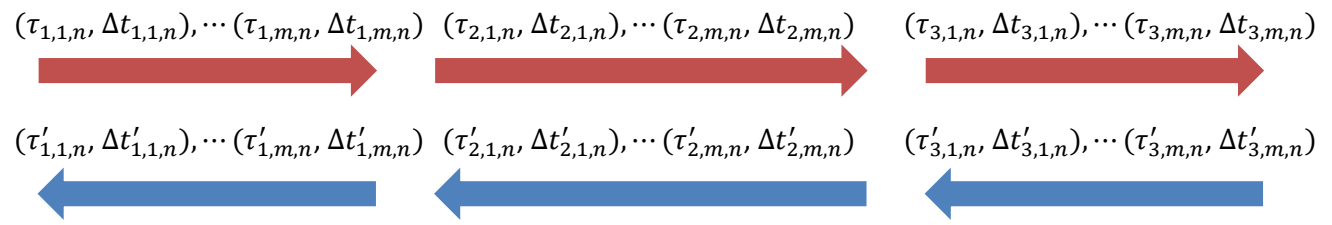


CA遠隔操作データ

TO → CA

TO ← CA

CAからのフィードバック

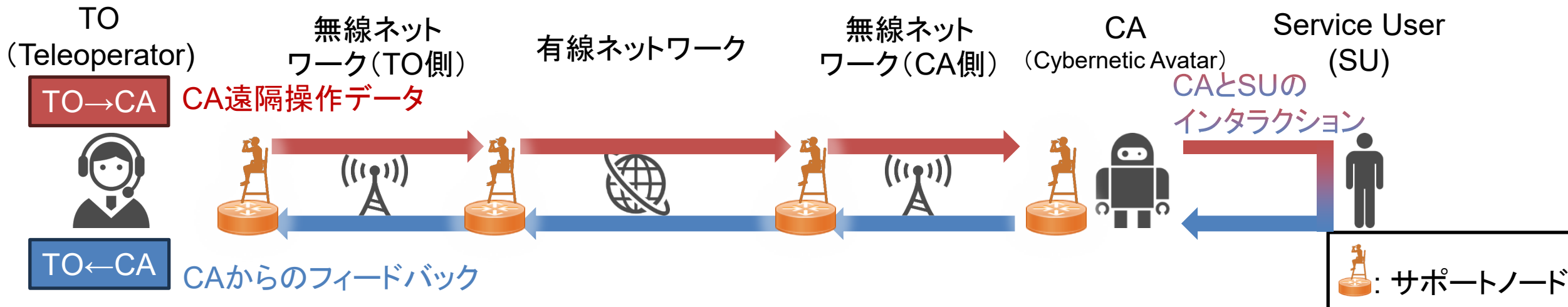


TO・CA数が増 → 遅延・ジッタ・データ量が増

$\tau_{i,m,n}$: TO_mとCA_n間の経路*i*の遅延
 $\Delta t_{i,m,n}$: TO_mとCA_n間の経路経路*i*のジッタ

- CAは一般のサービス利用者(SU)が自由に利用できる
 - ▶ CAは、活動エリアに必要とされる十分な通信環境を準備できる可能性がある
 - ▶ TOは、世界中のどこからでも、公衆LTE/5G、インターネット、会社や大学の専用ネットワークなどを経由してアクセスすることができる
- CAとTOが必ずしも同一の管理されたネットワーク上に配置されるとは限らない
 - ▶ 特性が保証できないインターネットを介した遠隔操作が行われる

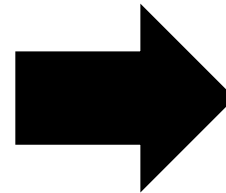
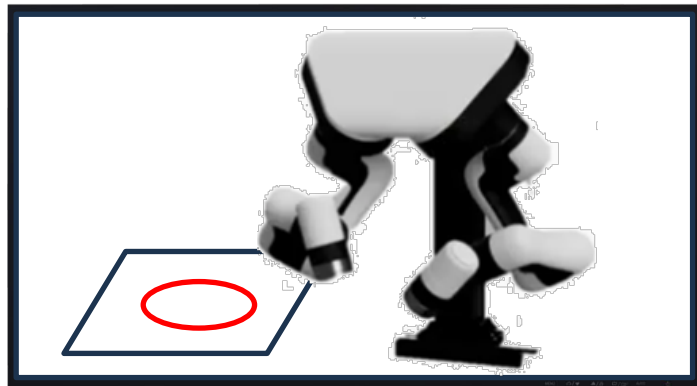
誰もが参画できるCA社会実現に向けて信頼性を確保するための研究開発においては、様々な通信環境を想定し、信頼性確保技術を開発し、評価する必要がある



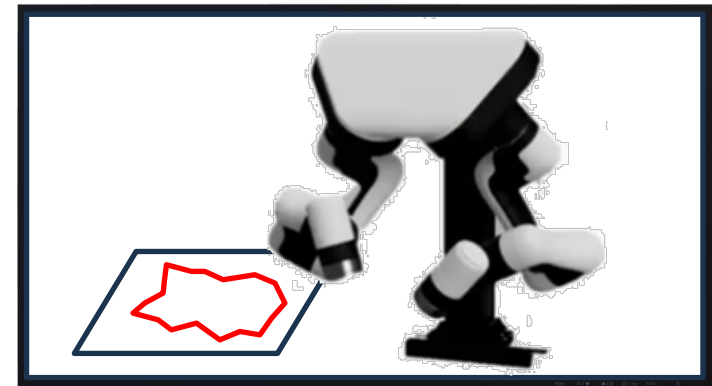
- 遠隔操作の遅延、ジッタ、パケットロスを低減してCAサービスを安定にする
 - ▶ 通信経路で発生する遅延のゆらぎ(ジッタ)を吸収し、遅延を揃えてCAサービスを安定に維持
 - ▶ 吸収できないジッタが発生しても、別の経路に切り替えてCAサービスを継続
 - ▶ それでもジッタが変動許容範囲を超える場合は、CAを自律動作に切り替えてCAサービスを継続

CAの双腕の制御データの受信に大きなジッタが発生すると...

ジッタがなければ正確に円が書ける



ジッタが発生すると円が不正確になる

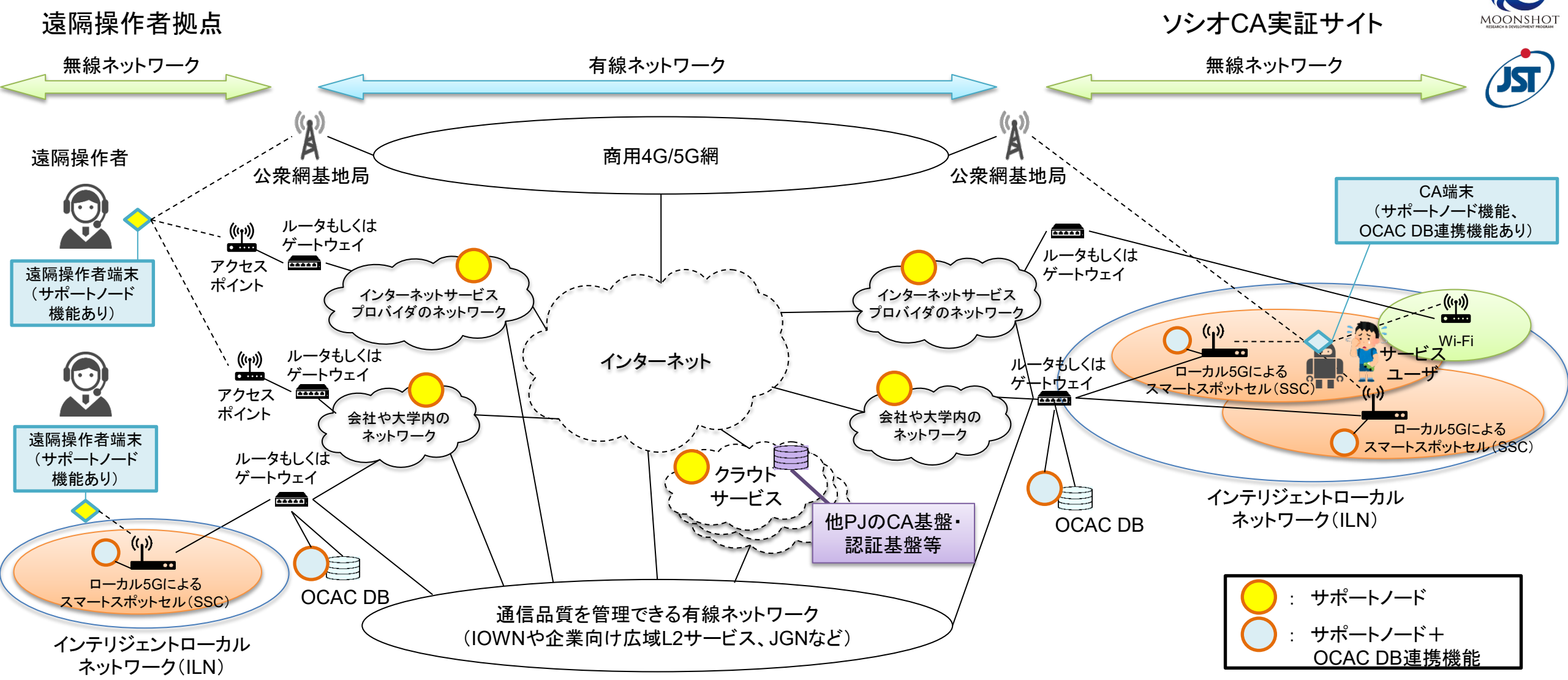


● 国内でCA遠隔操作環境を構築し、遅延やジッタの影響を見える化

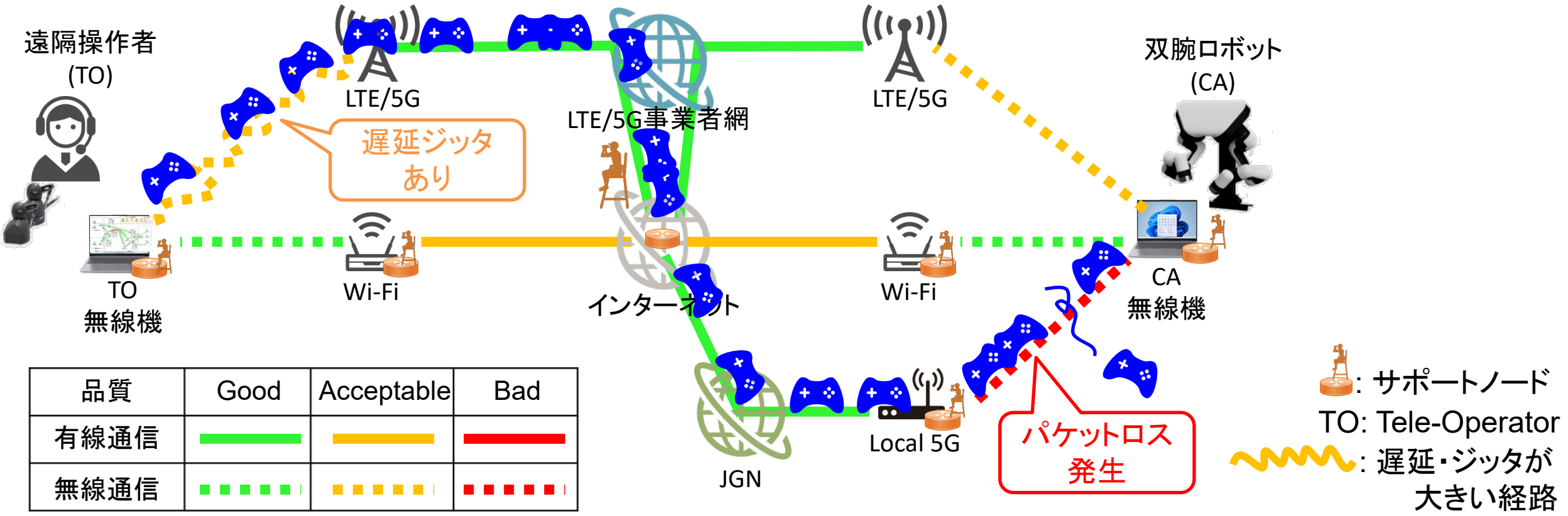
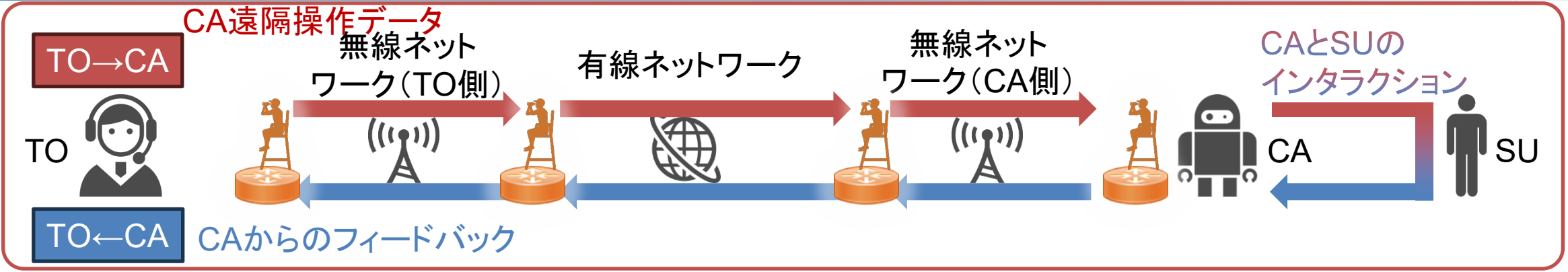
- ▶ 実動作ロボット(CA)を用いた遠隔操作環境を日本橋—横須賀間に構築
- ▶ 通信品質モニタ機能、ジッタ低減機能、経路切替機能を有するサポートノードを開発し、端末やネットワーク結節点に設置
- ▶ JGNとローカル5Gを用いた安定通信環境と、公衆LTE/5G、Wi-Fiとインターネットを用いた一般通信環境を構築し、サポートノード機能の有効性を評価
- ▶ 直近では、JGNの安定性を活用し、遅延やジッタを挿入して通信安定化の評価を実施(インターネット回線や公衆LTE/5Gでは、それ自身の特性変動が大きくて定量的な評価が困難)
- ▶ 通信品質の低下によりCA動作が不安定になり、サポートノード機能により安定化できることを確認

● 国際間通信環境にデモ環境を構築し、実環境での評価を実施

- ▶ フィンランド、ドイツと横須賀間の国際遠隔通信でCA動作評価を実施
- ▶ 国際遠隔通信の特徴的な通信品質変動を明確化するとともに、サポートノード機能により遠隔操作が安定化できることを実証
- ▶ 国際会議Smartcom2024でBest Paper Awardを受賞



※OCAC DB: Optimal CA Communication Area Calculation Database、CAが活動するエリアの通信状態やCAの動作内容などを格納するデータベース



品質	Good	Acceptable	Bad
有線通信	■	■	■
無線通信	■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■

サポートノード
TO: Tele-Operator
遅延・ジッタが大きい経路

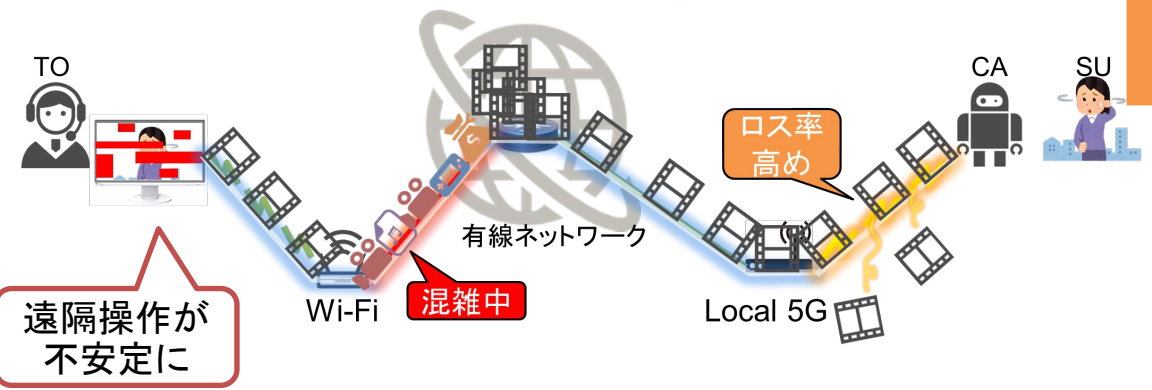
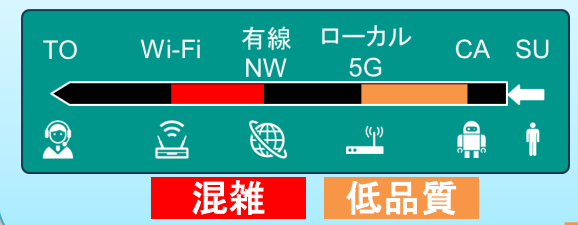
● 通信経路の遅延、ジッタ、パケットロスを低減するサポートノードを開発

- ▶ 遅延のゆらぎ(ジッタ)を吸収して遅延を揃える機能を開発し、日本橋と横須賀間の実ロボットの遠隔操作環境で、約60 msのジッタを5 ms以下に低減して遠隔操作を維持できることを確認した。
- ▶ 通信経路と代替経路の通信品質を把握し、大きなジッタやパケットロスを検知したらより品質のよい経路に切り替える機能により、遠隔操作の安定性を維持できることを確認した。

これまで

通信経路上に混雑があることが分かっていても回避はできない

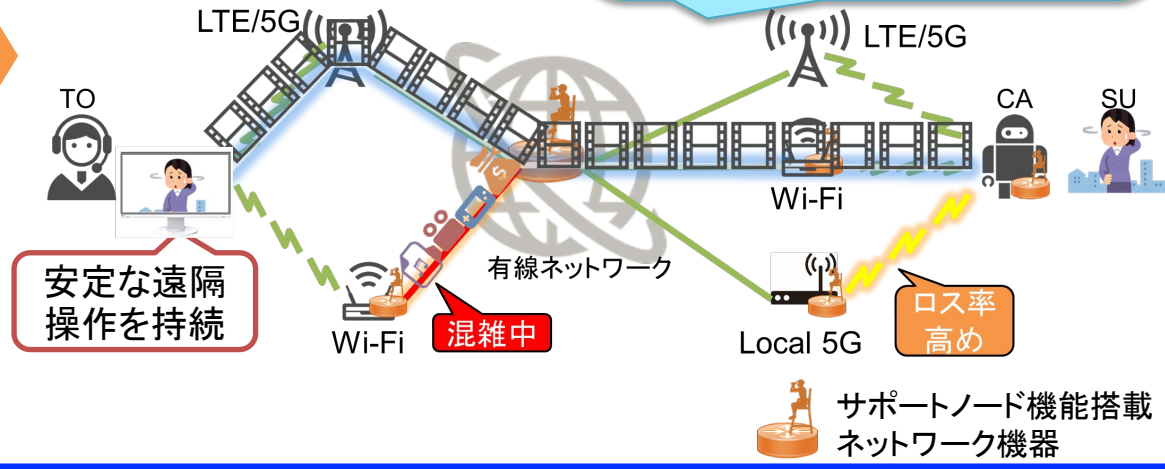
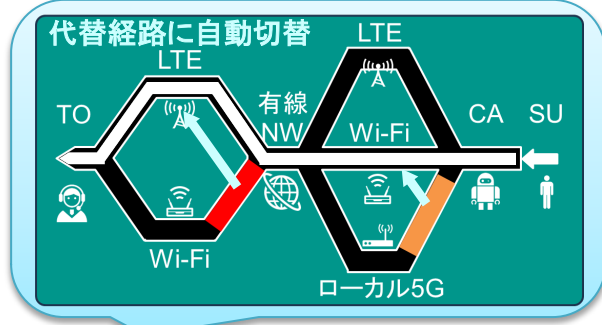
通信状態のイメージ



サポートノード導入

サポートノード導入後

通信経路上の問題を検知すると代替経路に切り替え



● ネットワーク品質の影響を示すためのロボット遠隔操作環境を構築

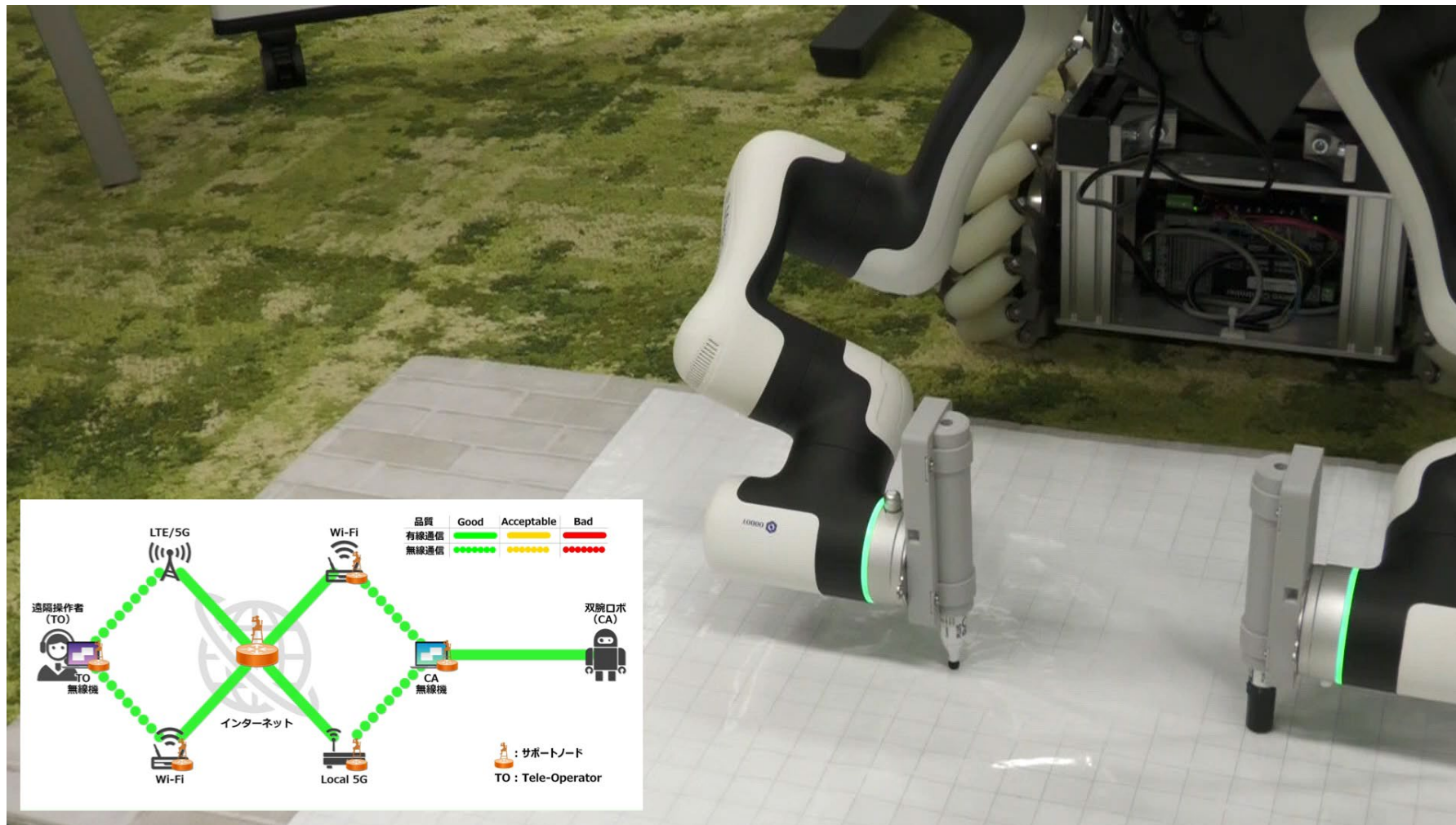
- ▶ 双腕ロボットのアームを遠隔操作可能な評価系を構築
- ▶ ロボットアームに円描画の操作コマンドを常時送信し、描画軌跡の変化をモニタ

Drawing speed	5 sec/round
Size of drawing circle	Radius: 9cm
Control signal packet size	65 – 71 Bytes/packet
Control frequency	30 msec /packet



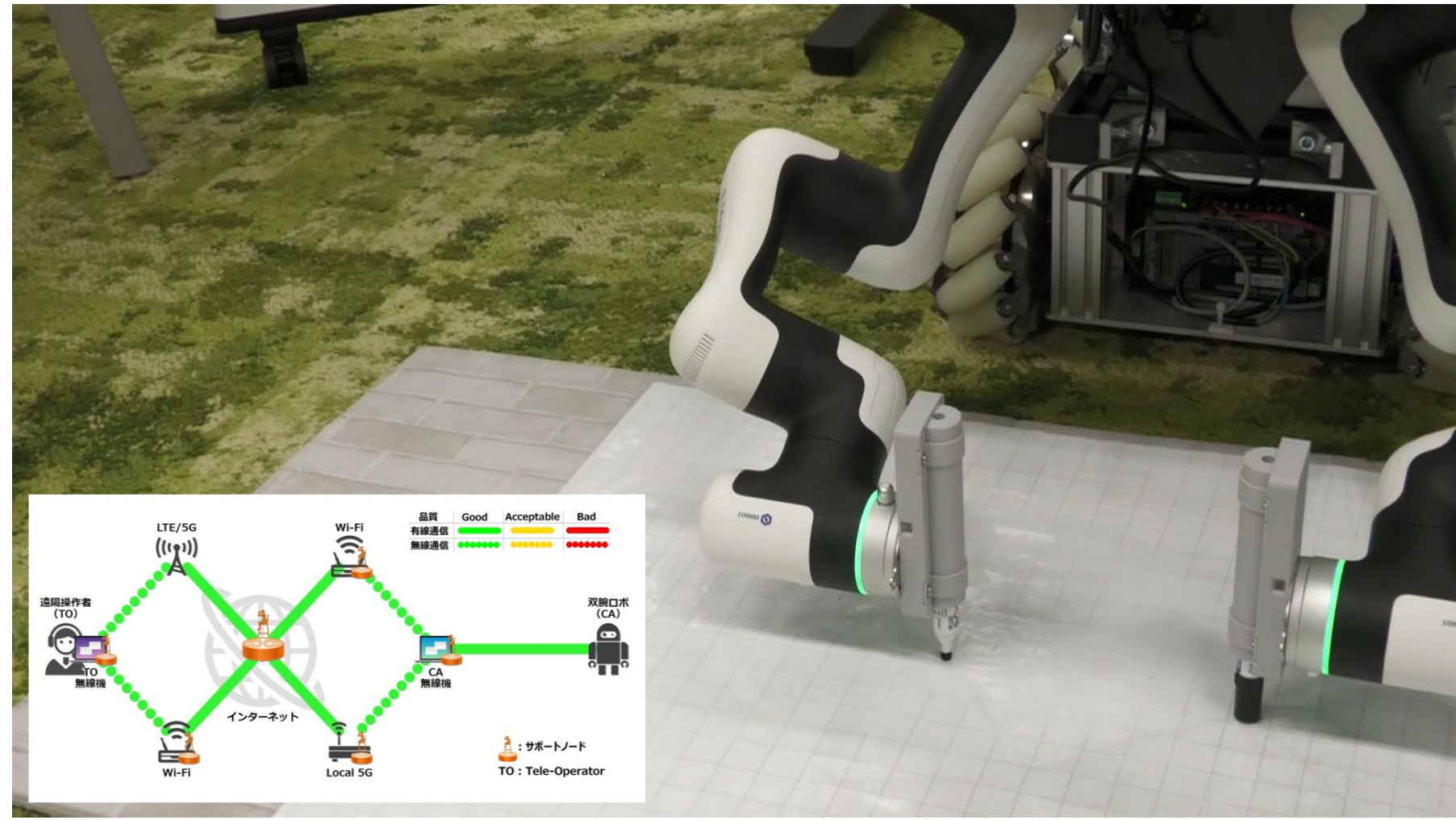
受信側で遅延の揺らぎ(ジッタ)を一定化

- 遠隔操作の通信経路中に、20~80ミリ秒の揺らぎのある通信遅延が発生
 - ▶ 制御信号が安定して届かないので、CAの腕の動作がぶれる
- 受信側にてバッファし、元の送信周期である30ミリ秒間隔に整えることで、CAの動作が安定化



0'10" 動作開始
0'36" ジッタ発生
0'58" ジッタ吸収機能on
1'25" 軌跡を確認
1'48" ジッタ吸収機能off
2'11" ジッタ解消
2'23" 動作停止

- 遠隔操作の通信経路中にて、パケットロス(ロス率5%)が発生
 - ▶ 制御信号の一部が届かないことで、CAの腕の動作が徐々にずれる
- サポートノードがパケットロスがない通信経路に切り替え、CAの動作が安定化

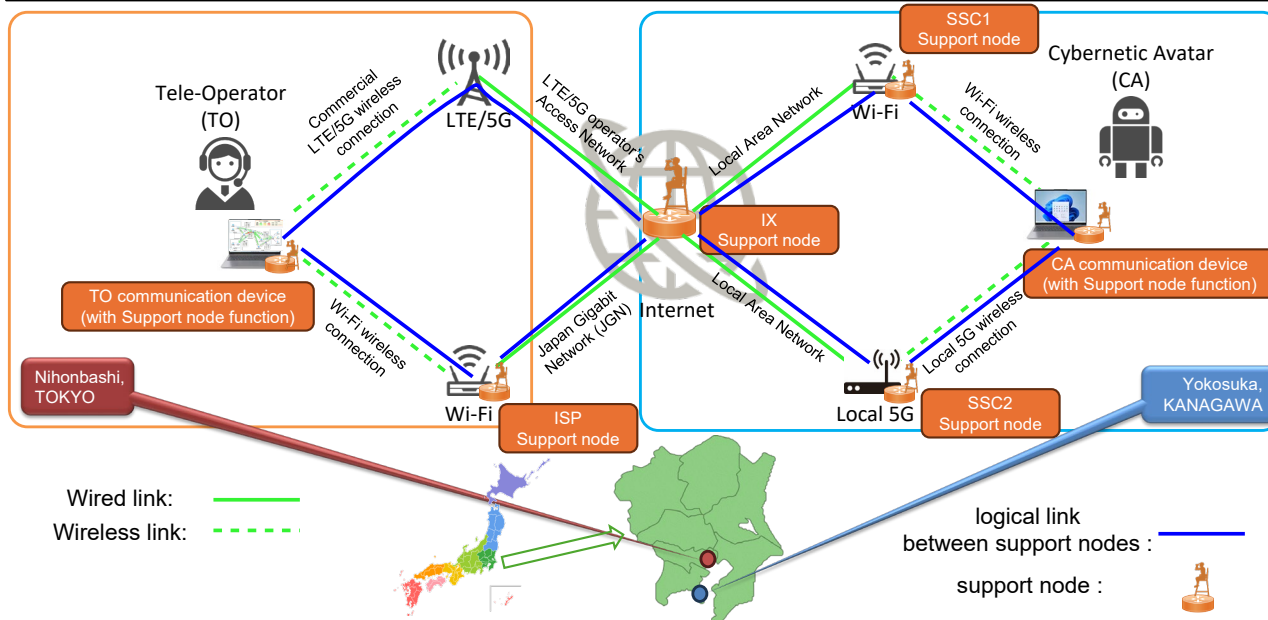


0'03'' 動作開始
0'30'' パケットロス5%発生
1'07'' 通信経路切り替え
1'18'' 軌跡を確認
1'38'' 経路切り戻し
2'09'' 動作停止

- サポートノードによる遠隔操作安定化を実証した成果が、ドイツで開催された国際ワークショップ Smartcom2024でBest Paper Awardを受賞
- 独フラウンホーファーなどの多くがTOとロボットの1対1通信を対象とする中、多数のCAの遠隔協調操作とCAを介したSUとのインタラクションの概念と、それを旨とした実証が高く評価

Development and Evaluation of Support Node Function for Reliability-ensuring Platform of Cybernetic Avatar

Homare MURAKAMI, Kazuo IBUKA, Atsushi Wakayama,
Shinichi HAMA, Jun AMAGAI and Takeshi MATSUMURA
National Institute of Information and Communications Technology
E-mail: {homa, ibuka, Wakayama, hama3, amagai, matsumura}@nict.go.jp



H. Murakami, et al., "Development and evaluation of support node function for reliability-ensuring platform of cybernetic avatar," in Proc. Smartcom2024, Nov. 2024.

- ムーンショット目標1における信頼性確保基盤の取り組みを紹介
- JGNを含めた遠隔通信環境を構築し、ロボット遠隔操作デモを実施
 - ▶ JGNの安定な通信経路上に、遅延やジッタを挿入して遠隔操作に影響が出ることを示した
 - ▶ 開発したサポートノードの機能により、遠隔操作を安定化できることを実証した
 - ▶ 得られた成果を国際遠隔操作環境に適用した実証実験に成功。国際会議での受賞に結び付いた