

令和3年度
課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証
ローカル5Gを活用した遠隔型自動運転バス社会実装事業
成果報告書概要版

令和4年3月25日

一般社団法人ICTまちづくり共通プラットフォーム推進機構

実証概要

背景・目的

群馬県前橋市は、過度に自動車に依存した社会であり、公共交通による交通手段分担率の低迷が大きな課題となっている。そこで前橋では「前橋市地域公共交通計画」を策定し「公共交通による、まちなかの回遊性の向上」を目標に個別施策が展開されているが、路線バスにおいては運転事業者のドライバー不足、運用コストの低減が必須且つ喫緊の課題となっており、複数事業者の共同運行および自動運転バスの導入等がその解決策として掲げられ令和4年度中の社会実装を目標に事業が推進されている。

自動運転バスの社会実装においては前橋駅⇄中央前橋駅区間の全走行箇所を5G化することが望ましいとはいえ、自立的な運用モデルを考えた場合には不可能であることから、一般的な直線道路等の通常区間はLTEによる運行を行い、最も複雑な走行環境(変則の五差路、バス、タクシーの乗り入れ、一般車両の乗り入れ、歩行者の横断等、不確実性の高い多数の要素)であり、自動運転走行が困難な上毛電鉄中央前橋駅ロータリー付近についてローカル5G通信利活用による管制を行った。また、自立運用モデルを想定した場合には安全性と並行してコストメリットを高める必要があり、管制官が複数の自動運転車両に対して遠隔監視・操作・操縦を行う(1:n運行)が必須の要件となり、本実証を通じその実現可能性を高めるべく実証を行った。

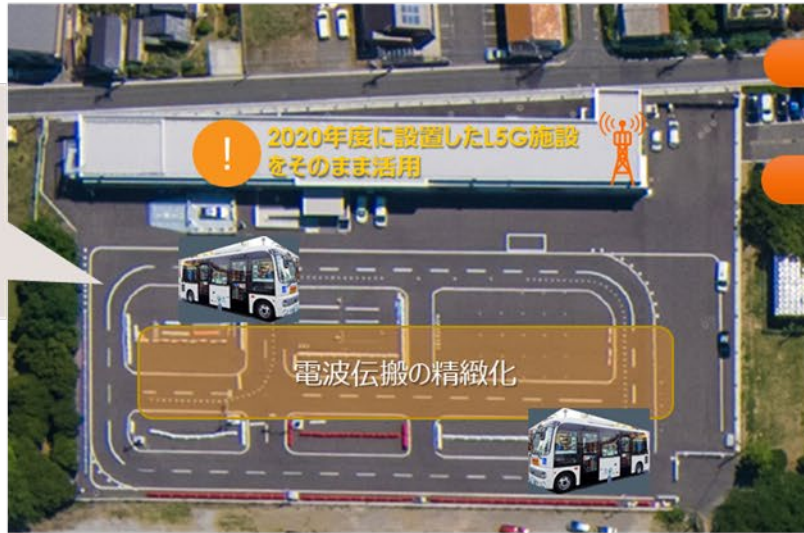
実証概要

- 対象路線: 前橋駅⇄中央前橋駅
- ローカル5G対象エリア: ①中央前橋駅前ロータリー(前橋市の自己土地)、②群馬大学CRANTS試験路
- 実証内容: 上記の①、②のエリアでそれぞれ技術実証、課題実証を実施
- 実証のポイント: 通常交通環境はLTEで運行し、交通環境が複雑な中央前橋駅をローカル5G化。社会実装を見据え、安全性の向上と費用対効果の関係から1:nで運行できる仕組みの実装(実証では1:2で運行)を目指し、自動運転バスの「複数台運用」、及び「遠隔監視・操作・操縦」の実証を行った。

実証概要(全体イメージ)

CRANTS試験路実証

中央前橋ロータリー等
複雑環境を模擬



技術実証

- 中央前橋駅を想定した電波伝搬モデルの精緻化

課題実証

- 5G対応型遠隔管制室情報集約ソリューション (車両-遠隔管制室間)
- 5G対応型遠隔管制室情報集約ソリューション (路側-遠隔管制室間)
- カメラ映像伝送安定化ソリューション (車両-遠隔管制室間、路側-遠隔管制室間、車両一路側)

公道実証



技術実証

- 中央前橋駅を想定した電波伝搬モデルの精緻化

課題実証

- 5G対応型遠隔管制室情報集約ソリューション (車両-遠隔管制室間)
- 5G対応型遠隔管制室情報集約ソリューション (路側-遠隔管制室間)
- カメラ映像伝送安定化ソリューション (車両-遠隔管制室間、路側-遠隔管制室間、車両一路側)

実証環境の構築

<実証環境の構築>

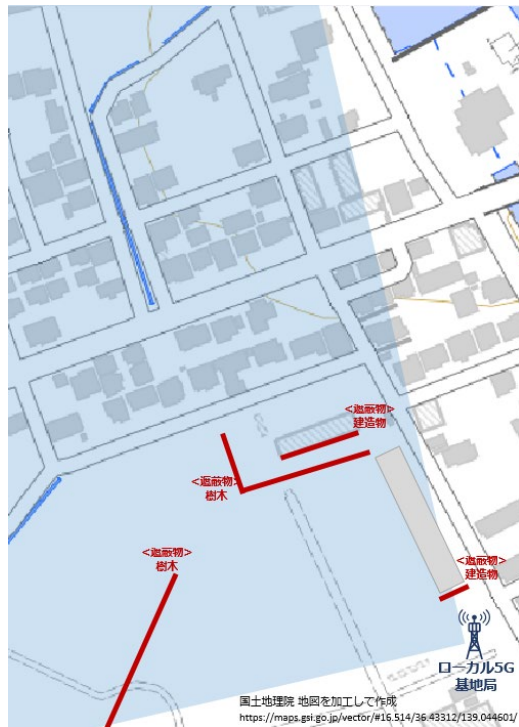
■ 実施環境

試験路実証環境と公道実証環境を設定

■ 試験路実証環境

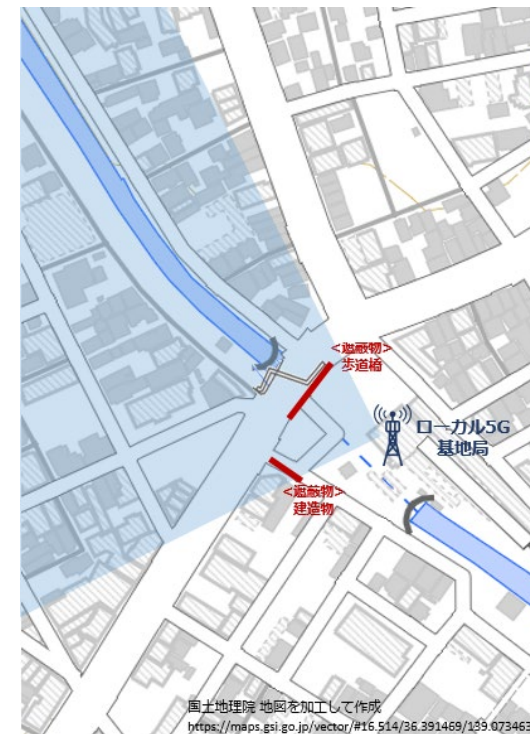
群馬大学

次世代モビリティ社会実装研究センター
(GRANTS)



■ 公道実証環境

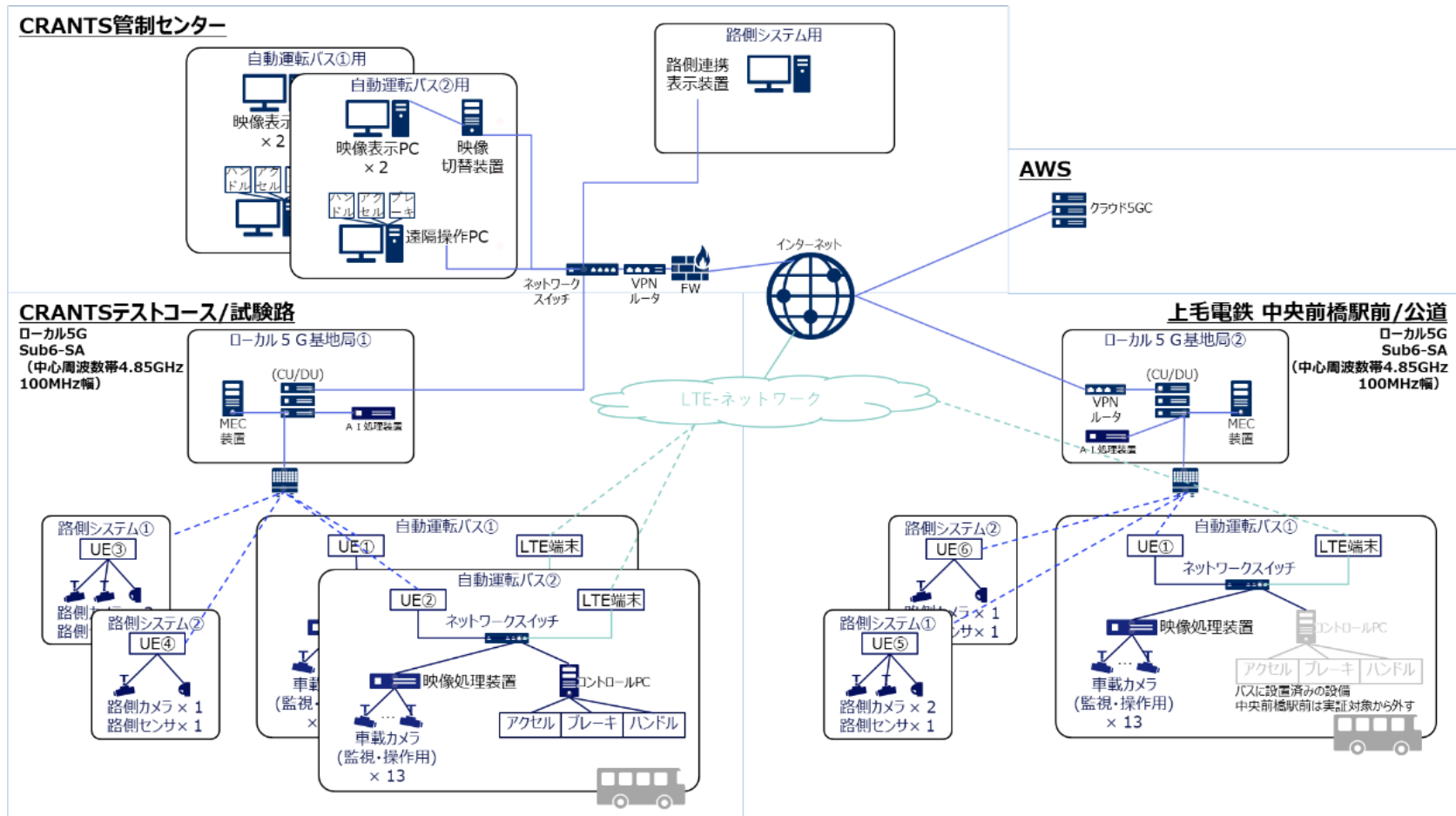
上毛電鉄中央前橋駅周辺



<実証環境の構築>

■ ネットワークシステム構成

4.8-4.9GHz帯域を利用したStand Alone方式のローカル5G基地局を構築



<実証環境の構築>

■ システム機能・性能・要件

■ 通信性能

構築した実証環境の通信性能を以下に記載

■ 試験路実証環境

周波数帯	中央周波数帯 4.85GHz
帯域幅	100MHz幅
送信出力	20dBm
UL : DL比率	1:1

■ 公道実証環境

周波数帯	中央周波数帯 4.85GHz
帯域幅	100MHz幅
送信出力	20dBm
UL : DL比率	1:1

<実証環境の構築>

■ 免許及び各種許認可

■ 無線局免許

無線局の種別: 実験試験局

免許人: 日本電気株式会社

免許申請: 令和3年11月29日

本免許取得: 令和3年12月10日

■ その他要件

使用したローカル5G関連の機器の開発供給計画認定を確認

・認定開発供給事業者名: 株式会社グレープ・ワン フォックスコン・ジャパン株式会社

・開発供給計画認定番号: 2021 開 1 総経第 0003 号-1

・認定日: 令和3年5月13日

■ 実証環境の運用

ローカル5G基地局の運用: 日本電気株式会社

技術実証: 日本電気株式会社

課題実証: 日本モビリティ株式会社

試験路の提供、車両の提供: 群馬大学

公道実証のフィールド提供: 前橋市 / 上毛電気鉄道株式会社

ローカル5Gの電波伝搬特性等に関する技術的検討 (技術実証)

技術実証(概要／技術的課題／ローカル5Gの電波伝搬特性等の測定)

技術実証の概要

●ローカル5Gの電波伝搬特性等の測定

CRANTS試験路および上毛電鉄中央前橋駅周辺にて受信電力や映像伝送等を想定した伝送スループットの測定・分析を実施した。

●電波伝搬モデルの精緻化

電波法関係審査基準(平成13年総務省訓令第67号)が規定するエリア算出法に基づく基地局ごとのカバーエリア及び調整対象区域と実測値の比較検証、現実の利用環境に近い電波伝搬モデル(算出式、パラメータ)の検討した。

課題解決システム利活用環境における技術的課題

伝搬経路上に水面が存在する場合や、基地局からの方位により遮蔽物の割合が異なる環境の場合、方位によってカバーエリア及び調整対象区域が変動することが想定される。このため、エリア算出法により算出したカバーエリア及び調整対象区域と、実際の電波環境に差異が生じる恐れがある。

ローカル5Gの電波伝搬特性等の測定

[実証目標]

- ・エリア算出法と実測結果の差を確認した。
- ・ユースケースに基づく所要性能を実現できているか確認した。

ULの伝送スループット : 20Mbps(1台あたり)

DLの伝送スループット : 100kbps(1台あたり)

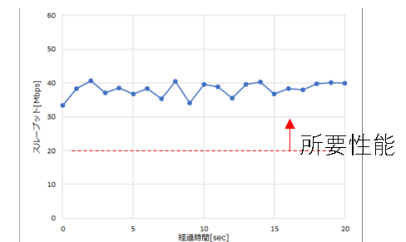
往復伝送遅延 : 43ミリ秒

[実証結果]

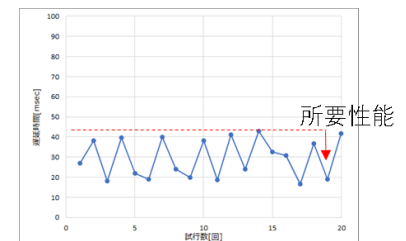
- ・CRANTS試験路、上毛電鉄中央前橋駅周辺いずれの実証環境でもアンテナ指向方向外を除き、エリア算出法のエリア端より遠方で、閾値の値を観測した。
- ・アンテナ指向方向外を除き、必要な所要性能を満たしていることを確認した。



エリア算出法と実測結果の差
上毛電鉄中央前橋駅周辺



スループットの測定結果



遅延時間の測定結果

技術実証 (電波伝搬モデルの精緻化 実証目標／仮説)

実証目標

[Kの実証]

上毛電鉄中央前橋駅周辺に位置する水路を使用し、水路に近接した地点と水路が近接していない地点の損失量の変動を検証し、水路の電波伝搬への影響を定量化する。

[Sの実証]

遮蔽物の電波伝搬への影響を検証する。

実証仮説

[Kの実証仮説]

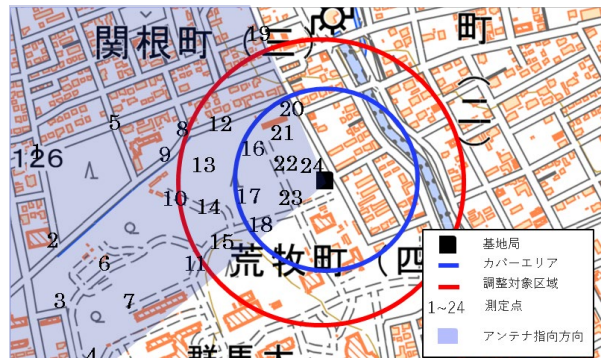
K=6を仮説とする。これは直接波と水面を反射した反射波が同相で合成され受信した場合に受信電力が最大6dB向上するためである。

[Sの実証仮説]

CRANTS試験路は基地局~測定点間に樹木や家屋があるため郊外(S=12.3)を仮説とする。上毛電鉄中央前橋駅周辺は下記のように3分類し、それぞれでS値の仮説を立てた。

補正値の仮説

分類	実証環境	補正値K	補正値S
1	CRANTS試験路	0	12.3
	中央前橋駅(大通り沿い)		
2	中央前橋駅(水路沿い)	6	12.3
3	中央前橋駅周辺(建造物密集)	0	0



CRANTS試験路 測定点



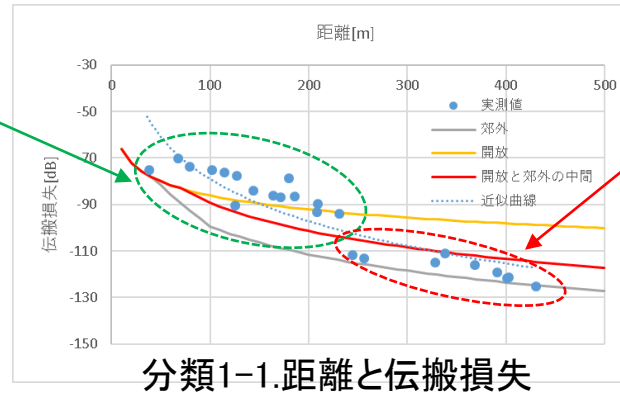
上毛電鉄中央前橋駅周辺 測定点と分類

技術実証 (電波伝搬モデルの精緻化 実証結果 1/2)

【分類1-1. CRANTS試験路(K=0, S=12.3)】

- ・開放と郊外の間値相当のS値で実測値近似曲線と類する伝搬損失となった。
- ・CRANTS試験路のような部分的に開放地相当の環境があるものの樹木や家屋が散在するエリアは開放地もしくは、開放と郊外の間値の補正値の使用が最も有効であった。

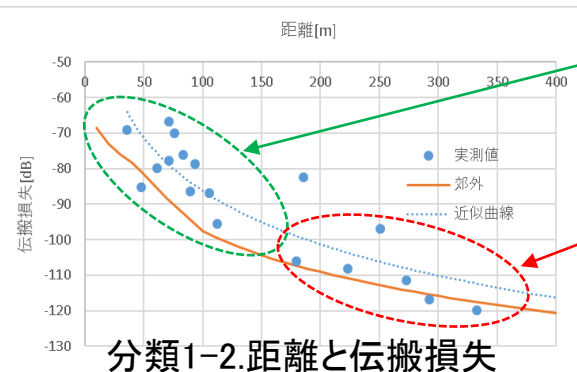
基地局が完全に見通し状態or樹木の隙間から基地局が確認できる位置関係となる。このため、基地局から240m未満の測定点では開放地に近い電波伝搬特性となる。



基地局と測定点の間に遮蔽物があり、240m未満の測定点より伝搬損失が大きくなっている。基地局から240m未満では開放地に近い伝搬損失の傾向であるため、240m以上の地点でも郊外の伝搬損失より伝搬損失が少ない傾向であると考察する。

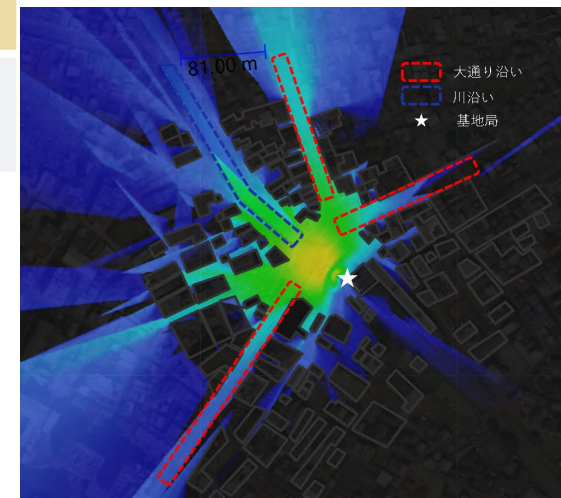
【分類1-2. 上毛電鉄中央前橋駅周辺 大通り沿い(K=0, S=12.3)】

- ・道路幅の広い(概ね20m)道路が存在する場合は、市街地相当のエリア(周囲に2階以上の建物が密集しているエリア)でも郊外地の補正値を使用することが必要であると考察した。



基地局が見通し状態となり郊外地より伝搬損失の少ない結果となったと考察する。

大通り沿いでは遮蔽となる建造物がないため、郊外相当の伝搬損失となったと考察する。この結果はレイトレース法によるシミュレーションとも合致している。

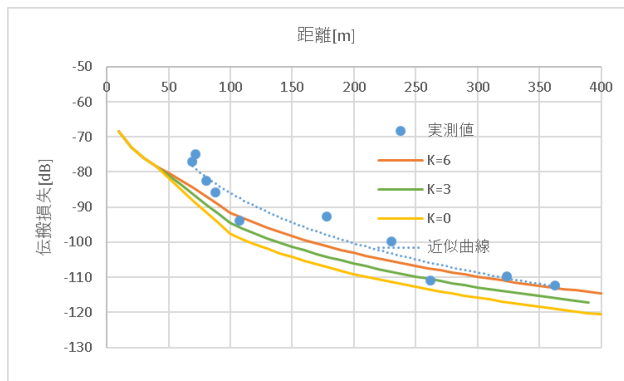


中央前橋駅周辺
レイトレース法による電波伝搬シミュレーション

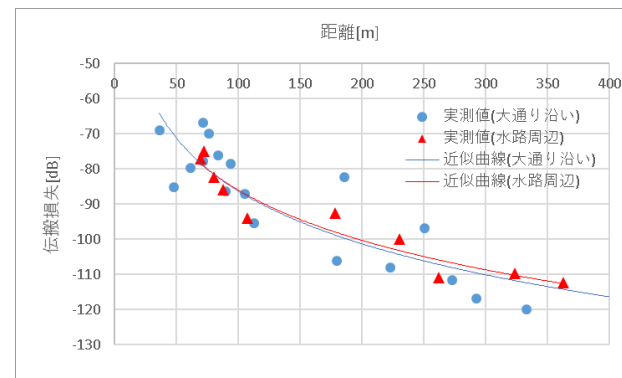
技術実証 (電波伝搬モデルの精緻化 実証結果 2/2)

【分類2.上毛電鉄中央前橋駅周辺 水路沿い】(K=6,S=12.3)

- ・左図実測結果に着目すると水路沿いの道路ではK=6, S=12.3の補正値を使用することが実測結果に合致した。
- ・分類1-2(右図中で「大通り沿い」と表記)の近似曲線と分類2(図中で「水路沿い」と表記)では近似曲線に明確な差を確認できず。
→大通り沿いと、水路沿いは水路以外の環境(道路幅や樹木)が類似した。
→環境の差分である水路は、深さが2m以上であり通常時の水面は見通し外となるため、伝搬損失に与える影響が少ない。
→幅10mに満たない狭い水路の沿道(本実証環境)では、水路による影響は軽微であると考察した。



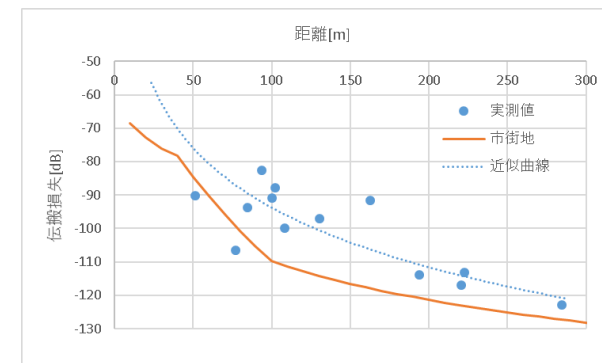
分類2.距離と伝搬損失



分類2.距離と伝搬損失2

【分類3.上毛電鉄中央前橋駅周辺 建造物密集エリア】(K=0,S=0)

- ・エリア算出法 市街地の分類より伝搬損失が少ない傾向であった。
- ・他の分類と比較し、距離と伝搬損失の関係にバラツキが大きい。
→市街地では周囲環境が多様なため、バラツキが発生したと考察した。



分類3.距離と伝搬損失

技術実証 (電波伝搬モデルの精緻化 まとめ)

電波伝搬モデルの精緻化 まとめ

[Kの実証]

・幅10mに満たない狭い水路の沿道(本実証環境)では、水路による影響は軽微であることを確認した。

[Sの実証]

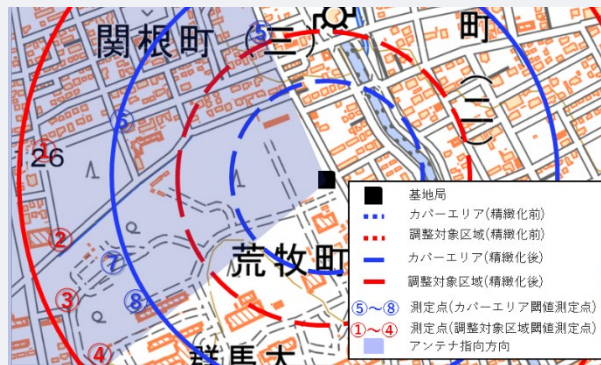
・部分的に開放地相当の環境があるものの樹木や家屋が散在するエリアは、既存のエリア算出法で規定されている補正值であれば「開放地」、新たにS値を設けるとすると「開放と郊外の間補正值」の使用が最も有効であった。(CRANTS試験路)

・市街地(2階以上の建物が密集するエリア)においても幅の広い道路が直線状に存在する場合は、「郊外」と区分し、補正值S=12.3を適用する。(上毛電鉄中央前橋駅周辺)

[精緻化前後のカバーエリアおよび調整対象区域]

CRANTS試験路は「開放地と郊外地の間補正值(S=22.4)」
中央前橋駅周辺は大通り沿い(S=12.3)、水路周辺(S=12.3)、
建造物密集エリア(S=0)と精緻化した。

※作図ではエリアが最も広くなるS=12.3、K=0を使用。



CRANTS試験路(S=22.4)



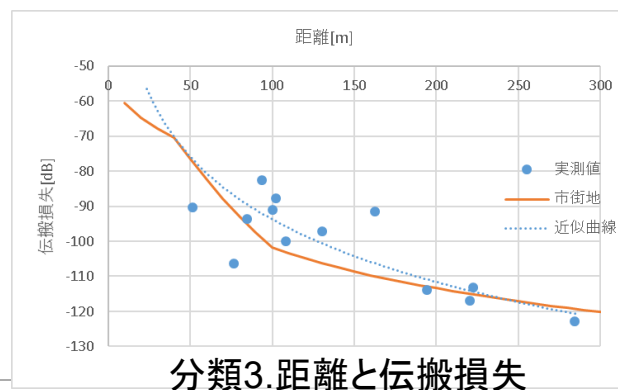
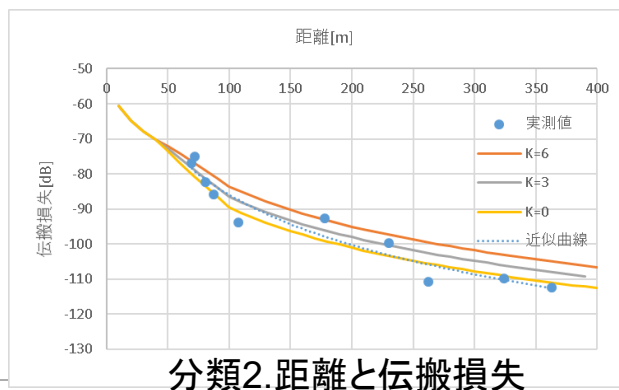
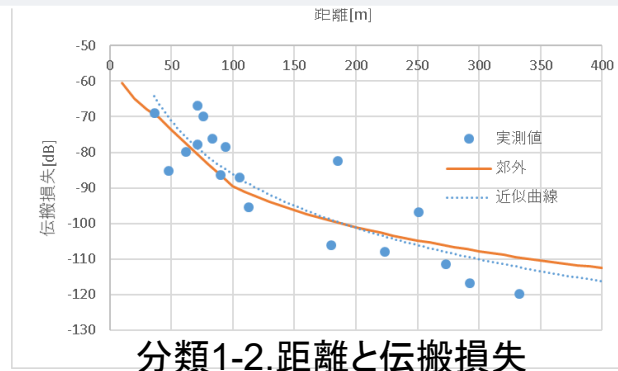
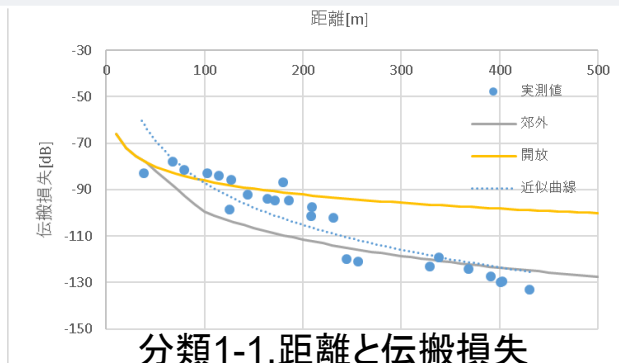
上毛電鉄中央前橋駅周辺(S=12.3、K=0)

→上記のようにS値を補正した場合においても、全体的に伝搬損失が上振れしており、補正しきれいいなかったため、次ページにて原因検証・考察を追加で行った。

技術実証（電波伝搬モデルの精緻化 追加考察）

【追加考察.人体損失について】

- ・前述した内容では、実測値の電波伝搬損失がエリア算出法より少ない傾向であったため、その原因について追加で考察を行った。
 - ・L5Gにおけるエリア算出法では「 $Pr = Pt + Gt - Lf + Gr - L - 8$ 」と定義されており、文献を参照するとこの“-8”が人体損失として考慮されていた。
 - ・本実証では人体損失が生じない構成で測定を実施。人体損失を除外した伝搬損失を改めて導出した。これにより各分類の近似曲線と類した伝搬損失を得ることができた。
 - ・人体損失の項は、想定するシステムにより調整する必要があると考察した。
- 人体損失の項をユースケースに合わせて補正(除外)すると、S値は従来通りの適用でも差し支えないと考察する。



ローカル5G活用モデルの創出・実装に関する調査検討 (課題実証)

実証環境

遠隔管制室の様子



高精細な映像情報を伝送

自動運転車両(2台)



路側機器



路側カメラ

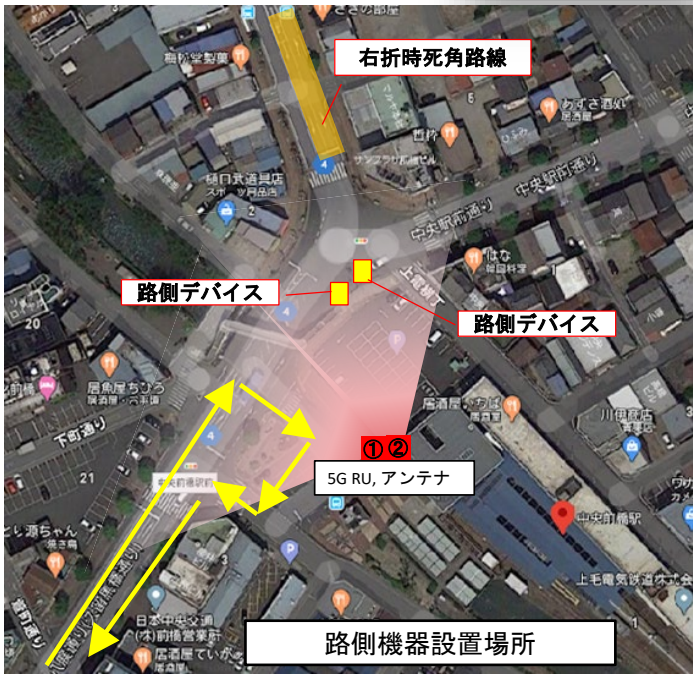


LiDAR

低遅延な指令情報を伝送



本開発実証では、前橋市における令和4年度の上毛電鉄中央前橋駅 - JR前橋駅間の自動運転バスの社会実装を目指し自動運転バスの「複数台運用」、及び「遠隔監視・操作・操縦」の実証を行った。

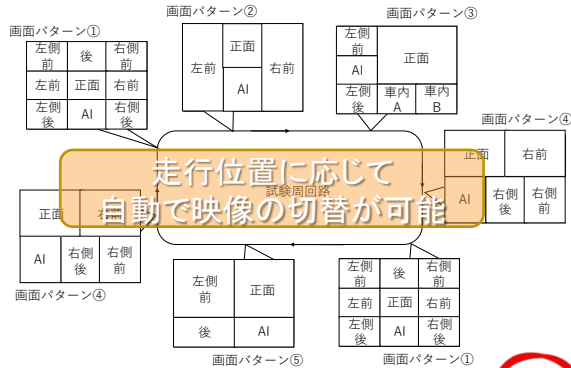


課題別の有効性の検証結果(1/3)

5G対応型遠隔管制室情報集約ソリューション
(車両一遠隔管制間)

位置情報に基づく最適映像構成指令機能

機能の特徴



達成目標 評価場所: 試験路&公道

達成

右折での安全確認をモデルケースとして、安全確認時間が、LTEとローカル5Gで30%以上の低減効果(高精細画像による安全確認距離の増大と、通信遅延の短縮による)があるか、評価する。

検証結果

中央前橋駅ロータリーに至る右折をモデルケースに対し、LTEでは遠隔オペレーターの安全確認時間が83%低減できることが確認できた。

LTE/ローカル5G対応自動映像切替機能

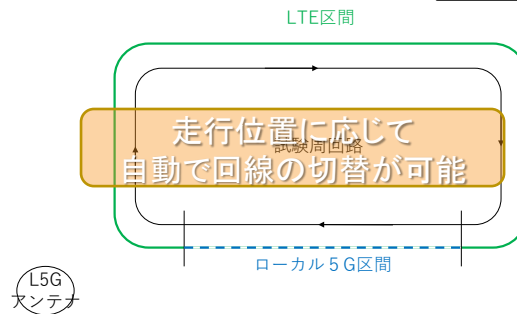
LTE



機能の特徴



ローカル5G



L5G
シグナル

達成目標 評価場所: 試験路&公道

達成

LTEとローカル5Gの切替ポイントを有する走行軌道において繰り返し切替を行うことで、映像途絶割合0%を達成できるか、評価する。

検証結果

試験路にて、手動および自動での映像切替を各30周実施。手動の場合3回の操作ミスが生じたが、自動では生じなかった。またその実験の中で、手動および自動のどちらも映像途絶は生じなかった。

AIによる映像情報補助機能

機能の特徴

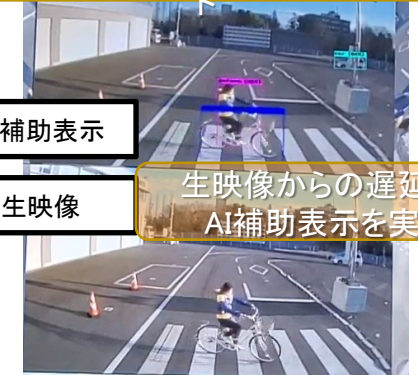


実験の様子

AIによる障害物の強調表示で遠隔オペレーターの監視業務をサポート

AI補助表示

生映像



生映像からの遅延なく AI補助表示を実現

達成目標 評価場所: 試験路&公道

達成

車載の映像構築装置にAIを組み込むことで、歩行者や対向車など、各走行シーンで危険となり得る障害物に対して強調表示を行う。

検証結果

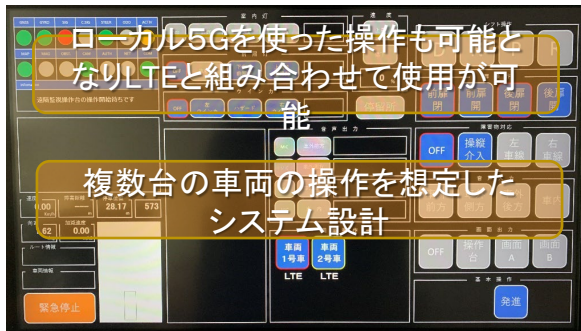
遠隔オペレーターのヒアリング結果
・昼間にも障害物の発見に寄与するが、夜間では周囲が見にくくなる中で強調機能が働くことにより、効果が増す。
などの意見が得られた

課題別の有効性の検証結果(2/3)

5G対応型遠隔管制室情報集約ソリューション
(車両—遠隔管制間)

遠隔操作機能

機能の特徴



評価場所: CRANTS試験路

達成目標

バス停での発進時などをモデルケースとして、発進操作に対する応答時間が、200ms以内となることを評価する。

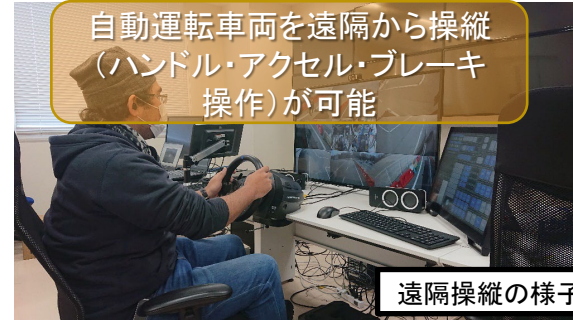
検証結果

バス停での発進時などをモデルケースとして、ローカル5Gでの発進操作に対する平均応答時間が32ms(通信時間26ミリ秒、その他通信以外要因6ミリ秒)となることが確認された。また、2台の車両を1人のオペレータで操作する実験を行い、技術的実現性が確認された。

達成

遠隔操縦機能

自動運転車両を遠隔から操縦(ハンドル・アクセル・ブレーキ操作)が可能



評価場所: CRANTS試験路

達成目標

遠隔操縦機能を有効にし、予め設定したコースを用い、LTEとローカル5Gで遠隔操縦を行った際、高精細画像による安全確認距離の増大と、通信遅延の短縮により、平均速度が20%増大することを、評価する

検証結果

直線路にパイロンを置いての車線変更を10回(各5回)行ったところ、LTEを用いた場合の平均走行速度が、ローカル5Gの平均走行速度に対して54%増大することが確認された

達成

課題別の有効性の検証結果(3/3)

5G対応型遠隔管制室情報集約ソリューション
(路側-遠隔管制間)

MEC活用による路側設置機器の削減

試験路に設置



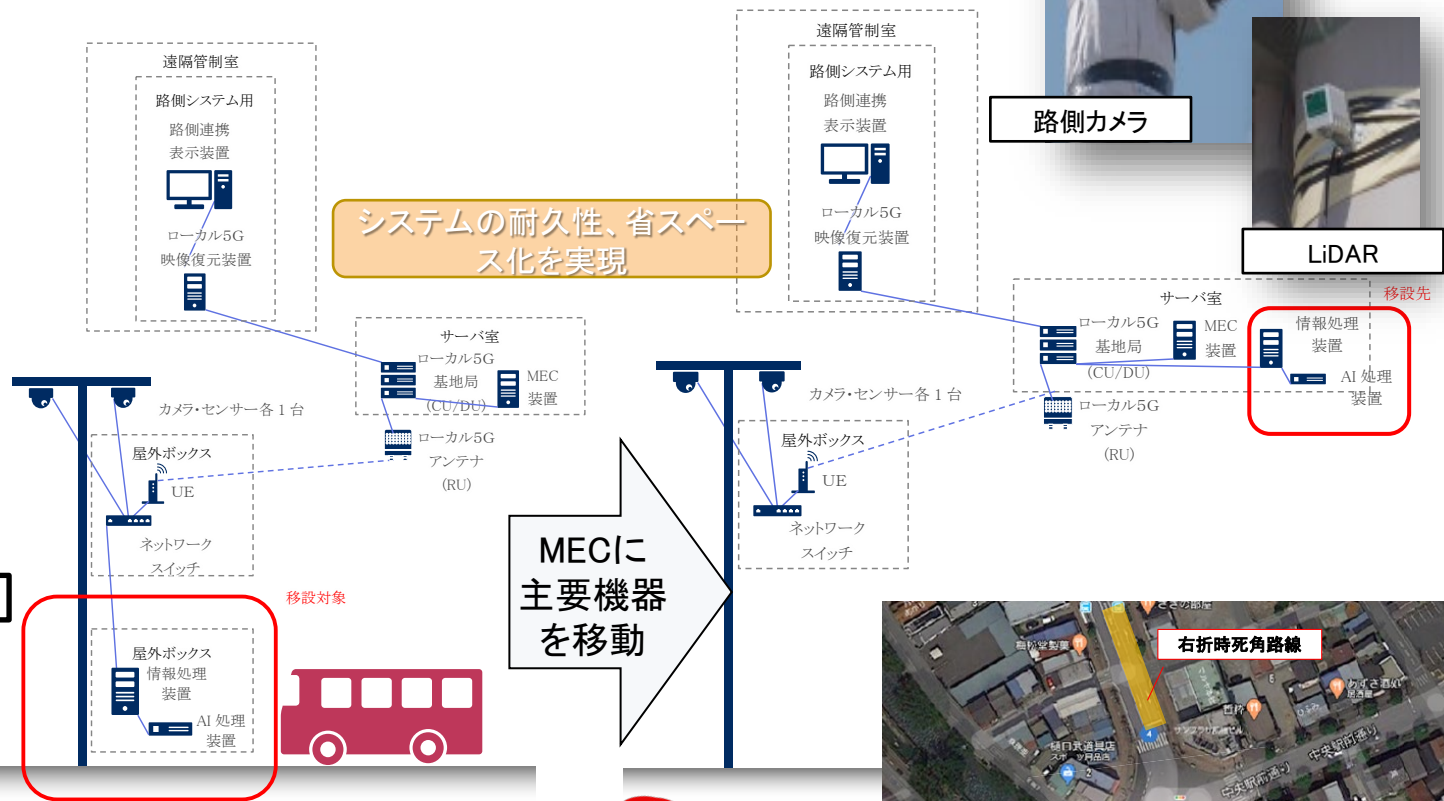
サーバー室



バス、トラック、自家用車
歩行者、自転車などを区別可能

実験結果

システムの耐久性、省スペース化を実現



達成目標

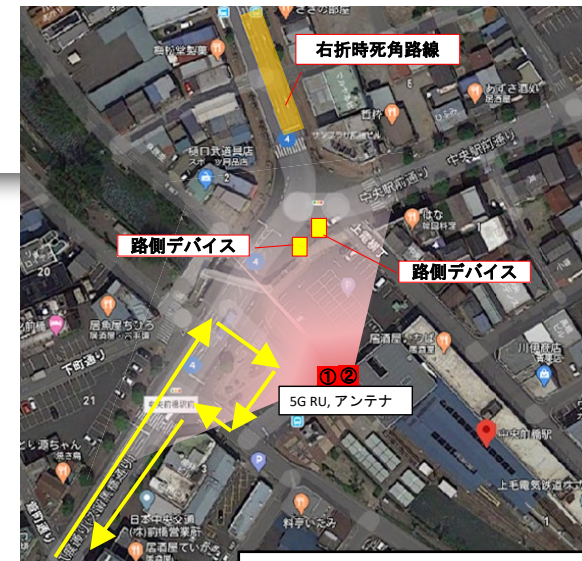
評価場所: 試験路 & 公道

達成

カメラ撮影から遠隔管制室への映像伝送およびAIによる視認補助の情報付加の合計時間が目標値である2秒以内を達成するか検証する。

検証結果

中央前橋駅に設置された路側カメラを用い、評価を行ったところ、カメラ撮影から遠隔管制室への映像伝送およびAIによる視認補助の情報付加の合計時間が0.8秒(AI補助表示処理平均時間0.733秒、通信時間0.026秒)を達成



公道での路側機器設置場所

一般公開実証実験

○実験期間: 令和4年2月21日(月)～ 令和4年2月27日(日)

※期間中、木曜、金曜を除く5日間

○区 間: 中央前橋駅～前橋駅 片道約1km

※土日祝日 前橋駅～けやきウォーク間は手動走行

○自動運転レベル: レベル2(運転席にドライバー有)

※遠隔型自動運転の実装を目指し、遠隔管制室から遠隔監視を実施

○実証のポイント:

①道路側へのセンサー、カメラの設置【日本モビリティ、NEC】

②早朝からの自動運転を実施【日本モビリティ、日本中央バス】



黄色網掛け: 自動走行

平日: 51本中51本

土日祝日: 51本中29本

2022年2月

月	火	水	木	金	土	日
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
○21	○22	○23	24	25	○26	○27
28						

○: 自動走行日

中央前橋駅時刻表

時	分		
7	12	39	59
8		26	55
9	12		40
10	10		40
11	10		40
12	10		40
13	10		40
14	10		40
15	10		40
16	10		40
17	10		40
18	10		40
19	10		

前橋駅時刻表

時	分		
7	25		50
8	12		41
9	03	26	56
10	26		56
11	26		56
12	26		56
13	26		56
14	26		56
15	26		56
16	26		56
17	26		56
18	26		56
19			

中央前橋駅時刻表

時	分		
7	12	39	59
8		26	55
9	12		40
10	10		40
11	10		40
12	10		40
13	10		40
14	10		40
15	10		40
16	10		40
17	10		40
18	10		40
19	10		

前橋駅時刻表

時	分		
7	25		50
8	12		41
9	03	26	56
10	26		56
11	26		56
12	26		56
13	26		56
14	26		56
15	26		56
16	26		56
17	26		56
18	26		56
19			

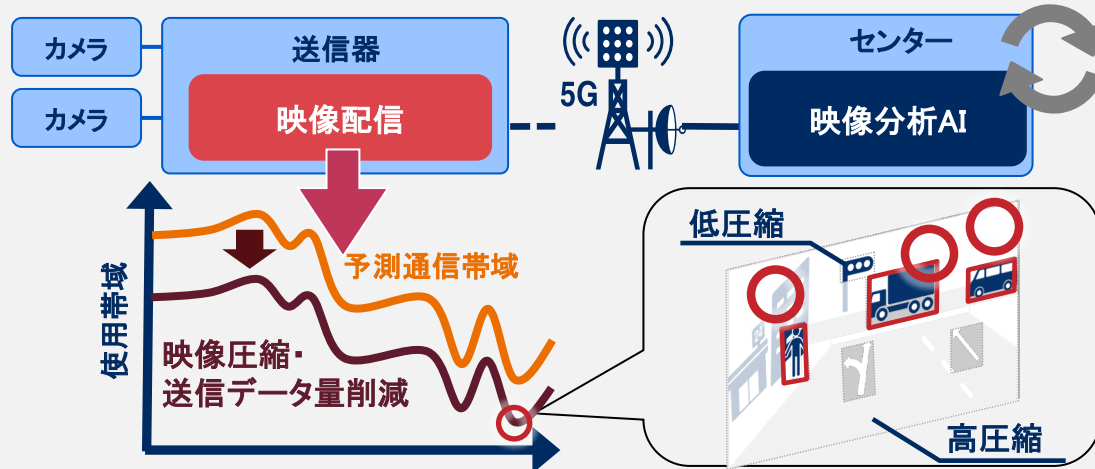
一般公開を行いながらの運用で実施することで、本運用に近い状況での知見を蓄積することができた

カメラ映像伝送安定化ソリューション

大容量・低遅延といったローカル5Gの特性を生かしつつ通信品質変動に対応するため、通信速度に合わせ映像データ容量を調整する技術を適用。遠隔管制室の安全確認業務をより安定・高効率に。

通信速度に合わせた映像配信技術

通信帯域予測し、送信データ量が予測した通信帯域を下回るように映像圧縮することで映像の乱れを回避。映像圧縮は、高い圧縮効果と認識を両立するため、認識パターンに合わせた圧縮。ローカル5Gの大容量を活用。

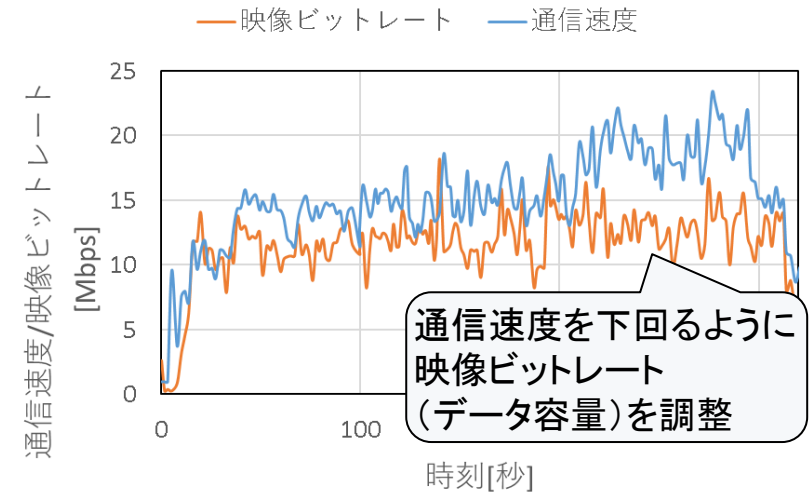


効果例: 高い映像圧縮と視認性



通信速度に合わせた映像配信技術

大容量なローカル5Gを生かしつつ、移動による遮蔽発生に伴う通信速度の低下に対応して映像品質(データ容量)を調整。



映像の乱れ・カクツキを回避
(目視確認)

まとめ

まとめ

課題実証・技術実証

技術実証

- [Kの実証]幅10mに満たない狭い水路の沿道(本実証環境)では、水路による影響は軽微であることを確認した。
- [Sの実証]部分的に開放地相当の環境があるものの樹木や家屋が散在するエリアは、既存のエリア算出法で規定されている補正值であれば「開放地」、新たにS値を設けるとすると「開放と郊外の間補正值」の使用が最も有効であった。(CRANTS試験路)
- [Sの実証]市街地(2階以上の建物が密集するエリア)においても幅の広い道路が直線状に存在する場合は、「郊外」と区分し、補正值S=12.3を適用する。(上毛電鉄中央前橋駅周辺)

課題実証

- 本実証における機能を実装することにより、遠隔型自動運転に必要な管制室での遠隔オペレーター業務において、より安全を確保しやすい機能の実現が確認できた。当初はローカル5Gの特徴とされる大容量低遅延が自動運転に寄与する部分と認識していたが、理想的な性能を得るためには自動運転システムと、ネットワークで十分な設計のすり合わせといったノウハウのさらなる蓄積が重要であると感じた。
- 昨年度課題に対して、ソリューションの高度化により課題の解消を図ることができた。一方で、自動運転バスの運用の特性上、ローカル5G圏外と圏内の行き来が生じるため、行き来での接続時の通信安定性を高める必要性を感じた。また、本格的な実装においては、自動運転システムの法的な手続きを進める必要があり、今後の課題としてはその手続き通過にかかる検証等(ローカル5Gに限らず全般的な)が必要となる。

遠隔型自動運転バスの実装に向けて

- 自動運転の実装に向けては自治体・地域交通事業者・地域住民によって大きな期待が寄せられており、2022年度の社会実装にむけて前橋市においては、本調査検討で対象としたJR前橋駅ー上毛電鉄中央前橋駅のシャトルバス区間における遠隔型自動運転の実装に向けて、より具体的な計画を推進していく。
- 実証によって1:n運行の実現可能性が高まったことを受け、その運行安全性の向上と合わせ、ローカル5Gを活用した自動運転バスの費用対効果もより詳細に検証する必要があり、現時点では有人運行と比べ、ほぼ同等のコスト構造となることから今後のさらなる機器の低廉化、対象路線の拡大、他の自動走行モビリティとの共用など多面的な価値を勘案し実用に向けた検討を行う。
- 遠隔型自動運転バスの社会実装に向けては、ローカル5Gによる遠隔管制の精度向上だけでなく、運行そのものの安全性の向上、車内の安全保全、料金收受、事故時の責任分界、障がい者等への対応、乱横断を防ぐ道路形状への対応など多次元での課題対応が求められる。