

5G 通信技術を用いた C-V2X における セルラーリソース割当手法の実装と評価

中村 樹[†] 荒川 伸一[†] 宮坂 拓也^{††}

田上 敦士^{††} 長谷川 剛^{†††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5
^{††} 株式会社 KDDI 総合研究所 〒356-8502 埼玉県ふじみ野市大原 2-1-15
^{†††} 東北大学電気通信研究所 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1
E-mail: †{i-nakamura,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 近年の組込みシステム技術や通信技術の進歩に伴い、サイバーフィジカルシステム (CPS) の実用化が進んでいる。CPS では様々なアプリケーションや大量のデバイスが動作し、それぞれに求められるサービスが異なることから、限られた通信リソースを効率的に割り当てる必要がある。本稿では、Cellular-V2X 環境においてフィジカルシステムの振る舞いをサイバーシステムで予測することで、周波数リソースを制御する手法を実装し評価した。道路上の監視カメラが走行車両の映像を基地局へ送信する環境を想定した実験環境を構築し、5G 端末と一体になったカメラが走行車両を捉えている間に多くのセルラーリソースを割り当てられることを確認した。

キーワード C-V2X, サイバーフィジカルシステム, 5G, セルラーリソース割当, マルコフ連鎖, 車両位置予測

Implementation and Evaluation of Cellular Resource Allocation Method for 5G-based C-V2X

Itsuki NAKAMURA[†], Shin'ichi ARAKAWA[†], Takuya MIYASAKA^{††},
Atsushi TAGAMI^{††}, Go HASEGAWA^{†††}, and Masayuki MURATA[†]

[†] Information Science & Technology, Osaka University 1-5 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan
^{††} KDDI Research, Inc. 2-1-15 Ohara, Fujimino-shi, Saitama, 356-8502 Japan
^{†††} Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University 2-1-1 Katahira, Aoba-ku Sendai-shi, Miyagi,
980-8577 Japan
E-mail: †{i-nakamura,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract With recent advances in embedded systems and communication technologies, Cyber-Physical Systems (CPS) are being practical. Since various applications and a large number of devices operate in a CPS, each of which will require different services, communication resources should be allocated instantaneously and efficiently. In this paper, we implement and evaluate a method to control frequency resource for 5G-based cellular-V2X environment by predicting the behavior of the physical system based on the information processing at cyber systems. We prepare an experimental environment supposing surveillance applications where a surveillance camera on the road transmits images of moving vehicles to a base station. By the experiments, we confirm that more cellular resources can be allocated while the camera integrated with the 5G User Equipment (UE) is capturing the moving vehicles.

Key words C-V2X, Cyber-Physical System, 5G, resource allocation, Markov chain, vehicle location prediction

1. はじめに

近年の組込みシステム技術や通信技術の進歩に伴い、サイ

バーフィジカルシステム (CPS) の実用化が進んでいる。CPS のコンセプトの下、様々なアプリケーションが考えられており、エンターテインメント、交通、スマートグリッド、医療など様々

な領域に広がっている。

CPS では様々なアプリケーションや大量のデバイスが動作し、それぞれに求められるサービスが異なることから、限られた通信リソースを適切に割り当てる必要がある。特に、都市に設置されることが想定される交通カメラや防犯カメラからの情報収集は、4G や 5G などの移動体通信システムの利用も考えられており [1]、動画データを基地局へ高品質・低遅延で送信することが望まれるため、より効率的かつ必要なタイミングでのセルラーリソースの割当が求められる。しかし、現在のセルラーリソースの割当は、フィジカルシステムの振る舞いによるリソース要求の変化に基づいて行われており、サイバースystemによる情報解析とは独立している。例えば、フィジカルシステムの振る舞いによって人の密集度が高まるとリソース要求も高まり、人の密集度が低くなるとリソース要求も低下することは容易に予見でき、人の密集度に応じたリソースの割当は可能である。しかし、将来的な人の密集度を予測して予めリソースを割り当てることはしておらず、CPS においてサイバースystemが行うフィジカルシステムの予測とは独立してセルラーリソースの割当が行われる。この場合、必要な量のリソースが必要なタイミングで割り当てられるとは限らないため、リソース不足や過度な割当が起こる可能性がある。したがって、フィジカルシステムの振る舞いをサイバースystemで分析する制御ループに通信リソース制御を組み入れることでリソースの効率化が期待できる。

本稿では、CPS におけるフィジカルシステムとサイバースystemの制御ループに通信リソース制御を組み入れ、必要なタイミングでリソースを割り当てることの有効性を実機を用いて明らかにする。そのために、道路等における監視カメラが走行車両の映像を基地局へ送信する CPS を想定し、5G 端末と一体となったカメラが走行車両を捉えている間に多くのセルラーリソースを割り当てる手法を実現する。実装した CPS は、フィジカルシステムでは車両が走行し、サイバースystemでは車両の位置速度情報の収集、車両位置予測を行う。また、セルラーリソース割当手法の実装にあたり、5G システムをソフトウェア無線機器を用いて構築し、更に車両位置予測結果に基づいたリソース割当が可能となるよう 5G システムを拡張する。

実機による評価のためには、車両の存在確率分布の計算手法、車両位置予測結果に基づくセルラーリソース割当アルゴリズム、および、5G システムがそれぞれ必要となる。このうち車両の存在確率分布の算出は、文献 [2], [3] の手法を用いる。ただし、現行の道路交通法では実車両を用いた検証が困難なこともあり、ミニチュア車両を用いた車両走行システムを実装する。その際に、実スケールとミニチュアスケールの物理挙動の差異を吸収する必要があり、そのためのパラメータ調整を行う。

2. 関連研究

基地局へ映像データを送信する際にリソース使用量の効率化を図る研究として、文献 [4], [5] がある。文献 [4] では、無線ビデオ監視システムにおいて、監視映像の品質と遅延の観点から、長期的なシステム性能を最適化するために、映像のビットレ

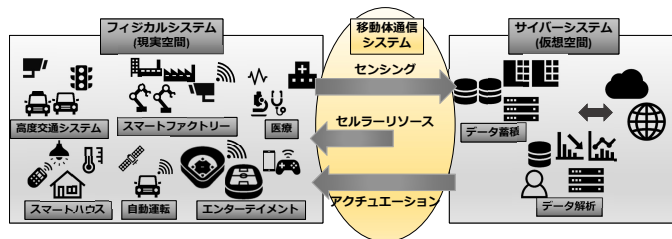


図 1 CPS の概要とアプリケーション例

トの動的制御とアップリンクリソースの割当を同時に考慮した確率的最適化問題を定式化している。文献 [5] では、車両交通モニタリングにおいて、エッジデバイスで動作する物体認識アルゴリズムを用いて重要な情報を削除することなく送信するフレームレートを大幅に削減することに加え、利用可能な帯域に送信を適応させることで、5~10% のフレームを送信することで 95% 以上の物体識別制度を維持できることを示している。これらの研究では映像のデータサイズを小さくすることを目的としており、車両の位置予測に基づきリソースを割り当てる本稿のアプローチとは異なっている。本稿の手法と組み合わせることで、リソースの使用の更なる効率化も考えられる。

3. 実装システム

3.1 サイバーフィジカルシステム

サイバーフィジカルシステム (CPS) とは、ネットワーク化された組み込みシステムであり、フィジカルシステムにおいて現実世界の事象をセンサーネットワークで収集し、サイバースystemにおいて収集した情報を蓄積及び AI 技術などを用いて解析を行い、その結果をフィジカルシステムに働きかけるといった、センシングとアクチュエートからなるフィードバックループによって制御される [6], [7]。図 1 に示すように、CPS のコンセプトの下様々なアプリケーションが考えられており、エンターテイメント、交通、スマートグリッド、医療など様々な領域に広がっている。監視、自動運転、高度道路交通システムなどは主要な CPS アプリケーションであり、複数の異種ネットワーク技術が使用される [8], [9]。このような CPS では、5G 通信技術を用いて大量のセンシングデータを処理することは当然考えられているが、一方で通信リソースを効率的に管理するネットワーク柔軟性の確保が重要となる [10], [11]。本稿では、CPS アプリケーションのサービス内容に応じて 5G セルラーリソースを制御することを考える。

3.2 想定システムとシナリオ

移動体の将来位置を予測することで、必要なタイミングでの通信リソースの割当が期待できる。例えば、特定の車両の将来位置を予測してセルラーリソースを割り当てることで、監視カメラを用いて不審車両をリアルタイムで追跡できると考えられる。また、人々の動きを予測し、混雑するであろう場所に予めリソースを割り当てることも可能となる。

本稿では、リソース制御を実現する具体例として、図 2 に示すシナリオを考える。道路等における監視カメラが走行車両の映像を基地局へ送信する CPS を想定し、この CPS では、フィ

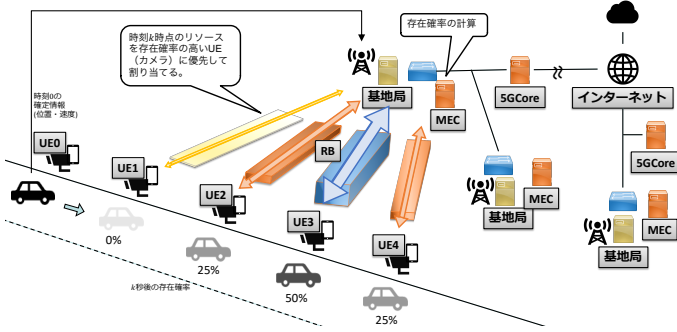


図2 想定システム図

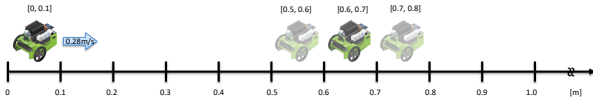


図3 セグメント長を 0.1 m とした場合の CORA で扱う位置情報

ジカルシステムでは一台の車両が走行し、サイバースystemでは車両の位置速度情報の収集、車両位置予測を行い、5G システムは 5G 端末と一体となったカメラが走行車両を捉えている間に多くのセルラーリソースを割り当てる。

3.3 車両位置予測に基づく 5G セルラーリソース割当手法

3.3.1 車両存在確率の算出

本稿では、文献 [2], [3] の手法の MATLAB 実装である “Continuous Reachability Analyzer” (以降、CORA) を用いて車両存在確率分布を算出する。CORA はマルコフ連鎖を用いて車両等の到達可能領域をセグメント単位で確率的に算出するプログラムである。セグメントとは CORA における確率分布の計算単位であり、図 3 に示すように座標空間は車両経路の始点を原点とする一次元座標で表現される。

まず、CORA によって定義されたマルコフ連鎖モデル及び、時刻 t_0 において車両から MEC サーバへ送信される初期位置・初期速度を用いて車両存在確率分布 $x(t_k, s)$ ($k \geq 1$) を算出する。ここで s はセグメント単位の位置を表している。

次に、カメラ i の撮影可能領域に車両が存在する確率 m_i を求める。ある時刻 t_k において、存在確率 m_i はカメラ i の撮影可能領域 p_i を用いて式 (1) で表される。

$$m_i(t_k) = \sum_{s \in p_i} x(t_k, s) \quad (1)$$

t_k は秒オーダーの情報であることから、基地局はこの情報を毎秒取得し利用する。以降、 $m_i(t_k)$ を存在確率と呼ぶ。

3.3.2 セルラーリソース割当手法

本稿では、2 種類の車両存在確率に基づいたセルラーリソース割当手法を用いる。なお、リソースの割当は RB (Resource Block; リソースブロック) 単位で行う。5G システムは、3.1.4 項で算出する UE i が撮影可能な領域に車両が存在する確率 m_i を用いて、UE i に対して割り当てる RB 数 R_i を決定する。ここで N_{RB} をセルラーリソースの周波数方向の RB 数とし、本報告における実験システムでは 245 である。

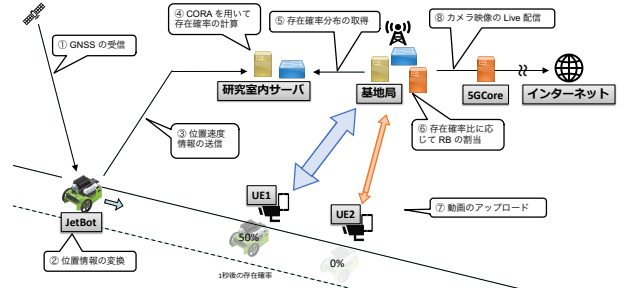


図4 実装システム図

a) 手法 1: 重み付き公平キューイング

手法 1 では、存在確率に基づいた重み付き公平キューイングによって RB を割り当てる。

サイバースystemは、存在確率 m_i を 50 倍し小数点以下を切り捨てることで重み付け後の存在確率 w_i を求める。また、200 ms ごとに計算したスループット T_i に対し、式 (2) の重み付けを行い、式 (3) によって係数 C_i を求める。

$$T_i \leftarrow \frac{T_i}{1 + w_i} \quad (2)$$

$$C_i = \frac{D_i}{T_i} \quad (3)$$

ここで D_i は UE i が送信したいデータ量を表す。次に、式 (3) で求めた C_i を比較し、一番大きな係数 C_m に対し、UE m へ送信したいデータ量に必要な RB を最大限割り当てる。UE m を除いた残りの UE に対し、同様の割り当てを繰り返す。

手法 1 は、存在確率によって重み付けを行い見かけ上のスループットを小さくすることにより、存在確率が大きいカメラに対して優先的に RB が割り当てられる。

b) 手法 2: 閾値ベース

手法 2 では、存在確率に基づいた閾値ベースで割り当てる RB 数を決定する。

サイバースystemは、存在確率 m_i を 50 倍し小数点以下を切り捨てることで重み付け後の存在確率 w_i を求める。次に、 w_i に応じて UE i に対して割り当てる RB 数 R_i を式 (4) で決定する。

$$R_i = \begin{cases} 0.1 * N_{RB} & (w_i = 0) \\ 0.3 * N_{RB} & (0 < w_i \leq 5) \\ 0.5 * N_{RB} & (5 < w_i \leq 16) \\ N_{RB} & (16 < w_i) \end{cases} \quad (4)$$

3.4 フィジカルシステムの構築

車両の存在確率分布に基づいてセルラーリソースを割り当てる手法を検証するために、3.2 節のシナリオを想定し、図 4 に示すシステムを構築した。ただし、現行の道路交通法では実車両を用いた検証が困難であり、ミニチュア車両を用いた車両走行システムを構築している。使用した機器の諸元は表 1 の通りである。

実装システムの動作を説明する。時刻 t_0 において、監視対象の車両は位置速度情報を基地局へ送信する。MEC サーバでは、 $t_0 + 1$ 秒後の車両の存在確率分布を算出する。基地局は求めた

表 1 システム構成

| 構成要素 | 詳細 |
|-----------|--|
| 車両 | Jetson Nano 搭載ロボットカーを使用する |
| カメラ | USB 接続可能な市販のカメラを使用する |
| 基地局 | 研究室内に設置する |
| 機能 | 詳細 |
| 物体位置予測機能 | MATLAB で CORA を動作させる |
| 位置情報受信機能 | SparkFun 社の ZED-F9R モジュールを用いる |
| ライブ配信環境 | Blackmagic Web Presenter 4K を用いて YouTube でライブ配信を行う |
| 車両-サーバ間通信 | 位置速度情報の送信に使用する |

表 2 Jetson Nano の性能表

| | |
|-------|----------------------------|
| GPU | 128 コア Maxwell |
| CPU | クアッドコア ARM A57 @1.43GHz |
| メモリ | 4GB 64 ビット LPDDR4 25.6GB/s |
| ストレージ | microSD |
| サイズ | 100 mm*80 mm*29 mm |

存在確率を取得し、存在確率に基づいてカメラの UE へ RB を割り当てる。時刻 $t_0 + 1$ では、車両は位置速度情報を再び基地局へ送信し、基地局では UE へ RB を割り当てる。以降これを毎秒繰り返す。

図 4 の例では、1 秒後の車両の存在確率として、UE 1 及び UE 2 で 50%, 0% と算出されている。その結果から、UE 1 のカメラの撮影可能領域に車両が存在する確率が高いことがわかり、UE 1 に対して優先的に RB を割り当てる。

各 UE では、割り当てられたセルラーリソースを使用して映像を送信する。本実装および本実験では映像の送信先は YouTube Live としている。

3.4.1 検証用車両

本システムでは、現実世界の車両の代用として、NVIDIA 社の小型コンピュータ Jetson Nano を搭載したロボットカーを用いる。Jetson Nano の性能を表 2 にまとめる [12]。ロボットカーは Python を用いて Jupyter Notebook から制御できる。

3.4.2 スケール調節

本システムでは現実世界の車両の代わりとしてロボットカーを用いるためスケールの調節が必要となる。法定速度とロボットカーの最高速度を考慮し、現実世界の 60 分の 1 のスケールで実装した。

現実世界の車両の速度を 60 km/h (= 16.7 m/s) とし、その車両を 10 秒間隔で撮影できるようなカメラの配置を想定する。それに合わせて、実装システムでは、ロボットカーの速度を 1 km/h (= 0.28 m/s)、カメラの間隔を 2.8m とした。

また、現実世界の車両はさまざまな力学的な力を受けて走行しているため、質量や加速度の調節も必要である。質量や摩擦係数を含めた加速度を 60 分の 1 スケールに調節するのは困難であるため、本システムでは、ロボットカーは定速であるとし、存在確率分布を算出する際には加速度のパラメータを 60 分の 1 とした。

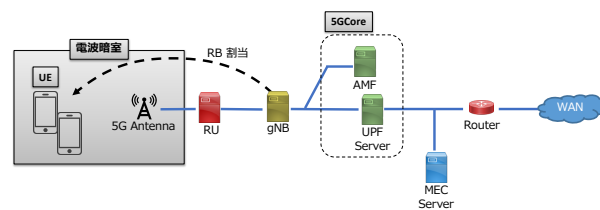


図 5 5G システム構成

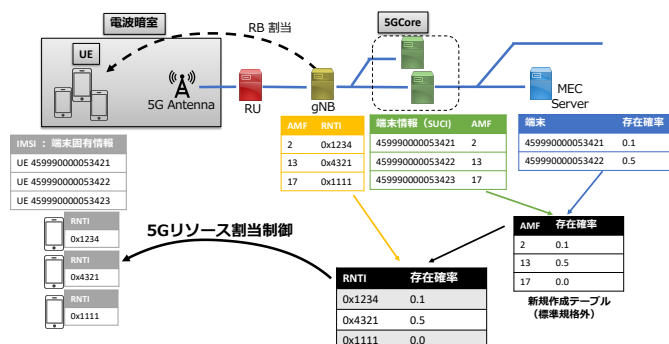


図 6 5G リソース割当における車両存在確率の反映

3.4.3 車両の位置情報の取得と利用

実験条件から算出される位置を事前に取得し、これに一定の誤差を加えて位置情報とした。SparkFun 社の ZED-F9R モジュール [13] を Jetson Nano に搭載することで GNSS 信号を受信、座標変換を試みたが、60 分の 1 スケール換算後の精度の問題が顕在化した。本稿の目的は車両の存在確率に基づいたリソース制御の動作検証であるため、実機を用いた位置情報の送受信は今後の課題とする。

3.5 5G システム

RB を動的に割り当てるため、本稿ではソフトウェア無線システムによる 5G システムを構築した。構築した 5G システムは、RU, gNB, 5G-Core から構成される (図 5)。RU は USRP N320 を用いて非 MIMO で構成している。gNB はオープンソースソフトウェア OAI [14], 5G-Core は open5GS [15] をそれぞれ改変したものを用いている。また、5G システムに接続する端末 (UE) は Samsung Galaxy S21 5G 及び Samsung Galaxy S21 Ultra 5G を使用している。なお、UE と USRP N320 のアンテナ間の無線通信は電波暗箱内で行っている。

5G システムのスロット構成は 5 ms 周期で DL スロット数を 5, Mixed スロット数を 1, UL スロット数を 4 としている。また、帯域幅は 90 MHz としており、セルラーリソースの周波数方向の RB 数 N_{RB} は 245 となっている。UE 単体での速度計測を行った結果、DL 180 Mbps, UL 68 Mbps であり、カメラ映像を収容するのに十分な帯域が確保されている。更に、割当結果を取得するため、各スロット毎に各 UE への RB 割当量のログを取得している。

カメラの映像は、スマートフォンのテザリング機能を用いて伝送される。5G システムは、各 UE に対して UL スロット時に RB を割り当てる。UE は割り当てられた RB を用いてカメラの映像を送信する。



図7 実験の様子

車両存在確率をリソース割当に反映させるため、図6に示すシステムを作成した。まず、gNBはUEとランダム識別子(RNTI)を用いて通信を行っており、端末の固有番号を元にしたリソース割当はできない。一方で、MECサーバでは、端末の固有番号とその端末に対応した車両存在確率を得ているが、MECサーバは5Gシステムとは独立しているためgNBとUE間の通信に用いているRNTIを取得することはできない。

そこで、5G-Coreソフトウェアを拡張し、MECサーバが持つ車両存在確率情報とRNTIのマッピングを行った。gNBはUEとの通信に用いるRNTIに加え、5G-Coreとの通信に用いるAMF IDを有している。一方で、5G-CoreはAMF IDと端末固有番号の対応表を持っている。そこで、5G-CoreがMECサーバから情報を取得しAMF IDと車両存在確率の対応表を作成し、gNBは5G-CoreからUEとAMF IDの対応に基づいて5G-Coreから存在確率を取得し、リソース割当に用いることとした。5G-Coreにおける対応表は、memcached[16]を用いて実装している。また、gNBからmemcachedによる対応表への情報アクセス周期は100msとしている。

4. 実験と評価

4.1 リソース割当実験

3章で述べたシステムを実装し、5Gセルラーリソースの割当実験を行う。実験では走行車両の動きに合わせて対応するカメラのUEに対して割り当てたアップリンクスロットのRBの数を比較評価する。つまり、カメラが車両を捉えている時はより多くのリソースで、車両を捉えていない時は少ないリソースで動画をアップロードする状態を望ましいとする。ただし、UE1, UE2の必要とするリソース量に差をつけるため、ライブ配信をする動画の品質に差をつけている。以下の3つの方針でセルラーリソース割当実験を行う。

- 制御なし
- 存在確率に基づいた重み付き公平キューイングでRBを割り当てる(3.3.2節手法1)。
- 存在確率に対して閾値によりRBを割り当てる(3.3.2節手法2)。

実験環境の諸元は次の通りである。

- ロボットカーは1 km/h (= 0.28 m/s) で予め決められた経路を走ることとする。

- UE1に対応するカメラの撮影可能はセグメントの範囲で[2.5, 3.0], UE2に対応するカメラは[5.3, 5.8]とする。つまり、実験開始から9~11秒後にUE1の前を通過し、19~21秒後にUE2の前を通過するようにカメラを設置する。

- UE1では1080p60の高品質(約8.0 Mb/s)で、UE2では720p25の低品質(約1.6 Mb/s)でライブ配信を行う。

4.2 実験結果

図8~10はそれぞれ、制御なし、手法1、手法2に基づいてリソースを割り当てた結果である。図は、1スロットあたりに割り当てた平均のRBの数の推移を示しており、平均のRBは1フレームに割り当てたRBの総数を1フレームのアップリンク数で割ることで求めている。

図8は車両存在確率によるリソースの制御を行っていない。そのため、高品質(1080p60)で配信しているUE1はビットレートが高く、多くのリソースを割り当てられていることは当然である。

図9は存在確率に基づいた重み付き公平キューイングでRBを割り当てたものである。図8と比較すると、車両通過時刻であるUE1の1100フレーム目付近及びUE2の2100フレーム目付近において、わずかに多くRBを割り当てた傾向が確認できたが、大きな変化は現れなかった。この原因は、図8から分かるように、本実験のライブ配信環境では低品質の時であっても多くのリソースを必要としているためである。動画ストリーミングにおけるバッファリングが発生し常に多くのリソース要求が起こったため、結果として存在確率が高まる区間以外で多く割り当てられている区間が存在している。したがって、存在確率を反映したRB割当を行っても大きな変化は現れなかった。

図10は存在確率に基づいた閾値ベースでRBを割り当てたものである。UE1, UE2の両者に対し存在確率が高くなるタイミングで多くのRBを割り当てることがはっきりと確認できた。車両の存在確率が0となるカメラに対して1スロットあたり平均7RBを割り当てているのに対し、存在確率が高くなるカメラには存在確率最大時に1スロットあたり平均120RBのリソースを割り当てている。また、実験環境諸元を参照すると、車両通過時刻とRBを多く割り当てている時刻が一致していることも確認できる。しかし、図8から分かるように、本実験のライブ配信では低品質(720p25)で配信している場合でも約20RBを要求している。したがって、1スロットあたり7RBを割り当てている状態であるとライブ配信に大きな遅延が生じる。この問題を解決するには、割り当てられたリソースに応じてライブ配信の品質を変更させる必要がある。実験ではYouTube Liveを用いて映像の配信を行っており、配信プロトコルにTCPベースのRTMPが使用されている。RTMPでは再送制御やバッファリングが発生し、存在確率をリアルタイムに動画の品質に反映することが難しい。したがって、WebRTC[17]などのUDPベースのストリーミングプロトコルを用いて配信を行うことで、割り当てられたリソースに応じた品質でストリーミングができると考えている。

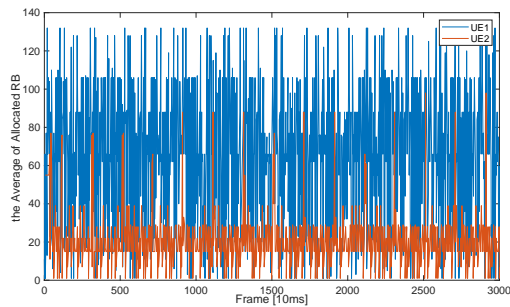


図8 各 UE への平均 RB 割当量の推移：制御なし

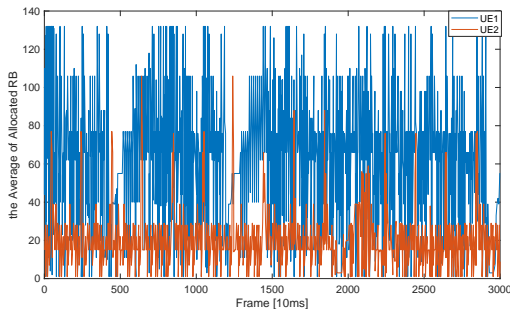


図9 各 UE への平均 RB 割当量の推移：手法 1 (重み付き公平キューイング)

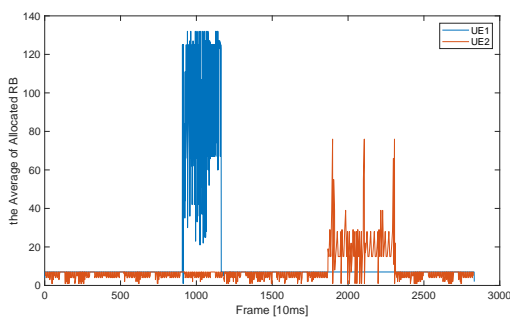


図10 各 UE への平均 RB 割当量の推移：手法 2 (閾値ベース)

5. おわりに

本稿では、車両位置予測に基づいて 5G セルラーリソースを割り当てるシステムを実装し、リソースの割り当て実験を行った。車両の存在確率が 0 となるカメラに対して 1 スロットあたり平均 7 RB を割り当てているのに対し、存在確率が高くなるカメラには存在確率最大時に 1 スロットあたり平均 120 RB のリソースを割り当てることを確認した。

本実験はミニチュア車両を用いたものであり、今後は実環境のスケールを再現した模擬環境もしくは実環境での評価が必要となる。そのためには、車両の動きに加速・減速を加えることや、GNSS による絶対位置の誤差の影響を軽減することが不可欠である。後者については、「みちびき」の L6D-CLAS 補強信号 [18] を受信し位置情報を補正することで改善されると考えている。しかし、補正した場合でも位置誤差を無くすことはできないと考えており、車両存在確率の算出に位置誤差の影響を組み入れて通信リソース制御に反映することが重要である。また、本実験では YouTube Live を用いて映像の配信を行った。

YouTube Live では配信プロトコルに TCP ベースの RTMP が使用されており、再送制御やバッファリングによって存在確率をリアルタイムに動画の品質に反映することが難しい。今後は、WebRTC [17] などの UDP ベースのストリーミングプロトコルを用いて映像転送実験を行うことを考えている。

謝辞 本研究の一部は JST ムーンショット型研究開発事業 JPMJMS2011 の支援を受けたものである。ここに記して謝意を示す。

文 献

- [1] R. Atat, L. Liu, H. Chen, J. Wu, H. Li and Y. Yi: "Enabling cyber-physical communication in 5G cellular networks: challenges, spatial spectrum sensing, and cyber-security", *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*, **2**, 1, pp. 49–54 (2017).
- [2] M. Althoff: "Reachability analysis and its application to the safety assessment of autonomous cars", PhD thesis, Technische Universität München (2010).
- [3] M. Althoff, O. Stursberg, M. Buss: "Model-based probabilistic collision detection in autonomous driving", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **10**, pp. 299 – 310 (2009).
- [4] G. Huang, B. Zhang, Z. Yao and C. Li: "Stochastic joint rate control and resource allocation for wireless video surveillance", *Computer Networks*, **190**, p. 107904 (2021).
- [5] P. Pradeepkumar, A. Pal and K. Kant: "Resource efficient edge computing infrastructure for video surveillance", *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, **01**, pp. 1–1 (2021).
- [6] B. Dafflon, N. Moalla and Y. Ouzrout: "The challenges, approaches, and used techniques of CPS for manufacturing in Industry 4.0: a literature review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **113**, 7, pp. 2395–2412 (2021).
- [7] E. A. Lee: "Cyber physical systems: Design challenges", 2008 11th IEEE international symposium on object and component-oriented real-time distributed computing (ISORC), pp. 363–369 (2008).
- [8] F. Khan, R. L. Kumar, S. Kadry, Y. Nam and M. N. Meqdad: "Cyber physical systems: A smart city perspective.", *International Journal of Electrical & Computer Engineering* (2088-8708), **11**, 4 (2021).
- [9] A. V. Jha, B. Appasani, A. N. Ghazali, P. Pattanayak, D. S. Gurjar, E. Kabalci and D. Mohanta: "Smart grid cyber-physical systems: communication technologies, standards and challenges", *Wireless Networks*, **27**, 4, pp. 2595–2613 (2021).
- [10] A. Darwish and A. E. Hassani: "Cyber physical systems design, methodology, and integration: the current status and future outlook", *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, **9**, 5, pp. 1541–1556 (2018).
- [11] M. Shafi, A. F. Molisch, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. De Silva, F. Tufvesson, A. Benjebbour and G. Wunder: "5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice", *IEEE journal on selected areas in communications*, **35**, 6, pp. 1201–1221 (2017).
- [12] NVIDIA. <https://www.nvidia.com/ja-jp/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-nano-developer-kit/>.
- [13] ublox. <https://www.u-blox.com/en/product/zed-f9r-module>.
- [14] OpenAirInterface. <https://openairinterface.org>.
- [15] Open5GS Open source project of 5GS and EPC. <https://open5gs.org>.
- [16] memcached. <https://memcached.org>.
- [17] N. Blum, S. Lachapelle and H. Alvestrand: "WebRTC: Real-time communication for the open web platform", *Communications of the ACM*, **64**, 8, pp. 50–54 (2021).
- [18] H. Namie and N. Kubo: "Performance evaluation of centimeter-level augmentation positioning L6-CLAS/MADDOCA at the beginning of official operation of QZSS", *IEEE Journal of Industry Applications*, **10**, 1, pp. 27–35 (2021).