

特別研究報告

題目

車両位置予測に基づく 5G セルラーリソース割当手法の実装と評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

中村 樹

2022 年 2 月 8 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

内容梗概

近年の組込みシステム技術や通信技術の進歩に伴い、CPS (Cyber-Physical System: サイバーフィジカルシステム) の実用化が進んでいる。CPS では、フィジカルシステムにおいてセンシングを行い、サイバーシステムにおいて収集した情報を蓄積及び解析、その後再びフィジカルシステムにアクチュエートするフィードバックループによりシステムを制御している。CPS コンセプトの下、監視、自動運転、医療機器、高度道路交通システムといった様々なアプリケーションが考えられている。CPS における情報の収集は、4G や 5G などの移動通信システムの利用も考えられており、様々なアプリケーションや大量のデバイスが動作する CPS において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からのリソース要求の変化に基づいて行われており、サイバーシステムによる情報解析とは独立して行われているため、必要なタイミングで必要なリソースが割り当てられるとは限らない。したがって、フィジカルシステムの振る舞いをサイバーシステムで解析した結果をもとに、必要なタイミングでリソースを割り当てるセルラーリソース制御が重要である。

本報告では、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、サイバーシステムでは車両の位置速度情報の収集、車両位置予測を行う。ただし、現行の道路交通法では実車を用いた検証が困難であるため、ミニチュア車両を用いた CPS を構築している。また、セルラーリソース割当手法の実装にあたって、5G システムをソフトウェア無線機器を用いて構築し、さら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 システムを拡張している。ミニチュア車両を用いた実験によってセルラーリソース割当手法が割り当てるリソース量を評価した結果、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 (Resource Block) 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。

主な用語

サイバーフィジカルシステム、5G、通信リソース、セルラーリソース割当、ソフトウェア無線、マルコフ連鎖、車両位置予測

目次

1	はじめに	6
2	サイバーフィジカルシステム	8
2.1	システム概要	8
2.2	関連研究	9
2.3	対象システム	9
3	車両位置予測に基づく 5G セルラーリソース割当手法	11
3.1	車両存在確率の算出	11
3.2	セルラーリソース割当手法	15
4	実装と評価	17
4.1	実装システム	17
4.2	スケール調節	18
4.3	車両の位置情報の取得と利用	20
4.4	5G システム	22
4.5	評価方法	24
4.6	実験結果	24
5	おわりに	29
	謝辞	30
	参考文献	31

目 次

1	CPS の概要とアプリケーション例	8
2	想定システム図	10
3	マルコフ連鎖の例	11
4	離散化された車両状態空間	12
5	車両状態の状態間遷移	13
6	各 UE に対する車両存在確率の推移	15
7	実装システム図	17
8	現実世界のタイミングチャート	20
9	実装システムのタイミングチャート	20
10	セグメント長を 0.1 m とした場合の CORA で扱う位置情報	21
11	5G システム構成	23
12	5G リソース割当における車両存在確率の反映	23
13	(1) 要求に応じて RB 割当	27
14	(2) 均一に RB 割当	27
15	(3) 重み付けした存在確率による重み付き公平キューイングで RB 割当	28
16	(4) 重み付けした存在確率による RB 割当	28

表 目 次

1	システム構成要素	18
2	Jetson Nano の性能表	18
3	現実世界の車両と JetBot の比較	19
4	地点 A、B における 1 秒毎に受信した GNSS 情報	22

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、CPS (Cyber-Physical System: サイバーフィジカルシステム) の実用化が進んでいる。CPS では、フィジカルシステムにおいてセンシングを行い、サイバーシステムにおいて収集した情報を蓄積及び解析、その後再びフィジカルシステムにアクチュエートするフィードバックループによりシステムを制御している [1, 2]。

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。特に、監視、自動運転、医療機器、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、将来はより高度で知的ものになっていくと予想されている [3, 4]。また、現在全国多くの都市・地域においてスマートシティの取り組みが進められている。近年注目されているスマートシティ [5] では、ICT 等の技術を活用し、都市や地域の抱える諸課題の解決を行い、市民生活の質や都市活動の効率性の向上を図ることをコンセプトとしており、都市環境をフィジカルシステムとし、サイバーシステムと連携することで課題解決を図る大規模な CPS と捉えられる [5, 6]。

このような CPS アプリケーションでは、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 などの移動通信システムの利用も考えられており、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、サイバーシステムによる情報解析とは独立して行われている。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、人の密集度に応じてリソースの割当を行うことは可能である。しかし、将来的な人の密集度を予測して、予めセルラーリソースの割当を行うことはしておらず、CPS において、サイバーシステム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、膨大なデータを送信する際のリソース不足によるネットワーク遅延や、逆に少ないデータ量の送信に対してリソースを過度に割り当てるといったケースが発生する可能性がある。したがって、フィジカルシステムの振る舞いをサイバーシステムで分析する制御ループに通信リソース制御を組み入れて、必要なタイミングで適切な量のリソースを割り当てること、つまりリソースの効率化を行うことが重要である。

本報告では、CPSにおけるフィジカルシステムとサイバーシステムの制御ループに通信リソース制御を組み入れて、必要なタイミングで適切な量の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、サイバーシステム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って、5G システムをソフトウェア無線機器を用いて構築し、さら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 [7, 8] 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る、そのためのパラメータ調整を行う。

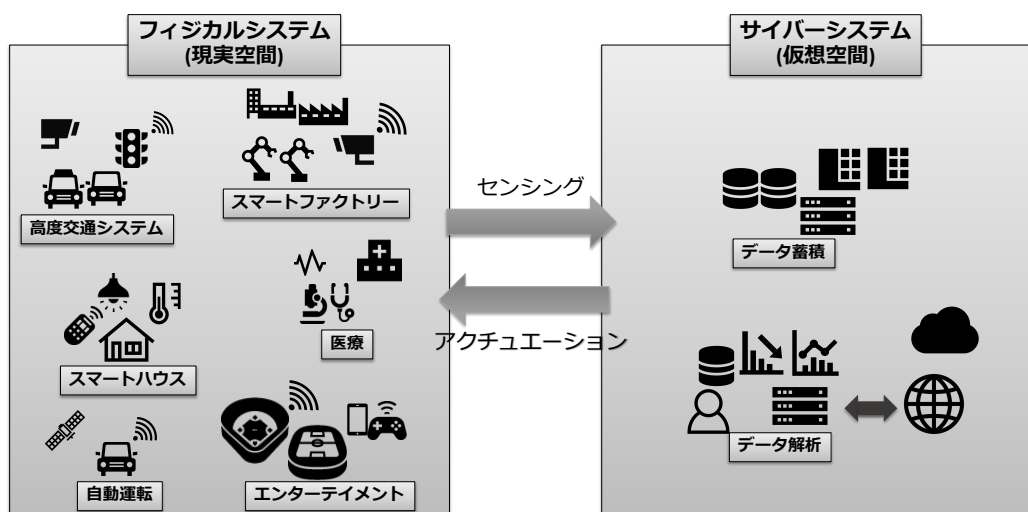


図 1: CPS の概要とアプリケーション例

2 サイバーフィジカルシステム

本章では、本報告の根幹となる CPS について述べる。2.1 節では CPS の概要を説明し、2.2 節では本報告に関連する研究内容を、2.3 節では本報告で対象とする CPS について記述する。

2.1 システム概要

CPS (Cyber-Physical System: サイバーフィジカルシステム) 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で起こっている事象をセンサーネットワークで収集し、サイバーシステム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 [1, 2, 9]。このように、CPS は現実世界とサイバー空間を密接に結びつけることにより、あらゆる社会システムの効率化、新産業の創出、知的生産性の向上に寄与している [10]。

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。特に、監視、自動運転、医療機器、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、将来はより高度で知的なものになっていくと予想されている [3, 4]。

しかし、よりクリティカルな問題となると、AI による判断のみでは不十分である。そこで、CPS のフィードバックループに人を介在させた CPHS (Cyber-Physical-Human System:

サイバーフィジカルヒューマンシステム)、または HiLCPSs (Human-in-the-Loop Cyber-Physical Systems: ヒューマンインザループサイバーフィジカルシステム) と呼ばれる CPS が存在する。CPHS において、人間の役割は重要であり、人間の行動やパフォーマンス、及び人間要因に関連するリスクをモデル化し、予測・評価することが求められている [11]。人間の知性と AI を統合することで、CPS の判断能力を向上させ、緊急性の高い状況にも対応できるようになる。

2.2 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 [12, 13] がある。文献 [12] 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、映像のビットレー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 [13] 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だけで、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報告のアプローチと異なっている。本報告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。

2.3 対象システム

本報告では、図2のような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 を想定する。この CPS では、フィジカルシステムでは車両が走行し、サイバーシステムでは車両の位置速度情報の収集、車両位置予測を行い、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。

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。

通信リソース制御により、次のシナリオの実現が考えられる。まず、特定の車両の存在確率分布に基づきセルラーリソースの割当を行うことで、監視カメラを用いた不審車両のリアルタイム追跡が可能になることが考えられる。また、車両の通るであろう道を予測し、到達する前の交差点の映像等の情報を運転者が手に入れることも可能になると考えられる。

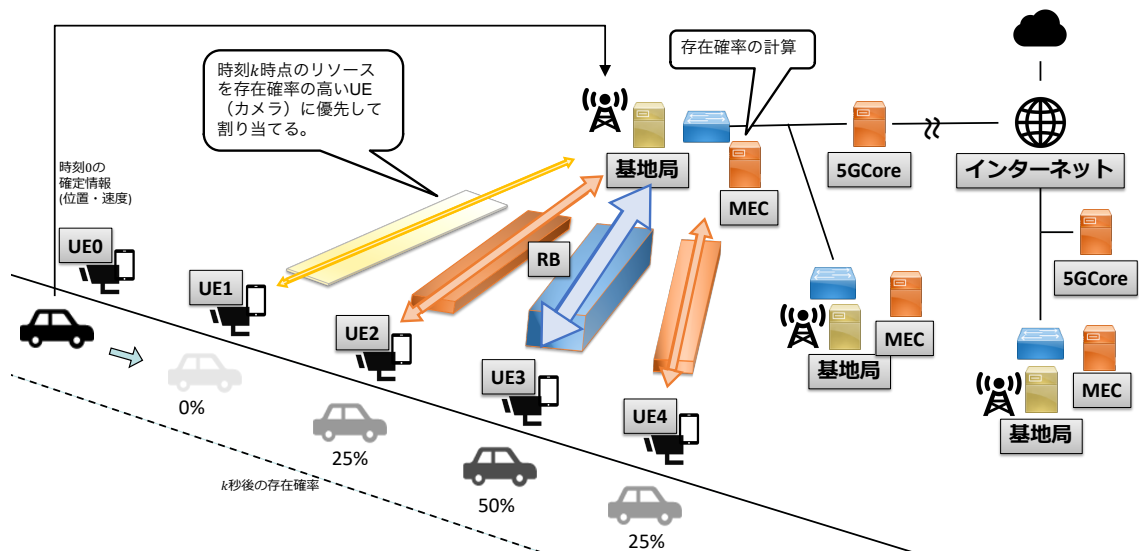


図 2: 想定システム図

本報告では、一台の車両を対象に検証を行うが、将来的には、複数の車両を同時に監視するシステムや、車両だけではなく、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といったケースに発展させることも可能である。

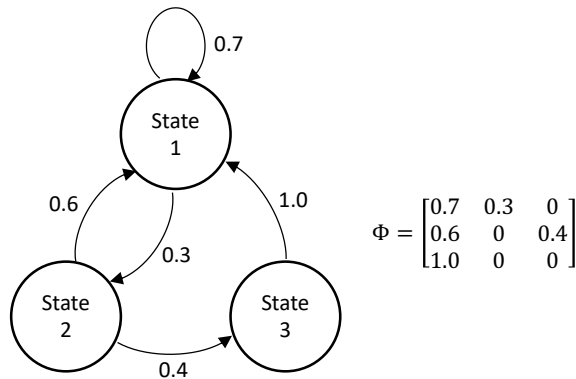


図 3: マルコフ連鎖の例

3 車両位置予測に基づく 5G セルラーリソース割当手法

本章では、車両位置予測に基づく 5G セルラーリソース割当手法を説明する。

3.1 車両存在確率の算出

本節では、文献 [7, 8] の手法とその MATLAB 実装である “Continuous Reachability Analyzer” [14] (以降、CORA) を用いた車両存在確率分布の算出方法を説明する。なお、CORA は、マルコフ連鎖を用いて車両等の到達可能領域を求めて衝突確率を算出するが、本報告では車両の衝突は考慮しないため、存在確率分布の算出に用いている。

3.1.1 マルコフ連鎖モデル

車両存在確率分布を求めるため、マルコフ過程の一種であるマルコフ連鎖を用いる。マルコフ過程とは、未来の状態の確率が過去の状態に依らず現在の状態のみで決定される確率過程であり、マルコフ連鎖とは、状態空間が離散的なマルコフ過程を指す。マルコフ連鎖では、離散状態を $z \in \mathbb{R}^+$ 、離散時間を $t \in t_1, t_2, \dots, t_f$ 、時間ステップを $t_{k+1} - t_k = T \in \mathbb{R}^+$ 、予測範囲を t_f と表し、これらを用いる。

このとき、ある時刻 t_{k+1} における確率ベクトル $p(t_{k+1})$ は、状態間遷移確率行列 Φ を用いて式 (1) で求められる。

$$p(t_{k+1}) = \Phi(T) \cdot p(t_k) \quad (1)$$

3 状態のマルコフ連鎖の例を図 3 に示す。

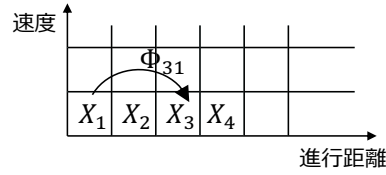


図 4: 離散化された車両状態空間

3.1.2 車両状態空間及び駆動入力量の離散化

車両存在確率分布を計算する問題をマルコフ連鎖に適用するため、車両環境情報の抽象化を行う。そのためには、状態の定義及び離散化が必要となる。

車両状態空間の定義と離散化 まずは、車両状態空間を、車両中心の進行距離 $S \subset \mathbb{R}$ と速度 $V \subset \mathbb{R}$ を状態変数とし、 $X = S \times V$ と定義する。次に、車両状態空間を図4のような格子状に離散化する。このとき、離散状態 X_i に関して、 $X_i =]\underline{x}_i, \bar{x}_i]$, $\underline{x}_i, \bar{x}_i \in \mathbb{R}^d$ かつ、 $X = \bigcup X_i$ である。

駆動入力量の定義と離散化 次に、駆動入力量 U は $U = \{u \mid -1 \leq u \leq 1\}$ と定義する。このとき、駆動入力量も車両状態空間同様離散化され、駆動入力量 U に関して、 $U^\alpha =]\underline{u}^\alpha, \bar{u}^\alpha]$, $\underline{u}^\alpha, \bar{u}^\alpha \in \mathbb{R}$ かつ、 $U = \bigcup U^\alpha$ である。

結合状態の定義 ここで、車両状態と駆動入力量の状態遷移確率は互いの状態が何であるかに依存しているため、二つを独立させたままでは状態間遷移確率が確定できない。そのため、車両状態と駆動入力量を結合させた結合状態を定義する。任意の車両状態 X_i と駆動入力量 U^α の結合状態を Z_i^α と表記する。結合状態の導入により、状態間遷移確率が確定する。

結合状態 Z_i^α である確率を p_i^α と表記する。以降、 p を $p^T = [p_1^1 \ p_1^2 \ \cdots \ p_1^c \ p_2^1 \ p_2^2 \ \cdots \ p_2^c \ p_3^1 \ \cdots \ p_d^c]$ 、 p_i を $p_i = \sum_\alpha p_i^\alpha$ 、 p^α を $p_i = \sum_i p_i^\alpha$ とする。

3.1.3 状態間遷移

結合状態の状態間遷移は車両状態と駆動入力量の遷移からなり、式(2)で行われる。

$$p(t_{k+1}) = \Gamma \cdot \Phi(T) \cdot p(t_k) \quad (2)$$

このとき、 $\Phi(T)$ は車両状態間遷移確率行列、 Γ は駆動入力量遷移確率行列である。

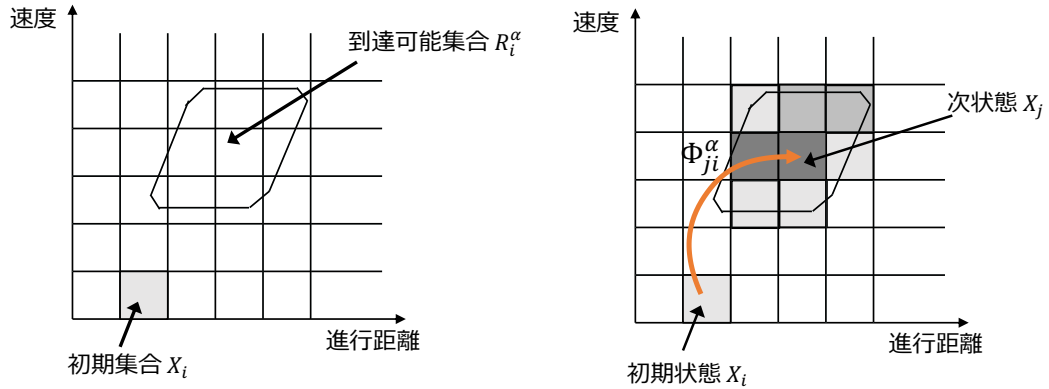


図 5: 車両状態の状態間遷移

車両状態の状態間遷移 式 (2) から分かるように、結合状態における車両状態と駆動入力量の遷移は分けて行われる。そのため、まずは駆動入力量を固定して車両状態を遷移させる。時刻 t_{k+1} において任意の結合状態 Z_j^α である確率は式 (3) で求める。

$$p_j^\alpha(t_{k+1})' = \sum_i \Phi_{ji}^\alpha(T) \cdot p_i^\alpha(t_k) \quad (3)$$

式 (3) は、刻 t_{k+1} において Z_j^α である確率は、駆動入力量が同じ全ての結合状態から結合状態 Z_j^α に遷移する確率の総和であることを示している。

車両状態の状態間遷移確率の定義 ある時刻に車両状態が X_i であるときに、時間ステップ T 経過後に状態 X_j に遷移する確率を式 (4) で定義する。

$$\Phi_{ji}^\alpha(T) = \frac{V(R_i^\alpha(T) \cap X_j)}{V(R_i^\alpha(T))} \quad (4)$$

$R_i^\alpha(T)$ は X_i を初期集合としたときに T 秒後に到達し得る集合である。 $V()$ は超多面体の体積を返す関数である。遷移確率 $\Phi_{ji}^\alpha(T)$ は、 T 秒後における可到達集合 $R_i^\alpha(T)$ と車両状態 X_j の体積分率として計算される。図 5 に車両状態の状態間遷移を示す。

駆動入力量の状態間遷移 次に、車両状態を固定して駆動入力量を遷移させる。時刻 t_{k+1} において任意の結合状態 Z_j^β である確率は式 (5) で求める。

$$p_j^\alpha(t_{k+1}) = \sum_\alpha \Gamma_j^{\beta\alpha} \cdot p_j^\alpha(t_{k+1})' \quad (5)$$

車両状態が同じ全ての結合状態から結合状態 Z_j^β に遷移する確率の総和となっている。位置と速度を状態変数に持つ車両状態と違い、駆動入力量は連続的に変化せず離散的に変化するため、同一時刻に状態遷移させる。

駆動入力量の状態遷移確率の定義 駆動入力量遷移確率行列 Γ は、駆動入力量優先度 λ と駆動入力量変更モデル Ψ を用いて式 (6,7) で定義する。

$$\hat{\Gamma} = \text{diag}(\lambda) \Psi \quad (6)$$

$$\Gamma = \text{norm}(\hat{\Gamma}) \quad (7)$$

駆動入力量変更モデル Ψ はドライバーが駆動入力量をどのように変化させるかのモデルである。駆動入力量優先度 λ は、位置や速度に依存して決定する駆動入力量の重みである。

駆動入力量変更モデル ドライバーが任意の駆動入力量 U^α から U^β に変更する確率 $\Psi^{\beta\alpha}$ は、式 (8) で定める。

$$\Psi^{\beta\alpha}(\gamma) = \text{norm}(\hat{\Psi}^{\beta\alpha}(\gamma)), \hat{\Psi}(\gamma) = \frac{1}{(\beta - \alpha)^2 + \gamma} \quad (8)$$

式 (8) は、どのようにドライバーが駆動入力量を変化させるかをヒューリスティックに表現している。ドライバーが現在の駆動入力量から別の駆動入力量に変化させる際に、より近い駆動入力に変更する傾向を表現している。

γ は入力変更頻度を表すパラメータである。より大きな γ は、ドライバーが駆動入力量をより頻繁に変更することを示している。

駆動入力量優先度 駆動入力量優先度 λ は、ドライバーの駆動入力量優先度 m を駆動入力量制約 c によって制限をかけた値である。車両状態 X_i における駆動入力量 β の優先度は式 (9) で求められる。

$$\lambda_i^\beta(t_{k+1}) = \begin{cases} m_i^\beta & \text{if } m_i^\beta \leq c_i^\beta \\ c_i^\beta(t_{k+1}) \rightarrow m_i^{\beta-1} + m_i^\beta - c_i^\beta & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

車両状態 X_i における加減速駆動入力量 β の駆動入力量優先度 m_i^β は、駆動入力量制約 c_i^β によって制限される。優先度と制約の差異は β よりも 1 段階駆動量が低い $\beta - 1$ に追加され、優先度の総和は 1 に保たれる。

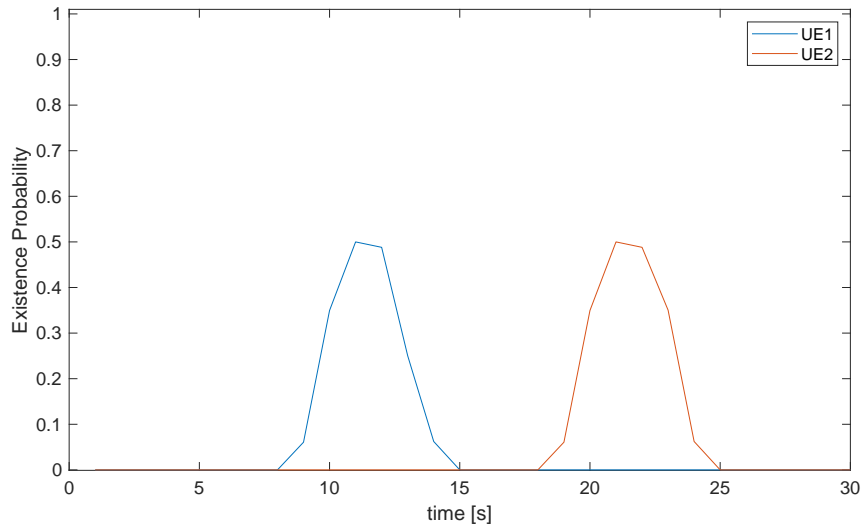


図 6: 各 UE に対する車両存在確率の推移

ドライバーの駆動入力量優先度 m は確率予測のパラメータとして与えられる。一方で、駆動入力量制約 c は、道路情報と車両状態、場合によっては他車両の位置確率分布を用いて算出する。

3.1.4 車両位置予測手法

3.1.1 項から 3.1.3 項にわたって定義し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及び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 は車両位置である。

次に、UE i が撮影可能な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、UE i が撮影可能な領域を p_i を用いて

$$m_i(t_k) = \sum_{s \in p_i} x(t_k, s) \quad (10)$$

で表される。 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。図 6 に、車両存在確率の推移を示す。

3.2 セルラーリソース割当手法

本報告では、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。

3.2.1 手法 1: 重み付き公平キューイング

手法 1 では、存在確率分布を重み付けした値から、重み付き公平キューイングによって RB を割り当てる。

サイバーシステムは、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 (11) の重み付けを行い、式 (12) によって係数 C_i を求める。

$$T_i \leftarrow \frac{T_i}{1 + w_i} \quad (11)$$

$$C_i = \frac{D_i}{T_i} \quad (12)$$

ここで、 D_i は、UE i が送信したいデータ量を表す。次に、式 (12) 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、車両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、優先的に RB が割り当てられる。

3.2.2 手法 2: 閾値を用いて割り当てる RB 数を決定

手法 2 では、存在確率分布を重み付けした値によって割り当てる RB 数を決定する。

サイバーシステムは、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 (13) で決定する。

$$R_i = \begin{cases} 0.1 * N_{RB} & (w_i = 0) \\ 0.3 * N_{RB} & (0 < w_i \leq 5) \\ 0.5 * N_{RB} & (5 < w_i \leq 16) \\ N_{RB} & (16 < w_i) \end{cases} \quad (13)$$

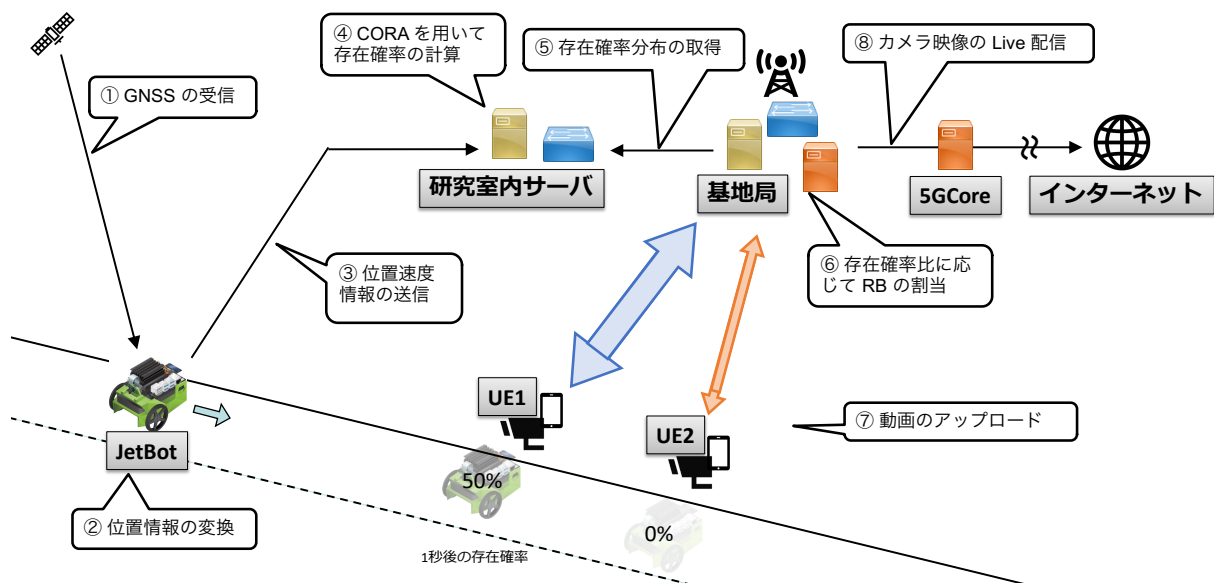


図 7: 実装システム図

4 実装と評価

本章では、CPS の実装及び本報告のセルラーリソース割当手法の評価を述べる。

4.1 実装システム

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、2.3 節のシナリオを再現したシステムを実装する (図 7、表 1)。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。

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。研究室内 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 7 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範囲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。

表 1: システム構成要素

構成要素	詳細
車両	JetBot を使用する
カメラ、UE	SONY α 1 及び α 7R を使用する
基地局	研究室内にサーバを設置する
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

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 JetBot を用いて検証を行う。JetBot は、小型コンピュータ Jetson Nano を搭載した AI 自立走行車であり、リアルタイムの画像分類、物体検出、セグメンテーション、音声処理などのアプリケーションを実行することが可能である。Jetson Nano の性能を表 2 にまとめる [15]。

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

JetBot の制御方法を説明する。まず、JetBot をネットワークに接続し、JetBot の docker コンテナを起動する。その後、JetBot を起動させ、Web ブラウザから IP アドレスを用いて接続することで、Web プログラミング環境の Jupyter Notebook から Python を用いて制御することができる。

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 JetBot を用いる。しかしながら、現実世界の車両と JetBot では、サイズ、重さ、トルク、最大速度に加え、タイヤと路面の摩擦係数やブレーキの構造などさまざまな要素が異なる。表 3 は、現実世界の車両として販売台

数が最も多いヤリスクロス [16] を例に挙げ、JetBot と比較した結果を示している。従って、CORA を用いて存在確率分布を算出する場合、実装システムのスケールに調節する必要がある。

表 3: 現実世界の車両と JetBot の比較

	ヤリスクロス	JetBot
車両総重量 [kg]	約 1500 kg	0.65 kg
サイズ (全長、全幅)[mm]	4180 mm、1765 mm	250 mm、150 mm
トルク [kgf*m/r.p.m]	約 120/4300 kgf*m/r.m.p	モーター制御
最大速度 [km/h]	約 130 km/h	約 2.8 km/h

4.2.1 サイズ、速度の調節

本システムは、法定速度と JetBot の最高速度を考慮し、現実世界の 60 分の 1 のスケールで実装する。まず、時間スケールの計算をするため、走行する車両を 10 秒間隔で撮影できるカメラの配置パターンを考える。図 8 のように、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を配置する。それに合わせて、実装システムでは、図 9 のように、JetBot の速度を 1 km/h (=0.28 m/s) とし、カメラの間隔を調節する。

4.2.2 加速度の調節

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。加減速に影響を与えるトルクやブレーキの性能だけではなく、風の抵抗や路面からの転がり抵抗などの要因があり、車両の運動に影響を及ぼす。従って、前項で述べたサイズや速度のみの調節では、車両にかかる力を考慮していないため、スケールの調節が不十分である。例えば、速度 v の車の制動距離 x は式 (14) で求められる。

$$x = \frac{v^2}{2\mu g} \quad (14)$$

ただし、 μ は地面とタイヤの動摩擦係数である。

式 (14) より、制動距離は速度の二乗に比例し、質量に反比例することがわかる。質量や摩擦係数を含めた加速度を JetBot スケールに調節するのは困難であるため、本報告では、JetBot は定速であるとし、また、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 として存在確率計算に影響しないようにした。

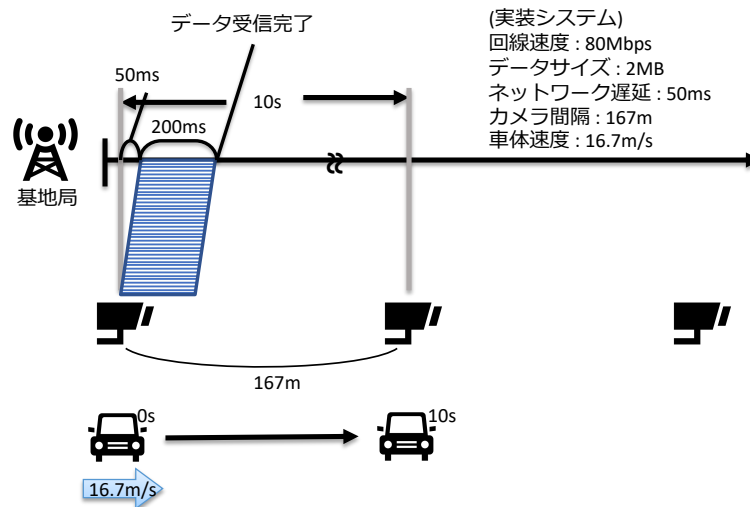


図 8: 現実世界のタイミングチャート

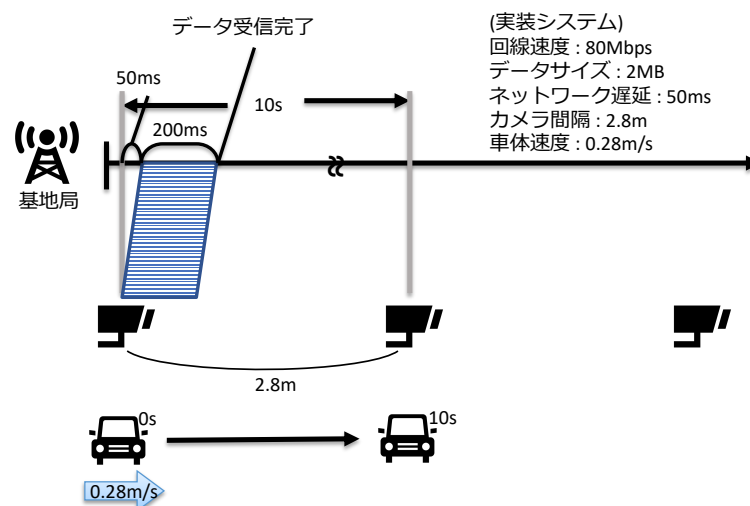


図 9: 実装システムのタイミングチャート

4.3 車両の位置情報の取得と利用

実装システムでは、SparkFun 社の ZED-F9R モジュールを JetBot に搭載することで GNSS 信号を受信する。ただし、CORA において受信した位置情報をそのまま利用することはできないため、本節ではその変換方法を述べる。また、受信した GNSS には誤差が含まれるため、誤差を含めて車両の位置予測をする方法を説明する。

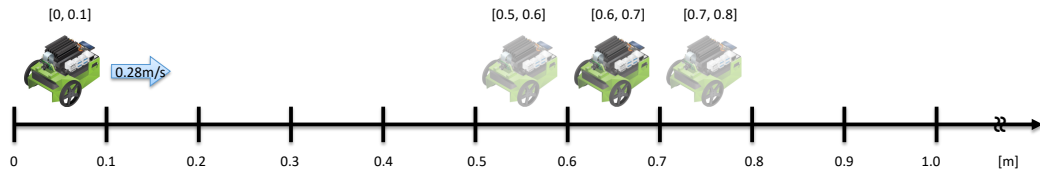


図 10: セグメント長を 0.1 m とした場合の CORA で扱う位置情報

4.3.1 位置情報の変換

図 10 のように、CORA では位置情報を車両存在確率分布の計算単位であるセグメントで指定する。また、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。GNSS で受信する位置情報は緯度経度の二次元座標であるため、初期位置からの距離を求めることで一次元座標に変換する必要がある。

まず初めに、受信した緯度経度の位置情報を初期位置として保存する。その後、受信した位置情報に関して、式 (15)~(19) のヒュベニの公式 (Hybeny's Distance Formula) [17] を用いて初期位置からの距離を求め一次元座標に変換する。

$$D = \sqrt{(Dy \cdot M)^2 + (Dx \cdot N \cdot \cos P)^2} \quad (15)$$

$$M = \frac{Rx(1 - E^2)}{W^3} \quad (16)$$

$$N = \frac{Rx}{W} \quad (17)$$

$$W = \sqrt{1 - E^2(\sin P)^2} \quad (18)$$

$$E = \sqrt{\frac{Rx^2 - Ry^2}{Rx^2}} \quad (19)$$

式 (15)~(19) において、 Dx は二点の経度の差、 Dy は二点の緯度の差、 P は二点の緯度の平均、 M は子午線曲率半径、 N は卯酉線曲率半径、 W は子午線/卯酉線曲率半径の分母、 E は離心率、 Rx は赤道半径、 Ry は極半径である。

次に、CORA で扱えるように、一次元座標をセグメントで指定する。ただし、受信した GNSS 信号には誤差が存在するため、誤差を含めてセグメントを指定する必要があり、次節で詳しく述べる。

4.3.2 GNSS の精度

GNSS の精度は、実際の座標との差である絶対座標の誤差と基準点からの差である相対座標の誤差により定まる。本報告では初期位置を 0 とした相対座標を用いて存在確率分布を算出するため、相対座標を誤差の指標とする。

表 4: 地点 A、B における 1 秒毎に受信した GNSS 情報

地点 A		地点 B	
真値 : 135.52223 34.818382		真値 : 135.52221 34.818362	
測定値	誤差	測定値	誤差
135.5219265 34.8183918	27.8 m	135.5219787 34.8184258	22.3 m
135.5219314 34.8183924	27.3 m	135.5219749 34.8184257	22.6 m
135.5219266 34.8183927	27.8 m	135.5219683 34.8184268	22.3 m
135.5219176 34.8183933	28.6 m	135.5219664 34.8184269	22.5 m
135.5219149 34.8183934	28.9 m	135.5219631 34.8184273	22.8 m

表 4 は、実際に実験を行う地点 A、B の緯度経度と連続した 1 秒毎に受信した GNSS 情報を示している。相対座標の誤差に関して、同じ地点での測定結果から確認でき、毎秒数十 cm ずつ誤差が生じる。この誤差の値は、本システムの実装環境が屋内であったが故に捕捉した GNSS 衛星の数が不十分であったことが原因と考えられる。この誤差を本システムのスケールで換算すると、数十 m の誤差となるため、実験に支障をきたす可能性がある。以上の理由より、本報告で用いる位置情報は予め用意した正確な位置情報を毎秒サイバースステムに送信することとする。ここで、GNSS を用いた場合の誤差を考慮して、CORA で位置情報を指定する際に、測定値±0.5 m で指定する。例えば、初期位置との距離が 3 m の地点にいる際には、セグメントの範囲を [2.5, 3.5] で指定して存在確率分布の計算を行う。

今後の課題として、より正確な位置情報を得る必要があり、例えば RTK (Real Time Kinematic)[18] を採用することを検討する必要がある。RTK は位置座標が予めわかっている基準局と位置を求める観測点で同時に GNSS 観測を行い、基準局で観測したデータを観測点にリアルタイムに送信し、観測点の誤差を補正する測位方法である [18]。

4.4 5G システム

RB を動的に割り当てるため、本報告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、5GCore から構成される (図 11)。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 [19]、5GCore は open5GS [20] をそれぞれ用いている。また、5G システムに接続する端末 (UE) は Samsung Galaxy S21 5G および Samsung Galaxy S21 Ultra 5G を使用している。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、

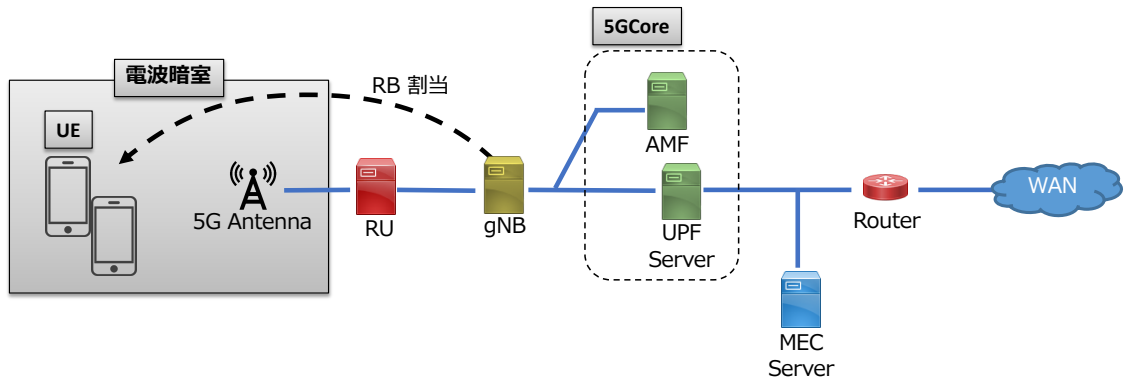


図 11: 5G システム構成

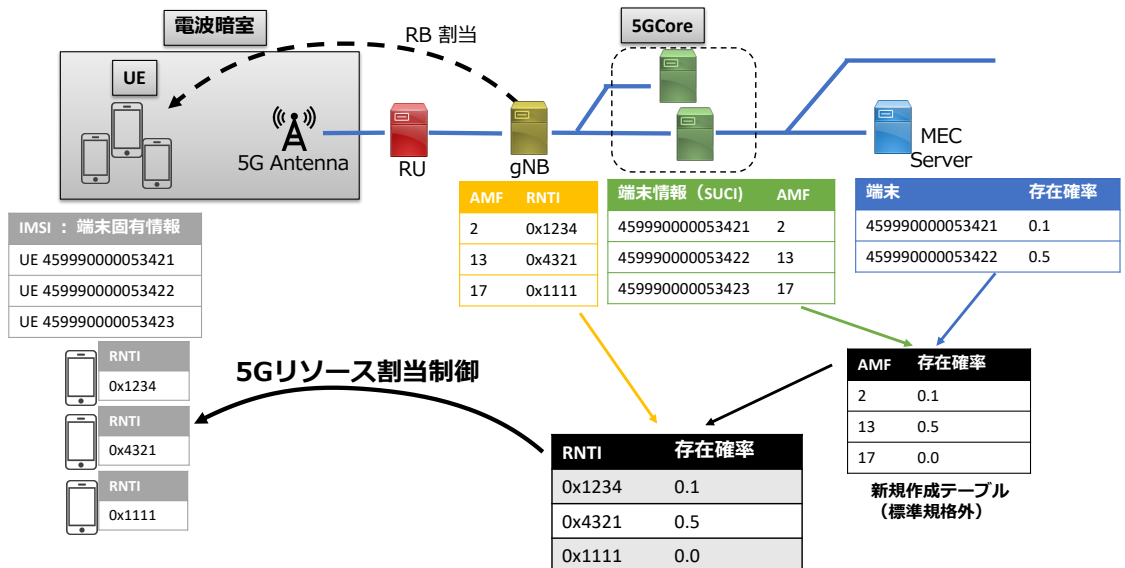


図 12: 5G リソース割当における車両存在確率の反映

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。

車両存在確率をリソース割当に反映させるため、図 12 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、5GCore 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、5GCore との通信に用いる AMF ID を有している。一方で、5GCore は AMF ID と端末固有番号の対応表を持っている。そこで、5GCore 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、5GCore から UE と AMF ID の対応に基づいて 5GCore 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。5GCore における対応表は、memcached[21] 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 100 ms としている。

4.5 評価方法

本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。その際に、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 の数を評価指標とする。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、車両が映っ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、UE 1、UE 2 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。

評価の基準として、以下の (1)~(4) のセルラーリソース割当アルゴリズムを用いて実験を行い、比較する。

- (1) 要求されたリソースに応じてそのまま RB を割り当てる。
- (2) 均一に RB を割り当てる。
- (3) 重み付けした存在確率による重み付き公平キューイングによって RB を割り当てる (3.2 節 手法 1)。
- (4) 重み付けした存在確率によって RB を割り当てる (3.2 節 手法 2)。

4.6 実験結果

前節の (1)~(4) のセルラーリソース割当アルゴリズムを用いてリソースの割当実験を行った。なお、実験環境の諸元は次の通りである。

1. JetBot は 1 km/h (=0.28 m/s) で予め決められたコースを走ることとする
2. UE 1 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]、UE 2 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 UE 1 の前を通過し、19~21 秒後に UE 2 の前を通過するようにカメラを設置する。
3. UE 1 では 1080p60 の高品質 (約 8.0 Mb/s) で、UE 2 では 720p25 の低品質 (約 1.6 Mb/s) でライブ配信を行う。

実験結果として、各リソース割り当てアルゴリズムに基づいて 5G システムが 1 スロットあたりに割り当てた平均の RB の数の時間推移を図 13~16 に示す。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 13 は各 UE の要求に応じて 5G システムが RB を割り当てたものであり、車両存在確率は考慮していない。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 14 は UE 1 および UE 2 に均一に最小の RB を割り当てているものであり、これも確率分布を考慮していない。この時、高品質で配信していた UE1 の方は配信を維持できずに大きな遅延を生じた。

図 15 は存在確率による重み付き公平キューイングに基づいて RB を割り当てたものである。図 13 と比較すると、車両通過時刻である UE 1 の 1100 フレーム目付近及び UE 2 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 13 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おこったため、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。従って、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 16 は重み付けした存在確率を用いて RB を割り当てたものである。UE 1、UE 2 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 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ている。また、実験環境諸元 2 と参照すると、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 13 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 20 RB を要求している。従って、1 スロットあたり 7 RB 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てしまう。この問題を解決するには、ライブ配信の品質を車両存在確率に応じて動的に変更する必要があると考えられる。例えば、車両存在確率が低い時はライブ配信の品

質を大きく下げ、確率が高まる時に品質を上げることで、車両を撮影していない時は少ないリソースでの配信が可能となる。また、本報告では監視カメラの映像送信を対象としたが、CPSにおいてはUEが実環境の振る舞いに応じて送信データ量を制御する機構も必要であると考えられる。

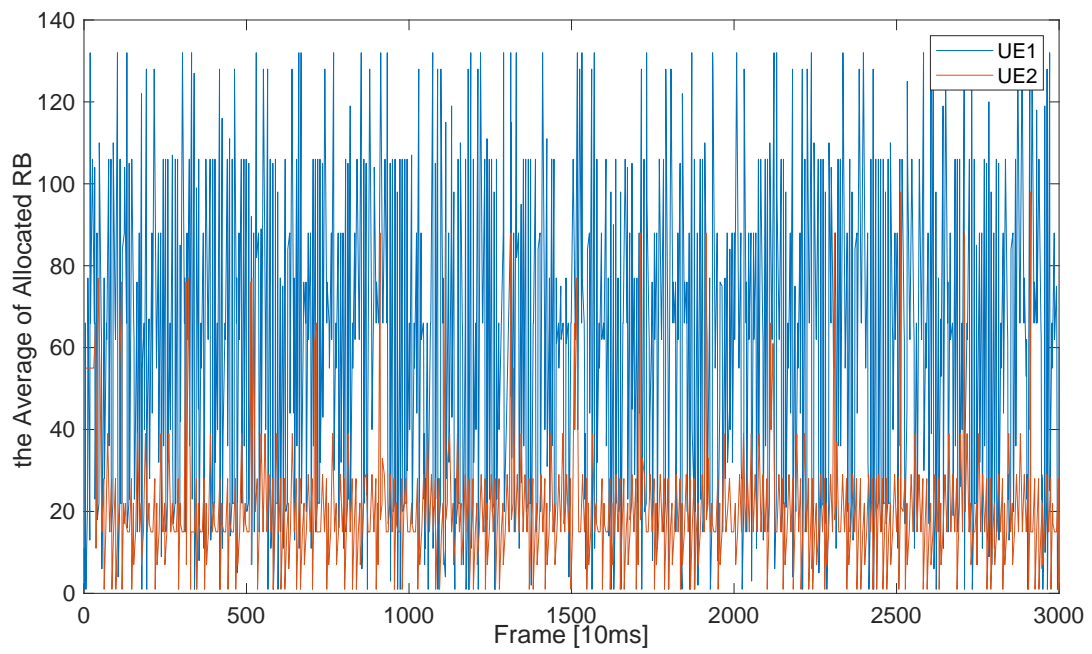


図 13: (1) 要求に応じて RB 割当

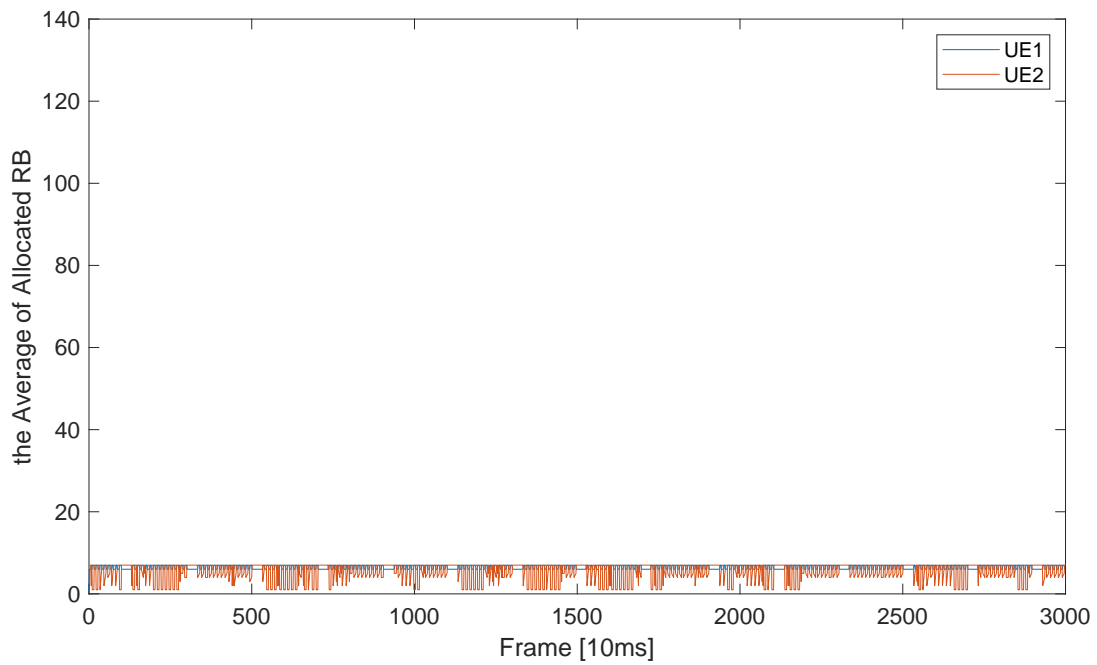


図 14: (2) 均一に RB 割当

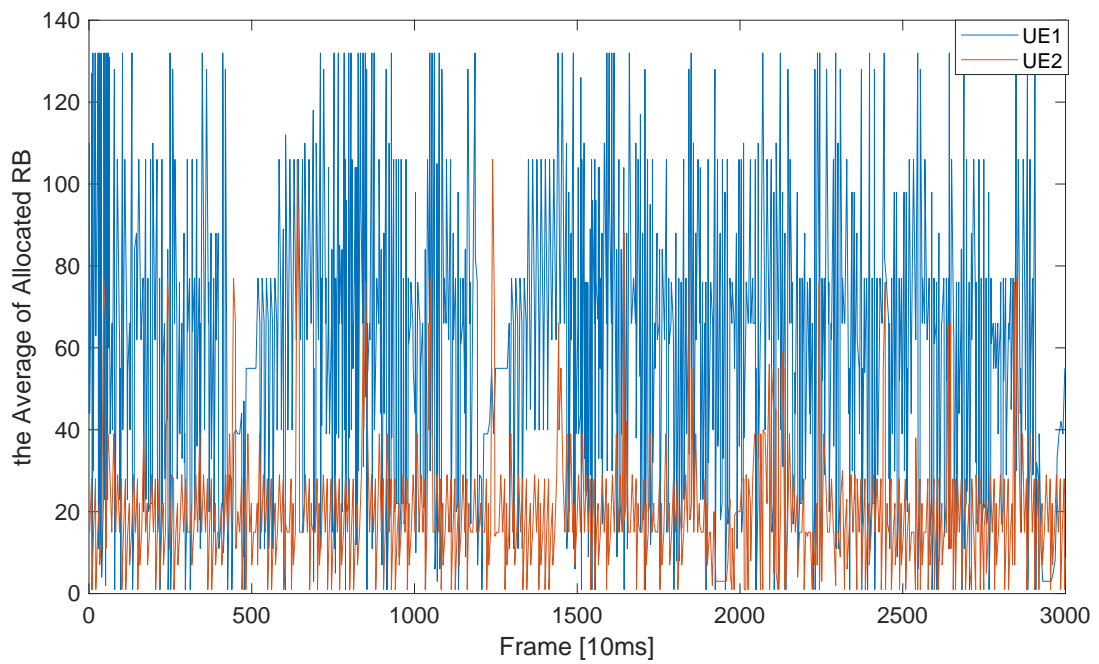


図 15: (3) 重み付けした存在確率による重み付き公平キューイングで RB 割当

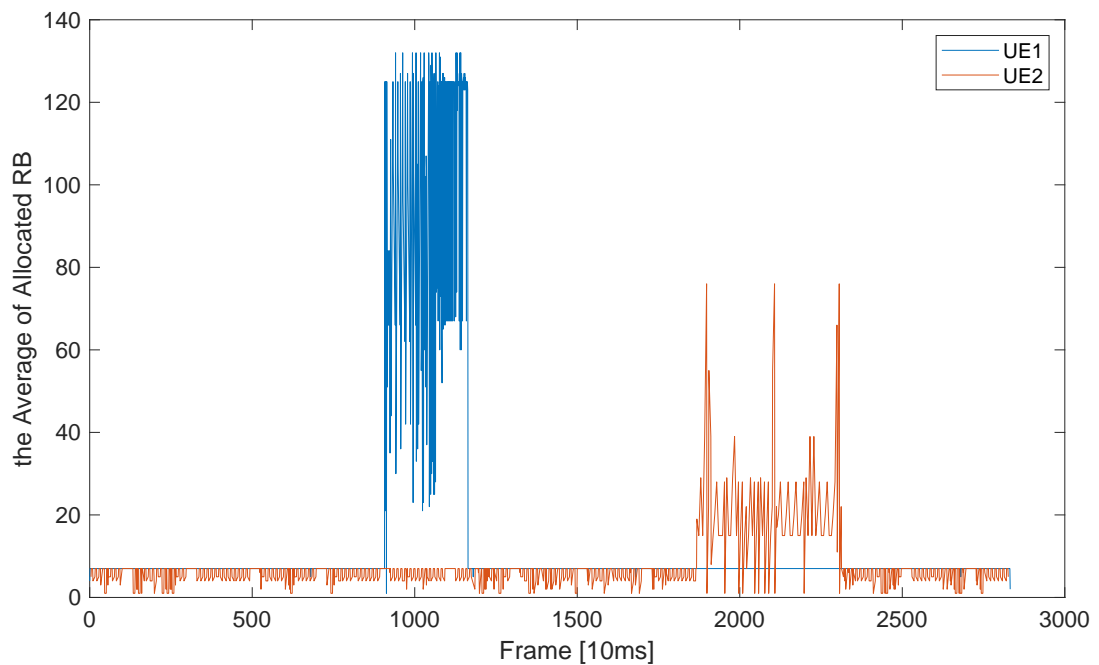


図 16: (4) 重み付けした存在確率による RB 割当

5 おわりに

本報告では、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、リソースの割当実験を行った。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7RB (Resource Block) 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ることを確認した。つまり、CPSにおいてフィジカルシステムとサイバーシステムの制御ループに通信リソース制御を組み入れることに成功した。

本報告の実験はミニチュア車両を用いたものであり、実環境をより忠実に再現した模擬環境もしくは実環境での評価が今後必要である。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。後者の位置誤差の影響を軽減することについては、RTKを用いてより正確な位置情報を利用する方法を本報告で述べた。しかし、RTKを用い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、本報告では監視カメラの映像送信を対象としたが、CPSにおいてはUEがフィジカルシステムの振る舞いに応じて送信データ量を制御する機構も必要であると考えられる。

謝辞

本報告を終えるにあたり、大阪大学大学院情報科学研究科村田正幸教授にはご多忙の中数々の貴重なご助言を賜りましたこと深く感謝いたします。大阪大学情報科学研究科荒川伸一准教授には、研究の進捗や方向性の確認、論文執筆に至るまで、日頃より多大なご指導やご助言を下さいましたこと心より厚く感謝いたします。また、平素よりご指導、ご教示いただきました大阪大学先導的学際研究機構大下裕一准教授並びに大阪大学情報科学研究科小南大智助教に心より感謝申し上げます。最後に、日々の学生生活を支えてくださった家族、友人、研究室の皆様に感謝の意を表し、謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] 加藤真平, “サイバーフィジカルシステム: 1. サイバーフィジカルシステムの概要と動向,” *情報処理*, vol. 55, pp. 910–915, Sept. 2014.
- [2] 株式会社 NTT ドコモ, “5G の高度化と 6G,” Feb. 2021. 3.0 版.
- [3] 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)*, vol. 11, Aug. 2021.
- [4] 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*, vol. 27, pp. 2595–2613, Mar. 2021.
- [5] 内閣府・総務省・経済産業省・国土交通省, “スマートシティガイドブック,” Apr. 2021.
- [6] A. Puliafito, G. Tricomi, A. Zafeiropoulos, and S. Papavassiliou, “Smart cities of the future as cyber physical systems: Challenges and enabling technologies,” *Sensors*, vol. 21, p. 3349, May 2021.
- [7] M. Althoff, *Reachability analysis and its application to the safety assessment of autonomous cars*. PhD thesis, Technische Universität München, Feb. 2010.
- [8] M. Althoff, O. Stursberg, and M. Buss, “Model-based probabilistic collision detection in autonomous driving,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 10, pp. 299 – 310, July 2009.
- [9] 中西崇文, “人工知能技術による創造性を生かした人間中心のサイバーフィジカルシステム,” *情報システム学会誌*, vol. 14, pp. 29–32, Mar. 2019.
- [10] 岩野和生, 高島洋典, “サイバーフィジカルシステムと iot (モノのインターネット) 実世界と情報を結びつける,” *情報管理*, vol. 57, pp. 826–834, Feb. 2015.
- [11] M. Jirgl, Z. Bradac, and P. Fiedler, “Human-in-the-loop issue in context of the cyber-physical systems,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, pp. 225–230, July 2018.

- [12] G. Huang, B. Zhang, Z. Yao, and C. Li, “Stochastic joint rate control and resource allocation for wireless video surveillance,” *Computer Networks*, vol. 190, p. 107904, Feb. 2021.
- [13] P. Pradeepkumar, A. Pal, and K. Kant, “Resource efficient edge computing infrastructure for video surveillance,” *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, pp. 1–1, Mar. 2021.
- [14] M. Althoff, N. Kochdumper, and M. Wetzlinger, “A tool for continuous reachability analysis.” <https://tumcps.github.io/CORA/>, accessed : 2021.12.20.
- [15] NVIDIA. <https://www.nvidia.com/ja-jp/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-nano-developer-kit/>, accessed : 2021.12.20.
- [16] TOYOTA, “SPECIFICATION SHEET トヨタ ヤリスクロス 主要諸元表.” https://toyota.jp/pages/contents/yariscross/001_p_001/4.0/pdf/spec/yariscross_spec_202107.pdf, accessed : 2021.12.20.
- [17] H. Takamizawa and N. Tanaka, “Authentication system using location information on iPad or smartphone,” *International Journal of Computer Theory and Engineering*, vol. 4, p. 153, Apr. 2012.
- [18] C. Mekik and M. Arslanoglu, “Investigation on accuracies of real time kinematic GPS for GIS applications,” *Remote Sensing*, vol. 1, pp. 22–35, Mar. 2009.
- [19] OpenAirInterface. <https://openairinterface.org>, accessed : 2022.2.7.
- [20] Open5GS Open source project of 5GS and EPC. <https://open5gs.org>, accessed : 2022.2.7.
- [21] memcached. <https://memcached.org>, accessed : 2022.2.7.