

一般道路環境における高速ビーム追従の適応的アルゴリズムの提案

岩城 療[†] 中里 仁[†] 小澤 爽仁[‡] 丸田 一輝[‡] ムハマド アサード[†]

エッサン ジャワンマーディ[†] 塚田 学[†] 落合 秀也[†] 江崎 浩[†]

[†] 東京大学 〒152-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

[‡] 東京理科大学 〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1

E-mail: {iwaki-ryo519, jin-nakazato, asad, ejavanmardi, mtsukada}@g.ecc.u-tokyo.ac.jp, 4320017@ed.tus.ac.jp, maruta@rs.tus.ac.jp, jo2lxq@hongo.wide.ad.jp, hiroshi@wide.ad.jp

あらまし 2019年より世界中でサービスが開始された5Gでは、ミリ波が移動体通信として初めて導入された。ミリ波は直進性が強く、回り込みしない特徴からカバレッジが小さいスモールセルへの導入がされている。一方で、様々な交通システムが協調的に認知、判断、実行を担える協調型自動運転では、通信に常時繋がるのが前提とされている。高速移動する車両に対して低遅延であるミリ波を用いるためには5Gにおけるビームフォーミングでは高速で追従できない課題がある。そこで本稿では、その課題の1つの解決策となる、高速で移動する車両に対し高速にビーム追従を行うビーム追従アルゴリズムについて、交通シミュレータと連携させることでより一般的な環境で評価することを行うことを可能とする。さらに、ビーム探索数の増加と探索次元の増加方式を提案し、一般的な道路環境にて評価し、適応的なアルゴリズムであることを示した。

キーワード ミリ波, 高速ビーム追従, V2X, 協調型自動運転

Adaptive Fast Beam Tracking Algorithm for Various Road Environment

Ryo IWAKI[†], Jin NAKAZATO[†], Sojin OZAWA[‡], Kazuki MARUTA[‡], Asad MUHAMMAD[†],

Ehsan JAVANMARDI[†], Manabu TSUKUDA[†], Hideya OCHIAI[†], and Hiroshi ESAKI[†]

[†] The University of Tokyo 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo

[‡] Tokyo University of Science 6-3-1 Nijjuku, Katsushika-ku, Tokyo, 125-8585, Japan

E-mail: {iwaki-ryo519, jin-nakazato, asad, ejavanmardi, mtsukada}@g.ecc.u-tokyo.ac.jp, 4320017@ed.tus.ac.jp, maruta@rs.tus.ac.jp, jo2lxq@hongo.wide.ad.jp, hiroshi@wide.ad.jp

Abstract The commercialization of 5G has been initiated for a while. Furthermore, millimeter wave (mmWave) has been introduced to small cells with small coverage due to its strong linearity and non-winding characteristics. On the other hand, in connected autonomous vehicles (CAVs), where various traffic systems can cooperatively perform recognition, decision-making, and execution, communication is assumed to be always connected. Therefore, to use low latency mmWave for high-speed moving CAV, beamforming in 5G cannot follow them at high speed. This paper proposes an improved beam tracking algorithm for high-speed CAVs, which can be evaluated in a more general environment using a traffic simulator. We proposed an adaptive algorithm for a general road environment by increasing the number of beam searches and search dimensions.

Key words Millimeter wave, Fast beam tracking, V2X, Connected autonomous vehicle

1. はじめに

日本における未来の社会のビジョンとして「Society 5.0」が提唱されている [1]。これは、人工知能 (AI)、ロボティクス、ビッグデータ、モノのインターネット (IoT) などの先進的な技術を活用して、経済発展と社会の課題解決を両立させることにより

豊かな社会全体を目指す概念である。自動運転は、Society 5.0 の実現に向けて重要な役割を果たす技術の1つとされている。自動運転技術は、現在「自律型自動運転」が主として研究開発及び社会実装が進められているが、車両は自車に備えられたセンサによる局所的な情報に基づき走行するため、運転者と同一の限界が存在する。これに対し、道路や信号など様々な交通

システムが協調的に認知、判断、実行を担える「協調型自動運転 [2]」では、自動運転のための通信機能を備えた協調型インフラが重要な役割を担う。自動運転の車両及び路側機が保持するセンサー情報を活用し、相互連携することで自律型自動運転だけでは実現できなかった技術的な課題を解決することができる。

無線通信の観点からは、増大するモバイルトラフィックを限られた周波数資源下で効率的に収容する手段として基地局のカバレッジ狭小化（スモールセル化）に加え、広帯域を確保可能なミリ波帯への移行が進んでいる背景がある。具体的には、第 5 世代移動通信（5G）では、新たに 6 GHz 以下の Sub6 と 26 GHz 以上のミリ波が割り当てられたが、その周波数の高さ故に従来のシステムと比較して電波の到達距離が短いという課題がある。そのため、5G はスモールセル化との親和性は高い一方、設置コストの観点から 2020 年の 5G 導入以降、ミリ波の基地局の展開は未だに進んでいない現状がある [3]。協調型自動運転車両には LiDAR や 4K カメラなどの高精細センサー群が搭載されており、無線ネットワークを介して、それらの取得情報を周辺の車両や基地局に共有する。そのため大容量通信を可能とするミリ波の活用は必須であるが、常時移動環境にある車両に対しカバレッジの狭いミリ波通信を安定的に提供するには多くの課題がある。この問題の解決に資する技術として、アレーアンテナによるビームフォーミングが有用とされている。しかしながら高速で移動する車両に対して正確にビームを追従させるには工夫が必要である。そこで本研究では、まず初めに交通シミュレータと無線通信プログラムを連携した、リアルな道路環境を模したシミュレーション環境の構築を行う。そしてそのシミュレータ上で様々な道路環境でのビーム追従アルゴリズム [4] の性能評価を行う。次にビーム探索の角度変化、および探索数増加といったアルゴリズムの改善を図り、それによってどれほど性能が向上するかを検証・評価する。本稿では、第 2 章で関連研究を説明したのち本研究との差分を明確にする。次に、第 3 章にて従来方法に対する 2 つの改良方式の提案を行う。第 4 章では提案方式を評価するための実道路に近いシミュレーションの構築とシミュレーション結果を示す。最後に第 5 章において本研究における結論を述べる。

2. 関連研究

本章では、本研究における関連研究について説明する。小セル化が進む無線移動通信システムでは、時空間変動するモバイルトラフィックに対して、どう効率的に基地局を展開し運用するのかという問題がある。これまで設備効率の観点からは、トラフィック需要に動的に追従し、スモールセル基地局が自律的なモバイル機能を備える適応型モバイルネットワークアーキテクチャが提案されている [5,6]。その実現形態の 1 つとして、モバイルトラフィック需要に対する報酬に応じて、ドライバーの行動特性を考慮することで基地局機能の制御を可能にした車両セルネットワークが提案されている [7]。また、5G で利用可能な高周波数帯を利用した場合の車車間通信特性を明らかにしている研究もある [8]。一方、車両基地局とネットワーク側との接続も大容量通信が必要であり、多素子アレーアンテナを用いた

ビームフォーミング [9] がその候補として期待されている。

協調型自動運転の路側機などのインフラと車の間の V2I (Vehicle-to-Infrastructure) 通信においては、ミリ波を適応させて高速大容量通信を可能にし、生のセンサーデータを共有させることで高度なインフラを担うミリ波 V2X の取り組みが行われている [10]。これを既存の 5G ミリ波にて実現した場合、制御信号を用いたビーム探索が 3GPP にて規定されている [11,12]。

上述の議論より、協調型自動運転技術の実現化に向けて、大容量のバックホール回線を持ったスモールセルシステムを想定した場合に、ミリ波などの高周波帯を用いた通信を行う必要がある。また、車両は高速で移動するため、それに対する動的かつ高速なビーム追従が必要となっている。自動運転車に対するビーム追従アルゴリズム [4] では、直線道路環境における簡易・高速ビーム追従手法を提案し、シミュレーションによりその有効性を明らかにしている。具体的なアルゴリズムとしては、予測される車の位置に対し、その前後にビームを向け、SNR (Signal-to-Noise Ratio, 受信信号電力対雑音電力比) を測定する。SNR の値が良い方向に車両があるものとして、車の位置と速度を予測する。しかし本研究においては、車両の移動において直線道路のみを想定しており実際の交通システムでの評価がされておらず、また、ビーム探索数の最適化が行われていないという課題が存在する。

3. 提案方式

本章では、先行研究であるビーム追従アルゴリズム [4] の改良手法を 2 つ提案する。まずビーム探索数の増加について、その次にビーム探索の次元拡張について述べる。

3.1 提案方式 1: ビーム探索数の増加

既存の研究 [4] では、予測される車の位置に対し、その前後の 2 方向にビームを照射する。そして SNR が良い方を採用し、その情報をもとに予想速度の更新を行うという仕組みになっている。しかし、単に前後 2 方向としただけでは、同じ方向であったとしても予測位置からのズレの大小の差異は関係なく均一のものとして扱われることから、推定精度が落ちる場合が存在する。そこで、図 1 に示すようにこのビーム探索数を各方向内で 2 分割、即ち全体で 4 方向に増やす拡張方式を提案する。

具体的なアルゴリズムについて説明する。既存手法においては、速度の更新式は下式で表される。

$$v_{est}(t) = v_{est}(t - \Delta t) + \text{sgn}\left(\log \frac{G_+}{G_-}\right) \frac{\alpha G(t)}{G(t - \Delta t)} \quad (1)$$

ここで、 $v_{est}(t)$ は現在の車両の推定速度、 $G(t)$ は現在の SNR、 $v_{est}(t - \Delta t)$ と $G(t - \Delta t)$ はそれぞれ 1 ステップ前の車両の推定速度と SNR、 G_+ と G_- はそれぞれビームを車両の進行方向に対して前と後に照射したときの SNR、 α は感度を示すパラメータである。

ビーム探索数を増加した改良アルゴリズムにおいては、この速度の更新式を下式のように変更した。

$$v_{est}(t) = v_{est}(t - \Delta t) + \frac{\beta G(t)}{G(t - \Delta t)} \quad (2)$$

ただし、 β は最も精度の高かったビームの方向に依存し、

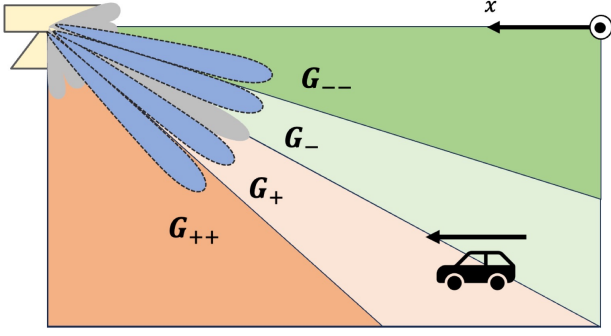


図 1: 4方向のビーム探索

$$\beta = \begin{cases} 2\alpha & \text{if } \max(\hat{G}) = G_{+++} \\ \alpha & \text{if } \max(\hat{G}) = G_{++} \\ -\alpha & \text{if } \max(\hat{G}) = G_{-} \\ -2\alpha & \text{if } \max(\hat{G}) = G_{--} \end{cases} \quad (3)$$

$$\hat{G} = \{G_{+++}, G_{++}, G_{-}, G_{--}\} \quad (4)$$

となる。ここで、 G_{+++} 、 G_{++} 、 G_{-} 、 G_{--} というのはそれぞれ図 1で指し示した領域に対するビームの SNR である。また、 α は式 (1) と同じパラメータである。 G_{+} と G_{-} は、車の推定位置を境目としている。なお、 G_{+++} と G_{++} 、 G_{-} と G_{--} それぞれの領域の分割方法は、 G_{+} と G_{-} から前後 2° ずつ離れたところとしている。

3.2 提案方式 2: ビーム探索の 2 次元への拡張

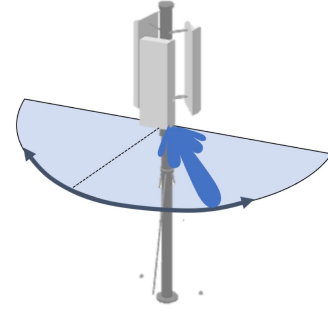
車両が 2 次元的な移動をする環境においては、2 次元でのビーム追従が必要となる。既存のアルゴリズムでは、基地局のアンテナからのビームの照射方向は、図 2a に示すように水平方向にしか探索を行っていなかった。このため、ビーム探索を 1 次元的にしか行うことができず、カーブなどの道路を移動する車両が 2 次元的な移動をする環境で追従特性が劣化するという問題点があった。本研究では、本課題を解決するため、図 2b に示すようなビーム探索方向の垂直方向も考慮した方式を提案する。提案方式により、ビームを道路の 2 次元平面上どこに対しても自由に照射できるようになり、より広いケースで高い精度のビーム追従が期待できる。

速度の更新式は下式のようにになる。アルゴリズムが 2 次元に拡張されているため、ここでの \mathbf{v}_{est} はスカラー量ではなく、2 次元のベクトル量になっていることに注意する必要がある。

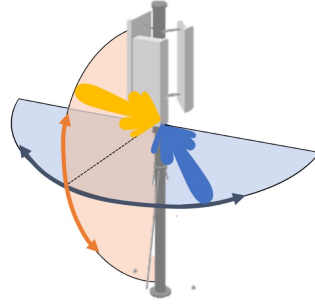
$$\mathbf{v}_{est}(t) = \mathbf{v}_{est}(t - \Delta t) + \frac{G(t)}{G(t - \Delta t)} \boldsymbol{\gamma} \quad (5)$$

ただし、 $\boldsymbol{\gamma}$ は最も精度の高かったビームの方向に依存し、

$$\boldsymbol{\gamma} = \begin{cases} (\alpha, 0) & \text{if } \max(\hat{G}) = G_{x+} \\ (-\alpha, 0) & \text{if } \max(\hat{G}) = G_{x-} \\ (0, \alpha) & \text{if } \max(\hat{G}) = G_{y+} \\ (0, -\alpha) & \text{if } \max(\hat{G}) = G_{y-} \end{cases} \quad (6)$$



(a) 水平方向のみ



(b) 水平&垂直方向 (提案手法 2)

図 2: 湾曲道路での結果

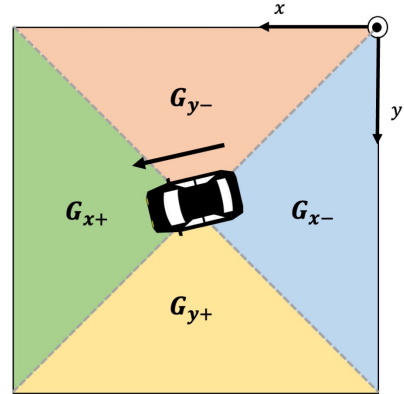


図 3: 2次元のビーム探索

$$\hat{G} = \{G_{x+}, G_{x-}, G_{y+}, G_{y-}\} \quad (7)$$

となる。ここで、 G_{x+} 、 G_{x-} 、 G_{y+} 、 G_{y-} というのはそれぞれ図 3で指し示した領域に対するビームの SNR である。また、 α は式 (1) と同じパラメータである。

4. シミュレーション結果

4.1 シミュレーション環境の構築

本研究では、交通シミュレータとして Simulation of Urban Mobility(SUMO) を、そしてビームフォーミング機能を実装した MATLAB を用いてシミュレーション構築を行う。ここで、車両のより現実的な走行動作と速度変化を再現する目的で、SUMO を用いた。MATLAB は車両に対するビーム追従の計算を行う

Algorithm 1 Beam Tracking Algorithm

```
1: traci.start()
2: num_search_beam ← 2 or 4
3: dimension ← 1 or 2
4: while t < t_end do
5:   traci.simulation.step()
6:   speed ← traci.vehicle.getSpeed('vehicleID')
7:   position ← traci.vehicle.getPosition('vehicleID')
8:   beam_track(num_search_beam, dimension, speed, position)
9: end while
10: plot()
11: traci.close()
```

ために用いた。

目的とするシミュレーションを行うためには、SUMO と MATLAB それぞれでの演算処理を同期させて、データのやり取りをできるようにする必要がある。そこで、この2つのソフトウェアを連携させて動かすための API が必要である。本シミュレーションでは、TraCI4Matlab と呼ばれる、SUMO が提供している API を用いる。TraCI4Matlab を利用することで、SUMO はサーバ、MATLAB はクライアントとしての機能を果たすことになる。具体的には、SUMO 上で動いている車の速度や位置、現在走行している道路の道幅といった情報を、MATLAB 上で関数を用いて取得することができる。

TraCI4Matlab の API を組み込んだ MATLAB のビーム追従アルゴリズム擬似コードを Algorithm 1 に示す。なお、このコードは 3 章で述べた提案方式を実装したものとなっている。

アルゴリズム 1 でのコードにおいて、*num_search_beam* はビーム探索数を、*dimension* はビーム探索を行う次元をそれぞれ示している。

このシステム全体の構成を図 4 に示す。netedit という SUMO に付属する GUI アプリケーションを用いて、所望の道路環境を作成する。その環境でシミュレーションを開始させる。シミュレーションが始まると SUMO 上で車両の位置・速度が計算され、TraCI4Matlab を介して MATLAB に送られる。MATLAB ではビーム追従の計算が行われる。上記動作が時間ステップごとに繰り返され、その間隔は表 1 に示したように 10 msec である。最終的に計測した受信 SNR などの結果が算出され、出力される。

4.2 湾曲道路の作成

カーブ環境でのシミュレーションを実行するために、SUMO 上で湾曲道路を作成する必要がある。直線の道路であれば、その走行長が決まればその形状は一意に定まるが、カーブの場合はどれくらい急かを表すパラメータも加わることになる。この指標を定量的に議論するため、本論文においては、曲率半径 R というパラメータを用いることとする。

SUMO で道路を作成するにあたっては、netedit を用いる。netedit では、曲率半径を指定して湾曲道路を作成することはできない。代わりに、カーブを扇形と見た時の弧と弦の距離 (図 5 の Y) を指定することで所望の湾曲道路が作成できる。 R と Y の関係は円の性質と三平方の定理を用いれば、下記の式で示すこ

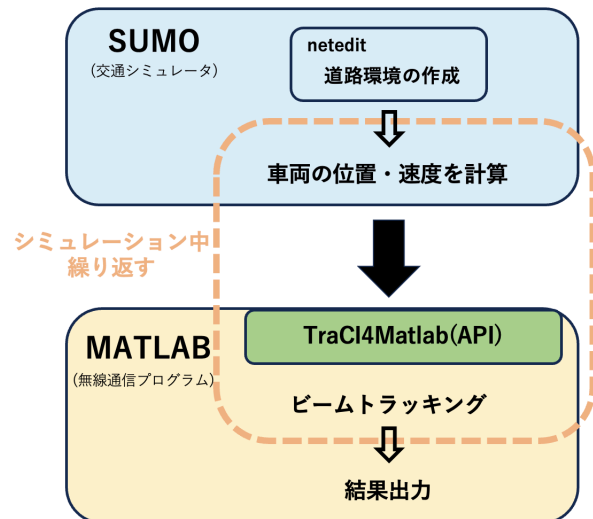


図 4: シミュレータのシステム構成

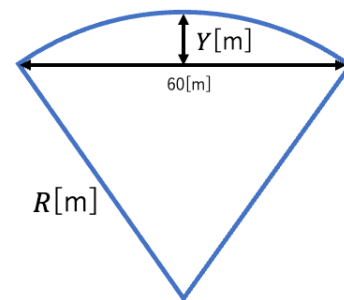


図 5: 曲率半径とカーブ

とができる。

$$Y = R - \sqrt{R^2 - 900} \quad (8)$$

なお、今回の実験においては道路の x 軸上の長さを 60 m とした。(湾曲道路の場合は弦の長さが 60 m になるようにした。) この式をもとに、任意の R に対応する湾曲道路を作成する。 R の値としては、150, 60, 40, 30 の 4 つを採用する。これらのうち 150, 60, 30 については道路構造令第 15 条中の表 [13] に記載されており、「車道の屈曲部のうち緩和区間を除いた部分の中心線の曲線半径は、当該道路の設計速度に応じ、次の表の曲線半径の欄の上欄に掲げる値以上とするものとする」となっている。 $R = 150, 60, 30$ はそれぞれ 60 km/h, 40 km/h, 30 km/h 制限の湾曲道路が満たすべき曲率半径として定められている。これらの曲率半径をもとに SUMO で作成した湾曲道路の形状を図 6 に示す。

4.3 シミュレーション概要

本研究では、直線道路と湾曲道路のシナリオを作成し、シミュレーションを行った。実験に使用したパラメータは表 1 に示している。

シミュレーションのシナリオとしては、直線道路と湾曲道路における車両走行を想定し、以下の 2 つを検討する。

- ・ シナリオ 1: 直線道路において、車の速度が途中 25 m 地

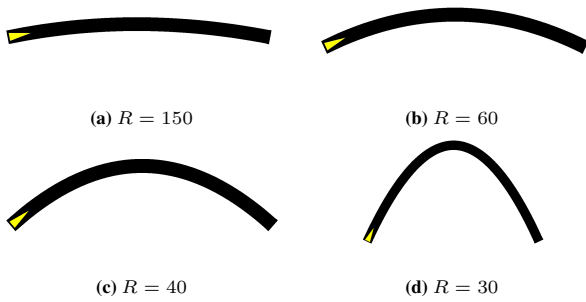


図 6: 作成した湾曲道路の形状

表 1: シミュレーションパラメータ

Parameters	Value
周波数	28 GHz
帯域幅	400 MHz
子局 / 車両のアンテナ数	256 (16 × 16) / 10
子局 / 車両のアンテナ利得	8/0 dBi
子局の送信電力	40 dBm
フィーダ損失	3 dB
子局のアンテナパターン	3GPP モデル [14]
チャンネルモデル	LoS, 自由空間伝搬
ビーム探索周期	10 msec
α	3

点付近まで時速 45 km/h, その後加速し, 35 m 地点付近で時速 60 km/h になる.

- シナリオ 2: 湾曲道路において, 車の速度が停止状態から約 50 km/h まで加速していき, そのあとは一定速度をキープする.

4.4 シミュレーション結果

直線道路におけるシナリオ 1 のシミュレーション結果を図 7 に示す. ここで, 黒線は伝搬路情報を理想的に取得できた場合を想定し, 第 1 固有伝送モードを実行した際の理想的な特性を示す [15], 橙色が Beam Sweeping [16], 青線が先行研究による 1 次元探索のみに基づく既存手法 [4], 緑線と赤線が本提案における 4 方向ビーム探索及び 2 次元ビーム探索をそれぞれ示す. 横軸は車両の走行位置で, 縦軸は車両における受信 SNR である.

直線道路ではビーム探索数を増加させる (提案手法 1) ことの効果により強く出た. 一方, 探索の次元数を増加させた (提案手法 2) ことの効果はあまり見られなかった. これは, 水平方向の探索が機能していることを意味するとともに直線道路が 1 次元の環境であることを考えると妥当な結果である.

次に, 湾曲道路におけるシミュレーション結果を図 8 に示す. ここでは 4.2 節で述べたように, 4 種類の湾曲道路環境を作成し, 評価を行った.

$R = 150$ の緩やかな湾曲道路においては 4 方向のビーム探索 (提案手法 1) の方がより SNR の遷移が高い結果となった. 青線で表される従来手法は背後に隠れてしまっていて見えにくい, 提案手法 1 とほぼ同じ特性になっている. つまり, この程度の緩

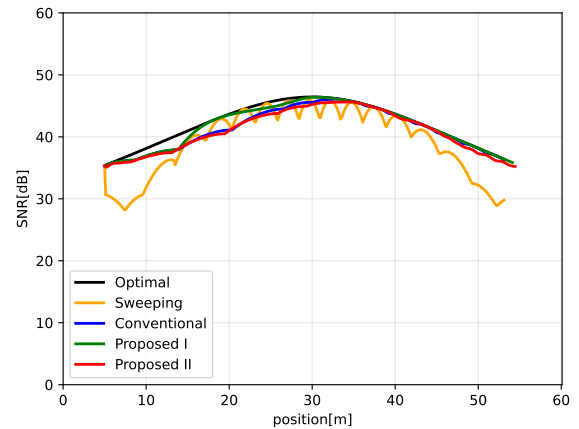


図 7: 直線道路における車両位置に対する受信 SNR 特性.

やかなカーブのケースでは 4 方向の探索を行うメリットはあまり無いと考えられる. 一方で, 2 次元のビーム探索 (提案手法 2) でも x 軸方向に 2 つのビームを照射しているため, 2 方向のビーム探索と同じような結果になることが期待されたが, 若干劣化する結果となった. これは, 垂直方向のビーム探索が冗長に行われたことにより最適な方向からずれたまま追従を継続してしてしまうケースが生じてしまったためと考えられる.

曲率半径が $R = 150$ よりも急なカーブになると, 提案手法 2 の有効性が観測される結果となった. 特に, $R = 60$ (図 8b), $R = 40$ (図 8c) 及び $R = 30$ (図 8d) では, 既存手法や提案手法 1 の性能が大幅に劣化しているのに対し, 提案手法 2 では良好な精度で最適値に近い SNR を維持できていることが確認できる. これらの湾曲道路での結果から, 一般的な湾曲道路では 4 方向のビーム探索はあまり効果的でないことがわかった. これは, 1 次元探索の性能の限界を示唆している. 一方で, 2 次元探索では大幅な改善が見られた. 湾曲道路においては, 垂直・水平のビーム探索の有効性がより発揮されていると言える.

以上の結果から, 4 方向のビーム探索と 2 次元のビーム探索, 2 つの手法を組み合わせることで, 一般的な道路環境において常に高い精度で V2X 通信を提供できることが期待される. 提案手法 1 と提案手法 2 の優位性の境界は $R = 150$ と $R = 60$ の間にあると考えられ, その詳細な検討は今後の課題とする.

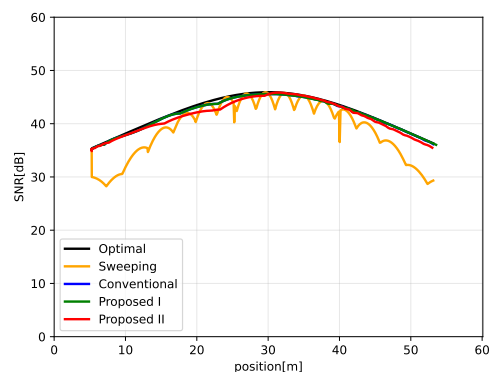
5. まとめ

本研究では, 実道路の再現性の高い交通シミュレータを SUMO に, そして高速ビーム追従機能を MATLAB で実装し, 両ソフトウェアを連携したシミュレーション環境の構築を実施した. 本シミュレーション環境を用いて, 既存のビーム追従アルゴリズムに対して 2 種類の改善方法を提案した. 4 方向のビーム探索は直線道路で特に効果的であり, 一方, 2 次元のビーム探索は湾曲道路で効果的であることを示した. 今後の展望としては, 2 つの提案手法について, 道路環境に応じて動的に切り替える手法について検討する予定である.

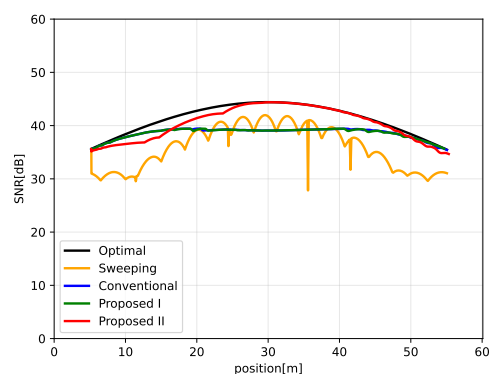
謝辞 本研究は、総務省 SCOPE(受付番号 JP235003002) の受託を受けたものである。

文献

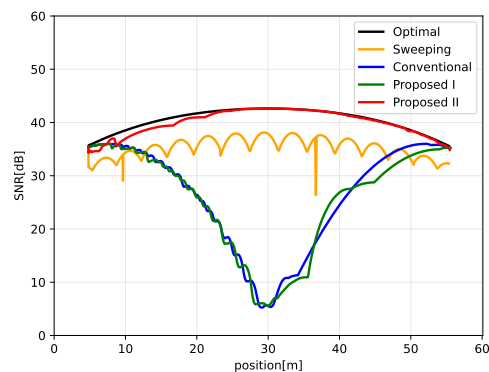
- [1] 一般社団法人 日本経済団体連合会, “Society 5.0 実現による日本再興～未来社会創造に向けた行動計画～.” [Online]. Available: https://www.keidanren.or.jp/policy/2017/010_honbun.pdf
- [2] 塚田学, “協調型自動運転に向けた通信技術とその展望,” In: 技術情報協会, 自動運転車に向けた 電子機器・部品の開発と制御技術, 2022, ISBN: 978-4-86104-884-5.
- [3] 総務省, “5GMF 白書 ミリ波普及による 5G の高度化.” [Online]. Available: https://www.soumu.go.jp/main_content/000878153.pdf
- [4] K. Maruta, D. Hisano, Y. Nakayama, “Fast Beam Tracking Algorithm for Wireless Backhaul in Adaptive Vehicular Cell Networks,” Proc. *The 39th IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE 2021)*, Virtual, January 2021.
- [5] Y. Nakayama, T. Tsutsumi, K. Maruta, and K. Sezaki, “ABSORB: Autonomous base station with optical reflex backhaul to adapt to fluctuating demand,” Proc. *IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications*, May 2017, pp. 1–9.
- [6] Y. Nakayama, K. Maruta, T. Tsutsumi, and K. Sezaki, “Optically back-hauled moving network for local trains: Architecture and scheduling,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 31 023–31 036, 2018.
- [7] K. Honda, R. Yasunaga, Y. Nakayama, K. Maruta, and T. Tsutsumi, “Dynamic mobile network architecture organized by drivers decision making,” Proc. *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Sept. 2018, pp. 1138–1139.
- [8] K. Maruta, Y. Nakayama, K. Honda, D. Hisano, and C. Ahn, “V2P connectivity on higher frequency band and CoMP based coverage expansion,” Proc. *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Sept. 2018, pp. 568–569.
- [9] S. Dutta, C. N. Barati, A. Dhananjay, and S. Rangan, “5G millimeter wave cellular system capacity with fully digital beamforming,” Proc. *2017 51st Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Nov 2017, pp. 1224–1228.
- [10] K. Sakaguchi, R. Fukatsu, T. Yu, E. Fukuda, K. Mahler, R. Heath, T. Fujii, K. Takahashi, A. Khoryaev, S. Nagata, T. Shimizu, “Towards mmWave V2X in 5G and Beyond to Support Automated Driving,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E104-B, no.6, pp. 587-603, Jun. 2021.
- [11] M. Giordani, M. Polese, A. Roy, D. Castor and M. Zorzi, “Standalone and Non-Standalone Beam Management for 3GPP NR at mmWaves,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 4, pp. 123-129, April 2019.
- [12] E. Onggosanusi, M. S. Rahman, L. Guo, Y. Kwak, H. Noh, Y. Kim, S. Faxer, M. Harrison, M. Frenne, S. Grant, R. Chen, R. Tamrakar and Q. Gao, “Modular and High-Resolution Channel State Information and Beam Management for 5G New Radio,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 3, pp. 48-55, March 2018.
- [13] 国土交通省道路局, “道路構造令.” [Online]. Available: <https://www.mlit.go.jp/road/sign/kouzourei/0.pdf>
- [14] 3GPP, TR 38.901, V14.0.0, “Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (release 14),” Mar 2017.
- [15] K. Maruta, T. Iwakuni, A. Ohta, T. Arai, Y. Shirato, S. Kurosaki, and M. Iizuka, “First eigenmode transmission by high efficient CSI estimation for multiuser massive MIMO using millimeter wave bands,” *Sensors*, vol. 16, no. 7, p. 1051, July 2016.
- [16] N. Nonaka, K. Muraoka, T. Okuyama, S. Suyama, Y. Okumura, T. Asai, and Y. Matsumura, “28 GHz-band experimental trial at 283 km/h using the shinkansen for 5g evolution,” Proc. *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, May 2020.



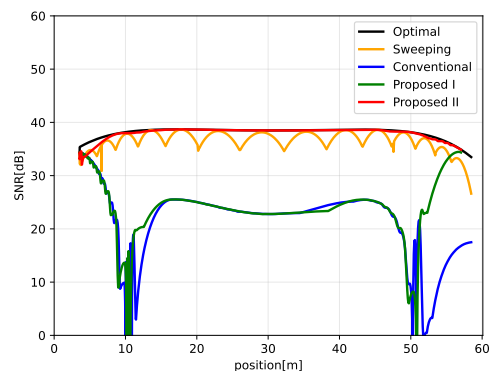
(a) $R = 150$



(b) $R = 60$



(c) $R = 40$



(d) $R = 30$

図 8: 湾曲道路における車両位置に対する受信 SNR 特性.