

車々間通信における周期的なビーコン送信電力増減による 事故リスクに応じた車両位置情報通知手法の評価

岡本 圭右¹ 石原 進¹

概要：

車々間通信を用いて、周辺車両と協調し車両同士の衝突を回避する安全運転支援システムを実現するためには、各車両が周期的に送る自身の位置や速度等を記載したビーコンを受信して周辺車両の状況を把握することが重要である。特に、近接車両間では事故が起きるリスクが高いため、頻繁かつ高精度に周辺車両の位置情報が必要となる。筆者らは簡便な方法で事故リスクに応じたビーコン配信を行うために、与えられたパターンに基づいてビーコンの送信電力を変更する手法を提案している。この手法を用いることで、遠距離に位置する車両に関してはビーコンの到達数は少ないものの事故を回避するためには十分な頻度でビーコンを到達させ、近距離に位置する車両には高頻度にビーコンを到達させることができると期待される。筆者らはこれまでに送信電力パターンによるビーコン受信への影響の評価や他の送信電力制御手法と提案手法の比較を行ってきた。本稿では、今までとは異なる送信電力パターンによるビーコン受信への影響について評価し、また既に提案されているあらかじめ決められた送信電力範囲の中からランダムにビーコン送信電力を決定する手法、送信電力を固定した手法と提案手法を比較し評価を行った。その結果、車両密度に関係なくビーコン送信・受信車両間距離が長い場合に、固定送信電力やランダムにビーコン送信電力を決定する手法に比べて、提案手法は連続してビーコン受信に失敗する頻度が少なくなることを確認した。さらに本稿では、提案手法を用いた場合のビーコンの受信を向上させるために、ランダムにビーコン送信電力を決定する手法と提案手法を組み合わせた手法について検討した。

1. はじめに

車々間通信を用いて周辺車両と協調し車両同士の衝突を回避する安全運転支援システムを実現するためには、各車両が周期的に送る自身の位置や速度等を記載したビーコンを受信して周辺車両の状況を把握することが重要である。衝突回避を目的とした車々間通信システムでは、各車両は自身の ID や車両位置、速度等をビーコンパケットに記載し、定期的に周辺車両に対して配信する。車両同士の衝突を回避するためには、車両の衝突の危険性が高い車両間の距離が近いときほど、高精度かつ高頻度に車両位置情報が必要となる。一方で、車両間距離が長い場合、車両同士の衝突の危険性は低いため、頻繁かつ高精度な位置情報提供は重要ではない。しかしながら、車両の移動や他車両間の通信による干渉等によって、車々間通信のための無線通信規格 IEEE802.11p を利用しても、周辺車両の位置を正確に把握することは容易ではない。特に、都市中心部のような車両密度が高い地域では、各車両の通信干渉等の影響で

ビーコンの受信率は大きく変化する。

周辺車両から送られたビーコンの受信率を向上させるために、ビーコンの送信周期を変更する手法 [1] やビーコンの送信電力を変更する手法 [2][3][4][5][6]、その両方を変更する手法が提案されている [7][8]。ビーコンの送信周期を変更する手法では、車両速度が速い車両は短い周期でビーコンを送信し、一方で車両速度が遅い車両は長い周期でビーコンを送信する。このようにビーコン送信周期を変更することで、交差点のような車両速度の低い箇所での過剰なビーコン送信を抑制することを期待している。一方、ビーコンの送信電力を変更する手法では、各車両が周辺の車両密度等に応じて適切な送信電力を算出する。

筆者らは、事故リスクに応じたビーコン配信に重点を置いた、一定周期で $P_1, P_2, P_3, P_4, P_1, \dots$ というように与えられたパターンに従って送信電力を周期的に変更するビーコン送信電力動的変更手法を提案している [9]。図 1 に示すように、各車両は与えられたパターンにしたがって送信電力を周期的に変更する。このように送信電力を動的に変更することで、事故リスクが大きい車両、つまりビーコン送信・受信車両間距離が短い車両に関しては高い頻度でビー

¹ 静岡大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Shizuoka University

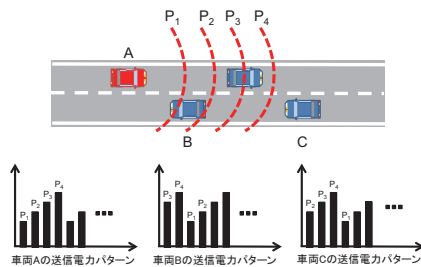


図 1 送信電力動的変更方式

コンを到達させ、事故リスクが小さい車両、つまりビーコン送信・受信車両間距離が長い車両に関しては少ない頻度でビーコンを到達させることを目指している。

提案手法を用いて事故を回避するために必要なビーコン受信を達成するためには送信電力パターンの選択が重要になる。送信電力パターンの設計要素として、少なくとも送信電力パターンを繰り返す周期（送信電力変更周期）、最低・最高送信電力、送信電力のパターン中に使用する送信電力の内訳、パターンに含まれる送信電力の使用順序の4つが考えられる。筆者らは[9]で、送信電力パターン中に使用する送信電力の内訳を変更した複数のパターンについての評価を行った。また[10]では、ある一つの送信電力パターンに対して、そのパターンの中に含まれる送信電力を大きい送信電力と小さい送信が交互に並ぶようにしたものと、そのパターンの中に含まれる送信電力を昇順に並べたものについての評価を行った。本論文では、送信電力パターンの設計要素の一つである送信電力変更周期の変更による提案手法の効果の違いについて検証する。さらに、[10]では、シミュレーションによって動的送信電力制御手法の一つであるDCCよりも車両密度が高く、ビーコン送信・受信車両間距離が長い場合に本手法の方が受信率が高くなることを確認している。

筆者らの提案する手法は、周囲の状況に応じて送信電力を変更しない点で、Kloiberらの提案する手法に類似している（以下、ランダム手法）。彼らの手法では、指定された送信電力の範囲の内から与えられた確率分布に従って各車両が自身の送信電力を決定する。そこで本論文では、提案手法と送信電力を固定した場合、ランダム手法を用いた場合の受信率とビーコン連続受信失敗回数の比較を行った。

以下2章では、ビーコン送信電力変更手法に関する関連研究について述べる。3章は提案手法の基本動作について述べる。4章では、まず、送信電力パターンの違いによる提案手法の効果の違いについて評価を行い、次に、提案手法、送信電力が固定の場合、ランダム手法について評価を行う。5章で、提案手法とランダム手法を組み合わせた手法について検討する。最後に6章で本論文をまとめる。

2. 関連研究

送信電力を動的に変更する手法は大きく2つのグループ

に分けられる。1つ目は、周囲の状況に応じて自身の送信電力を決定する手法である。この手法はさらに各車両が、定期的に送信されるビーコンに自身の近隣車両の位置情報や、自身の送信電力等の情報を付加して周辺車両に配信するという手法とビーコンに新たに情報を付加しない手法の2つのグループに分けられる。2つ目は、各車両が周囲の状況に左右されずに送信電力を決定する手法である。

まず、ビーコンに付加された新しい情報に基づいて送信電力を算出する手法について述べる。Torrent-Morenoらは車両の密度に注目して送信電力を変更するFPAV(Fair Power Adjustment for Vehicular networks)とD-FPAV(Distributed-FPAV)を提案している[2]。FPAVでは、全ての車両位置が既知で、集中制御が可能であるという条件のもと、各車両が一定数以上のビーコン(MBL: Maximum Beaconing Level)を受信しないように全車両の送信電力を平等に増加させて最終的な送信電力を決定する。

しかしながら、現実には全ての車両位置が既知であることは不可能であるため、FPAVを改良した各車両の分散処理によって適切な送信電力を設定するD-FPAVを提案している[3]。D-FPAVでは、自身の近隣車両の情報(位置、速度等)を付加しビーコンを定期的に送信し周辺車両の情報を取得し、各車両の最大送信電力で届く範囲内にいる車両内でFPAVを用いて送信電力を決定する。

LuらはETPC(Efficient Transmit Power Control)を提案している[4]。ETPCはできるだけビーコンの転送範囲を大きくすることを維持しつつ、周辺車両のビーコン受信率を向上させることに焦点を当てている。車両全体でビーコンを送るべき車両の上限値と下限値を決定しておき、その上限と下限の間の車両数にビーコンを送るように自身の送信電力を算出する。この手法は、定期的に交換されるビーコンに送信電力を値を記載し、それに基づいて自身の送信電力を算出する。

次に、ビーコンに新たな情報を付加せずに、周辺の車両状況を推定し、それを基に送信電力を決定する手法について述べる。欧州電気通信標準化機構ETSIではDecentralized Congestion Control(DCC)を定めている[7]。DCCでは、車両密度に応じて、異なるビーコン送信周期と送信電力等をパラメータとして持つ状態を3つ定義している。各車両はビーコンを受信したときの受信電力を基に車両密度を推定する。各車両が推定した車両密度が高い場合、長い送信周期、小さい送信電力、低い通信レートでビーコンを送信し、車両密度が低い場合、短い送信周期、大きい送信電力、高い通信レートでビーコンを送信する。各車両は受信したビーコンの受信電力を各状態に対して決められた閾値と比較し、閾値よりも高い場合は車両密度レベルが高い状態に遷移する。逆に、ビーコンの受信電力が閾値より低い場合は車両密度レベルの低い状態に遷移する。

しかしながら、DCCを実際に用いた場合、車両のほと

んどが同一の状態を選択し、その状態のパラメータに従ってビーコンを送信するということが起き、各車両が周辺の車両密度を正確に推測することは難しい [8]。そこで、Subramanian らは DCC で定義された状態をより細かくした手法を提案している [8]。シミュレーションの結果、DCC を改良した手法（状態が 6 つ）は、3 つの状態しかない DCC に比べ、ビーコン受信率が大きく向上している。

Huang らは周辺車両を追跡するために利用するビーコンの通信レートと送信電力を変更する手法を提案している [6]。この送信電力制御手法はチャネル占有率に基づいて送信電力範囲を算出する。各車両はその範囲に応じた送信電力でビーコンを送信する。シミュレーションの結果、固定送信電力を用いた場合に比べ提案手法を用いた場合に車両を正確に追跡できたこと示している。

次に、各車両が周囲の状況に左右されずに送信電力を決定する手法について説明する。Kloiber らの手法（ランダム手法）は、指定された送信電力の範囲の内から与えられた確率分布に従って各車両が自身の送信電力を決定する [5]。この手法を用いると、同一車両が連続して同じ送信出力を用いることが確率的に少なくなるので、車両間の位置関係が変わらない場合では他車両が送信するビーコンの SINR が受信側で常に変化する。そのため、連続した同一車両からのビーコンの受信失敗を避けることが出来る。しかしながら、彼らの手法では車両が連続して小さい送信電力または大きい送信電力を用いることもありうる。ビーコンを小さい送信電力で送り続けると、遠くの車両にはビーコンが届けることは出来ないため、遠くの車両の位置を正確に把握することは出来ない。また、ビーコンを大きい送信電力で送り続けた場合、遠くの車両にビーコンが届けることは出来るが、より多くの車両の通信に干渉する可能性が高くなる。

筆者らの提案手法は、周囲の状況に左右されずに送信電力を決定するという点で、Kloiber らのランダム手法に良く似ている。しかしながら、提案手法では、送信電力パターンにしたがって送信電力を周期的に周期的に変更するという点が異なっている。本手法では確率的に送信電力を選択していないので、ランダム手法のように連続して同じ程度の送信電力を使い続けることによるビーコンの送信も少なくなる。

3. 提案手法

本章では、筆者らが [9] で提案した手法について簡単に説明する。

3.1 基本動作

提案手法は、ビーコン送信電力を一定周期で $P_1, P_2, P_3, P_4, P_1, \dots$ と与えられたパターンにしたがって周期的に変更する。各車両は、送信電力変更周期 T [サイクル]

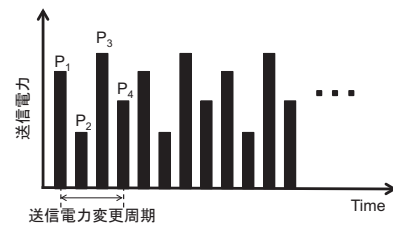


図 2 送信電力変更周期が 4 回の送信電力パターン

中の時刻 t に、ビーコン送信電力パターン $P=(P_1, P_2, P_3, P_4)$ から順に送信電力 P_t を選択する。

図 2 に送信電力パターンの例を示す。この例では全ての車両は、周期 $T=4$ の送信電力パターン $P=(P_1, P_2, P_3, P_4)$ を持っている。各車両は送信電力パターン P の中からランダムに最初の送信電力を決定し、ビーコン送信毎に送信電力を変化させる。例えば、車両 A は初めに P_1 でビーコンを送信し、その後、 $P_2, P_3, P_4, P_1, \dots$ と送信電力を変更させる。一方で、車両 B は、まず送信電力 P_3 でビーコンを送信し、その後、 $P_4, P_1, P_2, P_3, \dots$ と送信電力を変更させる。

提案手法では、周辺車両と送信電力パターンの同期を取ることや、通信条件の把握を用いた方法と併用する他、ランダム手法と組み合わせることも可能である。

3.2 送信電力パターンの設計要素

送信電力パターンの設計要素には、以下の四つの要素が考えられる。

- 送信電力パターンを繰り返す周期（送信電力変更周期）
送信電力変更周期が長い程、送信電力パターンに含まれる送信電力値の種類が多くなるため、車両同士が異なる送信電力を選ぶ確率が高くなる。一方で、送信電力変更周期が短い場合、送信電力パターンに含まれる送信電力値の種類が少なくなるため、車両同士が同送信電力を選ぶ確率が高くなる。
- 最低・最高送信電力
送信電力を大きくすると、遠方の車両までビーコンが届けることができるが、遠方車両までビーコンが届いてしまうことによって他車両の通信に干渉する可能性が高くなる。一方で、送信電力を小さくすると、遠方の車両にはビーコンは届かないため他車両への通信干渉は起こりにくくなるが、近接車両にしかビーコンが届けることができない。車両同士の衝突を回避するために適切な送信電力を選択する必要がある。
- 送信電力パターン中に使用する送信電力の内訳
周期の中でまんべんなく異なる送信電力を使う送信電力パターンや周期の大半を小さい送信電力や大きい送信電力が占める送信電力パターンなどが考えられる。送信電力のパターン中に使用する送信電力の内訳を変化させることで、送信電力パターンの平均送信電力が変化する。

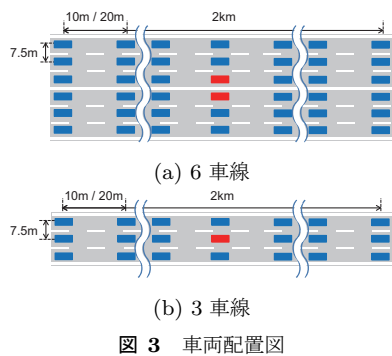


表 1 シミュレーションパラメータ

周波数	5.8 GHz
帯域幅	10 MHz
通信レート	3 Mbps
最低受信可能電力	-85 dBm
キャリアセンスレベル	-65 dBm
ビーコン送信間隔	100 ms
電波伝搬モデル	ITU-RP.1411[12]
ペイロードサイズ	200 bytes
ヘッダサイズ	86 bytes
シミュレーション時間	100 s
シミュレーション回数	5

- パターンに含まれる送信電力の使用順序
パターンに含まれる送信電力の使用順序を変更することによって、同じ送信電力の内訳であっても異なる送信電力パターンができる。

4. シミュレーション評価

本章では、送信電力パターンの設計要素の一つである送信電力変更周期の変更による提案手法の効果の違いについて比較する。また、提案手法の効果を確認するために、提案手法を用いた場合、送信電力を固定した場合、ランダム手法を用いた場合の三つを比較する。評価に当たっては、ビーコン受信率とビーコン連続受信失敗回数をを用いる。

4.1 シミュレーションシナリオ

シミュレーションでは全ての車両は動かないものとし、2km の直線道路に車両を配置した。車線数 (3 車線, 6 車線) と車両間距離 (10m, 20m) の異なる計 4 つの車両配置を用いた (図 3)。送信電力の内訳の異なる 3 種類のパターンに対し、それぞれ送信電力変更周期が送信回数 5 回, 10 回, 20 回の計 9 個の送信電力パターン (図 4) を用意した。全てのパターンの最低送信電力は 10dBm, 最大送信電力は 20dBm とした。パターンには、周期の前半に送信電力が大きくなるもの (Case1), 線形的に送信電力が増加するもの (Case2), 周期の後半に送信電力が大きくなるもの (Case3) を用意した。Case1 の平均送信電力が最も高く, Case3 の平均送信電力が最も低い。図 4 に示す送信電力パターン, 表 1 に示すシミュレーションパラメータを用いてシミュレーションを行った。シミュレータには Space-Time Engineering 社の Scenargie[11] を利用した。

4.2 評価指標

本章では、2 つの評価指標を用いて提案手法を評価する。

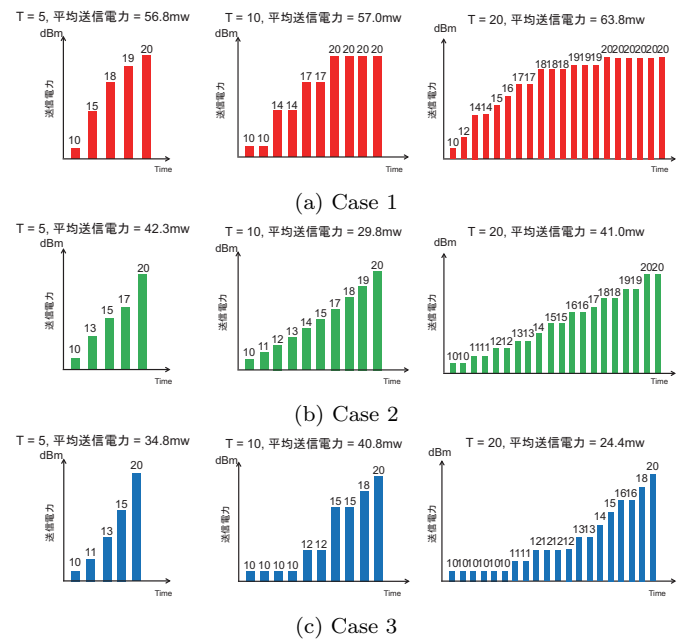


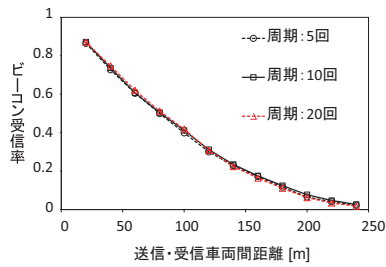
図 4 送信電力パターン

一つ目はビーコン受信率である。ビーコン受信率は、同一車線上に存在する車両から送信されたビーコンのうち、車両群中央の車両が受信したビーコンの割合と定義する。送信・受信車両間の距離とビーコン受信率との関係について評価する。二つ目は、ビーコン連続受信失敗回数である。ビーコン連続受信失敗回数は、同一車線上の車両から送られたビーコンのうち中央の車両によって連続して受け取られなかったビーコンの回数とする。

4.3 送信電力変更周期の影響

筆者ら既に [9] で送信電力パターン中に使用する送信電力の内訳を変更した複数のパターンについて評価を行っている。その結果、車両密度が高い場合には、提案手法の平均送信電力が小さいパターンの受信率が高く、車両密度が低い場合には、提案手法の平均送信電力が大きいパターンの受信率が高くなった。また [10] では、ある 1 つの送信電力パターンに対して、送信電力を昇順に並べた送信電力パターンと、小さい送信電力と大きい送信電力が交互に来るような送信電力パターンに対してビーコン受信率の比較を行った。2 つの送信電力パターンは同じ平均送信電力なのにもかかわらず、ビーコン送信・受信車両間距離が長い場合に、後者の送信電力パターンの方が受信率が高くなった。

以下、送信電力変更周期の影響を調べる。図 5 に送信電力変更周期が送信回数 5 回, 10 回, 20 回としたときの車両間距離 20m, 車線数 6 の場合におけるビーコン送信・受信車両間距離とビーコン受信率の関係を示す。送信電力変更周期を変更しても、ビーコン受信率に大きな差は見られないと言える。送信・受信車両間距離が短い場合、わずかながら送信電力変更周期が 20 回 (=2 秒) の場合が最も高く、送信・受信車両間距離が長い場合、わずかながら送信電力変



Case 1 (車両間隔 20m, 車線数 6)

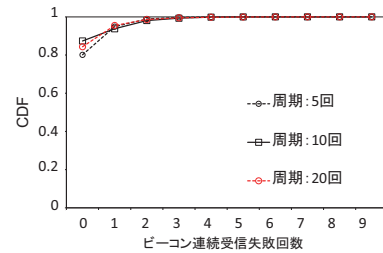
図 5 送信電力変更周期の違いのビーコン受信率への影響

更周期が 10 回の場合が最も高い (図 5). Case 2 と Case 3 を用いた場合も Case 1 と同様の結果を示した. また, 車線数 (3 車線) と車両配置間隔 (10m) を変化させた場合も, 同様の傾向がみられた. 以上のことから, 提案手法の送信電力パターンにおいて, 送信電力変更周期によるビーコンの受信率に大きな差はない.

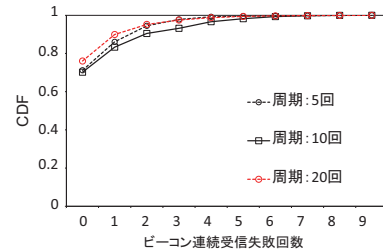
図 6 に車両密度が低い場合 (車両間隔 20m) におけるビーコン連続受信失敗回数の累積分布 (CDF) を示す. ビーコン送信・受信車両間距離が 60m より短い場合は, 送信電力変更周期を変更したことによる顕著な差は見られなかった. 送信・受信車両間距離が 60m の場合, 図 6(a) に示すように, 送信電力変更周期を変更しても, CDF に大きな差は見られない. 送信・受信車両間距離が 100m の場合 (図 6(b)), 送信電力変更周期を変更しても CDF に大きな差は見られないが, わずかながら送信電力変更周期が 20 回の場合がビーコン受信を連続して失敗する頻度が低く, 送信電力変更周期が 10 回の場合がビーコン受信を連続して失敗する頻度が高い. 送信・受信車両間距離が 140m の場合 (図 6(c)) は, 100m の場合と同様, 送信電力変更周期を変更による CDF に大きな差は見られなかった. わずかながら送信電力変更周期が 10 回の場合がビーコン受信を連続して失敗する頻度が低く, 送信電力変更周期が 5 回の場合がビーコン受信を連続して失敗する頻度が高い. Case 2 と Case 3 を用いた場合においても Case 1 と同様の傾向が見られた. 以上のことから, 提案手法の送信電力パターンにおいて, 送信電力変更周期によるビーコン連続受信失敗回数の累積分布にはわずかな差があるものの大きな差はなかった.

4.4 提案手法と固定送信電力, ランダム手法との比較

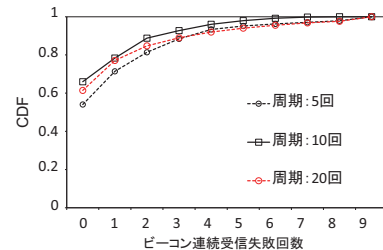
提案手法で用いる送信電力パターンの平均送信電力と同等の固定送信電力を用いるもの, およびランダム手法について提案手法と比較した. 本評価では, 図 4 に示す送信電力変更周期が 20 回の場合の送信電力パターンを使用した. ランダム手法では, 各パターンに含まれる送信電力の中からランダムにビーコン送信電力を決定するようにした. したがって, 平均的にはランダム手法と提案手法における各送信電力の値が用いられる頻度は同じである. 前節のシ



(a) Case 1 (ビーコン送信・受信車両間距離 60m)



(b) Case 1 (ビーコン送信・受信車両間距離 100m)



(c) ビーコン送信・受信車両間距離 140m

図 6 送信電力変更周期の違いのビーコン連続受信失敗回数への影響

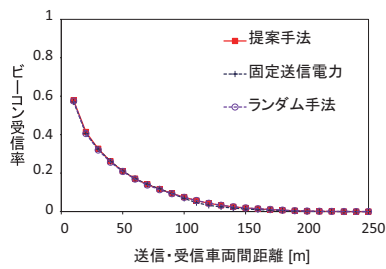
ミュレーションと同様に, 図 3 の車両配置パターン, 表 1 に示すシミュレーションパラメータを用いた.

4.4.1 ビーコン受信率

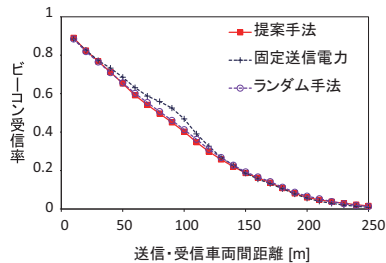
まず, 車両密度が高い (6 車線, 車両間隔 10m) の場合のビーコン送信・受信車両間距離とビーコン受信率の関係について述べる. 図 7 に Case1 を用いた場合のビーコン送信・受信車両間距離と受信率の関係を示す. Case1 と固定送信電力を用いた場合を比べると, 車両密度が高いときには, 両手法の受信率は送信・受信車両間距離に関係なく同程度である (図 7(a)). しかしながら, 車両密度が低くなると (3 車線, 車両間隔 10m), 送信・受信車両間距離が 50m から 100m の間では, Case1 の方が固定送信電力の場合より受信率が低くなる (図 7(b)). Case 2 と Case 3 を用いた場合も Case 1 と同様の結果がみられた.

提案手法とランダム手法の受信率を比較すると, 車両密度に関係なく, 提案手法とランダム手法はほぼ同程度の受信率を示していることが確認できる.

次に, 3 つの送信電力パターンについて, 車両密度が低い場合 (6 車線, 車両間隔 20m) におけるビーコン送信・受信車両間距離とビーコン受信率の関係を図 8 に示す. Case 1 を用いた場合, 3 手法の間に受信率の差はない (図 8(a)). 一方, Case 2 と Case 3 を用いた場合は Case 1 の結果と少し異なっている. Case 2 と Case 3 では送信・受信車両間距離が短い場合, 固定送信電力でビーコンを送信した方が

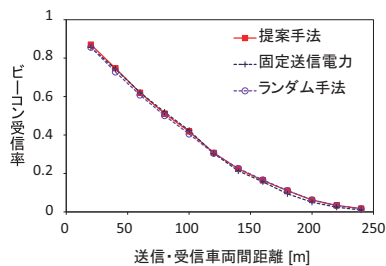


(a) 6 車線

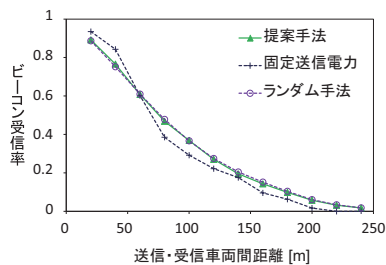


(b) 3 車線

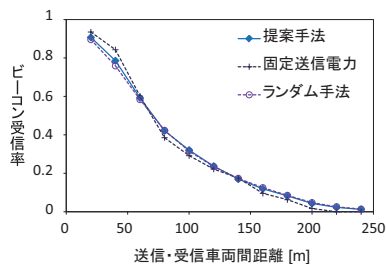
図 7 Case1 における受信率 (車両間隔 10m)



(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3

図 8 6 車線で車両間隔 20m の場合のビーコン受信率

提案手法よりも受信率が高い (図 8(b), 図 8(c)).

次に, さらに車両密度が低い場合 (3 車線, 車両間隔 20m) におけるビーコン送信・受信車両間距離とビーコン受信率の関係を図 9 に示す. 6 車線の場合と同様に, Case 1 を用いた場合, 3 手法の間に受信率の差はない (図 9(a)).

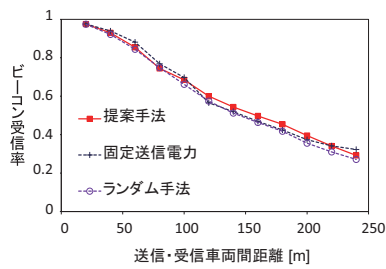
方, Case 2 と Case 3 を用いた場合は Case 1 の結果と少し異なる. Case 2 の場合, 送信・受信車両間距離に関わらず, 固定送信電力でビーコンを送信した方が提案手法とランダム手法よりも受信率が高い (図 9(b)). Case3 を用いた場合は, 固定送信電力を用いた方が提案手法とランダム手法よりも受信率が高い, あるいは同程度である (図 9(c)).

Case1 と Case2, Case3 のビーコン受信率に差があるのは, 以下の理由だと考えられる. Case1 は Case2, Case3 に比べ, 送信電力パターン内の大きい送信電力が占める割合が多く, 固定送信電力に比べて小さい送信電力でビーコンを送ることが少ない. したがって, Case1 は固定送信電力と同じようなビーコン受信率を示す. 一方で, Case2, Case3 は Case1 に比べ, 送信電力パターン内の小さい送信電力が占める割合が多く, 固定送信電力に比べて小さい送信電力でビーコンを送ることが多い. 車両密度が低い場合は, 車両数が少ないため車両同士による通信干渉が起きる可能性が低い. そのため, 大きな送信電力でビーコンを送ったとしても各車両はビーコンを受信することができる. しかしながら, 提案手法やランダム手法は固定送信電力に比べて小さい送信電力でビーコンを送ることがある. そのため, 遠くにビーコンが届かない場合や, 他の車両が大きい送信電力でビーコンを送った場合などが起きることが考えられる. したがって, Case1 は固定送信電力と同程度の受信率を示すのにもかかわらず, Case 2 と Case 3 は固定送信電力より低い受信率を示したと考えられる.

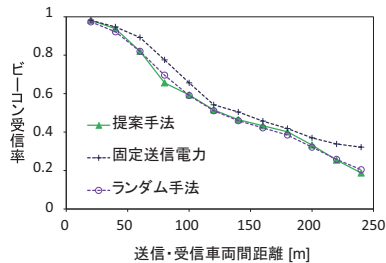
筆者らは, [9][10] で, 車両密度が高い場合には, 平均送信電力が小さいパターンの受信率が高く, 車両密度が低い場合には, 平均送信電力が大きいパターンの受信率が高くなることを確認していた. しかしながら, 本評価では平均送信電力が同じである提案手法, 固定送信電力, ランダム手法の 3 手法間に特に車両密度が低い場合にビーコン受信率に違いがみられた. 提案手法とランダム手法の間には車両密度に関係なく受信率にあまり差がないが, 提案手法と固定送信電力を比べると, 車両密度が低い場合に提案手法の方がやや受信率が低い傾向がみられた. 車両密度が低い場合は, 車両同士による通信干渉が起きる可能性が低いいため, 大きな送信電力でビーコンを送ったとしても各車両はビーコンを受信することができる. しかしながら, 提案手法やランダム手法は固定送信電力に比べて小さい送信電力でビーコンを送ることがある. そのため, 遠くにビーコンが届かない場合や, 大きい送信電力でビーコンを送ってきた他車両による干渉によってビーコンが受信できないといった場合などが考えられる. したがって, 車両密度が低い場合に提案手法やランダム手法の受信率が固定送信電力を用いた場合より低くなったと考えられる.

4.4.2 ビーコン連続受信失敗回数

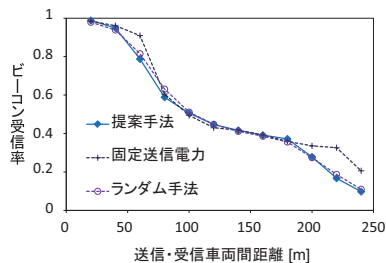
ビーコン送信・受信車両間距離が 60m より短い場合は, 車両密度に関係なく, 3 手法間にビーコン連続受信失敗回



(a) Case1

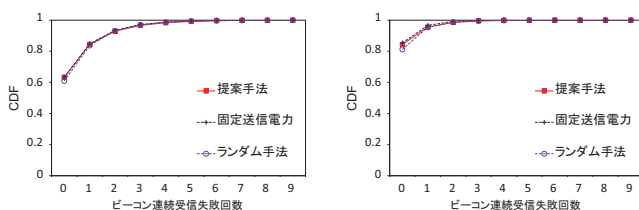


(b) Case2

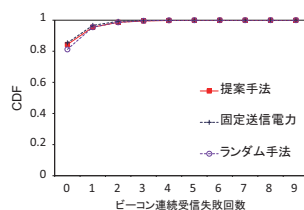


(c) Case3

図 9 3 車線で車両間隔 20m の場合のビーコン受信率



(a) 6 車線



(b) 3 車線

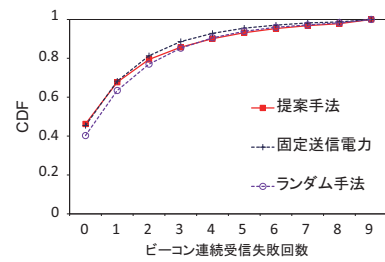
図 10 Case1 を用いた場合のビーコン送信・受信車両間距離が 60m のときのビーコン連続受信失敗回数

数の累積分布 (CDF) の顕著な差は見られなかった。

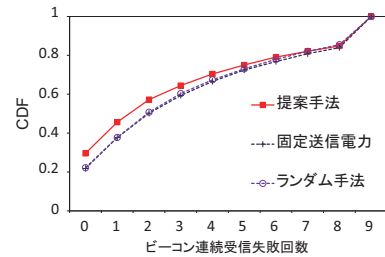
図 10 に車両間隔 20m で送信・受信車両間距離が 60m の場合におけるビーコン連続受信失敗回数の CDF を示す。図 10 に示すように、Case1 を用いた場合、車線数が増減しても各手法間に差はない。Case 2 と Case 3 を用いた場合においても Case 1 と同様の傾向が見られた。

図 11, 図 12 に Case 1 と Case 2 を用いた場合に 6 車線で車両間隔 20m, 送信・受信車両間距離が 100m と 140m におけるビーコン連続受信失敗回数の CDF をそれぞれ示す。

Case1 を用いた場合、送信・受信車両間距離が 100m (図 11(a)) では 3 手法間にほとんど差はないが、提案手法の方がランダム手法よりもより長くビーコンを連続して受信失敗する頻度がわずかに少ない。送信・受信車両間距離が 140m の場合 (図 11(b)) では、提案手法の方が固定送

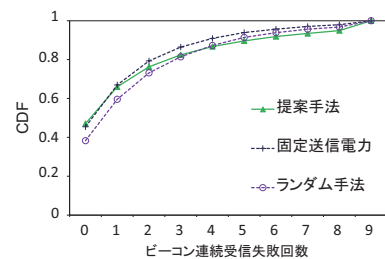


(a) ビーコン送信・受信車両間距離 100m

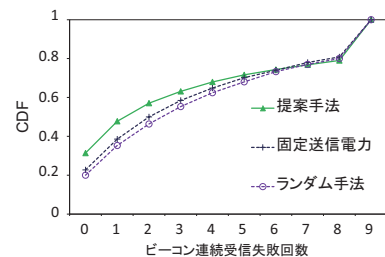


(b) ビーコン送信・受信車両間距離 140m

図 11 Case1 を用いた場合のビーコン連続受信失敗回数 (6 車線)



(a) ビーコン送信・受信車両間距離 100m



(b) ビーコン送信・受信車両間距離 140m

図 12 Case2 を用いた場合のビーコン連続受信失敗回数 (6 車線)

信電力やランダム手法よりもより長くビーコンを連続して受信失敗する頻度が少ない。

Case2 を用いた場合、送信・受信車両間距離が 100m (図 11(a)) では、提案手法の方が固定送信電力やランダム手法よりも、より長くビーコンを連続して受信失敗する頻度が多い。しかしながら、送信・受信車両間距離が 140m の場合 (図 11(b)) では、提案手法の方が固定送信電力やランダム手法よりも、より長くビーコンを連続して受信失敗する頻度が少ない。同様の傾向が Case 3 を用いた場合に見られた。

上述したように、提案手法は固定送信電力やランダム手法に比べ、特にビーコン送信・受信車両間距離が長い場合に、ビーコンの連続受信失敗回数の長さを短くすることが確認できた。一方で、ビーコン送信・受信車両間距離が短

い場合には提案手法は他の手法と同等の性能を示した。

この理由として、以下のようなことが考えられる。提案手法は固定送信電力と異なり、ビーコンを送るたびに送信電力を変更するため同一車両が連続して同じ送信電力を用いることが少なくなる。提案手法を用いることで、車両間の位置関係が変わらない場合に他車両から送信されるビーコンの SINR が受信側で常に変化するため、同一車両からの連続したビーコンの受信失敗を減らすことが出来たのではないかと考えられる。また、提案手法はランダム手法と異なり、与えられたパターンに基づいて送信電力を変更する。提案手法を用いることで、各車両は周期的に大きい送信電力で送る機会があるため、周期的に送信・受信車両間距離が長い車両からビーコンを受信できるが、ランダム手法はあくまでも確率的に送信電力が選ばれるので、大きい送信電力が長い間選ばれないこともある。そのため、提案手法の方が連続したビーコンの受信失敗を減らすことが出来たのではないかと考えられる。

5. 提案手法とランダム手法との組み合わせ

車両密度が低い場合に提案手法は、パターンの平均送信電力に等しい固定送信電力より受信率が低くなる特徴があった。そこで、車両密度に関係なく事故を回避するのに十分なビーコンを受信するために提案手法の改良を考える。

Kloiber らのランダム手法は送信電力のみをランダムに選択する。この戦略を提案手法におけるパターンのランダムな選択、あるいは、ランダムに選んだ送信電力からパターンを生成するなどの応用が可能である。

前者の手法では、送信電力パターンを複数個準備し、その中からランダムに選ばれたパターンに従ってビーコンを送信する。一定時間そのパターンを用いた後、パターンを変更する。その後各車両は、再びランダムに一つの送信電力パターンを選ぶ。このようにすることで、平均送信電力の異なる複数の送信電力パターンを用いて各車両がビーコンを送信するため、一つの送信電力パターンのみでビーコンを送信するよりも各車両が異なる送信電力を選択する確率が高くなり、ビーコン受信率の向上が期待される。

6. まとめ

本稿では、事故リスクの高い車両同士がビーコンを高頻度かつ正確に交換することに重点を置いて、一定周期で与えられた送信電力パターンに従ってビーコン送信電力を周期的に変更する手法について、送信電力変更周期の違いによる影響について評価を行った。また、提案手法を用いた場合と、予め決められた送信電力範囲の中からランダムにビーコン送信電力を決定する手法（ランダム手法）を用いた場合、パターンの平均送信電力と等しい固定送信電力を用いた場合と比較し、車両密度が低い場合に、ランダム手法より提案手法の方が高いビーコン受信率を達成できるこ

とを確認した。また、ビーコン送信・受信車両間距離が長い場合に、車両密度に関わらず固定送信電力やランダム手法より提案手法は連続してビーコン受信に失敗する頻度が少なくなることが確かめられた。さらに本稿では、提案手法を用いた場合のビーコンの受信を向上させるためランダム手法と提案手法を組み合わせた手法について検討した。

今後、事故リスクに基づいた理論的な送信電力パターンの決定方法を検討するほか、車両の移動ならびに様々な交通状況を考慮した評価を行う予定である。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金基盤研究 B（課題番号 23300024）および挑戦的萌芽研究（課題番号 24650027）の助成によるものである。

参考文献

- [1] ITS 情報通信システム推進会議: 5.8GHz を用いた車車間通信システムの実験用ガイドライン, ITS FORUM RC-005 (2007).
- [2] Torrent-Moreno, M., Santi, P., and Hartenstein, H.: Fair sharing of bandwidth in VANETs, in Proc. 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks (VANET'05), pp. 49–58 (2005).
- [3] Torrent-Moreno, M., Santi, P., and Hartenstein, H.: Distributed fair transmit power adjustment for vehicular ad hoc networks, in Proc. IEEE communications society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON'06), Vol.1, pp. 39–48 (2006).
- [4] Lu, H., and Poellabauer, C.: Balancing broadcast reliability and transmission range in VANETs, in Proc. of IEEE VNC, pp. 247–254 (2010).
- [5] Kloiber, B., Harri, J., and Strang, T.: Dice the TX Power - Improving Awareness Quality in VANETs by Random Transmit Power Selection, in Proc. IEEE VNC, pp. 56–63 (2012).
- [6] Huang, C. L., Fallah, Y. P., Sengupta, R., and Krishnan, H.: Adaptive intervehicle communication control for cooperative safety systems, in IEEE Network, vol. 24, issue. 1, pp. 6–13 (2010).
- [7] ETSI TS 102 687: Decentralized Congestion Control Mechanisms for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz range: Access layer part (2011).
- [8] Subramanian, S., Werner, M., Liu, S., Jose, J., Lupoaie, R., and Wu, X.: Congestion control for vehicular safety: synchronous and asynchronous MAC algorithms, in Proc. 9th ACM international workshop on Vehicular inter-networking, systems and applications (VANET'12), pp. 63–72 (2012).
- [9] 岡本圭右, 金原辰典, 石原進: 車々間通信における周期的なビーコン送信電力増減による車両位置情報通知の信頼性向上, 情報処理学会マルチメディア、分散、協調とモバイル DICMO2013 シンポジウム, pp.375–382 (2013).
- [10] Okamoto, K., and Ishihara, S.: Highly Reliable Data Distribution Scheme for Location Information in Vehicular Networks Using Cyclic Beacon Transmission Power Patterns, in proc. IEEE VNC, pp. 55–62 (2013).
- [11] Space-Time Engineering, <http://www.spacetime-eng.com> (2014 年 04 月 08 日確認)
- [12] Recommendation ITU-R P.1411-6: Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300MHz to 100GHz (2012).