

V2X 通信を利用した衝突警告アプリケーションにおける アプリ特性を考慮した自律分散的輻輳制御手法

平井 健士¹ 村瀬 勉¹

概要： V2X 通信を用いた衝突警告アプリケーション(CWA)において、通信ノード(人、車)が増加しすぎると、輻輳が発生し、CWA が要求するフレーム受信頻度を満たせないという問題があった。輻輳を緩和させる手法として、自律分散的輻輳制御手法(DCC)が提案されている。しかし、そのほとんどの提案方法が、すべてのノードにおいて一律に送信頻度を低下させてしまうため、受信頻度要求が満足できない恐れがある。そこで、本研究では、アプリの特性を考慮し、重要な情報を送信するノードの受信頻度要求だけを最低限満たすことを考え、ノードの送信情報の重要度に応じて、輻輳制御手法を適用するアイデアを提案する。具体的には、ノードに重要度を割り当て、その重要度の高いノードは積極送信を行い、重要度の低いノードは送信抑制を行うようにする。本提案手法を評価した結果、既存の DCC 方式と比較して 205%台数が多くても、また、DCC を利用しない方式と比較して 150%台数が多くても、重要度の高いノードにおける受信頻度要求を満たすことが可能であることを示し、提案方式の有効性を明らかにした。

Decentralized Congestion Control based on Characteristic of Crash Warning Applications in V2X Communications

Takeshi Hirai¹ Tutomu Murase¹

1. 背景

スマート社会の実現の一環として、ITS(Intelligent Transport Systems)の研究が活発に行われている[1]。スマート社会は、情報通信技術を用いた、より便利で安全安心な社会のことである。具体的には、交通やエネルギー利用、医療の分野での様々な課題を解決することが掲げられている。交通分野においては、安全安心やエネルギー利用の課題を解決する技術として、ITS の研究が注目されている。特に、自動運転やコネクテッドカーは、研究が活発に進められている。

ITS の1つとして、V2X(Vehicle-to-Everything)通信を用いて衝突事故を未然に防ぐ衝突警告アプリケーション(CWA: Crash Warning Applications)[2]の早期実用化が期待されている。このアプリケーションでは、自動車や歩行者が通信ノード(以下、単にノード)として機能し、一定周期でデータフレーム(以下、単にフレーム)を広告する。ノードは、V2X 通信方式の1つである DSRC(Dedicated Short Range Communications)[3][4]をブロードキャストモードにて使用し、周囲の全てのノードにフレームを同報する。DSRC は、IEEE802.11a と同様に CSMA/CA 方式を利用する IEEE802.11p[5][6]という MAC レイヤプロトコルを持つ通信方式である。送信されるフレームには、自身の状態情報(位置情報や速度情報など)が格納されており、各ノードは、

この情報の交換を通して、周囲のノードの存在状況を把握できる。各ノードは、他のノードが広告した情報をすべて受信し、自身の状態情報と合わせて考え、仮に衝突事故の危険性が高ければ、ユーザに警告を行う。

CWA は、衝突事故を高精度に検出するため、無線通信品質に関する2つの厳しい条件を要求している。1つ目は、時間的要求である。予想される衝突の2.5s~9.5s 前に衝突警告をしなければならない[7]。2つ目は、受信頻度要求である。高精度な衝突警告のために、十分な情報を受信しなければならない。十分な情報を得るためには、1秒間に10フレーム以上受信しなければならないと言われている[8]。すなわち、衝突が予想されるノード(衝突ノードと呼ぶ)の情報を1秒間に10フレーム以上受信する必要がある。

ノード数が増加すると、輻輳の影響で、収容台数(CWA 要求条件を満たす最大のノード数)は低下させざるを得ない[9]が、CWA の普及を考えると、収容台数を増加させる必要がある。CSMA/CA の特性として、ノード数が過剰になると、無線通信帯域に輻輳が生じるため、負荷に対して、受信できるフレーム数が低下してしまう。これにより、CWA の受信頻度要求を満たすことができなくなり、収容台数、すなわち、CWA の高精度な衝突警告が可能なノード数は、低下させざるを得ないということになる。将来的に CWA が普及し、多数の自動車や歩行者が通信機能を備えると、

¹ 名古屋大学
Nagoya University

ノード数が増加することは必然であり、収容台数の増加を研究すべきである。

輻輳を緩和するために、送信パラメータ(送信頻度や送信電力など)を制御し、周波数利用効率を向上させる手法として DCC(Decentralized Congestion Control)手法[10] - [21]が提案されているが、既存方式では、衝突ノードの受信頻度要求を満たすことができていない。なぜならば、既存の DCC 手法は、衝突ノードであっても送信パラメータを抑制するように制御している、もしくは、衝突ノードでないノードの送信パラメータを抑制せずに輻輳が十分に低減されていないためである。

本研究では、衝突ノードのような貴重な情報を送信するノードの送信を支援する DCC を提案する。具体的には、ノードが置かれている状況により、自身の発信する情報の重要度を推測し、その重要度に応じて輻輳低減への貢献度に差を設ける。すなわち、重要な情報を送信するノードは積極送信を行い、逆に重要な情報を送信していないノードは送信抑制を実施する。これによって、重要な情報を送信するノードの送信を抑制せずに、全体の輻輳を大きく低下させることが可能であるため、結果として、重要な情報を送信するノードの受信頻度要求を満たし、収容台数の増加が期待できる。

2. DCC 手法と既存 DCC 方式

既存の DCC 手法は、輻輳を低減するために、各ノードが送信を抑制する手法である。既存の DCC 手法は、リアクティブ型とプロアクティブ型に分けられるが、これらの手法は、衝突ノードのような重要な情報を送信するノードの送信を抑制するもしくは、輻輳低減度合いが小さいため、その情報を受信するノードの受信頻度要求を満たせないという課題がある。

2.1 DCC 手法の特徴

DCC 手法は、周波数利用効率の向上のため、送信パラメータを変動することによって、送信抑制を行い、輻輳並びに干渉を低減する手法である[10]。ETSI により、5 つのパラメータ制御を行うと定めている(Table I)。

1) 送信頻度制御(TRC: Transmit Rate Control): 送信頻度の低減により、トラヒック量を削減し、輻輳を緩和する。

2) 送信電力制御(TPC: Transmit Power Control): 送信電力を低減することで、干渉電力を抑える。

3) キャリアセンス閾値制御(DSC: DCC Sensitivity Control): キャリアセンス閾値を高くすることで、送信を抑制し、輻輳を低減する。

4) データレート制御(TDC: Transmit Datarate Control): 高いデータレートの変調方式を用いることで、帯域を増加させ、輻輳を低減する。

5) 送信公平性制御(TAC: Transmit Access Control): 高優先度のメッセージの大量送信を抑制することで輻輳を低減

する。DSRC では、定期的送信フレーム(CWA フレームなど)と非定期的送信フレーム(交通事故が起きたことや渋滞を知らせるフレーム)が用意されており、それぞれに EDCA 方式(IEEE802.11e)における 4 つの優先度がつけられている。

一方で、送信抑制により、受信頻度が低下する恐れもある。TRC、DSC、TAC の制御によって、送信頻度が低下する。それによって、受信頻度が低下する。また、TPC は送信電力の低下に伴い、受信電力も低下する。その結果、SINR(Signal-to-Interference Noise Ratio)が低下し、受信頻度もまた低下する。TDC による高データレートでの送信は、SINR の耐性を低下させる。すなわち、SINR が低下してしまう遠距離のノードとの通信において、特に大きな受信頻度低下が発生する。

Table I DCC の送信制御パラメータ

パラメータ	輻輳低減制御方法	欠点
TRC	送信頻度低減	送信数低下
TPC	送信電力低減	受信電力低下
DSC	センス閾値増加	送信数低下
TDC	高変調方式利用	必要 SINR 増加
TAC	優先度の公平性維持	送信数低下

2.2 リアクティブ型 DCC とプロアクティブ型 DCC とそれらの課題

既存の DCC 手法は、リアクティブ型 DCC とプロアクティブ型 DCC に分けられる。リアクティブ型 DCC は、無線帯域が輻輳したことを検知した後に、送信パラメータを変動する手法である。TRC 型[10] - [12]、TPC 型[10] [13] - [15]、DSC 型[10] [16]、TDC 型[17] [18]、TAC 型[19]がそれぞれ提案されている。プロアクティブ型 DCC は、輻輳を起こさないようにあらかじめ送信パラメータを制御する手法である。プロアクティブ型 DCC として、3 つの TRC 型手法が提案されている。1 つ目は、PR 方式である[20]。この方式は、近接しているノードが送信したフレームに相乗りすることで送信頻度を低減する。2 つ目は、移動距離に基づいた送信頻度制御方式である[21]。この方式では、時間周期での送信ではなく、一定の移動距離ごとに情報送信をするという新たな基準を提案することで、トラヒック量を削減している。3 つ目は、衝突猶予に基づく送信頻度制御方式である[21]。この方式では、最も受信頻度が低下する最遠に存在する衝突ノードに合わせて送信頻度を設定すればよいことを提案している。これにより、送信頻度が低くても受信頻度を満たせる場合、送信頻度を抑えられる。

既存の DCC 手法は、衝突ノードのような重要な情報を送信するノードの受信頻度要求を満たすことができず、収容台数を増加させることができない。リアクティブ型 DCC、PR 方式、移動量に基づく送信頻度制御方式では、Fig. 1 (A) のように、重要な情報を送信しないノードだけでなく、重

重要な情報を送信するノードであっても送信抑制を行ってしまうため、このノードの送信情報を受信すべきノードの受信頻度が低下してしまい、受信頻度要求が満たされない。また、衝突猶予に基づく送信頻度制御方式では、Fig. 1 (B)のように、重要な情報を送信しないノードの送信頻度を低減しておらず、輻輳・干渉低減手法として不十分であるため、重要な情報を送信するノードの送信情報を受信すべきノードの受信頻度要求を満たせない。したがって、既存のDCCは、重要な情報を得たいノードの受信頻度要求を満たすことを考えていないため、これを可能にする新たなDCC方式が必要である。

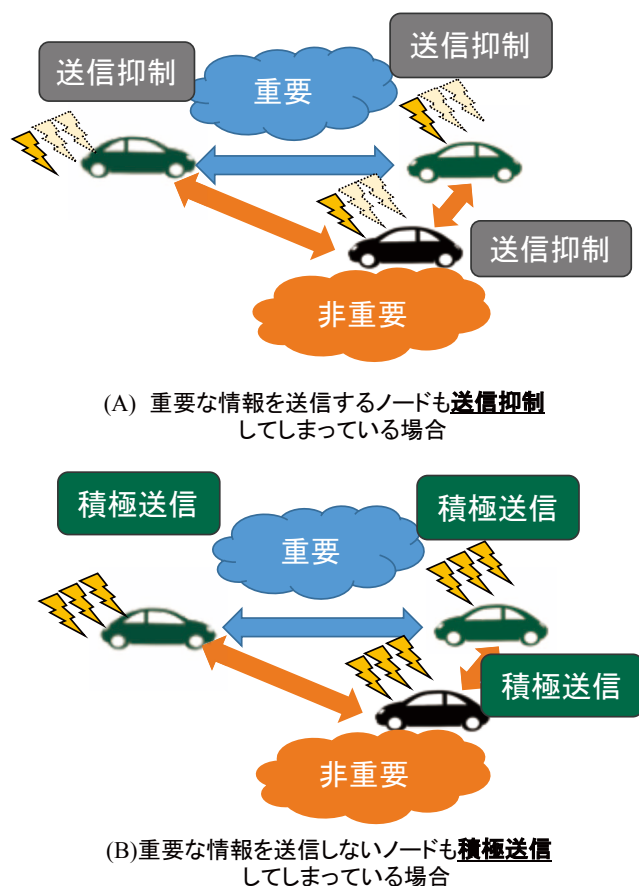


Fig. 1 既存のDCC方式の課題

3. 重要度を考慮したDCC

提案方式は、重要な情報を送信するノードには、積極送信を促し、重要な情報を送信しないノードには、送信を抑制する。そのために、重要度DI(Degree of Importance)を規定し、それに合わせて、送信パラメータ(基本送信パラメータと許容誤差範囲ET(Error Tolerance))を変動させる。これにより、重要な情報を送信するノードの受信頻度要求を満たすことが可能になる。

3.1 提案方式のアイデア

受信頻度要求を満たすべきノードである重要な情報を送信するノードの受信頻度要求を満たせるようにするためには、重要な情報を送信するノードの送信は抑制せずに、

つまり、積極的に送信したまま、重要な情報を送信しないノードの送信は抑制すればよい。これによって、重要な情報を送信するノードの送信頻度を保ちつつ、全体の輻輳を抑えることができるため、ノードが多くても受信頻度要求を満たすことができる。

これを行うために、自身の送信する情報の重要度に応じて、積極送信を実施するか送信抑制を実施するか決定する(Fig. 2)。すなわち、重要度が高い情報を送信するノードは、積極的に情報送信を行い、逆に、重要度が低い情報を送信するノードは、情報送信を抑制する。重要な情報を送信するノードとは、衝突ノードや優先度が高いノード(緊急車など)が挙げられる。例えば、衝突ノードは、衝突回避を行うため、対応する衝突ノードに対して高精度かつ高頻度に情報を伝達する必要がある。すなわち、対応する衝突ノードの受信頻度要求を満たせるように、積極的な情報送信を行う必要がある。非衝突ノードは、将来の衝突ノードの探索のため、情報に適度な誤差があってもよいが、多くのノードに関する情報を得る必要がある。すなわち、周辺のノードにも、たくさんのノードの適度に解像度が粗い情報を受信できるように、自身の情報送信を抑制するべきである。

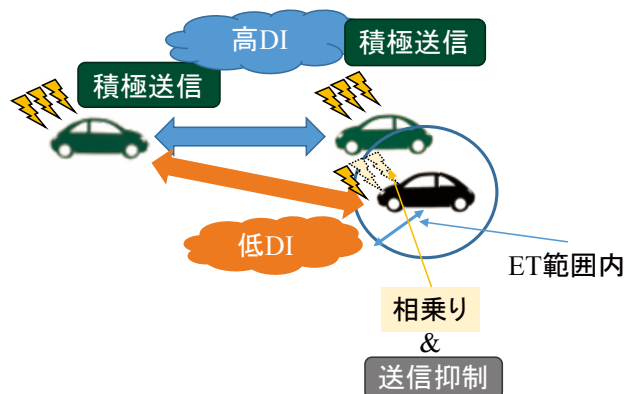


Fig. 2 提案方式の概念図

重要度の決定には、衝突の危険性や優先度などさまざまな決定要因を盛り込むべきである。本稿では、最も有力な要因である衝突の危険性でのみ定義した場合について説明する。衝突の危険性としては、3つの条件が考えられる。1つ目は、警告の必要性である。例えば、衝突の確率が高いほど、重要な情報を送信していることになる。また、警告時間が迫っているほど、警告の必要性が高まる。2つ目は、受信頻度要求の满足の難しさである。例えば、衝突しそうなノードが遠距離に存在すれば、受信頻度要求を満たすことが難しいため、積極送信の必要性が高まる。これは、[21]を効果的に導入するためのものである。ただし、このとき、警告時間が迫っているかどうか加味しなければならない。3つ目は、将来の衝突ノードの探索の必要性である。自身の速度が高速であれば、衝突ノード候補に遭遇する可能性が大きいので、重要な情報を出していると言える。

提案方式では、既存のDCCを総合的に活用して、積極送

信と送信抑制を実施する。積極送信に利用する手法としては、送信パラメータを高めることを行う。例えば、[21]の衝突猶予に基づいた送信頻度制御方式によって、受信頻度要求を満たせる最低限の送信頻度に増加させる。また、送信抑制に利用する手法として、送信パラメータを下げることに加えて、PR方式[20]による送信の相乗りを行う。例えば、送信頻度を下げたり、相乗りによる送信頻度低下させたりする。

提案方式は、リアクティブ型としてもプロアクティブ型としても利用可能である。リアクティブ型として利用する場合、既存のリアクティブ型 DCC 手法と同様にネットワークをモニタリングする機構を導入し、輻輳を検知したときに、DI に基づいて送信パラメータを制御すればよい。また、プロアクティブ型として利用する場合、常に、DI に応じた送信パラメータ制御すればよい。

3.2 提案方式の具体的な動作

提案方式では、重要度を連続値の割合 DI で表現し、DI に合わせて基本送信パラメータと許容誤差範囲 ET を操作する。基本送信パラメータは、前述した ETSI が規定している 5 つのパラメータである。例えば、基本送信パラメータの 1 つの送信頻度は DI が高いほど、増加させるべきである。また、ET は、送信情報の相乗り[20]に利用する。ET を利用して、自身のノードの情報をどのくらいの解像度を下げて送信してよいかを決定する。あるノード A が状態情報を送信したとき、その情報が、自身の状態情報と ET 以内の誤差ならば、ノード A の送信情報に相乗りし、自身は送信しない。DI が低いほど、解像度に低い情報を送信してよいことから、ET は DI に応じて小さくなるように決める。これにより、DI が低い情報を送信するノードにおける輻輳低減効果を増加させる。

3.3 提案方式の特徴

提案方式は、既存の DCC 方式と比較して、DI の高いノードの受信頻度を大きく増加可能であり、収容台数増加の効果が大きい。既存の DCC 方式よりも、DI の高いノードの受信頻度要求を重点的に満たすためである。

ただし、Fig. 3 のように、DI の高いノードが増加すると、輻輳低減効果が低下する。すなわち、収容台数の増加量が低下する。これは、DI の高いノードが積極送信に適した送信パラメータを用いるため、輻輳を引き起こすからである。例えば、DI の高いノードは、高送信頻度で送信するため、送信トラヒックが多くなり、DCC を利用しない方式(non-DCC 方式)と同等のトラヒック量になってしまうため、収容台数の増加が見込めなくなる。

さらに、低 DI ノードが、情報送信を大きく抑制してしまうと、周囲のノードが低 DI ノードの情報を全く受信できず、自身が高 DI になっていることを検知できずに、情報を受信しなければならないにも関わらず、受信頻度要求を満たせない可能性がある。将来的に高 DI になる可能性があ

るため、低 DI ノードであっても、周辺のノードの情報をある程度の受信頻度にて受信する必要がある(最低 1 フレーム)。すなわち、低 DI ノードであっても、ある程度の情報送信をしなければならない。

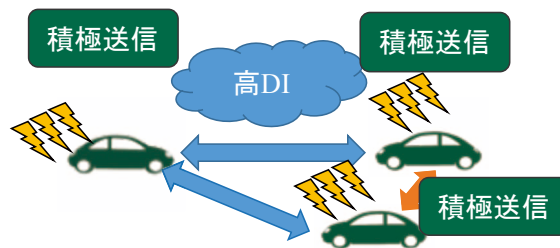


Fig. 3 提案方式における輻輳低減効果減少の例

4. 評価モデル

4.1 評価目的と評価方法

提案方式の有効性を示すため、既存の DCC 方式との比較と non-DCC 方式との収容台数の比較を行う。既存の DCC 方式は、ETSI が提案している DCC[10]からモデル化した方式を用いる。すなわち、全ノードが、ネットワークの輻輳度合い(すなわち、ノード数)にしたがって、送信パラメータを動的に変動する方式である。また、non-DCC 方式は、すべてのノードが常に同一の送信パラメータを使用して、フレーム送信を実施する方式である。

さらに、提案方式の有効性を評価するため、提案方式が最も影響を受ける DI の大きさに注目して、評価を行う。具体的には、ノード数比率(DI の高いノードの台数 / 全ノード)を変動させて評価を行う。既存の DCC 方式と non-DCC 方式は、DI によって、送信パラメータが変動するわけでないため、ノード数比率に影響を受けない。また、収容台数を調査するとともに、低 DI ノードの受信頻度が 1 を超えていることも調査する。

4.2 ノードのモデル

評価する衝突のシナリオは、2 台の 60km/h で移動するノードが正面衝突するシナリオを想定する。2 台のノードの衝突シナリオを仮定する理由は、最も基本的なシナリオで評価するためである。また、衝突の速度を 60km/h にする理由は、収容台数がシステム内の最も高速な衝突ノードに依存する[9]ことを踏まえ、日本の市街地の法定速度の最大値で移動していることを想定したためである。正面衝突のシナリオは、2 台のノードの速度が同一の場合に、相対速度が最も高速になるシナリオである。すなわち、CWA の時間要求における距離が最も遠いシナリオと言える。遠距離通信は最も受信頻度が低下するため、このシナリオにて受信頻度要求を満たせるならば、他のシナリオでも受信頻度要求を満たせる。

さらに、評価する 2 台の周辺に、ノードをランダムに配置する。これらのノードは、すべてのノードと CSMA/CA による送信権の取り合いを行う。また、評価する 2 台のノ

ードに対する SINR における干渉信号となる。この周囲に配置するノードは、高 DI ノードと低 DI ノードの 2 種類とする。高 DI ノードは、評価するノードと同様に 60km/h で走行し、衝突危険性が高いノードとする。低 DI ノードも同様に 60km/h で移動するが、衝突危険性は低いとする。

低 DI ノードの受信頻度調査の際には、高 DI になる直前に受信頻度が 1 を超えていることを想定する。そのために、最低限の衝突警告時間要求(予想される衝突の 2.5s~3.5s 前の期間)の 1 秒前の 3.5s~4.5s 前の期間における、正面衝突しそうなノードとの受信頻度を確認する。こちらも、正面衝突の受信頻度を調査する理由は、前述と同様である。

4.3 通信パラメータ

DSRC の評価においてよく利用される通信パラメータを利用する。フレームサイズは、ヘッダを 32 bytes、ペイロードを 250 bytes とする[11]。これは、衝突警告に一般的に用いられるフレームを想定している。また、DSRC の周波数帯域幅は 10 MHz を利用し、その伝送速度は、DSRC のブロードキャストモードで用いられる 3 Mbps を使用する。

4.4 各方式の送信頻度

本研究では、送信パラメータのうちの送信頻度だけを操作し、送信頻度の影響だけを評価する。すなわち、他の基本送信パラメータや ET によって得られる輻輳低減効果は評価しない。これに伴い、既存の DCC 方式も送信頻度だけを操作するものとする。

提案方式では、高い DI を持つノードの送信頻度を 15 に設定し[22]、低い DI を持つノードの送信頻度を 5 に設定する。また、既存の DCC 方式は、ネットワークの状況により送信頻度を変更する。具体的には、チャネルビジー割合をトラフィック量と帯域の比で表現し、これが 1、つまり、トラフィック量と帯域の比が等しくなるように、送信頻度を設定する。non-DCC 方式は、すべてのノードが受信頻度要求を満たせる送信頻度に合わせると仮定する。すなわち、すべてのノードの送信頻度を 15 とする。

5. 収容台数の評価結果

Fig. 4 は、既存の DCC 方式との収容台数を比較したグラフである。横軸は、ノード数比率を示しており、縦軸は収容台数を示している。提案方式は、既存の DCC 方式と比較すると、ノード数比率が 0.1 のとき、収容台数が 205%増加したことが確認できた。また、ノード数比率が 0.6 のとき、提案方式の収容台数は、既存の DCC 方式と比較して、61%も増加した。

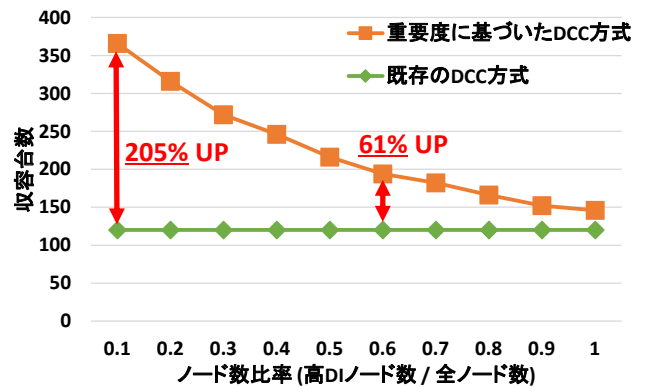


Fig. 4 提案方式と既存の DCC 方式の収容台数比較

Fig. 5 は、non-DCC 方式との収容台数の比率を表したグラフである。横軸は、Fig. 4 と同様で、ノード数比率を示しており、縦軸は収容台数を示している。提案方式は、ノード数比率が比較的低いときは、non-DCC 方式と比較すると、収容台数が 150%増加することを確認した。また、ノード数比率が比較的高い 0.6 のとき、提案手法の収容台数は、non-DCC 方式と比較して、33%増加していることが分かった。

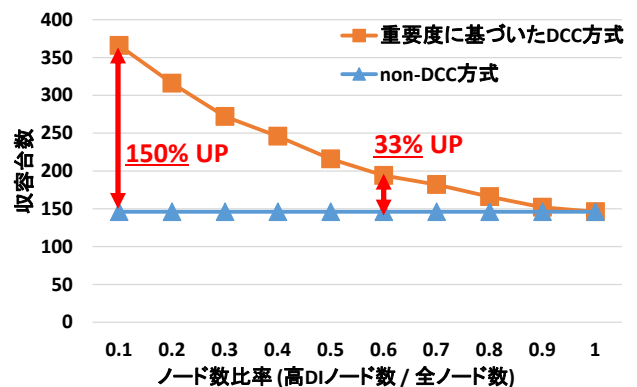


Fig. 5 提案方式と non-DCC 方式の収容台数比較

Fig. 6 は、それぞれのノード数比率での収容台数における、予想される衝突の 3.5s~4.5s 前の低 DI ノードの受信頻度を示している。横軸はノード数比率であり、縦軸は受信頻度、すなわち、受信フレーム数である。提案方式の低 DI ノードの受信頻度は、すべてのノード数比率において 1 を超えており、高 DI に変動することが可能であることが示された。ただし、提案方式の低 DI ノードの受信頻度は、non-DCC 方式と比較すると、66%低下しており、既存の DCC 方式と比較すると、74%低下していることが分かった。

以上の評価より、提案方式は、低 DI から高 DI への変動が可能であり、かつ、高 DI の場合に、他の方式と比較して、よりノードが多くても受信頻度要求を満たす、つまり、収容台数を増加させることが可能であることを明らかにした。

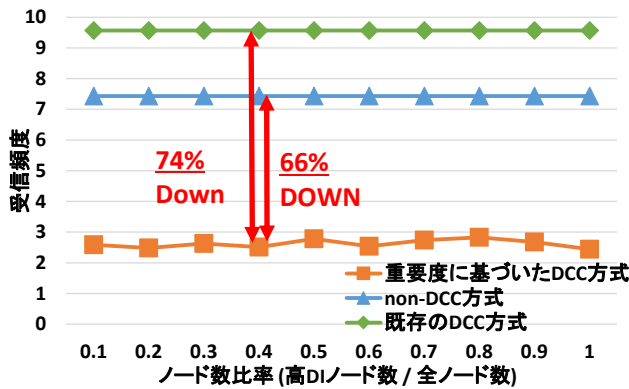


Fig. 6 各方式における低 DI ノードの警告期間直前の受信頻度

6. 結論

V2X 通信を利用した衝突警告アプリケーションにおいて、各ノードが自身の送信情報の重要度を考慮して送信パラメータを変動させる新たな DCC を提案し、評価によって収容台数が増加することを示した。提案方式は、各ノードの情報が周囲に必要とされている度合いに応じて適応的に送信リソースを割り当てるべきであるというアイデアのもと、輻輳制御を行う手法である。これにより、既存の DCC において満たせていなかった、受信頻度要求を満たすべきノード、例えば、衝突危険性が高いノードの受信頻度要求を満たすことができ、収容台数の増加が期待できる。提案方式を評価した結果、既存の DCC 方式と比較して、収容台数が 205%増加することを確認した。また、DCC を利用しない方式と比較して、収容台数が 150%も増加することが分かった。本評価を通して、提案手法が収容台数の増加に非常に効果的であることを明らかにした。

謝辞

本研究は、Alpine Electronics Research of America, Inc. の大西洋文氏の助言をいただいた。本研究の一部は、科研費 (15H02688) (15H01684) (16H02817) の助成を受けて実施した。

参考文献

- [1] Z. Xiong, H. Sheng, W. Rong, and D. E. Cooper, "Intelligent transportation systems for smart cities: a progress review," *Science. China Information Science*, vol. 55, no. 12, pp. 2908 – 2914, 2012.
- [2] T. ElBatt et al., "Cooperative collision warning using dedicated short range wireless communications," *ACM VANET 2006*, 2006.
- [3] J. B. Kenney, "Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States," *IEEE*, vol. 99, no. 7, 2011.
- [4] D. Jiang et al., "Design of 5.9GHz DSRC-based Vehicular Safety Communication," *IEEE Wireless Communications*, vol. 13, no. 5, 2006.
- [5] D. Jiang and L. Delgrossi, "IEEE 802.11p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments," *IEEE VTC 2008*, 2008.
- [6] T. V. Nguyen et al., "A performance analysis of CSMA based broadcast protocol in VANETs," *IEEE INFOCOM*, 2013.
- [7] D. Bezzina, "Light Vehicle Platform Update," *IVBSS 2008 Public*,

- Meeting, 2008.
- [8] "U.S. Department of Transportation Decision to Move Forward with Vehicle-to-Vehicle Communication Technology for Light Vehicle," <<http://www.nhtsa.gov/About+NHTSA/Press+Releases/2014/USDOT+to+Move+Forward+with+Vehicle-to-Vehicle+Communication+Technology+for+Light+Vehicles>>.
- [9] T. Hirai et al., "Node-Clustering in Vehicle-to-Pedestrian Communications for Crash Warning Applications," *ITS World Congress 2016*, 2016.
- [10] A. Autolitano, C. Campolo, A. Molinaro, R. M. Scopigno, and A. Vesco, "An insight into Decentralized Congestion Control techniques for VANETs from ETSI TS 102 687 V1.1.1," *IFIP Wireless Days*, 2013.
- [11] T. Tielert, D. Jiang, Q. Chen, L. Delgrossi, and H. Hartenstein, "Design methodology and evaluation of rate adaptation based congestion control for Vehicle Safety," *2011 IEEE Vehicular Networking Conference*, pp. 116–123, 2011.
- [12] G. Bansal, J.B. Kenney, and C.E. Rohrs, "LIMERIC: A Linear Adaptive Message Rate Algorithm for DSRC Congestion Control," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 9, pp. 4182 – 4197, 2013.
- [13] M. Torrent-Moreno, J. Mittag, P. Santi, and H. Hartenstein, "Vehicle-to-Vehicle Communication: Fair Transmit Power Control for Safety-Critical Information," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 7, pp. 3684 – 3703, 2009.
- [14] J. Mittag, F. Schmidt-Eisenlohr, K. Moritz, J. Härrä, and H. Hartenstein, "Analysis and Design of Effective and Low-overhead Transmission Power Control for VANETs," *ACM VANET 2008*, pp. 39 – 48, 2008.
- [15] G. Caizzzone, P. Giacomazzi, L. Musumeci, and G. Verticale., "A power control algorithm with high channel availability for vehicular ad hoc networks," *2005 IEEE International Conference on Communications*, vol. 5, pp. 3171 – 3176, 2005.
- [16] R. K. Schmidt, T. Leinmuller, G. Schafer, "Adapting the Wireless Carrier Sensing for VANETs," *International Workshop on Intelligent Transportation (WIT) 2010*, 2010.
- [17] D. Jiang, Q. Chen, and L. Delgrossi, "Optimal data rate selection for vehicle safety communications," *ACM VANET 2008*, pp. 30 – 38, 2008.
- [18] S. Yang, H. Kim, and S. Kuk, "Less is more: need to simplify ETSI distributed congestion control algorithm," *Electronics Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 279 – 281, 2014.
- [19] S. Bai, J. Oh, and J. Il Jung, "Context awareness beacon scheduling scheme for congestion control in vehicle to vehicle safety communication," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 7, pp. 2049 – 2058, 2013.
- [20] 伊藤速, 村瀬勉, 笹島和幸, "近隣端末の衝突警告相乗りにより省電力と輻輳低減を実現する歩車間通信方法," *電子情報通信学会 IN 研究会技術研究報告*, vol. 115, no. 484, IN2015 – 130, pp. 131 – 134, 2016.
- [21] 伊藤速, 村瀬勉, 笹島和幸, "低消費電力で衝突警告を実現するための歩車間通信に関する研究 ～ コンテキストに応じた送信頻度変更制御 ～," *電子情報通信学会 IN 研究会 技術研究報告*, vol. 116, no. 485, IN2016 – 133, pp. 217 – 222, 2017.
- [22] T. Hirai, T. Murase, "Effect of Estimation Error in Node-Clustering with V2X Communications for Crash Warning Applications," *IEEE ICCE-TW 2018*, 2018.