

アドホック・センサネットワークにおけるタイミング同期の安定化、セキュリティ向上に関する研究

田 中 久 陽 電気通信大学電気通信学部准教授

本研究調査は実環境におけるアドホック・センサネットワークでの運用を想定した実用に耐えるタイミング同期手法の構築を目指すものである。そのために、まず従来のタイミング同期手法の問題点を明確にし、その原因究明と原理的な解決方法を検討した。最終的に、移動端末を含むアドホックネットワークの新しいタイミング同期アルゴリズムが構築され、さらに省電力型のセンサネットワーク向けタイミング同期手法を考察し Mica を用いた実機検証を行なった。

本研究の成果は相互に関連する三つの項目からなっており、それぞれ以下の(i), (ii), (iii)の通りである。

(i) 現在のアドホック・センサネットワークにおけるタイミング同期方式における障害・問題点の解明と解消方法の検討：

従来のフィールド実験から、現在のアドホックネットワークにおけるタイミング同期方式には幾つかの障害が生じていることが判明している。この問題は特に、MAC 層の問題に起因することが大きい。すなわち、ネットワークが大規模かつマルチホップであるために、当初シングルホップのネットワークを想定して提案された MAC 層のタイミング同期方式に障害が生じているのである。本研究ではこれらの障害を検出し、その原因究明と原理的な解決方法を検討した。具体的な成果として、(a)複数の IBSS からなるアドホックネットワークにおいて、当初独立していた IBSS 同士が融合することによるタイミング同期の障害の解明、(b)その結果を利用し、この同期障害を回避するアルゴリズムの構築、及びその特許出願（この特許出願は PCT 出願され、現在米国特許を出願準備中である。）、(c)さらに、ネットワーク内にデータ通信が行われている現実的な状態での上記(a)の同期障害の解析が行われており、いずれも研究会等で発表されている。

(ii) より長寿命なセンサネットワーク向けタイミング同期方式の検討：

前年度の研究成果により、センサネットワークにおいてもネットワークの動的変化に素早く追従可能なタイミング同期方式がある程度構築されてきた、これを出発点とし、FTSP (Flooding Timing Synchronization Protocol) として知られている同期方式をベースに、より長いネットワークの寿命を実現するために、新しい同期方式を従来と異なる水晶発振器を用いて構成した。これを MicaZ に実装することにより、その動作検証ならびに性能評価を行ったところ良好な結果が得られている。この成果に関し、数件の学会発表を行ない、現在論文の出版を計画している。

(iii) GPS 等の信頼できる時刻情報を利用するセキュアなタイミング同期方式の検討：

最近米国ではセンサネットワークにおける内部の故障や意図的な攻撃に対するセキュリティーを保証する同期手法の検討が盛んに進められているが、このセキュリティー保証同期方式は、セキュリティーを保証する認証のためのオーバーヘッドが大きく、センサネットワークとしては負荷が多大であると考えられる。これに対し、本研究は、この複雑なセキュリティー保証方式とは逆の簡単かつ有効な同期手法を検討した。特に車車間通信において必要となるタイミング同期に注目し、GPS を利用した新しいハイブリッド型のタイミング同期アルゴリズムを構築した。このアルゴリズムによれば従来手法に比べよりセキュアに同期が得られ、上記の障害も解消されることが判明し、この提案アルゴリズムを特許出願した。この成果は既に国際学会等で発表され、論文発表を予定している。

以上の通り、上記3項目についてそれぞれ研究成果が得られたが、ここでは紙面の制限により、項目(iii)に関する車車間通信を想定したアドホックネットワークのタイミング同期手法の構築についてその結果の詳細を記載する。

1. 車車間通信のためのアドホックネットワークのタイミング同期手法の現状と問題点

車車間通信は、車両間でデータのやりとりを可能とし、交通の安全化・効率化により ITS（高度道路交通システム）の実現に貢献するものと期待されている[1]。車車間通信におけるデータ通信において、特定の基地局が利用できず車両間の自律分散的通信が必要となる局面が生じる。このアドホックネットワークにおいて有効に通信を行うための一つの通信方式として、自律分散型 TDMA（時分割多元接続方式）が検討されてきている[3][4]。ところが、この自律分散型 TDMA においては通信に関わる全車両のローカル時刻（タイミング）が揃っていること、すなわち同期が維持されていることが前提となる。この同期が維持されないと、自律分散型 TDMA においては、パケット衝突により通信が成立せず、その結果 ITS の目的に合わないことになる。したがって、車両間の同期は速やかに達成され、また、一度得た同期を維持することが要求される。

このような状況で重要と考えられる問題は、あらかじめ各々別のタイミングで同期していた複数の車群が接近していく場合の取り扱いである。この場合、車群同士が速やかかつ円滑に互いにタイミングを融合させ、一つの車群に融合することが必要となる。ところが上記の自律分散型 TDMA を行うために、各車両はその車群内部で既に得られている同期を保持する必要がある一方で、自車群とほかの車群間とのタイミング差を解消するために、車両によっては大きなタイミングシフトを行う必要も生じる。この車群融合というシチュエーションは現実の交通において頻繁に起こるものであるので、上記の二律背反する問題を解決し車群間のタイミング同期を円滑に行うための工夫が必要となる。

最近、今井、鈴木により提案されたタイミング同期アルゴリズム[2]は、この二律背反する問題を解決することを意図している。しかしながら、今井、鈴木のアプローチはその構成から二車群で比較的自明な場合には、直観的に有効と期待されるが、本稿で扱う現実に生じ得る自明でない場合や、三車群以上の場合での有効性の解析ならびに性能評価は明らかにされていない。以上を踏まえ、以下ではまず、(i) この同期アルゴリズムにより二車群以上の複数の車群が互いに同期するプロセスを明らかにし、(ii) 系統的なシミュレーションおよび解析によりこの同期アルゴリズムの有効性の限界を明らかにし、さらに解決すべき問題点を明確にする。

2. 車群融合時におけるタイミング同期の概要と関連研究

今井、鈴木のアプローチは、以下の自律分散アルゴリズムをその骨子としている。(i) 各車両はそのローカルタイミングを管理し、一定周期でその予定通信タイミングを通知する。(ii) 各車両は周期的に自身の予定通信タイミングと周辺車両からの予定通信タイミングの差を全て加算し、平均値を算出する。(iii) 各車両は、この平均値を小さくするように、周期的に自身の予定通信タイミングを逐次シフトさせていく。

従来研究として知られている Sourour, 中川による車車間通信のタイミング同期手法[3]は、以上のアルゴリズムのタイミング差の平均による通信タイミングの逐次修正という部分では共通しているが、以下の点において明らかに異なっている。

(a) 用いる周波数帯が異なること。今井、鈴木のアプローチは 700MHz あるいは 5.9GHz 帯を想定しているが、Sourour, 中川は 60GHz 帯を想定している。前者はタイミング同期とデータ通信を同一の周波数で行うが、後者はそれぞれを別の周波数帯で行うことを想定している。

(b) 今井、鈴木のアプローチは TDMA をベースとしているため、タイミング同期についても同期ビーコンの衝突は緩和される。一方、Sourour, 中川のアプローチは各車両ごとに所定のタイミングで同期ビーコンの送受信を行うものなので、車両間の同期が成立すると、同時に同期ビーコンの送信が行われ、同期ビーコンは受信されず、その結果同期状態が維持される。

(c) 今井、鈴木のアプローチは、同期ビーコンのタイミングのみを用いるが、Sourour, 中川のアプローチは同期ビーコンとしてパルス状波形を想定し、そのタイミングのみならず強度の効果も考慮に入れている。

今井、鈴木のアプローチを評価する一つの基本的な状況設定は[2], [5]で検討されているケースであるだろう。これは、2次元のメッシュ状の道路網においてランダムな初期タイミングをもつ車両群を想定するものである。ところが、もう一つの実用上重要な状況設定が考えられる。これは、[3]において既に指摘されているように複数の車群が図1の通り見通し上にあり、互いに徐々に接近していくケースである。この場合、各車群ではすでに同期が完了していると考えるのが自然であり、問題となるのは車群が互いに通信可能な距離にまで接近した場合である。

例えば、図1に示す2つの車群が融合する場合を考えよう。

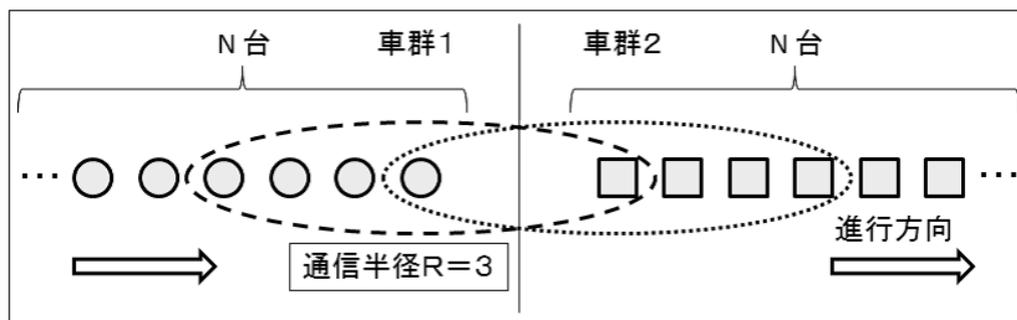


図1 2つの車群融合時の車両配置例

図1において、それぞれN台の車両からなる2つの車群は見通し上にあり、図の左側の車群を1、右側の車群を2とする。いま車群1、2は当初、別々のローカルタイミングでおおの同期しているものとする。そこで、先行していた車群2に車群1が近づき、車群1の先頭車両の通信範囲内に車群2の車両が入った時点を考える。すなわち、それぞれの車群の末端車両だけが、他方の車群の（末端車両の）タイミング情報を得られる状況である。

まず、車群1の先頭車両に注目する。この車両は、その予定通信タイミングを車群2の（最後尾車両の）予定通信タイミングに近づけようとする。ここで車両の通信範囲が広く、そこに含まれる車両台数が少ない場合、次のような問題が生じることが予想される。まず、車群1の先頭車両は、車群2の最後尾車両のみならず、車群1内の多くの車両からのローカルタイミング情報を受けとる。この車両は上記のアルゴリズムにより、大多数の車群1内の車両のタイミングに影響され、現状の通信予定タイミングを大幅に更新することが出来なくなる。したがって2つの車群の異なるローカルタイミングを円滑に同期させることが困難となる。

ここでは二車群間における車群融合の例を取り上げたが、三車群以上の複数車群の場合においても同様の問題、あるいは、さらに複雑な状況が生じるが、これについては3章で述べる。

以上の問題に対応するために、今井、鈴木が新規に追加した「車群対策」同期アルゴリズムは次のアイデアによるものである。すなわち、各車両は自身が現在、車群融合に関わっている可能性があるかと判断した場合、(i)受信した予定通信タイミング情報の中から自身のタイミングから最も離れたタイミングのみを選択し、(ii)このタイミングに対し、一度に行うタイミング修正量を、ある閾値を上限として、より大きく設定する。これはすなわち、車群融合を促進するために、自車群車両からの影響を無視したより大きなタイミング修正を行うものである。

3. タイミング同期過程の解析と同期性能評価

3.1 概要

本章では、系統的なシミュレーションにより、今井、鈴木のタイミング同期手法に対し、タイミング同期過程の解析と同期性能評価を行う。

シミュレーションは図2の(a)、(b)、(c)車群融合時を想定した三つの車両配置例について行い、それぞれの車両配置において、簡単のため時間経過による車両の移動は考慮しない。これは、図2(a)、(b)の場合の車群間の相対的位置関係の変化は同期が進行するタイムスケールと比べて十分ゆっくりしたものであり、また図2(c)の場合、交差点での3車群は信号により一時停止する状況を想定する理由による。各車群に所属する車両は通信半径R内（両側R近傍）に位置する自車群車両と通信が可能であるとし、車車間通信の1周期に一度、それらの車両に対して自身のタイミング情報を通知する。ただし、図2において円で囲まれている車群の境界に位置する少数車両は、他車群の車両と通信を行うことに注意する。なお、簡単のため、第一近似として通信の際のパケット衝突は無視できるものとする。各車両が周辺車両と同期しているか否かの判定は通信の1周期に一度行う。各車両について、その通信範囲内にあるすべての車両とのタイミング誤差が

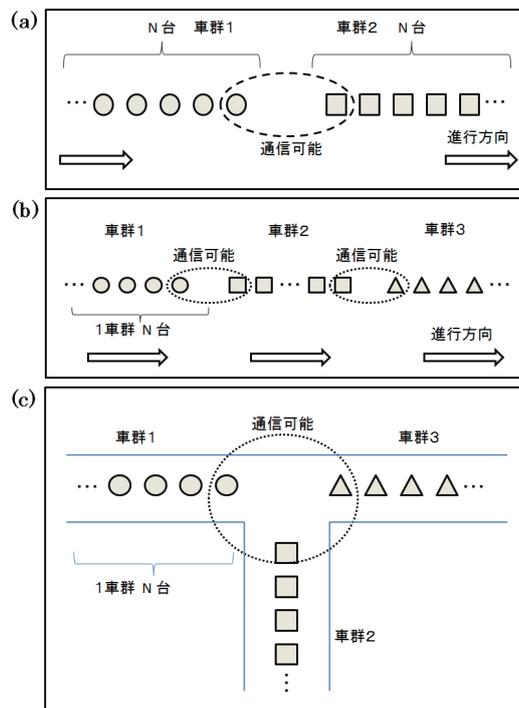


図2 車群融合時の車両配置例

- (a) 二車群融合
- (b) 三車群融合(見通し上の場合)
- (c) 三車群融合(交差点の場合)

±スロット長の8%の範囲以内(ガード時間内)であればその車両は周囲と同期しているとみなす。この判定条件により、全車両が同期するまでの通信周期数を所要同期時間と定め、これを多数回のシミュレーションにより求める。なお、通信の周期 = (スロット長) × (スロット数) であり、1周期中に設定されるスロット数は通信可能台数より十分多くあるものとする。以上の設定において、今井、鈴木のタイミング同期手法の性能評価を行うが、その比較対象として、今井、鈴木のタイミング同期手法から車群対策同期アルゴリズムのみを除いた同期手法(すなわち、周辺車両とのタイミング差のみを用いる同期手法)を「車群対策なしの同期手法」と設定し、その評価も行う。この比較により、車群対策同期アルゴリズムの効果を明らかにすることを意図した。また、このシミュレーションでは今井、鈴木の手法における車群対策同期アルゴリズム動作時のタイミング修正量の上限をスロット長の±2%とした。

3.2 二車群融合の場合のシミュレーション解析

二車群融合の場合のシミュレーション設定は、車両配置は図2(a)の通りとし、車両の移動は無視できるものとした。初期条件として、二つの車群は各々異なるタイミングで独立して同期しているものとし、また、各車両の初期通信タイミングをその車群ごとのスロット割当にしたがいランダムに決定した。ここではワーストケースを検討するために、二車群の初期通信タイミングを、最大の相互タイミング差となるように、スロット長の半分ずれているものとした。この2つの車群の初期通信タイミングを正規化して単位円上にプロットすると図3のようになる。ここで、単位円の円周は1スロット内のタイミングを $[0, 2\pi]$ に正規化したものに対応している。

車群構成車両数Nを40に固定し、正規化通信半径Rを4, 8, 12, 16, 20と変化させた場合の所要同期時間(周期数)をそれぞれ図4に示す。また、Rを8に固定しNを20, 30, 40, 50, 60と設定した場合のそれぞれの所要同期時間を図5に示す。それぞれのデータは1000回の試行により測定した所要同期時間の平均値である。

以上の二つの結果から、今井、鈴木の手法は車群対策なしの同期手法と比べ、通信範囲や車両数とほぼ無関係に、速やかに同期することが認められた。ここで、同期直後の時点での全車両のタイミング分布の一例を図6に示す。図6における○は各車両のタイミングを表しており、車群間で最もタイミング差の大きい2つの○がそれぞれの車群の末端車両のタイミングに相当する。

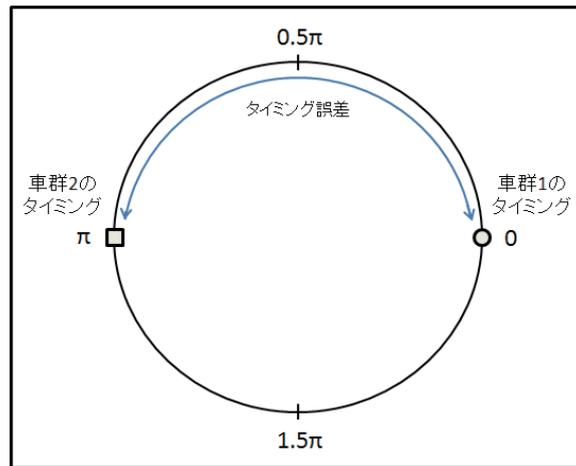


図3 シミュレーションにおける各車群の初期通信タイミング(二車群)

想定した車両配置において、他方の車群のタイミング情報を受信することが可能な車両は各車群の末端車両のみであるため、車群間の同期が達成されるためには末端車両同士のタイミング差が小さくなることが必須となる。

しかし、車群対策なしの同期手法では先に述べた通り、末端車両のタイミング修正量が他の自車群車両の影響により小さく限られ、その結果、図 6(a)のように車群内のタイミングが強く保たれたまま、長時間かけて車群間のタイミングを同期させていくことになる。一方、今井、鈴木的手法では、車群融合時のタイミング修正を最も離れたタイミング(つまり他方の車群のタイミング)に近づくように行うため、各車群の末端車両は速やかにお互いのタイミングを近づけることが可能となる。また、他の車両も同じく、末端車両のタイミングに追従していくため、車群間の同期を短い時間で円滑に達成することができる。このとき、車群対策同期アルゴリズム動作時のタイミング修正量の上限を適切な値に設定することにより、各車両は自身の通信範囲内にいる他の自車群車両との同期を維持したまま、タイミングを他方の車群へと近づけることができる。今井、鈴木的手法における同期直後のタイミング分布は、図 6(b)に示したように広く分布していることから、各車群のタイミングを分散して効率的に同期していることが認められる。

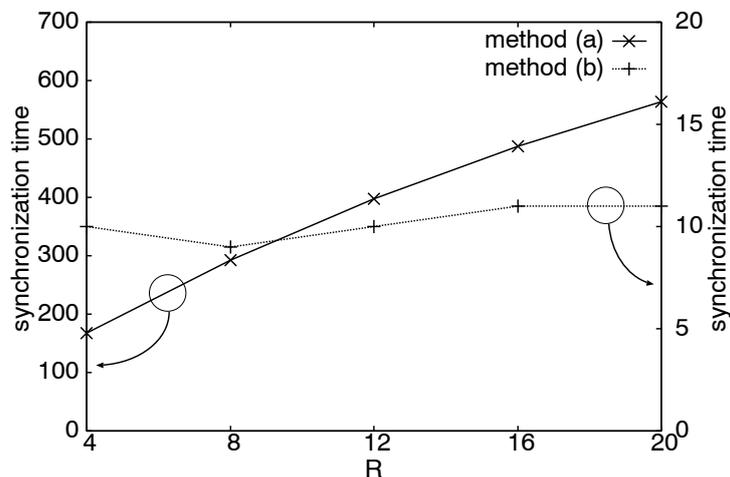


図4 二車群融合時における通信範囲変化に対する所要同期時間の変化
 (a) 車群対策なしの同期手法の場合
 (b) 今井、鈴木的手法の場合

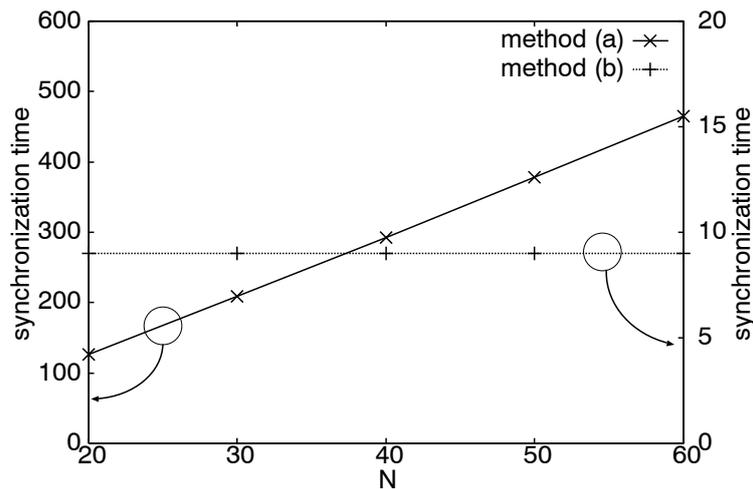


図5 二車群融合時における車両数変化に対する所要同期時間の変化
 (a) 車群対策なしの同期手法の場合
 (b) 今井, 鈴木の手法の場合

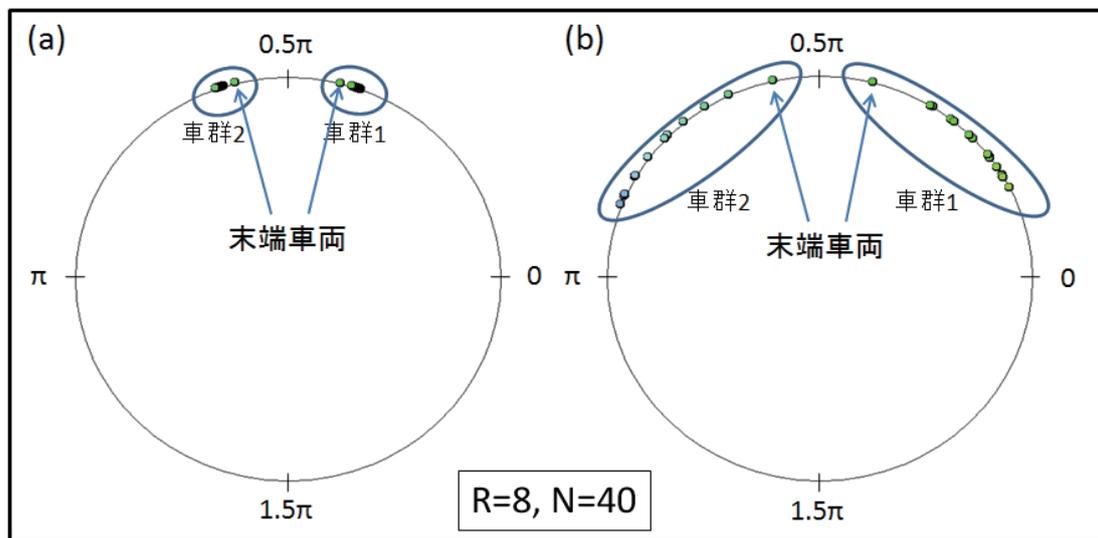


図6 二車群融合時における同期直後のタイミング分布例
 (a) 車群対策なしの同期手法の場合 (293周期後)
 (b) 今井, 鈴木の手法の場合 (9周期後)

3.3 三車群融合の場合のシミュレーション解析 (見通し上の場合)

3.2 の結果から, 今井, 鈴木タイミング同期手法は二車群融合時において有効に動作していることが明らかとなった. これを踏まえて, 三車群融合の場合についてシミュレーション解析を行う. まず, 三車群融合の一つのケースとして, 図 2(b) の 3 つの車群が見通し上にある場合を考える. このとき, 車群をまたいで通信が可能であるのは, 車群 1 の先頭車両と車群 2 の最後尾車両, 車群 2 の先頭車両と車群 3 の最後尾車両の二組である. 二車群の場合のシミュレーション設定にならぬ, 車群間の初期通信タイミングのずれは, 車群 2 のタイミングに対して, 車群 1 が (スロット長の半分 - 微少時間) 遅れたタイミング, 車群 3 が同等の時間進んだタイミングとする. なお, 本シミュレーションにおいてこの微少時間はスロット長の 2% とした. この値は今井, 鈴木の手法における車群対策同期アルゴリズム動作時のタイミング修正量の上限と同等のものである. これらのシミュレーション設定は, 2 つの車群 1, 車群 3 から影響を受ける車群 2 の先頭車両と最後尾車両で大きく異なるタイミング情報を受信する場合を想定したものであり, ひとつのワーストケースになっている. 図 7 に 3 つの車群の初期通信タイミングを $[0, 2\pi]$ に正規化して単位円上にプロットしたものを示す.

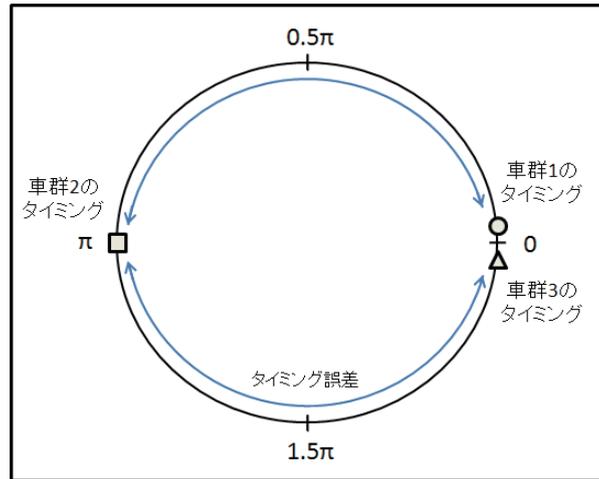


図7 シミュレーションにおける各車群の初期通信タイミング(三車群)

二車群融合の場合の解析と同様に、車群構成車両数 N を 40 に固定し、正規化通信半径 R を 4, 8, 12, 16, 20 と変化させた場合の所要同期時間を図 8 に示す。また、 R を 8 に固定し N を 20, 30, 40, 50, 60 と設定した場合の所要同期時間を図 9 に示す。

以上の二つの結果から、今井、鈴木の同期手法は、見通し上に並ぶ三つの車群が融合する場合においても、車群対策なしの同期手法と比べ速やかに同期を達成できることが認められたが、同期を達成するまでに必要な時間は、三車群融合の場合二車群融合のそれよりも長くなっていることがわかる(図 8(b), 図 9(b))。このことは、車群 1, 車群 2 間の同期度の時間変化を二車群融合の場合と見通し上の三車群融合の場合とで比較することにより明らかとなる。今井、鈴木の手法における車群 1, 車群 2 間の同期度の時間変化例を図 10 に示す。

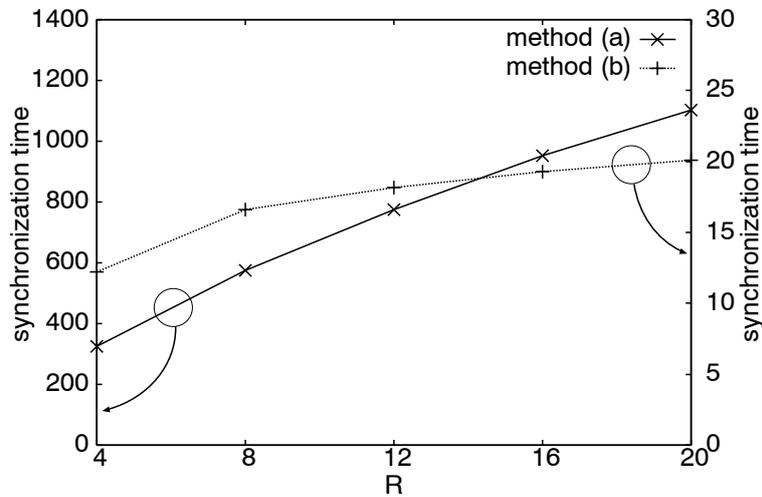


図8 三車群(見通し上の場合)融合時における通信範囲変化に対する所要同期時間の変化
 (a) 車群対策なしの同期手法の場合
 (b) 今井、鈴木の手法の場合

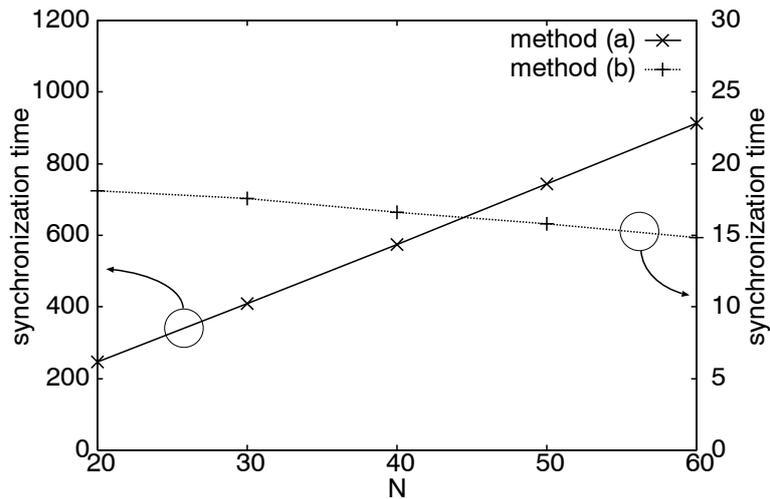


図9 三車群(見通し上の場合)融合時における車両数変化に対する所要同期時間の変化
 (a) 車群対策なしの同期手法の場合
 (b) 今井, 鈴木の手法の場合

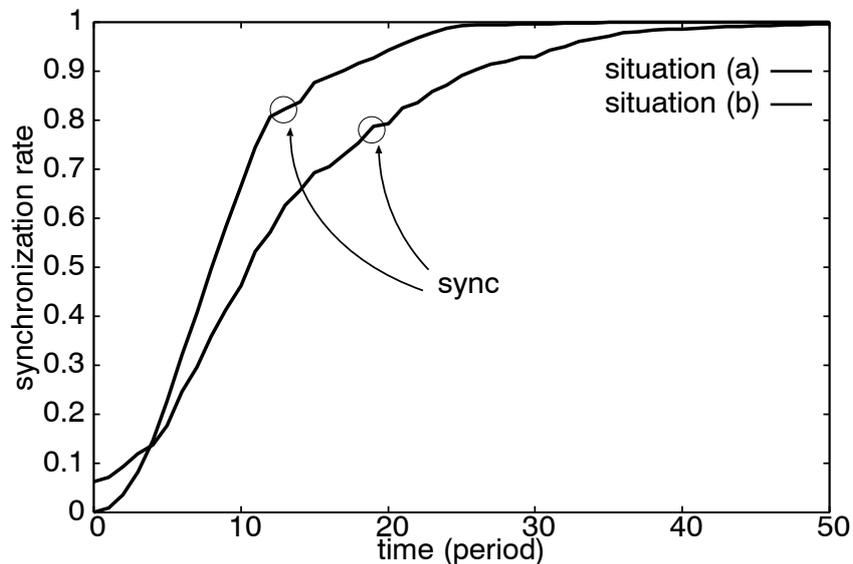


図10 今井, 鈴木の同期手法における車群1, 車群2間の同期度の時間変化例
 (a) 二車群融合
 (b) 三車群融合(見通し上の場合)

図 10 において, 横軸は時間 (周期数), 縦軸は同期度を表している. ここで, 同期度は車群 1 と車群 2 に属している全車両のローカルタイミングの揃い具合を表す値であり, この値は二つの車群のタイミングが完全に同期した場合に 1 となる値である. なお, 全車両の同期は, 図において円で囲まれている時点で達成されている. 図 10 の結果から, 見通し上の三車群融合の場合は二車群融合に比べ, ある同期度を達成するのにより長い時間を必要とすることがわかる. この所要同期時間が長くなる傾向は車群対策なしの同期手法の場合にも認められ, その原因は, 全車両のタイミング分布をみることにより説明される. 図 11 にそれぞれの手法における同期直後のタイミング分布の一例を示す.

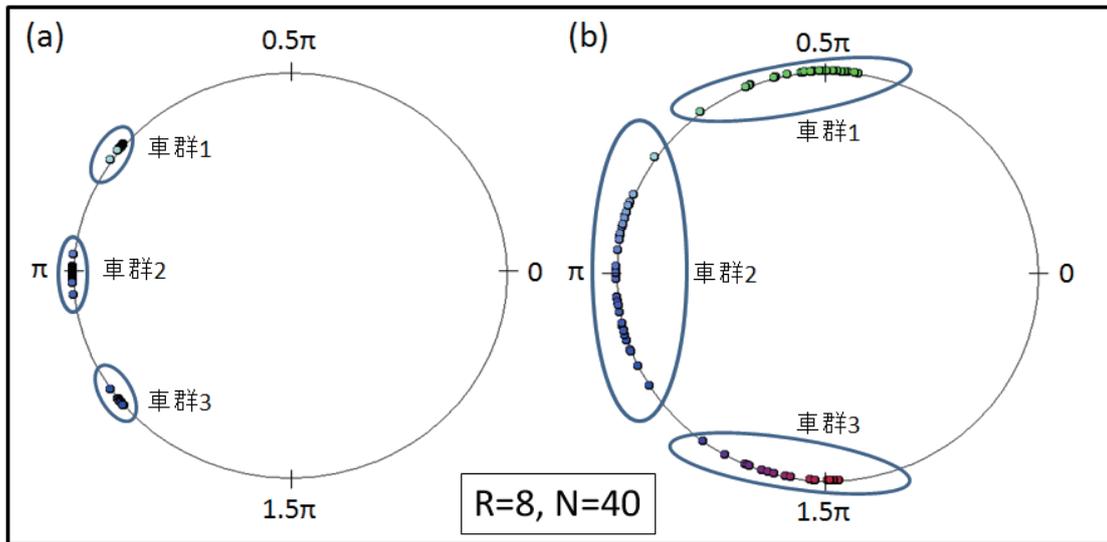


図11 三車群(見通し上の場合)融合時における同期直後のタイミング分布例
 (a) 車群対策なしの同期手法の場合 (576周期後)
 (b) 今井, 鈴木の手法の場合 (17周期後)

図 11 から, 三車群を見通し上に並べた場合には, 同期直後の車群 2 の車両のタイミングが初期のタイミング (図 11 (b) の π) の付近に分布していることがわかる. これは, 車群 2 の末端車両が自身のタイミングを, 車群 2 内の同期を保つために一定以上他方の車群のタイミングに近づけないためである. このため, 二車群融合の場合には 2 つの車群が互いに歩み寄ることでタイミングを近づけることが可能であったが, 三車群融合の場合は, 車群 2 の (平均) タイミングが初期タイミングの近くに拘束されており, 片方の車群 (この場合は車群 1, 車群 3) のタイミング修正を多く行うことによって車群間のタイミング差を縮めることになるため, 2 車群の場合より同期完了に時間が必要となる. この傾向は車群対策なしの同期手法において特に顕著であり, 車群 2 の車両のタイミングは初期通信タイミングの付近で密に分布し, そのため二車群融合の場合に比べ, 二つの車群間のタイミングを融合させるために長い時間が必要となる. 今井, 鈴木の手法においても, 車群 2 の先頭車両と最後尾車両は自身のタイミングを一定以上他方の車群に近づけることができず, そのため車群間のタイミング差を縮めるために車群 1, 車群 3 のタイミング修正を多く行う必要がある. しかし, 今井, 鈴木の手法においては各車両が一度に修正できるタイミング量が車群対策なしの同期手法と比較して大きいいため, 速やかに同期を達成することが可能である.

3.4 三車群融合の場合のシミュレーション解析 (交差点の場合)

以上では, 見通し上の三車群融合の場合, 同じ条件下の二車群融合の場合に比べ, いくぶん同期が遅れる傾向があることが判明した. では, 見通し上にない三車群が互いのタイミングの影響を受ける場合はどうなるだろうか. そのような状況として, 図 2(c)に示した車両配置が一つのワーストケースとして考えられる. つまり, これは三車群の末端車両が同時に互いの通信範囲内に入った場合である. 各車群の初期通信タイミングは三車群を見通し上に配置した場合と同様, 図 7 に示したものとする. なお, このとき車群 1 と車群 3 のタイミング差はガード時間以下であるので, シミュレーション開始時において二つの車群は同期していることになる.

上記の設定において二車群の場合や三車群を見通し上に並べた場合と同様のシミュレーションを行った結果, 車群対策なしの同期手法, 今井, 鈴木の手法の両者において, 車群間のタイミング差が一定となり同期しなくなる定常状態が存在することが明らかとなった. それぞれの手法における車群 1, 車群 2 間の同期度の時間変化例を図 12 に示す.

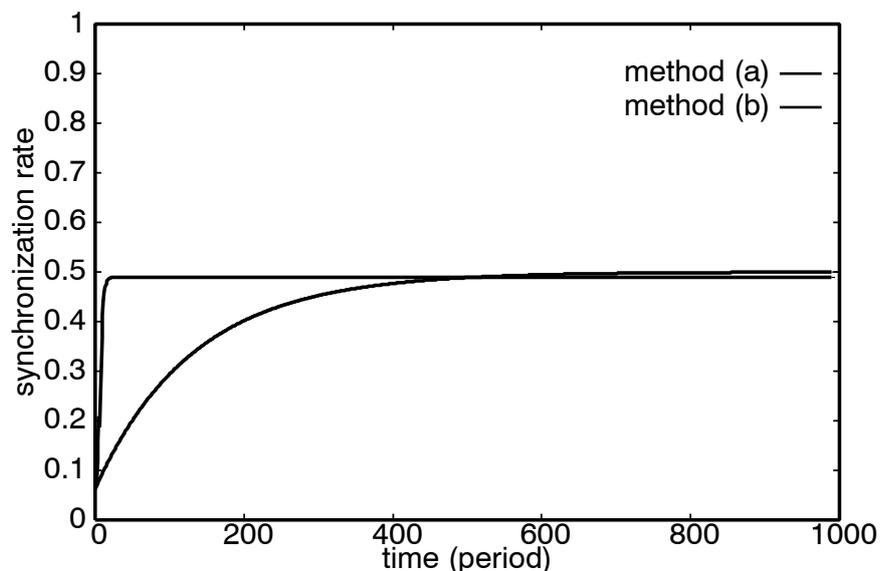


図12 三車群融合(交差点の場合)における車群1, 車群2間の同期度の時間変化例
 (a) 車群対策なしの同期手法
 (b) 今井, 鈴木の手法の場合

図 12 から, 車群対策なしの同期手法, 今井, 鈴木同期手法ともに, 同期度が一定値以上にならず, 定常状態に陥ってしまっていることがわかる. それぞれの手法における定常状態のタイミング分布例を図 13 に示す.

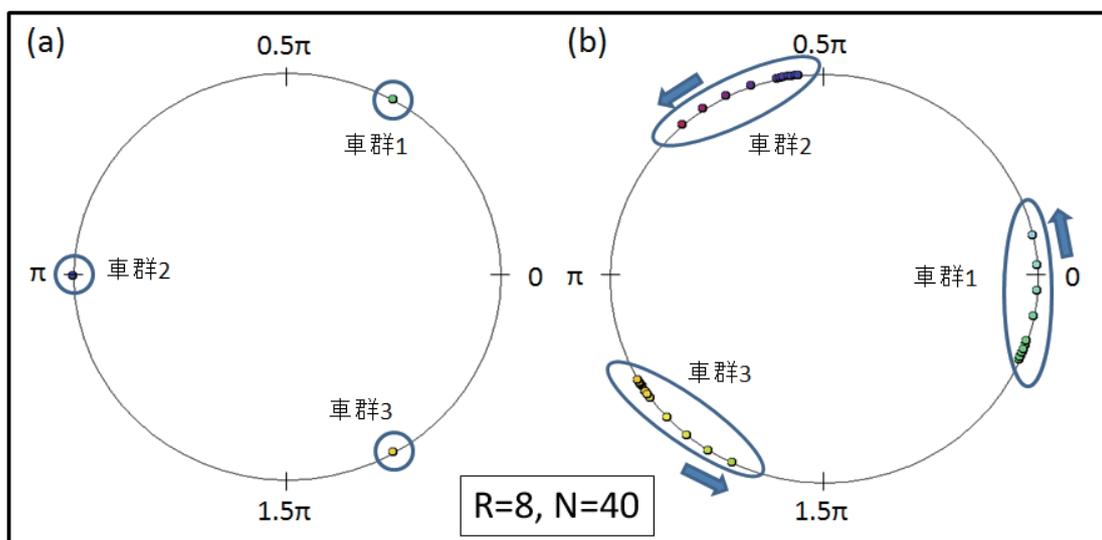


図13 三車群(交差点の場合)融合時における定常状態の例
 (a) 車群対策なしの同期手法
 (b) 今井, 鈴木の手法の場合

まず車群対策なしの同期手法における定常状態について説明する. 車群対策なしの同期手法において, 車群 2 の末端車両は求めるタイミング差の平均がゼロとなるので, 初期通信タイミングからタイミング修正を行わない. それに対し車群 1, 車群 3 の末端車両はそれぞれの通信タイミングを, 車群 2 の (末端車両の) タイミングに近づけていくが, 図 13 (a) のように全車群のタイミング差が同等となった時点で全ての末端車両が求めるタイミング差の平均がゼロとなってしまう, その結果この完全同期ではない状態が平衡状態となる. 次に, 今井, 鈴木の手法においては, 車群対策なしの同期手法の場合と同様な過程で全車群 (の末端車両) のタイミング差がほぼ同等となった後, 各車両の通信タイミングが一方向にシフトする挙動を示した. これは, 各車群の末端車両が車群対策同期アルゴリズムによって常に最も離れたタイミングに近づこうとし,

結局どの車群もタイミングを融合できないためである。なお、通信タイミングのシフト方向は三車群の初期通信タイミングによる。また、初期タイミングによっては、各車群のタイミングがシフトするのではなく、全ての末端車両のタイミング差が同等となった時点の通信タイミングを中心にして振動するようなタイミング修正を繰り返す場合も見られた。これは、各末端車両が近づこうとする車群、すなわち、それぞれのタイミングに対して最も離れたタイミングで通信を行っている車群が交互に入れ替わるためである。

このような、タイミング差が一定となり完全同期と異なる定常状態が今井、鈴木の手法に存在するということは以前から知られており、二次元メッシュ状の車両配置においてその回避手法、解消手法が検討されている[2][5]。従来研究[2],[5]では、同期しない集団の中心を特異点、あるいはコアと呼び、[2]では特異点に位置するタイミングを周辺車両のタイミングに置き換えることで定常状態を回避する手法を、[5]では特異点に位置する車両の通信タイミング通知を一定時間停止することで定常状態を解消する手法が提案されている。しかし、それらの回避および解消手法は、特異点付近にいる車両が互いに通信できる状況を想定して考案されたものであり、今回想定したような特異点に位置する車両同士のみが通信可能である場合には効果が低い。そのため、この同期障害に対応するためには、また別の方法を考える必要が判明した。

4. タイミング同期にGPS等を利用する可能性の検討

4.1. GPS信号を利用する可能性

先に述べた自律分散型 TDMA のフレームチャートの一例は図 14 に示す構成となる。各車両は 1 フレームに 1 度、1 つのスロットを利用して自身の位置情報や速度などの情報をデータパケットとして送信する。自律分散型 TDMA により、各車両の固有のタイムスロットを用いた低遅延かつ高品質な通信が可能になると期待されるが、このシステムを実現するためには 2 つの要求が存在する。1 つは、各車両が自身の使用するタイムスロットを周辺車両と協調して決定するスロット割当手法であり、これに関しすでに多くの成果が得られている[4][6][7][8][9]。そして、もう 1 つの要求は、スロットの先頭を周辺車両と揃えるためのタイミング同期手法である。このタイミング同期手法については、Sourour, 中川[3]や今井、鈴木[2]による自律分散型タイミング同期手法などの提案がなされているものの、まだ十分に議論がなされているとはいえない。現状では、車車間通信を行なう車両は GPS 受信器を搭載していることがほぼ暗黙の了解である。これにより GPS 信号を正しく受信することが出来れば、正確な位置情報とともに高い精度の時刻情報を参照することが可能である。このことから、GPS 信号の利用を期待して、タイミング同期手法の具体的な検討を先送りしている印象がある。しかしながら、GPS 信号による時刻情報は車両の周辺環境や天気、衛星の位置などにより精度が変化し、広域分散の車車間通信で常に保証された情報であるとはいえない[10][11]。

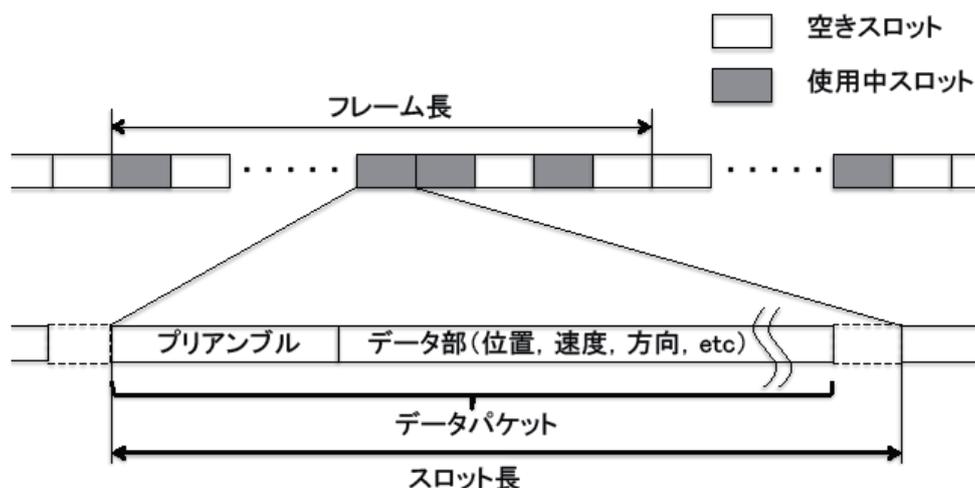


図14 車車間通信における自律分散型TDMA のフレームチャート

4.2. GPSを用いた場合の同期の性能評価

タイミング同期で参照可能な外部同期信号は、国内においては地上波デジタル放送波受信信号[12]や電波時計が受信する標準電波 JJY[13][14]などが挙げられるが、世界中で参照可能かつ高精度な時刻情報を得ることが可能なものとして、GPS 信号がある。GPS 信号は地球上のあらゆる位置において（遮蔽物などの存在を無視すれば）、6 個以上の衛星から常に受信できるように配置されており、最低 4 個の GPS 信号を参照することで GPS 受信機の位置ならびに現在の正確な時刻を取得することが可能である。民生用の GPS 受信機であっても誤差 10m 程度の測位が容易に可能とされており、nsec オーダーの時刻情報も得られることが期待されている。ところが、現実環境においては様々な要因による時刻精度の劣化が発生する。その 1 つとして挙げられるのが、ビルや森林、トンネルなどの遮蔽物による測位率の低下である。一般に GPS 受信機に搭載されている内部時計の精度は高くなく、数十秒間測位ができない状態となった場合、ASV の要求する同期精度から大きく外れてしまう。また、GPS 信号の精度に関しても常に保証されてはおらず、GPS 衛星の配置や天候、さらに自動車の場合は移動体環境であるためにフェージングの影響も受けることになる。カーナビゲーションシステムではこのような測位精度の劣化を抑えるために、地図情報とのマッチングや、加速度センサー等を独自に有しているが[10]、これらの機能は時刻の補正を考慮しているものではない。さらに、カーナビ用の GPS 受信機は位置情報の測位に最適化されており、高精度の位置情報が得られたとしても GPS 受信機の内部機構による時刻誤差が少なからず生じることが報告されている[11]。

先に述べた今井、鈴木による自律分散型タイミング同期手法と外部同期信号によるタイミング同期の同期状態の安定性を比較するために、次のようなシミュレーションを行なう。10×10 の格子状に 100 台の車両を配置する。また、各車両は周辺 12 台と通信可能であるとする。初期条件として、各車両のスロットのタイミングは全て揃っているが、内部時計の進む速度は 1 秒あたり $\pm 6 \mu s$ の範囲でずれているものとする。そして、ASV に基づき、周辺車両のうち 1 台でも $32 \mu s$ 以上のタイミングのずれが生じたとき、その車両の同期が外れたとみなす。そのような環境において、何もタイミング同期を行わない場合、ビル街などの測位率の低い環境において GPS によるタイミング同期を行なった場合、そして今井、鈴木による同期状態の推移を表わしたものが図 15 である。横軸は経過時間、縦軸は全車両のうち同期している車両の割合を表わす。何も同期手法を用いない場合、各車両のもつ内部時計のクロックドリフトにより同期状態が崩れ、わずかに数秒で同期状態が失われる。GPS を参照するタイミング同期の場合では、同期手法を用いない場合よりは向上するものの、同期状態を維持するには困難であることが伺える。一方、今井、鈴木による自律分散型タイミング同期手法の場合、同期状態は内部時計のクロックドリフト程度の揺らぎでは失われないことが明らかである。

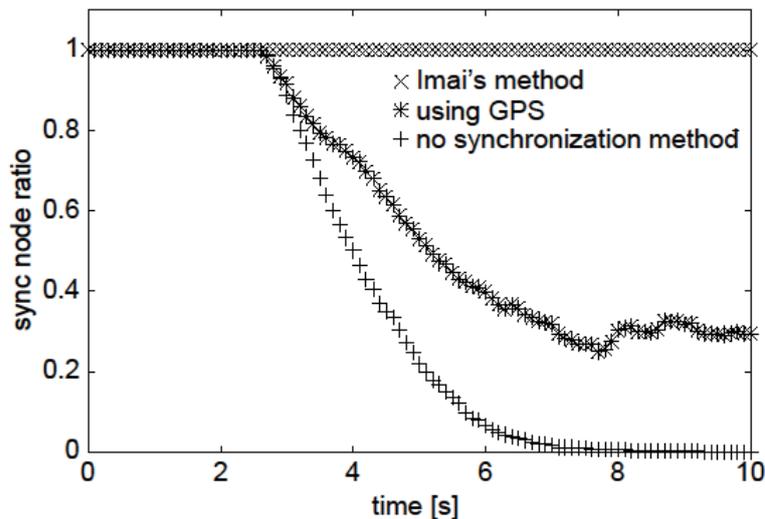


図15 従来のタイミング同期手法による同期安定性の比較

5. GPS等の外部参照ハイブリッド化タイミング同期手法の提案

前章で述べたように、外部同期信号は常に参照可能ではないため、安全運転支援システムのような高品質

な通信が要求される環境においては他のタイミング同期手法と組み合わせて利用することが望ましいと考えられる。本章では、2.1 で述べた自律分散型タイミング同期手法をベースに、外部同期信号の参照を取り入れた新たなタイミング同期手法を提案する。まず、前準備として、自律分散型タイミング同期手法へ対応するために外部同期信号のモデル化を行なう。そして、そのモデルに基づいた3種類のタイミング同期手法を提案する。

5.1 外部同期信号のモデル化

まず、外部同期信号として一般的な GPS 信号を参考に、外部同期信号と自律分散型 TDMA プロトコルのタイミングとの対応を考える。ASV によると、車車間通信における最小通信周期は 100ms と規定されているため、TDMA プロトコルの最小フレーム長 T_F は 100ms となるように設計することが必要である。一方、GPS を受信すると、協定世界時である UTC を得ることが出来る。この時刻情報を TDMA プロトコルで利用するには、例えば UTC における 0:00:00 を起点とした 100ms 刻みの時間配列を設定し、その配列とフレームを同期させればよい。従来の GPS 信号によるタイミング同期手法では、UTC に同期した 1 秒パルスを用いたタイミング同期手法が知られていることから、これは容易かつ妥当であると考えられる。また、これは言い換えるならば、車車間通信システム全体が UTC に同期することを意味するが、これは GPS 信号以外の外部同期信号、例えば路側機から得るタイミング情報[15]や電波時計の参照する標準電波などでも UTC を基準として用いる可能性が高く、十分に一般的かつ現実的な設定であると考えられる。

また、外部同期信号を参照する際、様々な要因により時刻誤差が生じる。各外部同期信号を参照する際に生じるおおよその時刻誤差 σ_{ESS} について表 1 にまとめる。ただし、この表に記されている GPS は時刻同期用の GPS 受信機を使用したときの値であり、これは車車間通信で使用される位置推定用の GPS 受信機とは異なること、また車両の移動やマルチパスなどの受信機をとりまく様々な要因から、現実にはより精度が劣化すると考えられる。これら表 1 で挙げた時刻誤差がどれ程影響するかについては、TDMA プロトコルのフレーム設計に依存する。つまり、TDMA が許容できる同期誤差 σ_{TDMA} に対する σ_{ESS} をパラメータとして用意する必要がある。本稿ではこれを正規化信号時刻誤差 σ と定義する。例えば豊田中研の D-TDMA プロトコルの実環境の設計例では、1 フレームあたり 400 以上のスロットを用意するため、 σ_{TDMA} は $32 \mu s$ より小さいことが要求されている[16]。また、外部同期信号の参照間隔 T_S や、トンネルやビル街などの周辺環境によって参照成功率 p が異なることも考慮に入れなくてはならない。以上をふまえ、外部同期信号を自律分散型 TDMA で参照する際に考慮すべきパラメータを表 2 にまとめる。

表1 外部同期信号と得られる時刻誤差

外部同期信号の種類	時刻誤差 σ_{ESS}
GPS(時刻同期用)	$\pm 100ns$
地上波デジタル放送波受信信号	$\pm 10 \mu s$
標準電波JJY	$\pm 20ms$

表2 外部同期信号の必須パラメータ

パラメータ	意味
正規化信号時刻誤差 σ	$ \sigma_{ESS} / \sigma_{TDMA} $
信号参照頻度 f	T_S / T_F
信号参照成功率 p	0:トンネル内など, 1:理想的環境

5.2 提案するタイミング同期手法

さて、表 2 で挙げたパラメータを考慮した上で外部同期信号を参照できるとしたとき、最もシンプルな方

法を考える。それは、

(i) 各車両は1周期に1度自身のタイミング情報をデータパケットのプリアンブルに付加させることで周辺車両に送信し、周辺車両より受信したタイミング情報をもとに、2.1節で述べたように平均タイミングを求めることにより自身のタイミングを更新する（今井，鈴木による自律分散型タイミング同期手法）。そして、

(ii) 外部同期信号を参照できた車両は、自身のタイミングを外部同期信号より得られたタイミングに更新するというものである（手法1）。また、手法1よりさらに外部同期信号への同期の高速化を期待して、手法1に加え、

(iii) 外部同期信号を参照出来た車両はしばらくの間(i)で述べた自律分散型タイミング同期手法によるタイミングの更新を行わず、外部同期信号のみを参照して得られたタイミングを保ち続ける方法を考える（手法2）。一方、上記の手法1,2とは逆に同期状態の安定性を期待した方法として、(i)' 外部同期信号を受信しても、すぐには自身のタイミング情報の更新を行わない。その代わりに、外部同期信号より得られたタイミング情報を自身のタイミング情報を送信する代わりに周辺車両に送信し、手法1(i)で述べた自律分散型タイミング同期手法を行なう、という方法を考える（手法3）。

6. シミュレーションによる性能評価

3章で提案した3つの手法の同期性能を評価するために、シミュレーションによる解析を行なった。以下にその設定について説明する。

(i) 図16(a)のように $32 \times 32 = 1024$ 台の車両を格子状に配置する。各車両は近傍の28台の車両と通信が可能とする。この設定は、問題の本質をクリアーにするための理想化である。また一方、著者は別に図16(b)のような具体的な道路状ネットワーク構造でのシミュレーションも行っており、ほぼ同様の結果が得られることも判明している。

(ii) 1フレームの長さをASVの仕様に基づき、 $T_F = 100\text{ms}$ とし、スロット数を400と設定する。そして、周辺車両とのスロットのタイミングのずれの許容誤差をスロット長の12%である $30\mu\text{s}$ とする。

(iii) 移動体でのGPSの参照精度 $\sigma_{\text{ESS}} = 1\mu\text{s}$ とし、GPS参照により得られる時刻の誤差を $[-1\mu\text{s}, 1\mu\text{s}]$ の一様乱数で与える。このとき、 $\sigma = 1\mu\text{s} / 30\mu\text{s} \approx 0.03$ であり、TDMAの許容誤差に対して十分に高い精度である。一方、標準電波JJYの場合、 $\sigma \approx 670$ となり、明らかに同期に適さない参照信号であることが分かる。

また、参照間隔 $T_S = 2\text{s}$ 、参照成功率をビル街などを想定し $p = 0.4$ とする。

以上の条件のもと、まず、 σ が1よりも小さい高精度な参照同期信号の場合と1よりも大きい低精度な同期信号それぞれの場合における各手法の同期能力について以下4.1で検証する。

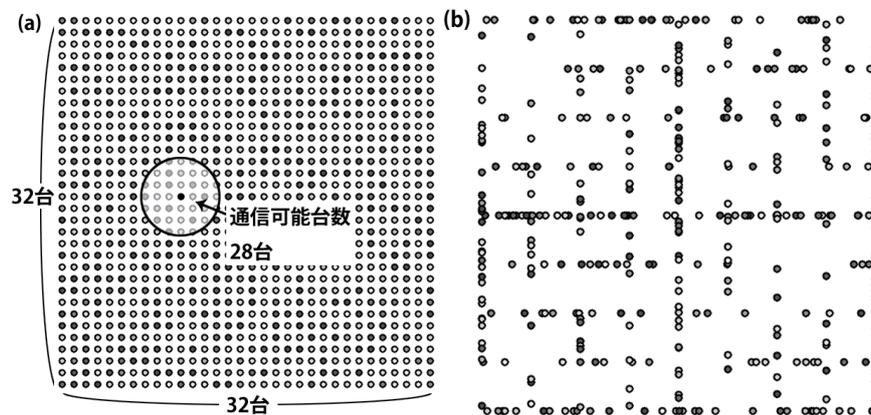


図16 想定するネットワーク例

6.1 各手法による同期能力の評価

まず、初期条件として各車両のスロットのタイミングをランダムに設定する。また、外部同期信号はシミ

ユレーション開始後2秒経過後から参照しはじめるものとする。そして、その初期条件から開始したときの経過時間を横軸に、周辺車両と同期が得られている車両の割合（同期ノード率）を縦軸にとりプロットした結果が図17, 18である。図17は高精度信号の一例として $\sigma=0.03$ と設定した。まず、外部同期信号を参照しない手法の場合、2.1で述べたように非同期状態へ緩和してしまい、2秒経過以降同期が進展しない。一方、提案した3手法はどれも10秒以内での完全同期が得られた。さらに、最もシンプルなアルゴリズムである手法1では同期完了までに外部同期信号参照開始より5秒必要なのに対し、手法2, 手法3は各々2秒程度と、約2倍以上高速で同期出来ることも判明した。また、同期状態の推移を比較すると、手法1, 手法2では外部同期信号を参照することにより同期ノード率が一時的に低下することが分かった。同期ノード率が低下することは、一度同期が得られた車両が、周辺に存在する外部同期を参照した車両が原因となって再び非同期状態へ戻ってしまう車両が存在することを意味する。これは、以下に挙げる2つの問題を引き起こす可能性がある。まず、その車両付近でスロットのタイミングがずれていることにより、ある車両が利用しているスロットと、その隣接スロットを用いて通信するある周辺車両とのパケットの衝突が発生する。そして、これにより通信の衝突が発生すると、スロット割当手法がこの衝突を検知し、スロットの再選択が複数車両で行なわれる可能性が生じ、通信の品質の一時的な低下がネットワーク全体へ波及する恐れがある。このように、同期ノード率の低下は一時的であれ望ましくない現象であるといえる。手法3の場合、同期ノード率がほとんど低下することなく完全同期が得られていることが分かる。また、低精度同期信号の一例として $\sigma=3.2$ の時の結果を図18に示す。 $\sigma>1$ であるので、外部同期信号により得られた時刻が必要同期精度よりも悪い可能性がある状況に相当する。この結果において、手法1, 手法3では完全同期が得られたが、一方、手法2は同期することが出来なかった。これは、手法2は外部同期信号への依存性が高いためであり、 $\sigma>1$ となるような環境には適さないことが分かる。そして、この場合も、手法3は同期速度、同期状態の推移ともに良い性能を示している。

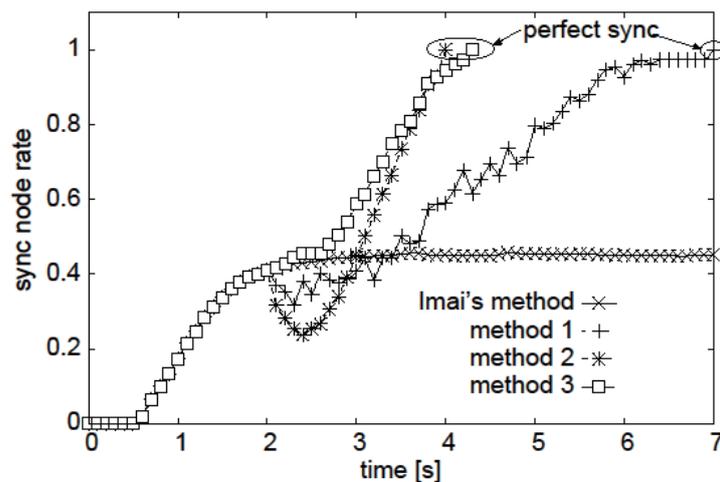


図17 高精度同期信号参照時

外部同期信号設定： $\sigma=0.03$, $f=20$, $p=0.4$

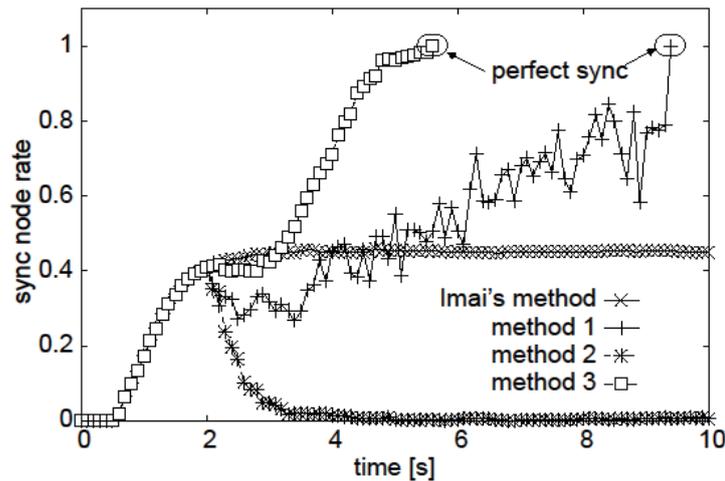


図18 低精度同期信号参照時

外部同期信号設定: $\sigma = 3.2$, $f = 20$, $p = 0.4$

6.2 外部同期信号に要求される時刻精度と同期所要時間の評価

以上, 4.1 で行なったシミュレーションにより, 手法 3 は今回提案した 3 手法の中では最も優れている手法であることが判明した. そこで, 手法 3 の同期能力についてさらに詳しく解析を行なう. f, p は 4.1 と同一に設定し, σ を適当な値に決める. 各車両のスロットのタイミングをランダムに与え, 手法 3 によるタイミング同期を 10 秒間行なうシミュレーションを 10 回試行する. そして, σ を変化させたときの平均同期所要時間と平均同期ノード率を表わしたのが図 19 である. ただし, 同期所要時間については 10 回全て成功した場合のみをプロットしており, また, 全て成功している場合の平均同期ノード率は明らかに 1 となる. この結果より, $1 < \sigma < 3$ の参照同期信号でも, $\sigma < 1$ の十分精度の良い信号とほぼ同等の時間で同期し, さらに, $\sigma \gg 6$ 程度までの低精度の参照同期信号であっても完全同期が可能となることが認められた.

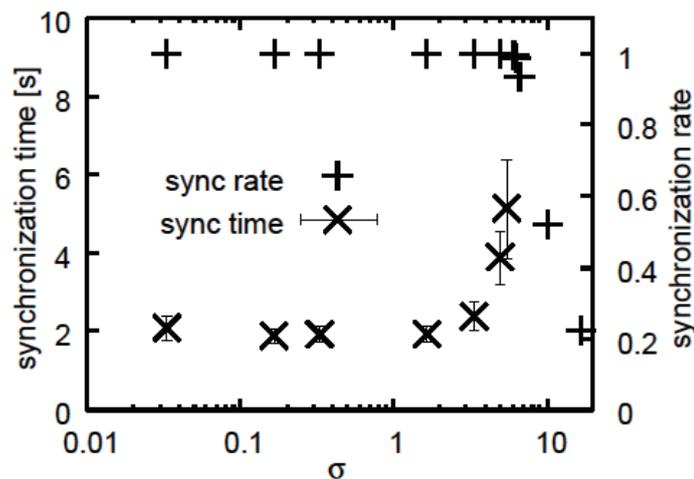


図19 信号精度による同期所要時間と同期能力の関係

外部同期信号設定: $f = 20$, $p = 0.4$

7. 結論

以上では、車車間通信において期待される自律分散型 TDMA のタイミング同期のために、従来の要素技術である自律分散型タイミング同期手法と参照同期信号を併用した新しいタイミング同期手法を提案し、2次元のネットワークで、その有効性を検証した。その結果、本提案手法は要求される同期精度より数倍劣る誤差をもつ参照同期信号においても高速に同期が達成される長所を持つことが判明した。また、本研究では参照同期信号のモデル化を行っており、信号の種類や TDMA プロトコルの設計にとらわれない一般的な解析結果を与えている。そのため、この結果は外部同期信号を利用可能なさまざまなアプリケーションにおいて、自律分散型 TDMA の設計に関し1つの指標となることが期待される。今後の課題として、今回一定としていたネットワークの車両密度や同期信号参照成功率の空間分布によるタイミング同期への影響などについて詳しく解析することが必要と考えられる。

文献

- [1] 国土交通省, “車両・交通システムの安全テクノロジー:自動車総合安全情報,” www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/index.html.
- [2] 今井 純志, 鈴木 徳祥, “タイミング同期の自律分散制御に関する検討,” 信学技報, USN2007-13, pp. 67 - 71, May 2007.
- [3] E. Sourour and M. Nakagawa, “Mutual Decentralized Synchronization for Intervehicle Communications,” IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 48, No. 6, pp. 2015 - 2027, Nov. 1999.
- [4] 牧戸 知史, 鈴木 徳祥, 原田 知育, 村松 潤哉, “リアルタイム車車間通信のための自律分散型TDMA プロトコル,” 情報処理学会論文誌Vol. 48, No. 7, pp. 2257 - 2265, July 2007.
- [5] 篠原 健太, 田中 久陽, “タイミング同期の自律分散制御における「モードロック状態」の解消手法,” 信学技報, AN2007-63, pp. 79 - 84, Dec. 2007.
- [6] 神崎 映光, 上向 俊晃, 原隆浩, 西尾章治郎, “アドホックネットワークにおける端末数の変化に応じたTDMA スロット割当手法,” 情報処理学会論文誌, Vol. 45, No. 3, pp. 824 - 837, 2004.
- [7] 神崎 映光, 上向 俊晃, 原隆浩, 西尾章治郎, “アドホックネットワークにおけるトポロジーの変化を考慮したTDMA スロット割当手法,” 電子情報通信学会論文誌B, Vol. J88-B, No. 5, pp. 933 - 947, 2005.
- [8] F. Borgonovo, A. Capone, M. Cesana and L. Fratta, “ADHOC MAC : New MAC Architecture for Ad Hoc Networks Providing Efficient and Reliable Point-to-Point and Broadcast Services,” Wireless Networks 10, pp. 359 - 366, 2004.
- [9] F. Borgonovo, A. Capone, M. Cesana and L. Fratta, “Impact of User Mobility on the Broadcast Service Efficiency of the ADHOC MAC Protocol,” IEEE Vehicular Technology Conference, VTS Spring, 2005.
- [10] 川添 利洋, 西嶋 元司, 反田 和忠, 津田 伸啓, 金子 一嗣, “最新のカーナビゲーションとGPS 受信機の技術動向,” 日本無線技報, No. 47, pp. 26 - 30, 2005.
- [11] 近藤 仁志, “GPS 受信機を用いた時刻・タイミング生成とそのアプリケーションシステム/制御/情報: システム制御情報学会誌, Vol. 51, No. 6, pp. 273 - 278, June 2007.
- [12] 唐沢 好男, “自律分散制御システムの同期確立問題: 搦手からのアプローチ~ITS 車車間通信への地デジ信号利用を例として~, ” 信学技報, AN2008-6, pp. 31 - 36, Mar. 2008.
- [13] Japan Standard Time Project, <http://jty.nict.go.jp/>
- [14] 渡辺 貴文, 森戸 貴, 南 正輝, 森川 博之, “電波時計を用いた同期型バッテリーレス無線センサネットワークの設計と実装,” 情処学報, 2007-MBL-41, pp. 113 - 118, Mar. 2007.
- [15] 原田 知育, 鈴木 徳祥, 牧戸 知史, 伊藤 修朗, 林 宏明, 寺田 重雄, “自律分散型TDMA 車車間通信システムの開発,” 情処学報, 2007-MBL-43, pp. 129 - 136, Dec. 2007.
- [16] 伊藤 健二, 田所 幸浩, 鈴木 徳祥, 原田 知育, 尾口 健太郎, 伊藤 修朗, “車車間通信による安全運転支援システムの性能評価,” 信学技報, ITS2007-26, pp. 13 - 20, Sep. 2007.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
アドホック・センサネットワークにおけるダイナミクスの問題(解説論文)	システム/制御/情報	2009年8月
分散無線ネットワークの同期の現状と課題(招待講演)	電子情報通信学会 信学技報 AN2009-5	2009年5月
Mode-Lock Eliminating Timing Synchronization Algorithm for Intervehicle Ad-hoc Networks(国際会議)	Proc. NOLTA2008	2008年9月
実環境を想定したセンサネットワークにおける時刻同期手法 FTSP の実験検証と改良手法	2008年信学会ソサイエティ大会予稿集	2008年9月
省電力ユビキタス・センサネットワークにおける衝突回避型ブロードキャスト手法の提案(学会発表)	2008年信学会ソサイエティ大会予稿集	2008年9月
車車間通信における車群融合時を想定した時刻同期手法の性能解析(学会発表)	2008年信学会ソサイエティ大会予稿集	2008年9月
車車間通信における「モードロック状態」を解消するタイミング同期手法(学会発表)	2008年信学会ソサイエティ大会予稿集	2008年9月
省電力ユビキタス・センサネットワークにおける衝突回避型フラッドイング手法の検討	電子情報通信学会 信学技報 AN2008-69	2009年3月
外部同期信号を利用した自律分散型 TDMA のタイミング同期に関する検討(研究会発表)	電子情報通信学会 信学技報 AN2008-36	2008年10月
アドホックネットワークから見た生物のプリミティブな環境適応能力 ~最近の研究動向~	電子情報通信学会 信学技報 AN2008-14	2008年5月
省電力センサネットワークにおけるコリジョン回避型ブロードキャスト手法の提案	電子情報通信学会 信学技報 AN2008-3	2008年5月
Improvement and Experimental Verification for Flooding Time Synchronization Protocol (FTSP)	電子情報通信学会 信学技報 AN2008-10	2008年5月
アドホックネットワークのタイミング同期過程における通信トラフィックの影響の解析	電子情報通信学会 信学技報 AN2007-76	2008年3月
タイミング同期の自律分散制御における「モードロック状態」の解消方法	電子情報通信学会 信学技報 AN2007-63	2007年12月

〈特 許 出 願〉

・通信装置、通信システム及びタイミング制御方法 (特願 2009-98353).

出願日:2009年4月14日

・発振器の内部機構の推定方法、推定プログラム及び推定装置 (特願 2008-320113).

出願日:2008年12月16日

・情報処理装置及び方法、プログラム、並びに通信方法 (特願 2008-286881).

出願日:2008年11月7日

・通信装置、移動体通信システム及び通信方法(特願 2008-149626).

出願日:2008年6月6日