

第2章 車両間通信アルゴリズム

2.1 はじめに

複数台の自動車が群をなして走行する場合、安全と効率（道路の実効容量の増加）を両立させるには、ドライバの操作状態や車両の走行状態に関する情報を、走行する車両間において交換する必要がある。こういった情報交換は、通常、ドライバが運転する車両ではドライバがウインカーやブレーキなどの操作を通じて行っている。これをさらに拡張して、自動運転中の車両相互の動作を調整しあうような走行、つまり協調走行を実現しようとする。と、車両の速度、加速度、操舵量、位置情報などの情報を、車載コンピュータ間でリアルタイムに交換する必要がある[12]。これを実現する一つの手段が車両間通信である。

車両間通信は、ITS 全般において活用されている技術である。ATMS/ATIS ではドライバへの情報支援（ドライバ間の意志伝達や前方の交通情報の入手など）に使われ[13]、AVCSS ではプラトーン内/外のロンジチューディナル制御、合流制御などに使われる。

津川らは、1980年代に車両間個別通信を複数台の自律車両で使用して、ソフトリンクビークルシステムを開発した[10]。このシステムでは、車両間通信に赤外線を使用し、車間距離を小さく保った状態で車両群の追従走行を制御することができた。ヨーロッパのITSプロジェクトであるPROMETHEUSでは、1990年代前半に57GHz帯のマイクロ波を使い、100ms周期のTDMAを利用して4台の車両による協調走行のデモが行われた。PATHが1997年に行ったAHSのデモでは、8台の乗用車が速度96km/h、車間距離6.3mの自動運転による追従走行が行われた[14]。同じくAHSのデモにおいて、ホンダは車両間通信にACC(Adaptive Cruise Control)を加えたシステムのデモを行った[15]。車両間通信を用いなかった時のACCを非協調ACC(noncooperative ACC)、車両間通信を用いた時のACCを協調ACC(cooperative ACC)と呼び、非協調ACCでは速度88km/h、車間距離40mでの追従走行を、協調ACCでは速度96km/h、車間距離12mでの追従走行を行うことができた。(財)自動車走行電子技術協会(JSK)の研究グループは、1997年に車両間通信を用いた複数台の自動運転車両による追従走行の実験を行った[11]。この実験では

通信媒体に赤外線を使用し，TDMA に基づく車両間通信が用いられ，4 台の車両による協調走行を行うことができた．

このように，車両間通信を利用した車両群の 1 次元的走行制御に関する研究は多く行なわれているが，合流に代表されるような車両群の 2 次元的走行制御に関する研究はほとんど行われていない．

2.2 車両制御のための車両間通信

車両間通信を行う場合，通信を行う各車両は常に移動しているため，有線通信を用いることは不可能であり，無線通信を使わざるを得ない．したがって，いくつかの制約が生じる．まず，無線通信では，車両群が同一のチャンネルを共有している限り，複数の車両が同時に送信することはできない．次に，通信可能範囲内の全ての車両に対してデータが送信されるため，車両台数が多くなると通信トラヒックが増大するという問題点がある．特に，車両制御には通信のリアルタイム性と短い通信周期が要求される．そこで，本研究では通信のリアルタイム性と短い通信周期を確保するために，車両間通信を大域的な通信である車両群間通信と局所的な通信である車両群内通信の 2 つに分けて取り扱う．これにより，通信トラヒックを減らし，車両群内通信でチャンネルあたりの車両数を制限することができる．例えば， n 台と m 台で構成される車両群間において通信が行われる場合，一対一の車両間通信のみを使用すると最高で $2m \times n$ チャンネルが必要になる（全二重通信の場合）．しかし，車両間通信として車両群間通信と車両群内通信を使用すると，車両間通信として必要なチャンネル数は車両群間通信の 2 チャンネルだけになる．

本研究で提案する車両間通信システムを図 2.1 に示す．この車両間通信システムは，車両群間通信と車両群内通信の 2 つの通信層から構成される．車両群間通信では車両群間での協調走行に必要な通信が，車両群内通信では車両制御に必要な高速な通信が行われる．

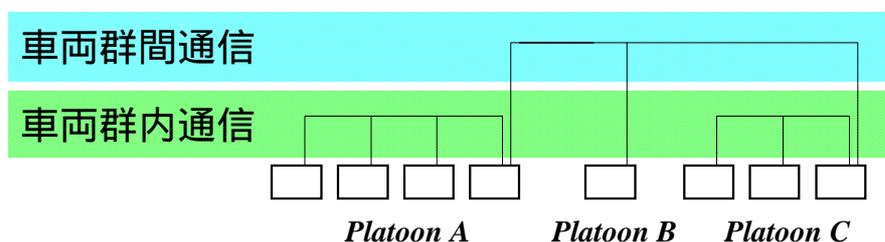


図 2.1: 車両間通信システム

2.2.1 車両群間通信

車両群間通信は車両群間で情報交換を行う時に使用される通信である。通信トラヒックを減らすため、車両群間通信は車両群の先頭車両間でのみ行う。車両群内での車両間距離と比べると、車両群間の距離は十分に離れている。そのため、車両群間通信の頻度は車両群内通信と比べて遅くすることができる。車両群間通信には、車両群内通信で必要とされる通信のリアルタイム性と短い通信周期が必要ないからである。通信方式も無線通信だけでなく車路車間通信方式などの通信方式を使用することも考えられる。車両群間通信のフローチャートを図 2.4，図 2.5 に示す。

協調走行を考えた場合、合流に関係する車両群間での通信が確立していればよく、相互に干渉しない位置関係にある車両群間での通信は必要ない。そこで、通信トラヒックを少なくする意味でも、協調走行に関係する車両群間でのみ通信が行なわれるように制限を設けることにする。

通信ゾーンの導入

協調走行は近接した車両群において行われるため、それに関係する車両群間通信も近接した区域間でのみ行えば十分である。そこで、走行路を幾つかの通信ゾーンに分割し、隣接した通信ゾーン間においてのみ車両群間通信を行うことにする。合流路と直線路について通信ゾーンを割り当てた場合を図 2.2，図 2.3 に示す。

図 2.2 は、合流路における通信ゾーンである。車両群は自分の属する通信ゾーンおよび、走行方向に隣接する通信ゾーンに対して通信を行う。例えば、図 2.2 中のゾーン 1 に属する車両群は、ゾーン 1 とゾーン 3 に属する車両群と通信を行い、ゾーン 3 に属する車両群はゾーン 4 に属する車両群と通信を行う。

一方、図 2.3 は直線路における通信ゾーンである。直線路は全体を 1 つの通信ゾーンとして定義することも可能であるが、通信ゾーンを大きく取るとは通信対象の増加を意味し、無駄な通信が増えることになる。そのため、直線路は図 2.3 に示すように複数の通信ゾーンに分割する。

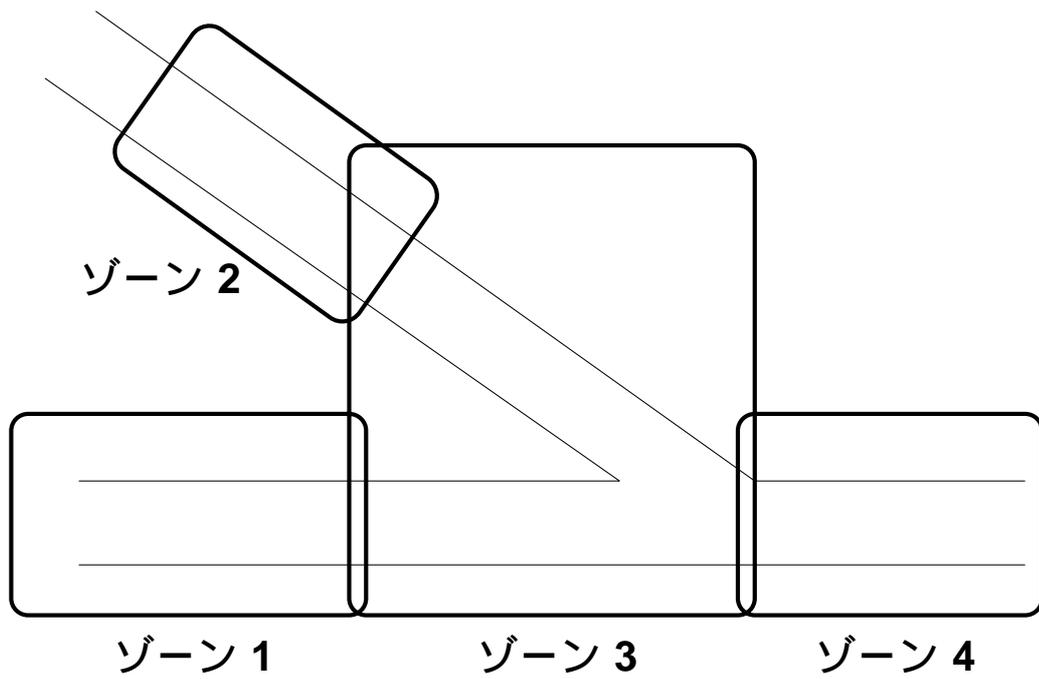


図 2.2: 合流路に対する通信ゾーンの割り当て



図 2.3: 直線路に対する通信ゾーンの割り当て

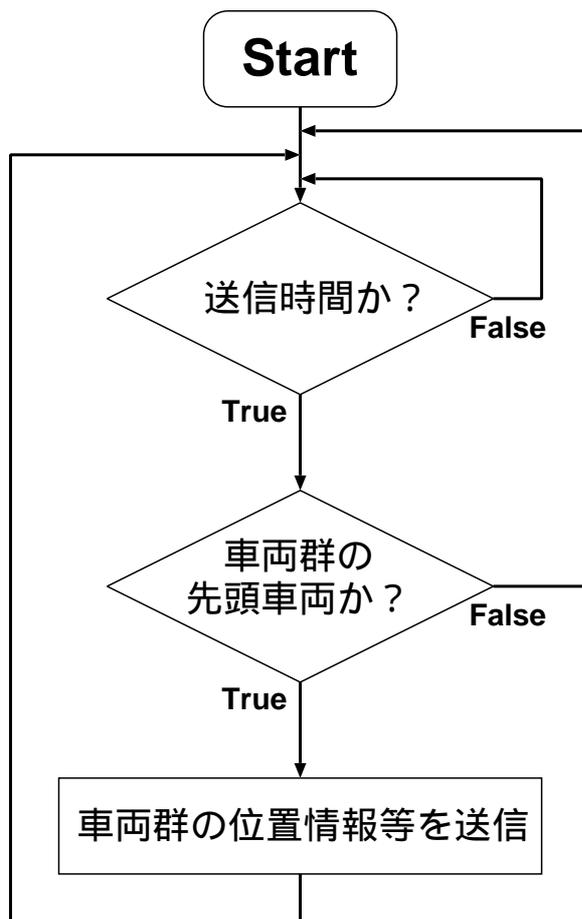


図 2.4: 車両群間通信の送信アルゴリズム

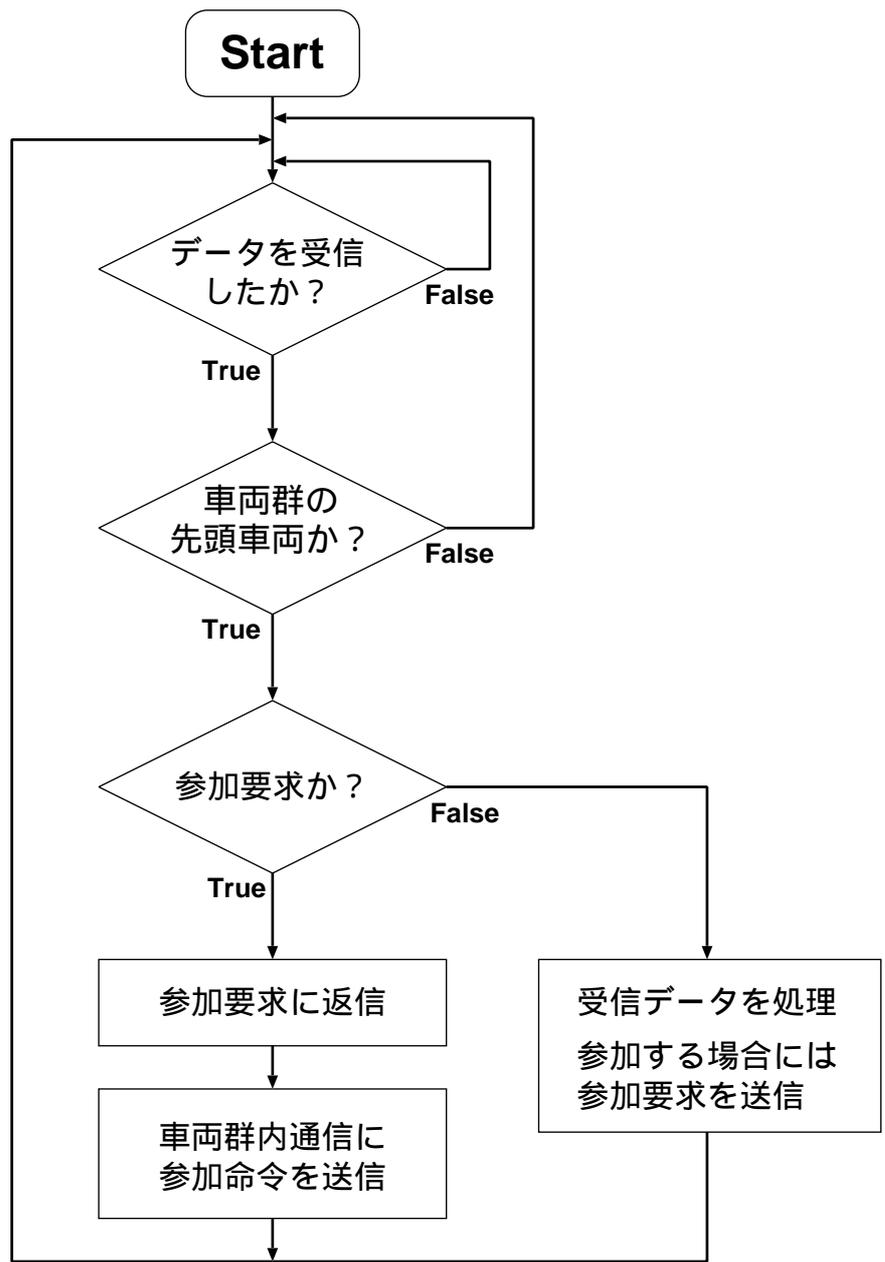


図 2.5: 車両群間通信の受信アルゴリズム

2.2.2 車両群内通信

次に、車両群内通信を車両制御の面から考えてみる。車両群内において前方を走行する車両に対して追従走行を行う場合、ロングチューディナル制御を行うために近接した車両間において高速な通信が行われる必要がある。

無線通信を行う場合、既存の通信方式として ALOHA システムや TDMA (Time-Division Multiplexing Access : 時分割多重アクセス) のようなスケジューリング方式を使うことが考えられる。

ALOHA システムでは、送信すべきデータが発生した時にすぐに送信を開始する。そのため、車両制御を目的に通信を行う場合には、各車両は常にデータを送信するために頻繁にデータの衝突が発生してしまい、効率が悪い。衝突が起こった場合には、各車両は次の送信機会まで待機することになるため、データの更新周期が保証できないという問題点もある。

一方、TDMA は一つの回線を時間軸上で分割し、複数の小さな回線 (スロット) として扱う方式である。一つのスロットに一つのシステムの送信権を割り当てる (TDM スケジュール) ため、データ送信時の衝突が発生しないという特長をもつ。しかし、スロットは固定長で、全てのシステムが同期している必要がある。TDMA を車両群内通信に用いる場合、車両群内の各車両は同期している必要があるとともに、車両群の最大構成台数を予め決定しておく必要がある。車両群の構成台数が一定の場合には、スロット数を構成台数と一致させることにより、送信効率を最大にすることができる。しかし、車両群の構成台数が変化する場合には、車両群の構成台数がスロット数よりも少なくなるようにする必要がある。これは、車両群の構成台数が少ない場合には、送信効率が悪化することを意味する。また、構成台数が変化することにより TDM スケジュールを頻繁に更新しなくてはならないという問題点もある。

このように、車両制御を目的とした車両間通信を行う場合、前提となる条件が通常の無線パケット通信とは異なるため、既存の通信方式をそのまま用いることは難しい。これまでに行われた車両間通信のためのプロトコルの研究には、車両群内の複数車両の制御を考慮した slotted ALOHA 方式 [16], slotted ALOHA 方式を用いて各車両間で自律分散的に同期をとるシステム [17], スペクトル拡散方式を用いた reserved ALOHA プロトコル [18] などがあるが、車両制御を目的とした車両間通信アルゴリズムに関する研究はまだ

少ない。

車両間通信の形態を考えた場合，近接車両間で bumper-to-bumper で通信を行うのか，車両群内の任意の車両間 (1 対 1 または 1 対 n) で通信を行うのか，それとも交通流内の任意の車両間 (1 対 1 または 1 対 n) で通信を行うのかなど，通信形態によりプロトコル (通信媒体を含む) は大きく異なる可能性がある．そのため，車両間通信プロトコルを統一的に論じることは難しい．

本研究では，車両制御を目的とした車両間通信方式として，ラウンドロビン方式を基本にスケジューリング方式を拡張し，車両群の構成台数に合わせて動的に通信経路を変化させるデータ伝達アルゴリズムを提案する．

2.3 データ伝達アルゴリズム

ここでは、車両制御のためのデータ伝達を目的としたデータ伝達アルゴリズムを提案する。車両制御のためのデータ伝達を目的とした場合、制御に必要なデータの更新周期は100ms未満にする必要がある。これは、これ以上遅くなると協調走行のための車両制御が困難になるからである。また、車両群への車両の参加/分離が頻繁に発生するので、このようなことも考慮してアルゴリズムを構成する必要がある。

ここでは簡単のため、使用する無線システムには通信媒体の指向性がなく、同一車両群内での各車両はお互いに通信可能であると仮定する。

2.3.1 定常状態のデータ伝達

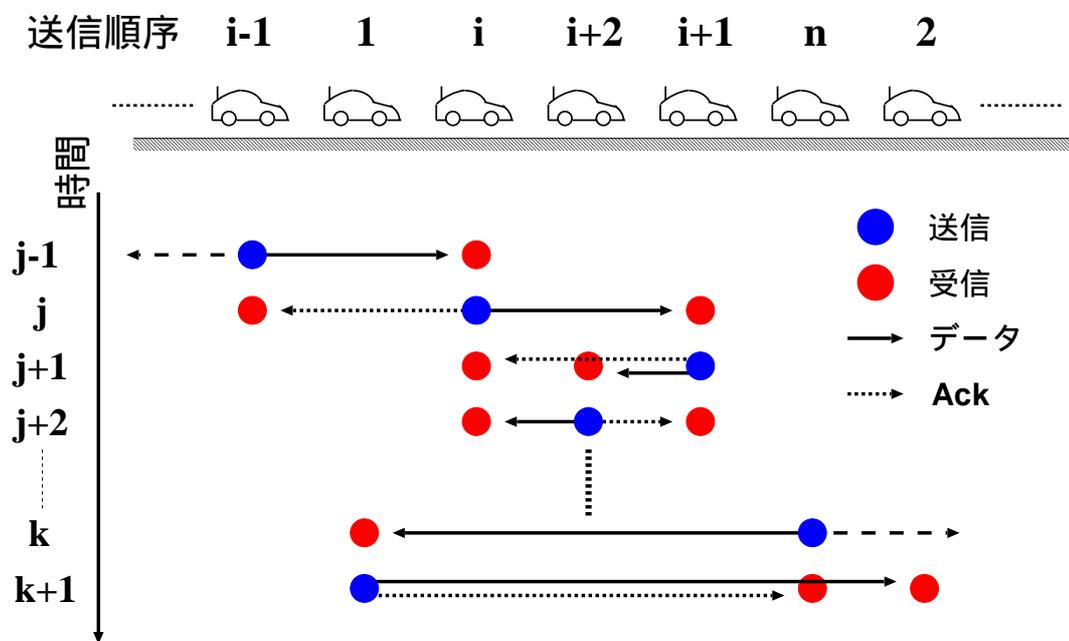


図 2.6: 定常状態のデータ伝達

まず、車両群の構成台数が一定である場合 (定常状態) について説明する。

車両群を構成する各車両に、走行順序とは独立に送信順序を割り当てる。この時、各車両は車両群の構成台数 n と自車の車両番号を知っているものとする。

車両 i は送信の順番が回って来ると、次にデータを送信する車両 $i+1$ に対してデータを送信する。この時、車両 i は車両 $i+1$ にデータを送信すると同時に、車両 $i-1$ に対し

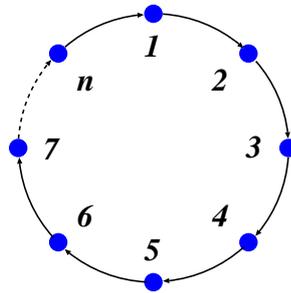


図 2.7: リングネットワーク

ても送信する．これは車両 $i - 1$ に対する車両 i の受信通知で，送信データの最後に受信通知のデータを追加することで実現する．もし，車両 $i - 1$ が車両 i から受信通知を受け取らなかった場合には，車両 $i - 1$ は車両 i に対し再度データを送信することになる．

車両 i からのデータを受け取った車両 $i + 1$ は，次にデータを送信する車両 $i + 2$ と車両 i にデータを送信する．これを送信順序の最後の車両 n まで順次繰り返す．最後にデータを送信する車両 n は，最初の車両である車両 1 と車両 $n - 1$ にデータを送信する．結果として，各車両はリング状に順次データを送信することになる (図 2.7) ．

ここで提案した方式は，従来の TDMA と比べて以下のような特長を持っている．

- 各車両が通信の同期を取る必要がない．
- 車両群の構成台数に合わせてリングネットワークを動的に変化させるため，無駄な待ち時間が生じない．
- 送信データ長に合わせて，各車両が送信できる時間を自由に変化させることが可能である．

しかし，以下のような問題点がある．

- 車両群内の全ての車両に対してのデータ送受が可能でなくてはならない．
- 通信順序と車両群内での走行順序が一致していない場合には，毎回全ての車両データを送信するか，各車両が常に他の車両に対する通信を傍受し他の車両のデータを保持しなくてはならない．

また，車両制御の面から情報更新周期の上限 (リングネットワークの最長巡回時間) が定まり，リングネットワークの最大構成台数，つまり車両群の最大構成台数が決定されることになる．

2.3.2 参加/分離時のデータ伝達

次に，リングネットワークに新たな車両が参加または分離する場合について説明する．新しい車両がリングネットワークに参加する可能性があるのはランプからの合流時や，単路部での車両群への参加時である．車両が合流する時には，合流前に車両群間通信により合流に関する情報を交換し合流準備が行われる．そこで，この情報を利用してリングネットワークへ車両に参加させる．また，分離については，リングネットワーク内での通信(車両群内通信)で情報を交換し，リングネットワークからの分離を行う．

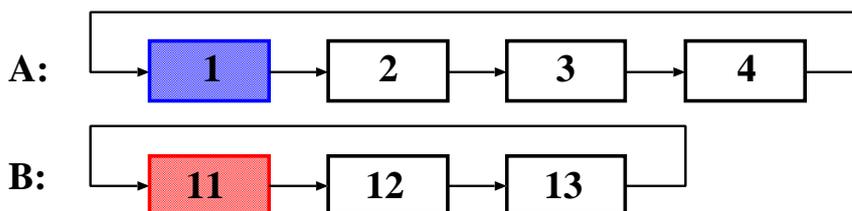
以下では，リングネットワークへの参加アルゴリズムおよびリングネットワークからの分離アルゴリズムについて説明する．

(1) 参加

車両群 A のリングネットワークに車両群 B のリングネットワークが参加する例を図 2.8 に，参加アルゴリズムのフローチャートを図 2.9 に示す．車両群間通信により，各リングネットワークは事前にリングネットワークへの参加準備を行っておく．

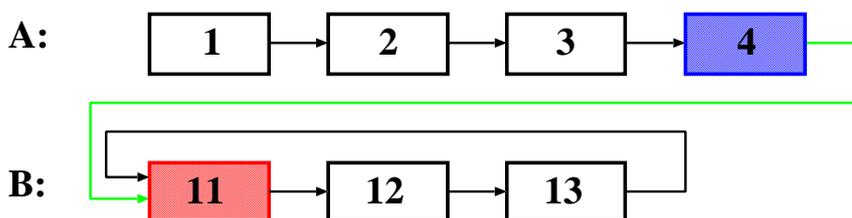
図 2.8 の (1) は再構成される前の状態を表している．まず，合流される側のリングネットワーク A の車両 (図中の 1 番の車両) は，車両群内通信の送信データに自車宛の経路を新しく合流するリングネットワーク B の車両 (図中の 11 番の車両) 宛に変更する命令を付加して送信する．リングネットワーク A の車両 (図中の 1 番の車両) への送信経路をもつ車両 (図中の 4 番の車両) は，そのデータを受け取ると送信経路をリングネットワーク B の車両 (図中の 11 番の車両) に変更し (図 2.8 の (2))，リングネットワーク B の車両 (図中の 11 番の車両) への送信経路をリングネットワーク A の車両 (図中の 1 番の車両) に変更する命令を送信データに付加して送信する．データを受け取ったリングネットワーク B の車両 (図中の 13 番の車両) は，送信経路をリングネットワーク A の車両 (図中の 1 番の車両) に変更し，リングネットワークへの参加が完了する (図 2.8 の (3)) ．

(1) 車両 1 と車両 1 1 の間で合流交渉



車両 1 : 車両 1 への経路を車両 1 1 への経路に変更する命令を発行

(2) 車両 4 が車両 1 への経路を車両 1 1 への経路に変更



車両 4 : 車両 1 1 への経路を車両 1 への経路に変更する命令を発行

(3) 車両 1 3 が車両 1 1 への経路を車両 1 への経路に変更

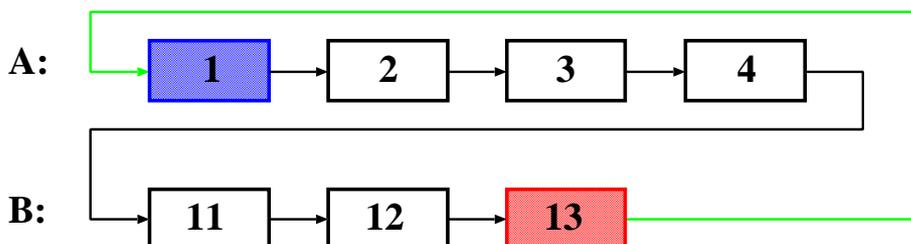
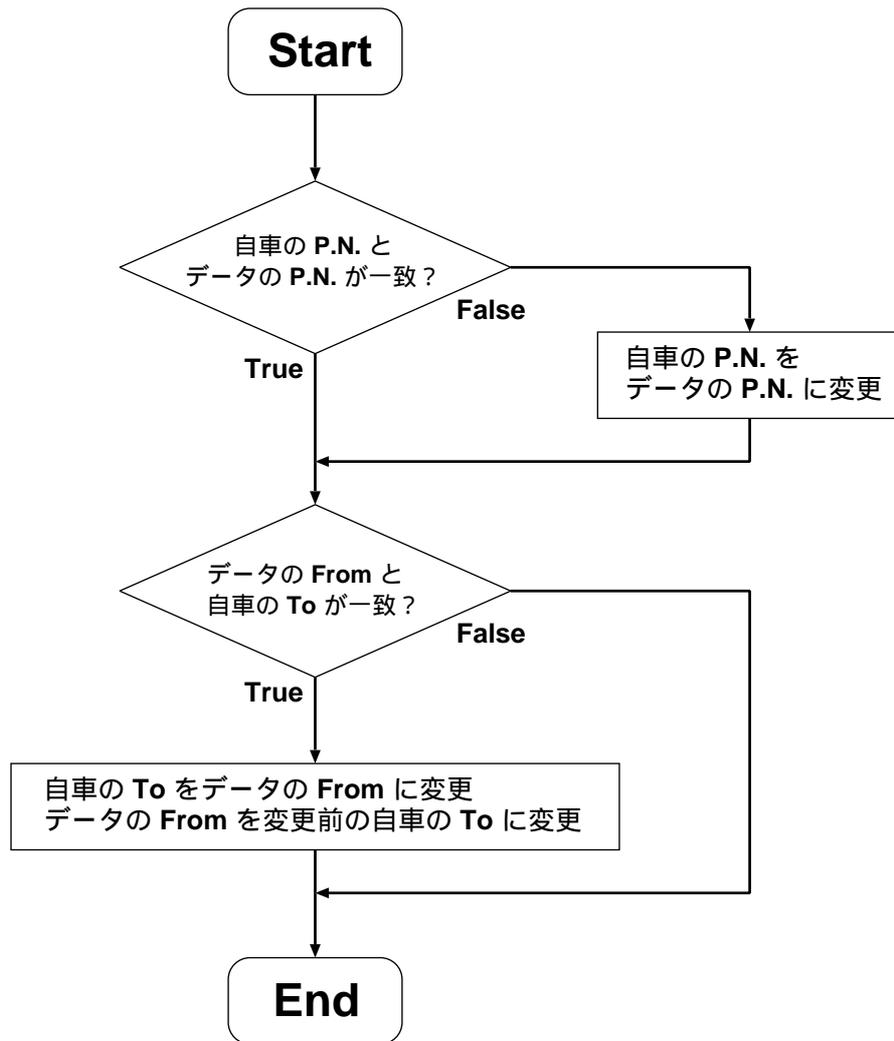


図 2.8: リングネットワークへの参加例



P.N. : 車両群識別番号 (車両群の先頭車両の車両番号)
自車の To : 次に送信する車両番号
データの To : 変更後の送信先
データの From : 変更前の送信先

図 2.9: リングネットワークへの参加アルゴリズム

(2) 分離

車両群 A のリングネットワークが二つのリングネットワーク (A と B) に分離する例を図 2.10 に、分離アルゴリズムのフローチャートを図 2.11 に示す。リングネットワークが分離する前に、車両群内通信を利用してどのように分離するかを各車両間で決定しておく。

分離するリングネットワークの車両 (図中の 2 番の車両) は送信データに自車宛 (2 番宛) の経路を、新しい経路 (図中の 4 番の車両への経路) に変更する命令を付加して送信する。変更後の送信経路と同じ経路をもつ車両 (図中の 3 番の車両) は、そのデータを受け取ると送信経路をリングネットワーク B の車両 (図中の 2 番の車両) に変更し (図の (2))、受け取った命令をそのまま更新前の経路に送信すると同時に更新後の経路にも新たなデータを送信する。データを受け取ったリングネットワーク A の車両 (図中の 1 番の車両) は、送信経路を新しい経路に変更し (図中では 2 番の車両から 4 番の車両に変更)、リングネットワークの分離が完了する (図の (3))。

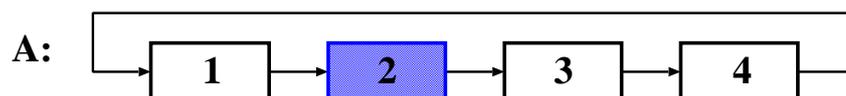
(3) 送信順序の変更

リングネットワーク内での送信順序と車両群内での走行順序が一致している必要がある場合 (例えば、車両群内の各車両が車両群内の他の全ての車両の情報を取得できないような場合)、リングネットワークが変化した直後に送信順序を変更しなければならない。

車両群内の各車両の走行順序を把握するため、車両群の先頭車両はリングネットワークの再構成終了後、各車両の位置情報を収集する命令を送信データに付加して送信する。これはリングネットワークが一巡することで完了する。各車両の位置情報が集まると、先頭車両は全車両の位置情報を再度リングネットワークに送信する。位置情報の付加されたデータを受け取ると、車両群内の各車両はそのデータを元にリングネットワークの送信順序を変更する (次に送信すべき車両を変更する)。以上で送信順序の変更が完了する。

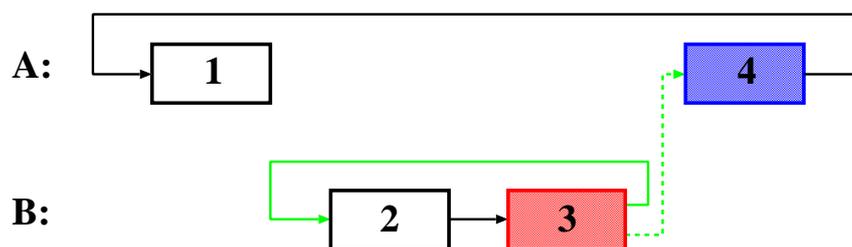
なお、毎回全車両データを送信するか、各車両が常に他車両に対する通信を傍受して他車両のデータを保持している場合には、送信順序と走行順序を一致させる必要はない。ただし、その場合には送信するデータ量が増加してしまうため、車両群の最大構成台数が少なくなるという問題がある。

(1) 車両 2 が分離を決定



車両 2 : 車両 4 への経路を車両 2 への経路に変更する命令を発行

(2) 車両 3 が車両 4 への経路を車両 2 への経路に変更



車両 3 : 車両 2 への経路を車両 4 への経路に変更する命令を発行

(3) 車両 1 が車両 2 への経路を車両 4 への経路に変更

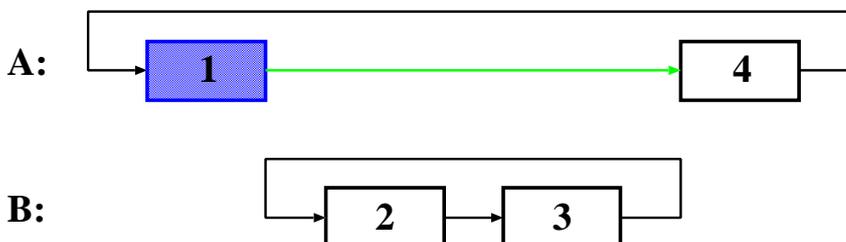


図 2.10: リングネットワークからの分離例

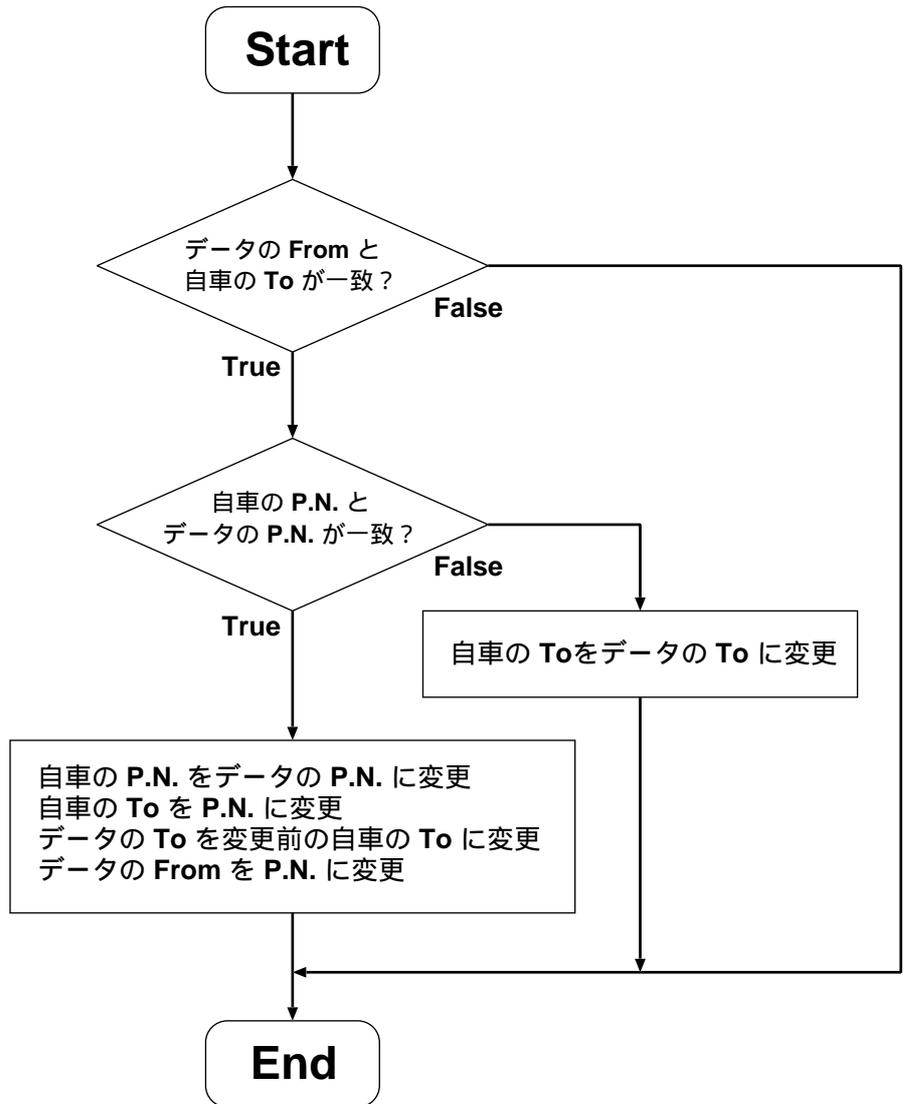


図 2.11: リングネットワークからの分離アルゴリズム

2.3.3 割り込み時のデータ伝達

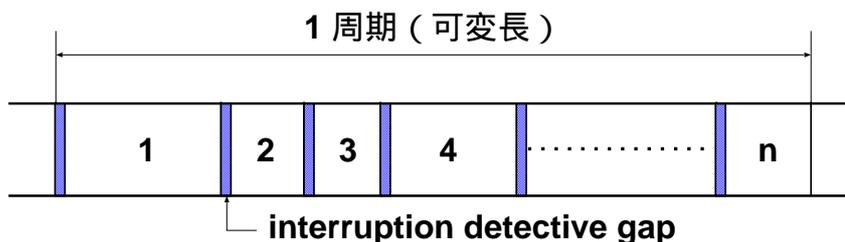


図 2.12: 割り込み時のデータ伝達

定常状態では車両群内の各車両がリングネットワーク内で順次送信を行っているため、そのままでは他の車両がリングネットワークに割り込んだり、緊急時のデータ伝達を行うことができない。これを解決するために、各車両がデータを送信した直後に他車が割り込むことのできる時間を設けることにする。これを“interruption detective gap”と呼ぶ(図 2.12)。

interruption detective gap では、同一リングネットワーク内の全ての車両は基本的に受信状態となる。リングネットワークに割り込もうとする車両は、このギャップ時に信号を送信する。このギャップにおいて送信される信号は、割り込みのトリガとして利用されるため必ずしもデータの形である必要はない。また、リングネットワーク側の車両もトリガとしての信号が受信できれば良いので、ギャップとして必要な時間はデータ送信に必要なスロット長と比べて十分に短くすることが可能である。

interruption detective gap で信号が送信されると、ギャップの後に送信する予定だった車両は送信を止め引き続き受信状態になる。ギャップに信号を送信した車両は、ギャップが終ってもデータの送信が開始されないことを確認した後、データの送信を開始する。ギャップの後に送信することになっていた車両は、割り込み車両からのデータを受信し適宜処理の後リングネットワークを再開する。

2.3.4 車両群内通信アルゴリズム

最後に、本研究で提案する車両群内通信全体のアルゴリズムをフローチャートとして図 2.13、図 2.14 に示す。図 2.14 は、参加/分離等を判別するフローチャートである。

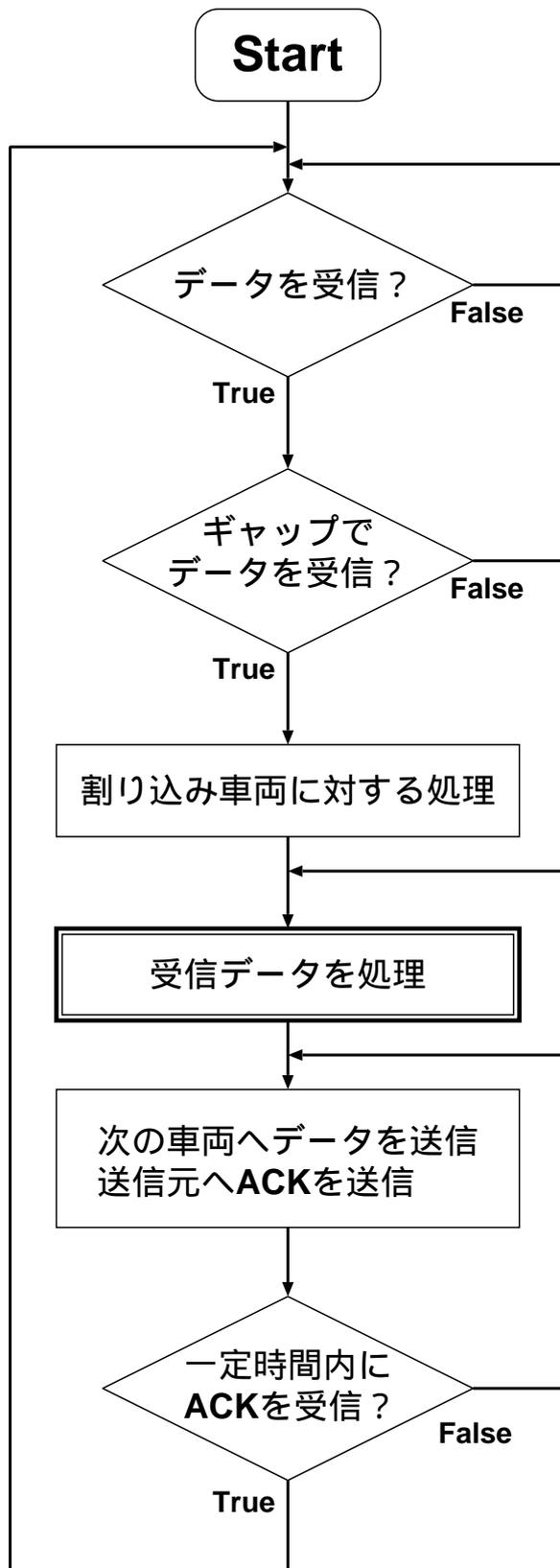


図 2.13: 車両群内通信アルゴリズム

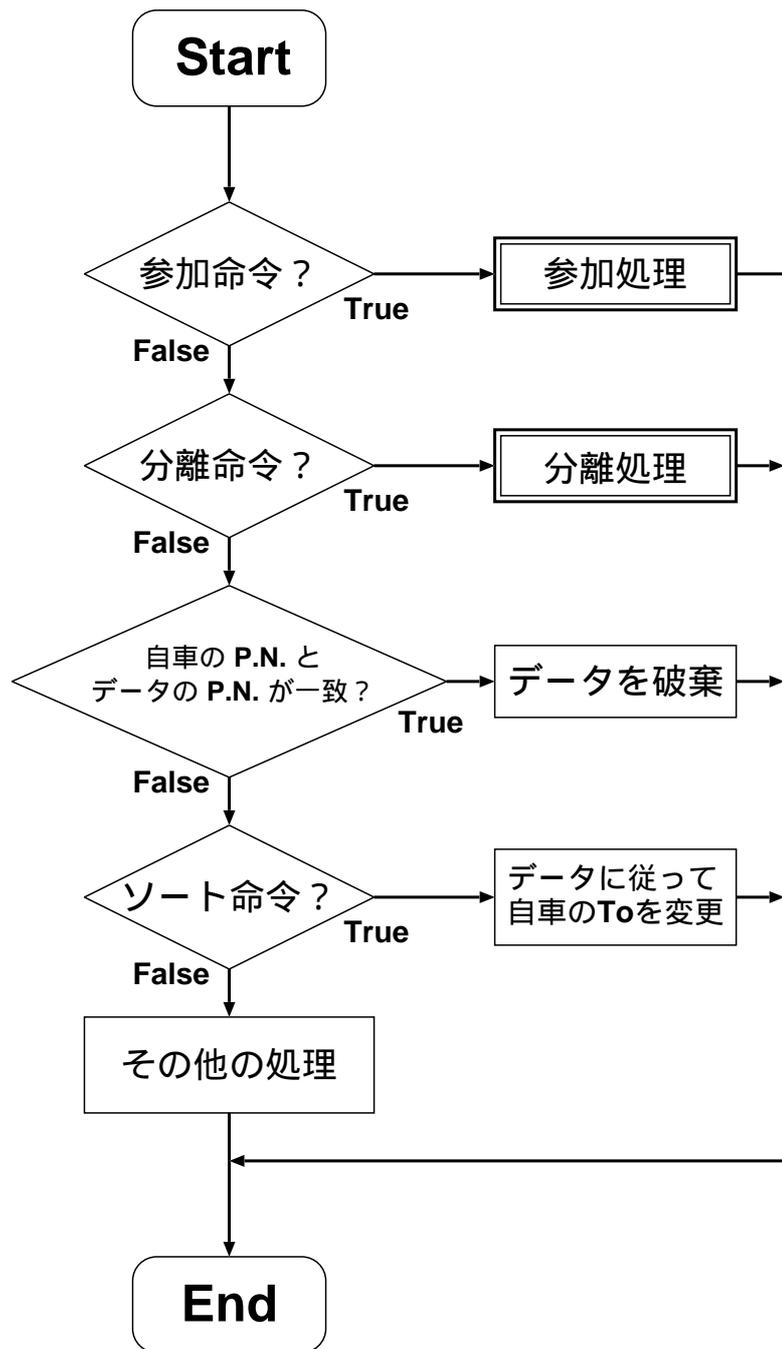


図 2.14: 受信データの処理アルゴリズム

2.4 シミュレーション実験

本研究で提案した車両間通信システムの有効性を確認するために、車両群間通信についてはコンピュータシミュレーションを、車両群内通信については数値計算を行った。その結果について以下に述べる。

2.4.1 車両群間通信

車両群間通信を用いて、10 台の車両が最終的に一つのリングネットワークを構成するシミュレーションを行った。

車両群間通信のデータ伝達方式としてスロット ALOHA 方式を使用した。複数の先頭車両が同時に送信してパケットが重複した場合にはそのパケットは無効とし、それ以外の場合には確実に伝達されることとした。送信パケットはスロット ALOHA の 3 スロット分とし、各車両群は約 20 スロット毎 (パケットが連続して重複しないように 2~2 スロット分ランダムに送信間隔を変更している) に自車両群の先頭車両の位置と車両群の長さおよび車両群の構成台数のデータを送信する。ここでは、リングネットワークの合流は隣接した車両群間において行われ、車両群内では車両群内通信が確立されているものとする。

図 2.15、図 2.16 にシミュレーション結果を示す。図 2.15 中の点はその車両が車両群間通信での送信状態にあることを表している。図 2.16 はシミュレーションの各段階におけるリングネットワークの状態、つまり車両群間通信によりリングネットワークが合流していく様子を表している。図 2.15 の a で、車両 6 がパケットを送信している。車両 6 に隣接している車両 7 がそれを受信し、車両 6 と合流するために返答する (図 2.15 の b)。このようにして合流が行われる (図 2.16 の A)。同様に、図 2.15 の c で車両 5 がパケットを送信すると、それに対して車両 6 が返答し (図 2.15 の d)、車両 5 と車両 6 の車両群 (車両 6 と車両 7 で構成) が合流する (図 2.16 の B)。図 2.15 の e では、車両 4、8、10 が同時に送信を行っている。送信が重複しているため、これらのパケットは無効となる。

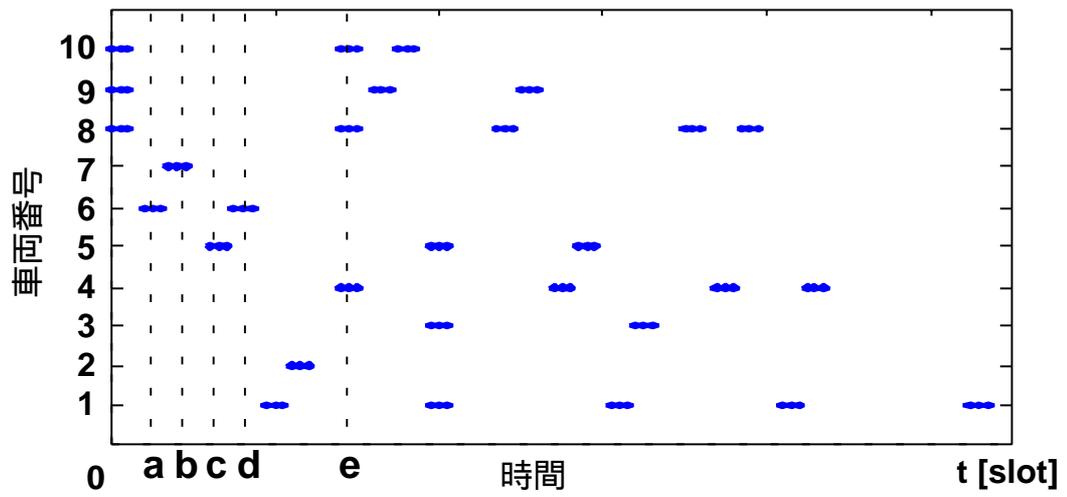


図 2.15: 車両群間通信シミュレーション結果 その1

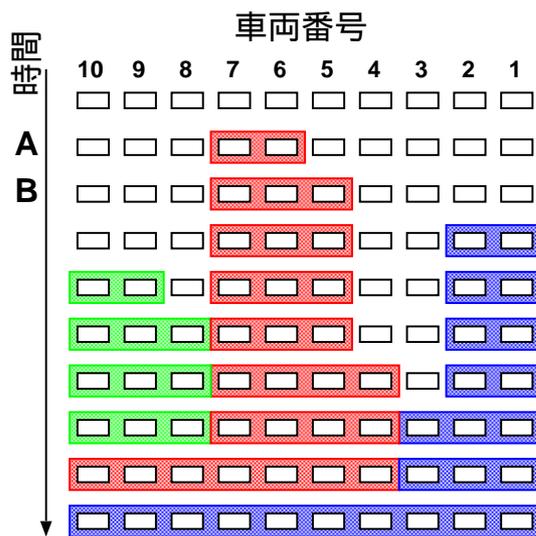


図 2.16: 車両群間通信シミュレーション結果 その2

2.4.2 車両群内通信

本研究で提案したデータ伝達アルゴリズムと自律分散同期プロトコル (TDMA)[19] を数値計算により比較した。数値計算に用いた各パラメータ値を表 2.1 に示す。

表 2.1: 数値計算に用いた各パラメータ値

パケット長	128bytes (1,024bits)
パケット間のガードビット	32bits
通信速度	1.544Mbps
interruption detective gap	1パケット送信時間の 1/10

まず、定常状態でのデータ伝達アルゴリズムについて評価を行った。図 2.17 は定常状態における車両群内の車両の自律分散同期プロトコルに対するデータ伝達アルゴリズムの単位時間あたりの送信回数比を示している。この結果から、本研究で提案するデータ伝達アルゴリズムは、車両群の構成台数が 15 台の時に自律分散同期プロトコルに比べて約 2 倍の性能を有していることがわかる。

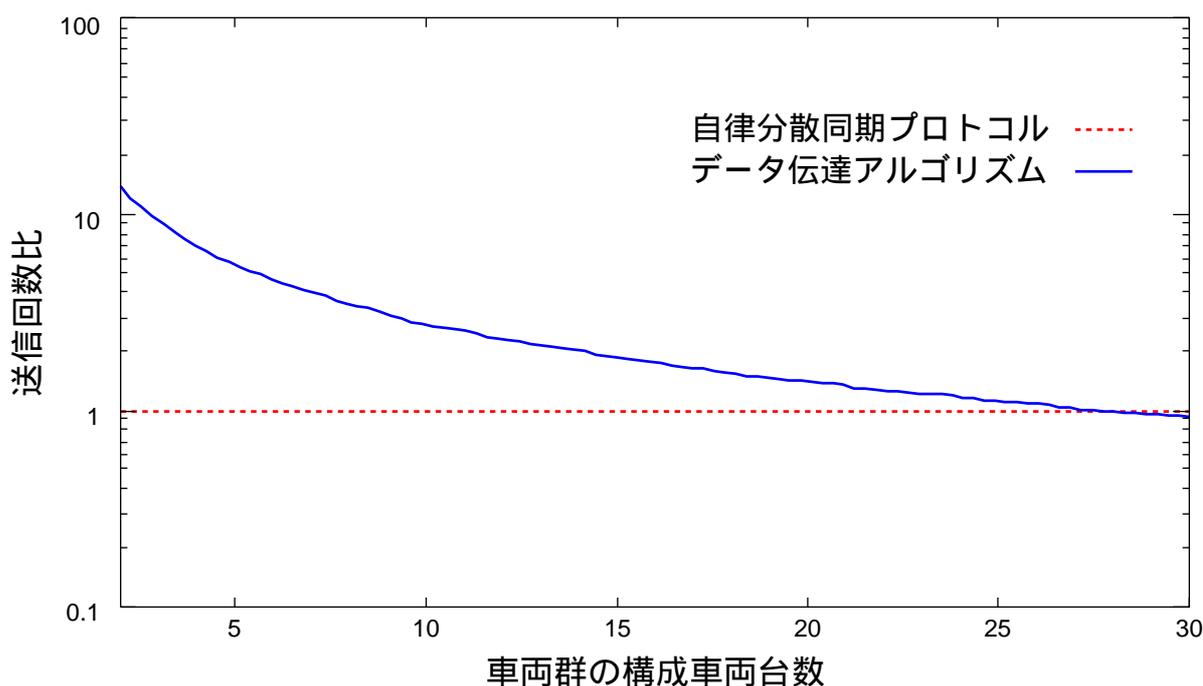


図 2.17: 定常状態における送信回数比

次に、割り込み時のデータ伝達アルゴリズムについて評価を行った。図 2.18 は、ある車両群に単独車両が合流する際に、ネットワークに参加するのに要する最大所要時間を示している。本アルゴリズムは、リングネットワークが一順するまでにネットワークにおける合流が完了する。そのため、自律分散同期アルゴリズムに比べて短時間に合流を完了することができる。

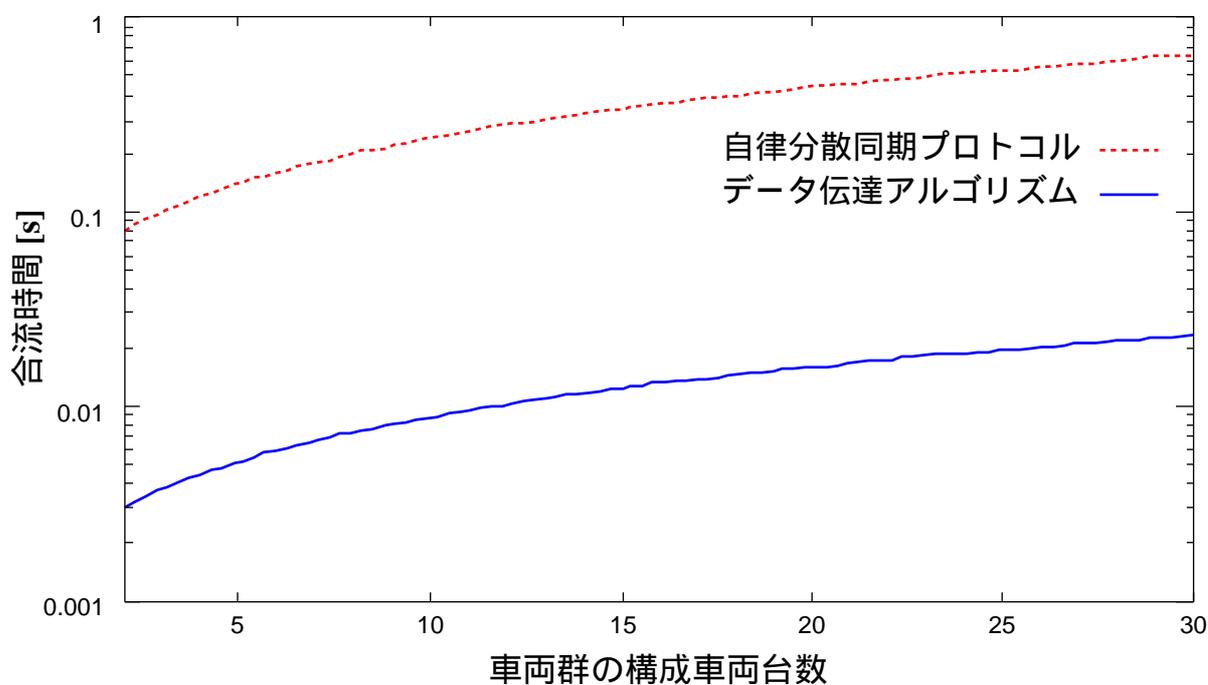


図 2.18: 単独車両がネットワークに合流するのに要する時間

2.5 まとめ

本章では，車両制御を目的とした車両間通信アルゴリズムを提案した．この車両間通信アルゴリズムは，リングネットワークをベースにした車両群内通信と車両群間通信の二つから構成されている．

本研究で提案するデータ伝達アルゴリズムは，例えば車両群の構成台数が 15 台の時に車両群の最大構成台数を 30 台に設定した TDMA と比較して約 2 倍の性能を有することを数値計算により確認した．