

## 移動ノード間協調による仮想信号機の実現手法

阿部 恵介<sup>†1</sup> 梶垣 博章<sup>†1</sup>

交差点における交通信号機は、互いに交わる動線を持つ車輛の衝突を回避し、安全な通行を実現する。物理的な交通信号機の設置、維持管理には多大なコストを要する。これを除去するために、車載コンピュータ間の協調によって仮想信号機を実現する手法がある。ここでは、同一の交差点に進入する複数の車載コンピュータが車車間通信を用いて速度、加速度、位置の情報を交換することによって、赤信号情報を生成、更新、削除する。この赤信号情報は、これを必要とする複数の車載コンピュータに分散配置される。本論文では、これを実現するための通信条件、プロトコルの概略を述べる。

### Virtual Traffic Signals by Cooperation among Vehicle-Mounted Mobile Computers

KEISUKE ABE<sup>†1</sup> and HIROAKI HIGAKI<sup>†1</sup>

A traffic signal at an intersection avoids collisions among vehicles whose lines of flow have points of intersection. Though it provides a safe driving environment, its setting and maintenance overhead is high. In order to avoid it, this paper discusses a method for virtual signals realized by cooperation among car-mounted computers. Here, red signal information is created based on mobility information, i.e. velocity, acceleration and location, of vehicles to an intersection. The red signal information is distributed to multiple vehicular computers and updated if necessary. This paper shows requirements for wireless communication devices and overviews the proposed protocol for the virtual traffic signal.

### 1. はじめに

高度道路交通システム (ITS) では、交通事故防止、危険回避、渋滞解消といった安全運転、安全走行を情報通信技術を用いて自動支援することを目的としている。ここでは、GPS を搭載したナビゲーション端末等の車載コンピュータを活用して、車載コンピュータをインフラネットワークに接続する、車載コンピュータを互いに接続するなどの方法によって、情報交換を可能とする [5]。路側等に設置された通信基地局と車載コンピュータとの間の路車間通信 (RVC: Road-Vehicle Communication) によって、道路交通情報通信システム (VICS) のような情報提供や自動料金収受システム (ETC) のような情報収集が実現されている。また、車載コンピュータ間の車車間通信 (IVC: Inter-Vehicle Communication) によって、走行支援道路システム (AHS) のような運転支援の実現が検討されている。

交差点は、異なる方向に延長する複数の道路が互いに交差する場所であり、異なる方向へ移動する車輛の動線が互いに交わるため、安全な通過のための支援が必要である。ここでは、交通信号機を設置することで車輛の衝突を回避するのが一般的である。交通信号機は、互いに交わる動線方向への通行を同時に許可せず、いずれかを赤信号によって一時的に禁止する。現在、交通信号機は日本全国に 20 万台、東京都内に 1 万 5 千台が設置されているが [8]、これらの設置、維持、管理には膨大な費用と労力を要する。2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災においては、被災地域においては交通信号機も多大な損傷を受け、被災地域以外においても計画停電等により交通信号機が停止されることにより、交通事故や交通渋滞が発生するなどの問題があった [7]。

そこで、本論文では、交差点に設置された物理的な信号機を廃し、車車間通信によって動的にソフトウェアで生成された仮想信号機によって、交差点を通過する車輛の安全運転を支援する方法を検討する。ここでは、衝突を発生し得る複数の車輛が存在する場合にはじめて車載コンピュータ間の通信によって仮想信号機を生成し、アドホックネットワーク技術によって交差点を通過する複数の車輛の車載コンピュータ間で生成した仮想信号機を調整、維持し、車輛の移動にともなって不要となった仮想信号機を破棄する。

### 2. 関連研究

車車間無線通信、すなわち車載コンピュータ間の直接通信を用いて安全運転支援を行なう手法として、出会い頭事故防止を目的とした研究開発がある [2, 4, 6]。ここでは、路地から大通りへと進入する車輛が大通りを通行する車輛の走行を妨げることなく安全に合流する

<sup>†1</sup> 東京電機大学未来科学部ロボット・メカトロニクス学科  
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

ことを実現することを目的としている．交差点付近にある建造物や通行する車輛そのものによって車輛の検出に失敗することを回避し，運転者に通行車輛の存在を通知するために，車載コンピュータの車車間通信によって車輛の存在を通知，警告する．交差点内における安全な走行を目指した論文に [1] がある．ここでは，他車輛によるシャドウイングを回避し，右直車輛間の衝突を回避する車車間通信手法について検討されている．

論文 [3] では，交差点における車輛通行の制御を車車間通信で実現する手法が提案されている．ここでは，信号情報を保持したノマディックエージェントを交差点近辺のいずれかの車載コンピュータに保持し続けることによって，物理的な信号機を設置せず，ソフトウェアによって実現された仮想的な信号機によって車輛の進行と停止を指示し，衝突事故を回避するものである．車輛が交差点近辺に存在する場合にのみ仮想的な信号機を生成して衝突事故を回避する点は，本論文も同様のアプローチをとる．一方，ノマディックエージェントによる手法は仮想信号機の状態を単一の車載コンピュータに保持し，信号機の状態の取得と車輛の交差点への進入による信号状態の更新をこの車載コンピュータで集中処理するのに対して，本論文で提案する手法は，赤信号状態情報（期間と方向）を分散的に管理し，交差点への車輛の進入と退去に対して赤信号状態情報を分散的な合意プロトコルによって更新する．

### 3. 提案手法

本論文では，交差点に物理的な交通信号機を設置せず，各車輛に搭載された車載コンピュータによる車車間通信を用いて仮想信号機を実現することで，交通信号機の設置，維持管理コストを要することなく，安全な通行を可能とする．仮想信号機の運転者へのインタフェースには，新幹線の運転室内に表示される運行指示（図 1）のようなデバイスを想定する．例えば，図 2 のようにナビゲーションシステムの画面に前方交差点における仮想信号機の状態（青信号/赤信号）を表示することが考えられる．仮想信号機は，交差点に進入する車輛が複数存在する場合に必要となる．車輛が単一である場合には，仮想信号機は存在せず，その車輛に対しては青信号が指示されていることと等価である．したがって，仮想信号機とは，車輛の衝突を回避するために赤信号情報を生成，更新するものである．赤信号情報とは，赤信号の開始時刻  $b_r$ ，終了時刻  $e_r$ ，進行方向  $direction$  の 3 項組  $(b_r, e_r, direction)$  であり，これを交差点に進入する複数の車載コンピュータ間で共有することが必要となる．なお，以下の各節においては，車載コンピュータを移動ノードと記す．また，移動ノードが通行する 2 つの直線路が交差点で直交する場合のみを想定して議論する．

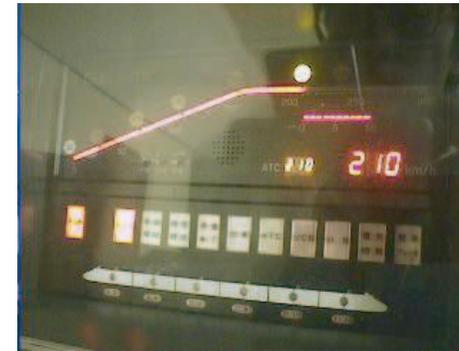


図 1 新幹線運転室内の運行指示



図 2 仮想信号機のインタフェース

#### 3.1 仮想信号機の生成

図 3 に示すように，移動ノード  $M_x$  と  $M_y$  が交差点  $I$  で直交する直線路を  $I$  に近づく方向に移動しているものとする．ここで， $M_x$  と  $M_y$  の速度を  $v_x$ ， $v_y$ ，減速時の加速度を  $a_x$ ， $a_y$  とする．また，交差点からの距離をそれぞれ  $d_x := |M_x I|$ ， $d_y := |M_y I|$  とする．このとき，移動ノード  $M_i$  ( $i = x, y$ ) が停止するのに要する時間は  $v_i/a_i$  であり，停止までの移動距離は  $v_i(v_i/a_i) - a_i(v_i/a_i)^2/2 = v_i^2/2a_i$  である．

一方，移動ノードには移動方向の長さ（車輛であれば車輛長）を持ち，移動ノードが互いにいずれかの場所を接触させることによって衝突が発生する．衝突をより安全に回避するためには，移動ノードの長さに加えて図 4(a) のように移動方向の長さにはマージンを加える必

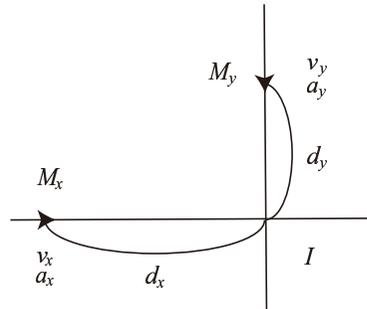
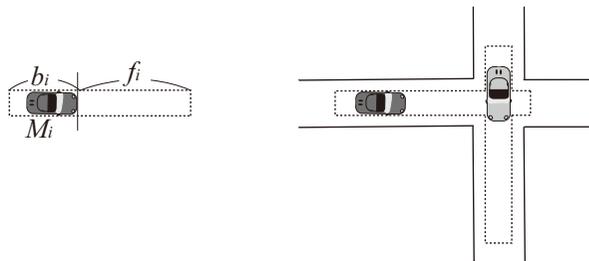


図 3 交差点を通過する移動ノード

要がある．ここでは，移動ノード  $M_i$  ( $i = x, y$ ) の前方方向に  $f_i$ ，後方方向に  $b_i$  のマージンを加えている．そして，移動ノード間でマージン部分を加えたいずれかの場所が接触することを衝突として衝突回避を議論することとする．例えば，図 4(b) の位置に移動ノードがある場合は衝突発生となる．したがって，移動ノード  $M_i$  ( $i = x, y$ ) の交差点通過時間は， $[s_i, e_i] := [(d_i - f_i)/v_i, (d_i + b_i)/v_i]$  となることから，移動ノード  $M_x$  と  $M_y$  の衝突条件は以下の式で与えられる．



(a) 移動ノードモデル

(b) 衝突

図 4 移動ノードモデルと衝突

[移動ノード衝突条件]

移動ノード  $M_x$  と  $M_y$  は， $s_x \in [s_y, e_y]$  または  $s_y \in [s_x, e_x]$ <sup>\*1</sup> を満足する場合に衝突する．これは以下のように表すこともできる．

$$(e_y - s_x)(s_x - s_y) = ((d_y + b_y)/v_y - (d_x - f_x)/v_x)((d_x - f_x)/v_x - (d_y - f_y)/v_y) \geq 0$$

または

$$(e_x - s_y)(s_y - s_x) = ((d_x + b_x)/v_x - (d_y - f_y)/v_y)((d_y - f_y)/v_y - (d_x - f_x)/v_x) \geq 0$$

□

この衝突条件を満足し， $M_x$  の方が  $M_y$  よりも停止までの時間が短い場合，すなわち， $v_x/a_x < v_y/a_y$  である場合には， $M_x$  に青信号， $M_y$  に赤信号を通知して  $M_y$  を停止させ， $M_x$  に  $I$  を通過させる． $M_y$  を  $I$  で停止させることができる最小の  $d_y$  は  $v_y^2/a_y$  である．このとき，もし  $M_y$  を停止させずに  $I$  を通過させるならば，その通過時間は  $[(v_y^2/2a_y - f_y)/v_y, (v_y^2/2a_y + b_y)/v_y] = [v_y/2a_y - f_y/v_y, v_y/2a_y + b_y/v_y]$  となる．この場合， $M_x$  と  $M_y$  が  $I$  で衝突する条件は， $((d_x + b_x)/v_x - (v_y/2a_y - f_y/v_y))((v_y/2a_y - f_y/v_y) - (d_x - f_x)/v_x) \geq 0$  または  $((v_y/2a_y + b_y/v_y) - (d_x - f_x)/v_x)((d_x - f_x)/v_x - (v_y/2a_y - f_y/v_y)) \geq 0$  である．これを  $d_x$  について解くと， $(v_y/2a_y - f_y/v_y)v_x - b_x \leq d_x \leq (v_y/2a_y + b_y/v_y)v_x + f_x$  となる．すなわち， $d_x < (v_y/2a_y - f_y/v_y)v_x - b_x$  である場合には， $M_x$  が先に  $I$  を通過することによって衝突が回避され， $d_x > (v_y/2a_y + b_y/v_y)v_x + f_x$  である場合には， $M_y$  が先に  $I$  を通過することによって衝突が回避される． $(v_y/2a_y - f_y/v_y)v_x - b_x \leq d_x \leq (v_y/2a_y + b_y/v_y)v_x + f_x$  である場合には衝突を回避するために  $M_y$  を停止させるが，これを実現するためには  $M_x$  と  $M_y$  が通信できなければならない．したがって，無線信号到達距離  $R$  は， $R \geq ((v_y^2/a_y)^2 + ((v_y/2a_y + b_y/v_y)v_x + f_x)^2)^{1/2} + \delta(v_x, v_y)$  を満足する必要がある．ここで  $\delta(v_x, v_y)$  は，後述する仮想信号生成プロトコル実行時間に短縮する  $M_x$  と  $M_y$  との間の距離である．同様に  $M_y$  の方が  $M_x$  よりも停止までの時間が短い場合，すなわち， $v_y/a_y < v_x/a_x$  である場合には， $M_y$  が青信号， $M_x$  を赤信号を通知して  $M_x$  を停止させ， $M_y$  に  $I$  を通過させる．これを実現するためには， $R \geq ((v_x^2/a_x)^2 + ((v_x/2a_x + b_x/v_x)v_y + f_y)^2)^{1/2} + \delta(v_y, v_x)$  を満足する必要がある．

[仮想信号機実現のための通信条件]

$v_x = v_y = v$ ， $a_x = a_y = a$ ， $f_x = f_y = f$ ， $b_x = b_y = b$  とすると以下のようにまとめられる．移動ノードの衝突を回避する仮想信号機実現のためには移動ノードの無線信号到達距離  $R$  が以下の条件を満たさなければならない．

\*1  $e_x \in [s_y, e_y]$  または  $e_y \in [s_x, e_x]$  としてもよい．

$$R \geq (5(v^2/a)^2/4 + ((v^2/a)(b+f) + (b+f)^2)^{1/2})^2$$

上記の条件を満足する無線信号到達距離  $R$  の移動ノード  $M$  は、自身の ID と次に通過する交差点の ID およびこの交差点への進入方向 (東西または南北) からなる 3 項組  $\langle M, I, direction \rangle$  を含むビーコンメッセージを継続的に送信する (図 5)。

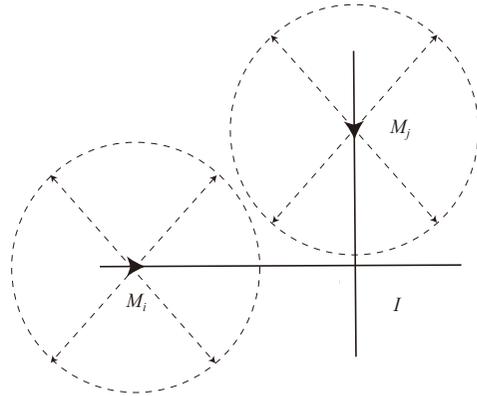


図 5 隣接移動無線ノードのビーコンメッセージ送信

移動ノード  $M_i$  と  $M_j$  との距離が  $R$  以下になると、互いにこのビーコンメッセージが受信可能となる (図 6)。ここで、互いの送信するビーコンメッセージに含まれる 3 項組の交差点 ID が等しく、侵入方向が異なるならば、仮想信号機を生成する。生成にあたっては、それぞれが自身の ID、速度、減速時の加速度、交差点までの距離からなる 4 項組  $\langle M, v, a, d \rangle$  を含む信号生成要求メッセージ  $SCreq$  を送信する (図 7)。移動ノード  $M_j$  から  $SCreq$  を受信した移動ノード  $M_i$  は、受信した  $M_j$  の移動速度  $v_j$ 、減速時の加速度  $a_j$ 、交差点までの距離  $d_j$  および自身の移動速度  $v_i$ 、減速時の加速度  $a_i$ 、交差点までの距離  $d_i$  から先に述べた衝突条件を満足するかを判定する。もし衝突が発生しないのであれば、 $M_i$  と  $M_j$  との間では仮想信号機を生成しない。一方、衝突条件を満足するのであれば、東西か南北のいずれかの方向に対して赤信号を生成する。すなわち、 $v_i/a_i < v_j/a_j$  である場合、 $M_i$  が交差点  $I$  を通過する時間  $[v_i/2a_i - f_i/v_i, v_i/2a_i + b_i/v_i]$  は  $M_j$  の進行方向  $direction_j$  に対する赤信

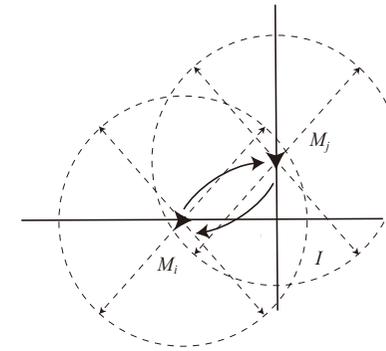


図 6 仮想信号機生成開始

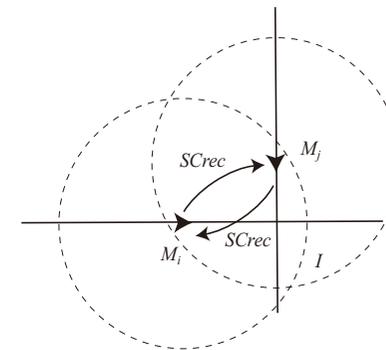


図 7 信号生成要求メッセージの交換

号を生成することによって、 $M_i$  が  $I$  を通過する間  $M_j$  を停止させる。逆に、 $v_i/a_i > v_j/a_j$  である場合、 $M_j$  が交差点  $I$  を通過する時間  $[v_j/2a_j - f_j/v_j, v_j/2a_j + b_j/v_j]$  は  $M_i$  の進行方向  $direction_i$  に対する赤信号を生成することによって、 $M_j$  が  $I$  を通過する間  $M_i$  を停止させる。

$M_i$  と  $M_j$  は、同一のデータ、同一のアルゴリズムを用いて赤信号の設定を計算するため、同一の結果を導くが、確認のために赤信号開始時刻  $b_r$ 、終了時刻  $e_r$ 、設定方向  $direction_r$  からなる 3 項組  $\langle b_r, e_r, direction_r \rangle$  を含む信号生成確認メッセージ  $SCconf$  を送信する (図

8) . *SCconf* を受信した移動ノード *M* は、自身の生成した赤信号と比較し、それらが等しい場合は信号生成肯定応答メッセージ *SCack* を送信する (図 9) . 一方、自身の生成した信号とは異なる赤信号が通知された場合には、信号生成否定応答メッセージ *SCnack* を送信する (図 10) . 送受信したメッセージがいずれも *SCack* である場合には、生成した赤信号に従って *I* を通過または赤信号期間が経過するまで停止する . また、送受信したメッセージのいずれかもしくは両方が *SCnack* である場合には、両赤信号を有効として *I* で停止する .

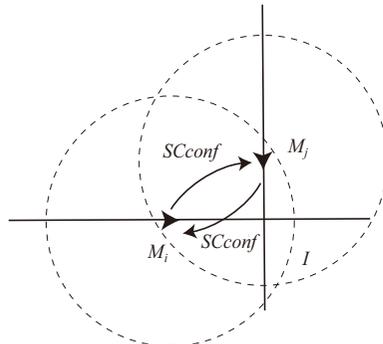


図 8 信号生成確認メッセージの交換

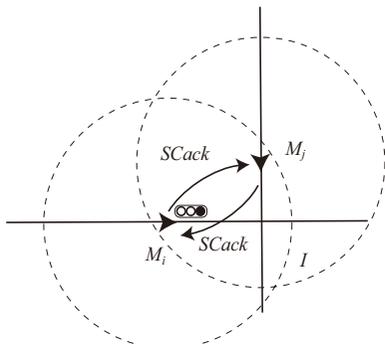


図 9 信号生成肯定応答メッセージの交換

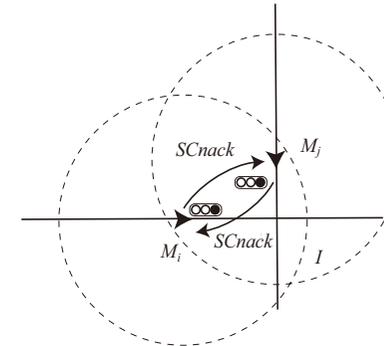


図 10 信号生成否定応答メッセージの交換

### 3.2 仮想信号機の維持

前節で示したように、交差点 *I* における仮想信号機は、異なる方向から *I* へ進入する 2 台の移動ノード間の車車間通信によって生成される . ここで、2 つの直線路が *I* で直交する場合には、異なる仮想信号が同時に生成されることはない . 図 11 に示すように、移動ノード *M<sub>n</sub>*、*M<sub>s</sub>*、*M<sub>e</sub>*、*M<sub>w</sub>* がそれぞれの方向から *I* へ進入するとき、*M<sub>n</sub>* と *M<sub>w</sub>* および *M<sub>s</sub>* と *M<sub>e</sub>* がそれぞれビーコンメッセージを受信して異なる仮想信号を生成したとするならば、 $d_n^2 + d_w^2 \leq R^2$  かつ  $d_s^2 + d_e^2 \leq R^2$  である . このとき  $d_n^2 + d_e^2 > R^2$  かつ  $d_s^2 + d_w^2 > R^2$  とはならないことから、*M<sub>n</sub>* と *M<sub>e</sub>* もしくは *M<sub>s</sub>* と *M<sub>w</sub>* は互いに無線信号到達範囲に含まれており、ビーコンメッセージの受信が可能である . 以上の考察から、それぞれの方向から進入する移動ノードについては、生成済みの仮想信号を保持する移動ノードと順次通信可能となる .

移動ノード *M<sub>x</sub>* と *M<sub>y</sub>* によって生成された交差点 *I* の仮想信号機が、 $v_x/a_x < v_y/a_y$  を満たすことによって *M<sub>x</sub>* が *I* を通過する期間に *M<sub>y</sub>* を停止させる赤信号情報 *RS* を含むものとする . このとき、*M<sub>x</sub>* と反対方向から *I* に進入する移動ノード *M'<sub>x</sub>* が *M<sub>y</sub>* と通信可能となったとする (図 12) . この場合、 $v'_x/a'_x < v_y/a_y$  であるならば、*M<sub>y</sub>* に対する赤信号を維持する . ただし、*M<sub>y</sub>* は *M<sub>x</sub>* と *M'<sub>x</sub>* の両方が *I* を通過する時間だけ停止するように停止期間を拡大する . 一方、 $v'_x/a'_x \geq v_y/a_y$  であるならば、*M'<sub>x</sub>* を停止させて *M<sub>y</sub>* に *I* を通過させる新たな赤信号情報を生成し *I* の仮想信号機に付加する .

逆に、*M<sub>y</sub>* と反対方向から *I* に進入する移動ノード *M'<sub>y</sub>* が *M<sub>x</sub>* と通信可能となったとする (図 13) . この場合、 $v_x/a_x < v'_y/a'_y$  であるならば、*M<sub>y</sub>* に対する赤信号を維持し、*M'<sub>y</sub>*

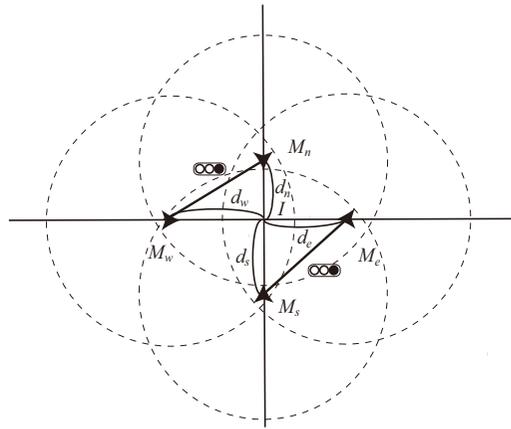


図 11 4 方向から進入する移動ノードと仮想信号機

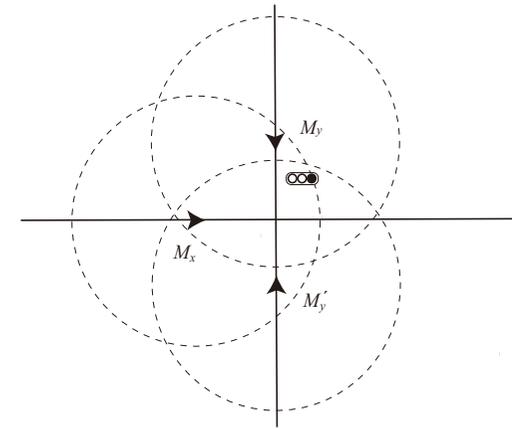


図 13 仮想信号生成済み交差点への移動ノード進入 (2)

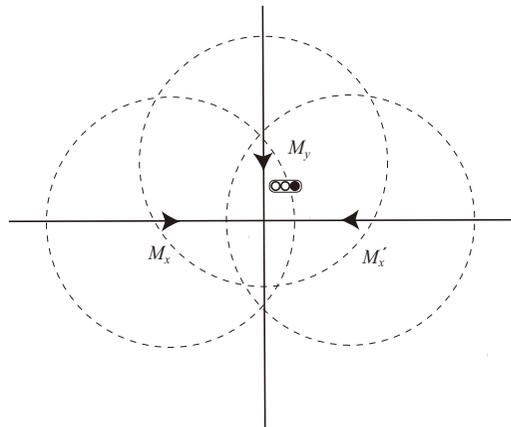


図 12 仮想信号生成済み交差点への移動ノード進入 (1)

も停止して  $M_x$  に  $I$  を通過させる。一方、 $v_x/a_x \geq v'_y/a'_y$  であるならば、 $M'_y$  を  $M_x$  よりも先に  $I$  を通過させるために新たな赤信号情報  $RS'$  を生成する。 $RS'$  では、 $M'_y$  が  $I$  を通過する時間  $M_x$  を停止させる。ここで、もし  $RS'$  の期間中に  $M_y$  が  $I$  へ到達可能であるならば、 $M_x$  の停止期間を延長して  $M_y$  をも  $I$  を通過させることが望ましい。そこで、 $RS$  を破棄し、 $M_y$  が  $I$  を通過する時間  $M_x$  を停止させる新たな赤信号情報  $RS''$  を生成する。

このように、仮想信号を共有している移動ノードと他の移動ノードが新たに通信可能となった場合には、現在の赤信号情報の維持、拡張、破棄および赤信号情報の追加といった処理を行なう。

### 3.3 仮想信号機の消滅

交差点  $I$  を通過した移動ノード  $M$  は、 $M$  の仮想信号機を必要としないため、 $I$  の赤信号情報を破棄する。以降、交差点  $I$  に関する制御メッセージを受信してもそれを処理せずに破棄する。こうして、維持されていた仮想信号機をすべての無線ノードが通過すると、その赤信号情報を保持する移動ノードが存在しなくなり、仮想信号機が消滅する。

## 4. まとめと今後の課題

本論文では、物理的は交通信号機を用いず、車車間無線通信を用いた車載コンピュータ間の協調によって生成、更新、消滅される仮想信号機について述べた。交差点で直交する直線路を対象として、仮想信号機生成に必要な無線信号到達距離を示し、仮想信号生成プロトコルを設計した。生成された仮想信号機は、対象交差点方向へ通行する車載コンピュータに順次共有され、必要に応じて赤信号情報の更新がなされる。また、赤信号情報を共有するすべての車載コンピュータが交差点を通過することによって、仮想信号機は消滅する。仮想信号機の維持について、新たな方向から交差点への進入する車載コンピュータによる更新については議論したものの、既に仮想信号機を保持している車載コンピュータに追従する車載

コンピュータ群，すなわち，車載コンピュータ列に対する対処については議論していない．ここでは，無線マルチホップ通信によって赤信号情報を拡散するとともに，列長に応じて各方法の通行量の平等性を考慮した適切な赤信号時間への更新を実現することが求められる．また，間隔の広くない交差点列においては，車輛の通行を妨げないための仮想信号機間協調を実現する必要もあり，検討を進めていく．

### 参 考 文 献

- 1) Dogan, A., Korkmaz, G., Liu, Y., Ozguner, F., Ozguner, U., Redmill, K., Takeshita, O. and Tokuda, K., "Evaluation of Intersection Collision Warning System Using an Inter-Vehicle Communication Simulator," Proceedings of the IEEE Intelligent Transport System Conference, pp.1103-1108 (2004).
- 2) Yang, X., Liu, J. and Zhao, F., "A Vehicle-to-Vehicle Communication Protocol for Cooperative Collision Warning," Proceedings of the 1st International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services, pp.114-123 (2004).
- 3) 久保田, 屋代, "交差点における NA を用いた仮想インフラの提案," 情処研報, Vol.2007-ITS-30, No.5, pp.27-32 (2007).
- 4) 茂木, テープウィロージャナボン, 堀内, "車々間通信のためのパケット中継制御方式の提案," 電子情報通信学会論文誌, Vol.91-A, No.1, pp.95-104 (2008).
- 5) 野原, 遠藤, 堀松, 難波, 間瀬, 小花, "多様な無線メディアを用いたユビキタス ITS の実現に向けて," 情報処理, Vol.50, No.1, pp.64-69 (2009).
- 6) 羽鳥, 岡田, 重野, "車々間通信による出会い頭事故防止支援を目的としたプロトコルの提案," 情処研報, Vol.2008-ITS-33, No.1, pp.1-6 (2008).
- 7) 朝日新聞, "信号消えた県道, 群馬で死亡事故 計画停電中" 2011 年 3 月 17 日, 朝刊, p.30 (2011).
- 8) 内閣府, "平成 23 年交通安全白書," 日経印刷, p.24 (2011).