

第7章 車車間通信とDGPSを利用した周囲 車両相対位置情報の獲得手法

この章では、DGPSを利用して獲得した絶対位置情報を車車間通信で送受信することにより、周囲車両の相対位置情報を獲得する手法を提案し、実験により獲得した相対位置情報の精度を評価する。

車車間通信とDGPSを利用して、周囲車両の相対位置を計測することの利点は、車車間通信が行われている限り非隣接かつ全方向の車両の相対位置を検出できる点である、この利点により、

- ・合流・離脱制御の効率化、安全化
- ・横方向の車両追従制御の効率化、安全化
- ・センサの冗長化

等に適用できる。以下では、上記の応用技術について説明する。

自律走行車やプラトーンに車両が合流する場合、合流車直後の車両の車間距離センサで検出した車間距離はステップ状に短くなる。この場合、合流車直後の車両は急激な減速が余儀なくされ、交通流の不安定化を招くことが予想できる。しかし、合流以前に合流車と合流車付近の車両の間で車車間通信を確立し、合流車が合流する位置を予測できれば、安定に合流を行うことが期待できる。本研究の第10章で提案するプラトーンの合流制御および離脱制御では、車間距離センサの代わりに、この手法で獲得した相対位置情報を利用してプラトーン内の任意の場所への合流や車間距離変化を伴わない離脱を実現している。

横方向の車両追従制御とは、同軸制御ともよばれ、車両が先行車の走行軌跡上を走行するように制御を行うものである[19, 20]。従来の車両追従制御では、制御車両直前の先行車の相対位置を検出して、操舵制御を行ってきた。この方式を複数の車両に適用した場合、先行車の走行軌跡に対する追従誤差が蓄積が問題となる。また、直前の車両との車間距離が操舵制御における注視距離となるため、短車間距離での高速走行が困難となる。しかし、全ての車両が直前の先行車ではなく、車群先頭車の絶対位置情報を獲得して、その軌跡に追従するように同軸制御を行えば、追従誤差の蓄積および車間距離の問題を同時に解決することができる。

センサの冗長化については、車間距離センサや、側方車両検出センサとの冗長系が構成できる。センサが故障した場合に切り替えることや、センサフュージョンのアルゴリズムを利用して、計測精度、信頼性の向上を図る[166]ことが期待できる。

上記の応用技術を実現するにあたり、相対位置計測で要求されることは以下の通りである。

- ・相対位置情報の精度
- ・相対位置情報のリアルタイム性（遅れないこと）

・相対位置情報の短サンプル周期での更新

この章では、上記要求を満たす相対位置情報の獲得手法として、第6章で提案した推定手法で獲得した絶対位置情報を車車間通信で送受信する方式を提案し、その方式による計測結果と走査式レーザー投受光器を利用した計測結果との比較を行う。

この章の流れを図7.0.1に示す。以下の各節では、この流れに従い相対位置の計測手法の検討、提案する相対位置計測手法、実験による評価について説明する。

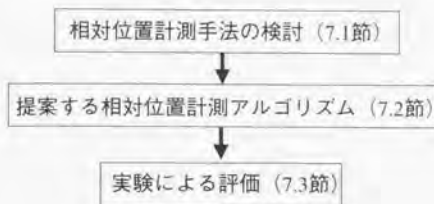


図7.0.1 第7章の流れ

7.1 相対位置計測手法の検討

この節では、車車間通信とDGPSを利用した周囲車両の相対位置計測手法を検討する。周囲車両の相対位置情報を合流・離脱制御、横方向の車両追従制御、車間距離センサとの冗長化等で利用するために、相対位置計測で要求されることは以下の通りである。

- ・相対位置情報の精度
- ・相対位置情報のリアルタイム性（遅れないこと）
- ・相対位置情報の短サンプル周期での更新

相対位置計測の手法として考えられる方式を以下に挙げ、それぞれについて考察する。

- 方式1：DGPSにより計測した絶対位置情報をそのまま車車間通信で送受信する。
- 方式2：DGPSにより計測した絶対位置情報にタイムスタンプを加え、車車間通信で送受信する。
- 方式3：DGPSにより計測した絶対位置情報にタイムスタンプを加え、速度、ヨーレート等の状態量を加えて、車車間通信で送受信する。
- 方式4：車両運動状態量を利用して処理した絶対位置情報を、車車間通信で送受信する。
- 方式5：車両運動状態量を利用して処理した絶対位置情報に速度、ヨーレートの状態量を加え車車間通信で送受信する。

方式1は、最も簡単な手法であるが、相対位置情報の獲得周期がDGPS受信機のサンプル周期（例えば200[ms]）に依存するため、短サンプル周期での相対位置情報獲得ができない。さらに、各車両のDGPSの位置計測タイミングが同期していない場合、大き

な計測誤差が生じる欠点がある。同期している場合でも、得られた相対位置情報は、DGPSの信号処理、データ転送に起因する遅れと車車間通信に起因する遅れを含むことになる。また、計測周期のずれ（例えば時刻 k の車両Aの絶対位置と時刻 $k-1$ の車両Bの絶対位置を比較してしまう場合がある）があっても検出することができない。

方式2は、方式1にタイムスタンプを加えることにより、DGPSの計測周期のずれを検出できるが、それ以外の方式1の欠点を受け継ぐ。

方式3は、方式2に状態量を加えることにより、DGPSの位置計測タイミングが同期していない場合、非同期分の影響を補正することができる。また、送信された周囲車両の状態量を利用して短サンプル時間の変位を推定すれば、サンプル周期の補間や遅れの補償も可能である。しかし、この方式は周囲車両の増大と共に計算の負荷が増大する欠点をもつ。

方式4では、DGPSと車両運動状態量（速度、ヨーレート、横滑り角）を利用して推定した絶対位置情報を送受信する。絶対位置情報の推定は、第6章で提案した絶対位置の推定手法を利用する。この推定手法を利用することで以下の利点が得られる。

- ・カルマンフィルタによる絶対位置情報の精度の向上
- ・カルマンフィルタによる高精度な車両方位角の獲得
- ・DGPSの信号処理、データ転送に起因する絶対位置情報の遅れの補償
- ・DGPSのサンプル周期の補間による短いサンプル周期（例えば50[ms]）での絶対位置情報の獲得
- ・推定した絶対位置情報が、自車両の運動制御に利用できる（例えば、第8章、第9章で提案する横方向制御）

推定した絶対位置情報を車車間通信で送受信し、同じく別の車両上で推定された絶対位置と比較することにより、高精度、短サンプル周期の相対位置情報を獲得することが可能となる。しかし、この方式で得られた相対位置情報は車車間通信に起因する遅れを含むものとなる。

方式5は、方式4に状態量を加えることにより、車車間通信に起因する遅れを補償することができる。この場合、車車間通信に起因する遅れ時間が既知である必要がある。車車間通信に起因する遅れが変動する場合は、タイムスタンプを加えて送受信すれば遅れを算出し、既知とすることが可能となる。

本研究では、この節の冒頭で述べた要求事項を全て満たすものとして方式5を採用する。次節では、方式5による相対位置の計測手法について説明する。

7.2 相対位置計測手法

この節では、第7.1節で検討した方式5について、相対位置計測手法の概要を説明する。図7.2.1に提案する相対位置計測アルゴリズムの概図を示す。この図で X_{ai} 、 Y_{ai} 、 θ_{ai} が第6章で提案した推定手法を利用して獲得した絶対位置情報に相当する。以下に

この手法の概要を説明する。

図7.2.1中の X_m , Y_m はDGPSによって計測した絶対位置である。この情報と車両運動状態量(速度 V , ヨーレート γ , 横滑り角 β)を利用したカルマンフィルタにより, DGPS受信機によって計測した絶対位置情報を補正し, 情報の精度と連続性の向上を図り, 同時に車両の方位角を推定する(第6.2節参照)。

図7.2.1中の X_k , Y_k , θ_k は, カルマンフィルタによって推定された絶対位置および方位角である。この値は, DGPSの信号処理時間およびデータ転送時間に起因する遅れを含む。本研究では, 遅れ時間分の車両変位を車両運動状態量により推定して足し合わせることで, 遅れを補償した絶対位置および方位角を算出している(第6.3節参照)。

図7.2.1中の X_{kc} , Y_{kc} , θ_{kc} は, 遅れを補償した絶対位置情報および方位角である。この情報のサンプル周期は, DGPSのサンプル周期 T_d (本研究では200[ms]を想定している)と等しい。これは, 車両運動制御やセンサの冗長化に利用するためには十分短いとは言えない。そこで, 車両運動状態量を利用した短サンプル周期の車両変位情報を利用して絶対位置情報の補間を行なう(第6.3節参照)。

図7.2.1中の X_{d1} , Y_{d1} , θ_{d1} は, 車両運動状態量を利用して推定した絶対位置および方位角である。この情報は短サンプル周期 T_e (本研究では50[ms]を想定している)で積分的に更新される。この情報は, 積分誤差の蓄積と初期誤差の影響を受けるので, X_{kc} , Y_{kc} , θ_{kc} を利用して逐次補正を行う。 X_{kc} , Y_{kc} , θ_{kc} と X_{d1} , Y_{d1} , θ_{d1} を比較して, 補正值 ΔX_c , ΔY_c , $\Delta \theta$ を算出し, X_{d1} , Y_{d1} , θ_{d1} に足し合わせることで, 絶対位置および方位角の推定値の初期値誤差を時間と共に減少し, かつ精度を維持することができる(第6.3節参照)。

図7.2.1中の X_{d2} , Y_{d2} , θ_{d2} および V_2 , γ_2 は車車間通信経路で受信した周囲車両の絶対位置, 方位角, 車両運動状態量である。この情報は, 車車間通信に起因する遅れ T_{com} を含む。

図7.2.1中の r_{x12} , r_{y12} , $r_{\theta12}$ は車両座標系(車両の縦方向を x 軸としている)における周囲車両の相対位置および相対ヨー角である。各値は以下の式により算出している。

$$r_{x12} = (X_{d2c} - X_{d1})\cos(-\theta_{d1}) - (Y_{d2c} - Y_{d1})\sin(-\theta_{d1}) \quad \cdots \cdots (7.2.1)$$

$$r_{y12} = (X_{d2c} - X_{d1})\sin(-\theta_{d1}) + (Y_{d2c} - Y_{d1})\cos(-\theta_{d1}) \quad \cdots \cdots (7.2.2)$$

$$r_{\theta12} = \theta_{d2c} - \theta_{d1} \quad \cdots \cdots (7.2.3)$$

ここで, X_{d2c} , Y_{d2c} , θ_{d2c} は, 車車間通信に起因する遅れを補償した周囲車両の絶対位置および方位角情報であり, 以下の式により算出している。

$$X_{d2c} = X_{d2} + V_2 \cdot T_{com} \cdot \cos(\theta_{d2} + \gamma_2 \cdot T_{com} / 2) \quad \cdots \cdots (7.2.4)$$

$$Y_{d2c} = Y_{d2} + V_2 \cdot T_{com} \cdot \sin(\theta_{d2} + \gamma_2 \cdot T_{com} / 2) \quad \cdots \cdots (7.2.5)$$

$$\theta_{d2c} = \theta_{d2} + \gamma_2 \cdot T_{com} \quad \cdots \cdots (7.2.6)$$

以上により, 周囲車両の相対位置情報を獲得できる。

車車間通信に起因する遅れが既知であれば、周囲車両側で X_{d2c} , Y_{d2c} , θ_{d2c} を演算し送信すれば、状態量を送信することなく相対位置の計測が可能となる。しかし、状態量を受信すれば、車車間通信の周期が T_c よりも長い場合に、状態量を利用して周囲車両の絶対位置および方位角情報を補間することができる。例えば、車車間通信の周期が 100 [ms] である場合に周期 50 [ms] で周囲車両の位置情報を獲得することを考える。この場合、周囲車両の情報を受信した 50 [ms] 後の周囲車両の絶対位置および方位角は、上式の T_{com} に 0.05 をを加算することにより推定できる。

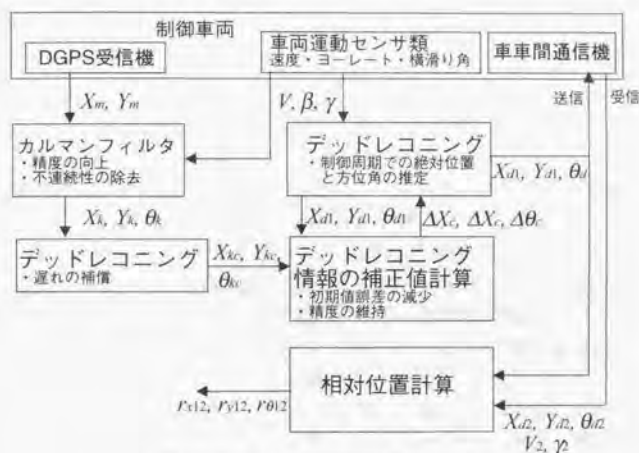


図 7.2.1 周囲車両の相対位置計測手法

7.3 実験による評価

この節では、第 7.2 節で提案した相対位置計測手法の評価するための実験とその結果について説明する。以下の各項では、実験システム、走査式レーザー投受光器による相対位置計測方法、実験の方法、実験の結果について説明する。

7.3.1 実験システム

実験システムは、第 6.6 節の絶対位置推定のための実験システムに車車間通信用の無線モデムを付加したものを 2 台分（日産インフィニティ Q45 と日産セフィーロ）用意したものとなる。この節では、相対位置を計測する車両を車両 1、周囲車両に相当する車両を車両 2 と呼ぶ。図 7.3.1、図 7.3.2 にそれぞれ、実験システムの概図と詳細図を示す。車車間通信には小電力無線モデムを使用し、通信速度は 4800bps である。車両 1 用のプログラムは、第 6.6 節の絶対位置推定のためのプログラムに、車車間通信

用無線モデムからのデータ受信および相対位置の計算を行うプログラムを加えたものとなる。一方、車両2のためのプログラムは、第6.6節の絶対位置推定のためのプログラムに、絶対位置情報と状態量の送信を行うプログラムを加えたものとなる。図7.3.3に実験プログラムのフローチャートを示す。

上記手法実験システムで計測した相対位置情報の精度を評価するために、これらの実験機材に加えて、走査式レーザー投受光器による相対位置計測システムを使用している。この相対位置計測システムは、車両追従制御用の相対位置計測システムとして使用された実績があり、車両運動制御ために十分なりアルタイム性と精度を有する相対位置情報の獲得が可能である[20, 162]。この相対位置計測システムでは、車両1に走査式レーザー投受光器、車両2にコーナーキューブプリズム（再帰反射性リフレクタ）を搭載し、相対位置計測を行う。走査式レーザー投受光器は2400[rpm]でミラーを回転することにより、水平方向に法線を持つファンビームを走査する。車両2の3点にコーナーキューブプリズムが取り付けられており、照射されたファンビームを再帰反射する。車両1は、反射光を検出した時のミラーの角度（角度分解能0.045[deg]）を利用して演算することにより、車両2の相対位置を算出することができる[162]。走査式レーザー投受光器からの信号処理および相対位置計算には、ノート型パソコン（PC9801互換機）を使用している。図7.3.4にDGPSの受信アンテナと走査式レーザー投受光器を搭載した車両1を示す。また図7.3.5に、DGPSの受信アンテナとコーナーキューブプリズムを搭載した車両2を示す。図7.3.6に静止状態で走査式レーザー投受光器とコーナーキューブプリズムにより相対位置を計測した結果を示す。1つの計測位置に対し20回計測を行った結果、10[m]の距離で、縦方向に最大誤差0.15[m]（標準偏差0.04[m]）横方向に最大誤差0.04[m]（標準偏差0.004[m]）の精度で相対位置を計測できることを確認している。走査式レーザー投受光器とコーナーキューブプリズムによる相対位置計測では、25[ms]のサンプル周期で相対位置を計測することができる。

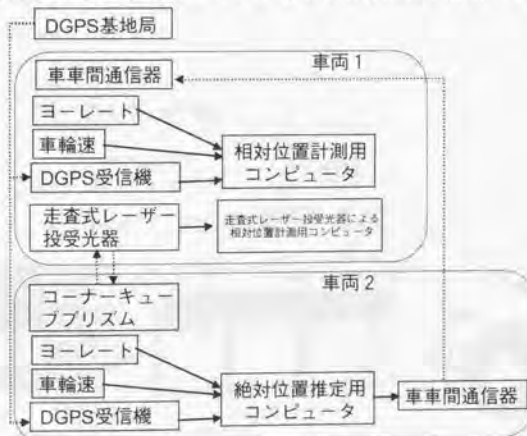


図7.3.1 実験システムの概図

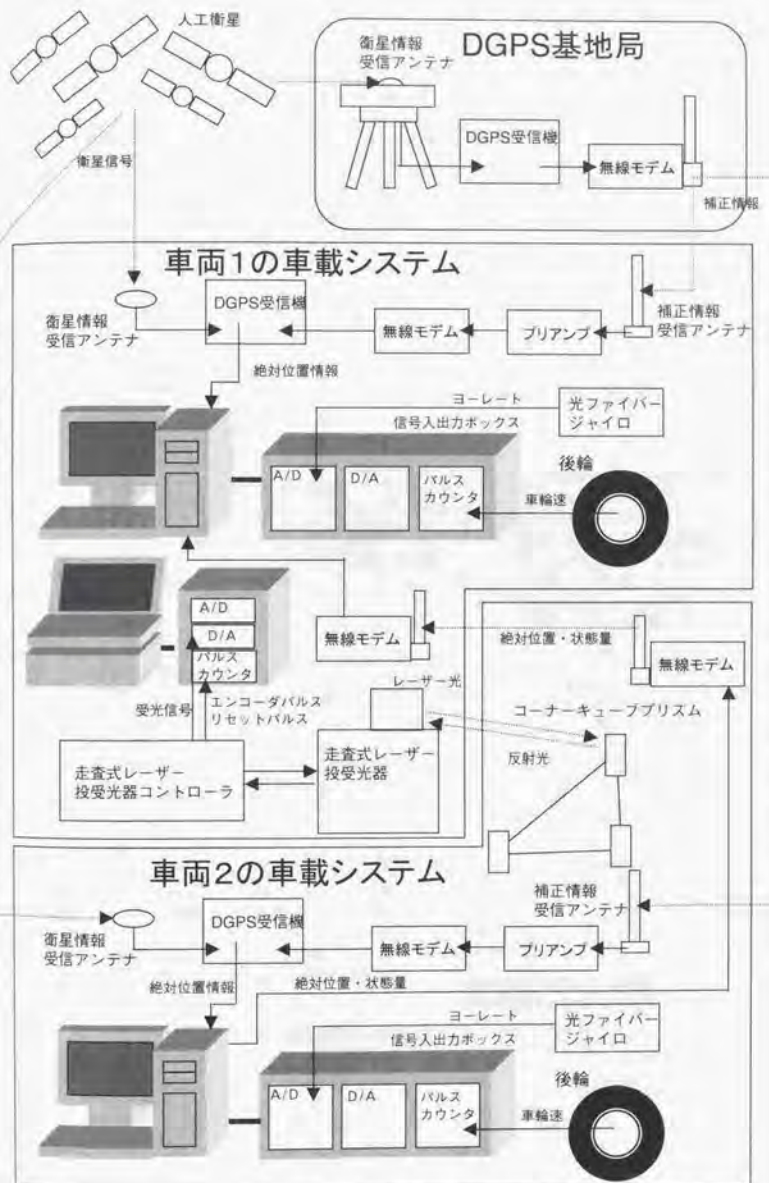


図 7.3.2 実験システムの詳細図



図 7.3.4 DGPS 受信機と走査式レーザー投受光器を取りつけた車両 1



図 7.3.5 DGPS 受信機とコーナキューブプリズムを取りつけた車両 2

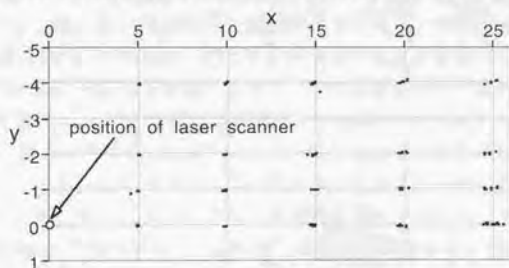


図 7.3.6 走査式レーザー投受光器による位置計測結果

7.3.2 実験の方法

実験は、筑波の工業技術院第2研究センターのテストコースにて行った。実験においては相対位置の計測周期を50[ms]、絶対位置推定のサンプル周期を50[ms]、車車間通信の周期を100[ms]とした。車車通信の周期を50[ms]としなかった理由は、車両2が1周期分の情報(状態量や絶対位置情報を文字情報の形で送受信している)を無線モデムに送信するのに50[ms]以上の時間を要するためである。車両2から送信された情報を車両1が受信するまでに70~100[ms]の時間を要する。この実験では相対位置

計測をサンプル周期50[ms]で行うため、通信遅れは150[ms] (3サンプル周期) となる。相対位置計測のサンプル周期 (50[ms]) の中で車車間通信情報を受信しない周期は、受信した周期の車両2の状態量情報を利用して車両2の絶対位置を推定することにより、相対位置を算出する。この実験では、車両1および2において同一のDGPSを受信機を使用しているため、DGPS受信機からの情報送信タイミングを利用して計測周期の同期をとっている。実験は以下の3つの走行条件で行った。

- ・車両1、車両2ともに走行速度約10[m/s]で縦列走行、車両2が車両1の前方を走行する。
- ・車両1、車両2ともに走行速度約20[m/s]で縦列走行、車両2が車両1の前方を走行する。
- ・車両1、車両2ともに走行速度約10[m/s]で走行し、車両2が車両1の前方をジグザグ走行する。

これらの走行条件において、提案する相対位置の計測手法と、走査式レーザー投受光器によって同時に相対位置を計測し、計測結果を比較する。これらの実験に加え、走行速度約20[m/s]の縦列走行において、第7.1節の方式1および方式2における相対位置計測も行い、評価する。

7.3.3 実験結果

図7.3.7、図7.3.8にそれぞれ速度10[m/s]、20[m/s]で縦列走行した場合の相対位置(x座標)を示す。各速度において相対位置情報は50[ms]周期で更新され、走査式レーザー投受光器による計測結果とほとんど一致している。また、車間距離が変化する状態においても、遅れなく相対位置を計測できていることがわかる。

図7.3.9に速度10[m/s]で直線的に走行する車両1の前方を車両2がジグザグに走行した場合の相対位置計測結果(y座標)を示す。この場合も相対位置情報は50[ms]周期で更新され、走査式レーザー投受光器による計測結果とほとんど一致している。図7.3.9をみると7秒あたりから、走査式レーザー投受光器による相対位置計測結果が更新されなくなっていることが分かる。この理由は、走査式レーザー投受光器が、車両2上の3つのコーナーキューブプリズムの反射光を検出できなかったためである。

図7.3.10に20[m/s]で縦列走行し、DGPSからの絶対位置情報をそのまま送受信して、相対位置を算出した場合 (第7.1節の方式1) 結果である。図7.3.10中で20[m]前後の値を示しているものが、DGPSの計測タイミングが一致している場合の計測値である。16[m]前後の値を示すものは、車両1と車両2の計測タイミングが1周期分 (200[ms]) ずれているものである。図7.3.11は、DGPSの計測タイミングが一致するものを抽出して相対位置を算出したものである (第7.1節の方式2)。この場合、走査式レーザー投受光器による計測結果とほぼ一致しているが、情報の更新周期がDGPSからの絶対位置情報の更新周期 (200[ms]) となる。また車間距離が変化する状態では、相対位置情報に遅れが生じていることがわかる。この実験では、車両1と車両2で同一のDGPS受信機を利用しているため、同一のタイミングの信号や信号搬送波位相情報を利用して絶対位置を演算している。そのため、この方式で算出した相対位置が走査式レーザー投

受光器による計測結果とほぼ一致する結果となったと考えている。もし、DGPS受信機が異なり、異なるタイミングの信号や信号搬送波位相情報を利用して絶対位置を計測する場合は、相対位置計測値にタイミングのずれ分の計測誤差が生じることが予想できる。

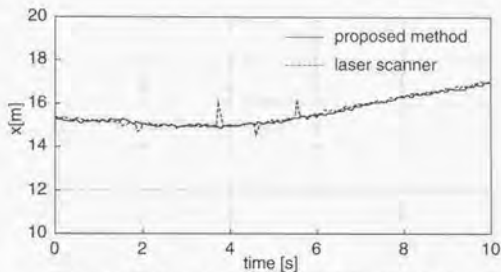


図 7.3.7 相対位置計測結果 (縦列走行, 10[m/s])

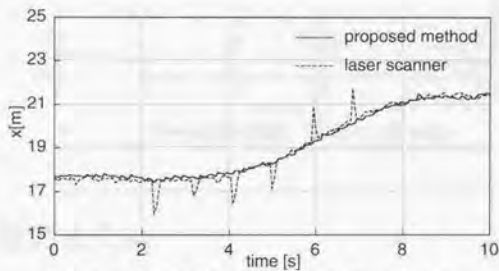


図 7.3.8 相対位置計測結果 (縦列走行, 20[m/s])

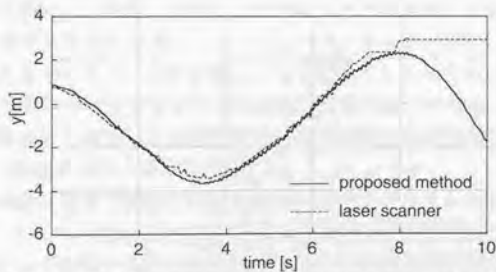


図 7.3.9 相対位置計測結果 (先行車はジグザグ走行, 10[m/s])

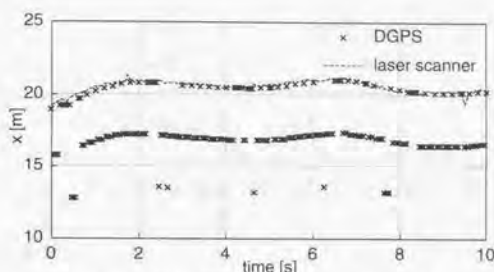


図 7.3.10 相対位置計測結果 (方式1, 20[m/s])

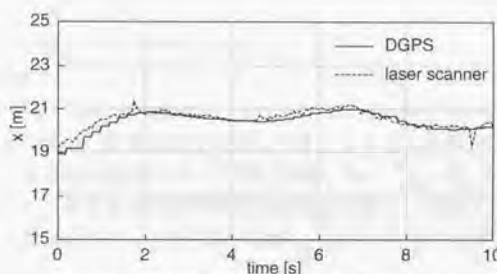


図 7.3.11 相対位置計測結果 (方式2, 20[m/s])

7.4 第7章のまとめ

この章では、車車間通信とDGPSを利用した相対位置計測について検討した。DGPSと車両運動状態量を利用して推定した絶対位置情報を車車間通信で送受信することにより相対位置を計測する手法を提案した。この手法は、第6章で提案した絶対位置の推定手法を拡張したものである。実車実験によって提案する計測方式の有効性を明らかにした。この章で明らかにしたことをまとめると以下のようになる。

- ・DGPSと車車間通信を利用した相対位置計測手法に関する複数の方式を検討し、各方式の利点、問題点を明らかにした。
- ・DGPSと車両運動状態量を利用した絶対位置推定アルゴリズムによる、短サンプル周期、リアルタイム（遅れがない）そして高精度な相対位置計測手法を提案した。
- ・実車実験によって提案する相対位置計測手法の有効性を明らかにした。

この章で提案した相対位置計測手法により、非隣接かつ全方向の車両の相対位置情報を獲得することが可能となる。また獲得した情報は、車両追従制御、合流制御、センサの冗長化等に応用するために十分な精度とリアルタイム性を有するものである。

全方向の車両の相対位置計測では、実験で比較した走査式レーザー投受光器を利用

することも可能である。しかし、走査式レーザー投受光器による相対位置計測は、

- ・コーナークューブプリズムの反射面にしてレーザー光の入射角が垂直から大きくずれると再帰反射できない、
- ・コーナークューブプリズムの識別が出来ない
- ・非隣接車両において、レーザー光が遮られる場合は検出できない

などの問題があるため、実際の交通環境に適用するのは困難である。これに対し、提案する計測手法は、DGPSによる絶対位置計測と、車車間通信が行われている限り確実に相対位置情報を獲得することができる。

この章で提案した相対位置計測手法は、どのような車両にも適用できる汎用性を有していることに加え、高い受容性も有している。ここでいう受容性とは、この手法を実現するにあたり、様々な機種種のDGPSを利用できることである。異種のDGPS受信機を利用して計測した絶対位置情報を車車間通信で送受信して、相対位置を計測する場合、計測周期や計測タイミングのずれによって大きな計測誤差が生じる(たとえば、速度20[m/s]の走行で200[ms]の計測タイミングのずれが、4[m/s]の計測誤差を生じる)。しかし、提案する方式は、車両運動センサを利用して推定した絶対位置情報を利用するため、DGPSの計測周期や計測タイミングに依存しない。よって、異種のDGPS受信機を使用した場合でも、高精度な相対位置計測が実現できる。提案する方式の場合、計測誤差は、絶対位置推定のサンプル周期×速度、以下となることが保証される。

7.5 記号

T_d	: DGPSのサンプル周期[s] (0.2)
T_c	: 制御周期および絶対位置推定および相対位置計測のサンプル周期[s] (0.05)
V	: 車両の速度[m/s]
γ	: 車両のヨーレート[rad/s]
β	: 車両の重心における横滑り角[rad]
X_{dl}	: デッドレコニングによる絶対位置推定値のX座標[m]
Y_{dl}	: デッドレコニングによる絶対位置推定値のY座標[m]
θ_{dl}	: デッドレコニングによる方位角推定値[rad]
X_m	: DGPSによる絶対位置計測値のX座標[m]
Y_m	: DGPSによる絶対位置計測値のY座標[m]
X_k	: カルマンフィルタにより推定された車両絶対位置のX座標[m]
Y_k	: カルマンフィルタにより推定された車両絶対位置のY座標[m]
θ_k	: カルマンフィルタにより推定された車両方位角[rad]
X_{k_c}	: X_k の遅れを補償した車両絶対位置推定値のX座標[m]
Y_{k_c}	: Y_k の遅れを補償した車両絶対位置推定値のY座標[m]

θ_k	: θ_k の遅れを補償した車両方位角[rad]
ΔX_c	: デッドレコニングによる絶対位置推定値のX座標補正值[m]
ΔY_c	: デッドレコニングによる絶対位置推定値のY座標補正值[m]
$\Delta \theta_k$: デッドレコニングによる方位角推定値の補正值[rad]
X_{d2}	: 周囲車両の絶対位置のX座標[m]
Y_{d2}	: 周囲車両の絶対位置のY座標[m]
θ_{d2}	: 周囲車両の方位角[rad]
V_2	: 周囲車両の速度[m/s]
γ_2	: 周囲車両のヨーレート[rad/s]
X_{d2c}	: X_{d2} の通信遅れを補償した周囲車両の絶対位置のX座標[m]
Y_{d2c}	: Y_{d2} の通信遅れを補償した周囲車両の絶対位置のY座標[m]
θ_{d2c}	: θ_{d2} の通信遅れを補償した周囲車両の方位角[rad]
r_{x12}	: 車両座標系における周囲車両の相対位置のx座標[m]
r_{y12}	: 車両座標系における周囲車両の相対位置のy座標[m]
$r_{\theta12}$: 車両座標系における周囲車両の方位角 (相対ヨー角)[rad]
T_{com}	: 車車間通信の遅れ時間[s] (0.15)

第8章 DGPSを利用した絶対位置情報に基づく横方向制御

この章では、DGPSを利用した絶対位置情報の車両運動制御への適用を検討する。第6章で提案した絶対位置の推定手法を用いて、獲得した車両絶対位置情報と目標コースデータに基づき、目標コースに追従するための横方向制御（操舵制御）を提案し、その有効性を明らかにする。従来提案された横方向制御は地点追従方式と車両追従方式に大別される。地点追従方式では、道路上に設置された磁気ネイル等のマーカや道路白線を認識し、それに追従するように制御を行うものである。一方、車両追従方式では先行車の相対位置を検出し、その走行軌跡に追従するように制御を行うものである。本研究で提案する横方向制御は、前者の地点追従方式に近いものである。しかし、大きく異なる点は、目標コースがソフトウェアで記述されている点である。その結果従来の地点追従方式と比べて以下のような利点が得られる。

- ・磁気ネイル等のインフラを設置することなく、自動運転が実現できるため、自動運転実現のためのコストや保守のためのコストを大幅に削減できる。
- ・車線変更や、進路変更等の制御が容易に実現できる。
- ・ナビゲーションシステムと融合した自動運転制御が実現できる。
- ・磁気ネイルシステム等と組み合わせることにより、信頼性の高いシステムが実現できる。

もちろん、車両追従方式においても、磁気ネイル等のインフラなしで自動運転を実現できるが、

- ・追従誤差の蓄積の影響
- ・進路変更等の制御が困難
- ・先行車なしでは走行できない
- ・安定な制御を実現するためには先行車との距離を車間時間で1秒程度確保しなければならない（交通容量の低下）

等の問題を有する。

この章の流れは図8.0.1のようになっている。以下の各節では、この流れに従い、車両の横方向運動のモデル化、目標コースデータの記述方法、操舵制御アルゴリズム、シミュレーションによる評価、実験による評価について説明する。

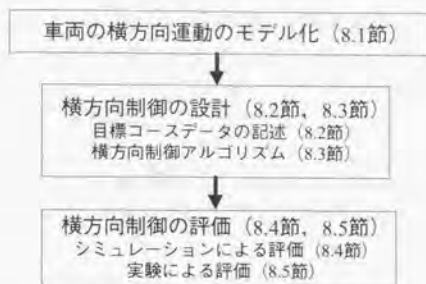


図 8.0.1 第 8 章の流れ

8.1 車両の横方向運動のモデル化

この節では、制御系の設計やシミュレーションで使用した車両モデルについて説明する。本研究では、車両の横方向運動モデルとして、図 8.1.1 に示す平面二輪モデルを使用する。平面二輪モデルは、制御系の設計の際に広く用いられている。このモデルは、タイヤ力の飽和や大きな横加速度を生じない領域では、車両運動を十分に再現できるモデルであるため、シミュレーションにも使用されている。本研究で想定する走行状況は、一般の高速道路における走行であり、低周波領域かつ低横加速度の走行となる。そのため、本研究ではシミュレーションにおいても平面二輪モデルを使用している。平面二輪モデルの運動方程式は以下のようになる。

$$mV\left(\frac{d\beta}{dt} + \gamma\right) = C_f + C_r \quad \dots\dots\dots (8.1.1)$$

$$I \frac{d\gamma}{dt} = l_f C_f - l_r C_r \quad \dots\dots\dots (8.1.2)$$

$$C_f = S_f \cos \delta = -K_f \beta_f \cos \delta = -K_f \left(\beta + l_f \frac{\gamma}{V} - \delta \right) \cos \delta \quad \dots\dots\dots (8.1.3)$$

$$C_r = S_r = -K_r \beta_r = -K_r \left(\beta - l_r \frac{\gamma}{V} \right) \cos \delta \quad \dots\dots\dots (8.1.4)$$

ここで、 m 、 I はそれぞれ車両質量および慣性モーメントである。 V 、 β 、 γ 、 δ はそれぞれ、速度、重心の横滑り角、ヨーレート、操舵角である。 l_f 、 l_r はそれぞれ前輪軸中心および後輪軸中心と重心の距離である。 S_f 、 S_r はそれぞれ前輪および後輪の横力、 C_f 、 C_r は S_f 、 S_r の横方向成分である。 K_f 、 K_r はそれぞれ前輪および後輪のコーナリングパワー（それぞれ 2 輪分の合計値）である。このモデルでは、前後方向の力を考慮していないため、前後方向運動に関しては、指定した速度で走行するものとしている。ロール運動、ピッチ運動、荷重変動を考慮していないため、コーナリングパワーも一定

としている。また、タイヤ力が飽和しない領域での走行を仮定している。スリップ角とコーナリングフォースの関係を線形としている。また、摩擦円による判定も行っていない。実際シミュレーションにおいて発生させる横力の最大値は、計算上の横力の飽和値の50%未満である。

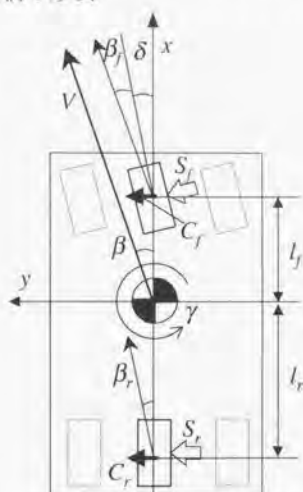


図 8.1.1 車両の横方向運動モデル

8.2 目標コースデータの記述

この節では、横方向制御における追従対象となる目標コースについて説明する。本研究では、目標コースデータを目標コースを点列化することで作成する。目標コースの各点列は、X座標、Y座標、Z座標（高度）、IDの4つの情報を持つ。X座標、Y座標はある地点を基準とする絶対座標である。Z座標は本研究では使用していない。この座標から得られる勾配情報が縦方向制御に利用できるものと考えている。IDは各地点の指定速度や分岐点における点列データの飛び先等を識別するために用いる。本研究のシミュレーションでは目標コースの絶対位置を1[m]間隔で離散化し、目標コースデータとしている。目標コースデータの離散間隔は制御に大きな影響を与えない、というのは、あらかじめ、目標コース全体の情報を持っていれば、制御で使用する前に目標コースデータの補間あるいは間引きを行うことで自由に目標コースの離散間隔を変更することができるからである。

目標コースデータの大きさについて考察する。100[km]の目標コースデータを考えると、1[m]間隔で離散化した場合100000個の点列データが必要となる。X座標、Y座標、Z座標、IDをそれぞれ4バイトの実数として格納する場合、圧縮なしで約1.5Mバイ

トの情報量となる。これは、フロッピーディスク1枚分程度の大きさであり、目標コース情報の大きさは自動運転システムにおいて問題にならないと考えている。

実際のシステムにおける目標コースデータの作成は容易である。まず、DGPSを搭載した車両で目標コースを低速で走行し、逐次絶対位置を計測かつ記録する。次に、計測した絶対位置情報に、間引き、補間、スムージング等の処理を施したあと、所定のフォーマットで格納すれば良い。

図8.2.1、図8.2.2にシミュレーションで使った目標コースデータを示す。1つは直線状のコース（本研究ではコース1と呼ぶ）であり、もう1つは、R640, R320, R160, R105のカーブが連続するコース（本研究ではコース2と呼ぶ）である。これらのコースは第6.5節のシミュレーションにおいても使用されている。また図8.2.3に実験に使用した目標コースデータを示す。これは、機械システム振興協会のテストコース（御殿場）を走行することにより作成したものである。このコースは、第6.6節の実験においても使用されている。また、図8.2.4に目標コースの上端のカーブ付近を拡大したものを示す。この図を見ると、目標コースが約0.4[m]間隔で離散化されていることがわかる。

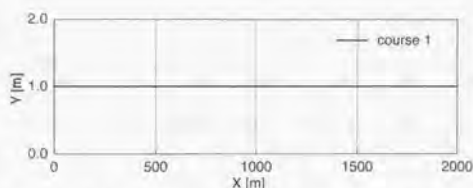


図8.2.1 シミュレーション用目標コースデータ（コース1）

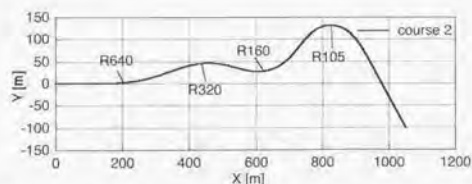


図8.2.2 シミュレーション用目標コースデータ（コース2）

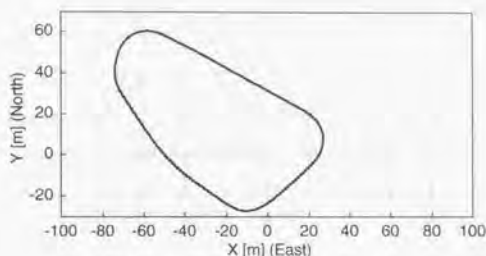


図 8.2.3 実験用目標コースデータ

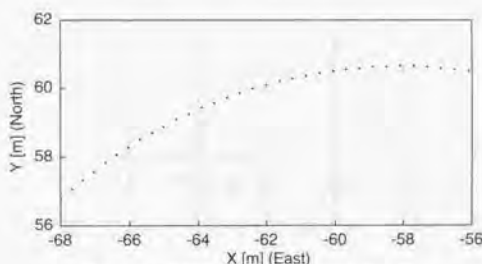


図 8.2.4 実験用目標コースデータの一部

8.3 操舵制御アルゴリズム

この節では、操舵制御アルゴリズムについて説明する。文献[19, 20]における車両追従制御のための操舵制御アルゴリズムの検討により、車両パラメータに依存しない制御アルゴリズムでも、十分高精度でロバストな車両追従制御が実現できることが明らかにされている。本研究では制御アルゴリズムの汎用性を重視し、車両パラメータに依存しない制御アルゴリズムを使用する。以下に制御アルゴリズムを説明する。

8.3.1 制御アルゴリズムの概要

この項では目標コース上を追従するための制御アルゴリズムについて説明する。制御アルゴリズムの目的は車両の絶対位置および方位角と目標コースとの位置関係により、操舵角を決定することである。本研究では、文献[19, 20]において、提案および検討された先行車追従走行のための操舵制御アルゴリズムをベースとして、予見(フィードフォワード)・フィードバック制御アルゴリズムを構築した。このアルゴリズムにおけるフィードバック情報は制御時の追従誤差である。予見情報は、将来誤差を0[m]にするために必要なヨーレート変化量である。将来誤差ではなく、必要なヨー

レート変化量を予見情報とすることにより、速度変化や予見時間の変化があっても安定かつ高精度に制御効果を発揮することができる。

8.3.2 目標操舵角変化量の算出方法

時刻 k における操舵変化量 $\Delta\delta[k]$ の算出法を説明する。目標コース点列の絶対位置を制御車両座標系に変換する。計算時間の短縮のため制御車両から一定距離以内に存在する点列のみに対しこの処理を行う。目標コースを構成する点列の絶対座標を (X_{dcj}, Y_{dcj}) とし、これを制御車両座標系に変換した場合の座標 (x_{dcj}, y_{dcj}) は、

$$\begin{bmatrix} x_{dcj} \\ y_{dcj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\theta[k]) & -\sin(-\theta[k]) \\ \sin(-\theta[k]) & \cos(-\theta[k]) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{dcj} - X[n] \\ Y_{dcj} - Y[n] \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8.3.1)$$

となる。図8.3.1に制御に用いる諸量の図を示す。図8.3.1中の点列が制御車両座標系上に変換された目標コースの点列である。制御車両が一定のヨーレートおよび横滑り角で走行すると仮定すると、予見時間 t_p 秒後の横方向変位 $y_{of}[k]$ は、

$$y_{of}[k] = V[k] \cdot t_p \cdot \left(\frac{1}{2} \gamma[k] \cdot t_p + \beta[k] \right) \dots\dots\dots (8.3.2)$$

として表される。 $y_{of}[k]$ が、 $V[k] \cdot t_p$ 先の目標コースの横方向変位 $y_{of}[k]$ と一致するために必要なヨーレート変化量 $\Delta\gamma_{des}[k]$ は、以下の式を満たさなければならない。 $\Delta\gamma_{des}[k]$ は、以下の式を満たさなければならない。

$$y_{of}[k] = V[k] \cdot t_p \cdot \left\{ \frac{1}{2} (\gamma[k] + \Delta\gamma_{des}[k]) \cdot t_p + \beta[k] \right\} \dots\dots\dots (8.3.3)$$

これを $\Delta\gamma_{des}[k]$ について解くと、

$$\Delta\gamma_{des}[k] = \frac{2y_{of}[k]}{V[k] \cdot t_p} - \frac{2\beta[k]}{t_p} - \gamma[k] \dots\dots\dots (8.3.4)$$

となる。 $\Delta\gamma_{des}[k]$ と制御時の追従誤差 ε を用いて操舵角の変化量 $\Delta\delta[k]$ を以下のように決定する。

$$\Delta\delta[k] = (K_1 \cdot \Delta\gamma_{des}[k] + K_2 \cdot \varepsilon[k]) T_c \dots\dots\dots (8.3.5)$$

ここで T_c は制御周期である。上式では $K_1 \cdot \Delta\gamma_{des}[k]$ が予見（フィードフォワード）制御の項であり、 $K_2 \cdot \varepsilon[k]$ がフィードバック制御の項となっている。ここで K_1 、 K_2 は一定ゲインであり、シミュレーションにより以下の J を最小化した値を使用している。

$$J = \int_0^{\infty} \varepsilon^2 dt \dots\dots\dots (8.3.6)$$

なお、 $y_{of}[k]$ および $\varepsilon[k]$ の算出については、原点（制御車両重心）からの距離がそれぞれ $V[k] \cdot t_p$ および $0[m]$ に最も近いコース点列をそれぞれ3点抽出し、最小二乗法で直線近似することにより、その直線との距離から算出している。

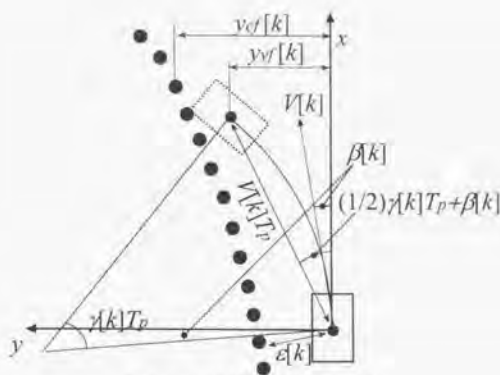


図 8.3.1 操舵制御アルゴリズム

8.3.3 この制御アルゴリズムの考察

この制御アルゴリズムは、前方注視 2 次予測モデルを参考にして作成された。前方注視 2 次予測モデルでは、一般に注視距離または予見時間を設定し、制御車両の 2 次予測位置 $(\dot{y} \cdot t_p + (1/2)\ddot{y} \cdot t_p^2)$ を算出し、目標コースに対する将来誤差にゲインをかけて操舵角変化量を決定する。将来誤差を注視先の目標コースの横偏差と制御車両の将来横変位に分離すると、注視先の目標コースの横偏差が比例要素、制御車両の将来横変位が微分要素となり、比例微分制御 (PI 制御) と等価なものとなる。本研究で構築した制御アルゴリズムには、制御時の追従誤差のフィードバックも行っている。このフィードバック情報は積分要素となり、この制御アルゴリズムは比例積分微分制御 (PID 制御) と等価なものとなる。よって、積分要素により、旋回追従走行時の定常偏差等を効果的に減少させることが可能となる。

次に、将来誤差にゲインをかけて操舵角の変化量を決定せずに、将来誤差をゼロにするために必要なヨーレートにゲインをかける手法について説明する。将来誤差にゲインをかける手法は、一定の走行速度および予見時間においては有効であるが、走行速度や予見時間が変化する場合には不安定な挙動を招く可能性がある。この制御アルゴリズムでは将来誤差をゼロにするために必要なヨーレート変化量を算出しゲインをかけて、操舵角変化量決定している。この手法によって車間距離や走行速度の影響を受けにくくできることを以下に説明する。

まず、車間距離の影響について考える。制御時の将来誤差 1[m]、走行速度 20[m/s]、ヨーレート 0[rad/s]、制御周期 0.05[s] の場合を想定する。このとき予見時間が 0.5[s] の場合と予見時間が 1.0[s] の場合では、異なる操舵角変化量指令値を出す必要があることは直感的にわかる。しかし、将来誤差にゲインをかけて操舵角を決定する手法では同じ操舵角変化量指令値が算出されてしまう。しかし、この制御アルゴリズムでは、予見時間 0.5[s] の場合の操舵角変化量指令値は 0.009967[rad]、予見時間 1.0[s] の場合の操舵角変化量指令値は 0.002498[rad] となる。予見時間 0.5[s] の場合は、予見時

間1.0[s]の場合の約4倍の操舵角変化量指令値が算出されているが、これは妥当である。予見時間0.5[s]の場合は、予見時間1.0[s]の場合の約2倍の姿勢角変化が要求され、姿勢角を変化させるための時間が2分の1であるため、単位時間あたりに要求される姿勢角変化量（ヨーレート）は約4倍となる。ヨーレートは操舵角とほぼ比例すると考えると、約4倍の操舵角変化量指令値は妥当であるといえる。よって、この制御アルゴリズムの中で用いられている手法は、車間距離の影響を受けにくくするといえる。

次に走行速度の影響について考える。この制御アルゴリズムでは必要なヨーレートの変化量に一定のゲインをかけている。しかし速度によって、操舵角と発生するヨーレートの関係が異なる。故に、速度に関わらず、必要なヨーレートの変化量に一定にゲインをかけることは不適切であり、この手法は速度変化の影響を受けるものであると考えられるかもしれない。しかし、この手法は以下の根拠によって速度変化の影響を受けにくいことがわかる。走行速度が V の場合、単位時間あたりの必要なヨーレートの変化量は V に反比例する、すなわち K/V となる。一方、車両が極端なオーバーステアまたはアンダーステア特性でない限り、定常状態における一定操舵角におけるヨーレートはほぼ速度に比例し、 $K'V$ と記述することができる。この2つを掛け合わせることで V の項が消え、ヨーレートの変化量にかけている一定のゲインは走行速度の影響を含んだものとなっている。故にこの手法は走行速度の影響を受けにくくすると考えてよい。

8.4 シミュレーションによる評価

この節では、第8.2節および第8.3節で説明した横方向制御を第6章で説明した絶対位置推定手法と組み合わせて評価するためのシミュレーションとその結果について説明する。

8.4.1 シミュレーションの方法

車両モデルとして、第8.1節で説明したモデルを使用する。計測する状態量は速度、ヨーレート、操舵角とし、横滑り角は線形オブザーバで推定している。目標コースデータは、第8.2節で説明した、2つの目標コースデータを使用した。絶対座標の原点は制御車両の初期座標とし、初期方位角と X 軸の方向が一致するものとする。車両の走行速度は20[m/s]（一定）とし、車両の操舵制御は、第8.3節で説明した操舵制御アルゴリズムによって行っている。制御周期は50[ms]である、シミュレーションでは以下の3つの条件で行った。

シミュレーション1：DGPSによる絶対位置情報に計測誤差が存在しない。DGPS受信機の計測周期、情報の遅れ時間、車両運動センサの計測周期（デッドレコニングの周期）はそれぞれ、200[ms]、200[ms]、50[ms]としている。計測した絶対位置情報

の遅れ補正とサンプル周期の補間のみを行うことで絶対位置情報を獲得する。制御車両の方位角は、計測された絶対位置の履歴から算出する。

シミュレーション2: DGPS受信機の計測誤差は標準偏差0.2[m]の正規分布に従い、計測周期、遅れについては、上記条件と同じである。この場合も、情報の遅れ補正と補間のみを行うことで絶対位置情報を獲得する。制御車両の方位角は、計測された絶対位置の履歴から算出する。このシミュレーションはコース1についてのみ行う。

シミュレーション3: DGPS受信機の計測誤差は標準偏差0.2[m]の正規分布に従い、計測周期、遅れについては、上記条件と同じである。絶対位置情報および方位角情報は、第6章の推定手法により獲得する。

さらに、シミュレーション3については、DGPS受信機の計測誤差の標準偏差が0.02[m]~10[m]の場合における、直線状目標コースを20[m/s]で10[km]走行した時の最大追従誤差を評価した。

8.4.2 シミュレーション結果

図8.4.1、図8.4.2に、DGPS受信機による絶対位置の計測誤差が存在しない場合（シミュレーション1）のシミュレーション結果を示す。図8.4.1は、目標コースに対する制御車両重心の追従誤差である。コース1における追従誤差の定常値は0[m]であり、コース2における追従誤差は0.03[m]以下に収まっている。図8.4.2は、制御車両のヨーレートである。各コースとも振動することなく追従していることがわかる。以上の結果により、DGPSによる絶対位置の計測誤差が0であれば、目標コースに対する高精度な追従が実現できる。すなわち第8.3節で説明した制御アルゴリズムが有効であることがわかる。

図8.4.3、図8.4.4にDGPS受信機による絶対位置の計測誤差が標準偏差0.2[m]の正規分布に従う場合（シミュレーション2）のシミュレーション結果を示す。図8.4.3は追従誤差であり、図8.4.1の結果に比べて大幅に精度が悪化している。図8.4.4はヨーレートを示している。ヨーレートの振動は大きく、乗り心地が良くないことがわかる。追従精度の劣化やヨーレートの振動は、絶対位置および方位角の車上計測値の誤差や不連続性に起因するものである。この結果は、DGPSを利用した絶対位置情報に基づく良好な車両運動制御を実現するためには、精度と連続性を有する絶対位置情報と方位角情報の獲得手法が必要であることを示している。

図8.4.5、図8.4.6に第6章の絶対位置推定手法を利用したシミュレーションの結果を示す。図8.4.5は追従誤差であり、各コースにおいて0.1[m]以下に収まっている。コース曲率等による定性的な誤差は見られず、誤差の主要な原因は、DGPS受信機の絶対位置計測誤差である。図8.4.6ヨーレートを示している。各コースにおいて、ヨーレートの振動は小さく、乗り心地の良い制御が実現できていることがわかる。この結果は、第6章の推定手法が車両運動制御に対して有効であることを示している。

表8.4.1にDGPS受信機の計測誤差の標準偏差が0.02[m]~10[m]の場合において、第6章の絶対位置推定手法を利用したシミュレーションの結果を示す。結果は、直線状

目標コースを $20[\text{m/s}]$ で $10[\text{km}]$ 走行した時の最大追従誤差を評価した。最大追従誤差は計測誤差の標準偏差の $60\% \sim 90\%$ となっていることがわかる。よって、所望の追従精度を得るためには、計測誤差の標準偏差が所望の追従精度と同程度の DGPS 受信機を利用する必要があると言える。

以上の結果により、第 8.2 節、第 8.3 節で構築した横方向制御の有効性を明らかにした。また、第 6 章の絶対位置推定手法の使用の有無による制御結果を比較することにより、この推定手法の車両運動制御に対する有効性を明らかにした。

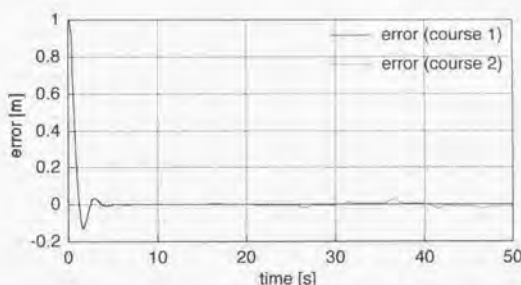


図 8.4.1 追従誤差（絶対位置の計測誤差が存在しない場合）

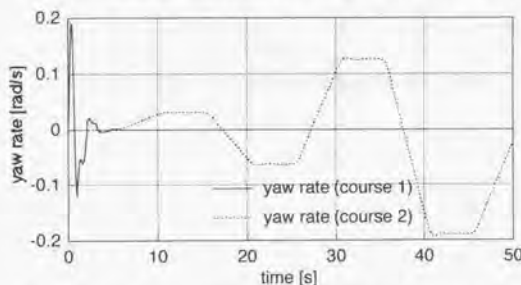


図 8.4.2 ヨーレート（絶対位置の計測誤差が存在しない場合）

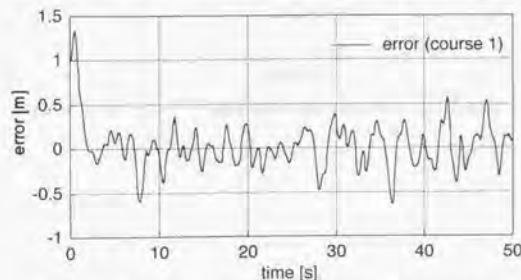


図 8.4.3 追従誤差（絶対位置の計測誤差が存在する場合）

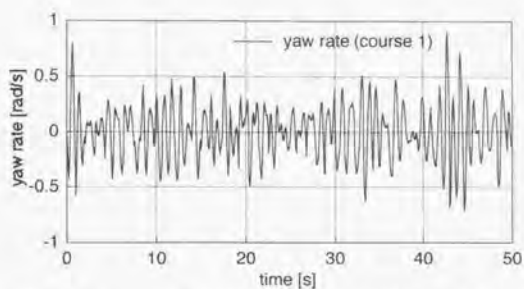


図 8.4.4 ヨーレート (絶対位置の計測誤差が存在する場合)

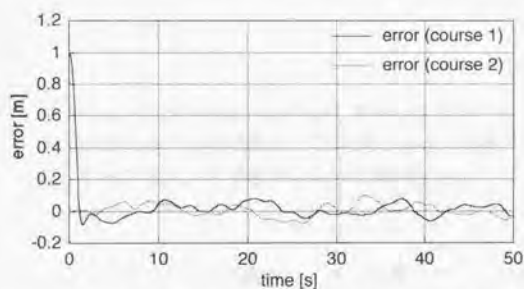


図 8.4.5 追従誤差 (第 6 章の絶対位置推定を行った場合)

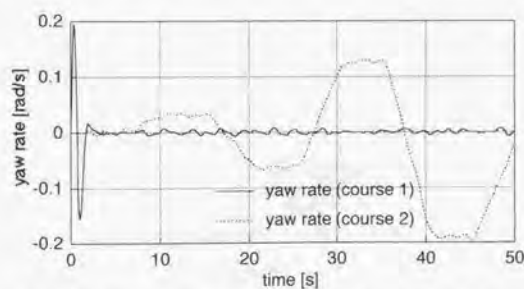


図 8.4.6 ヨーレート (第 6 章の絶対位置推定を行った場合)

表 8.4.1 各計測誤差における最大追従誤差

計測誤差の標準偏差[m]	最大追従誤差[m]
0.02	0.015
0.05	0.032
0.1	0.064
0.2	0.142
0.5	0.318
1	0.633
2	1.490
5	4.010
10	8.890

8.5 実験による評価

この節では、第8.2節および第8.3節で説明した横方向制御を第6章の絶対位置推定手法と組み合わせて評価するための実験とその結果について説明する。以下の各項では、実験システム、実験の方法、実験結果について説明する。

8.5.1 実験システム

実験システムは、第6.6節の絶対位置推定のための実験システムの操舵制御用の実験機材を加えたものである。実験システムの概図および詳細図をそれぞれ図8.5.1、図8.5.2に示す。以下では、操舵制御に関する実験機材についてのみ説明する。

ステアリングアクチュエーターにはACサーボモーターを用いている。図8.5.3にステアリングアクチュエータを示す。この実験システムでは、回転方向の指令信号と、回転角度の指令信号をACサーボモータのコントローラに与えることによりACサーボモータを駆動する。モータ回転角のサーボ制御は専用のコントローラが行っている。ハンドルの最小制御角は $0.80[\text{deg}]$ である。ステアリングアクチュエータはハンドルのコラム部分に取り付けられており、ACモータが減速器、電磁クラッチ、ベルトを介してハンドルを回転させる。電磁クラッチは、電源のON/OFFにより動作する。この実験システムでは電磁クラッチの電源のON/OFFは手動で行っている。また危険時においてドライバがハンドルを操作する場合、電磁クラッチが作動していても電磁クラッチが滑ることにより、アクチュエータの動作に反した操作が可能となる。また、ステアリングアクチュエータには操舵角計測のためにポテンシオメータが組み込まれている。モータのサーボ制御用にはこれとは別にモーター部分にロータリーエンコーダが組み込まれている。

横方向制御用のプログラムは、第6.6節の絶対位置推定のためのプログラムに、目標コースデータの読み込み、目標操舵角の算出、ステアリングアクチュエータの制御のプログラムを加えたものである。なお、目標操舵角の算出後、オーバーオールステアリングレシオをかけることによりハンドル角に変換し、ステアリングアクチュエー

タに回転指令を送っている。図8.5.4にプログラムのフローチャートを示す。

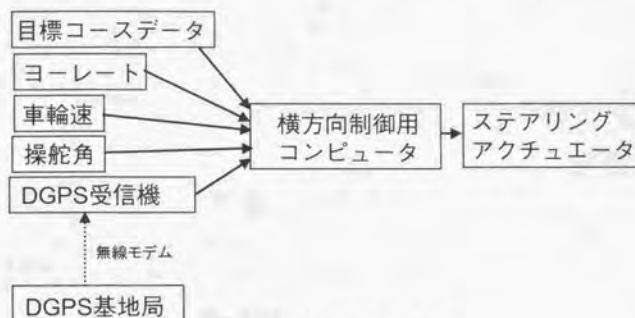


図8.5.1 実験システムの概図



図8.5.3 ステアリングアクチュエータ

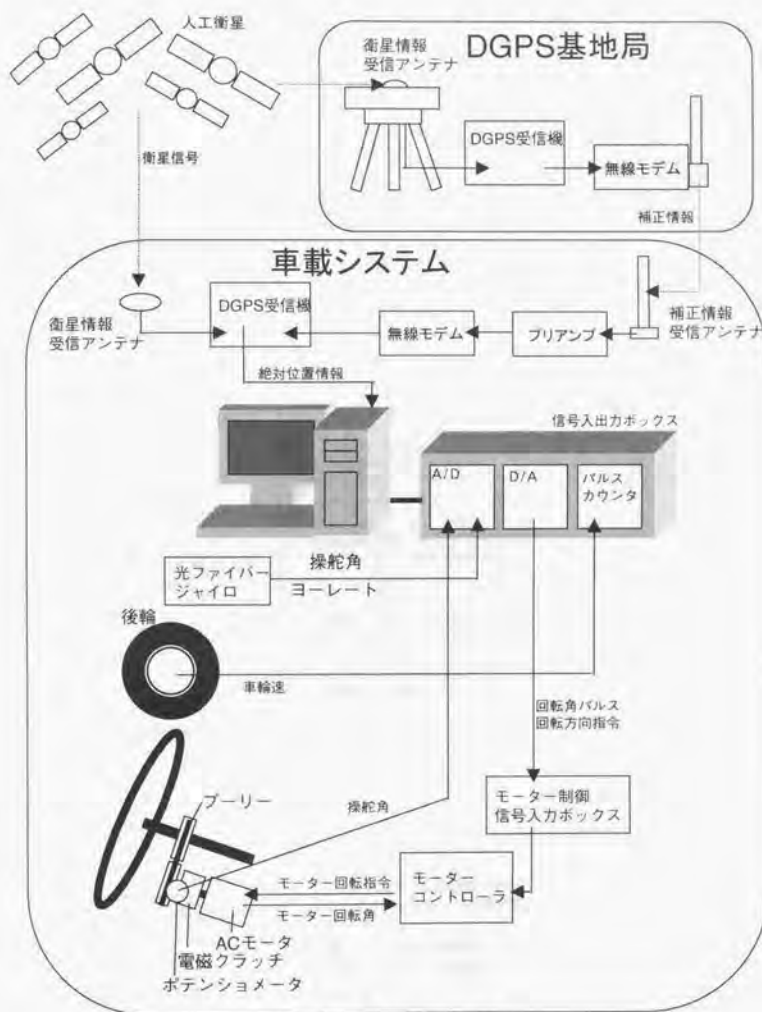


図8.5.2 実験システムの詳細図

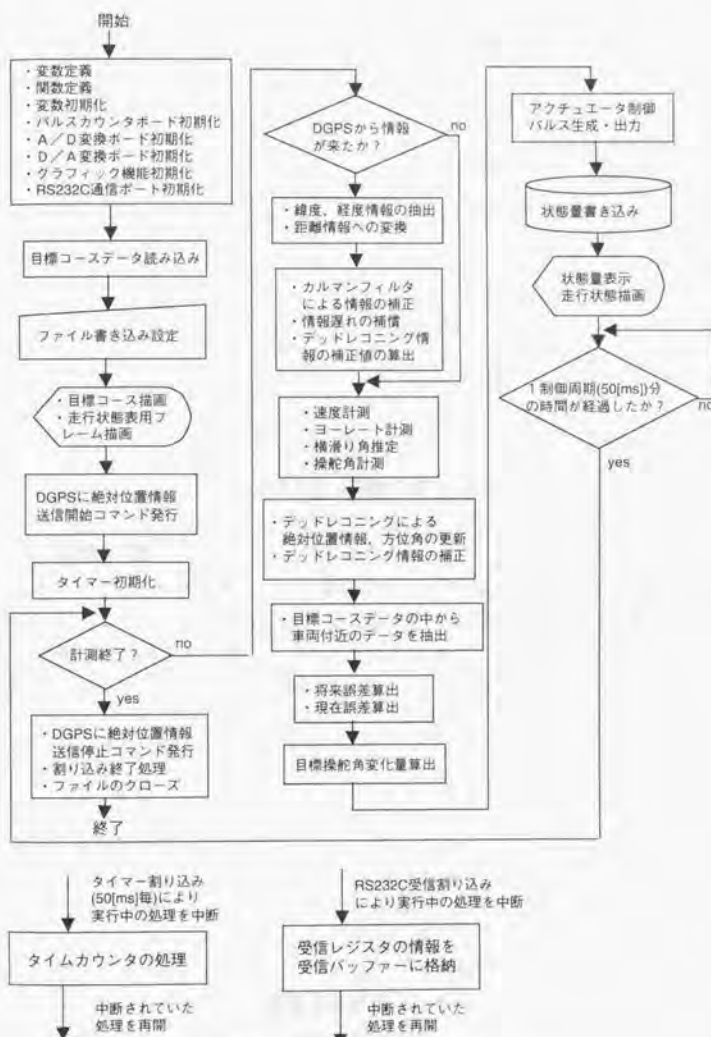


図 8.5.4 実験プログラムのフローチャート

8.5.2 実験の方法

実験は、第6.6節の実験と同様、機械システム振興協会のテストコース（御殿場）にておこなった。図8.5.5に実験コースを再び示す図中のアルファベットは実験結果において、走行している位置を分かりやすく示すためのものである。横方向制御は安全

を配慮しは走行速度3~5[m/s]で行った。制御周期は50[ms]とし、制御アルゴリズムの予見時間を1.5[s]とした。

上記実験に加え直線状の目標コースに対する追従実験を行った。この実験は筑波の工業技術院第2研究センターのテストコースにて行った。この実験における走行速度は約7[m/s](約25[km/h])とした。

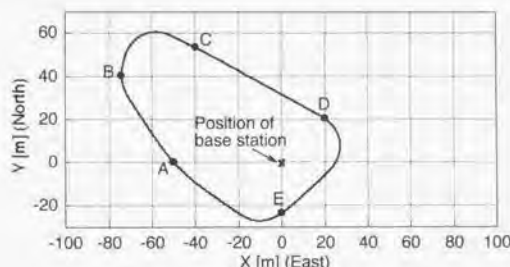


図8.5.5 実験用目標コース

8.5.3 実験結果

図8.5.6~図8.5.8に目標コース(図8.5.5)への追従結果を示す。図8.5.9に直線状の目標コースへの追従結果を示す。また図8.5.10に実験の様子を写真を示す。図8.5.6は、横方向制御時に目標コース上をA点を始点として時計回りに1周したときの追従誤差である。である。図中に記された記号は、目標コース上の該当点近傍を走行していることを示している。追従誤差は0.15[m]以下に収まっていることがわかる。またカーブの位置と追従誤差の関係をみると、追従誤差とカーブ曲率の間には相関が見られないことがわかる。図8.5.7はヨーレートを表している。ヨーレートは振動的にはなっておらず、乗り心地の良い制御が実現できている。図8.5.8はハンドル角を表している。ハンドル角は、ヨーレートの挙動どほとんど一致している。このコースを走行するために、ハンドルを最大約200[deg]回転させていることがわかる。

図8.5.9は、直線状の目標コースへの追従誤差を示している。この実験では走行速度を上記周回コースの追従実験における速度よりも大きなものとしている。定常状態における追従誤差は0.1[m]以下となっており、高精度な追従を実現していることがわかる。この走行においては、制御開始を開始して目標コースに追従以後は、ほとんどハンドルは動いておらず、ヨーレートもほとんどゼロとなっている。

実験結果により、この第8.2節、第8.3節で構築した横方向制御が実車上の運用においても有効であることを明らかにした。

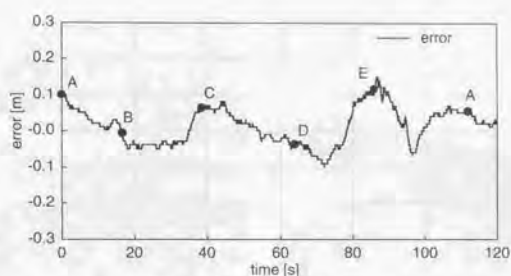


図 8.5.6 追従誤差

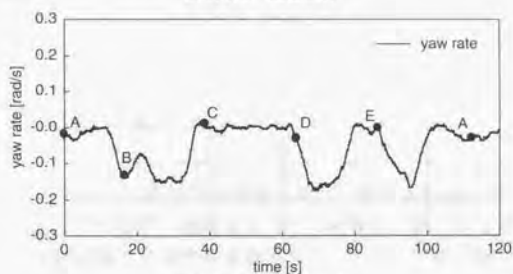


図 8.5.7 ヨーレート

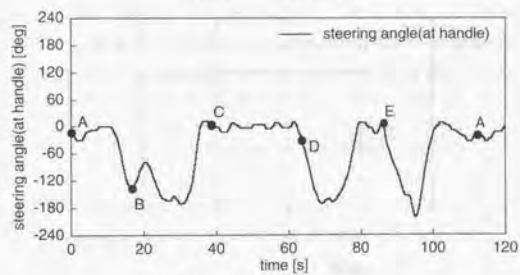


図 8.5.8 ハンドル角

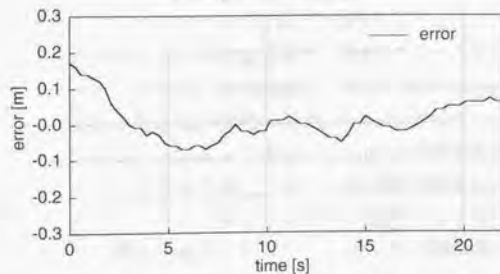


図 8.5.9 直線状コース追従時の追従誤差



図 8.5.10 実験の様子

8.6 第8章のまとめ

この章では、DGPSを利用した絶対位置情報に基づく横方向制御の検討を目的として、横方向制御の提案とその有効性の確認を行った。同時に、第6章で提案した絶対位置の推定手法の車両運動制御への有効性を確認を行った。この章で明らかにしたことをまとめると以下ようになる。

- ・追従対象として、実際の道路や先行車ではなく、データとして記述された目標コースに追従する手法を提案し、目標コースデータの記述法を提案した。
- ・目標コースに追従するための操舵制御アルゴリズムを提案し、その有効性をシミュレーションおよび実車実験により明らかにした。
- ・第6章で提案した絶対位置の推定手法が、車両運動制御に有効であることを明らかにした。

この章で提案した横方向制御は、目標コースがソフトウェアで記述されている点で、従来提案された横方向制御と大きく異なる。この制御は、従来提案された地点追従制御では困難であった、安価な自動運転システムの構築、ナビゲーションと車両運動制御の融合、冗長系の構築、車線変更や進路変更の制御の容易化などを容易に実現するポテンシャルを持つ。また、インフラからの指令に基づき目標コースの情報を変更することにより、道路工事現場における車線変更や、故障車、事故車の回避等が容易に実現することも可能である。しかし、この制御は、絶対位置情報が獲得できることを前提としているので、絶対位置情報の信頼性の高い獲得が不可欠である。第6章の絶対位置推定手法を用いる際は、トンネルや建物による衛星情報の断絶等の問題が依然として残っている。しかし、DGPSを利用した絶対位置情報の獲得の他に、道路上に敷設されたIDタグを読み取ることにより絶対位置情報を獲得する手法等が開発されており、これらを状況に応じて適切に組み合わせることにより、信頼性の高い絶対位置情報を獲得と制御が実現できると考えている。

この章で提案した横方向制御の特徴は、第6章で提案した絶対位置推定手法の特徴

と同じく、アルゴリズムの汎用性である。制御アルゴリズムの中で、車両質量や、コーナリングパワー、重心位置などの車両パラメータを全く使用していないため、この制御アルゴリズムは、2つのゲインを変更するだけで、あらゆる車両に適用できる。

8.7 記号

m	: 車両質量[kg] (2045)
I	: 車両の鉛直軸周りの慣性モーメント[kgm ² /rad] (4189.5)
V	: 車両の速度[m/s]
β	: 車両の重心における横滑り角[rad]
γ	: 車両のヨーレート[rad/s]
δ	: 車両の操舵角[rad]
l_f	: 車両の重心 - 前輪軸間距離[m] (1.282)
l_r	: 車両の重心 - 後輪軸間距離[m] (1.598)
S_f	: 前輪の横力 (2輪合計)[N]
S_r	: 後輪の横力 (2輪合計)[N]
C_f	: S_f の横方向成分 (2輪合計)[N]
C_r	: S_r の横方向成分 (2輪合計)[N]
K_f	: 前輪のコーナリングパワー (2輪合計)[N/rad] (170695)
K_r	: 後輪のコーナリングパワー (2輪合計)[N/rad] (153850)
$X_{dc,i}$: 絶対座標系における目標コース点列のX座標[m]
$Y_{dc,i}$: 絶対座標系における目標コース点列のY座標[m]
$x_{dc,i}$: 車両座標系における目標コース点列のx座標[m]
$y_{dc,i}$: 車両座標系における目標コース点列のy座標[m]
t_p	: 予見時間[s] (シミュレーション0.7, 実験1.5)
T_c	: 制御周期[s] (0.05)
X	: 絶対座標系における車両のX座標[m]
Y	: 絶対座標系における車両のY座標[m]
θ	: 絶対座標系における車両の方位角[rad]
$X_{dc,j}$: 絶対座標系における目標コース点列のX座標[m]
$Y_{dc,j}$: 絶対座標系における目標コース点列のY座標[m]
$x_{dc,j}$: 車両座標系における目標コース点列のx座標[m]
$y_{dc,j}$: 車両座標系における目標コース点列のy座標[m]
y_{cf}	: 目標コースの将来横変位[m]
y_{vf}	: 車両の将来横変位[m]
ε	: 追従誤差[m]
$\Delta\gamma_{des}$: ヨーレート変化量[rad/s]

- $\Delta\delta$: 操舵角変化量[rad]
 K_1 : フィードフォワードゲイン (1.0)
 K_2 : フィードバックゲイン (0.002)

第9章 路車間通信とDGPSを利用した車両運動制御（障害物回避制御）

この章では、絶対位置情報に基づく横方向制御の応用として、路車間通信を利用した横方向制御について検討する。第8章で提案した絶対位置情報の基づく車両制御の特徴は目標コースが書き換え可能な数値データとして記述されている点である。そのため、磁気ネイルや道路白線を検出して車線追従を行う制御システムと異なり、容易に進路変更や車線変更を実現できる。この章では、この特徴の応用として、制御車両が道路インフラからの情報に基づいて、目標コースを変更し、障害物を回避する制御を検討する。現在実用化に向けて研究開発が進められている走行支援道路システムとして、障害物衝突防止サービスがある。これは、道路インフラが道路上に存在する障害物を検出し、障害物の手前を走行する車両に障害物の存在を通知するサービスである。この章で検討する制御は、これを車両制御のレベルまで拡張するものである。すなわち、障害物の存在を検出した道路インフラが、障害物の存在を通知するだけでなく、それを回避するためのストラテジを与える。道路インフラから情報を受けた車両は、回避ストラテジにしたがい障害物を自動回避する。これにより、以下のような利点が得られる。

- ・道路上に故障車、事故車があっても、円滑に交通流を大幅に阻害することなく自動運転システムの効率を維持できる。
- ・道路工事箇所に対して自動回避が実現できるので、道路保守の容易化と自動運転システムの効率維持を実現できる。
- ・回避の際に、道路インフラから回避ストラテジに従った挙動をとるため、回避の際の挙動（回避のための走行軌跡）が予測できる。
- ・故障車、事故車が、回避ストラテジを接近する車両に送信することで、発煙筒の役割をはたすことができる。

この章では、道路インフラから受信した障害物回避ストラテジを制御車両上で処理し、目標コースを自動修正し、障害物を回避するシステムを提案し、その有効性を実車実験により評価する。

図9.0.1にこの章の流れを示す。以下の各節では、この流れに従い、道路インフラからの情報、車両側の制御、実験による評価について説明する。

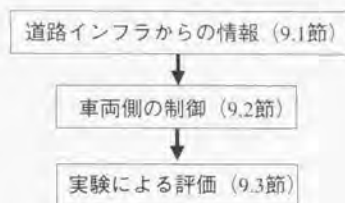


図9.0.1 第9章の流れ

9.1 道路インフラからの情報

この節では、道路インフラ上の障害物検出装置が、障害物の存在を確認した場合に車両に送信する情報について説明する。本研究では道路インフラにおける、障害物の検出手法については扱わず、障害物検出後に、車両に送信する情報のみについて検討する。本研究では、道路インフラが車両制御のために送信する情報として障害物の位置と回避ストラテジを想定している。ドライバに情報を与える場合は、「500m先に障害物があります」等の情報を与えるのが、直感的で分かりやすい。一方、絶対位置情報に基づく制御を行う場合は、絶対位置情報で障害物の位置を通知されたほうが、制御の見通しがよい。次に回避ストラテジについて説明する。車両が回避するための目標軌道を、道路インフラが生成した場合、インフラ側のアルゴリズムが煩雑になるばかりでなく、各車両に伝達しなければならない情報量が増大する。そこで、本研究では、目標軌道の生成は各車両の役割とし、インフラから車両に伝達する情報を以下のものとした。以下の情報における諸量を図9.1.1に示す。

- ・回避するべき障害物の絶対位置 (X_{ob} , Y_{ob})
- ・回避するために必要なオフセット量 (L_{offset})
- ・回避するためのオフセットを取り始める位置 (障害物からの距離) (Le_1)
- ・回避するためのオフセットを取り終わる位置 (障害物からの距離) (Le_2)
- ・本来のコースに戻り始める位置 (障害物からの距離) (Le_3)
- ・本来のコースに戻り終わる位置 (障害物からの距離) (Le_4)
- ・回避の際の最高速度 (V_c)

なお、本研究では、 $Le_1=Le_4$ 、 $Le_2=Le_3$ としているため Le_3 と Le_4 の送信は行わない、これだけの情報を車両に送信すれば、車両は、障害物を回避するための目標軌道を自動生成することが可能となる。

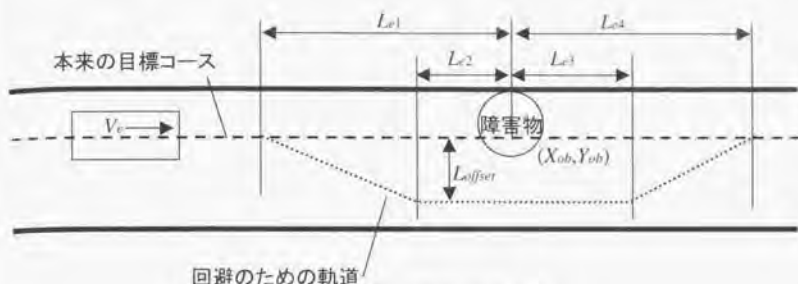


図 9.1.1 障害物回避のための情報

9.2 車両側の制御

この節では、第9.1節の道路インフラからの情報に基づき、障害物を回避する制御について説明する。従来提案された操舵による障害物を回避する制御は、緊急回避を対象としたものが中心であった。緊急回避では、荷重移動やタイヤ力の非線形性や、タイヤ力の発生の遅れが大きく影響するため、それらの影響を考慮した操舵制御系が提案されている（第2.4.4.5項参照）。本研究で想定する障害物回避は、すでに障害物の存在を道路インフラにより通知されていることが前提となる。このため、回避を行うための挙動は緩やかなものとなり、荷重移動、タイヤ力の非線形性や遅れの影響を考慮する必要はない。よって操舵制御としては、第8章の操舵制御を利用することができる。

目標コースに対して、オフセット（横偏差）をつけて走行するためには、2つの方法がある。1つは、制御における誤差情報にオフセットをつける方法であり、もう1つは、目標コースそのものを変更する方法である。以下の各項では、これらの方法について説明する。

9.2.1 誤差情報の変更による障害物回避

一般に横方向制御では、目標コースに対する横偏差をゼロにするように操舵角を制御する。ここで、横偏差をゼロではなく、ある値にするように操舵角を制御すれば、目標コースに対して、その値のオフセットをつけて走行できる。この方式は、本研究で提案する絶対位置情報に基づく制御や先行車に追従する車両追従制御では、容易に実現できるが、磁気ネイル等のマーカを参照して制御を行うシステムでは実現が困難である。というのは、磁気ネイル等のマーカを参照する場合、目標コースに対して一定量以上の横偏差をつけて走行すると、マーカを検出できなくなるためである。

以下に誤差情報にオフセットをつける方法を説明する。制御アルゴリズムは、第8.3節で提案したコース追従のための制御アルゴリズムを変更して用いる。図9.2.1に制

例に用いる諸量を示す、この図は図8.3.1とはほぼ同じである。この図中の黒丸が本来追従すべき、目標コースであり、白丸は、本来追従すべき目標コースにオフセット L_{offset} をつけたものである。第8.3節では、黒丸に追従するための操舵角の算出方法を説明したが、ここでは、白丸に追従するための操舵角の算出方法を説明する。本来の制御車両が一定のヨーレートおよび横滑り角で走行すると仮定すると、予見時間 t_p 秒後の横方向変位 $y_v[k]$ は、

$$y_v[k] = V[k] \cdot t_p \cdot \left(\frac{1}{2} \gamma[k] \cdot t_p + \beta[k] \right) \quad \dots\dots\dots (9.2.1)$$

として表される。第8.3節では、 $y_v[k]$ が、 $V[k] \cdot t_p$ 先の目標コースの横方向変位 $y_d[k]$ と一致するさせるように操舵制御のフィードフォワード項を決定したが、ここで、本来の目標コースにオフセットをつけたコースに追従するためには y_{cf} を用いずに、 y_v を L_{offset} 分ずらした値 y_{cfv} を使用する。この場合、必要なヨーレート変化量 $\Delta\gamma_{des}[k]$ は、以下の式を満たさなければならない。

$$y_{cfv}[k] = y_{cf}[k] - L_{offset}[k] = V[k] \cdot t_p \cdot \left\{ \frac{1}{2} (\gamma[k] + \Delta\gamma_{des}[k]) \cdot t_p + \beta[k] \right\} \quad \dots\dots\dots (9.2.2)$$

これを $\Delta\gamma_{des}[k]$ について解くと、

$$\Delta\gamma_{des}[k] = \frac{2y_{cfv}[k]}{V[k] \cdot t_p} - \frac{2\beta[k]}{t_p} - \gamma[k] \quad \dots\dots\dots (9.2.3)$$

となる。制御時の追従誤差 ε についても、同様に L_{offset} 分ずらした値 ε_v を使用する。この場合 ε_v は以下のように表せる。

$$\varepsilon_v[k] = \varepsilon[k] - L_{offset} \quad \dots\dots\dots (9.2.4)$$

$\varepsilon[k]$ と $\Delta\gamma_{des}[k]$ を使用することで操舵角の変化量 $\Delta\delta[k]$ を以下のように決定する。

$$\Delta\delta[k] = (K_1 \cdot \Delta\gamma_{des}[k] + K_2 \cdot \varepsilon_v[k]) T_s \quad \dots\dots\dots (9.2.5)$$

このように操舵角を決定することで、目標コースに対して、 L_{offset} のオフセットをつけて走行することができる。この方式の利点は、目標コース情報に全く手を加えることなく、 y_{cf} と ε を変更するだけで、目標コースに対してオフセットをつけて走行できる点である。また、任意のタイミングでオフセットをつけることができるので、車線変更を伴う合流における操舵制御に利用することも可能である。しかし、この方式は、定常値において、オフセットをつけることが可能であるが、定常値に至るまでの軌跡が走行速度、制御ゲイン、予見時間によって大きく変化する。図9.2.2に走行速度20[m/s]、10[m/s]、5[m/s]における直線走行時にステップ状の-1[m]のオフセットを与えた場合のシミュレーション結果を示す。各速度において、定常値に至るまでの走行軌跡が大きく異なることがわかる。障害物に至るまでに所定のオフセットをつけることができれば、結果として障害物を回避できる。しかし、道路工事現場等で障害物回避のための軌跡が定められている場合に、その軌跡から大きくはずれ、危険な状況に至る

可能性がある。操舵角の決定で、オフセット量をステップ状ではなく、距離の関数として滑らかに変化させれば、走行速度変化や制御ゲインに起因する軌跡の相違をある程度改善できる。しかし、この方法も確実な方法とは言えない。走行速度変化や制御ゲインによらず、所定の軌跡で障害物を回避するための最も確実な方法は、目標コース自体を変更することである。第9.2.2項では、目標コースを変更する方法を説明する。

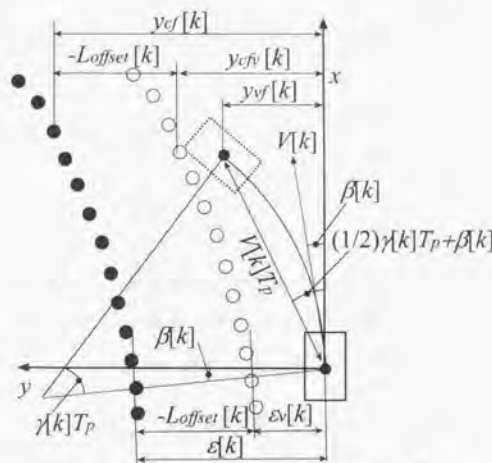


図9.2.1 誤差情報の変更による障害物回避

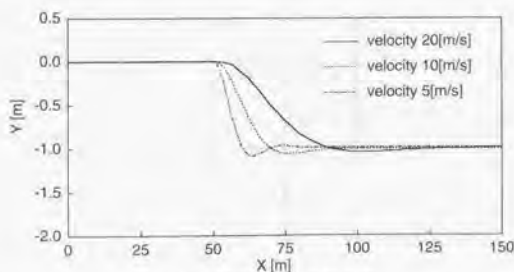


図9.2.2 速度による軌跡の違い

9.2.2 目標コースの変更による障害物回避

第8章で提案する横方向制御では、目標コース全体のデータをメモリに格納しておき、操舵角の決定の際に、車両近傍のデータを抽出して使用している。この項では、車両近傍のデータを抽出する段階で、回避ストラテジに基づき目標コースを変更する手法を説明する。目標コースデータにおけるX座標およびY座標の情報は図9.2.3のよう

に、連続的に並んでいるものとする。ここで目標コースの絶対座標を以下のような手順で変更する。変更前の目標コースの絶対座標を X_r, Y_r 、変更後の目標コースの絶対座標を X_{rv}, Y_{rv} とすると、インフラからの情報に基づき以下のように目標コースを変更する。

$$\begin{bmatrix} X_{rv}[n] \\ Y_{rv}[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r[n] \\ Y_r[n] \end{bmatrix} \quad (D_{ob}[n] \geq L_{e1} \text{ の場合}) \quad \dots\dots\dots (9.2.6)$$

$$\begin{bmatrix} X_{rv}[n] \\ Y_{rv}[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r[n] \\ Y_r[n] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \eta & -\sin \eta \\ \sin \eta & \cos \eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{L_{offset}}{2} \left\{ 1 + \cos \left(\frac{D_{ob}[n] - L_{e2}}{L_1 - L_2} \pi \right) \right\} \\ \frac{L_{offset}}{2} \left\{ 1 + \cos \left(\frac{D_{ob}[n] - L_{e2}}{L_{e1} - L_{e2}} \pi \right) \right\} \end{bmatrix} \\ (L_{e1} > D_{ob}[n] > L_{e2} \text{ の場合}) \quad \dots\dots\dots (9.2.7)$$

$$\begin{bmatrix} X_{rv}[n] \\ Y_{rv}[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r[n] \\ Y_r[n] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \eta & -\sin \eta \\ \sin \eta & \cos \eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{offset} \\ L_{offset} \end{bmatrix} \quad (D_{ob}[n] \leq L_{e2} \text{ の場合}) \quad \dots\dots (9.2.8)$$

ここで、 D_{ob} は、点 (X_r, Y_r) と障害物までの距離である。 η は X_r, Y_r において、目標コースと鉛直をなす角である。 D_{ob} および η は以下の式で表される。

$$D_{ob}[n] = \sqrt{(X_{ob} - X_r[n])^2 + (Y_{ob} - Y_r[n])^2} \quad \dots\dots\dots (9.2.9)$$

$$\eta = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{Y_r[n+1] - Y_r[n-1]}{X_r[n+1] - X_r[n-1]} \right) \quad \dots\dots\dots (9.2.10)$$

上式のように目標コースを変更した場合、結果として生成される変更後の目標コースは図9.2.4のようになる。この図では、本来の目標コースは、X軸に一致している。道路インフラからの情報は、 $(X_{ob}, Y_{ob}) = (50, 0)$ 、 $L_{e1} = 30, L_{e2} = 5, L_{offset} = 3.5$ としている。この図からもわかるように、障害物を回避する際の目標コースを三角関数で記述することにより、変更後の目標コースの曲率の変化をなめらかなものにしていく。上記の手法で、障害物回避のための目標コースを生成すれば、第8.3節の操舵制御アルゴリズムにより、生成した目標コースへの追従を行えばよい。

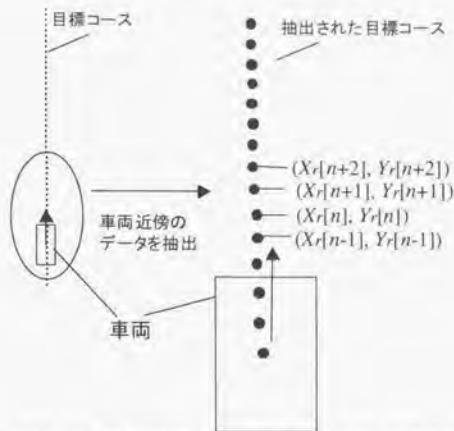


図 9.2.3 横方向制御における目標コースデータの抽出

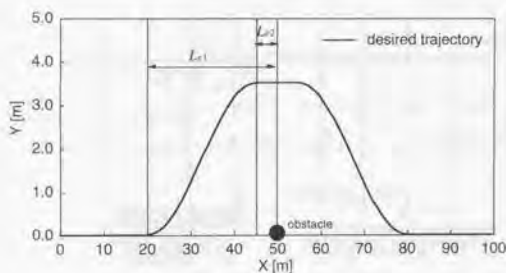


図 9.2.4 変更後の目標コース

9.3 実験による評価

この節では、第9.1節および第9.2.2項で説明した障害物の回避手法を評価するための実験とその結果について説明する。以下の各項では、実験システム、実験の方法、実験結果について説明する。

9.3.1 実験システム

実験システムは、第8.5節の横方向制御のための実験システムに路車間通信機を加えたものである。実験システムの概図および詳細図をそれぞれ図9.3.1、図9.3.2に示す。路車間通信機としては、小電力無線モデムを使用している。道路インフラからの情報は、ノート型パソコンから、小電力無線モデム経由で制御車両に送信される。制

御用プログラムは、第8.5節の横方向制御プログラムに、道路インフラからの情報受信と、障害物回避のための目標コースの自動生成を行うプログラムを加えたものとなる。図9.3.3にプログラムのフローチャートを示す。

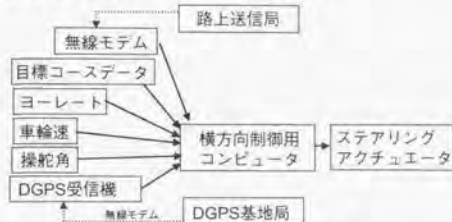


図 9.3.1 実験システムの概図

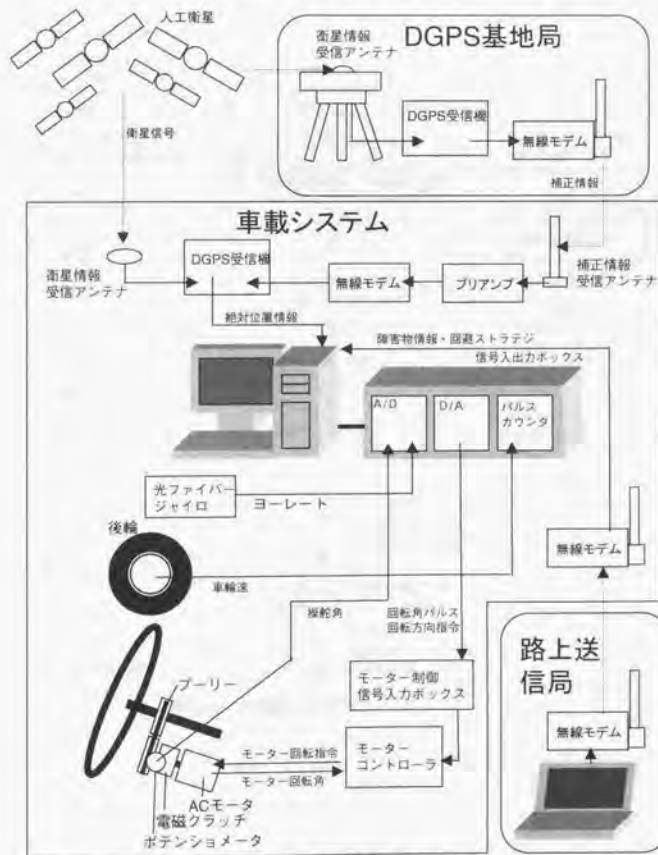


図 9.3.2 実験システムの詳細図

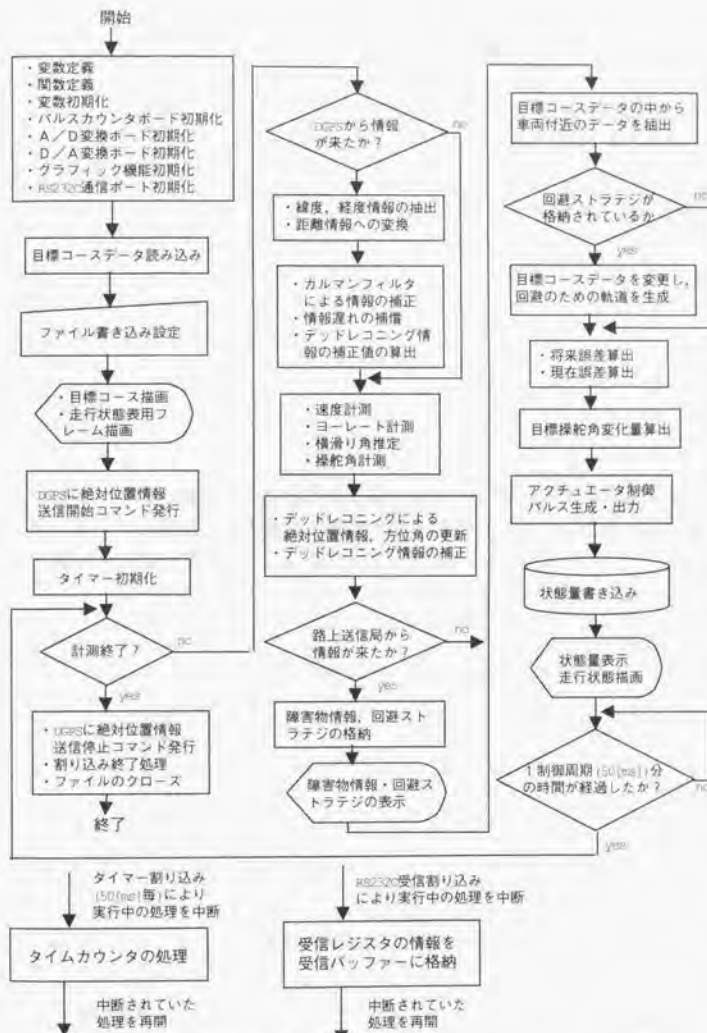


図 9.3.3 実験プログラムのフローチャート

9.3.2 実験の方法

実験は、第6.6節の実験と同様、機械システム振興協会のテストコース（御殿場）にておこなった。横方向制御は安全を配慮しは走行速度3～5[m/s]で行った。制御周期は50[ms]とし、制御アルゴリズムの予見時間を1.5[s]とした。路上の送信局および障害物（停止車両）を図9.3.4のように配置した。図9.3.4中の線は、路上送信局から、情報を送信しなかった場合の制御車両の軌跡（目標コースとほとんど一致している）である。もちろん、この場合は障害物を配置していない。実験で使用した無線モデムでは、コース上全域に路上送信局からの情報が届くため、この実験では、制御車両が路上送信局付近を走行したときに、人間の操作によって、障害物情報および回避情報を送信している。障害物に関する情報および、回避のストラテジとして以下の情報を文字情報の形で送信している。

$$(X_{ob}, Y_{ob}) = (-12, 38.2)$$

$$L_{e1}(=L_{e4})=20$$

$$L_{e2}(=L_{e4})=10$$

$$L_{offset}=3.5$$

制御車両はこの情報に基づいて、障害物回避のための目標コースを自動生成し、障害物を回避する。この実験では、速度制御はドライバーが行っているため、路上送信局からの速度情報の情報送信を行っていない。

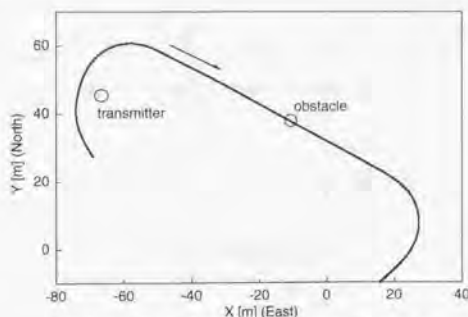


図9.3.4 障害物を回避しない場合の車両の軌跡

9.3.3 実験結果

実験結果を図9.3.5～図9.3.7に示す。図9.3.5は、制御車両の走行軌跡である。図9.3.4と比べて明かなように、障害物を回避している。図9.3.6は、障害物付近における走行軌跡を表したものである。この図をみると障害物を回避するだけでなく、路上送信局からの与えられた回避ストラテジ通りに従い、障害物を回避していることがわかる。すなわち障害物手前20[m]地点（A地点）から、本来の目標コースに対するオフセットを取り始め、障害物手前10[m]地点（B地点）では、指定のオフセット量であ

る3.5[m]に達している。また、障害物後方10[m]地点(C地点)から、本来の目標コースに戻り始め、障害物後方10[m]地点(D地点)で本来の目標コースに戻っている。

図9.3.7は、目標コースに対する追従誤差を示している。この場合の追従誤差とは、障害物回避の際に自動生成された目標コースに対する追従誤差を指している。図中に記された記号は、図9.3.6の走行軌跡上の該当点近傍を走行していることを示している。この図を見ると、本来の障害物回避のために、目標コースに対するオフセットを取る際と、障害物回避後本来の目標コースに戻る際に追従誤差が大きくなっていることがわかる。誤差が大きい部分における目標コースの曲率を考慮すると、この程度の追従誤差は避けられないと考えている。

以上の実験結果により、提案する障害物回避制御の有効性を明らかにした。

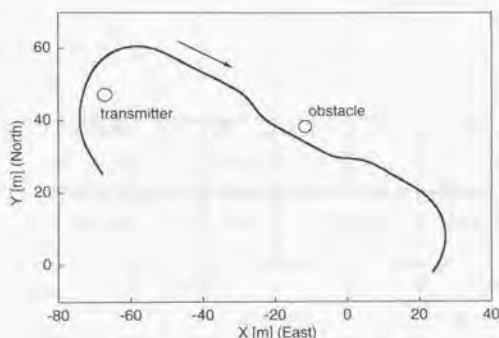


図 9.3.5 障害物制御による車両の軌跡

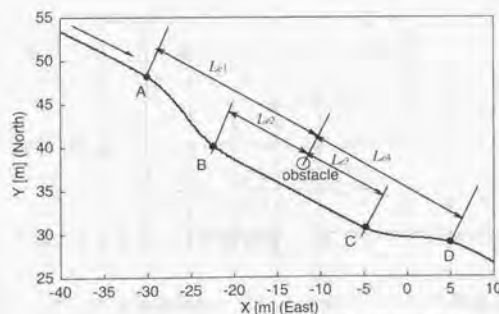


図 9.3.6 障害物制御による車両の軌跡 (障害物周辺)

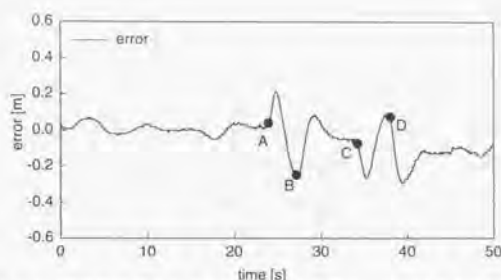


図 9.3.7 障害物回避のために生成された目標コースに対する追従誤差

9.4 第9章のまとめ

この章では、絶対位置情報に基づく横方向制御の応用として、路車間通信を利用した障害物回避制御について検討した。制御車両が道路インフラから受信した障害物位置と回避ストラテジの情報に基づき、障害物回避のための目標コースを自動生成し、障害物を回避する制御を提案し、その有効性を実車実験により確認した。この章で明らかにしたことをまとめると以下ようになる。

- ・ 障害物回避制御を行う際に道路インフラ車両に与えるべき情報を明確にした。
- ・ 道路インフラからの情報に基づき、障害物回避のための目標コースを自動生成する手法を提案した。
- ・ 道路インフラからの情報に基づき、障害物回避のための目標コースを自動生成し、それに追従することで障害物を回避する制御を提案した。
- ・ 実験により提案する障害物回避制御の有効性を明らかにした。

この章で提案した障害物回避制御は、第8章で提案した横方向制御の特徴である目標コースがソフトウェアで記述されている点を活かしたものである。その意味で、この制御は、第8章の横方制御のアプリケーションの1つと考えることができる。提案する障害物回避制御により、自動運転システムの信頼性の向上や、道路工事等の道路保守の容易化等を実現することができる。もちろん、この方式の障害物の回避において、制御車両が一般車線に入り込むような場合は、一般車両との衝突を避けるシステムの構築が必要となる。

この章で提案した障害物回避制御は、車両と道路インフラの協調を大幅に促進するものである。すなわち、この制御は、道路インフラが車両への情報提供のみならず、運動制御に介入するための基礎技術としての意義を有する。自動車のセンサよりも、遥かに広い検出範囲を持ち、巨視的な規模での情報解析が可能な道路インフラが、車両の運動制御に介入することができれば、自動運転システムの効率化が大きく促進されることが期待できる。

9.5 記号

X_{ob}	: 絶対座標系における障害物のX座標[m] (-12)
Y_{ob}	: 絶対座標系における障害物のY座標[m] (38.2)
L_{offset}	: 障害物回避のためのオフセット量(本来のコースに対する横偏差量) [m] (3.5)
L_{e1}	: 障害物回避のためののオフセットを取り始める位置 (障害物からの 距離) [m] (20)
L_{e2}	: 障害物回避のためののオフセットを取り終わる位置 (障害物からの 距離) [m] (10)
L_{e3}	: 本来のコースに戻り始める位置 (障害物からの距離) [m] (10)
L_{e4}	: 本来のコースに戻り終わる位置 (障害物からの距離) [m] (20)
V_c	: 障害物回避の際の最高速度[m/s]
V	: 車両の速度[m/s]
β	: 車両の重心における横滑り角[rad]
γ	: 車両のヨーレート[rad/s]
δ	: 車両の操舵角[rad]
t_p	: 予見時間[s] (1.5)
T_c	: 制御周期[s] (0.05)
y_{cf}	: 目標コースの将来横変位[m]
y_{cfv}	: 目標コースの将来横変位にオフセットをつけたもの[m]
y_{vf}	: 車両の将来横変位[m]
ε	: 追従誤差[m]
ε_v	: 追従誤差にオフセットをつけたもの[m]
$\Delta\gamma_{des}$: ヨーレート変化量[rad/s]
$\Delta\delta$: 操舵角変化量[rad]
K_1	: フィードフォワードゲイン (1.0)
K_2	: フィードバックゲイン (0.002)
X_r	: 絶対座標系における目標コースのX座標[m]
Y_r	: 絶対座標系における目標コースのY座標[m]
X_{rv}	: 絶対座標系における障害物回避のための目標コースのX座標[m]
Y_{rv}	: 絶対座標系における障害物回避のための目標コースのY座標[m]
D_{ob}	: 目標コース上の各点と障害物の距離
η	: 絶対座標系における目標コースと垂直をなす角

第10章 プラトウーンのタスク制御

この章では、プラトウーンのタスク制御層の制御アルゴリズムについて検討する。プラトウーンのタスク制御は、プラトウーンの挙動を決定するものであり、定常走行のみならず、合流、分離、インフラとの協調等を制御する。本研究ではプラトウーン中の1台の車両のリーダーシップによるプラトウーン挙動の決定および制御を想定している。本研究では、このリーダー車両の役割をプラトウーンの前頭車が負うものとしている。プラトウーン挙動の決定をプラトウーン中の1台の車両のタスクとして位置付けることにより、以下の利点が得られる。

- ・合流、分離の際の手続きや車車間通信負荷の軽減できる
- ・道路インフラからの情報をプラトウーン挙動に反映させる際の手続きや路車間通信負荷の軽減できる
- ・プラトウーン挙動を制御する際の各車両間のコンセンサスが不要になるため、挙動制御時の手続きや車車間通信負荷が軽減する。
- ・制御器が新機能を獲得した際に、その恩恵を受けられる確率が向上する。

これに対し、プラトウーンを構成する各車両がそれぞれタスク制御を行う場合は上記の手続きが複雑化し、通信負荷が増大する。また、制御器が新機能を獲得した際に、プラトウーン内の全ての車両がその機能を有しない限りその機能の恩恵を受けられないことが起こり得る。

本研究で設計するタスク制御は、以前の章で検討した全ての要素技術の使用を前提としている。すなわち、車両の動特性を均一化するモデルマッチング制御、プラトウーンを一力学系として扱った縦方向制御、絶対位置情報およびその送受信の使用を想定している。さらに、従来から存在する要素技術である車間距離計測、状態量計測、車車間通信、路車間通信等の技術の使用も前提としている。

この章の構成は図10.0.1のようになっている。以下の各節では、図の構成に従いプラトウーン形態、プラトウーン内通信、合流・分離時における通信、インフラとの通信、定常走行時のタスク制御、合流時・分離時におけるタスク制御、インフラからの情報に基づくタスク制御について説明する。なおタスク制御の評価は第11章にて説明する。

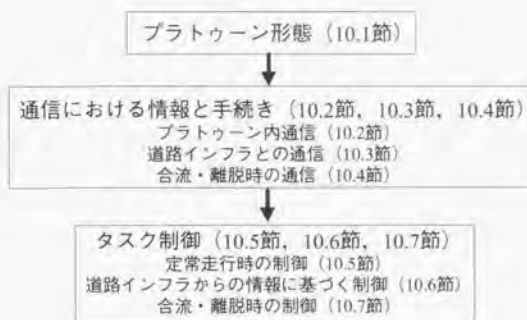


図 10.0.1 第 10 章の流れ

10.1 プラトーン形態

10.1.1 プラトーンの定義

本研究では、プラトーンの形態を縦一列の隊列とする。プラトーン内は主に車間距離の一定車間距離制御とし、プラトーン間は一定車間時間制御とする。プラトーン内は車車間通信による状態量の共有のによりストリングスタビリティを保證できる。このため、プラトーン内の車間距離制御方式は高交通容量を実現する一定車間距離制御が適していると考え、一方、プラトーン間の密な車車間通信は想定しないため、車車間通信なしでストリングスタビリティを保證できる一定車間時間制御が適していると考え、本研究の考え方に従えば、プラトーン走行と車間距離制御機能付きクルーズコントロール (Adaptive Cruise Control, ACC) を定義することもできる。すなわち、プラトーンを構成する車両が 1 台の場合は ACC であり、2 台以上の場合にはプラトーンと定義することができる。

10.1.2 プラトーンの形態の決定

プラトーンの形態を決定する際に決定するパラメータとして、図 10.1.1 に示す以下の 4 つがある。

- ・プラトーン内車間距離 ($L[m]$)
- ・プラトーン間車間時間 ($h[s]$)
- ・プラトーン間最低車間距離 ($L_m[m]$)
- ・プラトーン構成車両台数 ($N[台]$)

ここで、定常走行時の交通容量を算出し、パラメータの決定の際の考察に用いる。平均車長を $L_c[m]$ 、定常走行時の平均速度を $V[m]$ とすると、交通容量 $T_c[台/h]$ は、以下のように記述できる。

$$T_c = \frac{3600VN}{L_c N + (N-1)L + hV + L_m} \quad \dots\dots\dots (10.1.1)$$

ここで各パラメータで上式を変微分すると、

$$\frac{\partial T_c}{\partial N} = \frac{3600V(hV + L_m - L)}{\{L_c N + (N-1)L + hV + L_m\}^2} \quad \dots\dots\dots (10.1.2)$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial L} = -\frac{3600VN(N-1)}{\{L_c N + (N-1)L + hV + L_m\}^2} \quad \dots\dots\dots (10.1.3)$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial L_m} = -\frac{3600VN}{\{L_c N + (N-1)L + hV + L_m\}^2} \quad \dots\dots\dots (10.1.4)$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial h} = -\frac{3600V^2 N}{\{L_c N + (N-1)L + hV + L_m\}^2} \quad \dots\dots\dots (10.1.5)$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial V} = \frac{3600N\{L_c N + (N-1)L + L_m\}}{\{L_c N + (N-1)L + hV + L_m\}^2} \quad \dots\dots\dots (10.1.6)$$

上式は、各パラメータの変動が交通容量におよぼす影響度を表している。たとえば、式(10.1.3)を見ると、 L を小さくし、同時に N を大きくすると効果的に交通容量が増大することがわかる。また、式(10.1.6)は、速度によって交通容量が変化しないプラトーン形態は存在しないことを示している。各パラメータの影響を見通し良く評価するため上式に基準値を代入してみる。基準値としては、 $V=27.8[\text{m/s}]$ ($100[\text{km/h}]$)、 $L_c=L=L_m=5$ 、 $N=10$ 、 $h=2$ を使用した。この状況における、各パラメータの変動が交通容量に与える影響を評価することができる。

$$\frac{\partial T_c}{\partial N} = 230 \quad \dots\dots\dots (10.1.7)$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial L} = -372 \quad \dots\dots\dots (10.1.8)$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial L_m} = -41 \quad \dots\dots\dots (10.1.9)$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial h} = -1148 \quad \dots\dots\dots (10.1.10)$$

上式の意味は、例えばプラトーン内車間距離を基準値より $1[\text{m}]$ 短くすると、交通容量は約 $372[\text{台/h}]$ 増大することである。この評価により、積極的に調整すべきパラメータの見通しを得ることができる。 N の $1[\text{台}]$ の変動が交通容量に与える影響は、 L の $0.61[\text{m}]$ の変動、あるいは h の $0.2[\text{s}]$ の変動が交通容量に与える影響にほぼ等しいと言える。

上記の考察および本研究における制約に基づき、1レーンあたり最大 $10000[\text{台/h}]$ ($V=27.8[\text{m/s}]$ 、 $L_c=5[\text{m}]$ とする)を実現するプラトーン形態を求める。本研究で特に

調整の際、制約を受ける値は N である。 N は車車間通信能力に依存する値である。本研究で想定するプラトーンは状態量の送受信を利用して一力学系として扱うため N の増大と共に車車間通信負荷が大きくなる。また通信エラーは、個別の車両制御を主体とするプラトーン（従来型プラトーン）よりも重大な影響を及ぼす。通信の信頼性向上のためには N および L を小さくして、プラトーン長を短く押さえる必要がある。一方 L 、 L_m 、 h は、制御系およびアクチュエータの性能に依存する値である。従来研究によると、縦方向制御で0.15[m]程度の車間距離維持精度を実車実験により確認されている。また乗用車および大型車においてそれぞれ $h=0.25$ [s]および0.7[s]で安定な制御が実現できると言われている。これらの知見により、本研究では、 h および L を小さくすることにより大交通容量を実現するプラトーン形態を決定する。本研究では $L=2$ [m]、 $L_m=4$ [m]、 $h=1$ [s]、 $N=10$ [台]として決定した。この場合、平均速度と交通容量の関係は、

$$T_s = \frac{36000V}{72+V} \quad \dots\dots\dots (10.1.11)$$

となり、 $V=27.8$ [m/s] (100[km/h])において、10022[台/h]、 $V=13.9$ [m/s] (50[km/h])においても5880[台/h]の交通容量を実現することが可能である。従来の手動運転における交通容量が2000[台/h]程度であること、および自動運転システムで期待されている交通容量がその2～3倍程度であることを考慮すると、上記形態のプラトーンで十分に要求を満たすことができると考える。



図 10.1.1 プラトーンの形態

10.2 プラトーン内通信

この節では、プラトーンの挙動制御を実現するためにプラトーン内で送受信する情報とその手続きについて考察する。本研究では、通信媒体や通信方式についての考察は行わず、必要な通信情報を具体化することを目的としている。具体的な説明を行うために、本研究では、プラトーン内通信として時分割多重アクセス方式 (TDMA) に基づく通信方式を想定し、通信情報について説明する。時分割多重アクセス方式は、情報送信のタイミングを時間で区切ることにより、1つのチャンネルを複数の通信機で共有する方式である[19]。割り当てられた送信時間帯をタイムスロットと

呼ぶ。この方式は現在、携帯電話で使用されており、車車間通信においても適用例が報告されている。車車間通信で時分割多重アクセス方式を利用する場合は、携帯電話の場合と異なり、受信側は、そのチャンネルで発信される全ての情報を受信する。例えば、A、B、Cの三者があるチャンネルを利用して、時分割多重アクセス方式を利用して情報を発信する場合、Aは、割り当てられたタイムスロットで情報を発信すると同時に、そのチャンネルで発信されるB、Cの情報を受信する。一方携帯電話では、A、B、Cの情報をすべて基地局が受信し、別の通話先に送信するので、AはBあるいはCから発信される情報を受信することはない。この方式の利点は、通信のリアルタイム性が保証されている点である。もちろん本研究で提案するプラトーン内通信は、時分割多重アクセス方式の適用のみに限定されるものではない。たとえば、符号分割多重アクセス方式(CDMA)を適用することも可能であるし、赤外線等を利用した光通信を適用することも可能である。また、コンピュータ同士の通信で利用されているパケット通信も利用できると考えられる。(パケット通信を利用する場合は通信のリアルタイム性をどのように保証するかが問題となる。)本研究では、プラトーン内は同一チャンネルを利用した時分割多重アクセス方式を利用し、プラトーン毎のチャンネルの割り当てには、符号分割多重アクセス方式を利用することを想定している。

車車間通信は、図10.2.1に示す構成の通信内容構成が周期的に繰り返されるものとしている。各車両はインフラから発信される同期信号によってタイミングをとり、予約したタイムスロットの発信タイミングに合わせて情報を発信するものとしている。本研究では、プラトーン先頭車用に1つのタイムスロット割り当て、各追従車に1つづつタイムスロットを割り当てるものとする。この場合プラトーン構成する最大車両台数(N) - 1個のタイムスロットを用意する必要がある。合流車がアクセスする際に、追従車のタイムスロットを使用するものとする、さらに1つ以上の追従車用タイムスロットを用意する必要がある。よって追従車用のタイムスロットは N 個以上必要となる。

プラトーン先頭車がタイムスロットの中で送信する情報は表10.2.1のようになる。項目IDは、車車間通信手続きの説明の便宜のために付加したものである。構成車両台数を10台、実数を4バイト、車両IDを表す整数を4バイト、符号を1~4ビットとして計算すると約50バイトの情報となる。これらの情報は本研究で提案する制御システムにおいては、最低限必要な情報である。プラトーン先頭車の状態量や緊急停止指示などの情報を送受信すればシステムの信頼性向上を図ることができる。

追従車がタイムスロットの中で送信する情報は表10.2.2のようになる。実数を4バイト、車両IDを表す整数を4バイト、符号を1~4ビットとして計算すると約30バイトの情報となる。なお、プラトーンを構成しない、単体車両においては、プラトーン先頭車用のタイムスロットおよび追従車のタイムスロットにおいて情報を送信するものとする。

プラトーンの構成車両台数を N 台とすると、最低限必要な情報は約 $50+30N$ バイトとなる。10台の車両で50[ms]周期にて上述の通信を行うとすると、パリティビットの付加や情報圧縮をしない状態で通信速度56000[bps](7000[byte/s])の情報の送受信を

行うことが要求される。要求される通信速度は現在の移動体通信技術で十分実現できるものである。

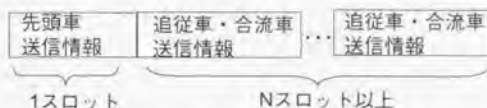


図 10.2.1 車車間通信におけるタイムスロット

表 10.2.1 プラトウーン先頭車が発信する情報

項目	データ型	符号の内容	主に使用する状況	項目ID
各車両の目標加速度	実数×N		定常走行	L1
各車両の車線変更指示	符号×N	車線変更許可OR車線変更許可	合流・離脱	L2
各車両の予約タイムスロットの変更先	整数×N		合流	L3
通信グループへの参加または離脱の許可・不許可を通知する車両ID	整数		合流・離脱	L4
通信グループへの参加または離脱の許可・不許可	符号	参加許可OR不許可OR離脱許可	合流・離脱	L5
プラトウーンへの編入または離脱許可車・不許可を通知する車両ID	整数		合流・離脱	L6
プラトウーンへの編入または離脱許可・不許可	符号	編入許可OR離脱許可OR不許可	合流・離脱	L7
プラトウーン先頭車権譲渡対象車両ID	整数		離脱	L8
通信行動状態	符号	行動無しOR他の通信グループへの参加要求中OR他の通信グループから参加被要求中OR通信チャンネル変更	合流	L9
通信チャンネル変更先	整数		合流	L10
タイムスロット使用状況	符号×N	使用および未使用		L11
通信グループ台数	整数		合流	L12
プラトウーン構成車両台数	整数		合流	L13

表 10.2.2 プラトウーン追従車および合流車が発信する情報

項目	データ型	符号の内容	主に使用する状況	項目ID
車両ID	整数		合流・離脱	F1
加速度	実数		定常走行	F2
速度	実数		定常走行	F3
絶対位置	実数×2		定常走行	F4
車間距離	実数		定常走行	F5
自車長	実数		定常走行	F6
プラトウーンメンバー資格	符号	プラトウーン構成車両OR非プラトウーン構成車両	定常走行	F7
車線変更状態	符号	車線変更無しOR他車線へ変更中ORプラトウーン車線へ変更中	合流・離脱	F8
通信グループへの参加・離脱要求	符号	参加要請OR参加中OR離脱要請	合流・離脱	F9
プラトウーンへの編入・離脱要求	符号	参加要請OR参加中OR離脱要求	合流・離脱	F10
車線変更要求	符号	要求ありOR要求無し	離脱	F11
プラトウーン先頭車権受理確認	符号	受理OR不受理OR非被要請	離脱	F12

10.3 合流・離脱時の車車間通信

この節では、第10.2節の車車間通信を利用して、合流および離脱時における車者間通信手続きについて説明する。この節では、車車間通信の手続きに焦点を絞って説明する。合流および離脱時の制御に関しては、第10.7節で説明する。

10.3.1 合流時の車車間通信手続き

本研究で言う合流とは以下のことを指す

- ・単体車両がプラトーンと通信を確立して、プラトーンに編入する
- ・単体車両と単体車両が通信を確立して、プラトーンを形成する
- ・プラトーンが別のプラトーンと通信を確立して、プラトーンを再形成する
- ・プラトーンが単体車両と通信を確立して、プラトーンを再形成する

合流の手順としては、車車間通信の確立を行い、その後プラトーンへの編入を行うものとしている。プラトーンがプラトーンあるいは単体車両に合流する際は、プラトーンの前頭車両のみが他のプラトーンあるいは単体車両と通信を行い合流手続きを行うものとしている。その際、追従車はプラトーン前頭車の指示に従い通信チャンネルの変更等を行う。図10.3.1は合流時における車車間通信の手続きを表す状態遷移図である。この車車間通信のプロセスの特徴は、同時に2チャンネルの送信あるいは、同時に2チャンネルの受信を行わない点である。プラトーンとプラトーンが合流する場合、自分のプラトーン内の通信チャンネルで車車間通信を行いながら、他のプラトーンと通信を行う必要がある。この車車間通信のプロセスでは、自分のプラトーン内の通信で先頭車のタイムスロットを使用して情報を発信し、他のプラトーンとの通信では、通信先チャンネルの追従車用タイムスロットを使用して情報を送信する。一方、情報を受信する際も、自分のプラトーン内の通信で追従車のタイムスロットの情報を受信し、他のプラトーンとの通信では、通信先チャンネルの前頭車用タイムスロットの情報を受信する。

以下では状態遷移図に付けられた記号に従って、以下に車車間通信手続きを説明する。

状態Aは、プラトーン走行状態あるいは、合流車線上を単体車両で走行している状態、あるいはプラトーン車線上を単体車両で走行している状態を示している。

状態Bでは、自車がリーダとなっているプラトーンの構成車両台数を確認する。ここで、単体車両の場合は構成車両1台のプラトーンとして扱う。ここで、プラトーンの構成車両台数が規定数（たとえば5台といった定数あるいは、道路インフラからの推奨プラトーン構成車両台数）以下の場合、合流の手続きを開始する。すなわち、構成車両台数が規定数以上のプラトーンは、他の車両の合流を受け入れるが、自ら他のプラトーンに合流しないこととなる。

状態Cでは、プラトーンが受信チャンネルを切り替えて、受信可能な周囲の他の通信グループの存在を確認する。周囲の他の通信グループが存在しない場合は合流を

中止する。周囲の他の通信グループが存在する場合、その送信内容を受信する。

状態Dでは、周囲に存在する通信グループの位置を確認する。周囲の通信グループの送信情報の項目F4(表10.2.1参照)と自車の車間距離センサの情報により、自車前方かつ最も近い車両を含むプラトーンであれば、それを合流対象として合流を継続する。

状態Eでは、合流対象プラトーンの通信行動状態を確認する。ここで、合流対象プラトーンの項目L9を参照する。他の車両と手続き中であれば、合流を中止する。

状態Fは、合流後のプラトーン構成車両台数を確認する。合流対象プラトーンのL12, L13を参照して、通信グループおよびプラトーンを構成する車両台数が規定数を超えないことを確認する。規定数(たとえば10台といった定数、あるいは、道路インフラからの推奨プラトーン構成車両台数)を超える場合は、合流を中止する。

状態Gでは、合流対象プラトーンの未予約の追従車用タイムスロットを確認する。合流対象プラトーンのL11を参照し、未予約の追従車用タイムスロットを確認し、その中で、自車が予約するタイムスロットを決定する。その後、送信チャンネルを合流対象プラトーンのチャンネルに合わせ、タイムスロットの発信タイミングにて、情報を送信する。その時に送信する情報の中で、F9を利用して通信グループへの参加要求を行う。

状態Hでは、通信グループへの参加要求の許可を確認する。合流対象のL4, L5を参照することにより、自車の通信グループへの参加要求が許可されたか否かを確認する。参加要求が許可されない場合は合流を中止する。

状態Iでは、合流対象プラトーンの未予約の追従車用タイムスロットを再度確認する。この手順は、自車を先頭車とするプラトーンに追従車が存在しない場合は、不要である。合流対象プラトーンのL11を参照し、未予約の追従車用タイムスロットを確認し、自車および追従車が予約するタイムスロットを決定する。

状態Jでは、自車の追従車に通信チャンネルを合流対象プラトーンのチャンネルに切り替えることを指示し、同時に合流対象プラトーンのチャンネルで予約するタイムスロットを指示する。L10にチャンネルの変更先を指示することにより、合流対象プラトーンのチャンネル変更を指示する。また、L3に予約タイムスロットを各車両別に指示することにより、合流対象プラトーンのチャンネルで予約するタイムスロットを指示する。

状態K, Lでは、通信チャンネルを変更することにより、合流対象プラトーンの通信グループに参加する。

以後は、自車が走行している車線に応じて状態Oあるいは、状態M, Nとなる。自車がプラトーン用車線を走行している場合、車線変更をすることなく、合流対象プラトーンに合流する(状態O)。自車が合流車線あるいは一般車線を走行している場合、車線変更を伴って合流対象プラトーンに合流する(状態M, N)。

状態Mでは、プラトーンへの編入要求を行う。自車のタイムスロットにおいて送信する情報の中で、F10を利用してプラトーンへの編入要求を行う。

状態Nでは、プラトーンへの編入許可の確認を行う。合流対象プラトーンのL6,

17を参照して自車のプラトーンへの編入要求が許可されたか否かを確認する。編入要求が許可されない場合は合流を中止する。

状態0では、合流対象プラトーンの制御を受ける。合流対象プラトーンのL1を参照し、それを自車の目標加速度として走行を行い、車線変更の指示により、車線変更を行う

状態Pは、合流が成功した状態である。

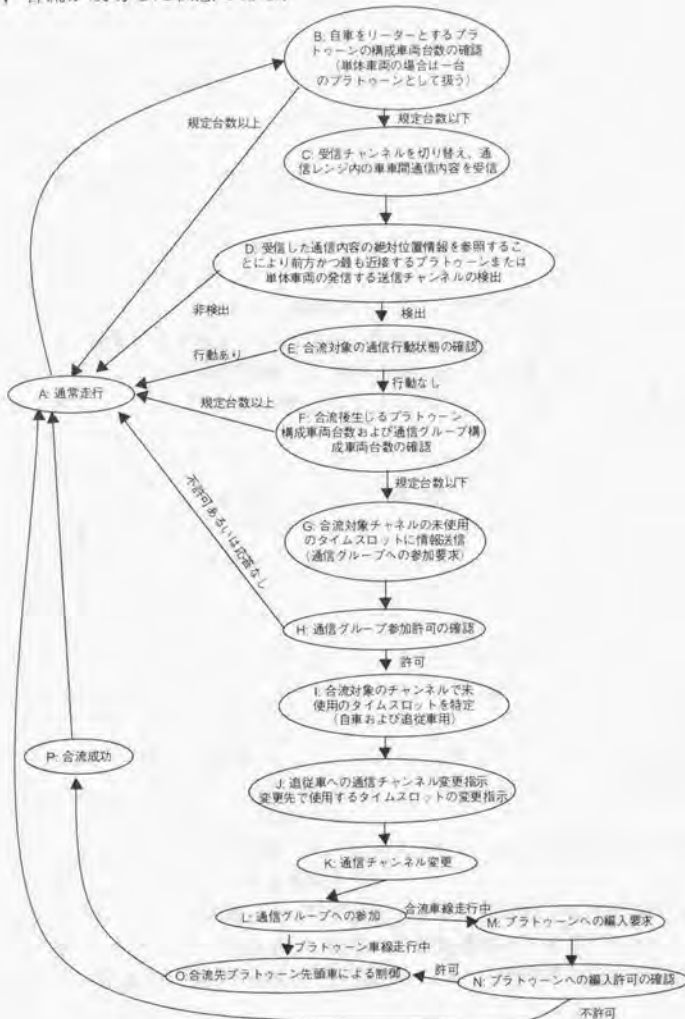


図 10.3.1 合流時の車車間通信手続きを表す状態遷移図

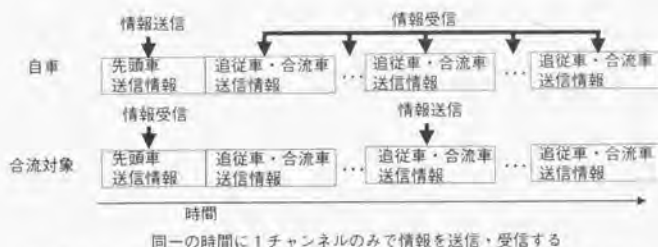


図10.3.2 合流時に先頭車が使用するタイムスロットおよび通信チャンネル

10.3.2 離脱時の車車間通信手続き

本研究で言う離脱とは、単体車両がプラトーンから離れて別の車線に移動し、通信グループから抜けることである。複数の車両がプラトーンから離れる場合は、離脱を同時に行うか繰り返し行うものとして扱う。

離脱の手順としては、車線変更を行い、プラトーンから離れ、その後車車間通信の切断を行うものとしている。図10.3.2は離脱時における車車間通信の手続きを表す状態遷移図である。離脱する車両がプラトーン先頭車あるいは追従車によって車車間通信プロセスが異なる。先頭車が離脱する場合、離脱前に先頭車の役割を他の車両に移動する必要がある。以下では状態遷移図に付けられた記号に従って、車車間通信手続きを説明する。

状態Aは、状態Aは、プラトーン走行状態を示している。

状態Bでは、プラトーンからの離脱の必要性を確認している。離脱の必要がある場合として、目標地点に到達するために、プラトーン車線とは別の車線を走行する必要がある場合、ドライバが手動運転に切り替える場合、車載機器の不調によりプラトーン走行の継続が困難な場合等がある。

状態C、D、E、Fは、離脱する車両がプラトーン先頭車の場合の手続きである。

状態Cでは、先頭車の役割を追従車に移動するために、対象となる追従車を決定する。この際、F4、F10を参照し、先頭車に最も近く、かつ離脱要求を行っていない追従車を対象とする。

状態Dでは、先頭車の役割の移動要求を行う。LSにて対象とする追従車の車両IDを発信することにより、その車両への移動要求を行う。またこの際に先頭車の状態量を追従車用のタイムスロットを利用して送信する。

状態Eでは、先頭車の役割の移動対象となる追従車からの応答を確認する。対象となる追従車のF12を参照することにより確認を行う。

状態Fでは、先頭車の役割の移動する。移動対象となる追従車が、先頭車用タイムスロットにて、情報を発信する。先頭車は、対象となる追従車のタイムスロットのみで情報を発信する。先頭車は役割の移動後、移動対象となった追従車の制御を受けることになる。

状態Gでは、車線変更の要求を行う。F11にて、車線変更を行うことを要求する。

状態Hでは、車線変更の許可を確認する。L12を参照して、車線変更の許可を確認する。

状態Iでは、車線変更を行う。車線変更を行う際の操舵制御は、各車両の制御系で行う方法と、ドライバが行う方法が考えられる。

状態Jでは、プラトーンからの離脱要求を行う。F10にて、プラトーンからの離脱要求を行う。

状態Kでは、プラトーンからの離脱許可を確認する。L6, L7を参照して、プラトーンからの離脱許可を確認する。

状態Lは、プラトーンから離脱した状態である。

状態Mでは、離脱車両の制御が自律走行制御系あるいはドライバによってなされている状態である。

状態Nでは、通信グループからの離脱要求を行う。F9にて、通信グループからの離脱要求を行う。

状態Oでは、通信グループからの離脱許可を確認する。L4, L5を参照して、通信グループからの離脱許可を確認する。

状態Pは、通信グループから離脱した状態である。この状態では、離脱車両は離脱したプラトーン及び周辺の通信グループで使用していないチャンネルにて情報を発信するか、情報の発信を停止する。

状態Qは、離脱が成功した状態である。

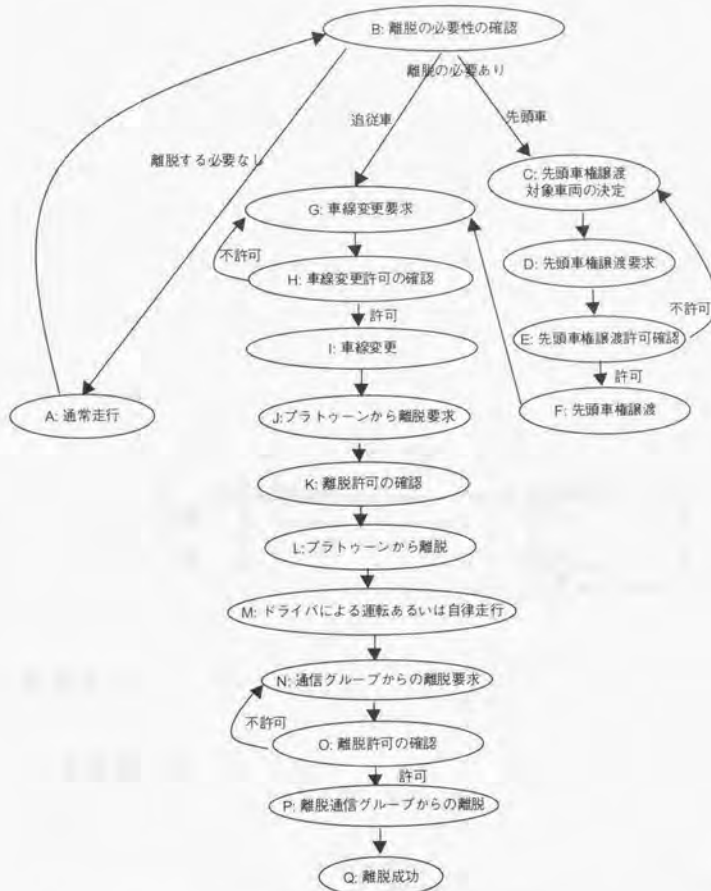


図10.3.3 離脱時の車車間通信手続を表す状態遷移図

10.4 道路インフラとの通信

道路インフラとの通信は、路車間通信と呼ばれ、道路の一定区間（セクション）を管理する制御層と車両の間での情報交換を行うものである。通信の方式としては、漏波同軸ケーブルを使用した手法など提案されている。本研究では、通信方式、手続き等には触れず、インフラから車両への通信内容のみを扱う。表10.4.1はプラトーン挙動制御のために道路インフラから車両に伝達する情報である。本研究ではプラトーン先頭車がインフラからの情報に基づき、プラトーンを制御することを想定している。追従車はインフラからの情報を必ずしも受信する必要はない。また、表中の情報は本研究で提案する制御システムにおいて、最低限必要な情報である。事故発生、故障車等に関する情報やその回避ストラテジ（第9章参照）、緊急停止指示、ある場所への所要時間などの情報を送受信すればシステムの信頼性向上やドライバーへの情報サービスの拡大を図ることができる。

表10.4.1 道路インフラが発信する情報

項目	データ型	符号の内容	主に使用する状況	項目ID
推奨速度	実数		定常走行	R1
推奨プラトーン構成車両台数	整数		定常走行	R2
交通量[台/h]	整数		定常走行	R3

10.5 定常走行時のタスク制御

10.5.1 目標車間距離の決定

定常走行時のタスク制御の目標は車間距離の維持である。車間距離維持のための制御系として第5章で説明した縦方向制御系を使用する。この制御系はプラトーンを一力学系として扱うことにより、各車両の車間距離と先頭車速度を独立に制御することが可能である。定常走行の場合、各車両の目標車間距離を一定値とする。各車両の目標車間距離は、第10.1.2項の考察に基づき以下のように決定する。速度 $27.8[\text{m/s}]$ ($100[\text{km/h}]$)において、交通容量 $10000[\text{台/h}]$ を実現するプラトーン形態として、 $L=2[\text{m}]$ 、 $L_m=4[\text{m}]$ 、 $h=1[\text{s}]$ 、 $N=10[\text{台}]$ （図10.1.1参照）の形態を決定した。実際の交通量が $10000[\text{台/h}]$ の時にプラトーン形態としてこの形態が望ましいが、実際の交通量が $10000[\text{台/h}]$ 未満の場合、この形態をとる必要はない。本研究では、実際の $10000[\text{台/h}]$ 未満の場合のプラトーン形態として、プラトーン長が不変となる形態を提案する。プラトーン長が不変となる形態とは図10.5.1のようにプラトーン構成車両台数によって車間距離が変化する形態である。この形態の利点は、合流・離脱等によってプラトーン長が変化しないため、後続のプラトーンに合流や離脱の影響が伝播しないことである。一方、プラトーン構成車両台数によってプラトーン長が

変化する場合は、合流や離脱の際に必然的に後続のプラトーンに影響を及ぼす。本研究で提案するプラトーン形態は、交通流の安定化や加減速の低減に貢献し、結果として旅行時間の短縮、燃料消費の低減、乗り心地の向上等につながるものである。プラトーン長を不変とする目標車間距離 sp_{des} は、以下の式で表すことができる。

$$sp_{des} = \frac{N \cdot L_c + (N-1) \cdot L - n \cdot L_c}{n-1} \quad \dots\dots\dots (10.5.1)$$

ここで、 N 、 L_c 、 L は基準とする（最大交通容量を実現する）プラトーンの形態を表すパラメータ（図 10.1.1 参照）であり、 n はプラトーン構成車両台数である。本研究では基準とするプラトーン長として、 $L=2[m]$ 、 $L_c=4[m]$ 、 $h=1[s]$ 、 $N=10[台]$ の形態を考える。この場合このプラトーン長を実現する車間距離 sp_{des} は、平均車長 $L_c=5[m]$ として、以下のように表せる。

$$sp_{des} = \frac{68-5n}{n-1} \quad \dots\dots\dots (10.5.2)$$

ただし、プラトーン構成車両台数が 2 台の場合は、車間距離が大きくなりすぎるので、3 台の場合と同じ値を使用している。

前述の方式プラトーン形態以外に、プラトーン長が変化しない形態として、図 10.5.2 に示す形態がある。この形態の特徴は、ある台数（図では 4 台）以上で構成されるプラトーンにおいてプラトーン先頭車に近い部分の車間距離を小さくしている点である。車間距離を小さくすることにより、プラトーン内衝突時の相対速度を小さく抑えられるので安全性が向上する。前述の形態を想定する場合も、この形態を想定する場合も以下で説明する定常走行、合流、離脱、インフラとの協調の制御アルゴリズムはほとんど変わらないので、以下では、前者の形態を想定して説明を行う。

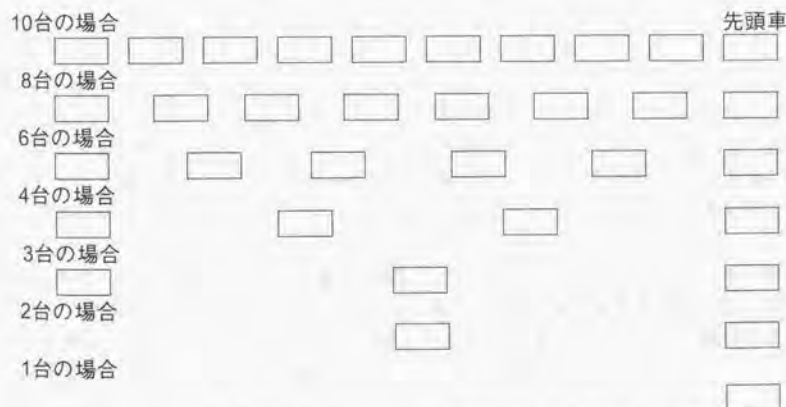


図 10.5.1 構成車両台数によってプラトーン長が変化しないプラトーン形態



図10.5.2 構成車両台数によってプラトーン長が変化せず、
先頭車周辺の車間距離を小さくしたプラトーン形態

10.5.2 制御方法

定常走行のタスク制御では、各車両が一定の車間距離を維持するための加速度を決定する。各追従車の加速度の決定は以下の手順で行う。図10.5.3に定常走行時の制御の概図を示す。

- (1) 先頭車が通信グループ内の車両が各々のタイムスロットにおいて発信する情報を受信する。
- (2) 受信した情報のF7を参照してプラトーンのメンバー資格を有する追従車を抽出する。
- (3) F4を参照して抽出した追従車の絶対位置に基づき追従車の並び順を決定する。 m 台の追従車が存在する場合、先頭車に近い順に1～ m 番目の追従車として扱う。
- (4) F2～F6および目標車間距離 sp_{des} を、第5章で説明した、縦方向制御系に代入し、各車両の目標加速度を決定する。その後、先頭車用タイムスロットにおいて、決定した目標加速度を発信する。各追従車の目標加速度はL1にて発信する。この際、各追従車が予約しているタイムスロットと同じ順番で各車両の目標加速度を発信する。

追従車は、L1を参照し、自車の目標加速度としてスロットルあるいはブレーキの制御を行う。先頭車は、前方に先行車が存在する場合は、一定車間時間制御により、先行車との車間距離を維持する。前方に先行車が存在しない場合はインフラが推奨する走行速度を維持するための速度制御を行う。

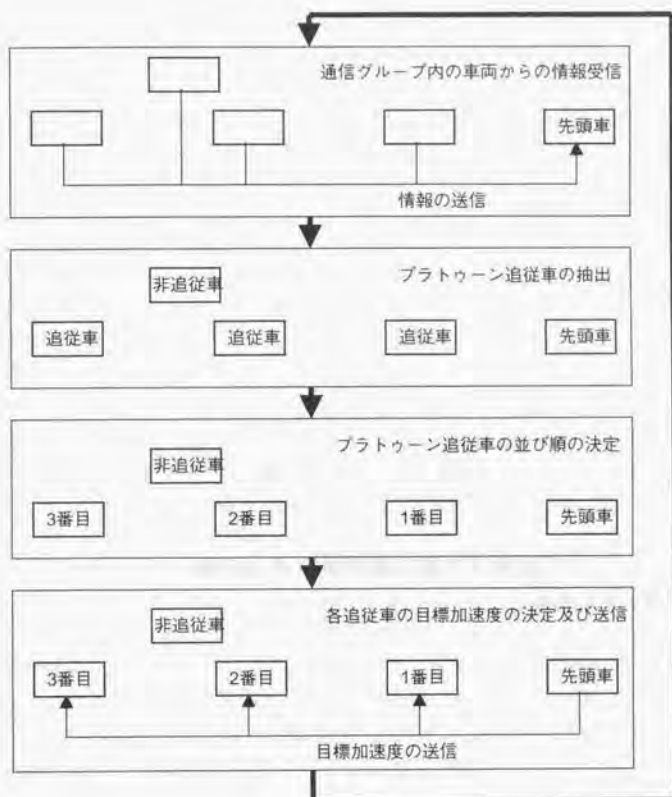


図10.5.3 定常走行の制御

10.6 道路インフラからの情報に基づくタスク制御

第10.4節で説明したように、道路インフラからの車両への情報として、本研究では、推奨速度、推奨プラトーン構成車両台数、交通量を想定している。以下の各項では、インフラからの各情報に基づくプラトーンの制御について説明する。

10.6.1 速度情報に基づく制御

プラトーンの前頭車は、道路インフラからの推奨速度に基づき、自車の速度制御を行う。但し、プラトーン前頭車の前方に先行車が存在する場合は、一定車間時間制御を行い車間距離を維持する、先行車との車間距離を維持している場合に、渋滞等

の影響でインフラからの推奨速度よりもプラトウーン速度が大幅に落ちている場合がある。この場合、渋滞等の影響の伝播をなるべく狭い範囲に留めるようにプラトウーンの挙動を決定する。本研究では、推奨速度とプラトウーン速度の差がある値(本研究では5[m/s])以上になったら、プラトウーン内の車間距離目標値 sp_{des} を小さくかつ一定(本研究では2[m])にする。プラトウーン内の車間距離を小さくすれば、渋滞等の影響の伝播をなるべく狭い範囲に留めることができる。また一定に保つことで、交通密度の変動を抑え、交通流の回復を早めることができる。車間距離を小さくかつ一定にして走行した後、プラトウーン速度と推奨速度の差がある値以下になったら定常走行時の車間距離に戻す。定常走行時の車間距離に戻す場合、第5.4.4項のアルゴリズムを使用して、プラトウーン末尾車の加速度をゼロとしたプラトウーン内車間距離の変更を行う。プラトウーン末尾車の加速度をゼロとすることで、プラトウーンの後続車の減速を防ぐことができる。この際、プラトウーンの前方を走行する先行車との車間距離が、車間距離制御範囲($hV+L_m$)以下になる場合は、車間距離の変更を中止する。すなわち、定常走行のプラトウーン形態へ戻すことは、積極的に行わず、プラトウーン同士の合流や、車両の離脱によって前方に十分なスペースが確保できた段階で徐々に行うものとしている。

10.6.2 プラトウーン構成車両台数情報に基づく制御

プラトウーン先頭車はインフラから送信されたプラトウーン構成車両台数情報に基づき、合流時の判定を行う。プラトウーン車線の単体車両あるいはプラトウーンが別の単体車両あるいはプラトウーンに合流を行う際、合流後にプラトウーン構成車両台数が、インフラからの推奨値を超える場合は、合流を中止する。なお、合流車線からの合流においては、プラトウーン構成車両台数の最大値を超えない限り、合流を行うものとしている。これは、合流車線からの迅速な合流を行うためである。またプラトウーン構成車両台数がインフラからの推奨値を上回っている場合、プラトウーン分割や車両の強制的な離脱は行わないものとしている。本研究では、インフラが推奨するプラトウーン構成車両台数は、その区間の交通量よりも若干大きな交通量を実現できる値としている。具体的には、1つのプラトウーンが占める道路区間を100[m]として概算することにより、

$$n_{des} = \frac{T_c \cdot v_{des}}{36V_{des}} \quad \dots\dots\dots (10.5.2)$$

としている。ここで、 n_{des} は推奨プラトウーン構成車両台数(小数点以下は切り上げ)、 V_{des} は推奨速度、 T_c は推奨交通量[台/h]である。但し、 n_{des} の最小値は3[台]としている。というのは、本研究で提案するプラトウーン形態では、プラトウーン構成車両台数が3台以下の場合には実現できる交通容量がほぼ等しいからである。

10.6.3 交通量に基づく制御

高速道路を走行している車両が勾配の影響で部分的に速度を落とす場合、その勾配部分の交通量[台/h]が減少する。減少した交通量が、後続道路における交通量よりも小さくなる場合、渋滞が発生する。これは、勾配部分への車両流入台数が、流出台数を上回るためである。このような現象はサグ渋滞として知られている。この項で説明する制御は、インフラからの情報に基づいて、このような現象の発生を防止するためのものである。

インフラは走行している車両を数えることにより、各道路セクションにおける理想的な交通量をリアルタイムに算出できるものとしている。プラトーンが、路面状況や道路形状等や勾配、先行車の減速等の影響で一時的に速度を落とさなければならない場合、インフラからの推奨交通量と現在の走行速度を参照して車間距離を決定する。式(10.1.1)を L について解くことにより、目標車間距離を算出し、算出した車間距離が現在の車間距離目標値よりも小さい場合は、車間距離目標値を算出した値に変更する。この制御により、一時的な速度低下による交通流の乱れを防止することができる。この制御は第10.6.1項の渋滞時の速度情報に基づく制御と類似しているが、第10.6.1項の制御は、渋滞後の対処であり、この制御は渋滞を予防するための対処である。

10.7 合流・離脱時のタスク制御

単体車両あるいはプラトーンが合流を要求してきた場合およびプラトーン追従車が離脱を要求した場合、プラトーン先頭車は合流および離脱の制御を行う。以下の各節では合流、離脱の制御についてそれぞれ説明する。

10.7.1 合流の制御

本研究で提案する合流制御の特徴は、合流車線あるいは一般車線からの合流において、合流車両がプラトーンの任意の場所から合流できる点である。従来提案された合流の方式は、プラトーンの末尾から車両が合流するものであった。この方式は交通量が少ない場合や、合流車両が少ない場合は有効である。しかし、交通量が多い場合、合流点(プラトーンとプラトーンの間)が少なくなり、合流点に到達するために時間がかかる。また、プラトーンとプラトーンの間で車両が合流すると、合流車直後のプラトーンの間隔に影響を与える(図10.7.1参照)。すなわち、合流車が前方に現れることにより車間距離がステップ状に変化し、急な減速を余儀なくされる。この影響は、合流車が多い場合特に大きくなり、合流点周辺の交通流が大きく乱れる原因となる。これらの影響については第11章で評価している。本研究で提案する制御システムで、合流車がプラトーンの任意の場所に合流できる大きな理由は、絶対位置情報を利用している点である。合流車や合流車直後の車両の車間距離センサの情報は合流前後(車線変更前後)でステップ状に変化するため、車間距離セン

サによる合流車前後の信頼性の高い車間距離計測は困難である。しかし、車間距離センサによる車間距離情報の代わりに、絶対位置情報を利用することにより、合流車前後の車間距離の信頼性の高い計測を実現することができる。

以下に、合流時のタスク制御について説明する。単体車両あるいはプラトーンから自車を先頭車とするプラトーンに合流を要求された場合、第10.3.1節で説明した通信手続きにより、車車間通信を確立する。この節の図10.3.1の状態遷移図の中で、状態0が、合流制御に相当するものである。

合流する単体車両あるいはプラトーンがプラトーン車線上を走行している場合、プラトーン先頭車は、合流車に対し、もともとの追従車と同様に車間距離制御を行う。すなわち車車間通信の確立し、プラトーンの編入を許可した後、即合流車を追従車として扱い、もともとの追従車同様に加速度目標値を与える。図10.7.2に同一車線上の合流制御の概図を示す。制御の方法は定常走行時の制御と同じである。しかし、合流車がプラトーンに編入されることによりプラトーン構成車両台数が変化するため、目標車間距離が変化する。目標車間距離は、合流時のプラトーン構成車両の合計台数と式(10.5.2)に基づいて決定される。そのため、合流時は全ての車両が新たな車間距離を維持するように加減速を行うことになる。

合流する単体車両が合流車線上(本線とは別の車線)を走行している場合、本研究では、合流車両がプラトーンの任意の場所から合流できるものとしている。合流車線上を走行する単体車両にプラトーンへの編入を許可した後、プラトーン先頭車は、合流車両に対し、追従車と同様な車間距離制御を行う。図10.7.3に合流車線からの合流制御の概図を示す。制御方法は定常走行時の制御と同じである。この場合、合流車線上の単体車両はプラトーンと同一車線に存在しないが、プラトーン車線に存在するものとして扱う。その際、車間距離に相当する情報は、車間距離センサを利用せず絶対位置情報を利用する。また、合流車両が割り込む位置(例えば2番目と3番目の追従車の間)はあらかじめ決定せず、随時各車両の絶対位置(F4)を参照して決定する。これは定常走行時の(2)に相当するものである。例えば、プラトーンに対して合流車が遅い場合、先頭車の距離が大きくなるにつれ、序列が後ろの追従車として扱われる。プラトーンと合流車の相対速度が規定値(たとえば $1[m/s]$)以下になり、合流車前後の車間距離が規定値以上(たとえば $2[m]$)になれば、先頭車は合流車に対して、車線変更を許可する。先頭車の許可によって、合流車が車線変更を行うことによって合流が完了する。なお、合流区間でプラトーン先頭車は減速は行っても、加速は行わないものとしている。

合流車線上からの合流では、合流車両は合流車線上で加減速の制御をプラトーン先頭車により受けることになる。そのため、合流車線が合流専用車線ではなく、一般車線の場合は、先頭車の制御を受けている際に一般車両との衝突が発生する可能性がある。特に、自動運転車線と一般車線の速度差が大きく、一般車線が混雑している場合に衝突の可能性が大きくなる。このような場合は、合流車は、自律的に自動運転車線へ車線変更し、その後合流の手続きを行う必要がある。

プラトーンに合流車が編入されると、プラトーン内の車間距離目標値がステッ

ブ状に変化することになる。第5章の縦方向制御では、目標車間距離に対する追従特性が高次遅れ特性となっているため、ステップ状に目標車間距離が変化しても大きな加速度が発生しない。

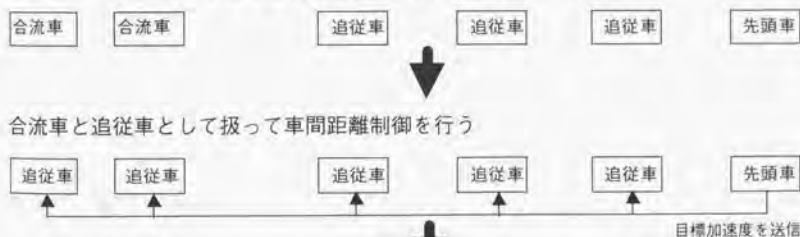
本研究で提案する合流制御では、プラトーン内の任意の場所に合流できるため、プラトーン内の構成車両を行き先別に並べることも可能である。(本研究のタスク制御では、合流時間の短縮を重視しているため、プラトーンを行き先別に並べていない)。プラトーン内の構成車両を行き先別に並び替えることで、車線の出口付近(プラトーンから車両が離脱する場所付近)の交通流の乱れを抑制できることが、文献[192]にて確認されている。



プラトーン末尾に車両が合流する際、後続のプラトーンに影響を与える

図 10.7.1 プラトーンの末尾(間)からの合流

プラトーンに同一車線を走行する2台の車両が合流する場合



プラトーン構成車両台数の変化に伴い目標車間距離が変化する



図 10.7.2 同一車線上の合流制御

プラトウーンに合流車線から車両が合流する場合

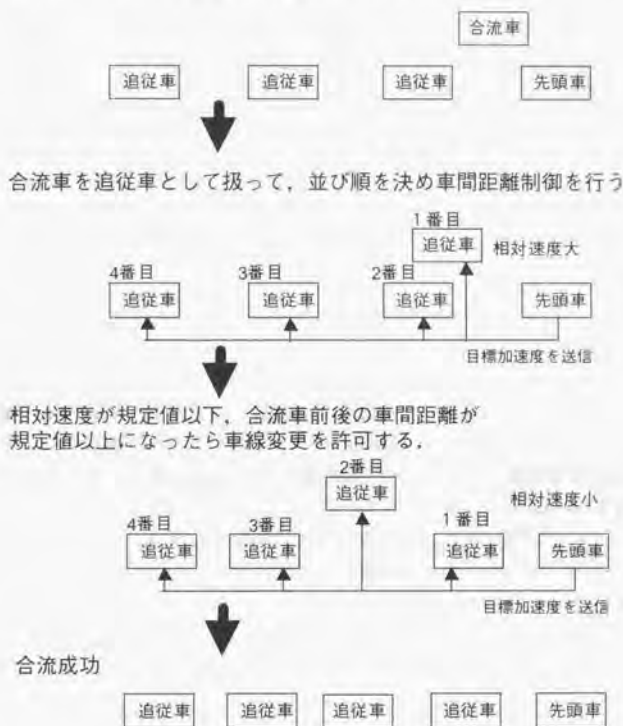


図 10.7.3 合流車線からの合流制御

10.7.2 離脱の制御

本研究で提案する離脱制御の特徴は、離脱車周辺の車間距離を変化させない点である。従来提案されたプラトウーン走行では、離脱の際にプラトウーンを分割し、離脱車前方の車間距離を大きくし、その後に車線変更を行う方式が提案されている[6, 31]。この場合、離脱の際に、離脱車以降の減速が余儀なくされ、さらには、後続のプラトウーンの車間距離制御に影響を及ぼす。よって、数多くの車両が同時に離脱する場合、交通流が大きく乱れる可能性がある。離脱の際に大きな車間距離をとらなければならない大きな理由は、車間距離センサの信頼性の問題であると考えている。離脱車や離脱車直後の車両の車間距離センサの情報は離脱前後（車線変更前後）でステップ状に変化するため、車間距離センサによる合流車前後の信頼性の高い車間距離計測は困難である。よって、安全な離脱を行うためには、離脱車前後に十分な車間距離を確

保する必要がある。しかし、本研究では車間距離センサによる車間距離情報の代わりに、絶対位置情報を利用することにより、離脱車前後の車間距離の信頼性の高い計測を実現することができる。

以下に離脱制御について説明する。離脱制御は、第10.3.2節で説明した通信手続きを行いながら進められる。この節の図10.3.1の状態遷移図の中で、状態G以降が、離脱制御に相当するものである。図10.7.4に離脱制御の概図を示す。プラトーンからの離脱を行う車両は、先頭車に車線変更を要求する。車線変更を要求された先頭車は、要求した場合、先頭車は、車間距離に相当する情報を車間距離センサを利用せず絶対位置情報を利用した制御に切り替え、車線変更の許可をする。車線変更を許可された離脱車は操舵制御系あるいはドライバの運転によって車線変更を行う。この際、先頭車は離脱車を追従車として扱い、車間距離制御を継続する。離脱車が車線変更の完了後、プラトーンからの離脱要求を行う。先頭車は離脱要求を許可し、離脱車を除いた追従車の車間距離制御を行う。離脱車が離脱後の目標車間距離は、離脱後のプラトーン構成車両の台数と式(10.5.2)に基づいて決定される。

車両が離脱する際に、離脱車は、車線変更を行った後にプラトーンからの離脱要求を行うまで、加減速の制御をプラトーン先頭車により行われることになる。そのため、離脱車線が専用車線ではなく、一般車線である場合に、離脱車が離脱車線に安全に割り込むスペースを見つけられない可能性がある。特に、自動運転車線と一般車線の速度差が大きく、一般車線が混雑している場合にこの可能性が大きくなる。このような場合は、従来提案されたプラトーンの離脱方式のように、プラトーンを分割し(離脱車が分割されたプラトーンの前頭車となる)、離脱車が自由に速度制御できるようにする必要がある。

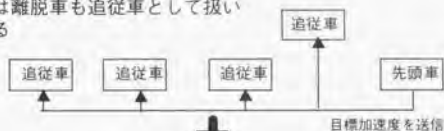
プラトーンから車両が離脱する場合

離脱車が車線変更を要求

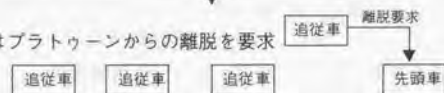


離脱車は車線変更

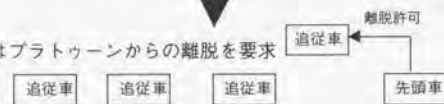
先頭車は離脱車も追従車として扱い
制御する



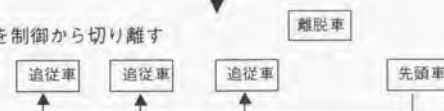
離脱車はプラトーンからの離脱を要求



離脱車はプラトーンからの離脱を要求



離脱車を制御から切り離す



離脱成功

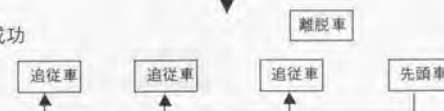


図 10.7.4 離脱制御

10.8 第10章のまとめ

第10章では、プラトウーンのタスク制御層設計について説明した。この制御はプラトウーンの挙動制御を行うものであり、合流・離脱、インフラと情報に基づく挙動制御を行う。この制御は、プラトウーンレベルでの制御によるインフラとの協調、合流、離脱等により、交通容量の拡大、交通流の安定化を実現するものである。この結果として、車両の加減速の減少、燃料消費率の向上、排出ガスの減少等も実現できる。これらの定量的な評価については、第11章で説明する。

第10章をまとめると以下ようになる。

- ・プラトウーン形態と交通容量の関係の定式化を行った。
- ・高交通容量を実現するプラトウーン形態を提案した。
- ・プラトウーンの挙動制御を実現するための車車間、路車間通信内容および通信手続きを明確にした。
- ・定常走行時のプラトウーンの挙動制御を提案した。
- ・インフラから情報に基づくプラトウーンの挙動制御を提案した。
- ・合流時・離脱時のプラトウーンの挙動制御を提案した。

この章では、プラトウーンが定常走行、合流、離脱およびインフラとの協調を行うためのタスク制御を提案するだけに留まらず、具体的な通信手続き等についても提案した。タスク制御や通信手続きについては、シミュレーション（第11章参照）によって車車間通信の確立、プラトウーンの形成や合流など行い、試行錯誤を繰り返した上で決定した。

この提案するタスク制御や手続きは、数百から数千の車両挙動を解析するシミュレーションにより問題無く遂行できることを確認している。現段階では、提案する手法が最適解であることを保証する事はできない。しかし、プラトウーンがタスクを遂行するための具体的な手法や手続きを提案したことの意義は大きいと考えている。

10.9 記号

L	: プラトウーン内車間距離[m]
h	: プラトウーン間車間時間[m](1.0)
L_m	: プラトウーン間最低車間距離[s](4.0)
N	: プラトウーン構成車両最大数[台](10)
V	: プラトウーンの速度[m/s]
L_c	: 平均車長[m](5.0)
T_c	: 交通容量[台/h]
n	: プラトウーン構成車両台数[台]
sp_{des}	: プラトウーン内目標車間距離[m]
n_{des}	: プラトウーン構成車両台数の推奨値[台]
V_{des}	: プラトウーンの速度の推奨値[m/s]

第11章 提案する制御システムの評価

この章では、提案する制御システムを巨視的な解析により評価する。車両レベルおよびプラトーンレベルでの評価は、第4章および第5章にて行っている。この章の目的は、提案する制御システムを運用した場合に、交通流、全体的な燃料消費、加減速等にどのような影響を与えるかを評価することである。このような評価のためには、プラトーンとプラトーンの相互作用、単体車両とプラトーンの相互作用を表現できるシミュレーションモデルの構築、および評価項目の定量的な計算手法を確立する必要がある。交通流を表現する数式モデルとして、流体モデルや粒子モデル等が開発されている。これらのモデルは、比較的少ない演算量で、巨視的な交通流の挙動を評価することができる。しかし、これらのモデルは、各車両に複雑な制御系や車車間通信手続を導入することが困難である。本研究で構築するシミュレーションモデルは、車両1台のレベルでダイナミクスおよび制御システム、車車間および路車間通信システムをモデル化することにより、制御システム影響が正確に車両挙動に反映されるものとしている。このようにモデル化した車両を道路上に複数配置し、その挙動を評価する。配置された車両は各々が有する制御システムおよび通信システムにより、プラトーンを形成し、道路上を走行する。また合流や分離、道路インフラとの協調等のタスクも遂行するものとしている。評価項目としては、交通容量、平均速度、加減速度、燃料消費量、平均合流時間等を評価する。この評価に基づき、本研究で提案する制御システム、従来提案されたプラトーン走行の制御システム、およびプラトーンを形成しない自律走行システムを比較し、本研究で提案する制御システムの有効性を明らかにする。

この章の構成は図11.0.1のようになっている。以下の各節では、図の構成に従いシミュレーションモデル、評価項目、比較対象、定常走行時の評価、合流・離脱時の評価、渋滞発生時の評価について説明する。

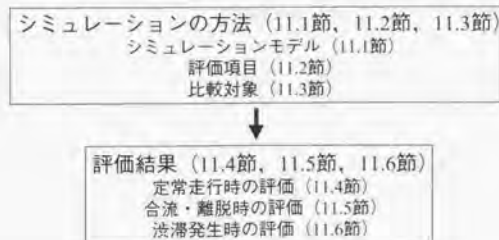


図 11.0.1 第11章の流れ

11.1 シミュレーションモデル

この節では、シミュレーションモデルについて説明する。シミュレーションモデルはC++言語で記述されており、車両やインフラなどをクラスとして記述することにより、数千台の車両挙動を同時に解析することを可能としている。

11.1.1 車両モデル

車両モデルとして、平面二輪モデルを使用する。車両の自由度は縦方向(進行方向)、横方向(横滑り角)、ヨー方向の3自由度を持つ。制駆動系のダイナミクスは、簡単のため目標加速度に対する一次遅れ特性を持つものとしている。ヨーレートおよび横滑り角は平面二輪モデルの運動方程式に基づく特性を持つものとし、タイヤの非線形性は考慮していない。実際の状況を考えると、すべての車両が異なった諸元を持つはずである。本研究の車両モデルでは、駆動系の特性にばらつきを持たせているため、質量特性やタイヤ特性の均一性は横方向運動のみに影響する。横方向運動は、交通流の挙動にはほとんど影響を与えない。駆動系の特性に関しては、車両毎に異なった1次遅れ時定数(0.1[s]~0.5[s]の間でランダムに決定)を持つものとしている。運動方程式の計算周期は0.01[s]としている。

車両モデルおよび制御システムは、C++言語のクラスとして記述されている。車両が道路上に配置されると、車両に含まれる制御システムがその挙動を支配する。各車両の制御システムには、以下が組み込まれている。

- ・車線追従のための横方向制御(第7.3節の制御と同等)
- ・車線変更のための横方向制御(第9.2.1項の制御と同等)
- ・自律走行時の車間距離制御(第5.4.3節の先頭車用の制御と同等)
- ・制駆動力特性のモデルマッチング制御(第4章の制御と同等)
- ・プラトーン先頭車用のプラトーンの縦方向制御(第5章の制御と同等)
- ・プラトーン追従車用のプラトーンの縦方向制御(先頭車の指令に従う)
- ・プラトーン先頭車用のタスク制御(第10章の制御と同等)

またセンサ、通信器に関しては以下が組み込まれている。

- ・車間距離センサ(レンジは100[m])
- ・速度センサ
- ・加速度センサ
- ・ヨーレートセンサ
- ・操舵角センサ
- ・絶対位置センサ(DGPSを想定)
- ・車車間通信器(レンジは150[m])
- ・路車間通信器(受信のみ)

センサ、通信器については、計測誤差、故障、通信エラー、通信チャンネルの干渉はないものとしている。制御周期、およびセンサの計測周期は50[ms]としている。この

シミュレーションでは、上記の車両モデルを5000台分用意している。車両モデルが道路上に配置されると、車両内の制御システム、センサおよび通信システムにより、自律的にプラトーンを形成しプラトーン走行を行う。

11.1.2 道路モデル

道路モデルとしては、全長10[km]の2車線の直線道路区間をモデル化している。1車線をプラトーン走行車線とし、もう1車線を合流車線あるいは離脱車線としている。

道路モデルは、各車両の追従対象として利用されているだけでなく、通信情報や位置情報の格納場所にもなっている。道路モデルは、5[m]毎に区分化された情報格納場所を持っている。各車両は、その車両の道路上における位置に基づき該当する格納場所に位置情報や速度情報、発信している電波情報（車車間通信のチャンネル情報）を書き込んでいる（図11.1.1参照）。道路モデル上に書きこまれた情報は、車間距離センサによる計測、路車間通信および車車間通信を行う際に利用される。車間距離センサによる計測では、自車位置前方の道路における情報格納場所を走査し、その情報を読み出すことで、先行車の存在および正確な位置情報を得ることができる（図11.1.2参照）。また、車車間通信においては、自車周辺の道路における情報格納場所を走査し、情報の発信源と、発信の際に使用されているチャンネルを知ることができる。路車間通信においては、道路インフラが、情報の発信範囲における該当する情報の格納場所に情報を書き込んでいる。各車両は、自車位置に基づいて該当する格納場所の情報を確認することで、道路インフラからの情報の有無や情報内容を知ることができる。

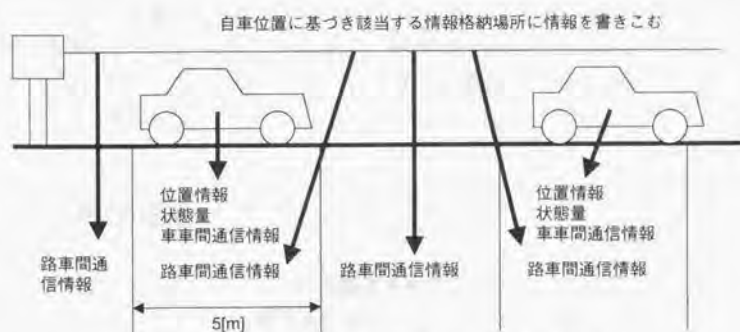


図11.1.1 道路モデル上の情報格納場所への情報の書き込み

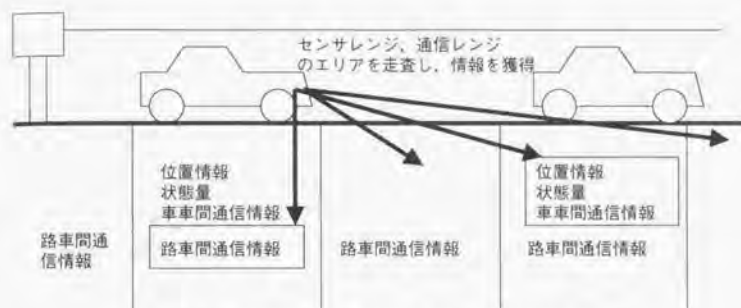


図11.1.2 道路モデル上の情報格納場所からの情報の読み出し

11.1.3 通信モデル

車車間通信としては、第10.2節で説明した通信情報を配列変数でモデル化している。各タイムスロットを配列変数として、最大25台で情報を共有できるものとしている。配列変数は、5000個用意している（5000チャンネル）。チャンネル関する検討は厳密に行っていない。本来は、同じチャンネルを利用して通信を行っているプラトーンが複数存在しても、それらが十分離れていれば、問題無く通信を行うことができる。しかし本研究では、チャンネルの割り当てや干渉を考慮していないため、全てのプラトーンが異なるチャンネルを使用するものとしている。各車両が道路モデルに書き込む情報は車車間通信で使用するチャンネルの情報である。各車両の車車間通信における発信及び受信は、使用しているチャンネルの配列変数にアクセスすることで行っている。車車間通信の確立における手続きは第10.3節の手続きを使用している。

路車間通信としては、第10.4で説明した通信情報を道路モデルの情報格納場所に格納している。道路インフラの情報発信機は500[m]区間毎に配置され、発信機は区間全域にわたり、情報を発信するものとしている。

11.2 評価項目

この節では、シミュレーションで評価する項目について説明する。なお、評価項目は評価するシナリオによって異なるため、全ての評価項目が全てのシミュレーションに適用されるわけではない。

11.2.1 最大交通容量

最大交通容量とは、定常走行状態で1車線上を単位時間あたりに走行できる最大車両数を指し、このシミュレーションでは以下の式により表すことができる。

$$T_v = \frac{3600VN}{L_v N + (N-1)L + hV + L_m} \quad \dots\dots\dots (11.2.1)$$

ここで、各変数は、第10.1.2項のプラトウーンの形態パラメータである。最大交通容量は大きいほど、高交通容量を実現できることになる。

11.2.2 交通密度に対する交通容量

ここで、交通密度とは1[km]あたりの車両台数のことである。交通密度が大きくなると、車両間の距離を小さくしなければならない。プラトウーン走行の場合プラトウーン内車間距離は一定値なので、速度を落として、プラトウーン間距離を小さくする必要がある。自律走行の場合も同様に速度を落として車間距離を小さくする必要がある。一般的に交通密度が大きくなる場合、ある程度までは、交通容量も増大するが、交通密度が大きくなり過ぎると、速度低下の影響が大きくなり、交通容量が低下する。交通密度 D_c と速度の関係は下式によって表現することができる。

$$V = \frac{1000N}{hD_c} - \frac{L_v N + (N-1)L + L_m}{h} \quad \dots\dots\dots (11.2.2)$$

式(11.2.2)を式(11.2.1)に代入すると交通密度と交通容量の関係を導くことができる。速度や交通容量は交通密度が大きくなっても高い値を維持できればよい。

11.2.3 平均速度

平均速度は、評価区間を走行する車両の速度の平均である。この値は高ければ、効率のよい交通流が実現できているといえる。

11.2.4 燃料消費量

燃料消費量は、評価区間を走行する車両が1[km]を走行する際に消費した燃料の平均としている。この逆数をとれば、燃料消費率(燃費)となる。車両1台における燃料消費量は、文献[62]を参考にし、単位時間あたりの燃料消費量を図11.2.1に示されるルックアップテーブルを使用して算出している。これを積分することにより燃料消費量を算出している。すべての車両に同一のルックアップテーブルを適用することは好ましくないが、本研究では簡単のため同一のルックアップテーブルを使用している。この値は小さければ、燃料消費と同時に排出ガスの少ない走行が実現できているといえる。

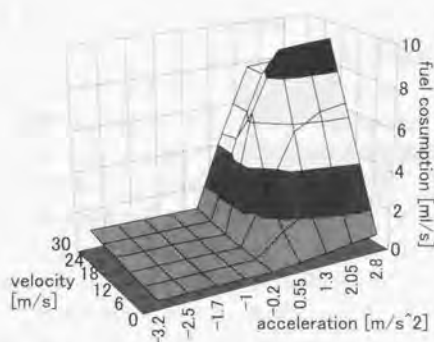


図11.2.1 燃料消費量のルックアップテーブル

11.2.5 加減速度

加減速度は、評価区間を走行する車両の加速度の二乗積分値を積分時間で割ったもの（1秒あたりの二乗積分値）の平均としている。この値は小さければ、交通流の乱れが小さいと考えて良い、また、加減速の少ない乗り心地のよい走行が実現できているといえる。

11.2.6 平均合流時間

平均合流時間は、合流車が発生してから、車線変更を開始するまでの平均時間としている。ここでいう車線変更開始とは、提案する制御システムにおいてプラトウーン内に合流する場合は、プラトウーン先頭車から車線変更の許可が降りた後、車線変更のために操舵を開始した瞬間のことを指している。また提案するシステムでプラトウーンと通信を行わずに合流する場合や、他の制御システムにおいて合流する場合は、合流部分前後に安全な車間距離を確保した後、車線変更のための操舵を開始した瞬間を指している。

11.3 比較対象

本研究で提案する制御システムを評価する際、比較対象として、従来提案されたプラトウーン走行制御および自律走行システムを採用する。表11.3.1に提案する制御システムと比較対象についての概要を記す。第11.4節以降の評価結果グラフには、表中の凡例ラベルA、B、CおよびDが使用されている。提案する制御システムについてはすでに説明しているので、この節では、比較対象について説明する。

11.3.1 従来のプラトーン走行制御

従来提案されたプラトーン走行制御は、文献[31]を参照し、モデル化している。制御アルゴリズムについては第2.3.7項にて説明している。ここで、プラトーン構成車両の最大数、目標車間距離、プラトーン間の制御に関しては、調整の余地があるので、 $27.8[m/s]$ ($100[km/h]$) において、 $10000[台/h]$ を実現する値に調整している。また、プラトーン間制御には一定車間時間制御を採用する。従来の方式は、合流の際、車両がプラトーン末尾から合流する方式であるため、プラトーン間に合流車が割り込む十分なスペースの確保が必要である。そのため車間時間を大きな値に調整している。この方式で合流する際は、合流車は自律的な判断で自動運転車線に入り、前方のプラトーンと車車間通信を確立後、末尾から合流するものとしている。車車間通信の手続きには、第10.3節の手続きを使用している。

11.3.2 自律走行システム

自律走行システムは、各車両の車間距離制御系によって、自律的に走行を行うものである。現在ACC (アダプティブクルーズコントロール) の名のもとで、研究および実用化が進んでいる。自律走行制御では、各車両は一定車間時間制御を行うものとしている。これは、車車間通信無しでストリングスタビリティを確保するためである。また、自律走行においては、車間時間を $1[s]$ および $2[s]$ の2種類を検討する。

表11.3.1 比較する制御システムの概要

	提案する制御システム	従来の制御システム	自律走行システム(ACC)
グラフにおける凡例	A	B	C($h=1[s]$), D($h=2[s]$)
プラトーンの形成	する	する	しない
プラトーンの構成 車両最大数(N)	10台	20台	
プラトーン内制御	プラトーンを一力学系として扱った縦方向制御。タスク制御層によるプラトーンの手動制御	一定車間距離制御	
プラトーン間制御	一定車間時間制御	一定車間時間制御	一定車間時間制御(車両間)
合流方式	タスク制御層による合流制御(プラトーンの任意の場所から合流)	プラトーンの末尾から合流	
離脱方式	タスク制御層による離脱制御	安全な車間距離を確保した後、車線変更	
プラトーン内車間 距離(L)	プラトーン構成車両台数、 交通状況により変化(最小で $2[m]$)	$2[m]$	
プラトーン間車間 時間(h)	$1[s]$	$2[s]$	$1[s]$ または $2[s]$
プラトーン間最低 車間距離(L_m)	$4[m]$	$4[m]$	$4[m]$
平均車長(L_c)	$5[m]$	$5[m]$	$5[m]$
制限速度	$27.8[m/s]$ ($100[km/h]$)	$27.8[m/s]$ ($100[km/h]$)	$27.8[m/s]$ ($100[km/h]$)
通信	車車間通信・路車間通信	車車間通信・路車間通信	路車間通信

11.4 定常走行における評価

この節では合流・離脱や車間距離変化、速度変化が一切ない状態での評価を行う。この場合、加速度変化も存在しないため、燃料消費や加減速特性等を評価しても意味がない。そこで、定常走行では、最大交通容量、交通密度と交通容量の関係を評価する。

最大交通容量は、式 (11.2.1) に表 11.3.1 のパラメータを代入することで得られ、図 11.4.1 のようになる。 $V=27.8[\text{m/s}]$ ($100[\text{km/h}]$) において、提案する制御システムおよび従来の制御システムでは、約 10000 [台/h] の交通容量を実現できることがわかる。一方自律走行では、車間時間 1[s] で約 2700 [台/h]、車間時間 2[s] で約 1500 [台/h] となり、前二者に比べ、実現できる最大交通容量が大幅に小さいことがわかる。ドライバの運転により実現できる交通容量が約 2000 [台/h] と言われていることを考えると、自律走行システムでは、交通容量の拡大にほとんど寄与できないことがわかる。

交通密度と速度の関係は、式 (11.2.2) に表 11.3.1 のパラメータを代入することで得られ、図 11.4.2 のようになる。提案する制御システムおよび従来の制御システムでは、交通密度が 100 [台/km] を超えると、速度の低下が始まることがわかる。一方自律走行システムでは、車間時間 1[s] で 27 [台/km]、車間時間 2[s] で 15 [台/km] を超えると速度の低下が始まることがわかる。

図 11.4.3 に交通密度と交通容量の関係を示す。提案する制御システムおよび従来の制御システムでは、交通密度が 100 [台/km] までは、交通密度に比例して交通容量が大きくなり、交通密度が 100 [台/km] を超えると交通容量が減少することがわかる。一方自律走行では、車間時間 1[s] で交通密度 27 [台/km] までは、交通密度に比例して交通容量が大きくなり、交通密度が 27 [台/km] を超えると交通容量が減少することがわかる。車間時間 2[s] では、交通密度 15 [台/km] までは、交通密度に比例して交通容量が大きくなり、交通密度が 15 [台/km] を超えると交通容量が減少することがわかる。

この結果から、提案する制御システムおよび従来の制御システムは、自律走行システムの 3 倍以上の最大交通容量を実現し、かつ高い交通密度の状況でも、高い交通容量を維持できることがわかる。

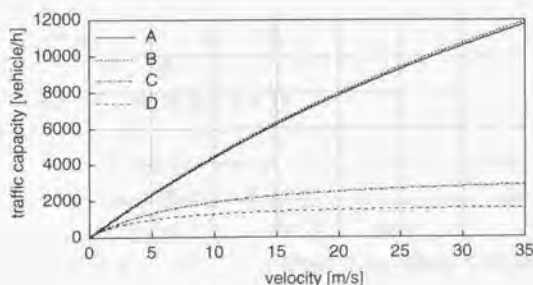


図 11.4.1 交通容量

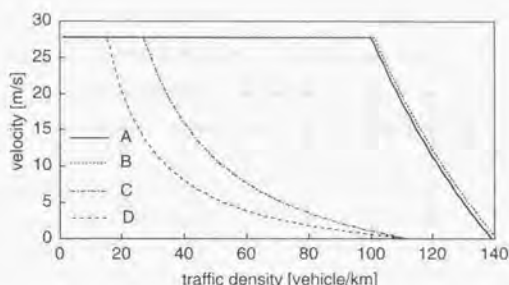


図 11.4.2 交通密度と速度の関係

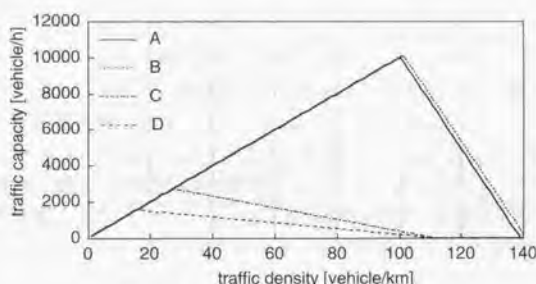


図 11.4.3 交通密度と交通容量の関係

11.5 合流・離脱時の評価

この節では、合流時および離脱時の評価を行う。合流時の評価としては、自動運転車線を走行しているプラトーンに合流車線から車両が合流する際の合流点付近の車両挙動および交通流を評価する。離脱時の評価としては、自動運転車線を走行しているプラトーンから車両が合流する際の離脱点付近の車両挙動および交通流を評価する。以下の各項では、合流時の評価として、シミュレーション条件とシミュレーション結果について説明し、その後、離脱時の評価として、シミュレーション条件とシミュレーション結果について説明し

11.5.1 シミュレーション条件（合流時）

シミュレーションは以下の条件で行う。（図 11.5.1 参照）

- ・自動運転車線を走行するプラトーンは道路の0[km]地点から初速度27.8[m/s]で発生する。
- ・合流車線は道路の3[km]地点に配置し、合流専用車線とする。合流車は初速度 25

[m/s]で発生する。

- ・プラトーン先頭車は、制限速度を超える速度は出さない。（先行するプラトーンとの間隔が大きい場合、無理して間隔を詰めない）
- ・提案する制御システムでは、近くにプラトーンが存在する場合、合流車は、合流車線上で第10.3.1項の手続きに従い、プラトーンと車車間通信を確立し、第10.7.1項の合流制御により合流する。
- ・提案する制御システムにおいて、近くにプラトーンが存在しない場合、合流車は合流部分前後に安全な車間距離が確保されている（前方に5[m]以上、後方にV[m]以上の車間距離が確保されている）ことを確認した後、自動運転車線に合流する。
- ・従来の制御システムにおいて、近くにプラトーンが存在する場合は、合流車は、プラトーンと約3[m/s]の相対速度をつけて走行し、プラトーンの末尾の合流可能な部分を探す。合流可能な部分を見つけると、プラトーンとの相対速度を0にしながらか車線変更を行う。車線変更後、前方のプラトーンと車車間通信を確立し、一定車間距離制御を行う。
- ・従来の制御システムにおいて、近くにプラトーンが存在しない場合、合流車は合流部分前後に安全な車間距離が確保されている（前方に5[m]以上、後方にV[m]以上の車間距離が確保されている）ことを確認した後、自動運転車線に合流する。
- ・自律走行システムにおいて、合流車は合流部分前後に安全な車間距離が確保されている（前方に5[m]以上、後方にV[m]以上の車間距離が確保されている）ことを確認の上、自動運転車線に合流する。

合流の条件としては以下の13種類を評価する。

- シミュレーション1： 自動運転車線:450[台/h]、合流車線:450[台/h]
- シミュレーション2： 自動運転車線:900[台/h]、合流車線:450[台/h]
- シミュレーション3： 自動運転車線:900[台/h]、合流車線:900[台/h]
- シミュレーション4： 自動運転車線:1800[台/h]、合流車線:450[台/h]
- シミュレーション5： 自動運転車線:1800[台/h]、合流車線:900[台/h]
- シミュレーション6： 自動運転車線:1800[台/h]、合流車線:1800[台/h]
- シミュレーション7： 自動運転車線:3600[台/h]、合流車線:450[台/h]
- シミュレーション8： 自動運転車線:3600[台/h]、合流車線:900[台/h]
- シミュレーション9： 自動運転車線:3600[台/h]、合流車線:1800[台/h]
- シミュレーション10： 自動運転車線:3600[台/h]、合流車線:3600[台/h]
- シミュレーション11： 自動運転車線:7200[台/h]、合流車線:450[台/h]
- シミュレーション12： 自動運転車線:7200[台/h]、合流車線:900[台/h]
- シミュレーション13： 自動運転車線:7200[台/h]、合流車線:1800[台/h]

自動運転車線を走行する車両は、上記合流条件を満たすように一定時間間隔で発生する。ここで、提案する制御システムおよび従来の制御システムでは、車両発生後にプラトーンを形成する。提案する制御システムにおけるプラトーンの構成車両台数は第10.6.2節のインフラからの推奨値に基づいている。もちろん、必ず推奨値通り

にプラトウーンを形成するわけではなく、車両同士が距離が通信レンジ、車間距離センサレンジよりも離れている場合はプラトウーンを形成できない。たとえば、シミュレーション1～3の自動運転車線では、推奨値は3台となるが、実際は車間距離が大きいためプラトウーンを形成していない。従来の制御システムにおけるプラトウーンの構成車両台数は第10.6.2節のインフラからの推奨値を単純に2倍している。

合流車両は、上記合流条件を満たすような、時間間隔で発生する。時間間隔のばらつきの標準偏差は平均時間間隔の1/4としている。たとえば、合流車線900[台/h]の場合は、車両発生時間間隔は4秒を中心とする標準偏差1秒の正規分布に従うものとしている[189]。

評価として、合流地点から1[km]の範囲（道路の3[km]地点から4[km]地点の間）における以下の項目を評価する。

- ・加減速量
- ・燃料消費量
- ・平均合流時間
- ・平均速度

シミュレーションは600秒間行う。加減速量、燃料消費量については、シミュレーション終了時に道路上に存在し、かつ評価区間を走行し終えた車両（4[km]～10[km]地点に存在する車両）の平均値とする。平均合流時間は、シミュレーション終了時に道路上に存在し、かつ合流車として発生した車両の平均値とする。平均速度については、シミュレーション終了時における評価区間の平均速度とする。



図11.5.1 シミュレーションの条件

11.5.2 シミュレーション結果(合流時)

表11.5.1～表11.5.4にシミュレーション条件および、シミュレーション結果を示す。自律走行システムに関しては、自動運転車線走行車の流入量が最大交通量を超えない範囲でシミュレーションを行っている。図11.5.2～図11.5.5は、各制御システムにおける結果を評価項目別にグラフで表したものである。グラフの凡例は、表11.3.1と対応している。図11.5.6、図11.5.7にそれぞれ、従来の制御システムおよび提案する制御システムによる合流のシミュレーション実行画面を示す。このシミュレーション実行画面は道路を500[m]毎に分割して示しており（道路の起点は左上端）、車線の右端と1段下の車線の左端がつながっている。このシミュレーション実行画面は、自動運転車線3600[台/h]、合流車線3600[台/h]の合流の様子であり、従来の制御システムにおいて渋滞が発生している様子がわかる。

少ない交通量（シミュレーション1～3）の結果を見ると、交通量の少ない合流では、各制御システムに大きな差は見られなかった。合流時間が、提案する制御システムにおいて、やや長くなっている。この原因は、提案する制御システムでは合流車とプラトゥーンが近い場合、合流車は車線変更前に車車間通信を確立し、先頭車の制御をうけるため、その手続きの分だけ時間がかかるためである。また合流車の発生タイミングの影響も大きい。従来の制御システムでは、加減速度で大きな値をとっているが、これはプラトゥーン形成時に車間距離を詰める際に加速していることに起因している。これは、制御ゲインの調整で克服できる問題であるので、問題視する必要はない。また車間時間2秒の自律走行システムでも加減速度が大きな値をとっている理由は、合流してから、車間時間2秒に相当する車間距離をとるために減速している車両が多いこと起因している。車間時間2秒の自律走行システムのシミュレーション3で、全ての評価項目が極端な値を示した理由は、合流後の交通量がこの制御システムで実現できる最大交通容量を超過していることに起因する。この場合は、渋滞が発生し交通流が大きく乱れ各評価項目が極端な値を示す結果となった。シミュレーション1～4の結果を見る限り、少ない交通量における合流では、どの制御システムにおいても問題無く適用できることがわかる。もし、自動運転車線で実現する最大交通容量が2000[台/h]程度で良いのであれば、車車間通信が不用である自律走行システム（車間時間が1秒）が適していると考ええる。

車間時間1秒の自律走行システムにおける交通量が多い場合（シミュレーション4～6）の結果を見ると他の制御システムに比べて合流時間が大幅に長くなっている。合流時間が長い理由は、自動運転車線を走行する車両の車間距離が短い（車間時間1秒）ため、合流車が安全に合流するための車間距離を確保できなくなっているためである。よってシミュレーション6では、車両が合流できずに合流車線上を走行し続けた車両も多数存在した。また、車間時間1秒の自律走行システムのシミュレーション6で、全ての評価項目が極端な値を示した理由は、合流後の交通量が各制御システムで実現できる最大交通容量を超過していることに起因する。この場合は、渋滞が発生し交通流が大きく乱れ各評価項目が極端な値を示す結果となった。

以下では、交通量の多い合流（シミュレーション4～13）について提案する制御システムと従来の制御システムを各評価項目別に比較する。

図11.5.2は、平均速度の比較結果である。提案する制御システムでは、全てのシミュレーションにおいて、合流部分の速度低下はなく、制限速度に近い値を維持している。これは、プラトゥーンの任意の位置から合流できるため、合流車が後続のプラトゥーンにほとんど影響を及ぼさないためである。また、プラトゥーン長を一定となるように車間距離を制御することにより、合流によってプラトゥーンの構成車両台数が変化しても、プラトゥーン長が変化せず、後続のプラトゥーンに影響を与えないためである。一方、従来の制御システムでは、シミュレーション10、13において速度が極端に低下していることがわかる。これは、合流車の方式に起因するものである。すなわち、従来の制御システムでは、プラトゥーンの末尾からの合流、すなわちプラトゥーンとプラトゥーンの間からの合流を行っている。合流車が自動運転車線に入る際に、合流

車の後ろのプラトゥーンが合流車との車間距離を維持するために減速することを余儀なくされる。合流車が少ない場合は、この影響は減衰して消滅する。しかし、合流車が連続して自動運転車線に入る場合は、合流車後続のプラトゥーンの減速の影響が減衰せず、合流部分付近の大幅な速度低下が起こる。また、合流車が少ない場合でも、自動運転車線の交通量が多い場合は、合流部分付近に速度低下が起こることがわかる。シミュレーション10、13では、合流部分における交通容量が、車両の流入量よりも低い値となるため、合流部分より上流では渋滞が発生している。すなわち、従来の制御システムではシミュレーション10、13の合流を実現できない。この速度低下の抑制方法としては、合流前のプラトゥーン間距離を $L_m+hV[m]$ よりも大幅に大きな値にすることが考えられる。この場合、合流部分で多少車間距離が詰まっても $L_m+hV[m]$ 以下にならないようにすれば、プラトゥーンの減速は生じず、速度低下をある程度防ぐことができる。プラトゥーン間距離はプラトゥーン構成車両台数を多くすれば大きくすることができるが、この場合、合流時間が増加する（プラトゥーンの末尾にたどり着く時間がかかるため）。なお、従来の制御システムのシミュレーション10において、合流前の推奨プラトゥーン台数を15台としてシミュレーションを行ってみたが、若干の改善は見られたものの速度低下を防ぐことはできなかった。

図11.5.3は加減速量を示している。提案する方式では、合流車の増加に伴い加減速量が増加する傾向があるが、すべてのシミュレーション条件で低い値を維持している。提案する方式では、プラトゥーン長を一定に保つために、プラトゥーンの構成車両台数によって車間距離を変化させているが、この変化に伴う加減速の影響は小さいこと考えてよい。自動運転車線7200[台/h]の合流（シミュレーション11～13）における加減速量が、自動運転車線1800[台/h]の合流（シミュレーション4～6）における加減速量よりも小さい理由は、車間距離変化の影響に起因する。すなわち、自動運転車線7200[台/h]の合流（シミュレーション11～13）では、合流後もプラトゥーンの構成車両台数の変化の割合が小さいため、合流後の車間距離変化による加減速がほとんどなかったためである。一方、従来の制御システムでは、合流車の増加に伴う加減速量の増加が激しいものとなっている。特にシミュレーション10、13は、合流車線、自動運転車線共に渋滞が発生しており、合流部分で初速度25[m/s]で発生した合流車が即座に急減速する状態になっている。このため、合流車の発生初速度によっては、この結果と異なるものとなることが予想できるが、それによってスムーズな合流が可能になるわけではない。シミュレーション10、13では、合流部分の交通容量が、合流後の交通量以下になっているのため、渋滞が自動運転車線に渋滞が発生している。このため、評価区間以外でも、自動運転車線の上流部分において渋滞のために大きな減速が発生している。

図11.5.4は燃料消費量を表している。第11.2.4項の評価法で定常走行における燃料消費量は約65[ml]である。このことを考えると、提案する制御システムでは、合流によってほとんど燃料消費量が変化せず、定常走行とほぼ同じような値となっていることがわかる。また、すべてのシミュレーションで、従来の制御システムにおける燃料消費量を下回る値となっている。この理由として、提案する制御システムでは、加

減速量が小さかったことに加え、モデルマッチング制御によって、各車両の加速度の応答特性が緩やかなものになっていることを考えている。一方従来の制御システムでは、シミュレーション10、13にて燃料消費量が極端に大きな値となっている。これらのシミュレーションは、合流部分で速度が大幅に低下しているシミュレーションと一致している。すなわち、合流時に低下した速度から制限速度に戻るために大きく加速することが、燃料消費量の増加の原因となっている。

図11.5.5は、平均合流時間を表している。提案する制御システムでは、平均合流時間は全てのシミュレーションで5秒前後の値となっている。提案する制御システムでは、プラトウーンの任意の場所から合流できるため、自動運転車線、合流車線の交通量に関わらず、ほぼ同じような合流時間となっている。もし、プラトウーンの加速度制限値を大きく設定（第5.4.2項参照）すれば、俊敏に合流車のためのスペースを作り、即座に合流車が車線変更を行うことができる。すなわち合流時間を短縮できる。しかし、この場合、合流に伴う加減速量が増大する。すなわち、提案する制御システムでは、合流時間と加減速量にはトレードオフの関係がある。一方、従来の制御システムでは、平均合流時間は、自動運転車線の交通量の増大に伴い増大する傾向がある。この原因として、プラトウーンが長くなると、プラトウーンの末尾まで到達するために多くの時間を要することに起因している。合流車が発生した時にタイミング良くプラトウーンの末尾にぶつかればよいが、場合によってはプラトウーンの末尾になかなか出会えない場合もある。たとえば、15台の車両で構成されるプラトウーンの全長は100[m]程度である。この場合、プラトウーンの前頭あたりに発生した合流車が末尾で合流するためには、相対速度3[m/s]で移動したとしても30秒程度を要することになる。シミュレーション10、13では、上記のようなプラトウーンの長さの影響に加え、合流部分付近の交通流の乱れにより、合流するための十分な車間距離が確保できず、合流時間が大幅に長くなる結果となっている。

以上の評価結果を以下にまとめる。交通量が少ない合流（シミュレーション1～3）では、提案する制御システム、従来の制御システムおよび自律走行システムにおいて結果に大きな違いはないと言ってよい。しかし、交通量が多い場合（シミュレーション4～13）に各制御システムによって大きな違いが生じる。シミュレーション6以降の合流は自律走行システムでは実現できないので、以下では提案する制御システムと従来の制御システムについて比較する。提案する制御システムでは、従来の制御システムに比べ、ほとんどの評価項目で良好な結果となった。従来の制御システムでは、第10.7.1節及び図10.7.1で説明したように、プラトウーンの末尾に合流した車両が、後続のプラトウーンの間隔距離制御に影響を与える。このため、車両の合流毎に合流車後続のプラトウーンは減速を行うことになり、平均速度の低下、加減速の増大、燃料消費の増大を招くことになる。結果として、定常走行で10000[台/h]の交通容量を実現できても、3600[台/h]の自動運転車線に3600[台/h]の車両が合流することができない。これは、定常走行における交通容量だけを評価して、プラトウーン走行の可能性を評価することは誤りであることを示している。また、合流車はプラトウーンの末尾から合流するため、車線変更前にプラトウーン末尾付近まで移動する必要がある。プ

ラトウーンが長い場合、プラトウーン末尾付近まで移動する時間が長くなり、合流時間の増加を招くことになる。一方、提案する制御システムでは、合流する車両はプラトウーンの任意の場所から合流できる。さらに、合流の際プラトウーンの長さを変化しないようにプラトウーン内車間距離を制御している。これにより、平均合流時間の短縮と合流による後続のプラトウーンへの影響の抑制を実現している。その結果、合流の際の加減速の抑制、速度低下の抑制、燃料消費の抑制、合流時間の短縮および交通流の安定化を同時に実現している。

表11.5.1 提案する制御システムにおけるシミュレーション結果

シミュレーション条件	自動運転車線(本線) [台/h]	合流車線[台/h]	推奨プラトウーン構成 車両台数(合流前)	推奨プラトウーン構成 車両台数(合流後)	加速度の二乗 積分値 [m ² /s ²] 4)	燃料消費量 [ml]	平均合流 時間[s]	平均速度 [m/s]
1	450	450	3	3	0.03	73.99	3.22	27.52
2	900	450	3	3	0.03	72.09	5.02	28.02
3	900	900	3	3	0.05	74.32	4.11	27.46
4	1800	450	3	3	0.06	71.85	5.00	27.50
5	1800	900	3	3	0.09	74.62	2.80	27.92
6	1800	1800	3	4	0.12	78.30	2.92	27.80
7	3600	450	4	5	0.04	68.92	3.98	27.86
8	3600	900	4	5	0.06	70.87	5.65	27.81
9	3600	1800	4	6	0.08	72.97	5.74	27.74
10	3600	3600	4	8	0.16	81.17	4.82	27.79
11	7200	450	8	8	0.05	71.03	3.71	27.75
12	7200	900	8	9	0.05	70.98	4.95	27.63
13	7200	1800	8	10	0.10	78.22	4.72	27.11

表11.5.2 従来の制御システムにおけるシミュレーション結果

シミュレーション条件	自動運転車線(本線) [台/h]	合流車線[台/h]	推奨プラトウーン構成 車両台数(合流前)	推奨プラトウーン構成 車両台数(合流後)	加速度の二乗 積分値 [m ² /s ²] 4)	燃料消費量 [ml]	平均合流 時間[s]	平均速度 [m/s]
1	450	450	1	2	0.09	76.54	2.01	27.91
2	900	450	2	3	0.08	73.32	2.95	28.13
3	900	900	2	4	0.13	78.55	2.79	28.18
4	1800	450	4	5	0.10	73.65	4.44	26.94
5	1800	900	4	6	0.19	78.32	3.81	27.44
6	1800	1800	4	8	0.33	89.36	6.10	27.96
7	3600	450	8	9	0.07	71.39	10.39	27.09
8	3600	900	8	10	0.12	75.21	10.58	27.85
9	3600	1800	8	11	0.33	89.74	12.78	25.85
10	3600	3600	8	15	1.17	228.65	70.83	5.52
11	7200	450	15	16	0.17	79.26	16.89	27.61
12	7200	900	15	17	0.36	90.69	23.58	26.14
13	7200	1800	15	19	1.06	194.77	28.40	18.52

表 11.5.3 自律走行システム(車間時間 1 秒)におけるシミュレーション結果

シミュレーション条件	自動運転車線(本線) [台/h]	合流車線[台/h]	推奨プラトーン構成 車両台数(合流前)	推奨プラトーン構成 成車両台数(合流後)	加速度の二乗 積分値 [m^2/s^4]	燃料消費量 [ml]	平均合流 時間[s]	平均速度 [m/s]
1	450	450	1	1	0.03	74.56	2.01	27.56
2	900	450	1	1	0.03	72.11	2.95	27.78
3	900	900	1	1	0.05	75.30	2.89	27.46
4	1800	450	1	1	0.04	72.40	7.73	27.39
5	1800	900	1	1	0.17	84.52	22.26	26.96
6	1800	1800	1	1	1.05	151.77	152.80	21.75

表 11.5.4 自律走行システム(車間時間 2 秒)におけるシミュレーション結果

シミュレーション条件	自動運転車線(本線) [台/h]	合流車線[台/h]	推奨プラトーン構成 車両台数(合流前)	推奨プラトーン構成 成車両台数(合流後)	加速度の二乗 積分値 [m^2/s^4]	燃料消費量 [ml]	平均合流 時間[s]	平均速度 [m/s]
1	450	450	1	1	0.08	78.36	2.01	26.89
2	900	450	1	1	0.10	78.70	2.96	26.95
3	900	900	1	1	0.88	201.17	52.18	6.49

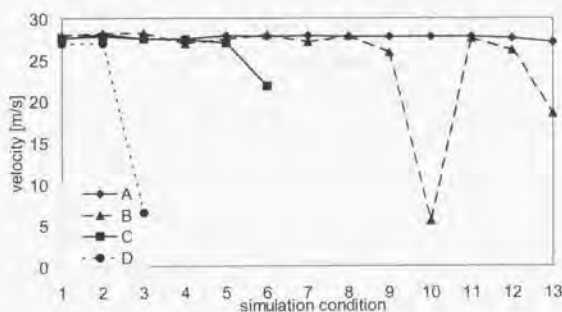


図 11.5.2 平均速度

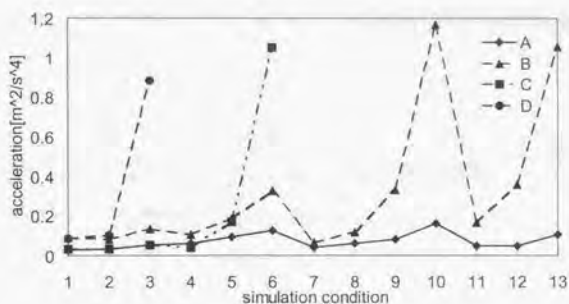


圖 11.5.3 加減速度

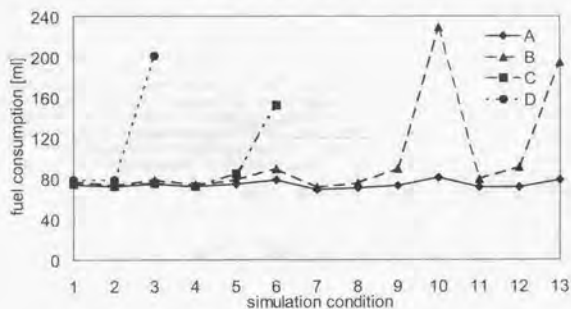


圖 11.5.4 燃料消費量

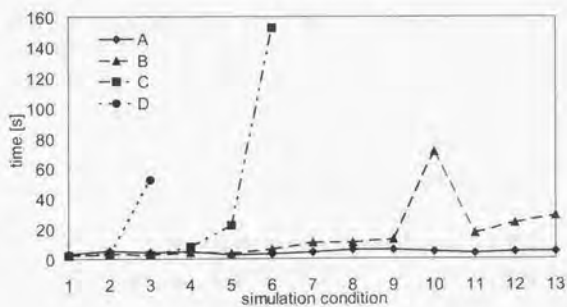


圖 11.5.5 平均合流時間

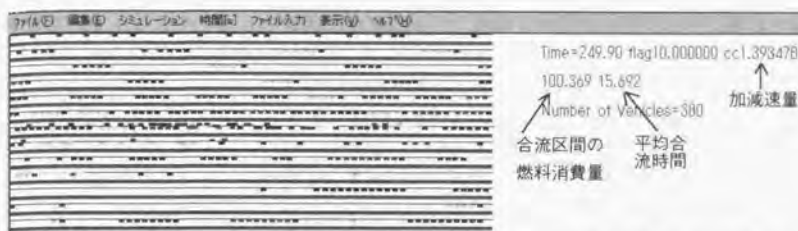


図11.5.6 シミュレーションの様子（従来の制御システムによる合流で渋滞が発生している様子）

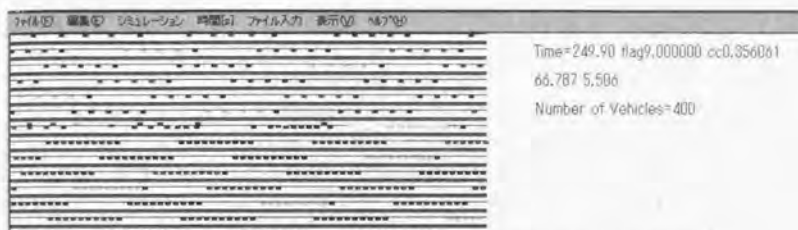


図11.5.7 シミュレーションの様子（提案する制御システムによる合流）

11.5.3 シミュレーション条件（離脱時）

シミュレーションは以下の条件で行う。（図11.5.8参照）

- ・自動運転車線を走行するプラトーンは道路の0[km]地点から初速度27.8[m/s]で発生する。自動運転車線の制限速度は27.8[m/s]とする。
- ・離脱点は道路の3.5[km]地点に配置し、離脱車線は離脱専用車線とする。
- ・離脱車は、車両発生時点でランダムに決定される。たとえば、自動運転車線3600[台/h]で、離脱車の割合が25%の場合、車両発生時に乱数による判定で25%の確率で離脱車として決定される。この場合、離脱車線は900[台/h]の交通量となる。
- ・提案する制御システムでは、離脱地点500[m]手前から、第10.7.2項および第10.3.2項の制御および通信手続きを開始し、離脱地点近傍で車線変更を行って離脱を行う。
- ・従来の制御システムでは、離脱地点500[m]手前から、離脱の手続きを開始する。離脱の手続きとしては、離脱車の手前でプラトーンを分割し、離脱車が分割されたプラトーンの前頭車となる。その後プラトーンの前頭車となった離脱車は、離脱地点近傍で車線変更を行う。離脱車を前頭車とするプラトーンの追従車は、離脱車の車線変更後にプラトーンを再形成する。
- ・自律走行システムでは、離脱車は離脱地点近傍で車線変更を行う。
- ・離脱車線で離脱車は車間時間1秒の自律走行を行う。離脱車線の制限速度は27.8[m/s]とする。
- ・プラトーン前頭車および自律走行車は、制限速度を超える速度は出さない。（先行

するプラトーンや車両との間隔が大きい場合、無理して間隔を詰めない) 離脱の条件としては以下の12種類を評価する。

- シミュレーション1: 自動運転車線:900[台/h], 離脱車:25% (225[台/h])
- シミュレーション2: 自動運転車線:900[台/h], 離脱車:50% (450[台/h])
- シミュレーション3: 自動運転車線:900[台/h], 離脱車:75% (675[台/h])
- シミュレーション4: 自動運転車線:1800[台/h], 離脱車:25% (450[台/h])
- シミュレーション5: 自動運転車線:1800[台/h], 離脱車:50% (900[台/h])
- シミュレーション6: 自動運転車線:1800[台/h], 離脱車:75% (1350[台/h])
- シミュレーション7: 自動運転車線:3600[台/h], 離脱車:12.5% (450[台/h])
- シミュレーション8: 自動運転車線:3600[台/h], 離脱車:25% (900[台/h])
- シミュレーション9: 自動運転車線:3600[台/h], 離脱車:50% (1800[台/h])
- シミュレーション10: 自動運転車線:7200[台/h], 離脱車:6.25% (450[台/h])
- シミュレーション11: 自動運転車線:7200[台/h], 離脱車:12.5% (900[台/h])
- シミュレーション12: 自動運転車線:7200[台/h], 離脱車:25% (1800[台/h])

自動運転車線を走行する車両は、上記離脱条件を満たすように一定時間間隔で発生する。ここで、提案する制御システムおよび従来の制御システムでは、車両発生後にプラトーンを形成する。提案する制御システムにおけるプラトーンの構成車両台数は第10.6.2節のインフラからの推奨値に基づいている。もちろん、必ず推奨値通りにプラトーンを形成するわけではなく、車両同士が距離が通信レンジ、車間距離センサレンジよりも離れている場合はプラトーンを形成できない。たとえば、シミュレーション1~3の自動運転車線では、推奨値は3台となるが、実際は車間距離が大きいいためプラトーンを形成していない。従来の制御システムにおけるプラトーンの構成車両台数は第10.6.2節のインフラからの推奨値を単純に2倍している。

評価として、離脱地点から±0.5[km]の範囲(道路の3[km]地点から4[km]地点の間)における自動運転車線について以下の項目を評価する。

- ・加減速度
- ・燃料消費量
- ・平均速度

シミュレーションは600秒間行う。加減速度、燃料消費量については、シミュレーション終了時に自動運転車線上に存在し、かつ評価区間を走行し終えた車両(4[km]~10[km]地点に存在する車両)の平均値とする。平均速度についてシミュレーション終了時における評価区間の平均速度とする。

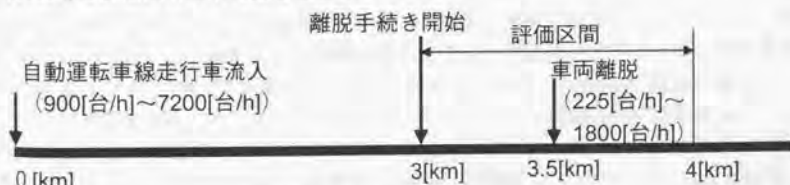


図11.5.8 シミュレーションの条件

11.5.4 シミュレーション結果(離脱時)

表11.5.5～表11.5.8にシミュレーション条件および、シミュレーション結果を示す。自律走行システムに関しては、自動運転車線走行車の流入量が最大交通量を超えない範囲でシミュレーションを行っている。図11.5.9～図11.5.11は、各制御システムにおける結果を評価項目別にグラフで表したものである。グラフの凡例は、表11.3.1と対応している。

少ない交通量(シミュレーション1～6)の結果を見ると、交通量の少ない離脱では、各制御システムにほとんど差は見られなかった。この理由としては、シミュレーション1～3では、どの制御方式でも車間距離が大きいいため、プラトーンを形成しておらず、自律走行と変わらない状況になっているためである。シミュレーション4～6では、提案する制御システムおよび従来の制御システムではプラトーンを形成しているが、プラトーンの構成車両台数が少ないためにほとんど、離脱に伴う加減速が生じないためである。特に提案する制御システムでは、プラトーンの構成車両台数が3台の場合と2台の場合では、目標車間距離が等しいため(第10.5.2項参照)、プラトーンの構成車両台数の変化に伴う加減速が生じない。自律走行システムでは、車両が離脱しても、制限速度を超える加速を行って無理に車間距離を詰めないため、離脱に伴う加減速が生じない。よって自律走行システムにおける結果はすべて定常走行と変わらない結果となっている。よって、交通量が少ない場合は、定常走行と変わらない結果を実現できる自律走行システムが適していると考えている。

以下では、交通量の多い離脱(シミュレーション7～12)について提案する制御システムと従来の制御システムを各評価項目別に比較する。

図11.5.9は、平均速度の比較結果である。提案する制御システムでは、全てのシミュレーションにおいて、離脱部付近の速度低下はなく、制限速度に近い値を維持している。これは、提案する制御システムでは、プラトーン長を変化することなく離脱を実現するので、離脱の影響が後続のプラトーンにの車間距離制御に伝播しないためである。一方、従来の制御システムでは、シミュレーション9、12において速度が低下していることがわかる。シミュレーション12では、速度低下に伴い渋滞が発生したため、250秒でシミュレーションを停止している。離脱に伴う速度の低下は、離脱の方式に起因するものである。すなわち、従来の制御システムでは、離脱の際にプラトーンを分割している。プラトーンを分割すると、分割したプラトーン間の車間距離が大きくなるため、必然的に分割されたプラトーンのうち後続する方のプラトーンの減速が生じる。プラトーンの中で離脱する車両が多い場合は、プラトーンの各所に分割が発生し、大きな減速が生じ、その影響が後続するプラトーンにも伝播することになる。この速度低下の抑制方法としては、離脱前のプラトーン間距離を $L_m+hV[m]$ よりも大幅に大きな値にすることが考えられる。この場合、離脱の際にプラトーンを分割することにより、後続のプラトーンとの車間距離が多少詰まっても $L_m+hV[m]$ 以下にならないようにすれば、前方のプラトーンでの分割の影響による後続のプラトーンでの減速は生じず、速度低下をある程度防ぐことができると考えられる。

プラトーン間距離はプラトーン構成車両台数を多くすれば大きくすることができるが、この場合、第11.5.2で検討したようにプラトーンに車両が合流する際の合流時間が大きくなる。

図11.5.10は加減速量を示している。提案する方式では、離脱車の割合の増加に伴い加減速量が増加する傾向があるが、すべてのシミュレーション条件で低い値を維持している。提案する方式では、プラトーン長を一定に保つために、プラトーンの構成車両台数によって車間距離を変化させている。車両が離脱するとプラトーンの構成車両台数が変化するため、車両が離脱したプラトーンでは車間距離が変化する。提案する制御システムにおける加減速は、すべてこの車間距離変化に起因するものである。一方、従来の制御システムでは、離脱車の増加に伴う加減速量の増加が激しいものとなっている。従来の制御システムでは、プラトーンの分割および離脱後のプラトーンの再形成の際に生じる加減速に起因するところが大きい。プラトーンの分割および離脱後のプラトーンの再形成の際に生じる加減速では、ゲインの調整である程度小さくすることができる。しかし、シミュレーション12においては、渋滞による加減速も影響しているため、ゲインの調整だけではほとんど改善できない。さらにこの場合は、評価区間以外でも、自動運転車線の上流部分において渋滞のために大きな減速が発生している。

図11.5.11は燃料消費量を表している。第11.2.4項の評価法で定常走行における燃料消費量は約65[ml]である。このことを考えると、提案する制御システムでは、離脱によってほとんど燃料消費量に変化せず、定常走行とはほぼ同じような値となっていることがわかる。また、すべてのシミュレーションで、従来の制御システムにおける燃料消費量と同等あるいは下回る値となっている。この理由として、提案する制御システムでは、加減速量が小さかったことに加え、モデルマッチング制御によって、各車両の加速度の応答特性が緩やかなものになっていることを考えている。一方従来の制御システムでは、シミュレーション9、12にて燃料消費量が極端に大きな値となっている。これらのシミュレーションは、離脱部付近で速度が大幅に低下しているシミュレーションと一致している。すなわち、離脱部付近で低下した速度から制限速度に戻るために大きく加速することが、燃料消費量の増加の原因となっている。

以上の評価結果を以下にまとめる。交通量が少ない離脱(シミュレーション1～6)では、提案する制御システム、従来の制御システムおよび自律走行システムにおいてほとんど差はないと言って良い。しかし、交通量が多い場合(シミュレーション7～12)に各制御システムによって大きな違いが生じる。シミュレーション7以降の離脱は自律走行システムでは実現できないので、以下では提案する制御システムと従来の制御システムについて比較する。提案する制御システムでは、従来の制御システムに比べ、合流時同様ほとんどの評価項目で良好な結果となった。従来の制御システムでは、プラトーンから車両が離脱する際にプラトーンを分割する。このため、車両の離脱ごとにプラトーンの分割が生じ、プラトーン内の車両の減速が余儀なくされる。さらに離脱車が多い場合は、減速の影響が後続のプラトーンの減速を招くことになる。また車両の離脱後に分割されたプラトーンを再形成する際に車間距離を

詰めるための加速を行うことになる。この結果、従来の制御システムでは、離脱車の割合が大きくなるに従い、平均速度の低下、加減速の増大、燃料消費の増大を招くことになる。一方、提案する制御システムでは、離脱の際に離脱車前後の車間距離を変化することなく、離脱車は車線変更を行う。さらに、離脱後は、プラトウーンの長さを変化しないようにプラトウーン内車間距離を制御している。離脱による後続のプラトウーンへの影響の抑制を実現している。その結果、離脱の際の加減速の抑制、速度低下の抑制、燃料消費の抑制および交通流の安定化を同時に実現している。

表 11.5.5 提案する制御システムにおけるシミュレーション結果

シミュレーション条件	自動運転車線(本線) [台/h]	離脱車の割合 [%]	推奨プラトウーン構成車両台数 (離脱前)	推奨プラトウーン構成車両台数 (離脱後)	加速度の二乗積分値 $[m^2/s^4]$	燃料消費量 [ml]	平均速度 [m/s]
1	900	25	3	3	0.00	65.60	27.80
2	900	50	3	3	0.00	65.60	27.80
3	900	75	3	3	0.00	65.60	27.80
4	1800	25	3	3	0.00	66.42	27.80
5	1800	50	3	3	0.00	66.30	27.80
6	1800	75	3	3	0.00	66.33	27.80
7	3600	12.5	4	4	0.02	67.34	28.02
8	3600	25	4	3	0.04	69.08	28.09
9	3600	50	4	3	0.07	70.51	28.12
10	7200	6.25	4	7	0.01	66.59	28.10
11	7200	12.5	8	7	0.02	67.59	28.19
12	7200	25	8	6	0.07	70.66	27.99

表 11.5.6 従来の制御システムにおけるシミュレーション結果

シミュレーション条件	自動運転車線(本線) [台/h]	離脱車の割合 [%]	推奨プラトウーン構成車両台数 (離脱前)	推奨プラトウーン構成車両台数 (離脱後)	加速度の二乗積分値 $[m^2/s^4]$	燃料消費量 [ml]	平均速度 [m/s]
1	900	25	2	1	0.00	65.60	27.80
2	900	50	2	1	0.00	65.60	27.80
3	900	75	2	1	0.00	65.60	27.80
4	1800	25	4	3	0.04	68.94	27.80
5	1800	50	4	2	0.08	71.38	27.36
6	1800	75	4	1	0.13	73.12	27.02
7	3600	12.5	8	7	0.04	68.79	27.72
8	3600	25	8	6	0.07	71.54	27.54
9	3600	50	8	4	0.24	86.44	24.85
10	7200	6.25	15	14	0.03	69.65	27.33
11	7200	12.5	15	13	0.12	80.97	27.40
12	7200	25	15	11	0.33	129.19	21.17

表 11.5.7 自律走行システム(車間時間 1 秒)におけるシミュレーション結果

シミュレーション条件	自動運転車線(本線) [台/h]	離脱車の割合 [%]	推奨プラトーン構成車両台数 (離脱前)	推奨プラトーン構成車両台数 (離脱後)	加速度の二乗積分値 [m^2/s^4]	燃料消費量 [ml]	平均速度 [m/s]
1	900	25	1	1	0.00	65.60	27.80
2	900	50	1	1	0.00	65.60	27.80
3	900	75	1	1	0.00	65.60	27.80
4	1800	25	1	1	0.00	65.79	27.80
5	1800	50	1	1	0.00	65.79	27.80
6	1800	75	1	1	0.00	65.79	27.80

表 11.5.8 自律走行システム(車間時間 2 秒)におけるシミュレーション結果

シミュレーション条件	自動運転車線(本線) [台/h]	離脱車の割合 [%]	推奨プラトーン構成車両台数 (離脱前)	推奨プラトーン構成車両台数 (離脱後)	加速度の二乗積分値 [m^2/s^4]	燃料消費量 [ml]	平均速度 [m/s]
1	900	25	1	1	0.00	65.60	27.80
2	900	50	1	1	0.00	65.60	27.80
3	900	75	1	1	0.00	65.60	27.80

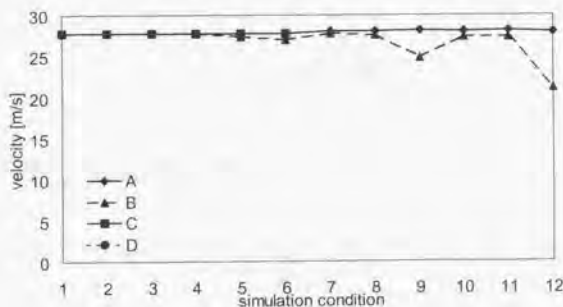


図 11.5.9 平均速度

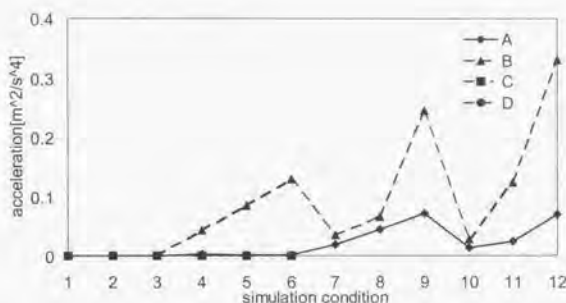


図 11.5.10 加減速度

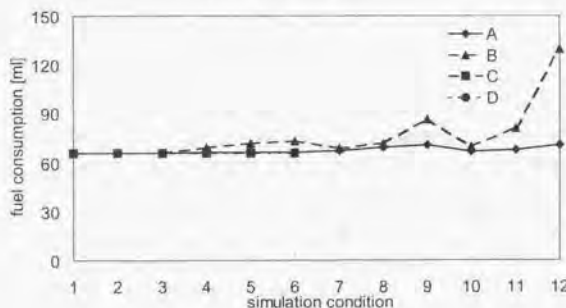


図 11.5.11 燃料消費量

11.6 渋滞発生時の評価

この節では、交通流が乱れたあとの回復の様子を評価する。すなわち、交通流の非定常状態から定常状態への移行の様子を評価する。このシミュレーションの目的は、プラトウンの挙動制御が、交通流の安定化に寄与できることを確認するものである。自動運転車システムの目標の1つに、人と物の移動時間をより短くかつ予測可能にすることがある。よって、自動運転車線の交通流が事故や故障（インシデント）により乱れることを未然に防ぐことはもちろん、乱れた場合も速やかな回復を実現できることが要求される。このシミュレーションでは、意図的に交通流を乱して渋滞を引き起こし、その後の回復に至る様子进行评估する。提案する制御システムでは、渋滞時に第10.6.1項の制御によりプラトーン挙動を制御し、渋滞の影響を狭い範囲に留め、早期回復を促進する。

11.6.1 シミュレーション条件

シミュレーションは以下の条件で行う（図11.6.1参照）。

- ・自動運転車線を走行するプラトゥーンは道路の0[km]地点から初速度27.8[m/s] (100[km/h])で発生する。
- ・制限速度は、道路全域にわたり27.8[m/s]とする。
- ・合流車は発生しない。
- ・道路上で先行している車両が8.5[km]地点に達した後（シミュレーション開始約300秒後）、 $-1[\text{m/s}^2]$ で強制的に制動させる。この場合、約8.9[km]地点に停止する。後続の車両も車間距離制御により減速し、停止することになる。
- ・シミュレーション開始500秒後に停止を解除する。この場合、停止を解除された車両は制限速度まで加速し、後続の車両も引き続き加速する。
- ・提案する制御システムでは、第10.6.1項の制御により、プラトゥーンの数と制限速度の差が5[m/s]以上になった場合、車間距離目標値を2[m]に固定する。
- ・従来の制御システムおよび自律走行システムでは、定常走行の制御と同様の制御を行う。
- ・プラトゥーンの構成車両台数は、常に一定とし、道路インフラからの情報に基づいて第11.5節と同様の値を用いる。このシミュレーションにおけるインシデントは、短期的なものであり、道路インフラがインシデントを検出していないことを想定している。よって、インフラは定常走行の場合と同様の指示を出すものとしている。

評価する交通量条件としては以下の3種類を評価する。

シミュレーション1：自動運転車線1800[台/h]

シミュレーション2：自動運転車線3600[台/h]

シミュレーション3：自動運転車線5400[台/h]

評価としては、道路上の1[km]～10[km]区間を評価する。発生した車両の大半が、0[km]～1[km]区間でプラトゥーンを形成しているため、この区間ではプラトゥーン形成に伴う加減速が発生する。そのため、この区間を除外した1[km]～10[km]区間を評価区間とした。評価する項目は以下の通りであり、シミュレーション開始300秒後（車両の制動開始後）からの時間変化を評価する。

- ・平均速度（評価区間全域の平均および100[m]区間別の平均）
- ・加減速度（評価区間全域の平均）
- ・燃料消費量（評価区間全域の平均）

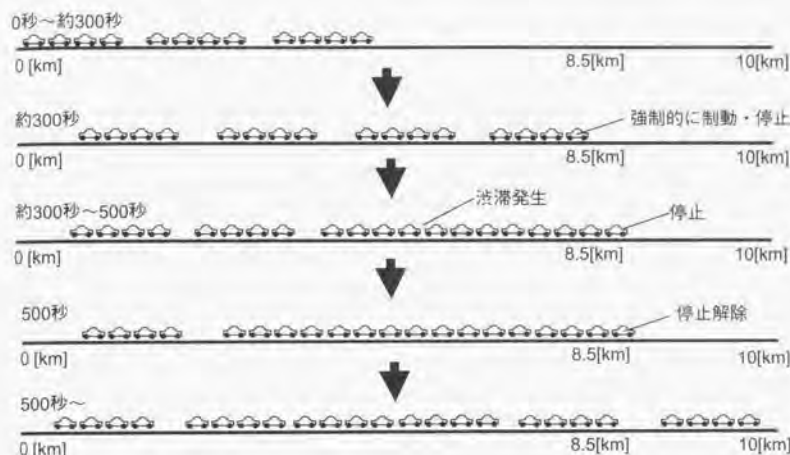


図 11.6.1 シミュレーション条件

11.6.2 シミュレーション結果

図 11.6.2～図 11.6.17 にシミュレーション結果を示す。自律走行システム（車間時間 1 秒）に関しては、3600[台/h]と 5400[台/h]の交通容量を実現できないためのシミュレーション 1 のみの結果を示す。図 11.6.9～図 11.6.17 の凡例は、表 11.3.1 と対応している。

図 11.6.2～図 11.6.8 は、評価区間の 100[m] 毎における、速度の時間変化を表している。交通量が多くなるに従い、渋滞の影響が上流に移動する度合いが大きくなっていることがわかる。各シミュレーションにおいて、提案するシステムが渋滞の影響が上流に移動する度合いが最も小さくなっている。一方、自律走行システムにおいて渋滞の影響が上流に移動する度合いが最も大きくなっている。この結果から、提案する制御システムでは、渋滞の影響を狭い範囲に留めることができることがわかる。なお、従来のシミュレーション 1 における制御システムで、1[km]～2[km]地点あたりでやや大きな速度が発生している理由は、プラトーン形成が 0[km]～1[km]で完了せず、評価区間中で、プラトーン形成に伴う加減速を行っているためである。しかし、この加減速は小さいため、評価区間全域の平均速度、平均加減速度、平均燃料消費量には、ほとんど影響を与えていない。

図 11.6.9～図 11.6.11 は、評価区間全域における平均速度である。300[s]～500[s]までは、車両が停止車両のために、徐々に速度が下がるが、停止車両が動き出してから、全ての制御システムで速度が回復している。回復する早さを比較すると、提案する制御システムにおいて最も早く平均速度が回復し、自律走行システムにおいて最も回復が遅い。また、同じ制御システムにおいては、交通量が多くなるに従って回復が遅くなる。

図 11.6.12～図 11.6.14 は、加減速量を表している。300[s]～500[s]の間は、もっぱら減速のみによる値である。これを比較すると、提案する制御システムでは、全てのシミュレーションにおいて、小さい加速度による減速を実現していることがわかる。これは、減速の際にプラトーン間車間距離を小さくしていることが、クッションのように減速を和らげる効果をもたらししていることに起因している。しかし、シミュレーション 3 のようにもともと車間距離が小さい場合は、この効果は小さい。500[s]秒からは、加減速量は、動き出した停止車両および、それに後続する車両の加速と、上流部の渋滞による減速を含むものとなる。この場合の加減速量の変化量は提案する制御システムにおいて一番大きい。このことは、提案する制御システムでは、停止車両が動き出してから、多くの車両が大きな加速度で加速を開始できていることを表している。また、加減速量がゼロになるまでの時間も、提案する制御システムにおいて一番短い。

図 11.6.15～11.6.17 は、燃料消費量を表している。停止車両が動き出した 500[s]以降を比較すると、提案する制御システムにおいて燃料消費量をもっとも大きくなる。これは、500[s]以降に多くの車両が、大きな加速度で加速しているためである。しかし、多くの車両が、大きな加速度で加速することにより、結果として渋滞が早く回復するため、燃料の総消費量は最も小さくなる。自律走行システムでは、500[s]後の燃料消費量の増加量は少ないが、増加している状態が長く続くため、結果として最も多くの燃料を消費することになる。

以上の結果により、提案する制御システムにより、渋滞の影響を狭い範囲に留め、早期回復を促進し、同時に加減速量および燃料消費の低減を実現できることが明らかにした。すなわち、プラトーンの挙動制御により、積極的に交通流を安定化することができることを明らかにした。提案する制御システムにおいて、渋滞の早期回復が実現できる理由は、加速の際に密度の変化を小さく抑えていることである。プラトーンを一力学系として扱った制御系により、車間距離が全く変化することなくプラトーンは加速することができる。車間距離が全く変化しないということは、プラトーン追従車は、先頭車に全く遅れることなく加速することができるということである。一方、従来の制御システムでは、追従車はプラトーンの前頭車と先行車の状態量によって加速度を制御しているため、必然的に先行車に対して加速の遅れが生じる。

プラトーン間の制御や自律走行に使用されている一定車間時間制御は、渋滞回復を遅らせる大きな原因である。この制御では、速度の増加に伴い大きな車間距離をとることになる。このことは、後続車は先行車に対して必然的に小さな加速度で加速しなければならないことを意味する。すなわち、後続車の加速に遅れが生じる。自律走行システムで、渋滞回復が著しく遅い結果となったのはこのことに起因している。提案する制御システムや、従来の制御システムにおいても、プラトーン間の制御として一定車間時間制御が使用されているため、少なからずこの影響を受ける。この影響を小さくするためには、車間時間を小さくすればよい。しかし、従来の制御システム

で車間時間を小さくすると、プラトゥーンの合流に支障をきたす（プラトゥーン間の距離が小さくなると合流車が入りにくくなる）。一方、提案する制御システムでは、プラトゥーン間距離が合流に影響を与えないため、さらに車間時間を縮めることが可能であると考えている。

このシミュレーションでは、短時間のインシデントを想定しているため、道路インフラから特別な指示を出さなかった。このような場合に、道路インフラがプラトゥーンの構成車両台数や速度、車線変更などを適切に指示できれば、さらに早く交通流が回復する可能性がある。このシミュレーションの結果は、道路インフラによる制御がなくても、プラトゥーンの挙動制御により、積極的に交通流を安定化できることを示すものである。

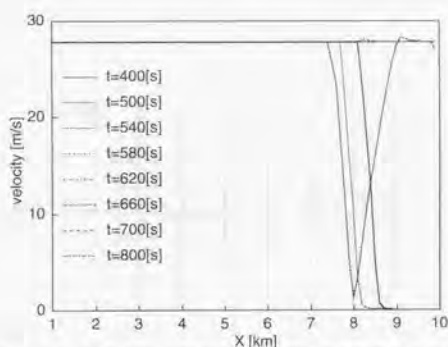


図 11.6.2 速度分布 (1800[台/h], 提案する制御システム)

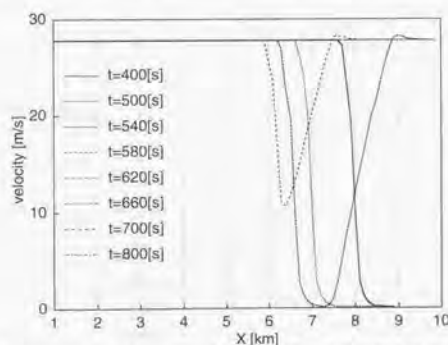


図 11.6.3 速度分布 (3600[台/h], 提案する制御システム)

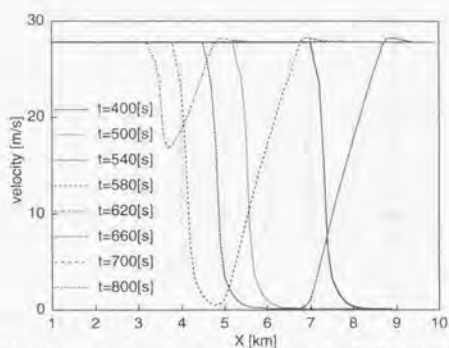


図 11.6.4 速度分布 (5400[台/h], 提案する制御システム)

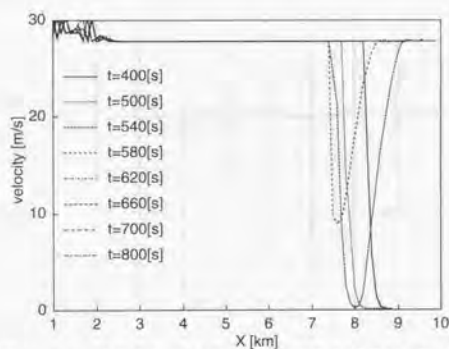


図 11.6.5 速度分布 (1800[台/h], 従来の制御システム)

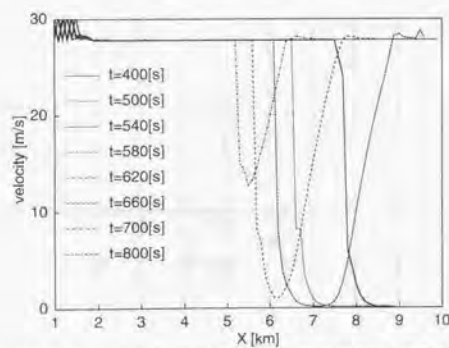


図 11.6.6 速度分布 (3600[台/h], 従来の制御システム)

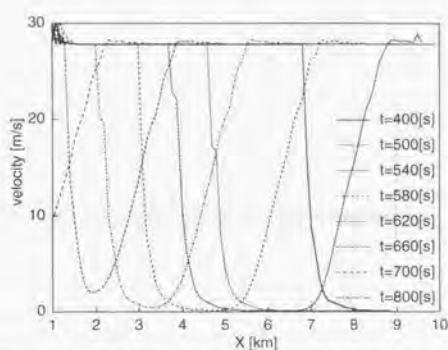


図 11.6.7 速度分布 (5400[台/h], 従来の制御システム)

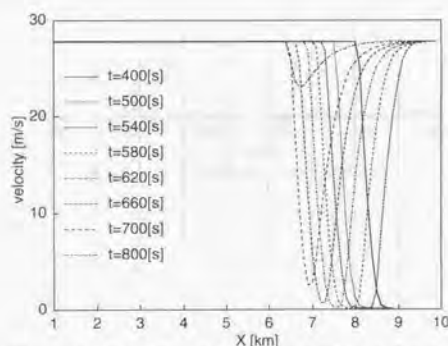


図 11.6.8 速度分布 (1800[台/h], 自律走行システム)

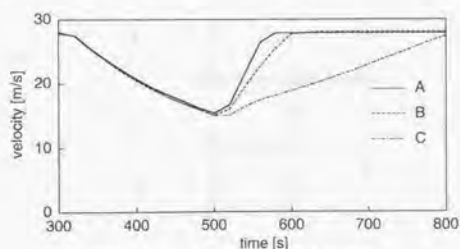


図 11.6.9 平均速度 (1800[台/h])

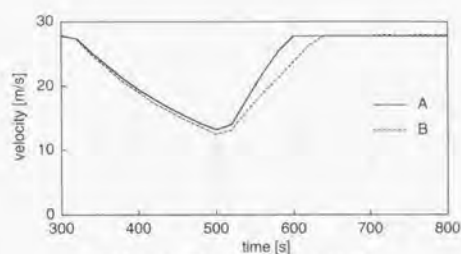


图 11.6.10 平均速度 (3600[台/h])

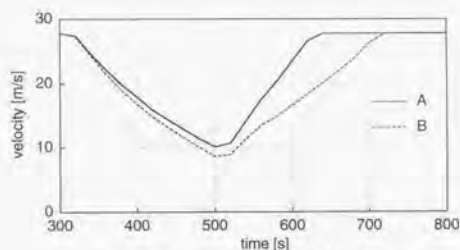


图 11.6.11 平均速度 (5400[台/h])

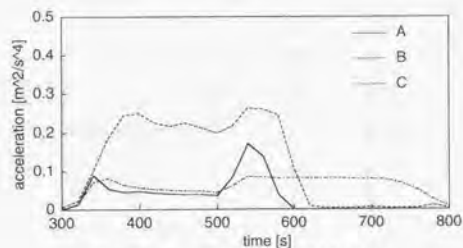


图 11.6.12 加減速度 (1800[台/h])

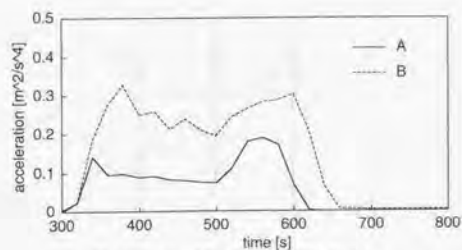


图 11.6.13 加減速度 (3600[台/h])

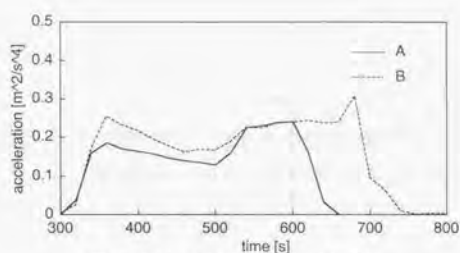


图 11.6.14 加减速量 (5400[台/h])

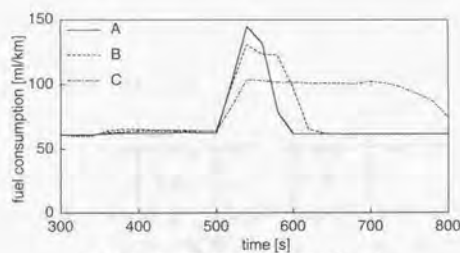


图 11.6.15 燃料消费量 (1800[台/h])

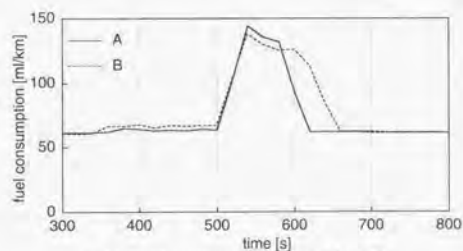


图 11.6.16 燃料消费量 (3600[台/h])

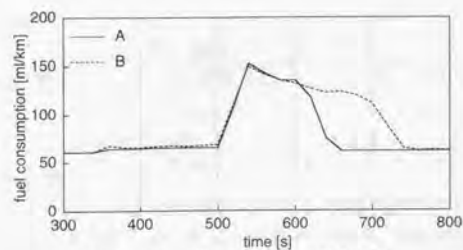


图 11.6.17 燃料消费量 (5400[台/h])

11.7 第11章のまとめ

この章では、提案する制御システムの有効性をシミュレーションにより確認した。シミュレーションモデルは、車両単位のダイナミクス、制御システム、通信システムをモデル化することにより構築されている。よって、このモデルを利用することにより、交通容量や平均速度といった交通流の巨視的な挙動のみならず、合流時間、燃料消費量、加減速度といった微視的な項目も評価することが可能となる。このモデルを利用して、提案する制御システム、従来の制御システム、自律走行システムを比較することにより以下のことを明らかにした。

- ・ 定常走行においては、プラトーンを形成する制御システムでは、1車線あたり最大10000[台/h]程度(手動運転の5倍程度)、自律走行システムでは3000[台/h]の最大交通容量を実現できることを示し、プラトーンを形成することで、飛躍的に大きな交通容量を実現できることを明らかにした。
- ・ 合流・離脱において、交通量が少ない場合(交通量が3000[台/h]程度以下の場合)は制御システムによる大きな差異はないことを明らかにした。
- ・ 合流において、交通量が多い場合(合流後の交通量が3000[台/h]程度以上の場合)では、合流条件によっては従来の制御システムでは、合流部分の速度が低下し、合流が不可能(合流部分の交通容量が、流入する車両の交通量未満になる)になることを明らかにした。すなわち、定常走行で10000[台/h]の交通容量を実現できても、高交通量における合流が不可能であるため、実際に実現できる交通容量が10000[台/h]を大きく下回る可能性があること明らかにした。
- ・ 提案する制御システムでは、合流条件によらず、合流部分の速度を低下することなく、短時間で合流できることを明らかにした。また、合流条件による加減速度、合流時間、平均速度、燃料消費量の変化がほとんどなく、平均速度と燃料消費量においては、定常走行における値とほぼ変わらないこと明らかにした。
- ・ 離脱において、交通量が多くかつ離脱車の割合が多い場合では、離脱条件によっては従来の制御システムでは、プラトーンの分割により離脱部分付近の速度が低下し、離脱が不可能(離脱部分の交通容量が、流入する車両の交通量未満になる)になることを明らかにした。
- ・ 提案する制御システムでは、離脱条件によらず、離脱部分付近の速度が低下せず、加減速度、燃料消費量においても、定常走行における値とほぼ変わらないこと明らかにした。
- ・ 交通流が乱れた後の交通流の回復については、提案するシステムで最も早く、自律走行システムで最も遅いことを明らかにした。
- ・ 提案する制御システムでは、交通流が乱れによる加減速度を小さく抑え、かつ迅速に交通流を安定化できるため、交通流の乱れに伴う、全体的な、燃料消費量や加減速度が一番少ないことを明らかにした。
- ・ 上記より、プラトーンのレベルの制御が、プラトーン走行の効率を向上し、か

つ交通流の安定化、乗り心地の向上、燃料消費量の低減を同時に実現できることを明らかにした。すなわち、提案する制御システムの有効性を明らかにした。

この章の評価により、提案する制御システムの有効性を示した。シミュレーションと比較した各制御システムにおける結果の差異は、ゲインやパラメータよりも、根本的な制御構造に起因している。たとえば、従来の制御システムにおける合流時の速度低下は、プラトゥーンの末尾から合流する方式をとっている以上、ゲインの調整やパラメータの調整で克服できる問題ではない。離脱においても、プラトゥーンを分割する方式をとっている以上、離脱部付近の交通容量の低下を防ぐことはできない。また交通流の回復速度にしても、先行車に対して遅れなく加速できれば交通流の早期回復が実現できる。しかし、従来の制御システムや自律走行では、車両レベルの制御によって車両加速度を制御しているため、先行車の加速に対して必然的に生じる遅れを防ぐことはできない。本研究で提案する制御システムでは、プラトゥーンレベルの制御を中心とする制御構造により、プラトゥーンの任意場所への合流や先行車に対する加速遅れの排除、減速時の加速度抑制等を実現し、その結果として、交通量に関わらず安定な合流・離脱や、乱れた交通流の迅速な回復を実現できるのである。第10章のタスク制御が、この章の評価結果に寄与するところは大きい。タスク制御は、本論文の各章で提案および検討した要素技術を前提とした上で設計されている。よって、本論文の各章の要素技術がこの章の評価結果に寄与している。

この章で使用したシミュレーションモデルは、制御システムの定量的な評価に利用されていることはもちろんであるが、第10章のタスク制御の設計・評価ツールとしての役割も果たしている。第10章で設計した通信手続きや、プラトゥーンの形成、合流・離脱などのタスクは、このシミュレーションモデルを利用して、車両間通信の確立やプラトゥーンの形成、合流・離脱などを行ってチェックし、不具合があれば修正し、再度チェックする手順を繰り返して設計した。このシミュレーションモデルは、タスク制御の設計・評価に留まらず、道路インフラの制御の設計・評価などにも利用できると考えている。自動運転システムの設計において、車両制御、通信システム、道路インフラ制御などをすべて一人の人間が設計することはあり得ない。自動運転システムは、さまざまな部分を担当する設計者達のコンセンサス（現在進められているITS技術の標準化がこれにあたる）に基づいて設計されることになる。設計者達が、このシミュレーションモデルのようなものを共通の設計・評価基盤として使用することができれば、設計者達がそのモデル上でコンセンサスを取りながら効率的にシステム設計を行うことができるのではないかと考えている。

11.8 記号

- \bar{L} : プラトゥーン内車間距離[m]
- h : プラトゥーン間車間時間[m]

- L_m : プラトーン間最低車間距離[s] (4.0)
 N : プラトーン構成車両最大数[台]
 V : プラトーン速度[m/s]
 L_c : 平均車長[m] (5.0)
 T_c : 交通容量[台/h]
 D_c : 交通密度[台/km]

第12章 結論

12.1 本論文の結論

この節では、本研究の成果を総括する。本研究では、プラトーン走行の高度化を実現するための制御システムを提案し、その制御システムの有用性および技術的妥当性を明らかにした。プラトーンレベルの制御と絶対位置情報の利用を大きな柱とした制御システムを提案し、これを実現するために必要な制御および計測技術の技術的妥当性を理論的および実験的に明らかにした。提案する制御システムは、交通容量の増大、安全性の向上、消費燃料と排気ガスの低減、乗り心地の向上等を両立できることを明らかにした。

本論文の各章で得られた知見をまとめると以下ようになる。

第1章では、本研究の背景として、今日の自動交通の諸問題と、それに対する国内外の動向を説明した。また本研究の目的、特徴、産業上の有用性を示した。

第2章では、本研究の技術的背景として、近年の自動運転制御に関する研究成果を概観し、現時点における自動運転制御システムに関する技術的知見を明確にした。

第3章では、本研究における問題提議として、従来提案されたのプラトーン走行システムの問題点を指摘し、それらの問題を克服するための制御システムの提案を行った。また、提案する制御システムを実現するために必要な要素技術を明確にした。具体的には以下のようにまとめられる。

- ・プラトーン走行の自律走行に対する優位性を指摘し、プラトーン走行実現の意義を示した
- ・従来のプラトーン走行における縦方向制御の問題点として、以下を指摘した。
 - (1) 車間距離の維持以外に合流、離脱の遂行を視野に入れた制御システムの構築がされていないので、これらのタスクを遂行する見通しが悪い
 - (2) プラトーンは交通状況に応じて車間距離の変更や、制御則の変更などを行う自由度を有しているのにも関わらず、それを最大限に活用できる見通しが悪い
 - (3) プラトーン間の相互作用やプラトーン-単体車両間の相互作用が考慮されていない
- ・従来のプラトーン走行における横方向制御の問題点として、以下を指摘した
 - (4) 何らか道路白線や磁気ネイル、先行車等のリファレンスが存在することを

前提に横方向制御系が設計されているので、進路変更、車線変更、インジデントへの対応する際の融通性が低い。

- ・上記(1)～(4)の問題点を克服するものとして、車車間通信を利用したプラトーンレベルの制御とDGPSを利用した絶対位置情報の利用を柱とした制御システムを提案した。
- ・提案する制御システムを実現するために必要な要素技術を明確にした。

第4章～第10章は、提案する制御システムを実現するために必要な要素技術の技術的妥当性を検討することを目的として、制御手法、計測手法の提案を行い、その有効性を確認した。本研究で検討した要素技術は、提案する制御システムを実現するために必要な技術であるばかりでなく、ITS関連の様々な技術の中で利用することができる。すなわち、本研究で検討する要素技術は、単体でITSにおける有用な基礎技術となる。

第4章では、自動車の縦方向の動特性を規範の特性に追従させるための制駆動力特性のモデルマッチング制御を提案し、その有効性を確認した。プラトーンを構成する各車両にこの制御を行うことにより、プラトーンを一力学系と扱うことが可能となり、プラトーンの挙動制御系の設計の見通しが良くなる。また、自動運転車両全体にこの制御を行えば、各車両の動特性が既知かつ同一となるため、巨視的な解析やストリングスタビリティの評価を容易にすることが可能となる。この章で明らかにしたことをまとめると以下ようになる。

- ・目標加速度に対する車両加速度の応答を規範の一次遅れ特性に追従させるためのモデルマッチング制御を提案し、その有効性をシミュレーションおよび実験により明らかにした。
- ・提案するモデルマッチング制御系は、速度による特性の差異、質量変動、勾配等の外乱に関わらず、その制御効果を発揮できることをシミュレーションにより明らかにした。

第5章では、プラトーンの挙動制御を実現するための制御として、プラトーンを一力学系として扱った縦方向制御を提案し、その有効性を確認した。この縦方向制御により、プラトーンの挙動を交通の要求に応じて容易にプラトーン内車間距離や速度を制御することが可能となる。この制御は、プラトーンの挙動制御の実現が可能であるという大きな特徴に加え、車車間通信を利用した強力なフィードフォワード入力を実現している。その結果、後続車は先行車に加減速に対して全く遅れることなく追従することが可能となるため、大型車などの加減速の遅い車両の縦方向制御にも有効である。この章で明らかにしたことをまとめると以下ようになる。

- ・プラトーンを一力学系としてモデル化し、状態フィードバックを利用した非干渉化を行うことで、プラトーン内の任意の車間距離と先頭車の速度を独立に制御に

制御できることを明らかにした。

- ・モデルマッチング制御の不完全性、通信遅れ、外乱等の影響を補償するためのフィードバック補償器を提案し、その有効性を明らかにした。
- ・プラトウーンの先頭車の速度制御の自由度を利用して、各車両の加速度目標値の二乗和を最小化する車間距離変更や、特定の車両の加速度をゼロとした車間距離変更が実現できることを明らかにした。
- ・提案する縦方向制御を実現する際にに許容できるモデルマッチング制御の不完全性の度合いと車車間通信遅れの度合いを明らかにした。

第6章では、自動運転制御で利用するための十分な精度とリアルタイム性を有する絶対位置情報の獲得手法として、DGPSと車両運動状態量を利用した絶対位置推定手法を提案し、その有効性を確認した。提案した絶対位置推定手法は、絶対位置情報を自動運転システムへ利用する展望を与えるものであると考える。たとえば、磁気ネイル等の路上マーカが敷設されていない道路での自動運転、車両同士の絶対位置情報の交換によるプラトウーンの合流・離脱の制御、インフラと車両の絶対位置情報の交換によるインフラによる車両監視や車両制御、ナビゲーションシステムとの融合などの応用が可能である。この章で明らかにしたことをまとめると以下ようになる。

- ・DGPSからの絶対位置情報を車両運動制御で利用する際の問題点として、精度、遅れ、サンプル周期の問題があることを明らかにした。
- ・車両運動状態量をシステムパラメータとした、非定常カルマンフィルタを提案し、これにより、DGPSの計測精度を向上と車両方位角の推定が実現できることを明らかにした。
- ・車両運動状態量を利用した短サンプル周期のデッドレコニングにより、DGPSからの絶対位置情報の遅れを補償とサンプル周期を補間を行う方法を提案した。
- ・上記2項目を組み合わせた、絶対位置の推定手法を提案し、これにより、高精度かつリアルタイムな絶対位置情報が獲得できることを、シミュレーションおよび実験により明らかにした。

第7章では、非隣接かつ全方向の車両の相対位置の検出手法として、DGPSと車車間通信を利用した周囲車両の相対位置計測手法を提案し、その有効性を確認した。この章で提案した相対位置計測手法により、非隣接かつ全方向の車両の相対位置情報を獲得することが可能となる。この手法で獲得した相対位置情報は、プラトウーン走行における合流や離脱の効率化を実現する重要な要素となる。また、この手法で獲得した相対位置情報は、合流・離脱制御以外にも、車両追従制御、センサの冗長化等に応用するために十分な精度とリアルタイム性を有するものである。この章で明らかにしたことをまとめると以下ようになる。

- ・DGPSと車車間通信を利用した相対位置計測手法に関する複数の方式を検討し、各

方式の利点、問題点を明らかにした。

- ・DGPSと車両運動状態量を利用した絶対位置推定アルゴリズムによる、短サンプル周期、リアルタイム（遅れない）そして高精度な相対位置計測手法を提案した。
- ・実車実験によって提案する相対位置計測手法の有効性を明らかにした。

第8章では、DGPSを利用した絶対位置情報の車両運動制御への適用として、目標コースに追従するための横方向制御（操舵制御）を提案し、その有効性を確認した。この章で提案した横方向制御の特徴は、目標コースがソフトウェアで記述されている点である。この特徴のために、従来提案された地点追従制御では困難であった、安価な自動運転システムの構築、ナビゲーションと車両運動制御の融合、冗長系の構築、車線変更や進路変更の制御の容易化などを容易に実現することができる。また、道路インフラからの指令に基づき目標コースの情報を変更することにより、道路工事現場における車線変更や、故障車、事故車の回避等が容易に実現することも可能となる。この章で明らかにしたことをまとめると以下ようになる。

- ・追従対象として、実際の道路や先行車ではなく、データとして記述された目標コースに追従する手法を提案し、目標コースデータの記述法を提案した。
- ・目標コースに追従するための操舵制御アルゴリズムを提案し、その有効性をシミュレーションおよび実車実験により明らかにした。
- ・第6章で提案した絶対位置の推定手法が、車両運動制御に有効であることを明らかにした。

第9章では、絶対位置情報に基づく横方向制御の応用として、路車間通信を利用した障害物回避制御を提案し、その有効性を確認した。この章で提案した障害物回避制御は、第8章で提案した横方向制御の特徴である目標コースがソフトウェアで記述されている点を活かしたものがある。その意味で、この制御は、第8章の横方制御のアプリケーションの一つと考えることができる。提案した障害物回避制御により、自動運転システムの信頼性の向上や、道路工事等の道路保守の容易化等を実現することができる。また、この制御は道路インフラが車両への情報提供のみならず、運動制御に介入するための基礎技術としての意義をもつ。この章で明らかにしたことをまとめると以下ようになる。

- ・障害物回避制御を行う際に道路インフラ車両に与えるべき情報を明確にした。
- ・道路インフラからの情報に基づき、障害物回避のための目標コースを自動生成する手法を提案した。
- ・道路インフラからの情報に基づき、障害物回避のための目標コースを自動生成し、それに追従することで障害物を回避する制御を提案した。
- ・実験により提案する障害物回避制御の有効性を明らかにした。

第10章では、プラトゥーンの挙動を決定するためのプラトゥーンのタスク制御を提案した。この制御は、プラトゥーンレベルでの制御によるインフラとの協調、合流、離脱等により、交通容量の拡大、交通流の安定化を実現するものである。この結果として、車両の加減速の減少、燃料消費率の向上、排出ガスの減少等も実現できる。この章では、プラトゥーンが定常走行、合流、離脱およびインフラとの協調を行うためのタスク制御を提案するだけに留まらず、具体的な通信手続き等についても提案した。この章で明らかにしたことをまとめると以下になる。

- ・プラトゥーン形態と交通容量の関係の定式化を行った
- ・高交通容量を実現するプラトゥーン形態を提案した
- ・プラトゥーンの挙動制御を実現するための車車間、路車間通信内容および通信手続きを明確にした。
- ・定常走行時のプラトゥーンの挙動制御を提案した。
- ・インフラから情報に基づくプラトゥーンの挙動制御を提案した
- ・合流時・離脱時のプラトゥーンの挙動制御を提案した

第11章では、提案する制御システムの有効性を確認することを目的として、提案する制御システムを運用した場合に、交通流、全体的な燃料消費、加減速等にどのような影響を与えるかを巨視的な解析により評価した。車両単位のダイナミクスおよび制御システム、車車間および路車間通信システムをモデル化したシミュレーションモデルを構築して、提案する制御システム、従来の制御システム、自律走行システムを比較した。シミュレーションでは、定常走行時、合流・離脱時、渋滞発生時における、交通容量、平均速度、加減速度、燃料消費量等を評価した。

- ・定常走行においては、プラトゥーンを形成する制御システムでは、1車線あたり最大10000[台/h]程度(手動運転の5倍程度)、自律走行システムでは3000[台/h]の最大交通容量を実現できることを示し、プラトゥーンを形成することで、飛躍的に大きな交通容量を実現できることを明らかにした。
- ・合流・離脱において、交通量が少ない場合(交通量が3000[台/h]程度以下の場合)は制御システムによる大きな差異はないことを明らかにした。
- ・合流において、交通量が多い場合(合流後の交通量が3000[台/h]程度以上の場合)では、合流条件によっては従来の制御システムでは、合流部分の速度が低下し、合流が不可能(合流部分の交通容量が、流入する車両の交通量未満になる)になることを明らかにした。すなわち、定常走行で10000[台/h]の交通容量を実現できても、高交通量における合流が不可能であるため、実際に実現できる交通容量が10000[台/h]を大きく下回る可能性があることを明らかにした。
- ・提案する制御システムでは、合流条件によらず、合流部分の速度を低下することなく、短時間で合流できることを明らかにした。また、合流条件による加減速量、合流時間、平均速度、燃料消費量の変化がほとんどなく、平均速度と燃料消費量に

においては、定常走行における値とほぼ変わらないこと明らかにした。

- ・ 離脱において、交通量が多くかつ離脱車の割合が多い場合では、離脱条件によっては従来の制御システムでは、プラトゥーンの分割により離脱部分付近の速度が低下し、離脱が不可能（離脱部分の交通容量が、流入する車両の交通量未満になる）になることを明らかにした。
- ・ 提案する制御システムでは、離脱条件によらず、離脱部分付近の速度が低下せず、加減速量、燃料消費量においても、定常走行における値とほぼ変わらないこと明らかにした。
- ・ 交通流が乱れた後の交通流の回復については、提案するシステムで最も早く、自律走行システムで最も遅いことを明らかにした。
- ・ 提案する制御システムでは、交通流が乱れによる加減速量を小さく抑え、かつ迅速に交通流を安定化できるため、交通流の乱れに伴う、全体的な、燃料消費量や加減速量が一番少ないことを明らかにした。
- ・ 上記より、プラトゥーンのレベルの制御が、プラトゥーン走行の効率を向上し、かつ交通流の安定化、乗り心地の向上、燃料消費量の低減を同時に実現できることを明らかにした。すなわち、提案する制御システムの有効性を明らかにした。

以上が、本研究で得られた知見である。これらの知見が、今後の ITS 技術の発展に何らかのかたちで寄与することができれば幸いである。

12.2 今後の課題と提案

自動車の自動運転システムの実現のためには、技術的課題、非技術的課題ともに数多くの問題が残っている。以下では、これらの課題のいくつかについて簡単に述べ、最後に、自動運転システムの理論的基礎を構築する上で重要な課題と考えているヒューマンファクターの課題についての意見を述べる。

技術的課題としては、システムの信頼性、耐環境性、耐久性の課題がある。自動車の場合は、1台の自動車のシステム故障の影響が、周囲（主に後続）の自動車に伝播し、交通流全体に影響をおよぼす可能性もある。また、自動車のシステム故障の影響が、搭乗者の死に直結する可能性が高い。実際にシステムを運用する際には、航空機のように多重系のセンサおよび制御システムにより冗長化することで、システムの信頼性、耐環境性、耐久性を向上することが考えられる。当然システムを冗長化すればするほど車両1台あたりのコストが大きくなる。システムが所望の信頼性、耐環境性、耐久性を獲得するために必要な冗長化の度合いを明確にする必要がある。また、複数のセンサによるセンサフュージョン、車載機器のステータスに応じた制御モードの変更等のあり方を明確にする必要がある。さらに、故障が生じた場合のフェールセーフのあり方についても十分な検討と有効性の確認が必要である。

技術的課題のもう1つとして、自動運転システムの実現方法の問題がある。自動運転システムは、いきなり実現できるものではなく、段階的に実現していくものである。本研究では、最終的な自動運転システムのあり方の1つを提案したことになる。現在、日本ではITSの段階的な発展の第1段階として、AHS-i(情報提供サービス)の実現に向けて研究が進められている。将来はさらに何段階を経て少しずつITSが成熟していくであろう。この過程の中でどのような形で、自動運転システムを発展させていくべきか、自動運転システムのゴールを明確した上で慎重な検討が必要であると考えている。

非技術的課題としては、事故責任の問題、システムに対するドライバの過信や緊張の低下の問題、車両とインフラの役割分担の問題、ドライバと社会の受容性の問題など様々な課題が残っている。また、自動車交通の諸問題に対する抜本的な解決手段として、自動車交通自体をなくしてしまうことも1つの選択肢である。そこまで極端ではなくても、モータリシフトや都市計画のあり方を工夫すれば、自動車交通への依存度を小さく抑えることが可能となるかもしれない。ITSおよび自動運転システムの大きな目標はもちろん自動車交通の諸問題の解決であるが、その背景は、自動車の汚名(交通事故や大気汚染等の元凶としての)をぬぐい、かつ自動車の利用を促進することである。自動車交通の諸問題に対する本当の解決に取り組むためには、自動車の利用という前提にとらわれず、自動車交通の諸問題を解決しうる様々な手段との融合を考えていくべきであろう。

最後に、自動運転システムの理論的基礎を確立する上で重要な課題と考えているヒューマンファクターの課題についての意見を述べる。従来の自動運転制御に関する研究成果を見ると、高密度な走行、高精度な車線追従を実現するための制御系が数多く提案され、有効性が確認されている。しかし、手動運転と自動運転の切り替え時におけるドライバ挙動や、自動運転時のドライバ挙動に関しては十分な成果が出ていない。たとえば、プラトーン走行などの高密度走行から、手動運転に切り替わる際のドライバの対応は重要な問題であるにもかかわらず、その問題に対する知見がほとんど得られていない。また、従来提案されてきた自動運転システムは、電子機械システムに精通していない人や高齢者に容易に受け入れられるものであるとはいいがたい。これらの大きな原因は、本研究も含め、従来の研究では、制御対象として操舵システム、制駆動システムといった車両ハードウェアのみを対象としてきたことである。ドライバの要素を考慮した研究も存在するが、その場合も、ドライバに違和感を与えないことや、乗り心地を向上することが対象となっている。ヒューマンファクターの課題に取り組むためには、システムがドライバに与える影響を考慮するだけでなく、ドライバがシステムに与える影響を考慮にいれた制御システムとインターフェースの設計が不可欠である。自動車は航空機と異なり、ドライバは熟練したパイロットではない。若年者から高齢者、男女を問わずさまざまな人間がドライバとしての資格を有する。また、ドライバのほとんど全てが、自動運転システムのハードウェアや制御方式を理解していないことを想定しなければならない。ドライバの予想もつかないような挙動に対して、システムがどのように対応するべきか、十分な検討の上、制御システ

ムの設計を行う必要がある。また、長時間にわたる自動運転の後に手動運転に切り替えた場合に、ドライバが安全に運転を引き継ぐことができるか、引き継ぎの際にシステムはどのように対応するべきか等の検討が必要である。以下では、このようなヒューマンファクターの課題に対するアプローチとして、筆者の意見を述べる。この課題に対するアプローチとして、車両ハードウェアの加え、ドライバ自体も制御対象として扱うことを提案する。大雑把に言う、システムが「ドライバ」を「不可侵の監督者」ではなく「出来の悪いアクチュエータ」として扱う。システムがドライバに対して適切な入力を与えることでドライバをコントロールする。ここで言う入力とは、文字や音声情報だけでなく、操舵トルクや、椅子をゆらす、電気ショックを与えるなど様々なものを含んでいる。制御対象（ドライバ）からの出力は、操舵やアクセル、ブレーキを踏む動作、スイッチ操作等である。また制御対象（ドライバ）のパラメータは運転能力、覚醒度、意思等である。システムは制御対象（ドライバ）からの出力をフィードバックすることで、制御対象（ドライバ）のパラメータを推定や、車両運動への反映を行う。また不測のドライバ挙動に対しては、簡単にドライバにオーバーライドさせず、場合によって、ノイズとして扱って処理する。自動運転から手動運転に切り替える際も、制御対象（ドライバ）の運転能力を適切に推定しながら、適切に入力を与えドライバをコントロールし、徐々に制御主体のウェイトを変化させる。このような視点から、制御システムを設計すれば、ある程度見通しよくヒューマンファクターの課題に立ち向かうことができるのではないかと考えている。もちろん、このようなシステムを構築する場合、システムの信頼性がほぼ100%であることが前提となる。自動運転システムが、老若男女を問わず広く利用されるためには、事故時にシステムが全て責任をとるぐらいの覚悟が必要であると考えている。

参考文献

- [1] 道路交通自動化システム調査専門委員会: 道路交通自動化システム, 電気学会技術報告, No. 636, (1997).
- [2] 常田賢一, 田宮佳代子, 石倉丈士: 輸送・道路・交通, 自動車技術, Vol.53, No.8, (1999), pp.166-172.
- [3] 高橋敏夫: 自動車と環境, 自動車技術, Vol.53, No.8, (1999), pp.24-26.
- [4] 入江 誠: 自動車と安全, 自動車技術, Vol.53, No.8, (1999), pp.31-34.
- [5] 河上清峯, 後藤武志, 清水 忠: 自動車と安全, 自動車技術, Vol.52, No.8, (1998), pp.22-25.
- [6] Petros A. Ioannou: Automated Highway Systems, Plenum Press, (1997).
- [7] Christopher Nwagboso: Advanced Vehicle and Infrastructure Systems, John Wiley & Sons, (1997).
- [8] 津川定之: 高度道路交通システム概論, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.3, (1999), pp.312-320.
- [9] Steven E. Shladover: Selection of Concepts for Automated Highway Systems (AHS), Proceedings of the Third World Congress on Intelligent Transport System, (1996).
- [10] Steven E. Shladover: Recent Steps Forward in Path Research on Advanced Vehicle Control Systems (AVCS), Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport System, (1995), pp.2520-2529.
- [11] Steven E. Shladover: Review of the State of Development of Advanced Vehicle Control Systems (AVCS), Vehicle System Dynamics, Vol.24, No6-7, (1995), pp.551-595.
- [12] T. Fujioka, K. Suzuki: Control of Longitudinal and Lateral Platoon Using Sliding Control, Vehicle System Dynamics, Vol.23, No.8, (1994), pp.647-664.
- [13] T. Fujioka, M. Aso, J. Baba: Comparison of Sliding and PID Control for Longitudinal Automated Platooning, Future Transportation Technology Conference and Exposition, (1995), pp.61-67.
- [14] 藤岡健彦, 馬場 純: 自動運転制御システムに関する研究 (Sliding ControlとPID Control), 自動車技術会論文集, Vol.28, No.1, (1997), pp.101-106.

- [15] 藤岡健彦, 村松孝治, 麻生 誠: シミュレータを用いた自動運転環境におけるドライバ挙動に関する研究 (緊急時におけるドライバの挙動), 自動車技術会論文集, Vol. 28, No. 4, (1997), pp. 135-139.
- [16] 藤岡健彦, 伏木 匠: トラフィックシミュレータの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 963, (1996), pp. 217-220.
- [17] 藤岡健彦, 麻生 誠, 大前 学: 自動車の自動運転における縦方向制御に関する研究, 第9回 ADVANTY Symposium 講演論文集, (1996), pp. 25-28.
- [18] 藤岡健彦, 麻生 誠: 車々間通信を用いた自動車の自動運転における縦方向制御に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol. 28, No. 3, (1997), pp. 143-147.
- [19] 藤岡健彦, 大前 学: ラテラルプラトウニングの制御方式に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol. 28, No. 2, (1997), pp. 109-114.
- [20] T. Fujioka, M. Omae: Vehicle Following Control in Lateral Direction for Platooning, Vehicle System Dynamics Supplement, Vol. 28, (1998), pp. 422-437.
- [21] 藤岡健彦, 山之内寅彦: カルマンフィルタによる車両位置計測精度の向上, 自動車技術会論文集, Vol. 29, No. 3, (1998), pp. 123-127.
- [22] 藤岡健彦, 三宅浩四郎: ベトリネットによる自動運転のモデル化に関する研究 (車々間通信のモデル化), 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 982, (1998), pp. 243-246.
- [23] 藤岡健彦, 伏木 匠: DMTのトラフィックシミュレータ, 日本機械学会第6回交通・物流部門大会講演論文集, No. 97-12, (1997), pp. 143-146.
- [24] T. Fujioka, Y. Shirano, A. Matsushita: Driver's Behavior under Steering Assist Control System, Proceedings of IEEE/IEEJ/JSAE International Conference on Intelligent Transportation Systems, (1999), pp. 246-251.
- [25] John Lygeros, Datta Godbole, Mireille Broucke: Towards a Fault Tolerant AHS Design, SAE Transaction 1995, (1995), pp. 2644-2663.
- [26] Wei-Bin Zhang: Minimum Reliability Requirements on Automated Vehicles for a Safe and Reasonably Efficient Automated Highway System, Proceedings of the Third World Congress on Intelligent Transport System, (1996).
- [27] Masayoshi Tomizuka: Advanced Vehicle Control Systems (AVCS) Research for Automated Highway Systems in California Path, 1994 Vehicle Navigation & Information System Conference Proceedings, (1994), Plenary 41-45.

- [28]Charmaine Toy, Kelvin Leung, Luis Alvarez, Roberto Horowitz: Emergency Vehicle Maneuvers and Control Laws for Automated Highway Systems, Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division 1998, DSC-Vol.64, (1998), pp.705-712.
- [29]Toy Charmine, Alvarez Luis, Horowitz Roberto: A Traffic Flow Controller for Non-Stationary Velocity Profiles on Automated Highways, Proceedings of 1999 American Control Conference, (1999).
- [30]Chi-Ying Liang, Huei Peng: Optimal Adaptive Cruise Control with Guaranteed String Stability, Proceedings of 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control 1998, (1998), pp.717-722.
- [31]Rajesh Rajamani, Seibum B. Choi, J. Karl Hedrick, Boon Law, Robert Prohaska, Paul Kretz: Design and Experimental Implementation of Control for a Platoon of Automated Vehicles, Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division 1998, DSC-Vol.64, (1998), pp.681-690.
- [32]D. Swaroop, J. K. Hedrick, C. C. Chien, P. Ioannou: A Comparison of Spacing and Headway Control Laws for Automatically Controlled Vehicles, Vehicle System Dynamics, Vol.23, No.8, (1994), pp.597-625.
- [33]H. Raza, P. Ioannou: Macroscopic Analysis of Traffic Flow of Automated Vehicle, Advances in Intelligent Transportation System Design, SAE Sp-1285, Paper No.972655, (1997), pp.25-34.
- [34]小久保哲志, 吉本堅一: 自動運転アルゴリズムの交通流に与える影響, 1996年自動車技術会学術講演会前刷集, No.964, (1996), pp.53-56.
- [35]Satoshi Tange, Hiroshi Mouri: An Investigation of Automatic Car Following, Proceedings of 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control 1998, (1998), pp.711-715
- [36]Dragos B. Maciucă, J. Christian Gerdes, J. Karl Hedrick: Automatic Braking Control for IVHS, Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1994, Paper No. 9438592, (1994), pp.396-401.
- [37]Diana Yanakiev, Ioannis Kanellakopoulos: Speed Tracking and Vehicle Follower Control Design for Heavy-Duty Vehicles, Vehicle System Dynamics, Vol.25, No.4, (1996), pp.251-276.
- [38]野波健蔵, 田 宏奇: スライディングモード制御, コロナ社, (1994)
- [39]伊藤敏夫, 荒木秀夫: 追突防止技術, 計測と制御, 第36巻, 第3号, (1997), pp.187-189.

- [40] 見市善紀, 御室哲志, 前村高広, 井上紀夫: 三菱予防安全ASVにおける衝突回避システムの開発, 日本機械学会第5回交通・物流部門大会講演論文集, No.96-51, (1996), pp.427-429.
- [41] 松田庄平, 菊池隼人: 衝突回避技術, 計測と制御, 第36巻, 第3号, (1997), pp.193-195.
- [42] Yunshan Zhou, Rogben Wang, Xiaojuan An, Shuhui Zhou: A Control Strategy for AGVs to Stop at the Specified Location. Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1996, Vol.2, (1996), pp.1343-1350.
- [43] M. Tomizuka, J. K. Hedrick: Automated Vehicle Control for IVHS Systems, the 1993 IfAC Conference, (1993).
- [44] Hung Pham, Karl Hedrick, Masayoshi Tomizuka: Autonomous Steering and Cruise Control of Automobiles via Sliding Mode Control, Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1994, Paper No. 9438673, (1994), pp.444-448.
- [45] Hideaki Inoue, Hiroshi Mouri, Hiroshi Sato, Akira Asaoka, Satoshi Ueda: Technologies of Nissan's AHS Test Vehicle, Proceedings of the Third World Congress on Intelligent Transport System, (1996).
- [46] 橋 彰英, 青木啓二, 美尾昌宏: インフラ協調型自動運転システム, 日本機械学会第5回交通・物流部門大会講演論文集, No.96-51, (1996), pp.243-246.
- [47] Masahiro Mio, Akihide Tachibana, Keiji Aoki, Makoto Nishida: Platoon System Based on Optical Inter-Vehicle Communication, Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport System, (1995), pp.1272-1277.
- [48] Pascal Daviet, Michel Parent: Longitudinal and Lateral Servoing of Vehicle in a Platoon. Proceedings of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, (1996), pp.41-46.
- [49] Juergen Seuss, Jobst Richert: Control Structures for Vehicle Convoy Driving. Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1996, Vol.2, (1996), pp.1277-1292.
- [50] 古川 修, 飯星 明, 上田 敏: 車々間通信を用いたプラトーン走行の予見制御方法, 日本機械学会第5回交通・物流部門大会講演論文集, No.96-51, (1996), pp.239-242.
- [51] Taketoshi Kawabe, Masanori Kobayashi, Souichi Nakabayashi, Ikurou Notsu, Yoshito Watanabe: A Concept of Car in a Virtual Moving Cell Platoon Construction on an Automated Highway System, Proceedings of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, (1996), pp.397-402.

- [52]Sridhar Seshagiri, Hassan K. Khalil: Longitudinal Adaptive Control of a Platoon of Vehicles. Proceedings of 1999 American Control Conference, (1999).
- [53]Chi-Ying Liang, Huei Peng: Design and Simulations of a Traffic-Friendly Adaptive Cruise Control Algorithm. Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division 1998, DSC-Vol.64, (1998), pp.713-720.
- [54]Hans Fritz: Model-Based Neural Distance Control for Autonomous Road Vehicle. Proceedings of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, (1996), pp.29-34.
- [55]Luigi Gortan, Pandeli Borodani, Paola Carrea: Fuzzy Logic Employed in an Autonomous ICC Vehicle. IVHS and Advanced Transportation Systems, SAE Sp-1076 Paper No.950472, (1995), pp. 9-18.
- [56]Joachim Schielen, Walter Schwertberger: Adaptive Cruise Control for Coaches. Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1996, Vol.2, (1996), pp.1351-1365.
- [57]Kenich Yoshimoto, Hideaki Tanabe, Miki Tanaka: Speed Control Algorithm for an Automated Driving Vehicle. Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1994, Paper No. 9438619, (1994), pp.408-413.
- [58]西山康宏: 追従制御技術, 計測と制御, 第36巻, 第3号, (1997), pp.184-186.
- [59]飯島徹也, 江川健一, 浅田哲也, 橋詰武徳, 加藤裕介, 溝口和貴, 山村智弘: ブレーキ制御付ACCの開発, 1999年自動車技術会学術講演会前刷集, No.114-99, (1999), pp.1-4.
- [60]東又 章, 安達和孝, 橋詰武徳, 田家 智: ブレーキ制御付ACCの車間距離制御系の設計, 1999年自動車技術会学術講演会前刷集, No.114-99, (1999), pp.5-8.
- [61]藤田泰彦, 菊地隼人, 荻野茂典, 大崎正滋: インテリジェントハイウェイクルーズコントロール (IHCC) の開発, 1999年自動車技術会学術講演会前刷集, No.114-99, (1999), pp.13-16.
- [62]Arnab Bose, Petros A. Ioannou: Analysis of Traffic Flow With Mixed Manual and Semi-Automated Vehicle. Proceedings of 1999 American Control Conference, (1999).
- [63]Paul Fancher, Zevi Bareket: the Influence of Intelligent Cruise Control Systems on Traffic Flow. Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1994, Paper No. 9438600, (1994), pp.402-407.

- [64]D. Swaroop, Charles D. Rizzuti, J. Karl Hedrick: Limitations of Alternative Platoon Control Strategies for IVHS, Transportation Systems ASME 1994, Dsc-Vol.54/De-Vol.76, (1994), pp.243-257.
- [65]Yean-Tzong Yang, Benson H. Tongue: A New Control Approach for Platoon Operations During Vehicle Exit/Entry, Vehicle System Dynamics, Vol.25, No.4, (1996), pp.305-319.
- [66]阪口 健, 宇野篤也, 津川定之: 車々間通信を用いた高速道路における合流-シミュレーションによる考察-, 第10回 ADVANTY Symposium 講演論文集, (1997), pp.75-78.
- [67]Jonathan Frankel, Luis Alvarez, Roberto Horowitz Perry Li: Safety Oriented Maneuvers for IVHS, Vehicle System Dynamics, Vol.26, No.4, (1996), pp.271-299.
- [68]Luis Alvarez, Roberto Horowitz: Safe Platooning in Automated Highway Systems Part I: Safety Regions Design, Vehicle System Dynamics, Vol.32, No.1, (1999), pp.23-55.
- [69]Luis Alvarez, Roberto Horowitz: Safe Platooning in Automated Highway Systems Part II: Velocity Tracking Controller, Vehicle System Dynamics, Vol.32, No.1, (1999), pp.57-84.
- [70]Ming L. Kuang, Michael Fodor, D. Hrovat, M. Tran: Hydraulic Brake System Modeling and Control for Active Control of Vehicle Dynamics, Proceedings of 1999 American Control Conference, (1999).
- [71]J Christian Gerdes, J Karl Hedrick: Hysteresis Control of Nonlinear Single Acting Actuators as Applied to Brake / Throttle Switching, Proceedings of 1999 American Control Conference, (1999).
- [72]Mike Bauer, Masayoshi Tomizuka: Fuzzy Logic Traction Controllers and Their Effect on Longitudinal Vehicle Platoon Systems, Vehicle System Dynamics, Vol.25, No.4, (1996), pp.277-303.
- [73]Huei Peng, Weibin Zhang, Steven Shladover, Masayoshi Tomizuka: Magnetic-Marker-Based Lane Keeping: A Robustness Experimental Study, SAE Transaction 1993, SAE Paper No. 930556, (1993), pp.750-755.
- [74]Unit Ozguner, Sergey Drakunov, Jonathan Young, Lee Henderson: Combine Longitudinal and Lateral Controller Design for a Vehicle With Radar Sensors, IVHS and Advanced Transportation Systems, SAE Sp-1076 Paper No.951009, (1995), pp.51-57.

- [75] P. Borodani, P. Carrea, L. Gortan: Short Headway Control for Trucks on Motorways: the CHAUFFEUR Project, Proceedings of the Fourth World Congress on Intelligent Transport System, (1997).
- [76] 美多 勉: H_{∞} 制御, 昭晃堂, (1994).
- [77] 早勢 実: H_{∞} 制御入門, オーム社, (1996).
- [78] M. Tai, M. Tomizuka: Dynamic Modeling of Multi-Unit Heavy Vehicles, Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division 1998, DSC-Vol.64, (1998), pp.673-680.
- [79] Dirk E. Smith, John M. Starkey: Effects of Model Complexity on the Performance of Automated Vehicle Steering Controllers: Controller Development and Evaluation, Vehicle System Dynamics, Vol.23, No.8, (1994), pp.627-645.
- [80] Satyajit Patwardhan, Masayoshi Tomizuka: Feedforward Controller Design Using Nonlinear Model Inversion for Automobile Tire Burst, Transportation Systems ASME 1994, DSC-Vol.54/De-Vol.76, (1994), pp.259-264.
- [81] 福村友博, 岩田徹, 村上晃清: TCS (トラクション・コントロール・システム) の最適化手法の検討 - および車両挙動制御装置への展開 -, 1996年自動車技術会学術講演会前刷集, No.964, (1996), pp.73-76.
- [82] 小野英一, 細江繁幸: 自動車操舵系のロバスト制御 (非線形 H_{∞} 状態フィードバックによるロバスト安定化), 計測自動制御学会論文集, Vol.30, No.4, (1994), pp.443-451.
- [83] 林 靖享, 土井俊一, 服部勝彦, 荒川英男: 車両のアクティブ制御 (操舵・懸架系制御), 計測自動制御学会論文集, Vol.28, No.7, (1992), pp.834-843.
- [84] 岩間紀男, 稲熊幸雄, 浅野勝宏, 天野也寸志, 荒川俊史, 林 靖享: 車両のアクティブ制御 - 後輪トルク独立制御 -, 計測自動制御学会論文集, Vol.28, No.7, (1992), pp.844-853.
- [85] 永井正夫, 山中幸子, 斎藤安弘, 平野 豊: 後輪操舵と駆動力配分の統合制御の研究, 1997年自動車技術会学術講演会前刷集, No.972, (1997), pp.29-32.
- [86] 古川 修, 安部正人: タイヤの横力モニタリングによる車両運動制御, 1997年自動車技術会学術講演会前刷集, No.972, (1997), pp.25-28.
- [87] 飛松克英, 原田正範, 原田宏: 悪路旋回時における車両の安定性向上, 日本機械学会第6回交通・物流部門大会講演論文集, No.97-12, (1997), pp.99-102.

- [88]Shinji Tanizaki, Toshihiko Yamanaka: the Effect of Active Rear Steer System, Proceedings of 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control 1998, Paper No. 9836419, (1998), pp.87-92.
- [89]Mark Depoorter, Sean Brennan, Andrew Alleyne: Driver Assisted Control Strategies: Theory and Experiment, Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division 1998, DSC-Vol.64, (1998), pp.721-728.
- [90]Sean Brennan, Andrew G. Alleyne: Driver Assisted Yaw Rate Control, Proceedings of 1999 American Control Conference.
- [91]津村俊弘, 小松信雄, 山脇信二: 相対位置情報に基づく同軸制御について, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, (1991).
- [92]三平満司, 小林忠晴: 非線形制御理論を用いた自動車型けん引車両の経路追従制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.30, No4, (1994), pp.427-434.
- [93]前田幹夫, 前田 靖, 村上周太: 知能ロボットのファジィ走行制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.28, No.10, (1992), pp.1231-1240.
- [94]津村俊弘, 大久保博志, 小松信雄, 何 強輝: 車両間通信を用いた複数車両の同軸走行制御に関する研究, 第35回システム情報学会研究発表講演会, (1991), pp.347-348.
- [95]藤原直史, 松川和史, 利谷 一: 画像情報を利用した移動体の自動追尾走行, 第7回 ADVANTY Symposium 講演論文集, (1994), pp.25-28.
- [96]Yoich Iwata, Masahiro Mio, Akira Ohata: Parking Control Based on Nonlinear Trajectory Control, Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1992, Paper No. 923037, (1992), pp.200-205.
- [97]Antonio Moran, Masao Nagai: Autonomous Parking of Vehicles With Intelligent Fuzzy-Neural Networks, Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1994, Paper No. 9438385, (1994), pp.270-275.
- [98]Igor E. Paromtchik, Christian Laugier: Autonomous Parallel Parking of Nonholonomic Vehicle, Proceedings of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, (1996), pp.13-18.
- [99]Akihide Tachibana, Keiji Aoki, Hiroshi Tominaga: the Lateral Control Strategy on Magnetic Nail Based AHS Lane, Proceedings of the Third World Congress on Intelligent Transport System, (1996).
- [100]毛利 宏, 古性裕之: LQ制御を用いた車線の自動追従走行の検討(第1報: 直線走行時の制御について), 1997年自動車技術会学術講演会前刷集, No.972, (1997), pp.45-48.

- [101] 古性裕之, 毛利 宏: LQ制御を用いた車線の自動追従走行の検討(第2報: 曲線走行時の制御について), 1997年自動車技術会学術講演会前刷集, No.972, (1997), pp.49-52.
- [102] Edward H. M. Lim, J. Karl Hedrick: Lateral and Longitudinal Vehicle Control Coupling for Automated Vehicle Operation, Proceedings of 1999 American Control Conference, (1999).
- [103] Ty A. Lasky, Bahram Ravani: Lateral Vehicle Control for AHS Using a Laser Sensor, Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport System, (1995), pp.1082-1087.
- [104] Juergen Guldner, Han-Shue Tan, Satyajit Patwardhan: Analysis of Automatic Steering Control for Highway Vehicles With Look-Down Lateral Reference System, Vehicle System Dynamics, Vol.26, No.4, (1996), pp.243-269.
- [105] 丸茂喜高, 毛利 宏, 鎌田崇義, 永井正夫: ロバスト制御による自動車線追従制御, 日本機械学会第7回交通・物流部門大会講演論文集, No.98-37, (1998), pp.135-138.
- [106] 橘 彰英, 青木啓二, 鈴木敏彦: コンピュータビジョンによる自動運転システム-白線検出による車両制御法-, 1992年自動車技術会学術講演会前刷集, No.924, (1992), pp.157-160.
- [107] Chieh Chen, Han-Shue Tan: Experimental Study on Dynamic Look Ahead Scheme for Vehicle Steering Control, Proceedings of 1999 American Control Conference, (1999).
- [108] 丸茂喜高, 毛利 宏, 王 玉清, 鎌田崇義, 永井正夫: 仮想点レギュレータを用いた自動車線追従走行の検討, 1999年自動車技術会学術講演会前刷集, No.114-99, (1999), pp.21-24.
- [109] 田島淳, 柚原直弘, 飯島朋子, 浅沼信吉, 石田真之介: 前方画像を用いたレーンキーピングシステムの研究, 日本機械学会第6回交通・物流部門大会講演論文集, No.97-12, (1997), pp.185-188.
- [110] Soon-Hwan Moon, Chai-Won Kim, Min-Hong Han: Navigation Control for an Autonomous Road Vehicle Using Neural Network, Proceedings of the Third World Congress on Intelligent Transport System, (1996).
- [111] Akihiko Shimura, Kazuo Yoshida: Steering Control for Car Cornering By Means of Learning Using Neural Network and Genetic Algorithm, Proceedings of 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control 1998, Paper No. 9836392, (1998), pp.81-85.

- [112]加藤 晋, 富田康治, 津川定之: レーンマークに沿ったビークルのラテラル制御, 第10回 ADVANTY Symposium 講演論文集, (1997), pp.59-62.
- [113]U. N. Petersen, A. Ruekugauer, W. O. Schiehlen: Lateral Control of a Convoy Vehicle System, Proceedings of the IAVSD Symposium, (1996).
- [114]M. Mitschke: Driver-Vehicle-Lateral Dynamics under Regular Driving Conditions, Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1992, Paper No. 923089, (1992), pp.499-511.
- [115]羽田昌敏, 天野也寸志, 土井俊一: コース追従時のドライバの予測時間に関する検討, 日本機械学会第74期全国大会講演論文集, No.96-15, (1996), pp.413-414.
- [116]Akinori Horiguch, Takamasa Suetomi: A Study on the Human Perception of Yaw Motion Using the Driving Simulator, Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1992, Paper No. 923086, (1992), pp.481-486.
- [117]K. Yoshimoto, T. Suetomi, H. Sakata: Development of Driver Behavior Model Using a Driving Simulator, Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1992, Paper No. 923087, (1992), pp.487-492.
- [118]Liang-Kuang Chen, A. Galip Ulsoy: Driver Model Uncertainty, Proceedings of 1999 American Control Conference.
- [119]景山一郎, 佐々木智秋: 人間の操縦動作を模擬した自動操縦車両用制御アルゴリズム, 日本機械学会第6回交通・物流部門大会講演論文集, No.97-12, (1997), pp.115-118.
- [120]Ken-Ich Yoshimoto, Hideki Ogawa, Hiroshi Kubota: A Course Tracking Control Algorithm Using Visual Information, Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1996, Vol.2, (1996), pp.1305-1320.
- [121]押上勝憲, 保坂明夫, 服部 彰, 谷口正明, 中野栄二: パッセンジャーフレンドリーな自律走行車の研究, 1992年自動車技術会学術講演会前刷集, No.924, (1992), pp.165-168.
- [122]Saied Mammar: H ∞ Robust Automatic Steering of a Vehicle, Proceedings of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, (1996), pp.19-24.
- [123]Jeng-Yu Wang, Masayoshi Tomizuka: Robust H ∞ Lateral Control of Heavy-Duty Vehicles in Automated Highway System, Proceedings of 1999 American Control Conference, (1999).

- [124]Jeng-Yu Wang, Masayoshi Tomizuka: Analysis and Controller Design Based on Linear Model for Heavy-Duty Vehicles, Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division 1998, DSC-Vol.64, (1998), pp.729-736.
- [125]Said Mammar: Robust Reduced Order Two-Degree-of-Freedom Tractor-Semitrailer Lateral Control, Proceedings of 1999 American Control Conference, (1999).
- [126]Wonshik Chee, Masayosi Tomizuka: Lane Change Maneuver for AHS Application, Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1994, Paper No. 9438637, (1994), pp.420-425.
- [127]Zvi Shiller, Satish Sunder: Emergency Maneuvers for AHS Vehicles, SAE Transaction 1995, Paper No. 951893, (1995), pp.2633-2643.
- [128]Dirk E. Smith, Jhon M. Starkey: Effects of Model Complexity on the Performance of Automated Vehicle Steering Controllers: Model Development, Validation and Comparison, Vehicle System Dynamics, Vol.24, No.2, (1995), pp.163-181.
- [129]Ahmed Alloum: Vehicle Modeling Aspects for an Embedded Real-Time Application, Vehicle System Dynamics, Vol.27, No.3, (1997), pp.187-219.
- [130]Anthony B. Will, Stanislaw H. Zak: Modeling and Control of an Automated Vehicle, Vehicle System Dynamics, Vol.27, No.3, (1997), pp.131-155.
- [131]S. Patwardhan, M. Tomizuka: Theory and Experiments of Tire Blow-Out Effects and Hazard Reduction Control for Automated Vehicle Lateral Control System, Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1994, Paper No. 9438646, (1994), pp.426-430.
- [132]山口裕之, 浅野勝宏, 安井由行, 伊藤孝之: 車体横すべり角推定法の開発, 1996年自動車技術会学術講演会前刷集, No.964, (1996), pp.121-124.
- [133]永井正夫, 斎藤安弘: 自動車の車体横滑り角の状態推定と操安性制御 (非線形オブザーバ), 日本機械学会第6回交通・物流部門大会講演論文集, No.97-12, (1997), pp.95-98.
- [134]Matthew C Best, Timothy J Gordon: Real-Time State Estimation of Vehicle Handling Dynamics Using an Adaptive Kalman Filter, Proceedings of 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control 1998, Paper No. 9836590, (1998), pp.183-188.
- [135]Yoshiki Fukuda: Estimation of Vehicle Slip-angle with Combination Method of Model Observer and Direct Integration, Proceedings of 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control 1998, Paper No. 9836626, (1998), pp.201-206.

- [136] Hiroshi Ohnishi, Junich Ishii, Mitsuo Kayano, Hiroshi Katayama: A Study of Road Slope Estimation on Running Vehicles With Automatic Transmissions. Proceedings of 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control 1998, Paper No. 9836581, (1998), pp.177-182.
- [137] H. J. Hong, H. Y. Jo: Prediction of Friction Between Tire and Road Using Powertrain Model, Proceedings of 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control 1998, Paper No. 9836518, (1998), pp.135-140.
- [138] 本田 治, 近藤 悟: 車間距離計測技術, 計測と制御, 第36巻, 第3号, (1997), pp.193-195.
- [139] 高木 誠: 自動車用ミリ波レーダ応用システム-開発状況と技術的課題-, 電子情報通信学会技術研究報告, SANE 96-49 ~ 56, (1996), pp.15-20.
- [140] 山本康典, 土井 歩, 吉岡 透, 足立智彦: レーザーレーダからの物体データを用いた進行路推定アルゴリズムの開発, 1995年自動車技術会学術講演会前刷集, No.955, (1995), pp.65-68.
- [141] 御室哲志: 車両周囲障害物認識技術, 計測と制御, 第36巻, 第3号, (1997), pp.174-176.
- [142] D. Baum, C. D. Hamann, E. Schubert: High Performance ACC System Based on Sensor Fusion With Distance Sensor, Image Processing Unit and Navigation System, Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1996, Vol.2, (1996), pp.1379-1391.
- [143] Umit Ozguner, Konur A. Unyelioglu, Cem Hatipoglu, Franz Kautz: Design of a Lateral Controller for Cooperative Vehicle Systems, SAE Transaction 1995, Paper No. 950474, (1995), pp.27-34.
- [144] 麻生 誠, 鈴木敏彦: 自動運転操舵制御のためのカルマンフィルタを用いた車両状態推定, 1999年自動車技術会学術講演会前刷集, No.114-99, (1999), pp.17-20.
- [145] 鈴木敏彦, 青木啓二, 橋 彰英, 森部 弘, 井上 博允: コンピュータビジョンによる自動運転システム(走行誘導用白線の認識), 1992年自動車技術会学術講演会前刷集, No.924, (1992), pp.161-164.
- [146] 寺久保 敏, 清水 修: AHS安全走行システムの画像処理技術の応用, 第10回 ADVANTY Symposium 講演論文集, (1997), pp.83-86.
- [147] Kunihiro Takada, Haruki Fujii, Osamu Hayashi: Multiple Vehicle Identification in a Longitudinal Ranging System, Proceedings of the Fourth World Congress on Intelligent Transport System, (1997).

- [148]吉田和弘, 広瀬茂男: 実時間計測可能な多眼ステレオビジョンの開発, 計測自動制御学会論文集, Vol.27, No.4, (1991), pp.436-443.
- [149]K.Saneyoshi, K.Hanawa, K.Kise: Image Recognition System for Active Drive Assist, Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1992, Paper No. 923050, (1992), pp.280-285.
- [150]実吉敬二, 上松憲邇, 木下昌裕, 塙圭二, 喜瀬勝之: 三次元画像処理技術を用いた運転支援システム, 1992年自動車技術会学術講演会前刷集, No.924, (1992), pp.169-172.
- [151]実吉敬二: ステレオ画像認識技術, 計測と制御, 第36巻, 第3号, (1997), pp.190-192.
- [152]坂上達也, 伊藤敏夫, 西岡邦雄: ステレオ画像処理を用いた測距アルゴリズムの開発, 1992年自動車技術会学術講演会前刷集, No.924, (1992), pp.153-156.
- [153]湯原博光, 寺内章, 坂雅和, 幅口正幸, 川合誠: ステレオ視センサ, 1999年自動車技術会学術講演会前刷集, No.78-99, (1999), pp.5-8.
- [154]加藤晋, 津川定之: 移動ロボットのためのマルチスリット光を用いた単一センサによる障害物と参照線の同時検出, 第10回 ADVANTY Symposium 講演論文集, (1997), pp.19-22.
- [155]広瀬武志: 画像処理による無人搬送車の位置と方位の測定, 計測自動制御学会論文集, Vol.27, No.5, (1991), pp.524-531.
- [156]橋本雅文, 茂木久徳, 大場史憲: 色標識を用いた移動ロボットの絶対位置・相対位置計測の研究-カルマンフィルタによるロボットの絶対位置推定-, 第10回 ADVANTY Symposium 講演論文集, (1997), pp.35-38.
- [157]橋本雅文, 大島誠, 大場史憲: 色標識を用いた移動ロボットの絶対位置・相対位置計測の研究-IMM(Interacting Multiple Model)法によるロボットの相対位置推定-, 第10回 ADVANTY Symposium 講演論文集, (1997), pp.39-42.
- [158]In-Soo Kweon, Yue Bao, 藤原直史: 移動体誘導のためのイメージ自動トラッキング, 第10回 ADVANTY Symposium 講演論文集, (1997), pp.23-26.
- [159]廣田正樹, 斉藤誠則, 森田信一, 福原裕成: 夜間歩行者警報技術, 計測と制御, 第36巻, 第3号, (1997), pp.171-173.
- [160]Kenich Yamada, Tomoaki Nakano, Shin Yamamoto: Wide Dynamic Range Vision Sensor for Vehicles, 1994 Vehicle Navigation & Information System Conference Proceedings, (1994), pp.405-408.
- [161]塙守智, 堀徳朗, 西出健一: LN-17型レーザ・ナビゲータ, 第6回 ADVANTY Symposium 講演論文集, (1993), pp.25-28.

- [162] 藤岡健彦, 大前 学: 車両追従方式による自動車の自動運転における操舵制御に関する研究, 第10回 ADVANTY Symposium 講演論文集, (1997), pp.71-74.
- [163] Corrad Cugiani, Luigi Giubolini: Millimetre Wave Radar Sensor for the Highway Global Positioning of a Vehicle, 1994 Vehicle Navigation & Information System Conference Proceedings, (1994), pp.409-415.
- [164] Klaus-Dieter Kuhnert, Hiroyuki Takahashi: Evaluation of Optical Distance Measurement for Car Control Applications, Proceeding of the International Symposium on Advanced Vehicle Control 1992, Paper No. 923051, (1992), pp.286-291.
- [165] 吉岡 透, 正田尚之, 細谷英生: 超音波センサを用いた後側方車両の検知技術, 計測と制御, 第36巻, 第3号, (1997), pp.177-180.
- [166] Jiangxin Wang, Susan Y. Chao, Alice M. Agogino: Validation and Fusion of Longitudinal Positioning Sensor in AVCS, Proceedings of 1999 American Control Conference, (1999).
- [167] Ty A. Lasky, Bahram Ravani: Application of GPS for Vehicle Control in an Automated Highway System Environment, Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport System, (1995), pp.1102-1107.
- [168] Robert Bodor, Max Donath, Vassilios Morellas, David Johnson: In-Vehicle GPS-Based Lane Sensing to Prevent Road Departure, Proceedings of the Third World Congress on Intelligent Transport System, (1996).
- [169] 小林一行, 宗像史生, 渡辺嘉二郎, 村山理: 差動GPSを用いた複合車両航法について, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.7, (1995), pp.880-888.
- [170] Greg Turetzky, Mangesh Chansarkar, Hazen Gehue: GPS as the Primary Navigation Sensor for ITS, SAE Technical Paper Series, Paper No. 972637, (1997).
- [171] 福井良太郎: ITS通信技術, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.3, (1999), pp.334-338.
- [172] (財)自動車走行電子技術協会: 車々間走行データ伝達システムのフェージビリティステディ報告書, (1997).
- [173] 牧野俊昭, 大泉純一, 菅 和俊, 薮 博昭, 中田健二: 複数台の無人搬送車に用いるスペクトル拡散通信の応用, 計測自動制御学会論文集, Vol.28, No.12, (1992), pp.1387-1396.
- [174] Masatoshi Uchida, Yasuo Kagawa, Akihiro Okuno: A Vehicle-To-Vehicle Communication and Ranging System Based on Spread Spectrum Technique-SS Communication Radar-, 1994 Vehicle Navigation & Information System Conference Proceedings, (1994), pp.169-174.

- [175]Issei Sasaki, Toshio Hirayama, Takeshi Hatsuda: Vehicle Information Networking Based on Inter-Vehicle Communication By Laser Beam Injection and Retro-Reflection Techniques, 1994 Vehicle Navigation & Information System Conference Proceedings, (1994), pp.165-167.
- [176]Kiyoshi Mizui, Masatoshi Uchida, Masao Nakagawa: Vehicle-To-Vehicle 2-Way Communication & Ranging System Using Spread Spectrum Technique-Proposal of Double Boomerang Transmission System-, 1994 Vehicle Navigation & Information System Conference Proceedings, (1994), pp.153-158.
- [177]Makoto Nakamura, Yutaka Yamada: Results of Experiments on Transmission Functions of Leakage Coaxial Cable (LCX) in Quasi-Microwave Band, 1994 Vehicle Navigation & Information System Conference Proceedings, (1994), pp.139-144.
- [178]Takashi Hatakeyama, Sadao Takaba: A Network Architecture of the Inter-Vehicle Packet Communication System, 1994 Vehicle Navigation & Information System Conference Proceedings, (1994), pp.159-164.
- [179]Yasuhiko Inoue, Masao Nakagawa: Mac Protocol for Inter-Vehicle Communication Network Using Spread Spectrum Technique, 1994 Vehicle Navigation & Information System Conference Proceedings, し, (1994), pp.149-152.
- [180]J. Kaltwasser, J. Kasssubek: A New Cooperative Optimized Channel Access for Inter Vehicle Communication, 1994 Vehicle Navigation & Information System Conference Proceedings, (1994), pp.145-148.
- [181]Young-An Kim, Masao Nakagawa: R-Aloha Protocol for SS Inter-Vehicle Communication Network Using Head Spacing Information, Proceedings of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, (1996), pp.278-283.
- [182]前田肇, 杉江俊治: アドバンスド制御のためのシステム制御理論, 朝倉書店, (1990).
- [183]木村英紀, 藤井隆雄, 森武宏: ロバスト制御, コロナ社, (1994).
- [184]市川邦彦: 自動制御系の設計理論, 産業図書, (1977).
- [185]水町守志: GPS 導入ガイド, 日刊工業新聞社, (1993).
- [186]有本卓: カルマンフィルター, 産業図書, (1977).
- [187]片山徹: 応用カルマンフィルタ, 朝倉書店, (1983).
- [188]東京天文台編: 理科年表, 丸善, (1984).
- [189]東京大学教養学部統計学教室編: 統計学入門, 東京大学出版会, (1991).
- [190]安部正人: 自動車の運動と制御, 山海堂, (1992).

- [191] 杉沼浩司: 移動体通信. 日本経済新聞社. (1996).
- [192] Tomoyuki Yashiro, Ken Kasagi, Kyoko Ariyasu, Satoshi Kishida, Yutaka Matsushita: Construction and Performance Evaluation of the Platoon-Formation Algorithm Considering the Destination of Each Vehicle, Proceedings of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, (1996), pp.35-40.

謝辞

本論文の研究を進めるにあたり、終始がわらぬあたたかい御指導を賜りました藤岡先生に心から感謝の念を申し上げます。藤岡先生には研究の方向づけのみならず、海外や国内の学会参加、論文発表、研究分科会の参加などの貴重な体験をさせていただきました。研究が行き詰まった時なども藤岡先生のあたたかい励ましにより、奮起することができました。また、研究費、実験場などの研究の行うための素晴らしい環境を整えて下さいました。本当にありがとうございました。

吉本先生、鎌田先生、鈴木先生、堀先生からは、本論文作成にあたり数々の貴重なご助言を賜りました。心から感謝しております。

本研究室助手の今泉さん、根本さん、秘書の落合さんには、研究生生活の面で大変お世話になりました。特に、今泉さんには、実験機器に関して指導していただいただけでなく、実験機器を作成していただいたり、実験の手伝いをしていただきました。また研究に必要な資材やコンピュータなどを迅速に用意して下さいました。心から感謝しております。

機械技術研究所の津川先生、日本大学の景山先生、網島先生、静岡理工科大学の小松先生からは、研究を推進する際に数々の貴重なご助言を賜りました。心から感謝しております。

機械技術研究所のみなさま、自動車走行電子技術協会のみなさま、機械システム振興協会のみなさまには、実験場を使用させていただいただけでなく、実験のための宿泊や、車両の保管、セットアップの際にも大変お世話になりました。日産自動車からは、実験車のインフィニティを貸与していただきました。心から感謝しております。

日本機械学会RC160 ITS-AVCSSの現状と将来展望に関する研究分科会の研究者委員の先生方および企業・法人委員のみなさまからは、ITSに関する最先端の情報を数多く教えて頂き、研究の大きな参考となりました。心から感謝しております。また、学会、研究会、ミーティング等の機会に様々なご助言をして下さいました。大学の先生方、企業の方にも大変感謝しております。

本研究室の先輩、後輩のみなさん、卒業された先輩、同期、後輩のみなさんには、研究生生活の内外で大変お世話になりました。貴重なご助言を頂いたり、実験や雑用を手伝ってもらったり、一緒に遊んだり...筆舌に尽くしがたいほどに数多くお世話になりました。みなさんのおかげで、本当に楽しい毎日を過ごすことができました。本当にありがとうございました。

本論文は、たくさんの方々のお世話になりながら、完成されたものです。みなさま、本当にありがとうございました。

1999年12月

大前 学



