排他機構を組み込んだコンセンサス制御による協調的自動駐車システム

能 登 紀 泰*・奥 田 裕 之*・田 崎 勇 一*・鈴 木 達 也*
早 川 聡一郎**・三 田 誠 一***・片 山 正 昭*・大 日 方 五 郎*Cooperative Automatic Parking System Based on Consensus Control
with Mutual Exclusion MechanismNoriyasu NOTO*, Hiroyuki OKUDA*, Yuichi TAZAKI*, Tatsuya SUZUKI*,
Soichiro HAYAKAWA**, Seiichi MITA***, Masaaki KATAYAMA* and Goro OBINATA*

A cooperative parking system based on consensus control and mutual exclusion mechanism is developed. The system incorporates the idea of consensus control that has been actively studied in the field of multi-agent control in order to balance the amount of time required for parking. Moreover, the notion of exclusive region is newly introduced to avoid collisions at junctions. The system is evaluated through large-scale simulations and field tests in which multiple personal electric vehicles share position and velocity information via wireless communication network.

Key Words: consensus control, cooperative parking, electric vehicle

1. はじめに

車を中心としたモビリティ技術における安全性に対する要求が日に日に高まっている。複雑かつ大規模な局面において安全性や利便性を確保するためには、従来の個体安全の考え方では不十分であり、これに加えて新たに車車間通信技術や協調・分散システム理論を統合し、自車のみではなく、他車や人との協調的振る舞いに注目しながら安全性を改善する「協調的安全」(Cooperative safety)の実現を目指す必要がある。一般に個体安全な車が複数台集まったとき必ずしも車群としての安全性が確保される保証はない。この点は個体安全に関する技術が高度化するほど顕在化し、結果として支援システム設計に対して大きな壁として立ちはだかる可能性がある。協調的安全は車群としての安全性を確保するためのキーコンセプトであり、次世代のモビリティシステムを考える上での重要な設計思想となる。このような考えのもと、現在までにプラトーン走行、合流、障害物回避などの研究が行なわれ

てきた¹⁾。

交通環境の中でも特に多くの車両が密集する環境として駐車場が挙げられる。駐車場はしばしば混雑が発生する場所であり、大型ショッピングセンターの駐車場などでは駐車完了するまでに10分以上かかることも珍しくない。これに加えて、駐車場は人車混合の交通環境であることから、駐車車両や構造物による歩行者のオクルージョンなどもあり、事故が起りやすい場所となっている。スムーズで安全な駐車システムを実現するには、環境中の車を車群として捉え、全体の協調を考えることが重要であると考えられるが、従来の駐車支援技術(文献2)などは主に車両単体の駐車を支援するための軌道生成や車両制御に焦点をあてたものが多く、駐車環境における車車間の協調に注目した例は少ない。

以上の背景にもとづき、本論文では車群の安全性と駐車効率を考慮した協調駐車システムの開発に取り組む。各車が駐車に要する時間を平均化することを目的として、マルチエージェント制御の分野において活発に研究されているコンセンサス制御を導入する。また、単純な仕組みで車両同士の衝突を回避するために、駐車環境の領域分割にもとづく排他制御を行なう。

本論文の構成を以下に述べる。第2章では、本論文で取り扱う協調駐車問題の定式化を行なう。第3章では、協調駐車システムの基礎となるコンセンサス制御の基本概念について解説する。第4章では、コンセンサス制御を駐車問題へ適用する方法について述べ、排他機構を組み入れることで、目標状態への収束性に関する性質を損なうことなくエージェント

* 名古屋大学大学院工学研究科 名古屋市千種区不老町

** 三重大学大学院工学研究科 津市栗真町屋町 1577

*** 豊田工業大学 名古屋市天白区久方 2-12-1

* Graduate School of Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya** Graduate School of Engineering, Mie University, 1577
Kurimamachiya-cho, Tsu*** Toyota Technological Institute, 2-12-1 Hisakata, Ten-
paku-ku, Nagoya

(Received February 22, 2013)

Fig. 1 Cooperative parking task

(車両) 同士の衝突回避が実現できることを示す。第5章では、シミュレーション環境上において数十台の車両が同時に駐車する数値シミュレーションを行ない、本手法の評価を行なう。続く第6章では、3台の一人乗り小型電気自動車と無線通信システムを用いた実車試験について述べる。最後に第7章においてまとめと今後の課題について述べる。

記法 本論文を通じて整数の系列 $i_1, i_1 + 1, \dots, i_2$ を $[i_1 : i_2]$ と書く。また、ベクトルの縦連結を $[v_1; v_2] = [v_1^T v_2^T]^T$ と書く。さらに、集合 $\mathcal{I}$ についてその要素数を $|\mathcal{I}|$ と表記し、二つの集合 $\mathcal{I}_1$ と $\mathcal{I}_2$ の差を $\mathcal{I}_1 \setminus \mathcal{I}_2 = \{i | i \in \mathcal{I}_1, i \notin \mathcal{I}_2\}$ と書く。

2. 協調駐車タスクの概要

複数の自律移動車両による協調駐車問題について述べる。駐車環境の模式図を Fig. 1 に示す。協調駐車問題の目的はおおまかに述べて複数の車両の衝突を回避しつつ所定の所要時間で駐車位置へ誘導することである。駐車環境は有界とし、その中に有限個の出発領域と駐車領域が配置されている。はじめ出発位置に配置されている各車両に対し、駐車位置と駐車までの経路を決定する。出発後は、経路が交差する部分において車両同士が衝突しないように、各車両の速度を調整する。また、必要に応じて出発位置上で車両をある程度待機させてもよい。ただし、車両間の平等性の観点から、駐車完了までに要する時間は同程度とすることが望ましい。本論文では簡単のために駐車環境へ進入する車のみを考え、逆に駐車環境から出ていく車は考えない。

上述の目的を達成するために、本論文では排他機構を組み込んだコンセンサス制御を用いる。コンセンサス制御の基本概念について第3章において述べた後、これを協調駐車問題に適用する方法について第4章で述べる。

3. コンセンサス制御の基本概念

本章では協調駐車制御の基本原理となる合意形成 (Consensus, コンセンサス) の理論について説明する。コンセンサス制御とは、複数のエージェントを同じ目標に収束させるように状態量を制御する手法であり、マルチエージェントシステムの分野で広く用いられている^{3)~6)}。コンセンサス制御では、エージェント間の情報の交換関係を有向グラフ構造で表現する (Fig. 2)。エージェントの数を n とし、 i 番目のエー

Fig. 2 Example of digraph used in consensus control

ントの状態を $x_i(t)$ とする。各エージェントは以下の状態方程式に従う。

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j \in N_i} w_{ji}(x_j(t) - x_i(t)) \quad (1)$$

ここで、 $N_i \subset \{1, 2, \dots, n\}$ はエージェント i へ有向リンクで接続されたエージェントのインデックスの集合を表す。ただし有向リンクはエージェント j からエージェント i の方向へ向くものとする。上述の有向グラフが全域木を含むとき、 $t \rightarrow \infty$ において合意状態

$$x_1(t) = x_2(t) = \dots = x_n(t) \quad (2)$$

に収束することが知られている⁷⁾。

4. コンセンサス制御と排他機構に基づく協調駐車システム

4.1 駐車環境の領域分割と駐車経路の生成

本章ではコンセンサス制御と排他機構により協調駐車システムを構成する方法について述べる。はじめに、駐車環境を有限個の部分領域の集合 $\mathcal{R}$ に分割する。ただし個々の出発領域と駐車領域が $\mathcal{R}$ の要素となるように分割しなければならない。領域分割の例を Fig. 3 に示す。図中の破線の矩形が個々の領域を表す。つぎに、各車両に関し、出発領域から駐車領域へ向かって通過する領域の系列を決定し、これを経路と呼ぶ。経路は通過する領域の集合 $\mathcal{R}_i$ とその接続関係 $\mathcal{E}_i$ の対で表わせる。たとえば Fig. 3 の車両 1 の場合、

$$\mathcal{R}_1 = \{R_1, R_6, R_{15}, R_{16}\},$$

$$\mathcal{E}_1 = \{(R_1, R_{15}), (R_{15}, R_{16}), (R_{16}, R_6)\}$$

である。さらに、経路中を通る車両の走行軌道を決定する (Fig. 3 中の矢印つき曲線)。経路と軌道を決定する際、以下の条件を満たす必要がある。

- A1 経路は他車の駐車領域を含まない。
- A2 軌道上の任意の位置において、車両はその大きさも考慮して軌道が通過する領域から逸脱しない。
- A3 軌道と領域境界との交点において、軌道と領域境界の接線は平行とならない。
- A4 軌道の始点と終点において車両はそれぞれ出発領域と駐車領域に含まれる。

本論文では、経路および軌道の決定方法について深く立ち

Fig. 3 Partitioning of parking space and parking trajectories

入らないが、経路の決定に関しては領域の隣接関係を表わすグラフ上で最短経路を求める方法が考えられる。また、軌道の決定については車両の最小旋回半径などを考慮して設計者が行なうものとする。

最後に、各車の駐車経路の和集合として与えられる有向グラフを $G = \langle \bigcup_i \mathcal{R}_i, \bigcup_i \mathcal{E}_i \rangle$ と定義し、これを経路グラフと呼ぶ。Fig. 3(a) に対応する経路グラフを Fig. 3(c) に示す。

4.2 コンセンサスによる車両制御

前節において各車の駐車軌道を決定する手続きについて述べた。本節では、衝突回避と駐車所要時間の平滑化を目的とした軌道に沿った走行速度の制御について述べる。各車をコンセンサス制御のエージェントとみなし、エージェントの番号の集合を $\mathcal{I} = [1:n]$ と書く。時刻 t における車両 i の駐車位置までの軌道に沿った道のりを $x_i(t)$ と定義する。また、車両のほかに目標状態（駐車完了状態）を表わす仮想的なエージェントを考え、これを 0 番目のエージェントとする。各状態の初期条件は

$$\begin{aligned} x_0(0) &= 0, \\ x_i(0) &= l_i \quad (i \in \mathcal{I}). \end{aligned} \quad (3)$$

である。ただし l_i は車両 i の軌道の長さである。

駐車問題におけるコンセンサス制御のグラフ構造の基本形を Fig. 4 に示す。目標状態から各エージェントへ向けてリンクが接続され、これにより各エージェントは常に目標状態へ

Fig. 4 Digraph used in consensus control for cooperative parking (three cars)

向けたフィードバックを受ける。また、エージェント間は相互にリンクで接続され、これによりエージェント間の状態が平滑化され、駐車所要時間の平均化が図られる。状態 x_0 はほかの状態からのフィードバックを受けないため、初期状態から変化せず恒等的に $x_0(t) = 0$ が成り立つ。

以上にもとづき、車両 i のダイナミクスを次式のように与える。

$$\dot{x}_i(t) = \min \left[0, -w_{0,i} x_i(t) + \sum_{j \in N_i} w_{ji} (x_j(t) - x_i(t)) \right] \quad (4)$$

ここで N_i は車両 i とリンクで接続された車両の番号の集合である。駐車問題において $\dot{x}_i(t) > 0$ となることは軌道上を逆走することを意味し、実用上望ましくない。これを防ぐために右辺に $\min$ 演算を加え、必ず $\dot{x}_i \leq 0$ が成り立つようにしている。系の状態を $x(t) = [x_1(t); x_2(t); \dots; x_n(t)]$ と定義し、取り得る状態の集合を $X = \{x | x_i \in [0; l_i]\}$ と書く。また、(4) 式にもとづき系の状態方程式を $\dot{x}(t) = f(x(t))$ と書く。

後で用いるために、 $\hat{\mathcal{I}} \subseteq \mathcal{I}$ に対して $\hat{\mathcal{I}}$ に属する車両間のみでコンセンサス制御が働き、ほかの車両は停止するような状態方程式を考え、これを $\dot{x}(t) = f_{\hat{\mathcal{I}}}(x(t))$ と書く。

$$\dot{x}_i(t) = \begin{cases} \min \left[0, -w_{0,i} x_i(t) + \sum_{j \in N_i \cap \hat{\mathcal{I}}} w_{ji} (x_j(t) - x_i(t)) \right] & \text{if } i \in \hat{\mathcal{I}}, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

[考察 1] 通常のコンセンサス制御には目標状態を陽に定めないことから収束値が初期状態に応じて変化するという性質があるが、本手法では 0 番エージェントを導入したことにより目標状態は自明となる。本手法では、むしろエージェント間の状態誤差のフィードバックによる過渡応答における同調（駐車ペースの平均化）のためにコンセンサス制御を用いているといえる。

4.3 排他機構による衝突回避

従来のコンセンサス制御はエージェントの状態に制約を課すことができないため、経路が交差する箇所において車両同士の衝突が生じる恐れがある。そこで、第 4.1 節で導入した

領域 $\mathcal{R}$ に排他性を与える．つまり，ある車両が領域 $R \in \mathcal{R}$ 中を走行している間，ほかの車両の R 内への進入を禁止する．このような排他機構を組み込んだコンセンサス制御のダイナミクスを以下に定式化する．準備としていくつかの記号を定義する．車両 i の軌道が領域 R と交差するとき，車両 i が R 上にあるときの状態 x_i の範囲を

$$[\underline{c}_i(R), \bar{c}_i(R)]$$

と書く．状態 x_i は目標状態に向かって減少するので， $\bar{c}_i(R)$ が R への進入時， $\underline{c}_i(R)$ が R からの脱出時に対応する．状態 x において R の境界上で進入する向きにある車両番号の集合を

$$I^{\text{enter}}(R, x) = \{i \mid x_i = \bar{c}_i(R)\}$$

と書く．また， R の内部にあるか，あるいは境界上で R から出る向きにある車両番号の集合を

$$I^{\text{occupy}}(R, x) = \{i \mid \bar{c}_i(R) > x_i \text{ and } x_i \geq \underline{c}_i(R)\}$$

と書く．車両 i が $i \in I^{\text{occupy}}(R, x)$ を満たすとき，車両 i は領域 R を占有するという．すべての領域 $R \in \mathcal{R}$ に関して， $I^{\text{occupy}}(R, x)$ の要素数がただか1であるような状態の集合を $X^f \subset X$ と書く．排他制御の仕組みにより，初期状態が $x(0) \in X^f$ を満たせば，以降の任意の時刻 t において $x(t) \in X^f$ が満たされる（証明略）．ある車両 i が領域 R の境界上で進入する向きにあり，同時に他の車両 j が R を占有しているとする．このとき，車両 j が R を脱出するまで車両 i は待ち状態になる．また，複数の車両が領域 R に対して待ち状態にあるときに R が解放された場合，待ち状態にある中で最も番号の若い車両が R へ進入する．以上にもとづき，状態 x で領域 R に対して待ち状態にある車両番号の集合を以下のように定義する．

$$I^{\text{wait}}(R, x) = \begin{cases} I^{\text{enter}}(R, x) & \text{if } I^{\text{occupy}}(R, x) \neq \emptyset \\ I^{\text{enter}}(R, x) \setminus \{\min I^{\text{enter}}(R, x)\} & \text{otherwise} \end{cases}$$

また，系全体で待ち状態にある車両の集合を

$$I^{\text{wait}}(x) = \bigcup_{R \in \mathcal{R}} I^{\text{wait}}(R, x) \quad (6)$$

と書く．上述の記法を用いて，排他機構つきコンセンサス制御の状態方程式を次式で定義する．

$$\dot{x}(t) = f_{I^{\text{wait}}(x(t))}(x(t)) \quad (7)$$

上式からわかるように，待ち状態にある車両は停止するだけでなく，待ち状態にない車両のダイナミクスに影響を及ぼさない．

4.4 排他機構つきコンセンサス制御の収束性

排他機構を導入したことでコンセンサス制御の安定性に関して慎重な取り扱いが必要となる．特に，複数の車両間で占

Fig. 5 Three cars in deadlock

有状態と待ち状態に循環関係が生じたとき，これらの車両はデッドロック状態に陥り，無期限に停止してしまう．簡単な例として，車両 1, 2, 3 があり，車両 1 は領域 1 を占有しつつ領域 2 を待ち，車両 2 は領域 2 を占有しつつ領域 3 を待ち，また領域 3 は領域 3 を占有しつつ領域 1 を待っているとする（Fig. 5 (a)）．このような場合はデッドロック状態である．デッドロックが生じている箇所では，Fig. 5 (b) のように経路グラフがサイクルを形成しており，かつサイクルのすべてのノードに対応する領域が占有状態にある．したがって，サイクルを構成するノード数に比べてそのサイクルを經由する車両数が少なければ，デッドロックに陥ることなくすべての車両が目標状態へ収束することが予想される．経路グラフ G に含まれるサイクル数を n^c ， j 番目のサイクルを部分グラフとして $G_j^c = \langle \mathcal{R}_j^c, \mathcal{E}_j^c \rangle$ と書く．また， j 番目のサイクルを經由する車両の集合を $\mathcal{I}_j^c = \{i \mid \mathcal{R}_j^c \cap \mathcal{R}_i \neq \emptyset\}$ と表わす．すると，経路グラフのサイクル上でデッドロックが生じないための十分条件は

$$\forall j \in [1 : n^c], |\mathcal{I}_j^c| < |\mathcal{R}_j^c| \quad (8)$$

と書ける．上の条件が成り立つとき，サイクルを構成するすべての領域が同時に占有される状況は生じ得ない．

以上の考察にもとづき，つぎの定理を示す．

《定理 1》 条件 (8) が成り立つとき，システム (7) の状態 $x(t)$ は任意の初期状態 $x(0) \in X^f$ について $t \rightarrow \infty$ で 0 へ収束する．

証明 リアプノフ関数候補を $V(x) = x^T x$ と定める．はじめに $x \in X^f$ ， $x \neq 0$ を任意に選ぶ．このとき

$$\hat{\mathcal{I}} = \{i \mid x_i > 0, i \notin I^{\text{wait}}(x)\} \quad (9)$$

と定義すると， $\hat{\mathcal{I}}$ は少なくとも一つの要素をもつ．これを示すために， $\hat{\mathcal{I}} = \emptyset$ ，つまり $x_i > 0 \Rightarrow i \in I^{\text{wait}}(x)$ を仮定して矛盾を導く．任意の $i \in I^{\text{wait}}(x)$ について，車両 i が待ち状態にある領域を R とすると，これを占有している車両 i' が存在する：

$$i \in I^{\text{wait}}(R, x), i' \in I^{\text{occupy}}(R, x). \quad (10)$$

経路に関する条件 (A1) より， $x_{i'} > 0$ であり，したがって仮定より $i' \in I^{\text{wait}}(x)$ である．すると， $I^{\text{wait}}(x)$ をノード集合とし，(10) 式を満たす対 (i, i') を有向エッジの集合とする出次数 1 の有向グラフが定義できる．グラフ理論より，このグラフは少なくとも一つのサイクルを含む．しかし，条件 (8)

Fig. 6 Simulation environment

より経路グラフのサイクル上のすべてのノードが車両で占有されることはないため、矛盾が生じる。したがって $\hat{I} \neq \emptyset$ である。

状態方程式 (7) よりすべての i について $\dot{x}_i \leq 0$ であり、また $\hat{i} = \arg \max_{i \in \hat{I}} x_i$ とおくと、 $\dot{x}_{\hat{i}} < 0$ である。ゆえに $\dot{V} < 2x^T \dot{x} < 0$ が成り立ち $V(x)$ がシステムのリアプノフ関数であることが示された。□

5. シミュレーションによる検証

シミュレーション環境を Fig. 6 に示す。環境中の各交差点および交差点をつなぐ通路部分に異なる排他領域を設けた。また、実際の駐車場環境を模擬するためそれぞれの通路は一方通行とした。各車の駐車経路はこれにしたがい決定する。駐車環境には出発領域が 2 箇所あり、それぞれの出発領域から 12 台の車両が順次出発する。前章までの説明では全車が同時に出発することを想定したが、このように車両が順次環境に投入される場合でも特別な取扱いはいらない。

まず、コンセンサス制御のグラフ構造として、各車と目標状態との間にのみリンクがあり、車両間にリンクがないものを用いて応答を評価した。各車の状態の時間変化を Fig. 7 (a) に示す。図より、それぞれの車両の状態量が時間の経過とともに 0 に収束していることがわかる。また、応答波形が水平となっている箇所は、その車両が領域境界上で待ち状態となっている期間を表わしている。

つぎに、目標状態とのリンクに加えて、異なる二つの出発領域から同時に出発する 2 台の車両間が相互にリンクで接続された場合の応答を評価した。状態の時間変化を Fig. 7 (b) に示す。図より、同時に出発した車両の状態がほぼ同時に 0 へ到達していることがわかる。このことから、コンセンサス制御の効果により同時出発する車両がペースを同調し、所要駐車時間を平均化できることが確認された。

6. 小型電気自動車と無線通信システムによる協調駐車実験

本章では小型電気自動車 3 台を用いた実車試験の結果について述べる。

6.1 実験車両のシステム構成

使用した実験車両はトヨタ車体 (株) 製の小型電気自動車

(a) without links between cars

(b) pair of cars starting at the same time are connected by links

Fig. 7 Time series of states in simulation experiment

Fig. 8 Experiment vehicle and wireless communication system

コムス®の改造車両である。本実験で使用した 3 台の車両は基本的な機能に違いはないが、仕様にある程度の差異があるため、以下ではその内の 1 台のみについて具体的に解説する。実験車両の構成図を Fig. 8 に示す。

加減速制御系 加速に関しては、加速指令値 (アナログ電圧) が車両制御 ECU に加えられ、これにより左右後輪のインホイールモータからトルクが発生される。ブレーキに関しては、ブレーキトルク指令が車両前方に取り付けられたブレーキペダル駆動モータに送られる。するとモータ軸に取り付けられたプーリがワイヤを巻きとり、その結果レバーが物理的

Fig. 9 Timing chart of wireless communication system

にブレーキペダルを押し下げる．トルク指令を 0 とすると，モータが脱力しバネの力によりレバーが押し戻され，ブレーキペダルがリリースされる．

操舵制御系 ステアリングハンドルの軸にモータとポテンショメータが取り付けられており，これにより操舵角制御を行なう．

位置推定器 車両の自己位置推定は単純なオドメトリにより行なう．左右後輪に取り付けられたロータリーエンコーダより得られる車輪回転速度と操舵制御系より得られる操舵角度をもとに車両の走行速度と旋回角速度を計算し，これを数値積分することで車両の位置と方位を更新する．一般に，オドメトリ手法では推定誤差の累積が問題となるが，駐車環境においては走行速度が十分低速である上に走行距離も短いため，問題がさほど顕著に現れることはない．

無線通信システム 各車は無線通信システム（(株)アローセブン）を搭載し，位置推定器により得られる車両の位置と向きをリアルタイムで共有する．無線通信のタイミングチャートを Fig. 9 に示す．基地局から 50 ミリ秒周期で発信されるビーコンに同期し，各車載端末が適当な時間遅れで位置情報を発信する仕組みとなっている．また，基地局からはデータ通信端末とは別系統で各車への走行許可信号が常に発信されており，何らかのトラブルにより走行許可信号の受信が途絶した車両は自動的に非常停止するフェールセーフシステムとなっている．

コンセンサス制御器 本実験では，コンセンサス制御の計算は車両 1 の車載 PC で集中的に行なうこととした．計算に必要な各車の軌道や排他領域の座標データも PC に記憶されている．なお，手動走行車に対して精密に走行速度を指示することは困難であるため，コンセンサス制御より得られる $\dot{x}_i$ は直接軌道上の走行速度とせず， $\dot{x}_i < 0$ のとき走行許可， $\dot{x}_i \geq 0$ のとき停止という形で二値化して用いる．

軌道追従制御器 駐車軌道は x, y 座標の離散的な点列としてあらかじめ用意し，各車の車載 PC に記憶しておく．オドメトリより得られる自車の位置と軌道との偏差を操舵角にフィードバックする簡単な自動操舵制御を採用する．

6.2 実験条件

実験時のようすを Fig. 10 に示す．車両の出発位置と駐車位置の異なる設定 1, 2 の二通りの試行を行なう．それぞれを Fig. 11 (a)(b) に示す．図中，番号が付記されている箇所が各車の出発位置であり，軌道（太線）に沿って反対側にあ

Fig. 10 Experiment scene

(a) configuration 1

(b) configuration 2

Fig. 11 Parking configuration for experiment

る矩形がそれぞれの目標駐車位置である．また，破線で囲まれた領域は排他性を有する領域である．軌道の交差部および駐車スペースの手前にそれぞれ排他領域を配置した．理論上は駐車環境全体が領域分割されていることになるが，破線の矩形外では各車の軌道が十分離れていることからこれらの領域を陽に意識する必要はない．

なお，本実験では自動走行システムの普及過渡期を想定し，自動走行車（車両 1, 3）と手動走行車（車両 2）の混在環境とした．車両 1, 3 はコンセンサス制御器と軌道追従制御器により自動走行するが，車両 2 は運転者が指示された軌道に沿って運転する．

6.3 実車実験結果

設定 1, 2 における各車の状態の時間系列を Fig. 12(a)(b) に示す．破線で描かれている区間は，排他制御により待ち状態となり，車両に停止指令が与えられていることを表す．設定 1 では，手動走行である車両 2 が先行して一つの排他領域へ進入したため，30 秒付近で後続の車両 3, 1 は順次待ち状態となった．その後車両 2 が排他領域を抜け，車両 1, 3

Fig. 12 Time series of odometry data

が順次走行を再開した。ここで車両3が先に待ち状態になったにもかかわらず車両1が先に走行再開しているのは、複数待ち状態においては番号の若い車両から待ち解除されるというルールにもとづいている。

設定2においても手動走行の車両2が先行して走行したため30秒付近で車両1, 3が待ち状態になっているが、今度は駐車位置手前にある排他領域上にて意図的に一時停止した。このために走行再開した車両1が50秒付近で再度待ち状態に入っていることが観察される。

7. ま と め

スムーズかつ安全な駐車環境の実現を目指し、コンセンサス制御と排他機構を用いた協調駐車システムを考案した。本システムは複雑な計算を必要としないことから、無線通信と自己位置推定の仕組みさえあれば比較的低コストで現実の駐車環境へ導入可能と考えられる。また、実車試験において手動走行車と自動走行車の混在環境でも使用可能であることが確認された。今後の課題としては、駐車環境へ進入する車両だけでなく環境から出ていく車両との協調方法の検討がある。また、各車への駐車スペースの割り当てや経路の選択もコンセンサスの枠組みで包括的に扱えるよう拡張を試みたい。最後に、今回の実車試験では協調制御部を特定車両の車載PC上に実装したが、駐車環境のインテリジェント化の観点からは協調制御部は環境のインフラが担うべきであり、また大規模化への対応として制御の分散化を検討していくべきである。

謝辞 本研究は、社団法人中部産業連盟受託研究「自動車走行における協調的安全に関する研究」の一環として行なわれた。この場を借りて関係諸氏にお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 津川定之：自動運転・無人運転自動車の自動運転技術の変遷，自動車技術，**60**-10, 4/9 (2006)
- 2) 宮原，小林，塩谷：車載レンジファインダによる車両認識と自動駐車システムの開発，自動車技術会論文集，**40**-4, 973/978 (2009)
- 3) 藤田，畑中：協調制御～合意から被覆まで～，第52回システム制御情報学会研究発表講演会予稿集，1/6 (2008)
- 4) W. Ren, R. Beard and T. McLain: Coordination Variables and Consensus Building in Multiple Vehicle Systems, Co-operative Control, 439/442 (2005)
- 5) W. Ren: Consensus Seeking in Multi-Vehicle Systems with a Time-Varying Reference State, American Control Conference 2007 (ACC'07), 717/722 (2007)
- 6) W. Ren and N. Sorensen: Distributed Coordination Architecture for Multi-Robot Formation Control, Robotics and Autonomous Systems, **56**-4, 324/333 (2008)
- 7) M. Mesbahi and M. Egerstedt: *Graph Theoretic Methods in Multiagent Networks*, Princeton University Press (2010)

[著 者 紹 介]

能 登 紀 泰

1989年生。2011年名古屋大学工学部機械航空工学科電子機械工学コース卒業。同年，同大学大学院工学研究科機械理工学専攻博士課程前期課程進学。車群の協調制御の研究に従事。

奥 田 裕 之 (正会員)

1982年生。2010年名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程機械理工学専攻修了，博士(工学)。同年科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業(CREST)の博士研究員，2012年より名古屋大学グリーンモビリティ連携研究センター特任助教，現在に至る。ハイブリッドシステム論に基づく人間行動のモデル化技術を中心とした，生体信号処理，および人間行動モデルの自動車，ロボット分野における人間中心機械設計への応用に関する研究などに従事。電気学会，日本機械学会の各会員。

田 崎 勇 一 (正会員)

1980年生。2008年東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻博士課程修了。工学博士。2007～2009年，日本学術振興会特別研究員。2008年，Honda Research Institute Europe (Germany) 客員研究員。2009年より名古屋大学大学院工学研究科助教，現在に至る。ハイブリッドシステム理論や動的システムの離散抽象化，多自由度ロボットの動作計画などに関する研究に従事。日本ロボット学会，IEEE 会員。

鈴木 達也 (正会員)

1964年生。91年名古屋大学大学院博士課程後期課程電子機械工学専攻修了。工学博士。同年名古屋大学工学部助手。2000年同助教授を経て、2006年同教授。現在に至る。この間、98年から1年間、U.C. Berkeley 客員研究員。離散事象システム論やハイブリッドシステム論とその実システムへの応用、人間を中心としたモビリティシステムに関する研究に従事。2008年 ICCAS Outstanding paper award, 2009年計測自動制御学会論文賞, 2010年自動車技術会論文賞などを受賞。システム制御情報学会, 電子情報通信学会, 電気学会, 日本ロボット学会, 日本機械学会, IEEE の各会員。

早川 聡一郎 (正会員)

1996年名古屋大学大学院博士課程後期課程電気工学研究科修了。博士(工学)。同年豊田工業大学助手。2009年三重大学大学院工学研究科機械工学専攻准教授。現在に至る。主として、メカトロニクスや人間行動解析に関する研究に従事。電気学会, 自動車技術会会員。

三田 誠一

1971年京都大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年日立製作所入社。中央研究所, 小田原工場勤務を経て99年豊田工業大学勤務, 情報通信教授。現在豊田工業大学特任教授, スマートビークル研究センター長, 工学博士。専門分野は信号処理, 画像処理。IEEE Consumer Electronics Society The best paper award, テレビジョン学会丹羽高柳論文賞, 丹羽高柳著述賞, テレコムシステム技術賞(奨励賞), 情報ストレージ推進機構論文賞, 発明協会会長賞, 日本磁気学会出版賞など受賞, 保有特許件数70件以上。電子情報通信学会, 映像情報メディア学会, IEEE Magnetic Society, Intelligent Transportation Systems Society, 日本磁気学会の各会員。

片山 正昭

1981年阪大・工・通信卒。86年同大学院博士課程了。工博。同年豊橋技術科学大助手。89年阪大・講師。92年名大・講師, 93年助教授, 2001年教授。現在, 名大・エコトピア科学研究所教授(工学研究科電子情報システム専攻教授およびグリーンモビリティ連携研究センター教授兼務)。95年より96年まで, 名大工学部との学術交流協定により, 米国ミシガン大学アンアール校工学部電気電子計算機科学科に滞在。制御と通信の融合, スマートコミュニティ実現のための通信技術の活用, 可視光通信システム, 電力線通信システム, 宇宙システムのための無線通信, 宇宙システムを活用した通信システムなどの研究に従事。日本信頼性学会会員, IEEE シニア会員, 電子情報通信学会フェロー, 2012年度東海支部支部長, 高信頼制御通信研究専門委員長, ワイドバンドシステム研究専門委員会副委員長(元), ソフトウェア無線研究専門委員会副委員長(元)。86年電子通信学会篠原記念学術奨励賞受賞。99, 2001, 2006年電子情報通信学会通信ソサイエティ功労感謝状。2006年電波の日総務省東海総合通信局長表彰。著書, 「Power Line Communications (共著)」, 「無線通信工学(編著)」, 「電力線通信システム(監修)」など。

大日方 五郎 (正会員)

1977年東北大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程修了, 工学博士。同年東北大学高速力学研究所助手, 秋田大学鉱山学部生産機械工学科講師, 助教授を経て, 90年同教授, 2001年名古屋大学大学院工学研究科機械工学専攻教授。2002年名古屋大学先端技術共同研究センター知能システム分野教授。2005年より同センター長, 2007年名古屋大学エコトピア科学研究所融合プロジェクト研究部門教授, 2010年同研究所副所長, 名古屋大学予防早期医療創成センター教授, 2011年名古屋大学グリーンモビリティ連携研究センター教授を兼務, 現在に至る。機械システム制御, 生体運動解析, 運動支援機器の開発などの研究に従事。日本機械学会, 日本ロボット学会, ライフサポート学会, IEEEなどの会員。現在, 自動車技術会副会長, 日本機械学会評議員, バイオメカニズム学会評議員, 日本生活支援工学会理事。