

多台先導車追従モデルによる隊列走行シミュレーションについて

VEHICLE PLATOON SIMULATION USING MULTI-LEADER VEHICLE FOLLOWING MODEL

北 栄輔¹⁾, 朝比奈鋼司²⁾, 牛田千智²⁾, 玉城龍洋³⁾, 村井 希¹⁾

Eisuke KITA, Koji ASAKURA, Chisato USHIDA, Tatsuhiko TAMAKI and Nozomu MURAI

- 1) 名古屋大学大学院情報学研究科 (〒466-8601 名古屋市千種区不老町 1)
 2) 名古屋大学大学院情報科学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町 1)
 3) 沖縄工業高等専門学校 (〒905-2171 沖縄県名護市辺野古 905)

The vehicle velocity control model in the four-vehicles platoon is considered in this study. Each vehicle has one to three leaders. The velocity control model is defined by means of the multi-leader Chandler-type vehicle following model. In the Chandler-type vehicle following model, the vehicle acceleration rate is defined as the linear function of the velocity difference between the vehicle and its nearest leader vehicle. Original Chandler model is extended to the multi-leader model. Stability analysis of the model leads to the model parameters. The validity of the velocity control model is discussed in the platoon simulation of LEGO Mindstorms.

Key Words : Vehicle Platoon, Chandler Model, Stability Analysis, LEGO MIND-STORMS.

1. 緒論

交通渋滞を緩和し交通量を増加させるために様々な取り組みがなされており, その一つに隊列走行がある. 隊列走行とは, 複数の車両が短い車間距離で列をなして走行することによって, 交通量を増大し, あわせて空気抵抗の減少によって燃費向上を目指している. このようなシステムを実現するためには運転者である人間の反応速度だけでは実現することはできないため, 速度の自動制御システムが必要となる. 本研究では, 車車間通信が実現された状況において, 隊列走行する車両が効果的に速度制御するアルゴリズムについて検討し, それを LEGO MINDSTORMS による隊列走行実験に適用する.

車両の速度制御には車両追従モデルを用いる. 代表的なものには, Chandler モデル⁽¹⁾, Newell モデル⁽²⁾, 最適速度モデル⁽³⁾ 等がある. 本研究では, Chandler モデル⁽¹⁾ を改良したモデルを用いる. 本来の Chandler モデルは直前方車両 1 台だけを参照するモデルであるが, 本研究では前方の複数台を先導車とするようにモデルを改良して用いる. 速度制御式の安定性解析よりモデルパラメータが満たすべき条件を求め, シミュレーションより妥当性を確認した後, それを LEGO MINDSTORMS NXT⁽⁴⁾ による隊列走行実験に用いる.

本論文の構成は以下のようになっている. 第 2 節では, 速

度制御モデルとモデルの安定性解析について述べる. 第 3 節ではモデルのシミュレーション結果を示し, 第 4 節で LEGO MINDSTORMS NXT による隊列走行実験について述べる. 最後に, 第 5 節は本論文の結論である.

2. 速度制御モデルの安定性解析

2.1. 車両追従モデル

連なって走行する車両群を考える (図 1). 車両は先頭から $0, 1, \dots$ と番号づける. Chandler モデルによれば, 前方から n 番目の車両の加速度は次式で与えられる⁽¹⁾.

$$\ddot{x}_n(t + \Delta t) = a_1(\dot{x}_{n-1}(t) - \dot{x}_n(t)) \quad (1)$$

ここで $x_n(t)$ は n 番目の車両の時刻 t での位置, Δt は応答の遅れ時間, a_1 は $n-1$ 番目の車両に対する n 番目の車両の感応率を表す. $n-1$ 番目の車両は n 番目の車両の直前方にある車両である. $(\dot{\quad})$ と $(\ddot{\quad})$ はそれぞれ時間に関する 1 次微分と 2 次微分を表す. 式 (1) は, 直前方車両の速度 $\dot{x}_{n-1}(t)$ と自車両の速度 $\dot{x}_n(t)$ の速度差に応じて, 自車両の加速度 $\ddot{x}_n(t)$ を変更するモデルである. このとき, 車両 $n-1$ を車両 n の先導車 (Leader) と呼ぶことにする.

Chandler モデルを隊列走行する車両の速度制御に適用するために, 拡張を考える. 隊列走行する車両は, 直前方車両と衝突しないように制御することが最も重要となる. そこで, 直前方車両からの入力として, 車間距離を加える. さらに, 2 台以上前を走行する先導車に対しては, 車車間通信を用い

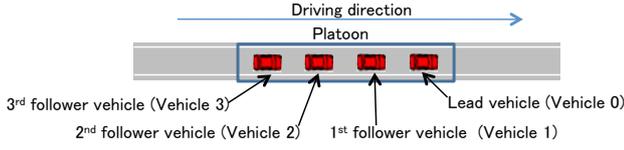


Fig. 1 Vehicle platoon of four vehicles. Vehicles are named as the lead vehicle, the first follower vehicle, the second follower vehicle and the third follower vehicle, respectively.

て情報交換するが、先導車から車間距離情報を取得するよりも、速度情報を取得する方がより容易である。著者らのグループでは、関連研究⁽⁹⁾において、複数の先導車の情報を利用するとより安全な走行を実現できる。そこで、Chandlerモデルを多台参照追従モデルに展開し、車間距離を加えた次のモデルを用いることにする。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_n(t) = & \gamma \{ (x_{n-1}(t - \Delta t_1) - x_n(t - \Delta t_1)) \\ & - (x_{n-1}(t - \Delta t_0) - x_n(t - \Delta t_0)) \} \\ & + \sum_{j=2}^m \lambda_j \{ \dot{x}_{n-j}(t - \Delta t_j) - \dot{x}_n(t - \Delta t_j) \} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで $x_n(t)$ は n 番目の車両の時刻 t での位置、 Δt_0 , Δt_1 , Δt_j は応答の遅れ時間である。 γ は $n-1$ 番目の車両に対する、 λ_{n-j}^n は $n-j$ 番目の車両に対する n 番目の車両の感度をそれぞれ表す。パラメータ m は n 番目の車両が参照する先導車の数である。また、 \dot{x} , \ddot{x} はそれぞれ x の時間に関する1次微分と2次微分を表す。すなわち、 $\dot{x}_n(t)$ は n 番目の車両の時刻 t おける速度を、 $\ddot{x}_n(t)$ は加速度を意味する。

2.2. 安定性解析

外乱による速度変化の影響が車両群の後方になるにつれて小さくなるように、モデルパラメータを設計する。式(2)において、すべての車両が等間隔を保ちながら、等速度で走行している状態を平衡状態とする。そのときの各車両の定常状態 $x_n = x_n^0$ を考え、その近傍の微小なズレ y_n について考える。つまり、

$$x_n = x_n^0 + y_n \quad (3)$$

これを式(2)に代入して整理すると、次式を得る。

$$\begin{aligned} \ddot{y}_n(t) = & \gamma \{ (y_{n-1}(t - \Delta t_1) - y_n(t - \Delta t_1)) \\ & - (y_{n-1}(t - \Delta t_0) - y_n(t - \Delta t_0)) \} \\ & + \sum_{j=2}^m \lambda_j \{ \dot{y}_{n-j}(t - \Delta t_j) - \dot{y}_n(t - \Delta t_j) \} \end{aligned} \quad (4)$$

y_n のフーリエ級数として以下のものが考えられる。

$$y_k(n, t) = \exp(i\alpha_k n + zt), \quad \alpha_k = \frac{2\pi}{N}k, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (5)$$

これを式(4)に代入し、テーラー展開 $e^{-z\Delta t} \simeq 1 - z\Delta t$ を適用して整理すると次式を得る。

$$\begin{aligned} z = & \gamma (e^{-i\alpha_k} - 1) (\Delta t_0 - \Delta t_1) \\ & + \sum_{j=2}^m \lambda_j (1 - z\Delta t_j) (e^{-i\alpha_k j} - 1) \end{aligned} \quad (6)$$

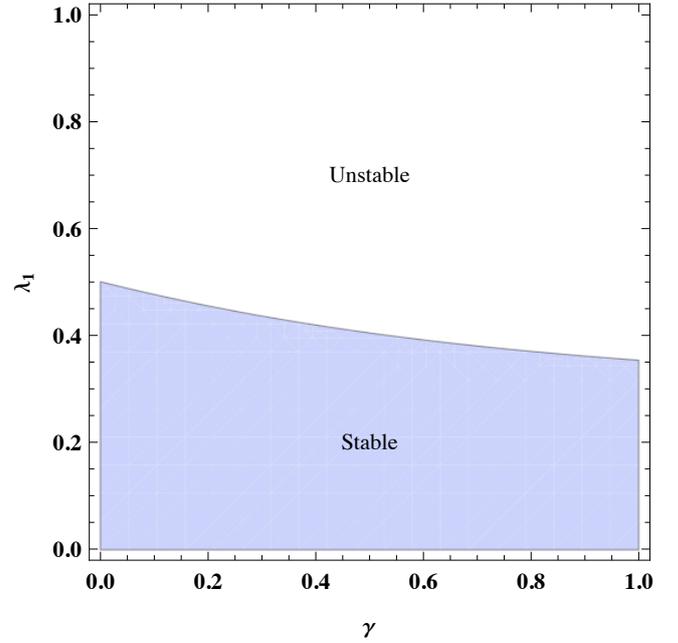


Fig. 2 Stability region of parameters in case of $m = 2$.

$m = 2$ の場合について式(6)は以下のようになる。

$$\begin{aligned} z = & \gamma (e^{-i\alpha_k} - 1) (\Delta t_0 - \Delta t_1) \\ & + \lambda_2 (1 - z\Delta t_2) (e^{-i\alpha_k 2} - 1) \end{aligned} \quad (7)$$

整理して、オイラーの公式

$$e^{-i\alpha_k} = \cos(\alpha_k) - i \sin(\alpha_k) \quad (8)$$

を適用すると以下の式を得る。

$$\begin{aligned} z = & (\cos(\alpha_k) - i \sin(\alpha_k) - 1) \{ \gamma (\Delta t_0 - \Delta t_1) \\ & + \lambda_2 (1 - z\Delta t_2) (\cos(\alpha_k) - i \sin(\alpha_k) + 1) \} \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)の解である z の実部が正のとき、式(5)を吟味すると y_k の値は時間経過により発散してしまうため、ダイナミクス(2)は不安定となってしまふ。 z の実部が負のとき、 y_k の値は時間経過により0に収束するため、ダイナミクス(2)は安定である。 z の実部が0のとき、ダイナミクス(2)は臨界状態である。

ダイナミクス(2)の安定条件を求めると、次式を得る。

$$\begin{aligned} & 2\{ \gamma (\Delta t_0 - \Delta t_1) + 2\lambda_2 \} \cdot 2\lambda_2 \Delta t_2 \\ & - \{ \gamma (\Delta t_0 - \Delta t_1) + 4\lambda_2 \} < 0 \end{aligned} \quad (10)$$

例えば、遅れ時間を $\Delta t_1 = \Delta t_2 = 1$, $\Delta t_0 = 2$ とすると、式(10)より、 γ 及び λ_2 は次式を満足しなければならない。

$$2(\gamma + 2\lambda_2) \cdot 2\lambda_2 - (\gamma + 4\lambda_2) < 0 \quad (11)$$

このときの安定領域のグラフを図2に示す。色付けされている部分が提案モデルの安定領域である。

$m = 3, 4$ について安定性解析を行い、まとめると安定条件

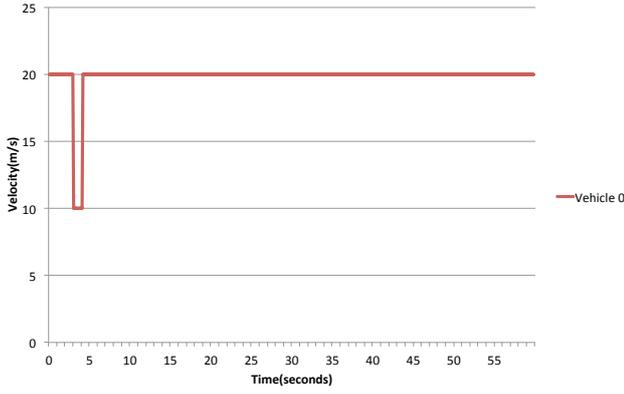


Fig. 3 Velocity history of the lead vehicle. The velocity decreases at 3 (s) and increase at 4 (s).

Table 1 Sensitivities in model in simulation 1.

Vehicle	γ	λ_2
Vehicle 1	1	1/2
Vehicle 2	1	$\sqrt{2}/2$
Vehicle 3	1	$\sqrt{2}/2$

Table 2 Sensitivities in model in simulation 2.

Vehicle	γ	λ_2
Vehicle 1	1	1/2
Vehicle 2	1	$\sqrt{2}/2$
Vehicle 3	1	1/3

は次式で与えられる.

$$2\{\gamma(\Delta t_0 - \Delta t_1) + \sum_{j=2}^m (j \cdot \lambda_j)\} \cdot \left\{ \sum_{j=2}^m (j \cdot \lambda_j \cdot \Delta t_j) \right\} - \{\gamma(\Delta t_0 - \Delta t_1) + \sum_{j=2}^m (j^2 \cdot \lambda_j)\} < 0 \quad (12)$$

3. 数値シミュレーション

3.1. シミュレーション条件

シミュレーション対象として、片側1車線道路を4台の車両が隊列走行する状態を考える。このとき、車両番号を先頭より0,1,2,3とする。各車両の初期速度は20(m/s)とする。先頭車両(車両番号0)は、時刻 $t = 3$ (s)において突然速度を10(m/s)まで急減速する。そのままの速度で1秒間走行した後、再び速度20(m/s)に加速し、等速度運動する(図3)。他の追従車両には、以下の2つの速度制御アルゴリズムを適用して比較する。各車両の初期の前方車両との車間距離は10(m)、1タイムステップは実時間で0.1(s)とする。

シミュレーション1: 自車両の直前方車両とその1台前の車両の2台を参照する。この場合の各車両の速度制御モデルは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_n(t) = & \gamma \{ (x_{n-1}(t - \Delta t_1) - x_n(t - \Delta t_1)) \\ & - (x_{n-1}(t - \Delta t_0) - x_n(t - \Delta t_0)) \} \\ & + \{ \lambda_2 (\dot{x}_{n-2}(t - \Delta t_2) - \dot{x}_n(t - \Delta t_2)) \} \end{aligned} \quad (13)$$

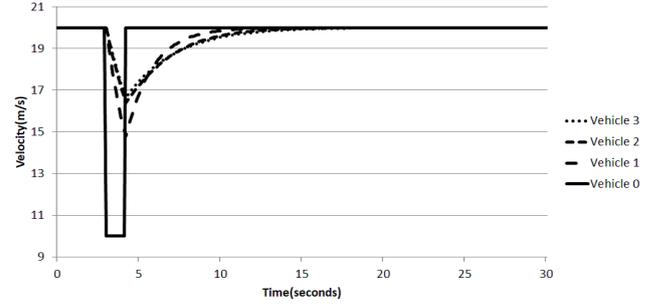


Fig. 4 Velocity histories of vehicles in simulation 1. The blue, the purple, the green and the red lines denote the velocity histories of the lead vehicle, the first follower vehicle, the second follower vehicle and the third follower vehicle, respectively.

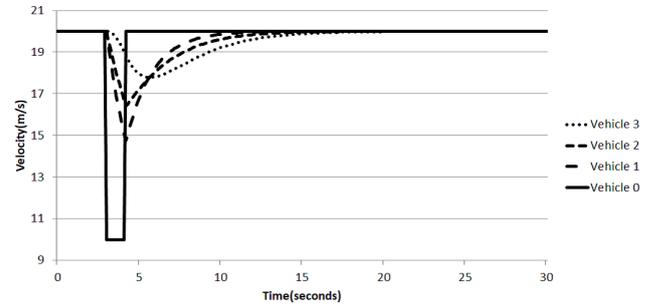


Fig. 5 Velocity histories of vehicles in simulation 2. The blue, the purple, the green and the red lines denote the velocity histories of the lead vehicle, the first follower vehicle, the second follower vehicle and the third follower vehicle, respectively.

ここで、2節で導いた安定条件に基づいて、感度は表1のように与える

シミュレーション2: シミュレーション2では、自車両の直前方車両と隊列の先頭車両の2台を参照する速度制御アルゴリズムである。この場合の速度制御モデルは次式で与えられる。ここで、 l は先頭車両を表す。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_n(t) = & \gamma \{ (x_{n-1}(t - \Delta t_1) - x_n(t - \Delta t_1)) \\ & - (x_{n-1}(t - \Delta t_0) - x_n(t - \Delta t_0)) \} \\ & + \{ \lambda_l (\dot{x}_l(t - \Delta t_l) - \dot{x}_n(t - \Delta t_l)) \} \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、2節で導いた安定条件に基づいて、感度は表2のように与える

3.2. シミュレーション結果

シミュレーション1, 2による隊列走行のシミュレーション結果をそれぞれ図4, 図5に示す。横軸が時間経過、縦軸が車両速度である。ラベル Vehicle 0, Vehicle 1, Vehicle 2, Vehicle 3は、それぞれ、先頭車両、第1追従車両、第2追従車両、第3追従車両を表す。

隊列の最後の追従車両である Vehicle 3 の速度変化を比較する。その結果を図6に示す。横軸が時間経過、縦軸が車両

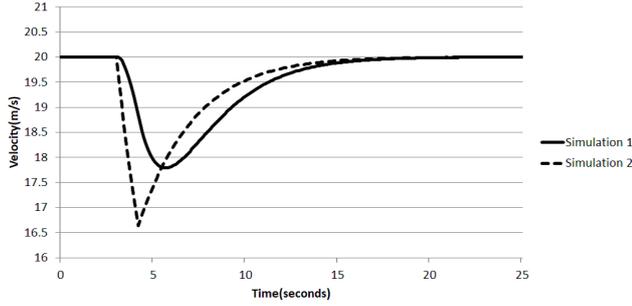


Fig. 6 Comparison of velocity histories of the third vehicles in simulation 1 and 2.

速度であり、ラベル Simulation 1, Simulation 2 はそれぞれシミュレーション 1, シミュレーション 2 を表す。実験 1 において第 3 追従車両の速度が最も遅いのはシミュレーション時間で 5.7(s) の時であるのに対し、実験 2 では 4.2(s) の時点である。第 3 追従車両の速度が元の速度にもどっているのは、実験 1 ではシミュレーション時間で 15.5(s) 付近であるのに対して、実験 2 では 14.0(s) 付近である。このことは、実験 1 よりも実験 2 の速度制御アルゴリズムの方が、第 3 追従車両の減速が早く始まり、早く元の速度に回復していることを示している。このことから、隊列の先頭車両の速度情報を用いることは第 3 追従車両の速度回復を改善するために効果的といえる。

4. LEGO MINDSTORMS による実験

第 3 節のシミュレーション結果を基に、LEGO MINDSTORMS NXT を用いた隊列走行実験を行う。

4.1. 速度制御アルゴリズム

速度制御アルゴリズムとして、1 台参照型の Chandler モデルと、第 3 節のシミュレーション 2 で用いた制御モデルの 2 種類を用いる。

本実験において、隣接していない車両同士の通信には Bluetooth を用いる。Bluetooth 通信において、情報を発信する車両を Master、受信する車両を Slave と呼ぶことにする。LEGO MINDSTORMS NXT 同士の通信では、1 台の車両が Master と Slave の役割を常時兼ねることができないので、直前方車両からその車両の速度情報を得ることができない。この問題を解決するために、Chandler モデルについては修正を加えることとする。

4.1.1. Chandler モデル

Chandler モデルは次式で与えられる。

$$\ddot{x}_n(t + \Delta t) = a(\dot{x}_{n-1}(t) - \dot{x}_n(t)) \quad (15)$$

ここで、右辺の $\dot{x}_{n-1}(t) - \dot{x}_n(t)$ は車間距離の差分として次式で近似的に求めることとする。

$$\begin{aligned} \dot{x}_{n-1}(t) - \dot{x}_n(t) &\equiv \Delta \dot{x}_{n-1}(t) \\ &\simeq \frac{\Delta x_{n-1}(t) - \Delta x_{n-1}(t - \Delta t)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、 $\Delta x_{n-1}(t)$ は時刻 t における車両 $n-1$ と車両 n の



Fig. 7 Experimental landscape of vehicle platoon of MIND-STORMS.

車間距離を示す。つまり、

$$\Delta x_{n-1}(t) = x_{n-1}(t) - x_n(t) \quad (17)$$

ここで、 $a = 1/2$ とする。

4.1.2. 提案モデル

自車両と直前方車両との車間距離と、隊列の先頭車両の速度を用いて、自車両の加速度を決定する速度制御アルゴリズムである。ここで、 l は先頭車両を表す。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_n(t) = &\gamma \{ (x_{n-1}(t - \Delta t_1) - x_n(t - \Delta t_1)) \\ &- (x_{n-1}(t - \Delta t_0) - x_n(t - \Delta t_0)) \} \\ &+ \sum_{j=2}^m \{ \lambda_j (\dot{x}_{n-l}(t - \Delta t_l) - \dot{x}_n(t - \Delta t_l)) \} \end{aligned} \quad (18)$$

ここで、提案モデルの感度については、2 節で導いた安定条件に基づいて、 $\gamma = 1, \lambda_1 = 1/2, \lambda_2 = \sqrt{2}/4, \lambda_3 = 1/3$ とする。

4.2. 実験条件

第 3 節で行ったシミュレーションと同様に、4 台の車両が 1 列に並んだ状態で隊列走行する。LEGO MINDSTORMS NXT には白地に黒で描かれた直線上を走行させる。このとき、LEGO MINDSTORMS NXT はカラーセンサを用いて黒いラインを識別し、ラインに沿って走行する (図 7)。

提案モデルにおいて、先頭車両からの速度情報の取得には、前述の Bluetooth 通信を用いる。本実験では先頭車両が Master となり、第 1 追従車両、第 2 追従車両、第 3 追従車両の計 3 台が Slave となる。Slave である第 1 追従車両、第 2 追従車両、第 3 追従車両は、Bluetooth 通信を用いて、Master である先頭車両から速度情報を受け取る。また、直前方車両との車間距離情報に関しては、各車両に接続されている超音波センサを用いて取得する。車間距離情報においては、Chandler モデルの場合も同様である。

実験において、各車両は最大出力の 75% のモータ出力で走行を開始する。また、各車両の前方車両との初期の車間距離は 15(cm) とする。先頭車両 (車両番号 0) は、開始から 5 秒後において、突如モータ出力を最大値の 50% に落とし、減速する。その後、開始から 7 秒後に再びモータ出力を最大値の 75% まで増加させ、それ以後 75% の出力を維持する。以上の条件下での、各車両の速度変化の様子について観察する。

4.3. 実験結果

LEGO MINDSTORMS NXT による隊列走行実験の結果を図 8 と図 9、表 3 及び表 4 に示す。図 8 及び図 9 は、各車両の速度変化図であり、横軸が時間経過、縦軸が車両速度である。表 3 と表 4 では、各追従車両の最高速度 (Maximum),

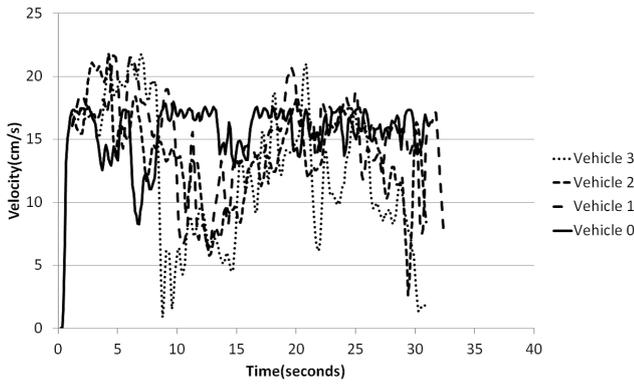


Fig. 8 Vehicles velocity by Chandler model.

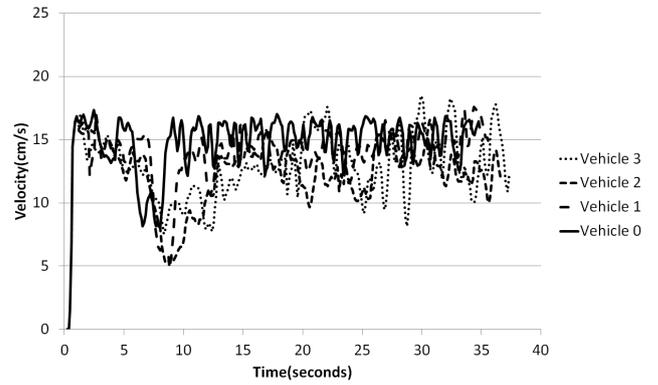


Fig. 9 Vehicles velocity by proposal model.

Table 3 Breakdown of the velocity difference in case of Chandler model.

Vehicle	Maximum (<i>cm/s</i>)	Minimum (<i>cm/s</i>)	Amplitude (<i>cm/s</i>)
Vehicle 1	21.66	6.41	15.25
Vehicle 2	21.81	2.64	19.18
Vehicle 3	21.78	0.88	20.90

最低速度 (Minimum), 及び速度の振れ幅 (Amplitude) すなわち, 最高速度と最低速度の差を示す. また, 図 8, 図 9, 表 3, 表 4 すべてにおいて, ラベル Vehicle 0, Vehicle 1, Vehicle 2, Vehicle 3 は, それぞれ, 先頭車両, 第 1 追従車両, 第 2 追従車両, 第 3 追従車両を表す.

図 8 及び図 9 から, Chandler モデルを用いた場合と提案モデルを用いた場合の双方とも, 追従車両 3 台共が先頭車両の速度変化に伴い, 加減速を行っている様子が見て取れる. しかし, 2 つの速度変化図を比較すると, 図 9 で示される提案モデルを用いた実験の方が, より速度の変動幅が小さいことがわかる. この事象は, 表 3 と表 4 の比較により, 更にははっきりと示される. 提案モデルを用いた場合は Chandler モデルを用いた場合よりも, 全ての追従車両について, 最高速度は小さく, 最低速度は大きく, 速度の振れ幅は小さくなっている. したがって, スムーズな車両の速度制御を行う上で, 直前方車両と隊列の先頭車両を参照する提案モデルの方が, 1 台参照を行う Chandler モデルよりも, より適していると考えられる.

また, 提案モデルを用いた実験単独で考えると, 表 4 より, 第 1 追従車両, 第 2 追従車両, 第 3 追従車両と後方の車両になるに従って, 最低速度が大きくなっていることがわかる. 同様に, 速度の振れ幅は後ろに行くにつれて小さくなっている. 第 3 節のシミュレーションにおいても, これらと同様の現象を確認することが出来た. これらの結果は, 先頭車両の速度変化から受ける影響が, 後続車両ほど小さくなっていることを示している. これは, 提案した車両追従モデルの適用により実現が期待されていた効果である.

以上より, LEGO MINDSTORMS NXT を用いた隊列走行実験においても, 提案の車両追従モデルにより, シミュレー

Table 4 Breakdown of the velocity difference in case of proposal model.

Vehicle	Maximum (<i>cm/s</i>)	Minimum (<i>cm/s</i>)	Amplitude (<i>cm/s</i>)
Vehicle 1	17.59	4.78	12.81
Vehicle 2	16.59	5.26	11.33
Vehicle 3	18.47	7.54	10.93

ションで予想されたと同様の効果が得られていることが確認できる.

5. 結論

隊列走行とは, 複数の車両が短い車間距離で列をなして走行することによって, 交通量を増大し, あわせて空気抵抗の減少によって燃費向上を目指す方法である. 本研究では, 片側 1 車線道路を 4 台の車両が隊列走行する場合において, 効率的な隊列走行を実現するための車両の速度制御方法について研究した.

速度制御モデルとして, Chandler モデルを多台参照追従モデルに拡張し, 車間距離項を加えたモデルを提案した. モデルの安定性解析からパラメータの安定領域を決定した. それをもとにパラメータを設計し, 計算機シミュレーションと LEGO MINDSTORMS を用いた実験を示した.

計算機シミュレーションにおいて, 直前方車両とその 1 台前の車両の 2 台を参照する場合と, 直前方車両と隊列の先頭車両の 2 台を参照する場合を比較した. 後者のほうが, 隊列の最後尾車両の速度回復が早かった.

つづいて, LEGO MINDSTORMS NXT による隊列走行実験を行った. シミュレーションと同様に, 4 台の車両が 1 列に並んだ状態で隊列走行を行い, 先頭車両の速度を変化させた場合の追従車両の速度変化の様子に着目した. その結果, シミュレーション結果とよく一致する結果を得られたので, モデルの有効性を確認することができた.

今後の課題として, 車両追従モデルにおける参照車両に対する感度を関数化することで, より効率的でスムーズな速度制御を実現することがある.

参考文献

- (1) R. E. Chandler, R. Herman, and E. W. Montroll. Traffic dynamics ; studies in car-following. *Operations Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 165–184, 1958.
 - (2) G. F. Newell. Nonlinear effects in the dynamics of car following. *Operations Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 209–229, 1961.
 - (3) M. Bando, K. Hasebe, K. Nakanishi, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama. Phenomenological study of dynamical model of traffic flow. *Journal of Physics I France*, Vol. 5, pp. 1389–1399, 1995.
 - (4) LEGO. Lego mindstorms education. <http://www.legoeducation.jp/mindstorms/>.
 - (5) S. Bexelius. An extended model for car-following. *Transportation Research*, Vol. 2, No. 1, pp. 13–21, 1968.
 - (6) Y. Wakita, T. Iguchi, H. Shimizu, T. Tamaki, and E. Kita. Comparison of zipper and non-zipper merging patterns near merging point of roads. *International Journal of Natural Computing Research*, Vol. 1, No. 3, pp. 19–29, 2010.
 - (7) NBC, NXC, SPC. <http://bricxcc.sourceforge.net/nbc/>.
 - (8) Bricx command center 3.3. <http://bricxcc.sourceforge.net/>.
 - (9) Y. Wakita, T. Iguchi, H. Shimizu, T. Tamaki, and E. Kita. Cellular automata simulation of traffic jams at the merging point of roads. In B. H. V. Topping and Y. Tsompanakis, editors, *Proceedings of the First International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering*, paper35, 2009. Civil-Comp Press.
-