# 隊列走行車両群の分流走行挙動シミュレーション

# SHUNTING BEHAVIOR SIMULATION OF VECHILES FROM VEHICLE PLATOON

北 栄輔<sup>1)</sup>, 高上 寬斗<sup>2)</sup>, 玉城龍洋<sup>3)</sup>, 村井 希<sup>1)</sup>

Eisuke KITA, Hiroto TAKAUE, Tatsuhiro 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)

This paper focuses on the shunting behavior of vehicles from one vehicle platoon. The vehicle velocity control model is defined by means of the Helly model. The model parameters are determined by solving the optimization problem whose objective function is defined as the summation of the control parameters. The validity of models is discussed in the computer simulation and the experiments of LEGO MINDSTORMS. The results show that the proposal model can control the vehicles in the platoon safely and that the experimental results agree well with the computer simulation.

*Key Words* : Vehicle Platoon, Helly Model, Computer Simulation, LEGO MIND-STORMS.

#### 1. 緒論

経済成長の進展に伴って,交通量が増加していている.その結果,交通渋滞が発生し,それが引き起こす経済損失や環境問題の悪化は大きな問題となっている<sup>(1)</sup>.

交通渋滞は,交通集中により交通需要が交通容量を上回る ことによって発生する.そこで,自動車と他の交通機関を連 携させて都市部での集中を緩和させたり,自動車以外の交通 手段の利用を推進することで,交通需要を調整する方法が検 討されている<sup>(1,2,3,4)</sup>.これらに加えて,隊列走行を用い る方法も広く検討されている.隊列走行では,車両が短い車 間距離で列をなして走行することで交通容量を増大し,高速 走行時の空気抵抗の低減を目的としている.

隊列走行技術が実社会で広く利用されるためには, 解決す るべき課題がいくつかある.その一つが, 具体的な交通状況 であるユースケース(合流,分流,車線変更等)ごとの走行 方法の確立である<sup>(5)</sup>.これまでの研究では,安定して隊列 を実現することが目的である.しかし,ユースケースにおい ては,隊列を構成する車両群が動的に変化しながら,隊列走 行を実現する必要がある.本研究では,このうちから分流に ついて検討する.分流とは,隊列を構成する車両群から,特 定の車両が分かれて別の方向に走行する交通状況である.

本研究室において,これまでにも分流挙動に関する研究を 行っている<sup>(6)</sup>.この研究では,車両の速度制御に Chandler モデル<sup>(7)</sup>という直前方車両との相対速度のみで加速度を制 御する車両追従モデルを採用し,数値シミュレーションによっ て検討している.これに対して,本研究では直前方車両との 相対速度だけでなく車間距離などを含んだ車両追従モデルの 一つである Helly モデル<sup>(8)</sup> とその改良モデルを用いて数値 シミュレーションを行い,その結果を LEGO MINDSTORMS NXT<sup>(9)</sup> を用いた実験と比較する.

本論文の構成は、以下のようになっている.第2節では、 本研究で用いる速度制御モデルとモデルパラメータの決定方 法について説明する.第3節では、扱う交通状況と速度制御 モデルで用いるパラメータについて述べる.第4節では、実 験結果を示し、数値シミュレーション結果と比較する.第5 節において、まとめと今後の課題を示す.

#### 2. 速度制御モデル

#### 2.1. 車両追従モデル

車両追従モデルは追従車両が前方を走行する車両との車間 距離や相対速度などの変化を入力とし、これに対応した反応 として、加速度や速度などの情報を出力する.これまで様々 な研究者によって車両追従モデルが提案されている.本章で は、以下に挙げる Helly モデルとその改良モデルを用いる. モデルの説明のために、N 台の車両が連なって走行する状態 図 1 を考える.

#### 2.1.1. Helly モデル

1959年に Helly が次式で与えられるモデルを提案してい

<sup>2020</sup>年11月1日受付, 2020年11月16日受理



Fig. 1 Platoon of N vehicles

る <sup>(8)</sup>.

$$\ddot{x}_{n}(t + \Delta t) = \alpha(\dot{x}_{n-1}(t) - \dot{x}_{n}(t)) + \beta(x_{n-1}(t) - x_{n}(t) - D_{n}(t))$$
(1)

ここで,時刻 t での n 番目車両の位置を  $x_n(t)$ , n-1 番目 の車両の位置を  $x_{n-1}(t)$  と示す.したがって,  $\dot{x}_n(t)$ ,  $\dot{x}_{n-1}(t)$ は車両の速度,  $\ddot{x}_n$  は車両の加速度となる.また,  $\alpha$ ,  $\beta$  はそ れぞれ感度を表し,  $D_n(t)$  は理想的な車間距離を与える関数 であり,以下の次式で定義される.

$$D_n(t) = a + b\dot{x}_n(t) + c\ddot{x}_n(t) \tag{2}$$

このモデルは相対速度と、理想的車間距離と車間距離の差分 とを線形和したものとなっている.つまりこの方程式は運転 者は前方車両との相対速度に応じてアクセルのふみ加減を決 定し、さらに適切な車間距離を保とうとするという認識に基 づいている.

#### 2.1.2. 改良 Helly モデル

改良 Helly モデルでは, Helly モデルの式 (2) を, 実測か ら求めた速度に依存する理想的車間距離の関数に変更して いる.

改良 Helly モデルの定義式は Helly モデルと同一で式 (1) である.ただし,理想的車間距離  $D_n(t)$  は次式で与えられる  $^{(10)}$ .

$$D_n(t) = 0.0029\dot{x}_n^2(t) + 0.3049\dot{x}_n(t) \tag{3}$$

上式は,実際に走行している車両の画像データから決定した ものである<sup>(10)</sup>.

### 2.2. パラメータ設計法

最適化問題を解くことで各車両で採用する車両追従モデ ルの感度を決定する.目的関数 Jを以下に示す.

$$J = w_1 T_d + w_2 O_s + w_3 E_{lim} + w_4 D \tag{4}$$

ここで, *T<sub>a</sub>* は遅れ時間であって,本研究では自車両の出力 が各目標値(直前方車の速度,理想的車間距離,先頭車の速 度)の50% になる時間として定義している. *O<sub>s</sub>* は行き過ぎ 量(オーバーシュート量)であって,本研究では自車両の出力 が各目標値(直前方車両の速度,理想的車間距離,先頭車両 の速度)より大きくなった値の最大値である. *E<sub>lim</sub>* は定常偏 差であって,本研究ではシミュレーションの終端値における 自車両の出力と各目標値(直前方車両の速度,理想的車間距 離,先頭車両の速度)の差である.最後に,*D* は理想的車間 距離と車間距離の差分の積算値である.*D* は制御工学に基 づいた指標ではないが,本研究で想定している分流挙動にお いて,車間距離を詰めることを重視しているため,この指標

Table 1 1	nitial conditions of simulation					
	Accel.	Vel.	Pos.	Pos.		
			(Ex.1)	(Ex.2)		
Lead	0	11.8	-90	-90		
1st follower	0	11.8	-130	-123		
2nd follower	0	11.8	-170	-156		
3rd follower	0	11.8	-210	-189		
4th follower	0	11.8	-250	-222		
5th follower	0	11.8	-290	-255		

を加える. w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, w<sub>3</sub>, w<sub>4</sub> は各評価指標の重みを表し, (0,1] の範囲で定義する. 各評価指標の値はスケールを統一するた めに無次元化を行っている.

設計変数として車両追従モデルの感度をとる。制約条件は 各車両の加速度の計算において,実機実験に用いる実験車両 の性能である。

パラメータ設計アルゴリズムを以下に示す.

- 数値シミュレーションで用いる感度と評価関数の暫定 的な最小値を初期化する.
- 2. 隊列走行おける分流挙動の数値シミュレーションを行い、各評価指標を計算する.
- 3. 数値シミュレーションで計算した評価指標を用いて評価関数 J を計算し,その値を現在の感度における評価 関数の値とする.
- 計算した評価関数が暫定的な最小値よりも小さい値な らば暫定的な最小値を更新し,暫定的な最適な感度を 更新する.
- 5. 数値シミュレーションで用いる感度に 0.01 を加える.
- 6.2から5を繰り返す.
- 7. 感度の値が1を超えたら計算を終了する.

### 3. 実験状況とパラメータ決定

#### 3.1. 実験状況

本研究では、分流シミュレーションの実機での検証のために、 LEGO MINDSTORMS NXT<sup>(9)</sup>を用いる.LEGO MIND-STORMS NXT は LEGO 社とマサチューセッツ工科大学が 共同で教育用に開発したロボットである.本実験で用いる実 験コースは全長 7[m] で木材を加工している.各車両はコー スの溝に沿って走行しながら速度制御を行う.また、分流車 両は分流地点で左右のモータ出力の比率を変更して分流を 行う.

本研究は6台隊列車両の中から3台が分流する状況を想 定して実験を行う.本実験における各車両の制御は4つの フェーズに分類される.各フェーズにおける各車両の参照車 両と加速度計算の手法について説明する.

本研究では,初期条件が異なる2種類の実験を行う.それ ぞれを実験1および実験2とする.実験1は初期車間距離が 分流モデルにおける理想的車間距離と同じ場合,実験2は初 期車間距離が理想的車間距離より小さい場合である.両方の

Table 2Helly model parameter for experiment 1

	Before shunting			After shunting		
	α	$\beta$	$\gamma$	α	$\beta$	$\gamma$
1st follower	1.0	0.14	0	0	0	0
2nd follower	1.0	0.36	0.86	0.97	0.5	0
3rd follower	0.23	0.02	0.93	0.92	0.09	0
4th follower	0.01	0.13	0.98	1.0	0.02	0.23
5th follower	0.01	0.23	1.0	0.2	0.19	0.41

Table 3Helly model parameter for experiment 2

	Before shunting			After shunting		ting
	α	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	β	$\gamma$
1st follower	0.99	0.2	0	0	0	0
2nd follower	0.46	0.01	0.95	0.83	0.08	0
3rd follower	0.76	0.01	0.93	1.0	0.46	0
4th follower	0.02	0.01	0.04	0.18	0.01	0.07
5th follower	0.02	0.01	0.04	0.05	0.39	0.97

場合において,初期速度と初期加速度は同じである.それぞ れの条件を表1にまとめて示す.

### 3.2. 速度制御手法

先頭車両は、一定速度で走行する. Bluetooth 通信を用い て、追従車両に自車両の速度を送信する.

追従車両は.提案した分流モデルを用いて加速度を計算 する.自車両の座標はタイヤの回転角から計算したオドメト リを用いて計算する.直前方車両の車間距離は超音波セン サを用いて計測する.直前方車両との相対速度は車間距離 の差分として次式で近似的に求める.また,先頭車の速度は Bluetooth 通信を用いて取得する.

$$\dot{x}_{n-1}(t) - \dot{x}_n(t) \equiv \Delta \dot{x}_{n-1}(t)$$

$$\simeq \frac{\Delta x_{n-1}(t) - \Delta x_{n-1}(t - \Delta t)}{\Delta t}$$
(5)

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 車間距離を示す. つまり,

$$\Delta x_{n-1}(t) = x_{n-1}(t) - x_n(t) \tag{6}$$

### 3.3. パラメータ決定

### 3.3.1. Helly モデルのパラメータ

理想的な車間距離を 13[cm] として, 2.2 節のアルゴリズム によって感度を決定する.実験1のために決定した感度を表 2 に,実験2のために決定した感度を表3に示す.いずれの 実験においても,第1追従車両は分流前は直前方車両であ る先頭車両の速度と車間距離しか参照しないため, $\gamma = 0$ に なっており,分流後は一定速度で走行するため,全ての感度 が0になっている.同様に分流後の第2,第3追従車両は直 前方車両である先頭車両,第1追従車両の速度,車間距離し か参照しないため, $\gamma = 0$ になっている.

Table 4 Improved Helly model parameter for experiment 1

	Before shunting			After shunting		
	α	β	$\gamma$	α	β	$\gamma$
1st follower	0.91	0.26	0	0	0	0
2nd follower	0.7	0.01	0.81	0.37	0.03	0
3rd follower	0.01	0.03	0.98	0.24	0.01	0
4th follower	0.01	0.12	1.0	0.01	0.04	0.35
5th follower	0.01	0.12	0.99	1.0	0.06	0.98

Table 5 Improved Helly model parameter for experiment 2

	Before shunting			After shunting		
	α	β	$\gamma$	$\alpha$	β	$\gamma$
1st follower	1.0	0.98	0	0	0	0
2nd follower	0.57	0.01	0.67	0.12	0.01	0
3rd follower	0.42	0.98	0.97	0.91	0.08	0
4th follower	0.36	0.86	0.99	0.01	0.04	1.0
5th follower	0.45	0.24	1.0	0.18	0.08	0.17

# 3.3.2. 改良 Helly モデルのパラメータ

理想的な車間距離を 13[cm] として、2.2 節のアルゴリズム によって感度を決定する.実験1のために決定した感度を表 4 に、実験2のために決定した感度を表5に示す.いずれも. 第1追従車両は分流前は直前方車両である先頭車両の速度と 車間距離しか参照しないため、 $\gamma = 0$ になっており、分流後 は一定速度で走行するため、全ての感度が0になっている. 同様に分流後の第2、第3追従車両は直前方車両である先頭 車両、第1追従車両の速度、車間距離しか参照しないため、  $\gamma$ は0になっている.

#### 4. 実験結果

# 4.1. Helly モデルによる実験結果

#### 4.1.1. 実験1

分流前において,隊列走行する車両は先頭から先頭車両 (Lead vehicle),第1追従車両 (1st follower vehicle),第2追 従車両 (2nd follower vehicle),第3追従車両 (3rd follower vehicle),第4追従車両 (4th follower vehicle),第5追従車 両 (5th follower vehicle)と名付けられている.分流点におい て,第1追従車両 (1st follower vehicle),第3追従車両 (3rd follower vehicle),第5追従車両 (5th follower vehicle)の3台 の車両が隊列から別方向に分流し,別の隊列を構成する.

実験1の実験結果を図2と図3に示す.図中のグラフは各 車両の軌跡を表し,横軸は時間[0.1*s*]を,縦軸は座標[cm]を 表す.分流地点の座標を0[cm]に設定している.図2は,分流 しない先頭車両 (Lead vehicle),第2追従車両 (2nd follower vehicle),第4追従車両 (4th follower vehicle)の軌道を示し, 図3は,分流する第1追従車両 (1st follower vehicle),第3 追従車両 (3rd follower vehicle),第5追従車両 (5th follower vehicle)の軌道を示す.



Fig. 2 Trajectory of un-shunting vehicles in experiment 1 (Helly model)



Fig. 3 Trajectory of shunting vehicles in experiment 1 (Helly model)

Table 6Comparison of computer simulation and experi-ment (Helly model)

	CC	RMSE [cm]
1st follower	0.999	5.7
2nd follower	0.994	24.8
3rd follower	0.998	13.7
4th follower	0.995	33.6
5th follower	0.998	20.6

分流前において,各車両の実験結果は数値シミュレーション結果とほぼ同じとなっている.分流後において,実験結果は数値シミュレーション結果に比べて加速が小さく,実験とシミュレーションにずれが生じている.ただし,シミュレーションの最後である 40s においては,実験とシミュレーションは同じ値に収束している.

相関係数 Correlation coefficient(Correlation coefficient; CC) と平均二乗誤差 (Root mean square error; RMSE)の計算結 果を以下の表 6 に示す.各指標を見ると,相関係数が高く, シミュレーション結果と実機実験結果は高い正の相関を持つ ことがわかる.したがって,この分流モデルは実機への再現 性が高いことがわかる.また,平均二乗誤差を見ると第1追



Fig. 4 Trajectory of un-shunting vehicles in experiment 2 (Helly model)



Fig. 5 Trajectory of shunting vehicles in experiment 2 (Helly model)

Table 7Comparison of computer simulation and experi-ment (Improved Hellly model)

	CC	RMSE [cm]
1st follower	0.999	5.3
2nd follower	0.999	28.2
3rd follower	0.995	25.5
4th follower	0.999	7.1
5th follower	0.999	22.7

従車両以外の車両は理想的車間距離よりも大きな誤差を持つ ことがわかる.

# 4.1.2. 実験 2

実験2の実験結果を図4と図5に示す.図4は,分流しない 先頭車両 (Lead vehicle),第2追従車両 (2nd follower vehicle), 第4追従車両 (4th follower vehicle)の軌道を示し,図5は, 分流する第1追従車両 (1st follower vehicle),第3追従車両 (3rd follower vehicle),第5追従車両 (5th follower vehicle)の 軌道を示す.

分流しない車両のうち,第2追従車両は分流前から分流 直後までは数値シミュレーションとほぼ同じ挙動を示してい るが,分流地点を通過後しばらくしてから実験結果と数値シ



Fig. 6 Trajectory of un-shunting vehicles in experiment 1 (Improved Helly model)



Fig. 7 Trajectory of shunting vehicles in experiment 1 (Improved Helly model)

Table 8Comparison of computer simulation and experi-ment (Improved Hellly model)

	CC	RMSE [cm]
1st follower	0.999	3.8
2nd follower	0.996	32.4
3rd follower	0.999	14.9
4th follower	0.995	41.3
5th follower	0.997	17.8

ミュレーション結果が離れている.また第4追従車両は始終 数値シミュレーションと同じような挙動を示している.これ に対して,第2追従車両において実験結果とシミュレーショ ン結果のずれは他に比べて大きい.この原因として,車両セ ンサーの測定誤差などが考えられる.

分流する車両のうち,第3追従車両については分流後,数 値シミュレーションとは異なり急加速し車間距離を詰めてい ることがわかる.第5追従車両は車線が分流直後は反応が 悪く,すぐには加速できていないけれども,Time=40sにお いては実験結果と数値シミュレーション結果はほぼ一致して いる.

相関係数と平均二乗誤差の計算結果を表7に示す.相関係



Fig. 8 Trajectory of un-shunting vehicles in experiment 2 (Improved Helly model)



Fig. 9 Trajectory of shunting vehicles in experiment 2 (Improved Helly model)

Table 9 Comparison of computer simulation and experi-ment (Improved Hellly model)

	CC	RMSE [cm]
1st follower	0.999	5.1
2nd follower	0.999	16.4
3rd follower	0.997	20.2
4th follower	0.999	18.1
5th follower	0.998	28.4

数が高く、シミュレーション結果と実機実験結果は高い正の 相関を持つことがわかる.したがって、この分流モデルは実 機への再現性が高いことがわかる.また平均二乗誤差を見る と第1追従車両、第4追従車両を除く他の車両は理想的車間 距離よりも大きな値になっていることがわかる.

# **4.2.** 改良 Helly モデルによる実験結果

# 4.2.1. 実験1

実験結果を図6と図7に示す.各車両は衝突することなく 走行しており、さらに各分流車両が分流後、各追従車両は直 前方車両に車間距離を詰めていることがわかる.また、数値 シミュレーション結果と同じような車間距離の挙動をしてい ることがわかる.分流前について、各車両はそれぞれ数値シ ミュレーション結果とほぼ同じ挙動をしているが、車両が分 流直後は反応が悪く数値シミュレーション結果に比べて加速 が小さく、直前方車に車間距離を詰めることができていない が、最終的には数値シミュレーション結果に収束しており、 直前方車に車間距離を詰めていることがわかる.

相関係数と平均二乗誤差の計算結果を以下の表8に示す. 相関係数が高く、シミュレーション結果と実機実験結果は高 い正の相関を持つことがわかる.したがって、この分流モデ ルは実機への再現性が高いことがわかる.また、平均二乗誤 差を見ると第1追従車両以外の車両が理想的車間距離よりも 大きな値になっている.

### 4.2.2. 実験 2

実験結果を図8と図9に示す.分流前について,各車両は それぞれ数値シミュレーション結果とほぼ同じ挙動をしてい るが,第2追従車両については分流直後は反応が悪く数値シ ミュレーション結果に比べて加速が小さく,直前方車に車間 距離を詰めることができていないが,最終的には数値シミュ レーション結果に収束しており,直前方車に車間距離を詰め ていることがわかる.また,第4追従車両は分流直後は数値 シミュレーションと同様に加速して車間距離を詰めているが, 次第に減速してしまい車間距離が開いてしまっている.

相関係数と平均二乗誤差の計算結果を以下の表9に示す. 相関係数が高く,シミュレーション結果と実機実験結果は高 い正の相関を持つことがわかる.したがって,この分流モデ ルは実機への再現性が高いことがわかる.また,平均二乗誤 差を見ると第1追従車両以外の車両は理想的車間距離よりも 大きくなっている.

### 5. 結論

本研究では,隊列走行が利用されるユースケースの一つと して,隊列が2つの隊列に分流する場合について検討した. 車両の速度制御モデルとして車両追従モデルの一つである Helly モデルとその改良モデルを利用した.モデルに含まれ る感度パラメータは,制御における遅れ時間や行き過ぎ量な どからなる目的関数を最小化するように決定した.

決定された感度パラメータを用いて数値シミュレーション と LEGO MINDSTORMS を用いた実験を行い,結果を比較 した.分流する前の各車両の挙動を比較すると,シミュレー ション結果と実験結果の車両座標は比較的よく一致していた. 分流後は,実験結果はシミュレーション結果と同じ値に収束 する車両と,そうではない車両があった.分流後は,各車両 は車間距離を詰める必要がある.このときに,センサーによ る測定誤差,道路との末などの影響を受けて速度制御が変動 するためであると想像された.今後は,速度制御モデルとパ ラメータ設計を改良して,より安定した挙動を示すモデルを 設計する必要がある.

#### 謝辞

本研究の一部は,日本学術振興会科学研究費(基盤研究 (C) No.19K04140)の助成を受けたものである.

### 参考文献

- 国土交通局 HP, 渋滞の現状と施策体系.www.mlit.go. jp/road/sisaku/tdm/Top03-01--1.html
- (2) 久保田尚,大口敬,高橋勝美.読んで学ぶ交通工学・交通計画.理工図書株式会社,2010.
- (3) 西成活裕. 渋滞学. 株式会社新潮社, 2006.
- (4) ITS Japan HP. http://www.its-jp.org/
- (5) 公益財団法人 高速道路調査会, 隊列走行構想の進展状況 と今後の課題, 2018 (2018 年 10 月 8 日参照).
- (6) 脇田佑希子,玉城龍洋,北栄輔.自動車専用道路の分流 地点付近での交通シミュレーション.日本機械学会 年 次大会講演論文集 2010(7), 323-324, 2010-09-04
- (7) R.E. Chandler, R. Herman, and E.W. Montroll. Traffic dynamics: studies in car following. *Opetations research*, Vol. 6, No.2, pp. 165-184, 1958.
- (8) Helly, W. Simulation of Bottlenecks in Single-Lane Traffic Flow. Theory of Traffic Flow (Proc. of Sym. on TTF(GM)), pp.207-238, 1959
- (9) LEGO education, http://www.legoeducation.jp/mindstorms/.
- (10) T. Tamaki and E. Kita. City Traffic Simulation Using Cellular Automata with Stochastic Velocity Model. Proceedings of The 2004 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, 2004.