

路車間通信と車車間通信の融合による シャドウイング発生率改善手法の一検討

濱田 悠司 今尾 勝崇 塚本 勝俊 小牧 省三

大阪大学大学院 工学研究科 通信工学専攻

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

E-mail: h_yuji@roms.comm.eng.osaka-u.ac.jp

あらまし 本報告では、路車間通信で問題となるシャドウイングを解消するために、非再生中継車車間通信を用いることにより、シャドウイングを受けている車両に対して、シャドウイングを受けていない車両から電波を中継して、シャドウイングの発生を抑える手法について検討する。車両速度、平均車頭時間、大型車混入率をパラメータとして変化させることによって、多種多様な交通流を模擬できる交通流モデルを用いて、車車間通信機器の搭載率、車車間通信の中継回数を考慮した計算機シミュレーションを行った。結果、車車間通信の導入により大幅なシャドウイング改善効果が得られることを明らかにする。

キーワード シャドウイング、路車間通信、車車間通信、交通流、マルチホップ

A Consideration on Improving Technique of Shadowing Rate by the Combination of Road-to-Vehicle and Inter-Vehicle Communications

Yuji HAMADA, Masataka IMAO, Katsutoshi TSUKAMOTO, and Shozo KOMAKI

Department of Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University

Yamada-oka 2-1, Suita, Osaka 565-0871, Japan

E-mail: h_yuji@roms.comm.eng.osaka-u.ac.jp

Abstract This paper proposes a new technique to reduce the occurrence rate of shadowing caused by other vehicles in Road-to-Vehicle Communication (RVC) systems. The technique, called Inter-Vehicle non-regenerative repeater, relays a RF signal from a non-shadowed vehicle to a shadowed vehicle. By using a traffic flow model which can simulate various traffic situations by means of changing vehicle speeds, mean time headways between vehicles, and large-sized vehicle rates, computer simulations show the improvement effect of the shadowing rate obtained by the combination of RVC and Inter-Vehicle Communication (IVC) for appropriate values by means of changing IVC device mounting ratio and hop counts in IVC.

Keyword shadowing, road-to-vehicle communication, inter-vehicle communication, traffic flow, multi-hop

1. まえがき

ITS (Intelligent Transport Systems)は、様々な交通問題を解決するシステムとして近年注目されており、その応用分野として、VICS (Vehicle Information and Communication System), ETC (Electronic Toll Collection system), 及び AHS (Advanced cruise-assist Highway Systems) に関する研究開発が進められている[1]. これらのシステムでは、路車間通信 (RVC: Road-to-Vehicle Communication) や車車間通信 (IVC: Inter-Vehicle Communication) の導入によって、渋滞の緩和、及びドライバーの安全性や快適性の向上、また環境の改善に大きな効果を発揮することが期待されている。

路側アンテナと車載アンテナとの間で無線通信を行う路車間通信システムとして DSRC (Dedicated Short Range Communication) があり[2], 必要な情報の送受信を高速かつ連続的に行うことが不可欠となる。特に、AHSの目的の一つとして安全運転支援があり、シャドウイングによる通信遮断が許容されないシステムが必要とされる。しかしながら、路車間通信においては周辺の車両等の障害物によって生じるシャドウイングは通信断断を発生させ、通信品質を大きく劣化させる。また、周辺車両との位置関係は時々刻々と変化する、路車間通信を行う車両が大型車両の影に入ると長時間にわたる通信断断が発生し、パースト誤りの原因となる。

この問題を解決する方策として、道路に沿って漏洩線路を敷設する方法[3]や、車両の前後から複局同時送信を行う方法等が検討されている[4]. また、我々はこれまでに、路車間通信における電波反射や電波回折の有効利用や路側アンテナや車載アンテナの最適配置によるシャドウイングの改善効果について報告を行ってきた[5],[6]. これに加えて、車両から路側アンテナへの見通し線の他車両による遮蔽を車車間通信で補償するという路車間通信と車車間通信を融合したシャドウイングの改善手法は効果が高いと考えられるもの[7], それに関する検討はこれまでのところなされていない。

そこで本稿では、実際の交通流を想定した車両トラヒックモデルを構築し、路車間通信を用いて受信した電波を、シャドウイングを受けている車両に対して車車間通信を用いて非再生中継し、シャドウイングの発生を抑える手法について検討する。車両同士が直接通信を行う車車間通信システムでは、ミリ波を用いた方式が想定されている[7]-[9]. ミリ波は、波長がミリメートルオーダーと極めて短いため、アンテナや送受信装置の小型化が可能となる。また、伝搬損失が大きいので長距離伝送には適していないが、この特徴を生かして狭い範囲に電波を閉じ込めることにより、他のユーザからの干渉を最小限に抑えることができる。そこで本検討ではミリ波を用いた車車間通信を仮定する。

ところで、統計的な振る舞いを行う交通流を考慮して通信品質を評価する場合、その手法として実交通流を用いて実験、またはシミュレーションを行うことが求められるが、コストや安全性等の問題があるため現実的に行うことは困難である。そこで、シミュレーションによって多様な条件を変化させつつ繰り返し交通

流を評価・検討できる交通流シミュレータに関する研究が盛んに行われている[10],[11]. 交通流シミュレーションでは、微小時間間隔で車両の位置をその都度計算するので詳細な解析が可能である。また、交通流を特徴付ける様々なパラメータを変化させることにより、あらゆる交通流を想定してシミュレーションを行うことが可能となる。そこで、多種多様な交通流に対応させるため、車両速度、平均車頭時間、及び大型車混入率をパラメータとして変化させ、実際の状況に近い交通流モデルを構築する。次に、車車間通信機器の搭載率、および車車間中継回数を考慮した計算機シミュレーションを行い、シャドウイングの改善効果について検討する。その結果、車車間通信の導入により大幅なシャドウイング改善効果が得られることを明らかにする。

2. シミュレーションモデル

図1(a)に路車間通信のみを用いる場合、図1(b)に路車間通信と車車間通信を用いる場合のシミュレーションモデルを示す。片側3車線の道路を仮定し、路肩に近い方から第1車線、第2車線、第3車線とする。また、車種として普通車と大型車の2車種を仮定する。交通流モデルとして各車線の車頭間隔 τ [sec]の分布を与え、その分布はk相アーラン分布[12],[13]

$$p(\tau) = \frac{(k\lambda)^k}{(k-1)!} \tau^{k-1} e^{-k\lambda\tau} \quad (\tau \geq 0) \quad (1)$$

に従うものとする。ただし、 τ は車頭間隔[sec]、 k は位相数、 λ は平均車頭間隔[sec]である。また、同一車線内における車両は一定速度で車線中央を走行するものとし、車線変更は考慮しないものとする。

路側アンテナ (BS: Base Station) は路肩に路側アンテナ間隔 L [m]ごとに均等に配置される。1本の路側アンテナは、送信電力とアンテナの指向性を適切に選択することにより、路側アンテナ間隔内全てをカバーするものと仮定し、隣接する路側アンテナ間での電波干渉は発生しないものと仮定する。

図1(a)において、路側アンテナから対象車両 (Target Vehicle) への直接波による受信電力 P_r は

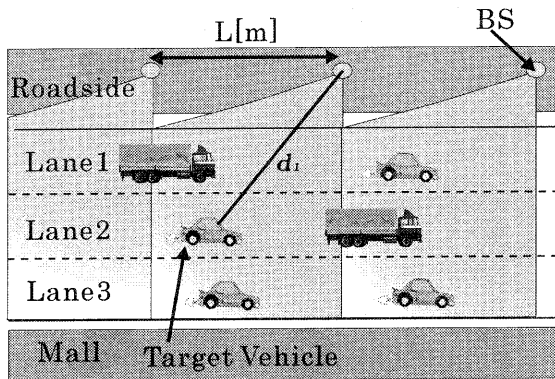
$$P_r = P_t + G_t + G_r - 20 \log \frac{4\pi d_1}{\lambda_1} \quad (2)$$

で与えられる。ただし、 P_t は送信電力、 G_t は路側アンテナ利得、 G_r は車載アンテナ利得、 d_1 は路側アンテナと対象車両の車載アンテナ間の距離、 λ_1 は波長である。

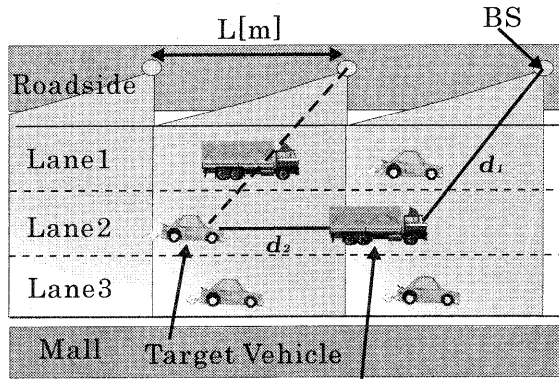
図1(b)において、中継車両 (Repeater Vehicle) は路車間通信で受信した電波を周波数変換後、車車間通信によって後続の対象車両へ中継する。中継車両の受信電力を P_r' とすると、対象車両における受信電力 P_v は

$$P_v = P_r' + G_I + G_t' + G_r' - 20 \log \frac{4\pi d_2}{\lambda_2} - \gamma_0 d_2 \quad (3)$$

で与えられる。ただし、 G_I は中継車両における AGC (Automatic Gain Control) 増幅器の電力利得、 G_t' は車



(a)路車間通信



Repeater Vehicle
(b)路車間・車車間通信

図1:シミュレーションモデル

車間通信の送信アンテナ利得、 G_t は車車間通信の受信アンテナ利得、 d_2 は車車間通信を行う車両間の距離、 λ_2 は波長であり、AGC 増幅器において伝搬損失分を増幅するものとする。また、 γ_0 は酸素吸収減衰係数であり、車車間通信時の酸素吸収による減衰を考慮する。

路車間・車車間通信時の変調方式として QPSK を用いた場合、誤り率 10^{-5} を達成するために必要な CN 比は 12.6[dB] である。また、受信機の熱雑音電力を -82.1[dBm] とし、数 dB 程度の雑音余裕を考慮して、最低受信感度を -65[dBm] と設定する。以上のことを考慮して、車両の送受信アンテナに指向性アンテナを用いることによって、同一車線内のみにおいて最大 150m の通信が可能であるとする。

図 1(b) の場合、対象車両が路側アンテナからの直接波を車載アンテナで受信できず、かつ車車間通信によっても電波が中継されない場合にシャドウイングが発生する。ただし、各車両において車車間通信機器の搭載率を考慮し、搭載している車両同士で通信できるものとする。

表 1 に、シミュレーションに用いた諸定数を示す。また、表 2、3 に、交通流モデルに必要な諸定数とパラメータを示す。路車間通信を行うための普通車と大型車の車載アンテナは、ダッシュボード上に設置されるものとする。比較的交通量の少ない自由流では第 1 車線ほど短い車間距離で走行し、交通量の多い渋滞流では車線間で各パラメータに大差がないように設定した。アーラン分布の位相数は交通流に発生する車群に属する車両数に相当するので、渋滞流ほど位相を大きく設定した。

表 1 シミュレーションに用いた諸定数

路車間無線周波数	5.8GHz
車車間無線周波数	60GHz
P_t	23dBm
G_t / G_r	10dBi / 5dBi
G_t' / G_r'	20dBi / 20dBi
γ_0	0.015dB/m
変調方式	QPSK
帯域幅 B	150MHz
雑音指数 F	10dB
受信機熱雑音電力	-82.1dBm
所要 BER	10^{-5}
最低受信感度	-65dBm

表 2 交通流に用いた諸定数

車長	(普通車)4.5m (大型車)10.0m
車高	(普通車)1.5m (大型車)4.0m
車幅	(普通車)2.5m (大型車)2.5m
ダッシュボード高	(普通車)1.0m (大型車)2.5m
車線幅	4.0m
路肩幅	2.0m

表 3 交通流パラメータ

Lane		1	2	3
自由流	平均車頭時間[sec]	3.0	3.25	3.5
	車両速度[km/h]	90	100	110
	大型車混入率[%]	80	60	40
	位相数	5	4	3
渋滞流	平均車頭時間[sec]	3.0	2.75	2.5
	車両速度[km/h]	40	45	50
	大型車混入率[%]	60	50	40
	位相数	6	6	6

3. シャドウイング率

隣接する路側アンテナ間隔内のサービスゾーンにおいて、ある車両がその区間を通過する時間を t_p 、その区間を通過する間にシャドウイングを受ける総時間を t_s と表すと、シャドウイング率 R は

$$R = \left\langle \frac{t_s}{t_p} \right\rangle \quad (4)$$

で与えられる。ただし、 $\langle \circ \rangle$ は全車両による集合平均である。

3.1. 車車間通信機器の搭載率によるシャドウイング率改善効果

図2, 3にそれぞれ自由流と渋滞流における車車間通信機器の搭載率に対するシャドウイング率を示す。ただし、路側アンテナ高は5m, 路側アンテナ間隔は50m, 車車間通信の中継回数を1回とした。

自由流と渋滞流のいずれの場合も、搭載率が増加するとシャドウイングを受けていない車両からシャドウイングを受けている車両に対して電波を中継できる可能性が高くなるため、シャドウイング率は徐々に改善される。特に、第1車線の車両は自車線の前方を走行する車両のみがシャドウイングの原因となるため、車車間通信を行うことにより、シャドウイングを十分に回避できる。また、大型車の車載アンテナは普通車よりも高く設置されており、路車間通信時に他車両からシャドウイングを受けにくくなるため、大型車のシャドウイング率はいずれの車線においても普通車より低くなるが、車車間通信を用いることによる改善効果は普通車と大型車ともに同じ傾向である。

自由流におけるシャドウイング率は、搭載率が100%に達した場合、搭載率が0%すなわち路車間通信のみを用いた場合と比較して、第1車線ではシャドウイング率が普通車と大型車ともに0になり、第2車線では普通車が1/5, 大型車が1/6, 第3車線では普通車と大型車ともに1/3程度に改善されている。また、第3車線のシャドウイング率の改善度が第2車線よりも低いのは、第3車線の平均車頭間隔が第2車線よりも長く、車間距離が車車間通信を行うことが可能な最大距離150mを超えることが頻繁に発生するためである。

一方、渋滞流におけるシャドウイング率は、搭載率が100%に達した場合、搭載率が0%すなわち路車間通信のみを用いた場合と比較して、第1車線では普通車が1/100, 大型車が1/30, 第2車線では普通車と大型車ともに1/3, 第3車線では普通車と大型車ともに1/2程度に改善されている。シャドウイング率の改善度が自由流よりも低いのは、渋滞流では路車間通信時にシャドウイングを受ける車両が多いので中継車両となる場合が少なく、1回の中継回数では車車間通信の効果が現れにくいためである。

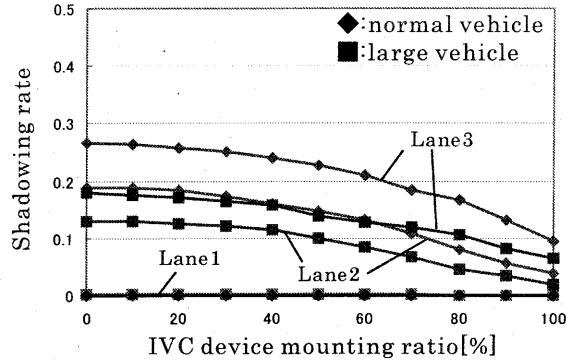


図2: 車車間通信機器の搭載率に対するシャドウイング率 (自由流)

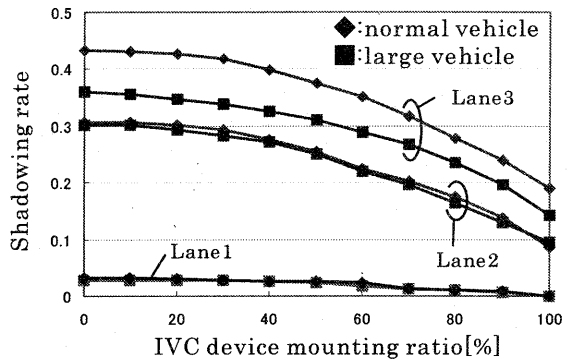


図3: 車車間通信機器の搭載率に対するシャドウイング率 (渋滞流)

3.2. 車車間通信の中継回数によるシャドウイング率改善効果

図4, 5にそれぞれ自由流と渋滞流における車車間通信の中継回数に対するシャドウイング率を示す。ただし、路側アンテナ高は5m, 路側アンテナ間隔は50m, 車車間通信機器の搭載率を100%とした。

自由流と渋滞流のいずれの場合も、第1車線の車両は自車線の前方を走行する車両がシャドウイングの原因となるため、車車間通信を行うことによりシャドウイングを十分に回避でき、自由流では中継回数を1回以上、渋滞流では中継回数を2回以上にすると第1車線のシャドウイング率を0にすることができる。

自由流の第2車線及び第3車線においては、まず1回の中継で先述のように大きなシャドウイング率改善効果が得られるが、中継回数を2回以上にしても、車車間通信可能な最大距離が150mに制限されていることに起因して、シャドウイング率の改善に限界が現れている。また、第3車線の平均車頭間隔が第2車線よりも長いので、第3車線のシャドウイング率改善の限界値は大きくなる。

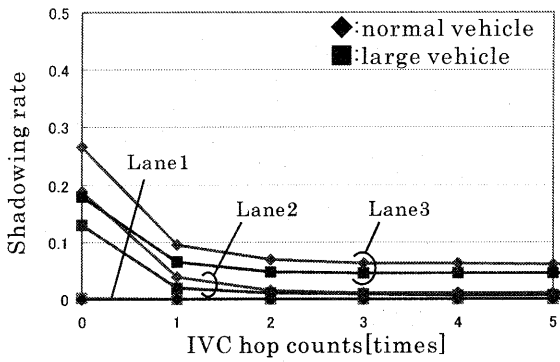


図4：車車間通信の中継回数に対するシャドウイング率（自由流）

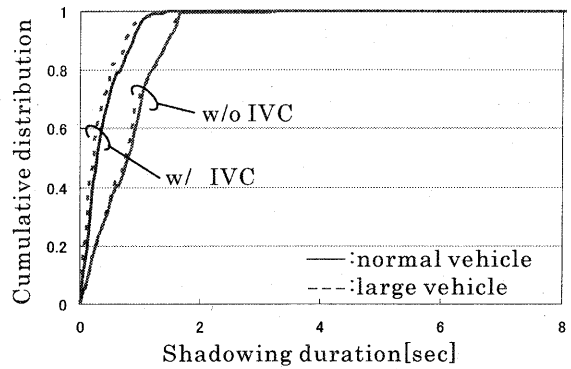


図6：シャドウイング継続時間（自由流）

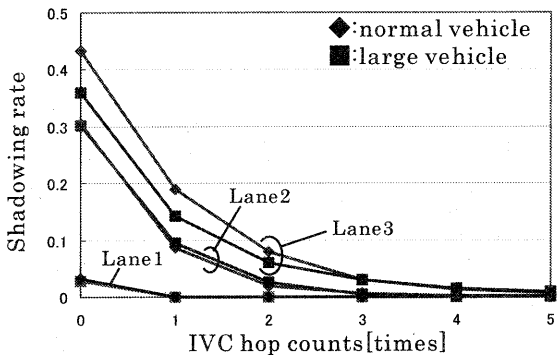


図5：車車間通信の中継回数に対するシャドウイング率（渋滞流）

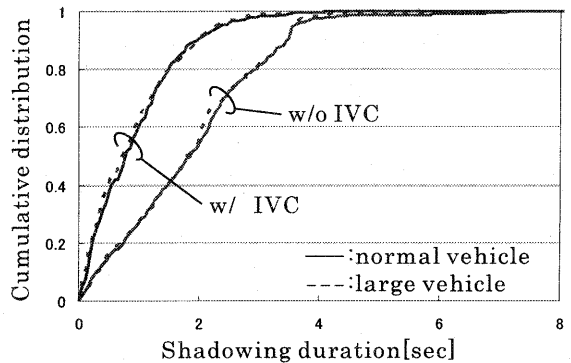


図7：シャドウイング継続時間（渋滞流）

一方、渋滞流の第2車線及び第3車線においては、車間距離が短く、車車間通信可能な最大距離に達しないため、中継回数が3回以上になるとシャドウイング率を0近くにできる。

4. シャドウイング継続時間特性

隣接する路側アンテナ間隔内のサービスゾーンにおいて、ある車両がその区間を通過する間にシャドウイングを受けたとき、その継続時間をシャドウイング継続時間と呼ぶ。

図6、7にそれぞれ自由流と渋滞流におけるシャドウイング継続時間の累積確率分布を示す。ただし、路側アンテナ高は5m、路側アンテナ間隔は50m、車車間通信機器の搭載率は100%、車車間通信の中継回数は1回とし、ここでのシャドウイング継続時間は第1車線～第3車線を総合した値である。また、表4に平均シャドウイング継続時間を示す。

同図から、車車間通信を用いることにより、路車間通信のみを用いた場合に比べてシャドウイング継続時間を大幅に短縮できることが分かる。累積確率が0.9となるシャドウイング継続時間に注目すると、普通車

表4 平均シャドウイング継続時間

	車種	車車間通信なし	車車間通信あり
自由流	普通	0.792[sec]	0.395[sec]
	大型	0.774[sec]	0.376[sec]
渋滞流	普通	1.898[sec]	0.952[sec]
	大型	1.861[sec]	0.963[sec]

と大型車のどちらの場合も、車車間通信を用いることによって自由流では1.5secから1.0secに短縮でき、渋滞流では3.5secから2.0secに短縮できる。また、平均シャドウイング継続時間は、車車間通信を用いることによって自由流及び渋滞流のいずれの場合においても、約1/2に短縮できることが分かる。

5. あとがき

本報告では、路車間通信で受信した電波を、シャドウイングを受けている車両に対して車車間通信で非再生中継し、シャドウイング発生を抑える手法について検討した。実際の交通流を想定した車両トラフィックモデルを構築し、車車間通信機器の搭載率と車車間通信の中継回数を考慮した計算機シミュレーションを行い、

シャドウイング率とシャドウイング継続時間の改善効果について検討した結果、以下のことが分かった。

- 車車間通信機器の搭載率が増加するに従って、シャドウイング率を改善できる。
- 自由流では車車間通信の中継回数が1回で十分なシャドウイング率の改善が得られる。
- 渋滞流では車車間通信の中継回数が増加すると自由流の場合よりも大きなシャドウイング率の改善が得られる。
- 車車間通信を導入することによって、平均シャドウイング継続時間を約半分に改善できる。

今後は、隣接車線間での車車間通信について検討を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)14350202の補助によるものである。

文献

- [1] 津川 定之, “高度道路交通システムにおける通信システム,” 信学論(B), vol.J82-B, no.11, pp.1958-1965, Nov. 1999.
- [2] “狭域通信システム標準規格(ARIB STD-T75),” 社団法人電波産業会, Nov. 2001.
- [3] 池田 幸雄, 金田 正行, 巨理 達, “漏洩線路を用いた路車間通信方式の検討,” 信学ソ大, SAD-2-6, pp.28-29, Sep. 1998.
- [4] 福井 良太郎, 柿田 法之, 屋代 智之, 重野 寛, 松下 温, “道路照明を用いた連続無線ゾーン構成法による路車間通信システムの実用性の評価,” 情報学論, vol.43, no.12, pp.3931-3938, Dec. 2002.
- [5] Masataka Imao, Shin Takahashi, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki, “Shadowing Rate Considering Effect of Radio Diffraction and Traffic Flow for Road-to-Vehicle Communication System,” Proc. ITST2002, pp.295-299, Nov. 2002.
- [6] 濱田 悠司, 今尾 勝崇, 塚本 勝俊, 小牧 省三, 澤 良次, 熊沢 宏之, “路車間通信システムにおけるアンテナ配置によるシャドウイング率改善の検討,” 信学総大 A-17-11, p.340, Mar. 2003.
- [7] 和田 友孝, 前田 慎, 岡田 実, 塚本 勝俊, 小牧 省三, “ミリ波車車間通信における信号伝搬特性,” 信学論(B), vol.J81-B, no.12, pp.1116-1125, Dec. 1998.
- [8] Yong-Hoon Kim and Ki-Seok Yang, “60GHz Millimeter-Wave Test Bed for High Speed and Wide Band Communications,” IEICE Trans. Electron., vol.E82-C, no.7, pp.1301-1306, July 1999.
- [9] Akihito Kato, Katsutoshi Sato, Masayuki Fujise, “Propagation Characteristics of 60-GHz Millimeter Waves for Inter-Vehicle Communications,” IEICE Trans. Commun., vol.E84-B, no.9, pp.2530-2539, Sep. 2001.
- [10] Ari Widodo, 長谷川 孝明, “車々間通信ネットワークの交通流に与える効果について,” 信学論(B), vol.J82-B, no.11, pp.2010-2017, Nov. 1999.
- [11] Ari Widodo, 長谷川 孝明, “車々間通信ネットワークを含めた高度交通システムの評価のための自律走行交通流シミュレータ,” 信学論(B), vol.J82-B, no.11, pp.2002-2009, Nov. 1999.
- [12] 竹内 伝史, 本多 義明, 青島 縮次郎, “交通工学,” 鹿島出版会, pp.151-153, 1986.
- [13] 越 正毅, “交通工学通論,” 技術書院, pp.78-89, 1989.