

自動運転車両の挙動パラメータがラウンドアバウト流入交通容量に与える影響に関する分析

高 芸¹・張 馨²・中村 英樹³・柿元 祐史⁴

¹正会員 名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町C1-2(651))

E-mail: gaoyii0305@yahoo.co.jp

²正会員 名古屋大学大学院特任助教 環境学研究科 都市環境学専攻(同上)

E-mail: zhang@genv.nagoya-u.ac.jp (Corresponding Author)

³フェロー会員 名古屋大学大学院教授 環境学研究科 都市環境学専攻(同上)

E-mail: nakamura@genv.nagoya-u.ac.jp

⁴正会員 名古屋大学大学院助教 環境学研究科 附属持続的共発展教育研究センター(同上)

E-mail: kakimoto@nagoya-u.jp

ラウンドアバウトにおける車両挙動は合流と分流を基本とするため、自動運転技術による安全で円滑な運転支援の可能性が期待できる場面の一つであると考えられる。このとき、ラウンドアバウトの流入交通量は、自動運転車両(AV)の性能設定により大きく左右されることとなる。特に、車頭時間パラメータが流入交通容量に影響することはこれまでの研究で明らかとなっている。そこで本研究では、交通流シミュレータを用いて、AVの各種挙動パラメータの設定および混入率に応じたラウンドアバウトの流入交通容量を推定する。そして、挙動パラメータが流入交通容量に与える影響を明らかにすることを目的とする。その結果、AVの車頭時間パラメータ、速度分布のばらつき、および流入部におけるAV混入率が流入交通容量に対して有意な影響を与えることが示された。

Key Words: Roundabout, Entry capacity, Automated vehicle, Mixed flow, Traffic simulator

1. はじめに

自動運転車両(以降、AV)が導入されることにより、交差点における安全性と円滑性の向上が期待されている。特に、ラウンドアバウト(以降、RAB)における車両挙動は、合流と分流を基本とするため、一般の交差点に比べてAVによる安全運転支援の可能性が高いと考えられる。しかし、現段階の技術では、早急にすべての車両がAVに置き換わることは極めて困難であり、今後AVと手動運転車両(以降、HDV)の混在交通が発生することは避けられないと想定される。そのため、AVとHDVの混在交通流がラウンドアバウト流入交通容量に与える影響を把握することが必要である。

また、ラウンドアバウト流入交通容量は、車頭時間パラメータ、反応時間、希望速度などの挙動パラメータに依存することから、AVの挙動特性を表現するパラメータ設定が重要であることは明らかである。

そこで本研究では、AVの挙動パラメータおよびAVの

混入率が、ラウンドアバウト流入交通容量に与える影響を把握することを目的とする。

2. 既往研究

これまでのところ、実道におけるAVとHDV混在交通流はほとんど実現していないため、ラウンドアバウト流入交通容量の実観測は困難である。その代わりに、AVがラウンドアバウト流入交通容量に与える影響を検討する方法として、ギャップアクセプタンス理論に基づく既存の推定式と交通流シミュレータによる容量計算の2つの方法がある。いずれの方法においても、AVの挙動パラメータを合理的に仮定することが必須であることは共通である。

Patcharinee et al¹⁾とShi et al²⁾は、単路部における車頭時間パラメータの短縮により、AV混入率の増加に伴い、交通容量が指数関数的に増加することを明らかにしたが、

これは交差点に関する分析ではなく、またAVの挙動パラメータ設定は固定している。Bailey³⁾は、交通流シミュレータを用いてネットワーク分析を行い、4枝のRABにおけるAVの混入率が増加することでラウンドアバウト流入交通容量も増加することを明らかにした。しかし、この研究もAVの挙動パラメータの影響を考慮していない。

Friedrich⁴⁾は交通流モデルを開発した上で、信号交差点におけるAV混在状態での交通容量増加には2つの要因があり、1つはAV間の車頭時間パラメータの短縮、もう1つは車両群の速度分布であることを明らかにした。この研究ではRABについて検討していないものの、これらの結論は本研究でAVの設定において参考になるものである。著者らの先行研究⁵⁾は、交通流シミュレータを用いて車頭時間パラメータで定義した2種類のAVそれぞれの混在がラウンドアバウト流入交通容量に与える影響を明らかにしたが、速度分布の影響は検討していない。

そこで本研究では、ミクロ交通流シミュレータVISSIM⁶⁾を用いてHDVとAVにそれぞれの車頭時間パラメータと速度分布を設定することで、車頭時間パラメータと速度分布がAV混在時のラウンドアバウト流入交通容量に与える影響を分析する。

3. 分析方法

(1) ラウンドアバウト流入交通容量の推定方法

日本ラウンドアバウトマニュアル⁷⁾におけるラウンドアバウト流入交通容量推定式は、式(1)に示すように、ドイツの式⁸⁾に基づいている。

$$c_i = \frac{3600}{t_f} \left(1 - \tau \frac{Q_{cir}}{3600} \right) \times e^{\left\{ -\frac{Q_{cir}}{3600} \left(t_c - \frac{t_f}{2} - \tau \right) \right\}} \quad (1)$$

ここに、 c_i は流入部*i*の交通容量 (pcu/h)、 Q_{cir} は流入部正面上流断面の環道交通量 (pcu/h)、 t_c はクリティカルギャップ (s)、 t_f は流入車両の追従車頭時間 (s)、 τ は環道交通流の最小車頭時間 (s)、である。

この推定式では、環道車両の車頭時間パラメータは負の指数分布に従い、それぞれの値は一定であると仮定している。しかし、この仮定は、低～中程度の交通量の場合のみ信頼できるものである。また、RABの幾何構造の違いおよび異なるAV性能の違いによる影響については、一定の車頭時間パラメータ値を用いることでは十分表現できない。

(2) AVタイプ別の挙動パラメータの設定

本研究では、AVはHDVと車頭時間パラメータおよび速度分布が異なると仮定し、HDVと積極的な設定の

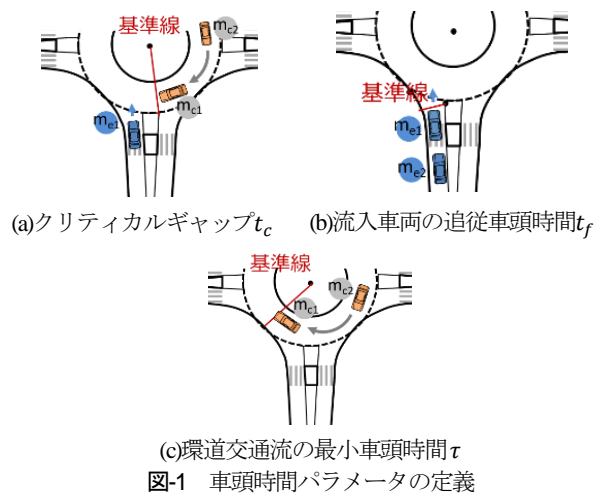


図-1 車頭時間パラメータの定義

表-1 車両タイプ別の車頭時間パラメータ値

車両タイプ	t_c (s)	t_f (s)	τ (s)
HDV・nAV	3.6	3.2	2.0
aAV	2.9	2.4	1.7
dAV	4.8	4.2	2.2

AV(以降、aAV)、普通のAV(以降、nAV)および慎重な設定のAV(以降、dAV)の4つのタイプの車両を設定する。

a) 車頭時間パラメータの設定

式(1)における、ラウンドアバウト流入交通容量に関連する車頭時間パラメータの定義とこれらの車両タイプ別設定値を、以下に示す。

クリティカルギャップ t_c とは、図-1(a)に示す流入車両(m_{e1})がギャップ選択できる環道走行先頭車両(m_{c1})と追従車両(m_{c2})の間の最小車頭時間である。流入車流(m_{e1} 、 m_{e2})の追従車頭時間 t_f は、2台の車両が連続して環道へ流入する場合の追従車頭時間である。図-1(b)に示す流入部の断面において計測する。環道交通流(m_{c1} 、 m_{c2})の最小車頭時間 τ は、2台の車両が追従して環道走行する場合の最小車頭時間である。図-1(c)に示す環道部の断面において計測する。

これら3つの車頭時間パラメータが実際の値から逸脱しないよう、滋賀県守山市のRAB⁹⁾で観測されたHDVの値を基に設定することとする。観測された車頭時間パラメータを基に、車両タイプ別に表-1のとおり設定する。

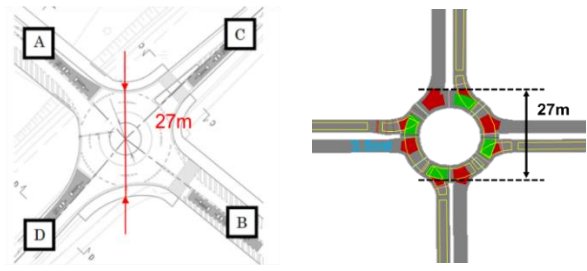
クリティカルギャップ t_c は、本研究では7秒以下の車頭時間を対象として、棄却ギャップと流入ギャップから流入確率分布を算出し、確率分布の50パーセンタイル値をHDVとnAVの代表値、aAVとdAVの代表値はそれぞれ15パーセンタイル値、85パーセンタイル値を採用する。

追従車頭時間 t_f は、観測値から追従車頭時間の累積分布を算出し、累積分布の50パーセンタイル値をHDVおよびnAVの代表値、aAVとdAVの代表値はそれぞれ15パーセンタイル値、85パーセンタイル値を採用する。

最小車頭時間 τ も同様に観測値から累積分布を算出し、

累積分布の15パーセンタイル値がラウンドアバウトマニュアル⁷⁾でHDVの推奨値に近いことから、HDVとnAVの代表値として採用する。それを踏まえて、aAVとdAVの代表値はそれぞれ5パーセンタイル値、25パーセンタイル値を採用する。

車頭時間パラメータは幾何構造によっても値が変化することが言われている⁹⁾ため、VISSIMで構築するRABは観測値を取得した守山市のRABと類似の幾何構造となるよう図-2に示す設定とする。



(a) 守山市RAB (b) VISSIMで構築するRAB
図-2 想定するRABの幾何構造

b) 速度分布の設定

RABにおける流入速度は、ラウンドアバウトマニュアル⁷⁾の焼津市山の手RABにおける速度変化観測事例に基づけば、一般的に20~40 km/hとなる。そのため、本研究では、図-3に示す20~40 km/hの範囲で、 $(\mu, \sigma) = (30, 3.33)$ の正規分布に従うと仮定してHDVの速度分布を図中の黒線のように設定する。一方、AVはいずれのAVタイプについても、HDVよりも速度のばらつきが小さいと仮定する。具体的には、aAVについてはHDVよりも積極的な設定を仮定しているため、図中の赤線で示す30~40 km/hの範囲で $(\mu, \sigma) = (35, 1.67)$ の正規分布、dAVはその慎重さを表現するために、緑線の20~30 km/hの範囲で $(\mu, \sigma) = (25, 1.67)$ の正規分布として、それぞれ速度分布を設定する。さらに、nAVには異なる速度分布を与えることで、シミュレーション環境で速度分布が流入交通容量に及ぼす影響を把握する。このため、平均速度が高いnAVをnAV1(aAVと同設定)、低いものをnAV2(dAVと同設定)と定義する。

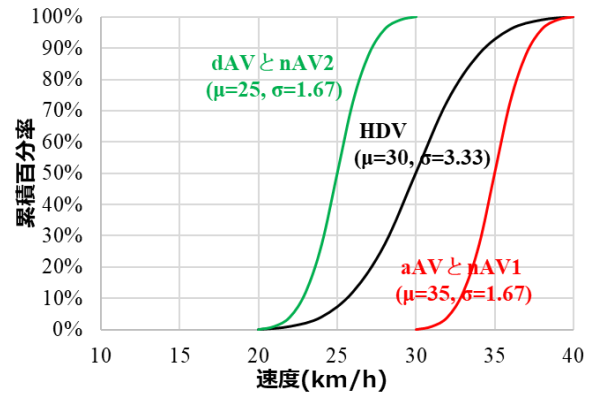


図-3 AVタイプ別の設定速度分布曲線

(3) VISSIMにおけるパラメータのキャリブレーションと設定

VISSIMでは、3つの車頭時間パラメータを直接設定できないため、VISSIMのDriving BehaviorsとPriority Ruleの機能を用いてキャリブレーションする。Driving Behaviorsは、自動車追従モデル "Wiedemann 74"のパラメータである平均停止距離(Average standstill distance)、安全距離の加算部分(Additive part of safety distance)、安全距離の倍数部分(Multiplic. part of safety distance)を設定する機能である。そこで、それぞれ環道交通流と流入交通流の追従車頭時間に合わせて調整することで、 t_f と τ をキャリブレーションする。Priority Ruleでは、最小ギャップ時間(Min. Gap Time)、最小車頭時間(Min. Headway)、最高速度(Max. Speed)を調整し、 t_c をキャリブレーションする。各種車両の速度分布はVISSIMのSpeed Distributionの機能を用いて設定する。

(4) 実行シナリオ

VISSIMで各AVタイプの3つの車頭時間パラメータをキャリブレーションを施した後、以下のシナリオを実行する。

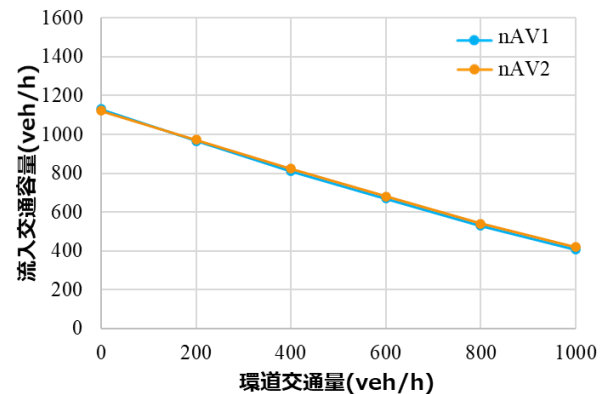


図-4 nAVの平均速度設定に応じた流入交通容量

- ・ 混在するAVタイプ：aAV, nAV, dAVのいずれか (同時に異なるAVタイプが混在する環境は想定しないことに注意)
- ・ 環道(添え字cで示す)におけるAV混入率(%aAV_c, %nAV_c, %dAV_cのいずれか)：0, 20, 40, 60, 80, 100 %
- ・ 流入部(添え字eで示す)におけるAV混入率(%aAV_e, %nAV_e, %dAV_eのいずれか)：0, 20, 40, 60, 80, 100 %
- ・ 環道交通量(Q_{cir})：0, 200, 400, 600, 800, 1000 veh/h

シミュレーション実行時間は4,800秒で、うち最初の1,200秒はウォームアップタイムとする。信頼度の高い結果を得るために、各シナリオで5回ずつランダムシードを変更し、それらの結果の平均値を用いて分析を行う。

4. AVの挙動パラメータ設定がラウンドアバウト流入交通容量に与える影響

(1) 平均速度の違いがラウンドアバウト流入交通容量に与える影響

図-4は、平均速度の異なる2種類のnAV(nAV1, nAV2)のラウンドアバウト流入交通容量をそれぞれ示す。その結果、速度の分散が同一の場合には、平均速度の違いはラウンドアバウト流入交通容量にほとんど影響を与えないことが確認できる。このため以降では、nAVにはnAV1の速度分布を適用することとする。

(2) 車頭時間パラメータと速度分布がラウンドアバウト流入交通容量に与える影響

ここでは、各AVタイプの混在がラウンドアバウト流入交通容量に与える影響を分析する。このとき、環道、流入部それぞれに混在を仮定するAVタイプに応じて、次の2つのケースについて分析を行う。

ケース1は、環道部におけるAV混入率を40% ($\%AV_c=40$)に固定し、流入交通容量を流入部におけるAV混入率 ($\%AV_e=20$ と $\%AV_e=80$)に応じて分析するものである。これらの結果を図-5に示す。いずれのAVタイプの場合も、環道交通量が増加するとそれぞれに応じて流入交通容量が低下するといった共通の傾向が見られる。また、流入部におけるAVの混入率が高い場合には、流入交通容量がaAVでは増加、dAVでは減少し、nAVでは横ばい傾向となっている。AVタイプ別に比較すると、aAV若しくはnAVが混在する場合は、100%HDVに比べて流入交通容量が上昇する一方、dAV混在の場合には、100%HDVに比べて流入交通容量が減少することがわかった。(1)の結果より平均速度の違いの影響はほとんどないことが明らかとなっていることから、これは車頭時間パラメータの違いによる影響であると考えられる。

ケース2は、流入部におけるAV混入率を40% ($\%AV_e=40$)に固定し、流入交通容量を環道部におけるAV混入率 ($\%AV_c=20$ と $\%AV_c=80$)に応じて分析するものである。図-6に示す結果より、流入部におけるAVの混入率が増加するほど流入交通容量がaAVでは増加、dAVでは減少し、nAVは横ばい傾向となることがわかる。AVタイプ別に比較すると、ケース1と同様にaAVおよびnAV混在の場合には、100%HDVに比べて流入交通容量が増える一方で、dAV混在の場合には、100%HDVに比べて流入交通容量が減少することがわかった。

また、図-5と図-6を比較すると、図-5の流入部における各種AVの混入率の増加に伴う流入交通容量の変化の程度は、図-6に示す流入部の混入率を固定したケース2よりも大きくなることが確認された。この現象は、流入部におけるAVがラウンドアバウト流入交通容量に顕著

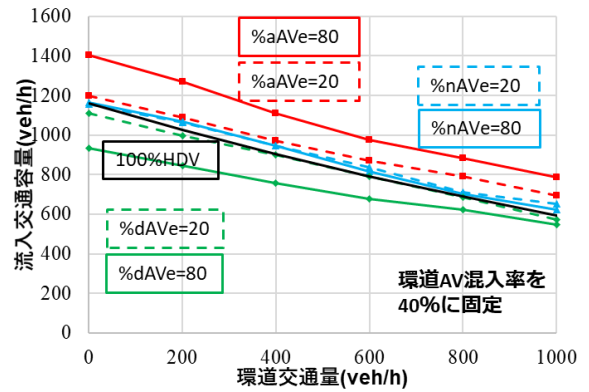


図-5 環道交通流のAV混入率を40%とした場合 ($\%AV_c=40$)の流入交通容量(ケース1)

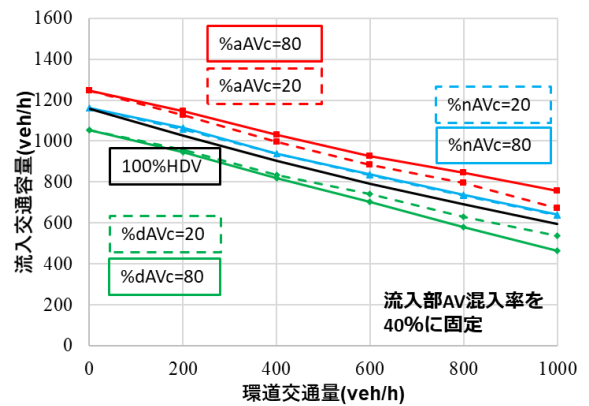


図-6 流入部のAV混入率を40%とした場合 ($\%AV_e=40$)の流入交通容量(ケース2)

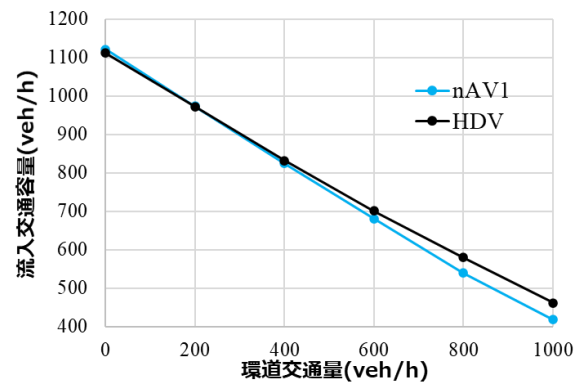


図-7 100%HDVと100%nAVでの流入交通容量

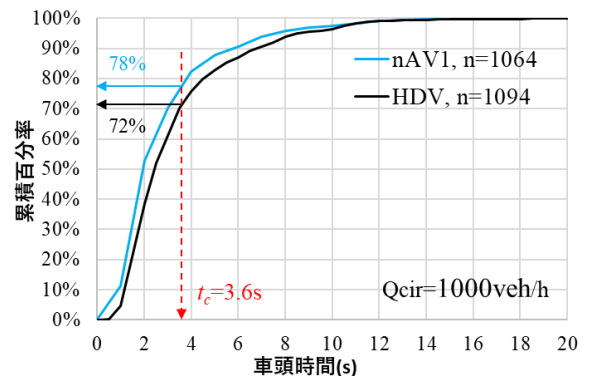


図-8 環道車両の車頭時間分布 ($Q_{ci}=1000\text{veh/h}$)

な影響を与える一方、環道におけるAVの混在は流入交通容量に与える影響が相対的に小さいことを示している。

本研究では、HDVとnAVの性能の違いを速度分布のみで表現しているため、nAVの混入率を低～中程度に設定すると、nAVが流入交通容量に与える影響はほとんど見られない。そこで、速度分布の影響を把握するため、100%HDVと100%nAVの比較を行った結果を図-7に示す。環道交通量が多い場合には、100%HDVに比べると、100%nAVの方が流入交通容量が小さくなった。図-8に、環道交通量が1000 veh/hの場合における環道車両間の車頭時間の累積百分率を示す。クリティカルギャップ3.6秒を閾値とすると、流入するHDVが選択できるギャップが流入するnAVに比べて6%多い。これはHDVの速度分布のばらつきが大きく、流入車両と環道走行車両のギャップの組み合わせパターンが多様になるためであると考えられる。つまり、環道交通量がかなり多い場合、同じ車頭時間パラメータを設定した車両を仮定しても、速度分布のばらつきを小さく設定すると、流入交通容量の増加に対する影響が小さくなることがわかる。

5. おわりに

本研究では、ミクロ交通流シミュレータVISSIMを用いて、異なる車頭時間パラメータおよび速度分布により定義される3タイプのAVの混在がラウンドアバウト流入交通容量に与える影響をそれぞれ把握した。

複数の速度分布を用いて分析を行った結果、平均速度の違いはラウンドアバウト流入交通容量に影響を与えない一方で、速度のばらつきは流入交通容量に影響を与えることを明らかにした。そして、車頭時間パラメータがHDVより小さいAVが混在すると、ラウンドアバウト流入交通容量が増加し、逆にこれらが大きいAVが混在すると、ラウンドアバウト流入交通容量が減少することが確認された。また、環道に比べて、流入部へのAVの混在が流入交通容量に与える影響が大きいことを明らかにした。さらに、環道交通量が多い場合において、速度分布のばらつきが流入交通容量に影響を与えることを明らかにした。

今後、挙動パラメータの異なる複数タイプのAVとHDVの同時混在も考慮する必要がある。また、本研究

では歩行者との交錯の影響を考慮していないが、これらがラウンドアバウト流入交通容量に与える影響は大きいいため、今後検討が必要である。

謝辞：

本研究は、JSPS科研費基盤研究(B)19H02261の助成を受けたものである。

実観測データの分析に際しては、株式会社オリエンタルコンサルタンツ神戸信人氏から貴重なデータを提供していただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Patcharinee, T., Ya-Chi, Ho. and Nicholas F. M.: Highway Capacity Benefits from Using Vehicle-to-Vehicle Communication and Sensors for Collision Avoidance. The 74th IEEE Vehicular Technology Conference, San Francisco, CA, USA, 2011.
- 2) Shi, L. and Panos, D.P.: Autonomous and connected cars HCM estimates for freeways with various market penetration rates. Transportation Research Procedia, vol. 15, pp. 389-402, 2016.
- 3) Bailey, N.K: Simulation and Queueing Network Model Formulation of Mixed and Non-automated Traffic in Urban Settings Signature redacted Signature redacted. Institute of Technology, Massachusetts, 201.
- 4) Friedrich B.: The Effect of Autonomous Vehicles on Traffic. In: Maurer M., Gerdes J., Lenz B., Winner H. (eds) Autonomous Driving. Springer, Berlin, Heidelberg, 2016.
- 5) Gao, Y., Zhang, X., Kang, N. and Nakamura, H.: Estimation of Roundabout Entry Capacity under Autonomous Vehicle Mixed Flows through a Traffic Simulator, Proceedings for the 14th EASTS Conference, 14 pages, 2021.
- 6) PTV Planung Transport Verkehr AG : VISSIM 7.00 - User Manual, 2014.
- 7) (一社)交通工学研究会 : ラウンドアバウトマニュアル2021, 2021.
- 8) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (German Highway Capacity Manual), No.299, Köln, Germany, 2001.
- 9) 神戸信人, 張馨, 中村英樹, 尾高慎二 : 幾何構造要因を考慮したラウンドアバウト流入交通容量推定モデル, 土木学会論文集D3(土木計画学研究・論文集第35巻(特集)), Vol.74, No.5, pp.1_1399-1_1409, 2018.

(?受付)

AN ANALYSIS OF THE INFLUENCES OF AUTOMATED VEHICLES' HEAD-WAY PARAMETERS ON ROUNDABOUT ENTRY CAPACITY