

# 走光型視線誘導システムによる 追従特性への影響分析

朱 慧珺<sup>1</sup>・柳原 正実<sup>2</sup>・小根山 裕之<sup>3</sup>

<sup>1</sup>非会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ (〒151-0071 東京都渋谷区本町3-12-1)

E-mail:zhu-hu@oriconsul.com

<sup>2</sup>正会員 首都大学東京大学院都市環境学科研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail:yanagihara@tmu.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 首都大学東京大学院都市環境学科研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail:oneyama@tmu.ac.jp.

渋滞発生時の車両の追従の仕方は全体の交通流と密接な関係がある。また、渋滞対策として導入されている走行型視線誘導システムの効果については、マクロの視点で実証的な知見は示されているものの、ミクロの視点からは十分に把握できていない。本研究では走光型視線誘導システムの運用の有無と車両の追従特性との関係を明らかにするため、追従走行実験から取得した車両挙動データを用いて追従特性指標を算出し、実験条件の違いによる比較分析を行った。分析の結果、システム点灯時には希望車頭距離の分散が小さくなり、光刺激の速度を先行車両の速度より速い速度に設定した場合についても、希望車頭距離の分散がより小さくなることがわかった。

**Key Words :** *Moving Light Guide System, characteristic of car following, desired spacing, response time of car following*

## 1. はじめに

サグ部やトンネルの入口等の単路部ボトルネックは渋滞が発生しやすいことが知られている。渋滞発生時の追従の仕方は全体の交通流と密接な関係があると考えられる。単路部ボトルネックにおける渋滞対策として、走光型視線誘導システムが注目されている。このシステムは、道路に沿い路肩部に複数設置した発光体を順次点灯させることにより、設定された速度で流れているように見える光の外部刺激を運転者に与えるシステムである。

阪神高速 3 号神戸線上り深江サグ部 (20.5kp~19.5kp) における実道追従実験を通じて、田平ら<sup>1)</sup> は、上り坂において、該当システムの点灯速度に関わらず、車間距離変化を及ぼしやすいこと、点灯速度が 60km/h の時に、車速を運用速度に合わせたいと感じたドライバーは車間距離が減少しやすく、交通容量の改善傾向があること、該当システム点灯時に、PICUD 値の平均が消灯時より大きく推移することを明らかにしている。増本ら<sup>2)</sup> は、消灯時より点灯時の方が渋滞時間・渋滞量ともに少ないことと、下流側の点灯速度を速めに設定すれば、捌け交

通量が向上させ、ブロック毎の速度状況に応じたきめ細やかな点灯パターンの方が効果的であることを明らかにしている。また、下り坂での速度超過防止対策などにもこのシステムは利用されている<sup>3)</sup>。

しかしながら、走光型視線誘導システムの効果について、交通流の変化に対する実証的な知見は示されているものの、システム運用時の車両の追従特性は十分に把握できていない。

そこで本研究では、追従車両の速度と先行車両に対する車頭距離の関係に着目し、走光型視線誘導システムの運用の有無と車両の追従特性との関係を明らかにすることを目的とする。具体的には、異なる複数の実験条件下における走行実験において取得した追従走行時の車両挙動データを用いて追従特性指標を算出し、実験条件の違いによる比較分析を行った。

## 2. 追従特性指標の算出方法

本研究では追従特性指標として、希望車頭距離、追従

感応時間の2つを扱う。これらの追従特性指標は速度と車頭距離の関係に着目して算出する。

(1) 追従に関する仮定

先行車両の速度が一定とした場合、後続車の挙動は速度—車頭距離平面上において楕円曲線に近い軌跡を描く。これは、ドライバーが速度や車頭距離などを一定に保つようにアクセル・ブレーキ操作、すなわち加速度の調整を行っており、その結果、速度と車頭距離が一定の周期で振動するためである。

ただし、実際の走行が描く軌跡は1つの楕円にならない。実際の走行では時間経過とともに複数の楕円を形成するような挙動が見られる。これは追従状態が時間とともに変わる原因と考えられる。この追従状態の変化については一般的なドライバーが理想とする走行速度や車頭距離などを、道路の縦断勾配や平面線形の変化などに応じて変えていることが変化の要因として考えられる。よって、本研究では速度—車頭距離平面上における1つの楕円状を描く部分を追従状態が安定しており、時間経過によって楕円が変化するものとする。

加速度を算出する代表的な追従モデル式には速度—車頭距離平面上において1つの楕円状の軌跡を描く単項初等関数型のモデル式<sup>4)</sup>が存在する。当該式を微分方程式を見立てると一般解が単振動の式になっていると考えられるため、本研究では速度—車頭距離平面上における1つの楕円に対応する区間を単振動追従区間、1つの単振動追従区間において追従挙動の特性を単振動追従特性と定義する。本研究では単振動追従特性を単に追従特性と呼ぶ。

また、実際のデータでは傾いている楕円の軌跡が見られる。加速度追従モデル式を考慮すると単振動追従区間の周期の4分の1と追従モデル式の反応時間とが一致して

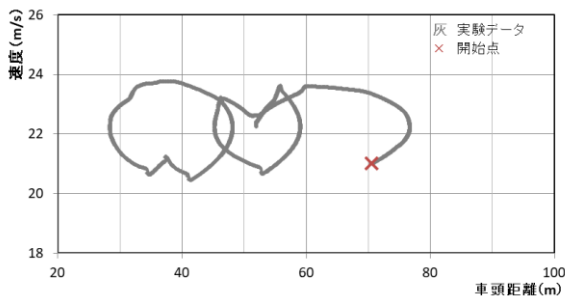


図1 車両挙動の軌跡

いない場合に、傾いている楕円が形成すると考えらる。

(2) 単振動追従区間の抽出

単振動追従区間においては同じく理想とする走行速度と車頭距離を表すと考えられるため、速度—車頭距離平面上における1つの楕円を形成するとみなせる一連のデータを抽出する。

実験データから、速度—車頭距離平面上における一連の車両挙動を示す点の軌跡は、図1のような時間経過とともに反時計回りの楕円曲線を形成することがわかる、したがって、単振動追従区間の境目は反時計回りで変化する軌跡の変化点として抽出する。具体的には速度と車頭距離の変化ベクトルを求め、前後のベクトルの方向変動が一定の範囲に収まる連続区間を抽出して区分する。

(3) 追従特性指標

区分したそれぞれの単振動追従区間からは、楕円のパラメータとしての中心座標、長軸、短軸、傾きが算出される。楕円のパラメータは各軌跡データの座標と楕円曲線との距離を最小化する値として求めることができる。これらの楕円パラメータより、2つの追従特性指標として希望車頭距離と追従感応時間を得る。

希望車頭距離はドライバーが適切だと思う先行車両との車頭距離とする。これは単振動追従区間における速度—車頭距離平面上の楕円の中心座標に対応する車頭距離と定義する。一連の単振動追従挙動の中では一定の速度と車頭距離となるように加速度が調整され、希望車頭距離は楕円の中心に収束する可能性が高いため、この距離を走行速度に対してドライバーが適切であると考えている車頭距離と考える。

追従感応時間は追従モデルにおける反応遅れ時間と定義する。また、先行車両への対応が緩慢である場合についての追従感応時間も同等の値として求める。緩慢な追

$$a(t + \Delta t) = \alpha' \Delta v(t) \tag{2}$$

$$\frac{dv}{dt} \Big|_{t+\Delta t} = \alpha' \frac{ds}{dt} \Big|_t + f(t) \tag{3}$$

$$\Delta t = \frac{1}{\omega} \left( \frac{\pi}{2} - \phi \right) \tag{4}$$

$$\alpha' = \frac{\beta}{\alpha} \tag{5}$$

$$f(t) = \frac{d}{dt} (v^d|_{t+\Delta t} - \alpha' s^d|_t) \tag{6}$$

$$\Delta t = \frac{T}{4} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \left( \left( \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{\sin^2 \theta}{a^2} + \frac{\cos^2 \theta}{b^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2} \right) \cos \theta \sin \theta \right) \right) \tag{1}$$

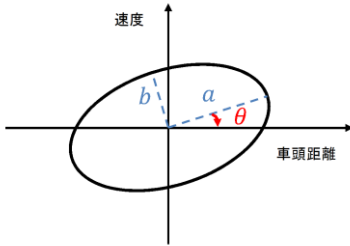


図2 楕円のパラメータ

従状態においては速度—車頭距離平面上における楕円曲線は大きくなる。それに伴い、加速度モデル上で反応遅れ時間も相当大きなものになる。本研究ではこれらの追従モデルにおける反応遅れ時間を追従感応時間とする。追従感応時間は大きいほど、緩慢な追従をしており、追従感応時間が小さいほど、敏捷な追従をしていることを表す。

追従感応時間については、楕円の媒介変数表示の数式と積分形の追従モデル式との関係から求められ、式(1)のように定義する。加速度追従モデル式は1つの単振動追従区間に対して1つの関係式(2)が存在する。式(2)を積分すると式(3)が得られ、式(4)、式(5)、式(6)の関係を仮定すると、式(1)が求められる。

なお、 $a$ と $b$ は楕円の長軸と短軸、 $\theta$ は楕円の傾き、 $T$ は変動周期とする。図2に示す。微分形の車頭距離と速度の関係から求めた変動周期を考慮すると、追従感応時間は希望車頭距離の変動幅を中央速度の変動幅で除したものに比例する。それぞれの変動幅はその元の値と比例する傾向があるため、車頭距離を走行速度で除した車頭時間と追従感応時間は比例する傾向にある。

### 3. ドライビングシミュレータを用いた追従実験

走光型視線誘導システムの運用の有無による追従挙動を比較するため、ドライビングシミュレータを用いた追従実験を行った。

#### (1) 実験概要

実験区間としてアクアライン上り線のトンネルの出口部の上り坂と出口後の道路を合わせて約5564mをシミュレータ上に再現した。システムの設置箇所はトンネルにおける勾配変化点付近の約1000mの道路の両側である。発光体の形状は矩形、色は緑、輝度はHSL色空間で50、高さは1.2m、間隔は10m、発光パターンは1灯3滅とした。

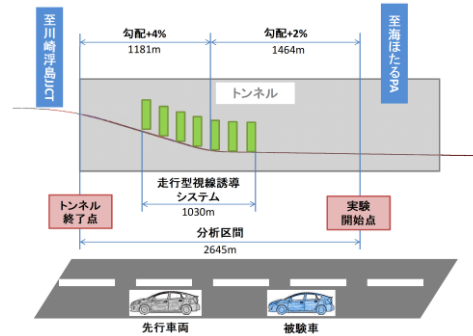


図3 実験の分析区間

表1 分析に有効なデータ

光刺激の速度 (km/h)	実験の順番 (光刺激)	人数	走行
75	1. なし 2. あり	4	8
75	1. あり 2. なし	5	10
85	1. なし 2. あり	5	10
85	1. あり 2. なし	2	4

片側2車線、先行車両は走行車線において定速で走行して、被験者は先行車両に追従して運転すると指定した。また、ドライビングシミュレータでの運転に慣れるため、本番の実験を実施する前に、発光体を設置せず高速道路において、被験者1人あたり1回約7分間の練習走行を設けた。分析区間は開始点からトンネル終了点まで2645mとする。その縦断勾配図は図3に示す。なお、分析区間は道路の縦断勾配と平面線路を再現したが、その後2753mの区間は縦断勾配0%、平面線形が直線を設定した。

#### (2) 実験データ

被験者はシステムの点灯と消灯2回走行し、先行車両の速度は80km/h、システムの速度は75km/hと85km/hのパターンを半数ずつ合計20人40走行分のデータを収集した。なお、データの誤りなどの原因で、分析に有効なデータは16人32走行であった。詳細を表1に示す。

#### (3) 単振動追従区間の抽出

実験データから、速度-車頭距離平面上において、時間経過とともに反時計周りの複数の楕円を形成することがわかる。よって、速度と車頭距離の変化ベクトルは反時計周りで小さく変化しているといえる。単振動追従特性の変化と偶然の変化を区別するため、まず、速度と車頭距離の変化ベクトルが正確に反時計周りに連続変化している区間に区切り、隣り合った短い区間については統合とフィルタリングをするという方法を用いて、単振動追従区間を抽出した。

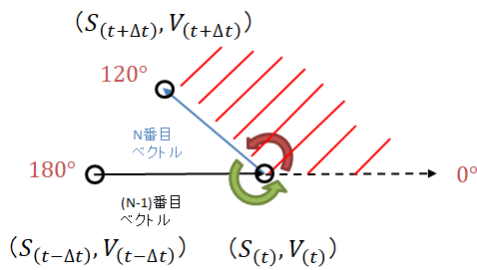


図4 データの区切りのイメージ図

$$\cos\theta \geq -\frac{1}{2} \quad (7)$$

$$\sin\theta > 0 \quad (8)$$

$$\sum_i \left\| \frac{\begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - h \\ Y_i - k \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} \frac{1}{a} & 0 \\ 0 & \frac{1}{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - h \\ Y_i - k \end{bmatrix}} \right\| - \left\| \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - h \\ Y_i - k \end{bmatrix} \right\| \quad (9)$$

a) データの区切り

まず、データの区切り条件について述べる。同じ区間の変化ベクトルに関しては、図4のように、(N-1)番目のベクトルを延長すれば、N番目のベクトルはその延長線の反時計周り0°から120°の関係となるとする。

具体的には、①②は変化ベクトルのなす角度を判断する。③は抽出する単振動追従区間の長さを判断する。

- ①. 相隣の変化ベクトルなす角のcos値は式(7), sin値は式(8)により判定する。
- ②. 相隣のベクトルがなす角は式(7), 式(8)どちらの1つを満たさなければ、一連のデータを取るのを中止する。
- ③. 一方、一連のデータについてベクトルの数が5以上の場合保留する。

b) データの統合

変化ベクトルは誤差を考慮し、長い楕円曲線を抽出するため、隣り合った区間のデータが同等の楕円を形成する場合にその2つの区間を統合する。

統合条件は①②を示す。

- ①. 各走行ケースにおいて、相隣の区切ったデータは平均方向のベクトルは両方ともsin値が0より大きい場合、統合する。
- ②. 保留の区切ったデータはそれぞれ相隣の2つ, 3つ, 4つ...を①に示す方法を用いて統合する。

c) データのフィルタリング

統合したデータについて、速度-車頭距離平面上における一連の車両挙動を示す点の軌跡は楕円曲線の一部であるか否かを判定し、同じ区間はより長い区間を含めないようにするため、統合したデータをフィルタリングする。

フィルターリング条件は

- ①. n個の区切ったデータを統合する時に、統合した後のデータの長さが10\*nより短い場合、スキップする。さらに、前後のデータを統合する。
- ②. 楕円の軌跡を確保するため、統合したデータについて、各変化ベクトルは他の全ての変化ベクトルの距離を計算して、距離行列のコンター図を描き、グラフ上で極大値の数が4以下の場合、フィルターリング条件1を満たす。
- ③. 該当区間はより長い区間に含まれない場合、フィルターリング条件2を満たす。
- ④. フィルターリング条件2つ共に満たす場合、該当区間は単振動追従区間とする。

(4) 追従特性指標

抽出した単振動追従区間に最も当てはまるような楕円を求める手法を楕円 fitting と呼ぶ。楕円 fitting において、速度-車頭距離平面上のデータの回転移動1次変化式と楕円の方程式により得られる楕円のパラメータは、各データの座標と楕円曲線との距離を最小化する値として求まる。このときの目的関数を式(9)に示す。ただし、楕円パラメータは中心座標 (h, k), 長軸a, 短軸b, 傾きθとする。

希望車頭距離は式(9)のh, 追従感応時間はΔtである。

4. 結果と考察

追従実験の結果、図5のように、速度-車頭距離平面上に想定される複数曲線の一部が見られ、本研究における追従特性指標の推定手法が実データに対して適用可能



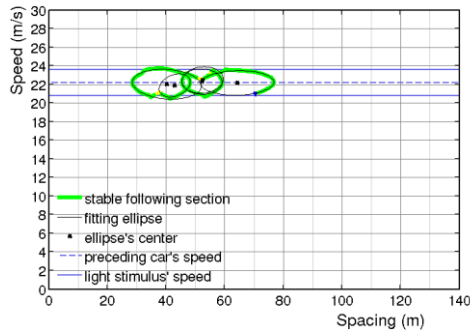


図 5 適用結果

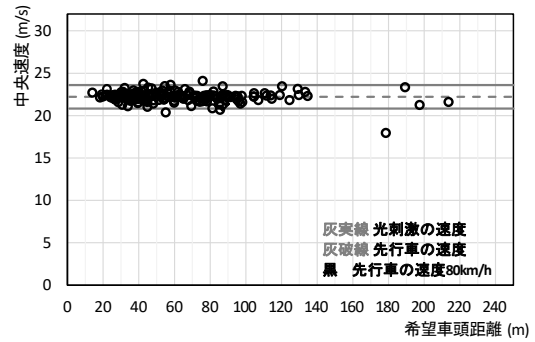


図 8 楕円中心点

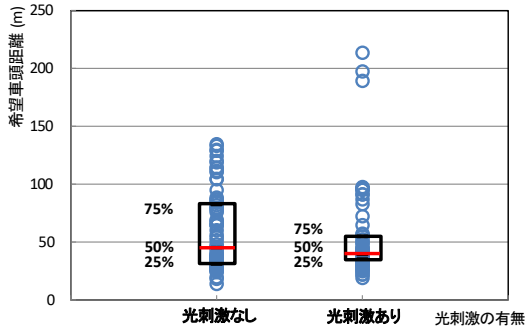


図 6 光刺激の有無別

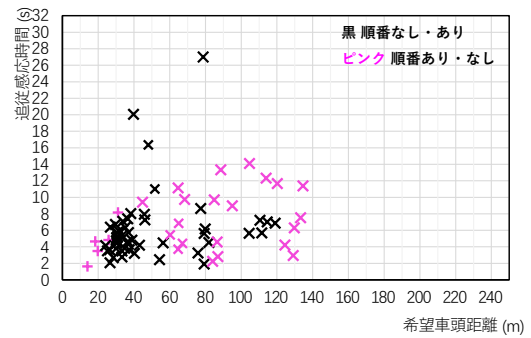


図 9 消灯時・実験順序別

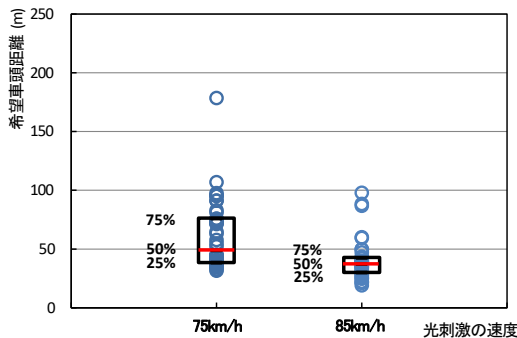


図 7 光刺激の速度別

表 3 実験順序別希望車頭距離の統計値

実験順序	平均	分散	標準偏差
光刺激なし・あり	51.90	664.04	25.77
光刺激あり・なし	73.33	1056.41	32.50

表 2 光刺激速度別希望車頭距離の統計値

光刺激の速度[km/h]	平均	分散	標準偏差
75	61.08	861.72	29.36
85	40.41	327.14	18.09

であることがわかる。

まず、全てのデータについて走光型視線誘導システムの光刺激の有無を比較する。図 6 から、全体としてシステム点灯時の希望車頭距離の分散が小さくなる傾向が見られた。これはシステムの点灯により、運転時のドライバーの注意を喚起して、車頭距離を短くしたと考えられる。また、希望車頭距離は 180 メートル以上となる結果が存在する。これは 1 名の被験者に関しては、実験開始時においてアクセルを踏まず、先行車両との距離が大き

く離れてしまったからであり、もう 1 名の被験者に関しては先行車両に十分追従しなくなり、車頭距離が大きくなるからである。

次に、上述した理由で、希望車頭距離が 180 メートル以上の結果を除いて、システム点灯時に、光刺激速度別の希望車頭距離について、平均値と分散値を求めて比較する。図 7 と表 2 から、光刺激の速度が 85km/h の場合に希望車頭距離の分散が 1% 有意に小さくなる傾向があり、その平均に 1% 有意差があることが見られた。これは、光刺激の速度が先行車両の速度より早い場合（光刺激=85km/h）には、後続車両は早い光刺激の速度に追い掛けようとして車頭距離が短くなったものと考えられる。一方、光刺激の速度が先行車両の速度より遅い場合（光刺激=75km/h）には、後続車両は遅い光刺激の速度に影響されて車頭距離が長くなる場合と、光刺激の影響を受けず先行車両を追従する車両が混在するため、希望車頭距離の平均・分散ともに大きくなったと推測できる。

また、実験について fitting した楕円の中心点をプロットした。図 8 から、全体的に被験車について、楕円の中

心に対応する中央速度は先行車両の速度，約 22m/s (80km/h) に接近している。つまり，単振動追従状態において，追従車両のドライバーは先行車両の速度に接近しようとする現象が見られる。

なお，追従特性指標の結果に対する実験順序の影響を確認するため，システム消灯時において全てのデータを比較する。図 9 と表 3 から，システム消灯時の条件の走行実験をシステム点灯時より前に行った場合にも希望車頭距離の平均に 1% 有意差があること，分散に差がないことが見られる。同じく光刺激なしの場合，順序以外の実験条件は同じであるが，差が出るのは実験順序の影響があったことが分かる。今回の実験では慣れの影響をできるだけ除外するために適度な練習走行時間を設けたが，これでもなおドライビングシミュレータを用いた追従走行実験が完全に実験順序の影響を除けず，実験手法については今後の課題といえる。なお，実験にあたっては異なる実験順序のサンプルができるだけ同数得られるように配慮して分析を行っており，上記の分析結果の大きな方向性には影響ないと考えられる。

## 5. 結論

本研究では追従特性指標の算出方法を示し，追従走行実験における走光型視線誘導システムの運用の有無によ

る追従特性への影響について比較分析した。

システム点灯時には，消灯時より希望車頭距離の分散が小さくなる傾向が見られた。また，光刺激の速度などのシステム点灯の条件によって追従特性への影響が異なり，光刺激の速度は先行車両の速度より速い速度に設定すると，希望車頭距離の分散が小さくなることが分かった。単振動追従状態において，追従車両のドライバーは先行車両の速度に接近しようとする傾向も見られた。

一方，個人差や実験順序など走行条件の影響が大きく，全体として明確な傾向が現れない場合も存在した。これらを考慮した実験及び分析の実施は今後の課題である。

## 参考文献

- 1) 田平優太，塩見康博：走光型視線誘導灯によるドライバーの追従挙動への影響分析，第 55 回土木計画学研究発表会・講演集，2017
- 2) 増本裕幸，飛ヶ谷明人，兒玉崇，北澤俊彦，鈴木健太郎：阪神高速道路における走光型視線誘導システムの運用と発現効果の体系化について，第 55 回土木計画学研究発表会・講演集，2017
- 3) 亀岡弘之，高橋秀喜，山本浩司，田子和利，岡田若奈，辻光弘，木香達秀，小根山裕之：走光性を活用した注意喚起設備の実道実験，第 10 回 ITS シンポジウム，2011
- 4) 大口 敬：高速道路単路部渋滞発生解析—追従挙動モデルの整理と今後の展望—，土木学会論文集，No. 660/IV49，pp39-51，2000

## IMPACT ANALYSIS OF THE MOVING LIGHT GUIDE SYSTEM ON THE VEHICLE'S FOLLOWING CHARACTERISTICS

Huijun ZHU, Masami YANAGIHARA and Hiroyuki ONEYAMA

There is a close relation between vehicle's following way and traffic flow when traffic congestion occurs. The Moving Light Guide System has been installed as a measure to ease congestion. Even though the effect of the system has been confirmed from macro-perspective, but it is still not be clarified from the micro-perspective. In this study, in order to clarify the relation between whether the operation of the Moving Light Guide System and vehicle's following characteristics, by conducting the comparative analysis of different experiments' conditions and calculating following characteristic indexes with the date of vehicle behavior on the following driving experiments. As a result, as the system is operating as well as the speed of light stimulus faster than the speed of preceding vehicle, dispersion of the desired spacing is smaller.