

区画線上に組み込んだ移動走査コードの提案

石野 友美^{1,a)} 河中 治樹^{1,b)} 小栗 宏次^{1,c)}

概要：本研究では、走行中に区画線上のコードを復号することで、車両の進行方向における位置情報を提供することが可能な移動走査コードを提案する。一定の区間内において、区画線上の場所を一意に示すことが可能な移動走査コードの条件を求め、既存の区画線認識手法や本来の路面標示としての機能に影響を与えない設置方法として、突起物を用いて移動走査コードを区画線上に並べる方法を定めた。

Proposition of Moving Sensor Detectable Code Incorporated on Lane Markings

YUMI ISHINO^{1,a)} HARUKI KAWANAKA^{1,b)} KOJI OGURI^{1,c)}

1. はじめに

周辺の環境に合わせて自動車の走行を制御するために必要な技術として、車両位置推定技術が挙げられる。停止線の前で自動車を停止させる場合、走行中の自車位置を特定し、停止線から自車までの距離を正確に把握する必要がある。そのために車両位置を推定する方法には様々なものがある。

衛星を利用する方法や環境地図を利用する方法などが提案されている。しかしながら、衛星を利用する場合では、衛星との通信を行うために遅延が生じるという課題が存在する。専用の計測車両によって生成された高精度な3次元地図を利用する場合では、環境地図の新鮮さをどのようにして保つかという課題が存在する [1], [2]。車両が走行と同時に環境地図を生成し推定する場合は、センシングに用いるセンサの計測誤差が推定誤差に影響するという課題が存在する [3], [4]。

衛星や地図を用いない車両位置推定手法として、道路を利用する方法も提案されている。区画線を用いた車両位置推定では、道路上の区画線をカメラやレーザレーダを用いて認識し、区画線から自車までの距離 (横位置) を計測

することが可能である [5], [6]。しかしながら、区画線は進行方向における変化が少ないために、進行方向における車両位置情報を区画線から得ることが困難であるという課題が存在した。そこで、進行方向の位置情報を道路に基づいて取り出すために、走行車線に沿ってビーコンを埋め込み、ビーコンを基準として車両位置推定を行う方法が提案されている [7], [8], [9]。道路上のビーコンを用いる場合は、道路に埋め込まれたレーンマーカ (磁気マーカ及び電波マーカ) を順に計測することで車両位置の推定が可能であるが、建設する際に道路を作り直さなければならないことから、コストが高いという課題が存在する。コストの問題を解決する手法として、前方カメラを用いてレーンマーカではなく区画線上にペイントした M-CubITS 素子を計測する手法が提案されている [10]。M-CubITS を用いた推定手法はリアルタイムで高精度な推定が可能であるが、一方で M-CubITS 素子が 3 m 毎に設置されるために情報の分解能が低いという問題がある。また、近年では前述の区画線検知技術が商用化されているため、M-CubITS 素子を区画線上にペイントすることで既存の区画線検知技術に影響を与える可能性が考えられる。

そこで、提供可能な情報の分解能が高く、既存の車両位置推定技術と併用することが可能な車両位置推定手法を提案する。我々は停止線までの距離を復号可能な移動走査コード (Moving Sensor Detectable Code) を突起物の組み

¹ 愛知県立大学 大学院情報科学研究科
Aichi Prefectural University, Nagakute, Aichi 480-1192, Japan

a) y.ishino@bme.ist.aichi-pu.ac.jp

b) kawanaka@ist.aichi-pu.ac.jp

c) oguri@ist.aichi-pu.ac.jp

表 1 8進数の移動走査コードの例

Table 1 Example of Moving Sensor Detectable Code in Case of Octal Literal

部分数列の長さ	移動走査コード	組み合わせの数
1	01234567	8
2	012345670203040506071314151617242526273536374647576543210	56

表 2 長さ 2 の部分数列のキーの探索結果

Table 2 Searching Key When the Length of a Partial Sequence is 2

キー	数列全体における位置
01	01 2345670203040506071314151617242526273536374647576543210
02	01234567 02 03040506071314151617242526273536374647576543210
03	0123456702 03 040506071314151617242526273536374647576543210
04	012345670203 04 0506071314151617242526273536374647576543210
05	01234567020304 05 06071314151617242526273536374647576543210
06	0123456702030405 06 071314151617242526273536374647576543210
07	012345670203040506 07 1314151617242526273536374647576543210
10	012345670203040506071314151617242526273536374647576543210

合わせによって表現し、突起物を区画線上に並べることで進行方向の自転車位置情報を取り出す方法を考案した。

2. 移動走査コードの定義

2.1 移動走査する状況下で復号可能なコード

区画線上のコードの計測は車両が道路上に進入したときから開始される。自宅の駐車場から道路に進入するときや車線変更で走行車線を変更するときなど、コードの計測を行うタイミングや位置はその時々によって異なり、固定することはできない。そのため、進行方向における車両位置情報を表す区画線上のコードは、コードの途中、もしくは末端から計測を開始した場合でも復号することが可能なコードである必要がある。そこで、データ系列の途中から読み始めた場合でも情報を取り出すことが可能なコードとして、車両が走りながら計測する、つまり移動走査する状況下で復号が可能な移動走査コードを提案する。

具体的には、部分数列の長さを n とすると、長さ n の部分数列を一桁ずつずらして数列全体を探索したとき、その部分数列が唯一つ存在し、重複しない性質を満たす数列を移動走査コードとする。なお、移動走査コードとなる数列に用いることのできる数字は $0 \sim (m-1)$ の m 種類、つまり m 進数の数字であり、誤検出を抑えるために同じ数字は必ず隣接しないことを条件とする。

2.1.1 部分数列の長さ 1 のときの移動走査コード

移動走査コードの例として、 $n=1$ および $m=8$ のときの移動走査コードを表 1 に示す。表 1 より、'0' や '1' などの長さ '1' の部分数列を数列 "01234567" から探索した時、数列内に同じ部分数列が存在しないことが確認できる。よって、長さ 1 の部分数列をキーとして数列を探索することで、数列内の位置を一意に定めることができる。

また、キーとして用いる部分数列の種類は移動走査

コードが表現可能な情報量に比例する。長さ 1 の部分数列の組み合わせが $0, 1, \dots, m-1$ の m 個に限られることから、部分数列の長さ 1 の移動走査コードを用いて提供することが可能な情報は、全 m 種類となる。区画線上に移動走査コードの数列を並べる間隔を i mm とし、移動走査コードの数列を 1 桁ずつ区画線上に設置した場合、停止線の手前 $m \times i$ mm から m 種類の情報を車両へ提供することができる。 $i=50$ のとき、停止線の手前 $50m$ mm から情報を提供することが可能となるが、長さ 1 では情報を提供する距離および提供する情報の種類が少ない。そこで、部分数列の長さ n を増やすことで部分数列の組み合わせの数を増やし、提供可能な距離や情報の種類を増加させる。

2.1.2 部分数列の長さ n のときの移動走査コード

長さ n の部分数列の組み合わせの数 C は、隣接する数字が重複しない m 進数の数列の組み合わせを表す式 (1) で求まる。

$$C = m \times (m-1)^{n-1} \quad (1)$$

$n=2, m=8$ としたときの移動走査コードとその組み合わせの数を表 1 に示す。表 1 より、部分数列の長さ n が増加したことで、数列全体の長さや組み合わせの数 C が飛躍的に増加する。

表 1 に示す $n=2$ および $m=8$ の移動走査コードを表す数列から、任意の長さ 2 の部分数列を探索した結果を表 2 に示す。'01' や '02' などの長さ 2 の 8 進数の部分数列は、表 2 の数列内で太文字で強調されたところのみ検出される。表 2 のように、探索した部分数列と同じ部分数列が数列内で唯一つのみ存在するような移動走査コードを任意の長さ n に対して作成できる。

部分数列の長さ n の移動走査コード全体の長さ L は、式 (2) で求まる。

表 3 部分数列の長さを変化させた場合の移動走査コード

Table 3 Moving Sensor Detectable Code for the Various Length of a Partial Sequence

部分数列の長さ n	組み合わせの数 C	数列の長さ L	コード全長 R [mm]
2	56	57	$57i$
3	392	394	$394i$
4	2,744	2,747	$2,747i$
5	19,208	19,212	$19,212i$

表 4 移動走査コードの数列が満たす条件

Table 4 Conditions of Moving Sensor Detectable Code

#	条件
1	用いる数字は 0 から $m - 1$ までの m 種類である
2	同じ数字は隣接しない
3	長さ n の部分数列を一つのコードとしてみなす
4	コードは数列内に 1 つのみ存在し、重複しない



図 1 数列“12345”を色によって表現した場合

Fig. 1 Expression of “12345” by Color Pattern

$$L = m \times (m - 1)^{n-1} + (n - 1)$$

$$= C + (n - 1) \quad (2)$$

例として、部分数列の長さが $n = 2$ で $m = 8$ 種類の数字を用いるとき、部分数列の組み合わせの数は式 (1) より 56 通り存在し、数列の長さは式 (2) より 57 桁となる。

また、区画線上に i mm 毎に数列の各要素を設置したとき、移動走査コードを並べた区画線の長さ (コード全長) R mm は、式 (3) によって求められる。

$$R = i \times \{m \times (m - 1)^{n-1} + (n - 1)\}$$

$$= i \times L \quad (3)$$

例えば長さ $n = 2$ での $m = 8$ におけるコード全長 R は式 (3) より $57i$ m となる。 $m = 8$ において部分数列の長さ n を変化させたとき、部分数列の組み合わせの数およびコード全長の推移を表 3 に示す。表 3 より、部分数列の長さ n が増加するにつれて組み合わせの数、数列の長さおよびコード全長が共に増加することがわかる。

以上より、本研究では表 4 に示した 4 つの条件を満たす数列を移動走査コードとする。

3. 区画線上に移動走査コードを並べる方法

3.1 色や塗布パターンの違いによる移動走査コードの表現

区画線の色と塗布パターンによって数列“12345”を表現したものをそれぞれ図 1 および図 2 に示す。図 1 および図 2 はそれぞれ区画線上に数列“12345”を左から順に区画線上に表現している。図 1 は色によって数字の違いを表現した区画線であり、図 2 は数字毎に異なる塗布パターンと



図 2 数列“12345”を塗布パターンによって表現した場合

Fig. 2 Expression of “12345” by Painting Pattern

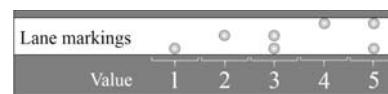


図 3 数列 12345 を凹凸によって表現した場合

Fig. 3 Expression of “12345” by Convex Pattern

対応付けて表現した区画線である。これらの表現方法は、視覚的に数列の違いを表現している。このように視覚的に数列の違いを表現したとき、区画線の視認性に影響を与える点が問題点として挙げられる。図 1 のように数列を色によって表現した場合は、運転手がこれまで利用してきた白色や黄色の区画線と同一の路面標示であると認識できない可能性が考えられる。また、塗布パターンによって表現した場合は破線や減速帯など他の路面標示と混合する可能性やドライバや歩行者からの視認性が下がる可能性が考えられる。加えて、区画線の色や塗布パターンが変わることで既存の区画線検知技術へ影響を及ぼす可能性も考えられる。これらの理由から、色や塗布パターンなどの視覚的な差異による数列の表現は区画線上にコードを並べる方法として適切でないと考えられる。

3.2 凹凸の組み合わせによる移動走査コードの表現

区画線上の凹凸の組み合わせによって数列を表現したものを図 3 に示す。図 3 は一定の区間毎に 3 つの突起物を設置し、突起物が存在するか否かによって数列を表現したときの区画線を横から見たときの図である。具体的には突起物が有る場合 (凸) を 1、無い場合 (凹) を 0 とすると、数列内の各桁における数字‘1’は 100、‘2’は 010、‘3’は 001、‘4’は 110、‘5’は 011 と対応付けられている。

凹凸によって数列を表す場合では、突起物の色を設置する区画線の色と同じ色にすることで視覚的に表現した際に生じる二つの問題に対処することができる。また、区画線上に突起物を設置すること自体はすでに実用化されており、突起物としてリブやスポットフレックスがある。また、こういった既存の製品、技術を利用することで素材や施工機

の開発および導入のコストを抑えることができる。以上より、本研究では区画線上に設置する数列を凹凸によって表現することとする。

3.3 移動走査コードの計測に用いる計測機器

区画線上に凹凸を用いて表現した移動走査コードを計測するためには、凹凸による違いを検知可能な計測機器を自動車に搭載する必要がある。区画線の認識に用いる計測機器の候補としてカメラとレーザ測距センサが挙げられる。カメラは色から、レーザセンサは反射強度（輝度値の変化）から区画線を検知することが可能である。区画線上に設置する移動走査コードは凹凸の組み合わせによって表現するため、凹凸を識別するための形の情報が必要となる。カメラで凹凸の識別を行うことも不可能ではないが、本研究では物体で反射したレーザ光が検知器に到達するまでの時間から距離情報を算出可能なレーザレーダ（LIDAR）を計測に用いる。

3.4 区間内に設置する突起物の大きさと個数

3.4.1 突起物の最小の幅

区画線上に一区間で設置する突起物の個数を検討するためには、まず突起物の大きさや突起物同士を離す長さを決める必要がある。レーザレーダは地面に向けて下向きに照射し、 $0.0 \sim W$ mm の範囲で計測を行うとする。このとき、ステップ間で必ず生じるレーザレーダで計測できない範囲は、レーザレーダと計測対象までの距離が遠ざかるほど長くなるという特徴がある。レーザレーダの計測範囲内における、1ステップ間で生じるレーザレーダが当たらない範囲の長さを算出する。式(4)で求めた s ステップのときのレーザレーダから対象までの路面上の長さ d_s mm を用いて、 s および $s+1$ ステップ間で生じるレーザレーダが当たらない範囲の長さ E を式(5)によって算出する。

$$d_s = \frac{h \sin(S \times s)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - S \times s\right)} \left(s = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{R}{S} \right\rfloor \right) \quad (4)$$

$$E = d_{s+1} - d_s \quad (5)$$

ただし、 R はレーザレーダの走査角度、 S はレーザレーダの角度分解能あるいはステップ数を示す。

本研究では移動走査コードを計測する際に用いるレーザレーダとして表5に示す仕様のレーザレーダを想定している。表5より、 $W = 1700, R = \frac{3\pi}{2}, S = \frac{\pi}{720}$ のとき、 0 mm \sim $1,700$ mm で算出した E を表6に示す。表6より、 E はレーザレーダから離れるに従って大きくなり、 E の最大値は 16.0 mm であった。このことから、表5に示すレーザレーダを用いた場合、突起物の幅が 16.0 mm より小さいとき、突起物が計測されない可能性があるといえる。このように用いるレーザレーダの仕様によって突起物の最小の幅が定まるが、本研究では突起物の幅は 16.0 mm 以上

表5 計測に用いるレーザレーダの仕様

Table 5 Specifications of LIDAR for Detecting the Convex Patterns

項目名	変数名	数値
計測範囲 [mm]	$0 \sim W$	$0 \sim 1,700$
走査角度 [rad]	R	$\frac{3\pi}{2}$
角度分解能（ステップ角） [rad]	S	$\frac{\pi}{720}$
走査時間 [ms/scan]	T	25

表6 1ステップ間でレーザ光が当たらない範囲

Table 6 Unirradiated Range for One Step

計測対象の位置 [mm]	計測できない範囲 [mm]
0	4.8
500	5.8
1,000	8.8
1,500	13.6
1,700	16.0

であるとする。

3.4.2 突起物の厚さ

物体にレーザレーダを照射するとき、物体によってレーザ光が遮られる範囲はレーザレーダによって計測することができない範囲となる。計測する物体の厚さやレーザレーダを照射する角度によって遮られる範囲は変化するが、物体の厚さが厚いほど、また照射する角度が傾いているほどその範囲は大きくなる。このことから、レーザレーダによって突起物を照射した場合で遮られる範囲が最大となる点は、最もレーザレーダの照射する角度の傾きが大きくなる W mm 付近であるといえる。

突起物の厚さは、区画線上の突起物として既に商品として販売され、施工が行われているリブやスポットフレックスの厚さと同等であれば走行上の安全性に問題はないと考えられる。リブ式路面標示材におけるリブの厚さは $4 \sim 7 \pm 1$ mm であり、スポットフレックスの厚さは $2 \sim 4 \pm 1$ mm であることから、本研究では移動走査コードを表すために用いる突起物の厚さは 5 ± 1 mm とする。

3.4.3 突起物同士の最小の間隔

レーザレーダから W mm 離れた計測地点に厚さ 5 mm の突起物を設置したとき、突起物によってレーザ光が遮られるために生じる計測できない範囲が最大になる。レーザレーダの走査範囲 $0 \sim W$ mm の中で最も遠い計測地点 W mm を示すステップ数を s_w とすると、このことから、厚さ 5 mm の突起物によって生じる、計測することができない範囲の最大値 D_{max} は式(6)で求まる。

$$D_{max} = \frac{5 \times \sin(s_w \times S)}{\sin\left\{\frac{\pi}{2} - (s_w \times S)\right\}} \quad (6)$$

表5より、 $W = 1700, s_w = 227, S = \frac{\pi}{720}$ とすると、 D_{max} はおよそ 7.6 mm となり、 7.6 mm 以下の間隔で突起物が区画線上に並べられていた場合、突起物と突起物の間の平らな面を計測することができない可能性がある。このよう

表 7 突起物を並べる個数と大きさ

Table 7 Number and Scale of Protuberance

並べる個数	組み合わせの数	幅 [mm]	間隔 [mm]
2	4	50	50
3	8	40	15
4	16	30	10

表 8 突起パターンと数字の対応

Table 8 Patterns of Protuberances and Value

移動走査コードの数列内の数字	対応する突起パターン
0	000
1	001
2	010
3	011
4	100
5	101
6	110
7	111

に用いるレーザーレーダの仕様によって突起物の幅と同様に突起物同士の最小の間隔が定まる。本研究では区画線上に一行に並べる時、突起物同士の間隔を少なくとも 7.6 mm 以上離すこととする。

3.4.4 突起物を並べる大きさと個数

式 (5) および式 (6) で求めた突起物の最小の幅と最小の間隔を満たすような突起物を区画線上に並べる。レーザーレーダを用いて安定した突起物の検知を行うためには、突起物上により多くのレーザー光が当たり、データを計測できることが重要となる。そこで、レーザーレーダの計測間隔が最も長い W mm で計測した場合でも、突起物上と突起物同士の間に 2 点ずつレーザー光が当たることを条件とする。表 5 の仕様に従って、式 (5) および式 (6) から突起物が満たすべき条件として、突起物の最小の幅と最小の間隔を求めた。式 (5) および式 (6) より、突起物の最小の幅は 32.0 mm、突起物同士の最小の間隔は 15.2 mm となった。区画線上に突起物を一行に並べる最大の個数と突起物の大きさについて、これらの条件を満たす必要がある。加えて、突起物の大きさは幅 150 mm の区画線上に並べることが可能な大きさである必要がある。

表 7 に突起物を並べる個数とその大きさを示す。表 7 より、区画線上に 4 つ並べたとき、突起物の幅とその間隔は式 (5) および式 (6) の条件を満たさないため、安定した計測を行うことができない可能性がある。区画線上に 2 つ並べた場合は突起物の幅と間隔が十分に式 (5) および式 (6) の条件を満たすため、安定した計測が期待される。一方で、3 つ並べた場合や 4 つ並べた場合に比べて 2 つ並べた場合は組み合わせの数が少なく、移動走査コードの数列内で用いることのできる数字の種類 m が 4 種類に限られる。

そこで、区画線上に並べる突起物の最大の個数は 3 つとする。移動走査コードを表す数列の各数字を突起物の有無

の組み合わせによって表現すると、区画線上に 3 つ並べた突起物は、1 区画ごとに 3 桁の 2 進数を表現することができる。突起物の有無の組み合わせを突起パターンとし、突起パターンと数字の対応を表 8 に示す。表 8 より、1 区画ごとに表す数字の種類は全 8 種類となる。表 5 に示すレーザーレーダを用いて移動走査コードを計測することを前提としたとき、進行方向における車両位置を表す移動走査コードを並べた区画線の概念図を図 4 に示す。

4. 移動走査コードから提供可能な情報

車両の走行に伴って移動走査コードを 1 桁毎に計測し、数字へと順に復号することで n 桁の部分数列を認識する。 n 桁の数値をキーとしてローカルデータベースを探索することで、現在の車両位置から停止線までの距離情報を取得することで自車両から停止線までの距離という相対的な位置情報を提供することが可能である。相対位置情報の正確さや分解能は、区画線を分割する長さ i mm に依存する。例えば $i = 50$ として区画線を 50 mm 毎に分割した場合、移動走査コードは 50 mm 毎の相対位置情報を提供することが可能である。

5. おわりに

自動走行に向けた道路インフラとして、走行車両に対して様々な情報を提供することが可能な区画線を提案した。本研究では区画線上に設置する車両の進行方向における位置情報を提供する移動走査コードの条件を定めた。コードを区画線上に設置する際に、区画線の本来の役割や区画線検知手法に影響を与えないことを前提として、区画線上でコードを表す突起物の並べ方を定めた。今後の課題としては、区画線上に並べた移動走査コードを読み取るためのレーザーレーダを用いた計測手法の確立が挙げられる。

移動走査コードの復号が可能であった場合、さらに GPS によって得られる位置情報と組み合わせることで、車両がどの交差点を走行しているかという走行位置の特定を行うことが可能となる。GPS によって探索範囲を限定したうえで長さ n の部分数列をキーとしてネットワーク上のデータベースにアクセスすることで、渋滞情報や事故情報など、走行位置によって異なる様々な情報を走行中の車両へ提供することができる。

参考文献

- [1] 渋谷奈保, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬洋, 小島洋子, 高橋新: 車載レーザスキャナによる距離データマップの構築と高精度自車位置推定, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 89, No. 1, pp. 215-225 (2009).
- [2] 米陀 佳祐, 三田 誠一, 奥谷 翼, 武藤 健二: 3次元高精細点群データを活用した多層マップマッチングによる公道自己位置推定, 精密工学会誌, Vol. 81, No. 11, pp. 1017-1026 (2015).
- [3] Yoshiko Kojima, Arata Takahashi, Yoshiki Ninomiya:

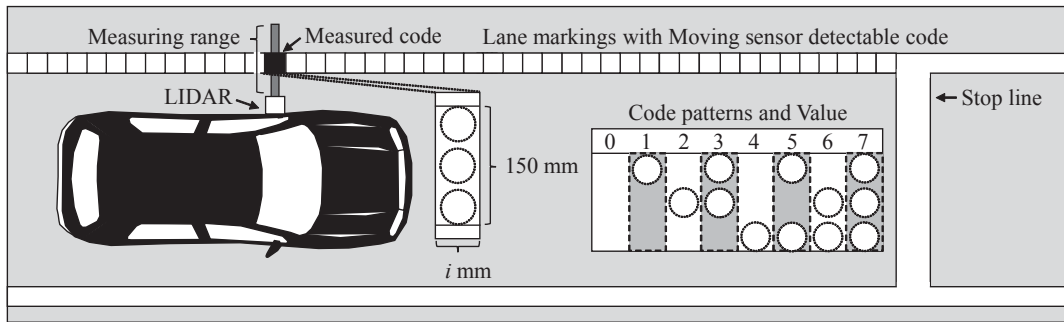


図 4 移動走査コードを並べた区画線の概念図

Fig. 4 Image of Lane Markings with Moving Sensor Detectable Code

“Precise ego-localization using GPS and an outside-monitoring sensor,” In Proceeding ITSWC 2006 (2006).

- [4] 小島洋子, 高橋新, 二宮芳樹: 汎用 GPS と車載レーザーレーダを用いた高精度自車両位置推定, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 1, pp. 64-74 (2009).
- [5] 葛西 達哉, 小野口 一則: 多重情報地図を用いた隊列走行のための区画線検出システム, 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 10, pp. 1036-1044 (2013).
- [6] 磯貝俊樹, 松浦充保, 川合健夫: レーザスキャナを用いたレーンマーカ検出, 映像情報メディア学会誌, Vol. 68, No. 10, pp. 780-784 (2014).
- [7] Je-yeon Kim, Takaaki Hasegawa: “On re-positioning of the PN coded magnetic markers system on road platform “Dot ITS”,” In Proceeding of IEEE ITSC 2002, pp. 259-262 (2002).
- [8] 金帝演, 長谷川孝明: 道路プラットフォーム「ドット ITS」における PN 符号化磁気マーカシステムに関する一検討, 電子情報通信学会技術研究報告, ITS, Vol. 101, No. 463, pp.23-27 (2001).
- [9] 金帝演, 長谷川孝明: 高速道路と一般道路交差点での M 系列レーンマーカの配列方法と再位置特定について, 電子情報通信学会論文誌 A 基礎・境界, Vol. 88-A, No. 2, pp.257-268 (2005).
- [10] 金帝演, 長谷川孝明: M-CubITS を用いた車両測位実験, 電子情報通信学会論文誌 A 基礎・境界, vol.89-A, No.11, pp.993-1003 (2006).