

市街地移動ロボットのための白線検出アルゴリズムの開発

天野, 亮佑 / AMANO, Ryosuke

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

55

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2014-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00010333>

市街地移動ロボットのための 白線検出アルゴリズムの開発

A STUDY OF LANE DETECTION ALGORITHM FOR MOBILE ROBOT UNDER REAL WORLD
ENVIRONMENT

天野 亮佑

Ryosuke Amano

指導教員 小林一行

法政大学大学院工学研究科システム工学専攻修士課程

This paper describes a robust and stable lane detection algorithm for mobile robot under real world urban area environment. In order to achieve robust and stable lane detection, we propose a new eigenvector based clustering algorithm based on the omni-directional images. Employment of an eigenvector based clustering enables robust and stable lane detection even if the steep curved lane and/or even if a worn colored lane. In order to detect steep curved lanes as well as a worn colored lane, eigenvector based curb fitting methods are employed. Validity of a new proposed algorithm is confirmed by both offline simulations and actual outdoor experiments by using mobile robot under real world environments.

Key Words: Mobile robot, Lane detection Eigenvector, Omni-directional camera

1. はじめに

移動ロボットはこれまで、工場などのよく整備された屋内環境に限定して利用されてきた。現在では実験的な段階であるものの、屋外環境や不整地に対応した移動ロボットも開発されている[1]。屋外環境での利用範囲が拡大していけば、将来は市街地のような人の生活環境下でも利用されていくと考えられる。

白線は市街地において路側帯として通行人の安全の確保や侵入禁止の区分の明確化という、安全性を高めるための重要な役割を果たしている。移動ロボットも安定した白線検出が可能ならば、路側帯などの白線に人と同様に従うことで、市街地でも安全な移動が実現可能である。自動車では安全性を高めるための白線検出法としてハフ変換やエッジ検出を利用した手法がある[2],[3]。これらの手法は自動車に適した手法として開発されているため、直線的な

白線でかつ交通の流れがよく整備されている高速道路などで使われている。市街地移動ロボットで認識に必要と想定される白線はPhoto.1 (a)のような劣化し途切れている白線やPhoto.1 (b)のような急峻なカーブである。また市街地では歩行者や自転車などの予期しない動的障害物の存在も考慮する必要がある。



(a) Worned colored lane

(b) Curved lane

Photo.1 Sample Lane

移動ロボットの視野角は安全性を考慮する上で非常に重要である。広い視野角は移動ロボットの周囲を含む外界の状況を広範囲にわたり把握できる。移動ロボットの周囲を含む広い視野角の画像を得るための研究として、複数台のカメラで取得した画像を合成して移動ロボットの周囲の画像を得る研究もされている[4]。しかし画像の合成に処理時間がかかることやカメラを複数台稼働するにはキャリブレーションの必要があるため移動ロボットに複数台カメラを搭載することは現実的ではない。そこで、本研究では周囲の画像情報を一度に取得できる視覚センサである、全方位カメラを利用して市街地移動ロボットに適した白線検出アルゴリズムの開発とその検証を行なう。

2. 移動ロボットの定義と問題の記述

本研究での市街地移動ロボットとは市街地で安全に白線が検出できるロボットと定義する。Fig.1 に標準的な市街地移動ロボットを示す。市街地移動ロボットには視覚センサと方位センサ、速度センサが搭載されている。これらのセンサを使い環境認識や自己位置推定、経路探索ができる移動ロボットと定義する。

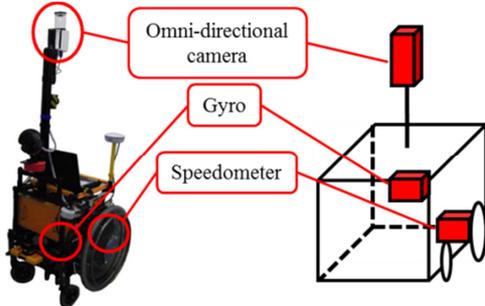


Fig.1 Mobile robot suitable for urban area

以下に市街地で移動ロボットが白線検出を行うための仮定を3つ設ける。

- (A1) 白線の幅は 15[cm]程度とする。
- (A2) 移動ロボットは白線の内側を走行する。
- (A3) 移動ロボットの速度は 6[km/h]以下とする。

仮定(A1)は、日本の道路にひかかれている白線の幅が 15[cm]程度であることから設けた。

仮定(A2)は、電動車いすが道路交通法では歩行者扱いとなることから設けた。

仮定(A3)は、電動車いすが道路交通法で移動速度が 6[km/h]以下と定められていることから設けた。この定義

と仮定より、市街地で白線検出を行なう際の問題点をつぎにまとめた。

- (P1) 外界の状況を把握するための視野角の問題
- (P2) 劣化した白線の問題
- (P3) 曲線を描く白線の問題
- (P4) 動的障害物によって白線を見失う問題

問題(P1)は、移動ロボットは市街地を安全に移動するため、外界の状況を把握するための広い視野角の画像情報が必要である。そこで全方位カメラを採用する。全方位カメラは移動ロボット周囲の外界の状況を一度に把握できるので高い安全性が必要な市街地移動ロボットに適している。

問題(P2)は、市街地にある白線は劣化しているものが多く、かすれや途切れがある問題である。劣化している白線は白線検出の安定性を著しく低下させる。

問題(P3)は、市街地の白線は急峻なカーブや大きく緩やかな曲線を描く白線も存在する問題である。従来の白線検出法は自動車が高速道路の白線を検出するための手法であるため市街地の白線を検出することは難しい。従来手法は、直線的な白線が道の左右の両方に必要などの条件がある[5]。

問題(P4)は、市街地では歩行者や自転車といった動的障害物が多く存在する問題である。これらの動的障害物は前まで検出できていた白線を見失う原因となる。

3. 白線検出アルゴリズムの概要

Fig.2 に開発した移動ロボットに適した白線検出アルゴリズムの流れを示す。

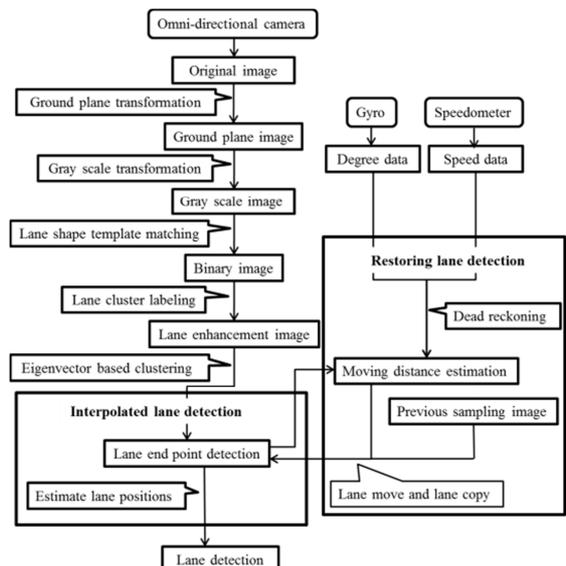


Fig.2 Development lane detection algorithm flow

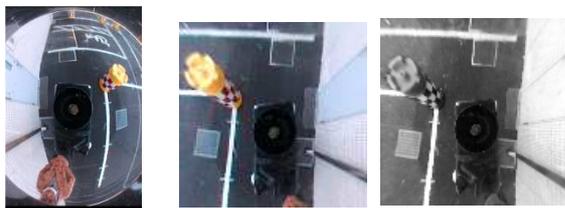
フローチャートに示されている白線候補点の検出までの流れを以下に示す。

全方位カメラから得られた画像を地平面画像に変換する。この変換した地平面画像をグレースケールに変換し、その後テンプレートマッチングをして二値化画像に変換する。変換によって得られた二値化画像に対してラベリングでノイズを除去して白線候補点を検出する。検出した白線候補点に途切れがあった場合は白線ごとの固有値と固有ベクトルから端点を検出した後、途切れている部分を補間する。動的障害物や光量の変化によって白線が検出できなくなった場合は、移動ロボットのサンプリング間の移動軌跡を考慮して、以前のサンプリングで検出した白線を復元させて検出する。

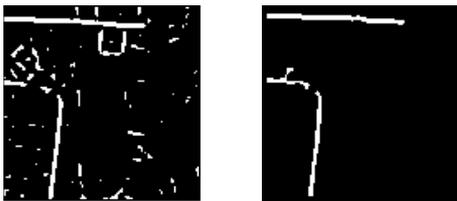
4. 白線検出アルゴリズム

(1) 白線候補点の抽出

Fig.3 に白線候補点の抽出までの処理過程で得られる画像を示す。全方位カメラから得られた画像を Fig.3(a)に、全方位カメラから得られた画像を 5[cm/pixel]の地平面画像に変換した画像を Fig.3(b)に、地平面画像にグレースケール変換をした画像を Fig.3(c)に示す。グレースケールには最も有名な手法である加重平均法を用いて輝度を算出するのではなく B(Blue)成分を用いることで白線を強調した。グレースケール画像にテンプレートマッチングで二値化変換した画像を Fig.3(d)に、二値化画像にラベリングをして白線を検出した画像を Fig.3(e)に示す。



(a) Original image (b) Ground plane image (c) Gray scale image



(d) Binary image (e) Candidate lane

Fig.3 Lane detection

(2) 途切れた白線の補間

市街地にある白線は劣化しているものが多く途切れている箇所やかすれている箇所が存在する。白線の途切れやかすれがある場合は途切れている端点を検出した後、白線の補間する。この白線補間は以下の2Stepにより構成される。

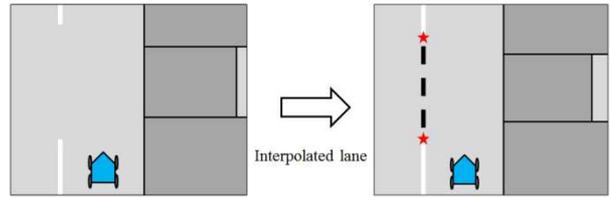


Fig.4 Interpolated lane

1) 白線の端点の検出

ラベリングによって得られたラベル情報から白線候補点をラベルごとの集まりに分ける。分けられた集まりごとに固有値と固有ベクトルを求めることで、端点検出の処理時間を短縮するためのフィルターを作成する。

白線の集まりごとの縦と横の座標をそれぞれ p_1, p_2 とする。 p_1, p_2 の i 番目の画素をそれぞれ p_{1i}, p_{2i} ($i = 1, 2, \dots, n$)とし、変換軸の長さを1として式(1)を解き固有ベクトルと固有値を算出する。

$$\begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$s_{kk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_{ki} - \bar{p}_k)^2, (k=1,2) \quad (2)$$

$$s_{kj} = s_{jk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_{ki} - \bar{p}_k)(p_{ji} - \bar{p}_j), (j=1,2) \quad (3)$$

$$\bar{p}_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n p_k \quad (4)$$

$$\bar{p}_j = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_j \quad (5)$$

w_n : 固有ベクトル

λ : 固有値

算出された固有値 λ から白線の形状に合わせた楕円の長軸と短軸の固有ベクトルの方向を得ることができる。この固有ベクトルの方向から、端点を検出するためのテンプレート画像と白線補間の端点の組み合わせを決定する。

検出すべき端点を明確にするため、画像に対してメディアンフィルターをかけた後テンプレートマッチングを用いて端点を検出する。

2) 白線補間

途切れている白線の間を直線で補間する。そのため補間する端点の組み合わせを点と直線の距離と2点間の距離から決める。

端点の形状と算出された固有ベクトルの長軸の傾きをもとに端点から直線を引き、この直線と他の端点との距離を算出する。この直線と点の距離と端点間の距離から補間する端点の組み合わせを決める。

基点とする端点の座標をそれぞれ g, h とする。候補となる i 番目の端点の座標をそれぞれ $g_j, h_j (j = 1, 2, \dots, n)$ として式(8), (9)を解き直線と点の距離 d と2点間の距離 r を算出する。算出された d と r から補間すべき端点を得る。 k_{broad} と k はともに閾値であり、道幅と移動ロボットの横幅から決定する。

$$a = \frac{\lambda_l}{\lambda_s} \quad (6)$$

$$c = h - ag \quad (7)$$

$$d = \frac{|h_i - ag_i - c|}{\sqrt{1+a^2}} \quad (8)$$

$$r = \sqrt{(g - h_i)^2 + (g + h_i)^2}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

$$f(x_i, y_i) = \begin{cases} 1 & (r < k_{broad} \ \& \ d < k) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (10)$$

λ_l : 長軸の固有ベクトル

λ_s : 短軸の固有ベクトル

(3) 動的障害物によって見失った白線の復元

屋外環境で画像処理を行なう場合、動的障害物によって周囲状況や天候によって光量に変化がある問題がある。動的障害物や急激な天候の変化は前のサンプリングまでは検出できていた白線を瞬間的に検出できなくなることがある。そこで前のサンプリングで検出できていた白線情報を一時的に復元する。復元に利用する範囲は移動ロボットの時速を4[km], 歩行者の平均移動速度を4[km]とした場合、すれ違うまでにかかる時間である1.5[s]とする。

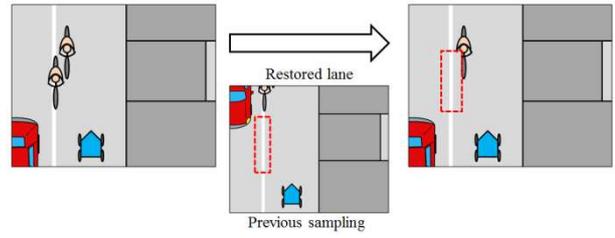


Fig.5 Restored lane

1) 移動ロボットの移動軌跡計算

見失った白線を複製するために白線を検出できていたサンプリングから現在までに移動ロボットが移動した軌跡を算出する。

移動ロボットに搭載されている速度計とジャイロから(11)式, (12)式のDead Reckoning法で移動ロボットの移動軌跡を算出する。

$$x(t_k) = v_k \times (t_k - t_{k-1}) \times \cos \theta_k + x(t_{k-1}) \quad (11)$$

$$y(t_k) = v_k \times (t_k - t_{k-1}) \times \sin \theta_k + y(t_{k-1}) \quad (12)$$

t_k : 時刻 t_k

$x(t_{k-1}), y(t_{k-1})$: 時刻 t_{k-1} での移動軌跡

v_k : 時刻 t_k での移動ロボットの速度

θ_k : 時刻 t_k での移動ロボットの角度

2) 白線の移動と復元

見失う前に検出した白線の座標 $x(t_{sample}), y(t_{sample})$ から式(11)と式(12)で算出された移動ロボットの移動軌跡 $x(t_k), y(t_k)$ を引き、白線を見失う前からの角度変化を回転行列で算出する。移動軌跡と角度変化から白線を移動させて復元する。

$$\Delta x = x(t_{sample}) - x(t_k) \quad (13)$$

$$\Delta y = y(t_{sample}) - y(t_k) \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} x_{restore} \\ y_{restore} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Delta \theta & -\sin \Delta \theta \\ \sin \Delta \theta & \cos \Delta \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (15)$$

$\Delta \theta$: 見失う前からの角度の変化量

t_{sample} : 見失う前に白線を検出した時刻

5. 実験

(1) ハードウェア構成

Fig.7 に実験で使用した移動ロボットと搭載センサを示す。移動ロボットは電動車いす(JW アクティブ:ヤマハ発動機製)をベースに作成し、これに視覚センサとして双曲面レンズと CCD カメラを組み合わせて構成される全方位カメラ、方位センサとして光ファイバジャイロ(HOFG-3:日立電線製)、速度センサとしてロータリーエンコーダを搭載した。画像を取得するための全方位カメラは車両の中央部高さ 180[cm]の位置に設置した。

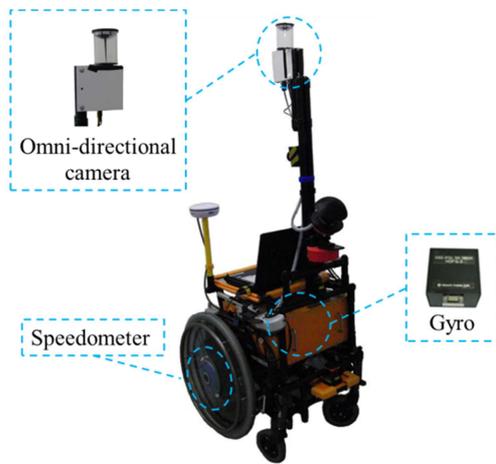
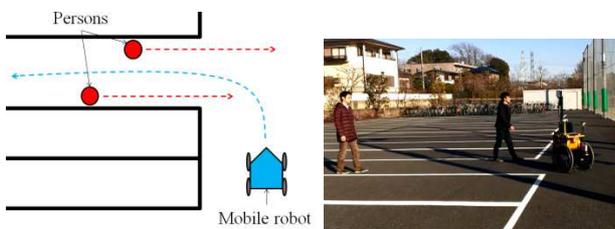


Fig.7 Mobile robot

(2) 白線復元の検証実験

動的障害物に対して白線復元が有用であることを確認する実験を行った。実験では移動ロボットと前方から歩いてくる歩行者がすれ違う中で白線復元を行った。Fig.8(a)に実験環境、(b)に平面変換後の画像、(c)に2値化画像、(d)に見失う前に検出した画像、(e)に開発手法を示す。



(a) Experiment environment

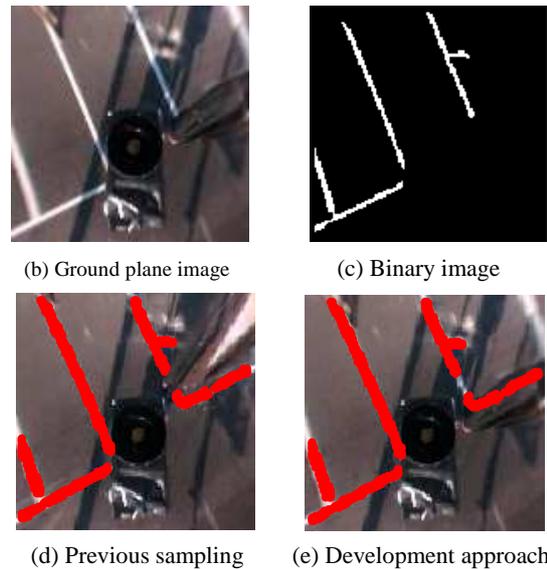
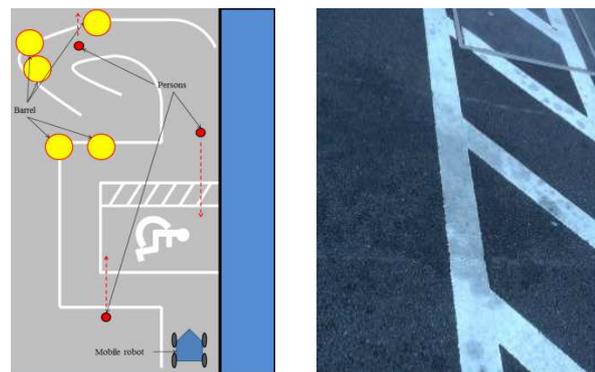


Fig.8 Experiments lane result

歩行者が通り白線を部分的に隠してしまい、一部の白線を見失うが、復元を行ったことで見失った白線も検出できていることが確認できる。

(3) 開発手法の検証実験

開発した白線検出法全体の有用性を確認するために法政大学小金井キャンパス内で実機実験を行った。Fig.9(a)にコース環境を示す。コースは長さ約 20[m]、コース内には静的障害物であるクッションドラムと、動的障害物である歩行者(3人)が存在しそれぞれ任意の方向、速度で歩いている。コースには Fig.9(b)に示すような複雑な形状をした、色が劣化した白線や急峻なカーブも存在する。

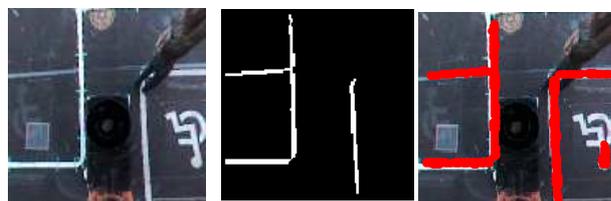


(a) Experiment Course (b) Wormed colored lane

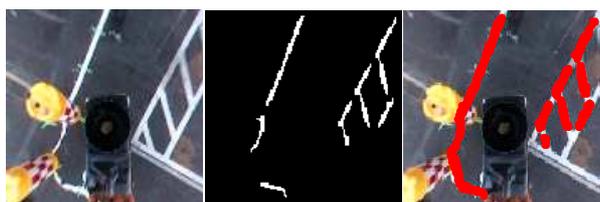
Fig.9 Experiment environment

実験結果を Fig.10 に示す。Fig.10 の左は平面変換をした画像、中央は白線を検出した画像、右は開発した手法を適用した後の画像である。Fig.10(a)に白線を復元しているフレ

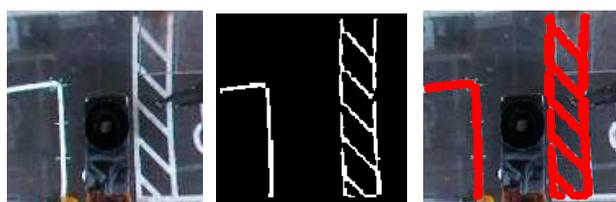
ームを, Fig.10(b)に白線を補間しているフレームを, Fig.10(c)に複雑な形状をした, 色の劣化した白線を検出しているフレームを Fig.10(d)に急峻なカーブの白線を検出しているフレームを示す。



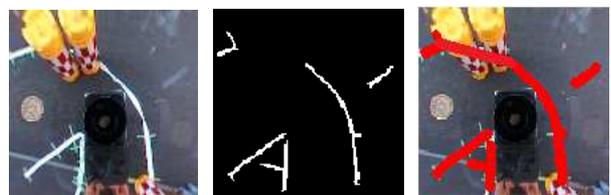
(a) 50Frame



(b) 90Frame



(c) 85Frame



(d) 170Frame

Fig.10 Experiments lane result

実験の結果, 移動ロボットは安定して白線をすることができた. 白線復元を行った Fig.10(a)では白線検出では通行人によって見失って検出できていなかった白線が復元により検出できていることが確認できる. Fig.10(b)ではクッションドラムによって途切れている白線を補間できているのが確認できる. Fig.10(c)では複雑な形状をした劣化した白線を正確に検出できていることが確認できる. Fig.10(d)では急峻なカーブでもコースの形状を捉えて検出できていることが確認できる.

6. おわりに

本研究では全方位カメラを用いて, 移動ロボットが市街地で安全に移動するための白線検出アルゴリズムの開発を行った. 有用性を確認するため法政大学キャンパス内で実機実験を行ない, 劣化した白線や急峻なカーブの白線, 動的障害物が存在する環境下でも安定して白線検出ができることが確認できた. このことから開発した白線検出アルゴリズムを用いることで, 市街地移動ロボットの安全性を高めることが可能であり, 市街地移動ロボットに適した白線検出アルゴリズムを開発することができたといえる

今後は, 他の白線検出法との精度の比較や実際に人が生活している市街地で実験を行い, 開発した手法の有用性を検証していきたい.

参考文献

- 1)佐藤雅紀:車輪型移動ロボットの不整地移動に関する性能評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2010, pp.2P1-F15(1)-2P1-F15(3),2010
- 2)Bin Yu : Lane Boundary Detection Using A Multiresolution Hough Transform, International conference on image processing, Vol.2,pp.758-751,1997
- 3)Sin-Yu Chen : Edge-based Lane Change Detection and its Application to Suspicious Driving Behavior Analysis, Intelligent information hiding and multimedia signal processing, Vol.2,pp.415-418,2007
- 4)吉岡健司:全周囲カメラシステムの開発, Matsushita Tech Journal, Vol.54, No.2, pp.16-21,2011
- 5)Seung Gweon Jeong : Real-Time Lane Detection for Autonomous Navigation, Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings,pp.508-513,2001