

幾何学的拘束を考慮したバックミラー画像からの車両検出・追跡

鍋島 彰崇[†] 安達 栄輔[†] 栗田 多喜夫[†] 大津 展之[†]

[†] 産業技術総合研究所

〒 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2 事業所

E-mail: †{teru-nabeshima,e-adachi,takio-kurita,otsu.n}@aist.go.jp

あらまし 運転者の周囲状況の理解が不十分である、運転者とシステムとの意思の疎通が不完全である等のために多くの交通事故が発生している。この防止を目的とした支援システムの要素技術として、本論文では、夜間の高速道路を走行中に撮影したバックミラー映像中の後方車両を検出・追跡する手法について検討する。後続車両のヘッドライトをサポートベクターマシン (SVM) に訓練させ、夜間のバックミラー映像から後続車両のヘッドライトのみを認識させる手法を提案する。SVM を用いてバックミラー画像中でヘッドライトを検出するためには、入力画像を多段階で縮小し、それらの縮小画像中のすべての位置で局所領域を切り出し、それら SVM で学習した識別器に入力する必要がある。ここでは、バックミラーと道路面との幾何学的な関係を利用することで、検出のための探索を制限し、効率的で安定な検出を実現する。

キーワード 幾何学的拘束、サポートベクターマシン、対象検出・追跡

Vehicle detection and tracking in rearview mirror images using geometrical constraints

Terutaka NABESHIMA[†], Eisuke ADACHI[†], Takio KURITA[†], and Nobuyuki OTSU[†]

[†] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Umezono 1-1-1 Tukuba Center 2, Tukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-8586 Japan

E-mail: †{teru-nabeshima,e-adachi,takio-kurita,otsu.n}@aist.go.jp

Abstract Because of driver's misunderstanding of his circumstance or mismatches between driver's intention and system's response, many traffic accidents have occurred. We have been developing a support system for safety driving to prevent such situation. This paper presents an algorithm of detecting and tracking the back vehicles in rearview mirror images taken while driving in a highway at night. The search range for headlight detections is reduced by using the geometrical constraints between the camera and the road plane. As the results, the robustness and the speed of the detection algorithm is improved.

Key words geometrical constraints, Support Vector Machine, object detection and tracking

1. はじめに

近年、交通量の増加による交通事故が問題となっている。このことから、交通の情報化を目指す ITS の分野では、この問題に対して、様々な研究がなされている。その中には運転支援の分野があり、注目を集めている。この中で、車の運転における安全性向上のために、周囲を観測するためのカメラが車に搭載され始めている。これは、前方の車や歩行者、障害物の早期発見や、後方から迫ってくる車などの状況把握には有効なものであるといえる。

本論文では、バックミラーによる映像から車後方の状況を、

自動的に監視するシステムについて検討する。従来法としては、車載センサーを用いた車両検出、障害物検出の研究が古くからなされており、画像を用いたものと各種レーダ、車々間通信を用いたもの等がある。また、車両前方を対象にしたものには、追尾走行と障害物検出などがあるが、車両後方を対象にしたものは、後方のある領域を前もって決めて固定しておいて、その領域を監視しているもの [2] が多く、対象車両の動向を監視したものは少ない。車両後方画像を用いた車両検出では、昼間に後方からくる後続の車両前面の検出、追跡が行われている [1]。

バックミラーの映像は、昼間など明るいところでは、車の形を認識することは比較的簡単であるが、夜間などの暗い状態で

は、車のヘッドライトのみから車かどうかを認識する必要がある。また、道路脇にある電灯や道路周辺にある建物や商店などの明かりや対向車による明かりなど、自車の後方からくる後続車両のヘッドライト以外にもたくさんの明かりがバックミラーに映し出されるので、それらと後続車両とを区別することが重要である。

そこで、本論文では、後続車両のヘッドライトをサポートベクターマシン (SVM) に訓練させ、夜間のバックミラー映像から後続車両のヘッドライトのみを認識させる手法について検討する。SVM を用いてバックミラー画像中でヘッドライトを検出するためには、入力画像を多段階で縮小し、それらの縮小画像中のすべての位置で局所領域を切り出し、それら SVM で学習した識別器に入力する必要がある。ここでは、バックミラーと道路面との幾何学的な関係を利用することで、検出のための探索を制限し、効率的で安定な検出を実現する方法について考察する。

2. 道路平面拘束を考慮した夜間車両認識

ここでは、後続車両のヘッドライトをサポートベクターマシン (SVM) に訓練させ、夜間のバックミラー映像から後続車両のヘッドライトのみを認識させる手法について検討する。SVM を用いてバックミラー画像中でヘッドライトを検出するためには、入力画像を多段階で縮小し、それらの縮小画像中のすべての位置で局所領域を切り出し、それらを SVM で学習した識別器に入力する必要がある。車は道路面上を走行しており、ヘッドライトは道路面から一定の高さの位置にある。また、自車が道路を直進している場合には、バックミラーと道路との幾何学的な関係は一定である。このような幾何学的な拘束条件から導出されるバックミラー画像中でヘッドライトの大きさや位置の関係を利用すると、ヘッドライトの検出のための探索をかなり制限することができる。また、バックミラー画像中でヘッドライトの見かけの大きさに依存して探索点間隔を制御すると、さらに探索を効率化することができる。さらに、このような幾何学的な拘束条件を用いると、街路灯等のヘッドライトと道路面との関係を満たさないような光源や反射光を誤ってヘッドライトと認識する可能性が減り、より頑健なヘッドライトの検出が期待できる。

2.1 バックミラー映像

本論文で用いるバックミラー映像は、文部科学省の科学技術振興調整費「重点課題解決型研究」の「状況・意図理解によるリスクの発見と回避」の中で、高速道路を走行中の業務用トラックに搭載したカメラで撮影した。Fig.1 にバックミラー画像の例を示す。大型トラックからの映像であるため、高い位置から見下ろしたものであることがわかる。また、隣の斜線が画像の中心に沿っており、片方には、自分の車体移っており、その反対側には、反対側の車線や道路脇にあるガードレールなどの背景があるが、夜間の暗闇の中では、ライトで照らし出された部分だけが映し出される。



Fig. 1 バックミラー映像

2.2 サポートベクターマシン (SVM)

パターン認識の分野では、特徴ベクトルの線形分離可能性に基づく線形識別手法が良く使われている。パターン認識手法の中で最も認識性能の優れた学習モデルとして、サポートベクターマシン (SVM) [4] があげられる。

SVM は、ニューロンのモデルとして最も簡単な線形しきい素子を用いて、2 クラスのパターン識別器を構成する手法である。今、正例、負例の二つのクラスに属する学習データのベクトル集合を、

$$(x_i, y_i), \dots, (x_l, y_l) \quad x_i \in R^n, y_i \in \{+1, -1\}$$

とする。この時、この学習データ $x_i \in R^n$ から、クラスラベル出力 $y \in \{\pm 1\}$ への識別関数 $y = f(x, \theta)$ を決定しなければならないが、SVM では「マージン最大化」という基準を用いることで未学習データに対しても高い識別性能 (汎化性能) を維持する識別関数を構成する。また、カーネルトリックを用いて、非線形の識別関数を構成できるように拡張することで、現在知られている多くの識別器の中でも最も優れた識別性能を発揮する手法のひとつであると言われている。カーネル SVM の識別関数は、 l 個の学習データ x_i と、テストデータ x との類似度 (内積) を計算し、それらを線形結合した形で

$$y = f(x, \theta) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^l y_i \alpha_i K(x_i, x) + b \right) \quad (1)$$

$$\theta = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l, b) \quad \alpha \geq 0$$

のように定義される。この時、類似度を計算するための関数 K は、カーネル関数と呼ばれ、事例間の一般化された内積と解釈できる。ここで、線形結合の重み α_i が求めるパラメータとなり、実際には最適化問題

$$\min. \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l y_i y_j \alpha_i \alpha_j K(x_i, x_j) \quad (2)$$

$$\text{s.t. } y_i \left(\sum_{j=1}^l y_j \alpha_j K(x_j, x_i) + b \right) \geq 1 \quad (i = 1, \dots, l)$$

を解くことで求められる。この時、 $\alpha_i > 0$ となる事例 x_i をサポートベクターと呼んでいる。

2.3 バックミラー画像と道路平面との関係

ここでは、カメラの視点 $O(X, Y, Z)$ を原点として Z 方向に画像の中心 $o(x, y)$ が来るようなカメラ座標系 (X, Y, Z) を考える。この時、焦点距離を f で表すと、画像の中心の座標は

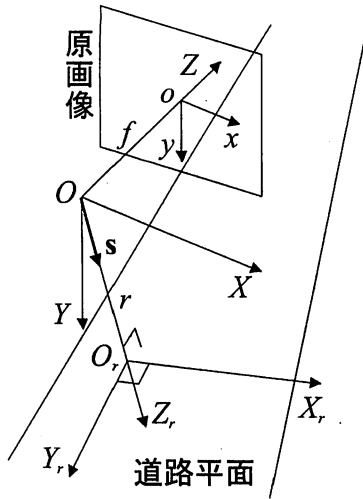


Fig. 2 座標系

$(0, 0, f)^T$ となる。また、Fig.2のように、道路平面がカメラ座標系において定義された単位ベクトル s に直交する平面となるような道路平面の座標系 (X_r, Y_r, Z_r) を考える。このとき、 s で表される道路平面への垂線と道路平面との交点 O_r を道路平面の座標系における原点とする。また、 $OO_r = r$ とする。ここで、 X_r 軸、 Y_r 軸は道路平面内に存在し、 Y_r 軸は車線と平行するように設定する。また、 Z_r 軸は s に平行とする。

カメラ座標系 (X, Y, Z) と道路座標系 (X_r, Y_r, Z_r) は

$$RX = X_r + [0, 0, r]^T \quad (3)$$

のような関係で結ばれることが知られている。ただし、 R はカメラ座標系から道路座標系への回転を表す直交行列であり、 $X = (X, Y, Z)^T$ 、 $X_r = (X_r, Y_r, Z_r)^T$ である。また、 X から画像の座標 $(x, y)^T$ は

$$x = f \frac{X}{Z}, y = f \frac{Y}{Z} \quad (4)$$

で求められる。

2.4 ヘッドライトの位置と見かけのサイズの関係

ヘッドライトの画像中での見かけの大きさは、カメラの視点 O からヘッドライトまでの三次元的距離に反比例すると考えられる。単眼カメラでは、原理的に物体までの距離は計測できないが、ヘッドライトは道路平面上の一定の高さの位置に存在すると仮定すると、道路平面と画像平面との幾何学的な関係が既知ならば距離を推定できる。以下に、画像上で検出されたヘッドライトの距離の算出法について説明する。

カメラ座標系において、カメラ中心から道路平面までの距離は

$$r = s^T X \quad (5)$$

で表される。ここで、画像上の点 $(x_h, y_h)^T$ においてヘッドライトが検出されたとすると、ベクトル $x_h = (x_h, y_h, f)^T$ の延長線上に存在することから、ヘッドライトの三次元位置

$X_h = (X_h, Y_h, Z_h)^T$ は、

$$X_h = \|X_h\| \frac{x_h}{\|x_h\|} \quad (6)$$

の様に求めることができる。式(6)の X_h を式(5)の X に代入することにより、ヘッドライトまでの距離 $\|X_h\|$ は、

$$\|X_h\| = \frac{r \|x_h\|}{s^T x_h} \quad (7)$$

のように求められる。従って、ヘッドライトの見かけ大きさ S は、 $\|X_h\|$ に反比例するように、

$$S \propto \frac{s^T x_h}{r \|x_h\|} \equiv \frac{1}{r} h(x_h, y_h) \quad (8)$$

を用いて推定することができる。ここで、

$$h(x, y) = \frac{s^T x}{\|x\|} \quad (9)$$

とする。

2.5 探索範囲の限定

Fig.3 は、画像中での見かけの大きさが、後続車両の距離に応じて変化し、遠い時には小さくなり、近い時には大きくなる様子を示している。

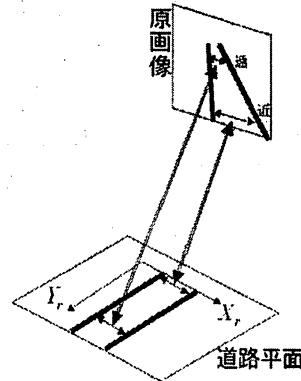


Fig. 3 原画像と道路平面の対比

ヘッドライトを検出するように訓練した SVM を用いた識別器をヘッドライトの検出に利用するには、入力画像を多段階で縮小し、それらの縮小画像中のすべての位置で局所領域を切り出し、それらすべての局所領域を識別器でバックミラーかどうか判定する必要があるが、前述の画像面上の位置と見かけの大きさの関係を用いると、大きさを変化させての探索が不要となり必要な識別回数を大幅に削減できる。

また、画像中の検出点のサンプリング間隔についても、画像中のヘッドライトの見かけの大きさに応じて適切に設定することが可能となり、さらに、探索回数を削減できる。ここでは、Fig.4 のように、道路面上で均等なサンプリングを行い、対応する画像面上の点を検出点とする方法を採用する。

例えば、Fig.5 に示すように、道路面上のサンプリング間隔

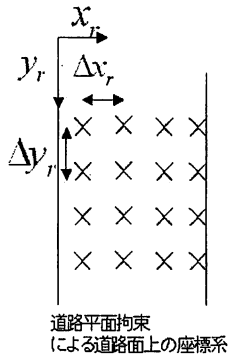


Fig. 4 道路面上での均等サンプリング

を1、および、5とした場合には、画像中の検出点の分布は、Fig.6 となる。この図から、自車から遠い領域では検出点が密に分布しているが、自車に近い領域では検出点がまばらになり、探索の効率化が図れると考えられる。

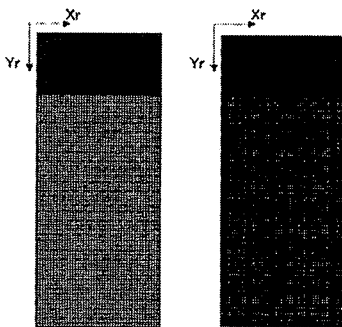


Fig. 5 道路面でのサンプリング
(左図：間隔=1、右図：間隔=5)

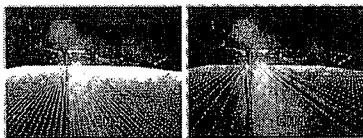


Fig. 6 画像中の検出点
(左図：間隔=1、右図：間隔=5)

2.6 後続車両の距離推定

バックミラー画像中でヘッドライトが見つければ、前述のバックミラー画像と道路平面との関係を利用して、画像中のヘッドライトの座標 $(x_h, y_h)^T$ から、自車から後続車両までの距離を推定することができる。式 (6)、(7) から、カメラ座標系でのヘッドライトの三次元位置 \mathbf{X}_h

$$\mathbf{X}_h = \frac{r}{s^T \mathbf{x}_h} \mathbf{x}_h \quad (10)$$

となる。従って、式 (3) の関係から、検出されたヘッドライトの道路平面上における座標 $\mathbf{X}_r^h = (X_r^h, Y_r^h, Z_r^h)$ は、

$$\mathbf{X}_r^h = R\mathbf{X}_h - [0, 0, r]^T \quad (11)$$

で与えられる。このようにして求めた自車から後続車両までの距離は、自車が追い越し可能な状況にあるかどうかの判断に有用な情報である。そのような状況の認識は、安全運転の支援にとって非常に重要である。

3. 評価実験

提案手法の有効性を確認するため、高速道路を走行中の業務用トラックに搭載したカメラで撮影したバックミラー画像を用いた評価実験を行った。

3.1 SVM によるヘッドライトの検出

まず、ヘッドライトを識別するように訓練した SVM を用いた識別器で、ヘッドライトの検出が可能かどうかの実験を行った。

ヘッドライトとそれ以外の対象を SVM に学習させるために、学習用のデータを用意する必要がある。ここでは、画像からヘッドライトを含む局所領域を切り出し、それらをすべて 10×10 画素に変換して、学習用のデータとした。このとき、切り出した局所領域の大きさは、 $10 \times 10 \sim 20 \times 20$ 画素の 11 段階とした。SVM-light [5] [6] [7] を使用した。

ヘッドライトの検出では、画像中のすべての点から $10 \times 10 \sim 20 \times 20$ 画素の 11 種類の局所領域を切り出し、それを 10×10 画素に変換して、ヘッドライトとそれ以外の対象を識別するように学習した SVM で識別した。つまり、この方法では、画像の各点で大きさを 11 種類変化させて SVM 識別器で識別している。

これによって、ヘッドライトの位置と見かけのサイズに依存しないでヘッドライトの検出を行うことができるが、車両の位置やヘッドライトの見かけのサイズをすべて調べており、検出のための識別に伴う計算コスト（時間、計算量）が大きくなる欠点がある。

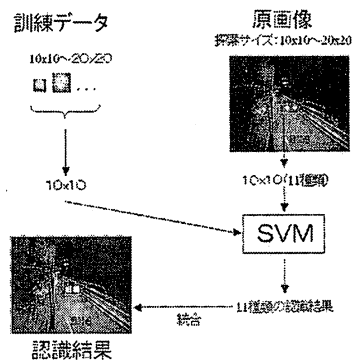


Fig. 7 SVM を用いたヘッドライトの検出

3.2 画像面上の位置と見かけの大きさの関係の利用

画像面上の位置と見かけの大きさの関係をを用いると、大きさを変化させて識別器に入力する必要が無くなり、ヘッドライトの探索が効率化されると考えられる。また、街路灯等のヘッドライトと道路面との関係を満たさないような光源を誤ってヘッドライトと認識する可能性が抑制されると期待される。

具体的には、320x240 の画像において各点で 11 段階の大きさで識別していたところを、推定した見かけの大きさのみで識別すればよくなる。

Fig.8,9 に、11 段階のすべての大きさを識別する場合（全探索）の検出例と推定した見かけの大きさのみで識別する場合の検出例を示す。

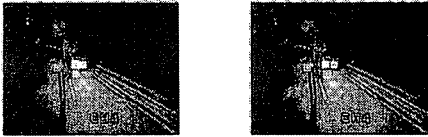


Fig. 8 検出例 (左: 全探索, 右: 見かけの大きさで識別)



Fig. 9 検出例 (左: 全探索, 右: 見かけの大きさで識別)

速くに後続車両が存在している場合 (Fig.8) には、すべての大きさを識別する場合と推定した見かけの大きさのみで識別する場合の検出結果はほとんど変わらない。しかし、Fig.9 のように、後続車両が自車の近くに存在している場合では、すべての大きさを識別する場合には、後続車両のヘッドライト以外の光源を検出してしまっているが、推定した見かけの大きさのみで識別する場合には、後続車両のヘッドライトのみを正しく認識している。

つまり、期待したように、道路面と画像面との幾何学的な関係から見かけの大きさを推定し、推定した見かけの大きさのみで識別することで、後続車両のヘッドライト以外の道路周辺にある電灯や道路沿いにある建物や商店などの明かりなどによる誤認識を減らすことが可能であることが確かめられた。一般に、バックミラー映像の中には、道路周辺にある電灯や道路沿いにある建物や商店などの明かりも映し出されるので、このような拘束条件を満たさないような光源を検出しないようにすることは、夜間での車両検出では重要であると考えられる。

3.3 検出点の設定

画像中の検出点のサンプリング間隔は、画像中のヘッドライトの見かけの大きさに応じて適切に設定すべきである。ここでは、道路面上で均等なサンプリングを行い、対応する画像面上の点を検出点 (Fig.6) とする方法を利用した検出実験を行った。

Fig.10,11 に後続車両が遠い時と近い時の全探索の場合の検

出結果を示す。ここで、道路面上でのサンプリング間隔は、 $\Delta x_r / \Delta y_r = 1, 5$ とした。

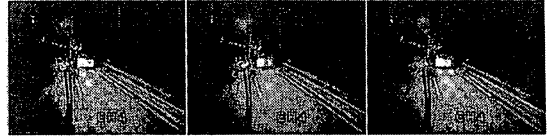


Fig. 10 検出結果: 後続車両が遠い場合。
(左: 全探索, 中: 間隔 = 1, 右: 間隔 = 5)



Fig. 11 検出結果: 後続車両が近い場合。
(左: 全探索, 中: 間隔 = 1, 右: 間隔 = 5)

後続車両が遠い場合には、すべての条件で確実に後続車両を正しく検出できている。後続車両が近い場合には、全探索では後続車両が正しく検出されているが、ヘッドライト以外の光源を誤認識してしまっている。道路面上のサンプリング間隔が 1 の場合には、後続車両のヘッドライトのみを正しく検出出来ているが、サンプリング間隔が 5 の場合には、サンプリングが粗すぎるためか検出できなかった。これは、サンプリング間隔を 5 以上にすると自車に近い後続車両のヘッドライトの中心がサンプリング間隔の間に入ってしまい、正しい検出が難しくなったためと考えられる。一方、サンプリング間隔が 1 の場合は、検出点数を減らしつつ、後続車両のヘッドライトをほぼ正しく検出できており、後続車両の検出に耐えうる手法であるといえる。

3.4 自車と後続車両との距離の推定

道路平面上では、後続車両の走行するレーンの 2 つの車線は平行であり、このレーン (高速道路) の車線幅は、3.5[m] である。この事実を利用すると、自車と後続車両との距離が推定できる。

Fig.12 に、自車から後続車両までの距離を後続車両に追い越されている動画で推定した例を示す。自車から後続車両までの距離が 10m 以上ある場合には、自車と後続車両との距離が正しく推定できていることがわかる。この場合には、後続車両との距離が次第に短くなり、この結果から追い越されている状況であることがわかる。このような状況では、さらに自車が追い越しをしようとするのは危険であり、運転者がそうした操作をしようとするれば、それに対して注意を与えることで、事前に事故の危険性を減らすことが出来ると考えられる。

ここで用いた映像は、1 秒間に 4 フレームの動画であるので、Fig.12 から自車と後続車両の相対速度も推定できる。Fig.13 に推定した自車と後続車両との相対速度を示す。この図から、自車に対する後続車両の相対速度は、ほぼ 4[m/s] であり、後続車両の方が自車よりも速いスピードで走行していることがわかる。

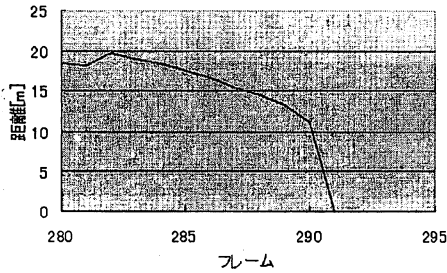


Fig. 12 自転車から後続車両の距離

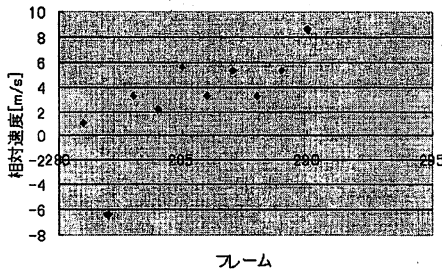


Fig. 13 自転車に対する後続車両の相対速度

4. まとめ

本論文では、夜間の高速道路を走行中に撮影したバックミラー映像中の後方車両を検出・追跡する手法について検討した。後続車両のヘッドライトをサポートベクターマシン (SVM) に訓練させ、夜間のバックミラー映像から後続車両のヘッドライトのみを認識させる手法を提案した。SVM を用いてバックミラー映像中でヘッドライトを検出するためには、入力画像を多段階で縮小し、それらの縮小画像中のすべての位置で局所領域を切り出し、それら SVM で学習した識別器に入力する必要があるが、ここでは、バックミラーと道路面との幾何学的な関係を利用することで、検出のための探索を制限し、効率的で安定な検出が実現できることを示した。また、その結果から、自転車と後続車両との相対距離等を推定でき、追い越されている状況等の安全運転支援のための状況認識に利用できる可能性があることが示された。

5. 謝 辞

本研究の一部は、文部科学省の科学技術振興調整費「重点課題解決型研究」の「状況・意図理解によるリスクの発見と回避」の研究助成により行われたものである。

文 献

- [1] 安増拓見、小沢慎治”車両後方面像からの危険車両検出”、電気学会論文誌 C 125 巻 4 号, pp.570-575, 2005 年
- [2] 大田直哉、新島和孝”人工昆虫視覚による後方接近車両の検出”、信学論誌, J84-D ,8,pp1589-1596

- [3] 工藤 拓, 山田 寛康, 中川 哲治, 松本 裕治”SVM を用いたチャンキングタスクにおける素性の自動選択”, 言語処理学会 第 7 回年次大会発表論文集, pp.257-260, March 2001.
- [4] Vladimir N. Vapnik, The Nature of Statistical Learning Theory. Springer, 1995.
- [5] <http://svmlight.joachims.org/>
- [6] Thorsten Joachims, Learning to Classify Text Using Support Vector Machines. Dissertation, Kluwer, 2002.
- [7] T. Joachims, Optimizing Search Engines Using Click-through Data, Proceedings of the ACM Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD), ACM, 2002.