

# 高精度実環境文字認識のための面積比による付加情報埋め込み

大町真一郎<sup>†</sup> 岩村 雅一<sup>††</sup> 内田 誠一<sup>†††</sup> 黄瀬 浩一<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 東北大学大学院工学研究科

<sup>††</sup> 大阪府立大学大学院工学研究科

<sup>†††</sup> 九州大学大学院システム情報科学研究院

あらまし 環境中の文字をデジタルカメラを入力デバイスとして高精度に認識するために、文字画像と同時に認識補助のための付加情報を提示する方法が検討されている。付加情報は、幾何学的変換に対してロバストに抽出できることが要求される。本報告では、面積比を利用した付加情報提示手法を提案する。面積比はアフィン変換に不変であり、アフィン変換を受けた環境においても誤りなく抽出されることが期待される。実際に付加情報を埋め込んだ文字パターンを作成し、提案手法の有効性と可能性について議論する。

キーワード アフィン不変量, 面積比, 情報埋め込み, 付加情報, 文字認識

## Area Ratio as Supplementary Information for Camera-Based Character Recognition

Shinichiro OMACHI<sup>†</sup>, Masakazu IWAMURA<sup>††</sup>, Seiichi UCHIDA<sup>†††</sup>, and Koichi KISE<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering, Tohoku University

<sup>††</sup> Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

<sup>†††</sup> Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

**Abstract** In order to achieve a highly accurate recognition of characters in a scene image with a digital camera, there are some attempts on offering supplementary information for recognition with a character image. The information should be robust against geometric distortions since an image taken by a digital camera is usually geometrically distorted. In this paper, we propose a method of embedding information in a character pattern by designing a character pattern in two colors so that the information is embedded as the area ratio of the two colors. It is expected that the area ratio is correctly extracted even if the character pattern is affine-transformed since the area ratio is affine invariant. We evaluate generated character patterns with the embedded information and discuss the effectiveness of the proposed method.

**Key words** Affine invariants, Area ratio, Information embedment, Supplementary information, Character recognition

### 1. はじめに

デジタルカメラを入力デバイスとして取得した環境中の文字を認識する手法が検討されている [1], [2]. デジタルカメラによって取得した文字の画像は光学式スキャナで取得した画像と異なり、一般に低解像度であり、照明が非均一であり、幾何学的な変換を受けているため、高精度な認識を実現するのは非常に困難である。高精度な認識の実現のために、文字画像と同時に認識補助のための付加情報を提示する方法が検討されている [3], [4].

付加情報は、様々な幾何学的変換に対してロバストに抽出で

きることを要求される。幾何学的変換は、回転変換、ユークリッド変換、相似変換、アフィン変換、射影変換等に分類でき、後のものほど変換の自由度が高く変形が激しいと言える。カメラで撮影された画像は、一般に射影変換を受けるため、射影変換を受けても変わらない量（射影不変量）を用いて付加情報を提示することが望ましい。射影不変量の一つに複比 [5] がある。文字パターンを複比パターンと呼ばれる縞で表し、縞の間隔の複比の値をその文字のカテゴリに対応づけることで、カテゴリ情報を文字パターンに埋め込む方法が提案されている [3]. しかし、複比パターンは文字パターンの概観を大きく変えるため、人間の読み易さを若干損ねるという問題点があった。

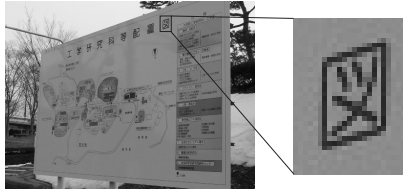


図1 看板中の文字

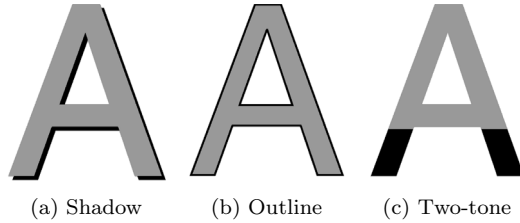


図2 様々な埋め込み法

本論文では、文字パターンの概観をできるだけ損わずに安定した情報抽出を可能とする方法として、2領域の面積比を用いた付加情報の埋め込み法を提案する。すなわち、文字パターンを2色で印字し、それぞれの色の領域の面積比を特定の値とするようにデザインする。2領域の面積の比はアフィン変換を施しても変化しないアフィン不変量である[6]。前述のようにカメラで撮影された画像は一般には射影変換を受けるが、図1の例に示すように、個々の文字の領域に限定すれば近似的にアフィン変換とみなすことが可能な場合も多く、アフィン不変量を用いることで実用的には十分な精度で情報の抽出が行えるものと考えられる。実際に付加情報を埋め込んだ文字パターンを作成し、提案手法の有効性と可能性について議論する。

## 2. 面積比を用いた情報の埋め込み

### 2.1 埋め込み形態

文字パターンを単色ではなく2色を用いて印字し、それぞれの色の領域の面積比を特定の値とするようにパターンをデザインすることで情報を埋め込む。図2に示す例のように、様々な埋め込みの形態が考えられる。(a)は影の部分とそれ以外の部分の面積を利用したもの、(b)は輪郭線の面積とそれ以外の部分の面積を利用したもの、(c)はツートンカラーのフォントのそれぞれの色の部分の面積を利用したものである。

文字に影を付加したり輪郭線を別の色とすることは文字パターンのデザインとしてすでに行われており、提案手法はその線幅を変えるにすぎない。さらに、文字は字種ごとに固有の形を持つため、図2のどの形態で埋め込むにしても、字種によってある程度固有の「自然な」面積比が存在すると考えられる。従って、複色パターンの埋め込みと比較してより自然な埋め込みが可能になると考えられる。

なお、本手法は文字切り出しの問題を解決する手段としても適用できる。個々の文字画像を正確に切り出すことは困難な問題である。特に分離文字の統合については、認識を併用する以外に本質的な解決策はないが、分離文字の個々の部分に対して同じ値を埋め込んでおくことにより、別々の文字なのか分離文字の個々の部分なのか判断できる。

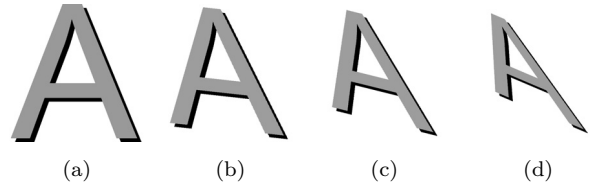


図3 アフィン変換を受けた画像

表1 アフィン変換のパラメータと面積比

	(a)	(b)	(c)	(d)
$a$	1.0	0.9	0.8	0.7
$b$	0.0	0.1	0.2	0.3
$c$	0.0	0.1	0.2	0.3
$d$	1.0	0.9	0.8	0.7
$r$	0.2301	0.2300	0.2301	0.2300

### 2.2 アフィン変換の例とアフィン不変性

アフィン変換は、一般に点  $(x, y)^t$  を以下の式により点  $(x', y')^t$  に写像するものである。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix} \quad (1)$$

式(1)において、 $(e, f)^t$  は平行移動のパラメータであるから、パターンの変形には関与しない。従って、実際には行列

$$P(a, b, c, d) = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \quad (2)$$

による変換のみを考えればよい。式(2)の  $a, b, c, d$  の値を変化させることで様々な幾何学的な変形を行うことが可能である。図3に例を示す。(a)が元の画像であり、高さが500画素の文字「A」(フォントはArial)の文字部分(灰色部分)に対して影の部分(黒色部分)を付加したものである。(b)~(d)は(a)の画像を表1に示したアフィン変換のパラメータ  $a, b, c, d$  で変換した画像である。それぞれの灰色の画素の数に対する黒の画素の数の比を  $r$  として表1に示してある。表から、アフィン変換を受けても比の値はほとんど変わらないことが分かる。ただし、後に3.1のシミュレーション実験で確認されるように、量子化による誤差は生じる。

## 3. 文字パターンのデザイン

面積比を情報として埋め込んだ文字パターンを作成する方法の一例を述べる。まず、面積比を情報として埋め込むための基礎データを得るためのシミュレーション実験とその結果について述べる。そして、字種固有の面積比について述べ、実際に情報を埋め込んだ文字パターンを作成する。

埋め込みの形態としては図2(a)に示すように、影を付加する方法を使用した。以下の説明で、図2(a)の灰色の部分文字画像あるいは文字部分、黒色の部分を影の画像あるいは影の部分、図2(a)全体を文字パターンと呼んで区別する。

### 3.1 幾何学的変換による埋め込み値の変動

アフィン変換を施した場合に、量子化誤差により埋め込んだ値がどのように変化するかを調べるために、情報を埋め込んだ

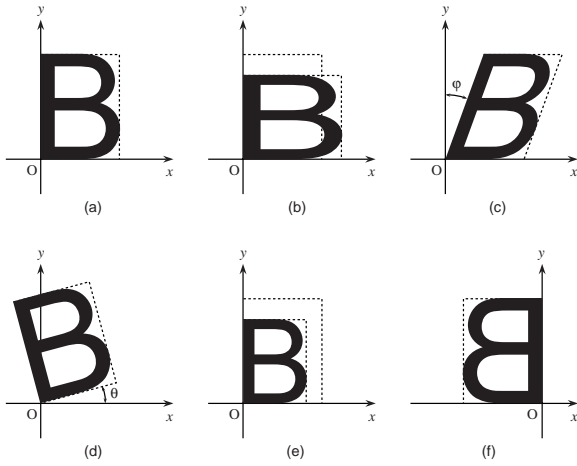


図 4 様々な変換

文字パターンにアフィン変換を施した結果得られる画像について面積比を計算した。

アルファベット大文字 26 文字を用い, Arial, Arial Black, Helvetica, Times の 4 つのフォントについて, 0.1, 0.2, 0.3 の 3 種類の値を埋め込んだ文字パターンを作成した。すなわち, 各字種ごとに 12 種類の文字パターンが存在する。具体的には, まず, 2.2 と同様に各フォントにおける「A」の文字の高さが 500 画素になるように調整した文字画像を準備した。元の文字画像を右方向に 1 ~ 120 画素, 下方向に 1 ~ 30 画素の範囲で移動した画像を影の画像とし, 面積比を計算して埋め込むべき値と最も近くなる移動量を用い, 情報を埋め込んだ文字パターンを作成した。

次に, 得られた画像に対してアフィン変換を施す。ここで, 変換の種類に対する埋め込んだ情報の劣化を直感的に把握するために, 図 4(b) ~ (e) に示す 4 種類の変換を考える。図 4(a) が元の画像である。(b) がアスペクト比を変える変換であり,  $x$  軸方向に  $\alpha$  倍,  $y$  軸方向に  $1/\alpha$  倍するものとする。(c) は  $x$  軸に沿った剪断変換であり, 傾き角度を  $\varphi$  とする。(d) は回転変換であり, 回転角を  $\theta$  とする。(e) は拡大・縮小変換であり, 元の画像を  $r$  倍する。なお, アフィン変換には図 4(f) のような鏡像変換も含まれるが, ここでは考えない。

図 4(b) ~ (e) の変換はそれぞれ以下の行列で表せる。

$$A(\alpha) = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & 1/\alpha \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$S(\varphi) = \begin{pmatrix} 1 & \tan \varphi \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$L(r) = \begin{pmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{pmatrix} \quad (6)$$

これらを組み合わせることで, 鏡像変換を除く任意の変換を表現できる。実際,

$$P(a, b, c, d) = L(r)S(\varphi)R(\theta)A(\alpha) \quad (7)$$

を解くことにより,  $ad - bc > 0$  であれば, 以下のようにパラメータが定まる。

$$\alpha = \sqrt{\frac{a^2 + c^2}{ad - bc}} \quad (8)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{a}{\sqrt{a^2 + c^2}} \quad (9)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{ab + cd}{ad - bc} \quad (10)$$

$$r = \sqrt{ad - bc} \quad (11)$$

式 (3) ~ (6) のパラメータを変えて文字パターンの画像を変換する。具体的には, まず式 (7) の行列  $P$  を用い, 変換後の画像の  $i$  行  $j$  列の画素の位置に対応する変換前の画像の座標  $(i', j')$  を求める。

$$\begin{pmatrix} i' \\ j' \end{pmatrix} = P^{-1} \begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i_0 \\ j_0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

ただし,  $(i_0, j_0)^t$  は  $i' \geq 0, j' \geq 0$  となるように定める。そして, 変換前の画像の  $[i']$  行  $[j']$  列の画素値を変換後の画像の  $i$  行  $j$  列の画素値とする。 $(i, j)$  と  $([i'], [j'])$  は一対一対応ではないため, 量子化誤差が発生する。

次に, 変換された画像の面積比を求める。そして, 埋め込んだ値と抽出された値との差 (誤差) を求め, 各字種の各パラメータごとに, 12 種類の画像の中で誤差が最大となるものを求める。結果を図 5 に示す。26 字種すべての結果を表示するのは現実的ではないので, 図では, 26 字種の平均値, 最大値, 最小値を示してある。また, 平均値よりも大きい値のみを母集団とした場合の標準偏差を平均値に加えた値を点線で, 平均値よりも小さい値のみを母集団とした場合の標準偏差を平均値から引いた値を一点鎖線で示してある。

#### (1) アスペクト比の変換

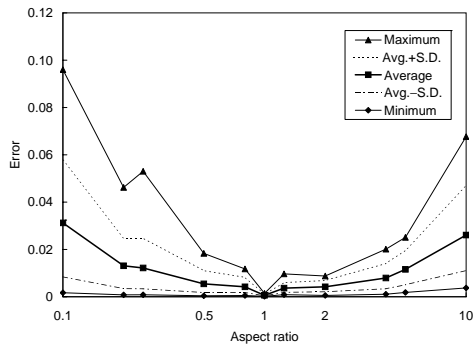
式 (3) を用い,  $\alpha$  を様々に変えた場合の誤差を図 5(a) に示す。横軸が  $\alpha$  を表す。図より,  $\alpha$  が 1 から離れるに従って誤差が急激に増大していることが分かる。また, 字種により誤差の値に大きく差があった「S」や「O」など曲線から構成される字種は誤差が小さく, 最大でも 0.005 程度であった。一方「I」「J」「L」のような直線部分を含む字種は誤差が大きかった。全字種の誤差を例えば 0.02 程度に収めるためには,  $0.5 \leq \alpha \leq 2.0$  程度にする必要がある。

#### (2) 剪断変換

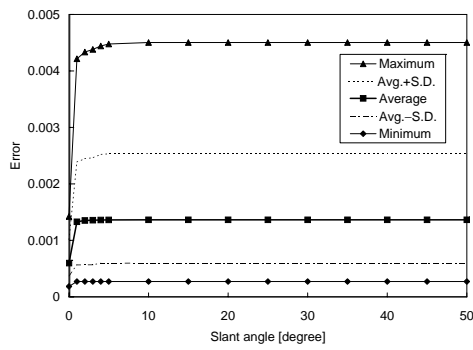
角度  $\varphi$  で画像を剪断変換した場合の結果を図 5(b) に示す。横軸が  $\varphi$  を表す。図から, 僅かでも傾斜させると値が急激に増加するが,  $\varphi = 5^\circ$  程度で頭打ちになることが分かる。この場合も, 誤差が大きいのは「I」や「L」のような直線部分を含む字種であった。しかし, 誤差は最大でも 0.005 程度であり, アスペクト比の変換と比較して影響が小さいことが分かる。

#### (3) 回転変換

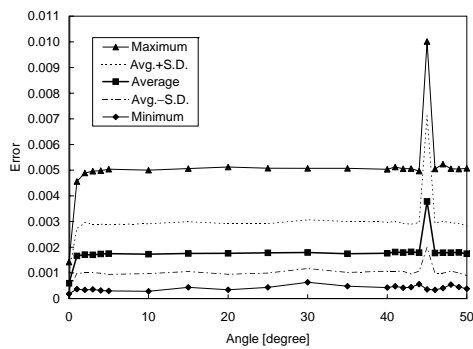
画像を  $\theta$  だけ回転させた場合の結果を図 5(c) に示す。横軸が  $\theta$  を表す。僅かでも回転させると値が急激に増加するが,  $\theta = 5^\circ$  程度で一旦頭打ちになる。そして,  $\theta = 45^\circ$  付近で再び急激に増加する。しかし, 最大でも 0.01 程度であり, やはりアスペク



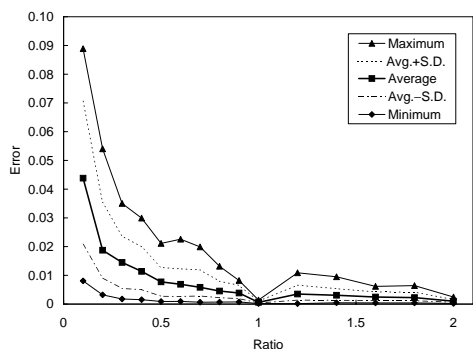
(a) Change in aspect ratio



(b) Shear



(c) Rotation



(d) Enlargement

図5 様々な変換による誤差

ト比の変換と比較して回転変換の影響は小さいことが分かる。

#### (4) 拡大・縮小変換

画像を  $r$  倍に拡大・縮小させた場合の結果を図 5(d) に示す。横軸が  $r$  を表す。 $r$  が大きくなっても誤差はそれほど増加しないが、 $r$  が小さくなると誤差が非常に大きくなる。これは、文字パターンを縮小することによる量子化誤差の影響が非常に大

表 2 文字ごとの誤差の最大値

文字	A	B	C	D	E	
最大値	0.009	0.005	0.002	0.007	0.007	
F	G	H	I	J	K	L
0.009	0.004	0.014	0.019	0.010	0.007	0.014
M	N	O	P	Q	R	S
0.007	0.011	0.002	0.007	0.001	0.005	0.002
T	U	V	W	X	Y	Z
0.011	0.008	0.003	0.003	0.008	0.006	0.008

きいことを表している。

以上の結果より、回転や傾きといった変換と比較して、拡大・縮小による影響が非常に大きいことが分かる。また、字種によって誤差が大きく異なることも確認された。実際には、使用する文字や想定される変形の範囲によって生じ得る量子化誤差の最大値を予想し、埋め込む値の刻み幅を定める必要がある。4つのパラメータのうち、 $\alpha$  と  $r$  を  $0.5 \leq \alpha \leq 2.0$ ,  $0.8 \leq r$  と制限したときの、各字種ごとの、4種類の変換の中での最大の誤差(小数点以下4桁目を切り上げ)を表2に示す。

### 3.2 文字パターン固有の面積比

2.1で述べたように、字種ごとにある程度固有の「自然な」面積比が存在すると考えられる。そこで、Arial, Arial Black, Helvetica, Times の4つのフォントについて、アルファベット大文字26字種について図2(a)の形態の埋め込みを行った場合の面積比について調べた。具体的には、3.1と同様に「A」の高さが500画素となるように大きさを調整した文字画像を用い、文字画像を右方向に10画素、下方向に10画素ずらした画像を影の画像とした場合の、文字部分と影の部分の面積比を求めた。結果を図6に示す。図から分かるように、フォントによって若干のばらつきはあるものの、あるフォントで面積比が大きい字種は他のフォントでも大きく、あるフォントで面積比が小さい字種は他のフォントでも小さいという傾向があることが分かる。

### 3.3 埋め込み例

実際に様々なフォントを用い、アルファベット26文字のそれぞれに対して情報を埋め込んだ例を示す。自然な埋め込みを行うために、図6から、字種ごとに各フォントにおける面積比を平均し、平均値が小さい順にソートする。そして、その値が小さい順に、小さい値を情報として埋め込む。

また、3.1で求めた誤差の範囲を考慮する。すなわち、ソートされた  $i$  番目の文字に埋め込む値を  $v_i$  とし、表2中の値(誤差の最大値を切り上げたもの)を  $e_i$  としたとき、

$$v_i + e_i \leq v_{i+1} - e_{i+1} \quad (13)$$

がすべての  $i$  について成り立つようにする。埋め込む値の最小値は0.10とした。このようにして得られた値を表3に示す。Arial, Arial Black, Helvetica, Times の4つのフォントについて、表3に示す値を埋め込んだ画像を図7に示す。今回は、文字パターンの概観は無視し、アフィン変換の許容範囲をある程度大きくし、しかもすべての字種に異なる情報を埋め込んだため、影が多い字種と少ない字種の影の部分の差が若干目立っ

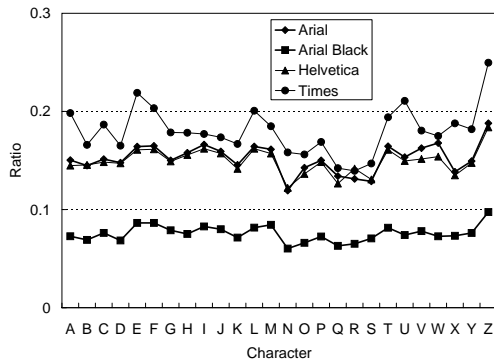


図 6 各文字の面積比

表 3 実際に埋め込んだ値

文字	A	B	C	D	E	
値	0.232	0.136	0.221	0.162	0.444	
F	G	H	I	J	K	L
0.428	0.215	0.255	0.350	0.285	0.148	0.405
M	N	O	P	Q	R	S
0.308	0.100	0.129	0.192	0.112	0.122	0.115
T	U	V	W	X	Y	Z
0.380	0.323	0.298	0.272	0.177	0.205	0.459

ている．実際には，文字パターンの概観は提案手法が実用的となるかどうかを決める大きな要素であるため，アフィン変換の許容範囲に加えて後に述べる撮影画像からの情報抽出時の誤差も考慮した上で，不自然ではない文字パターンのデザインを行う必要がある．

#### 4. 実 験

作成された文字パターンを実際に印刷し，デジタルカメラで撮影した画像から面積比が正しく抽出できるかどうかの実験を行った．図 7(a) ~ (d) のそれぞれの画像（アルファベット 26 文字を含む）を，A4 判 1 枚に収まる大きさと印刷した．その際，文字パターンの部分を赤，影の部分を黄色で印刷した．印刷した色を CMYK で表したものを表 4 に示す．各画像がデジタルカメラのほぼ正面になるように配置し，太陽光下で撮影し，撮影された画像から各文字パターンを切り出した．撮影条件を表 5 に示す．画像サイズは 3072 × 2048 であり，各文字パターンの高さは 330 ~ 400 画素程度であった．

なお，今回の実験では，印刷した文字をカメラで撮影することによる劣化がどの程度であることを確認することを主な目的としているため，正面から撮影した画像のみを用いている．斜めから撮影した場合は画像が受ける変換は厳密には射影変換であってアフィン変換とはならないため，射影変換をアフィン変換で近似することによる誤差が含まれ，カメラで撮影することによる劣化を評価することが困難である．射影変換をアフィン変換で近似することによる誤差の解析や，斜めから撮影した画像を用いた評価については今後行っていく予定である．

次に，切り出された文字パターンから面積比を求める訳であるが，デジタルカメラで撮影した画像では，文字部分と影の部分の境界付近は両者の色の中間色となっているため，文字パ



(a) Arial



(b) Arial Black



(c) Helvetica



(d) Times

図 7 作成された画像の例

ターンを文字部分，影の部分，境界の 3 領域に分割し，境界と判別された部分の面積は，文字部分と影の部分の面積に均等に分配する．具体的な手順は次の通りである．まず，撮影された画像に対して HSI 変換 [7] を行い，彩度  $S$  が  $S \geq S_b$  である領域を文字パターンの領域とみなす．次に，色相  $H$  を用いて文字部分，影の部分，境界の 3 領域に分割する．理想的には文字部分は赤 ( $H = 0^\circ$ )，影の部分は黄色 ( $H = 60^\circ$ ) であるから， $H < H_c$  の領域を文字部分， $H > H_s$  の領域を影の部分，それ以外を境界と定める． $S_b$ ， $H_c$ ， $H_s$  は閾値であり，実験的に  $S_b = 0.2$ ， $H_c = 35^\circ$ ， $H_s = 45^\circ$  と定めた．実際の撮影された

表 4 印刷した色

	Cyan	Magenta	Yellow	Black
文字部分	1%	96%	91%	0%
影の部分	3%	2%	76%	0%

表 5 撮影条件

シャッター速度	絞り数値	ISO	焦点距離	圧縮
1/60	F11	100	25.0mm	なし (RAW)



(a) Photographed image. (b) Result.

図 8 領域分割の例

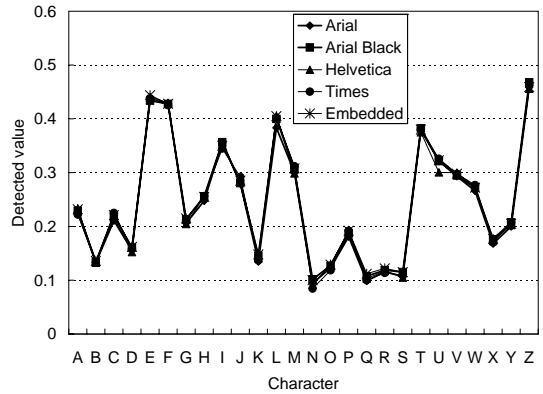
画像から文字パターンの領域を抽出し、領域を分割した例を図 8 に示す。(a) が撮影した画像で、(b) が領域分割の結果である。(b) では、薄い灰色の領域が文字部分、濃い灰色の領域が影の部分、黒色の領域が境界を表す。

各文字パターンの画像から面積比を求めた結果を図 9 に示す。横軸が字種を表す。図 9(a) は、縦軸が埋め込んだ面積比 (Embedded) および各フォントごとの抽出された面積比の値を表す。図 9(b) は、縦軸が埋め込んだ面積比と抽出された面積比の値の差を表す。全部で 104 個の文字パターンのうち、91 個 (88%) で誤差が 0.01 以下であり、最大でも 0.025 以下であることが分かった。また、誤差が表 2 の値以下であった文字パターンは 68 個 (65%) であった。表 2 はあくまで計算機シミュレーションの結果であり、実際に誤りのない情報抽出を行うためには図 9 の結果も考慮して埋め込む値を決定する必要がある。本論文では字種ごとにすべて異なる値を埋め込んだが、現実的には埋め込む値の種類は字種数と比較して小さくなることも考えられる。そのような場合には字種間の誤り傾向をもとにした最適割り当て [4] を行うことも必要となろう。

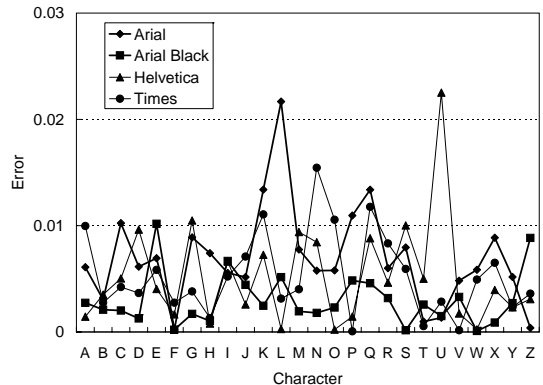
## 5. むすび

本論文では、環境中の文字をデジタルカメラを入力デバイスとして高精度に認識することを目的とし、文字画像と同時に認識補助のための付加情報を提示する手段として、面積比を利用した手法を提案した。文字に影を付加したり輪郭線を別の色とすることは文字パターンのデザインとしてすでに行われており、提案手法はその線幅を変えるにすぎないため、自然な情報の埋め込みが可能となる。また、面積比はアフィン変換に不変であり、アフィン変換を受けた環境においても誤りなく抽出されることが期待される。

実際に付加情報を埋め込んだ文字パターンを作成して面積比を抽出する実験を行い、実際の文字パターンを生成する際の基礎データを得ることができた。これらのデータをもとに現実的



(a) Detected area ratios.



(b) Error.

図 9 撮影した画像から抽出された面積比および埋め込んだ値との誤差

な文字パターンの生成を行うこと、斜めから撮影した画像を用いてアフィン変換で近似することによる誤差を解析すること、文字認識アルゴリズムと情報抽出結果を統合した認識システムを構築して認識実験を行うことは今後の課題である。また、今回の実験では文字部分と影の部分の色が既知であるものとして領域の分割を行ったが、任意の色で印刷された場合にも対応できる手法を考案することも今後の課題である。

## 文 献

- [1] 黄瀬浩一, 大町真一郎, 内田誠一, 岩村雅一, “カメラを用いた文字認識・文書画像解析の現状と課題,” 信学技報, PRMU2004-246, March 2005.
- [2] D. Doermann, J. Liang and H. Li, “Progress in camera-based document image analysis,” Proceedings of the Seventh International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2003), pp.606-616, August 2003.
- [3] 内田誠一, 岩村雅一, 大町真一郎, 黄瀬浩一, “カメラによる文字認識のための付加情報の埋め込みに関する検討,” 画像の認識・理解シンポジウム 2005 (MIRU2005) 論文集, pp.235-242, July 2005.
- [4] 岩村雅一, 内田誠一, 大町真一郎, 黄瀬浩一, “情報付加による認識率 100%の実現—人にも機械にも理解可能な情報伝達のために—,” 画像の認識・理解シンポジウム 2005 (MIRU2005) 論文集, pp.901-908, July 2005.
- [5] 佐藤 淳, “コンピュータビジョン —視覚の幾何学—,” コロナ社, 1999.
- [6] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, 2nd edition, 2004.
- [7] 高木幹雄, 下田陽久監修, “新編 画像処理ハンドブック,” 東京大学出版会, 2004.