

2007年度 修士論文

# 主観的輪郭の Captcha への応用

早稲田大学大学院 理工学研究科  
情報ネットワーク専攻  
橋本 弥弦

学籍番号： 3606U083-0

提出日： 2008年2月4日

指導： 村岡 洋一 教授

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>6</b>
1.1	本論文の構成 . . . . .	6
1.2	本論文の概要 . . . . .	7
<b>第2章</b>	<b>研究背景</b>	<b>8</b>
2.1	Captcha の現状 . . . . .	8
2.1.1	Captcha とは . . . . .	8
2.1.2	OCR とは . . . . .	8
2.1.3	Captcha と OCR の関係 . . . . .	8
2.2	主観的輪郭の応用 . . . . .	9
2.2.1	主観的輪郭とは . . . . .	9
2.2.2	主観的輪郭の解析コスト . . . . .	10
2.2.3	主観的輪郭の Captcha への応用メリット . . . . .	11
<b>第3章</b>	<b>研究目的</b>	<b>12</b>
3.1	錯視 Captcha の生成アルゴリズムの確立 . . . . .	12
3.2	錯視の実用性評価 . . . . .	12
<b>第4章</b>	<b>提案手法</b>	<b>13</b>
4.1	錯視 Captcha 生成手法の概要 . . . . .	13
4.2	合成描画規則 . . . . .	14
4.2.1	テキストレイヤー . . . . .	14
4.2.2	誘導図形レイヤー . . . . .	14
4.2.3	ダミーレイヤー . . . . .	16
4.3	特徴点 . . . . .	16
4.3.1	輪郭のチェーンコード化 . . . . .	16
4.3.2	主特徴点の動的決定 . . . . .	18
4.3.3	補完特徴点の動的決定 . . . . .	18
4.4	誘導図形 . . . . .	19
4.5	ダミー図形の描画手法 . . . . .	19
<b>第5章</b>	<b>実験</b>	<b>20</b>
5.1	実験環境 . . . . .	20
5.1.1	データ収集 . . . . .	20
5.1.2	Captcha の正解比較 . . . . .	21
5.2	評価内容 . . . . .	21

第 6 章	結果と考察	23
6.1	正解率 . . . . .	23
6.2	回答時間 . . . . .	23
6.3	生成確率 . . . . .	23
第 7 章	結論	25
付録 A	外部発表	28

# 目 次

2.1	MSN Hotmail 2005	9
2.2	MSN Hotmail 2008	9
2.3	Kanizsa の三角形	10
2.4	明瞭度の高い主観的輪郭	10
2.5	星型 主観的輪郭	11
2.6	主観的輪郭の存続性	11
3.1	錯視 Captcha 例	12
4.1	レイヤー構成	13
4.2	レイヤー描画処理	13
4.3	テキストレイヤー例	14
4.4	通常誘導図形レイヤー例	15
4.5	確率誘導図形レイヤー例	15
4.6	ダミーレイヤー例	16
4.7	チェーンコード表	17
4.8	チェーンコード化	17
4.9	SFIRA	18
4.10	主特徴点の抽出	18
4.11	補完処理後の特徴点 (右)	19
5.1	LabyTex 起動ダイアログ (錯視 Captcha)	20
5.2	Captcha の正解比較	21
5.3	チャンク構造	21
6.1	錯視 Captcha 正解率	24
6.2	錯視 Captcha 回答時間	24

# 表目次

# 第1章 はじめに

## 1.1 本論文の構成

本論文は7章から成る。

### 第1章 はじめに

本論文の構成、概要、研究背景について述べる。

### 第2章 研究目的

本研究の目的について述べる。

### 第3章 提案手法

本研究の目的を達成するための手法について述べる。

### 第4章 関連研究

提案手法と深い関連のある研究について紹介する。

### 第5章 実験方法

本研究で用いるアルゴリズムと評価方法について述べる。

### 第6章 結果と考察

実験を行なった結果とその考察を述べる。

### 第7章 結論

本論文のまとめ、今後の課題を述べる。

## 1.2 本論文の概要

Captcha とは、人間とボットを識別するチャレンジレスポンス型の逆チューリングテストである。イメージファイルに描かれた文字列を、ユーザーにタイピングさせて認証する形式が普及している。近年の文字認識技術の精度は向上し、従来の Captcha の解析コストは低下している。そこで本研究では、解析コストの高い主観的輪郭を利用した Captcha（以下、錯視 Captcha）の生成手法を確立し実用性を検証した。検証のポイントは二つある。一つはそもそも主観的輪郭の知覚は個人差があるため、Captcha として応用できるほど知覚されるものなのかという点。もう一つは、主観的輪郭の生成エンジンの精度である。いずれも、実際に Captcha を利用してもらった結果の正解率から評価を行った。その結果、生成確率、正答率、回答時間などの点で、錯視 Captcha が十分実用性を持つほど、主観的輪郭が知覚され、錯視 Captcha 生成エンジンも十分な精度をもつことが分かった。

## 第2章 研究背景

### 2.1 Captcha の現状

#### 2.1.1 Captcha とは

Captcha ( "Completely Automated Public Turing test to tell Computers and Humans Apart" ) とは名前の由来通り、人間とボットを識別するためのレスポンスチャレンジシステムの総称である。一般的にはイメージファイルに描かれた文字列をユーザーにタイピングさせる形式や、音声データから認証を行うものが普及しており、主に Web サービスの登録画面やコメントスパム対策としてブログにも使われている。本研究では、Captcha の中でもタイピング形式のものを題材にする。

#### 2.1.2 OCR とは

OCR(Optical Character Recognition) とは、光学式文字認識装置のことである。書籍などに記された文字を画像データに変換し、そこに描かれている文字を読み取ってデジタル化することでデータを保存・整理することを目的のひとつとしている。20 世紀から研究は行われているものの、スキャナの性能や、大量の学習データ・パターンファイルを蓄積する媒体、マシンの性能にも依存していたため、最近までは OCR の精度は低かった。しかし、ここ数年のコンピューターの急激な発展と研究によって、現在では非常に精度の高い OCR が出現してきた。それどころか、インターネットの普及にも後押しされ、OCR 技術がフリーソフトや SDK として配布されるようになるなど、誰もが手軽にその技術を共有できるようになった。

#### 2.1.3 Captcha と OCR の関係

先述したように、Captcha がイメージファイル上の文字列をユーザーにタイピングさせ認証を行うのに対し、OCR はそのイメージファイルに描かれた文字列を読み取ろうとしている。皮肉にも OCR 技術の発展が Captcha の解析コストを低下させる結果となっている。OCR の性能は "歪んだ文字" や "複数の文字が繋がった文字列" の認識精度がまだ十分とは言えないが、OCR の最終目標が "文字列の正確な読み取り" にある以上、今後の OCR の発展が従来の Captcha にとって脅威となることは明白である。

このような OCR の脅威が近づくにつれて、タイピング形式の Captcha にも変化が起きてきた。一例として、MSN Hotmail で表示される Captcha を取り上げてみる

と、2005年から2008年にかけてCaptchaの文字数が増加し、文字の歪みやノイズなどの加工処理もさらに複雑になっていることが分かる(図2.1, 図2.2)。このように、Captchaの解析コストを引き上げる工夫がされる一方で、それを利用するユーザーの視点からはタイピングすべき文字数が増え、加工処理によっては人間にも読みづらいCaptchaが増加しつつある。

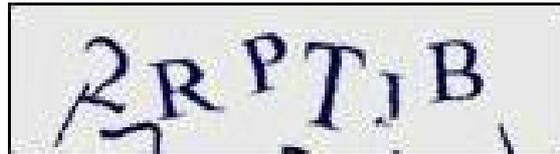


図 2.1: MSN Hotmail 2005



図 2.2: MSN Hotmail 2008

## 2.2 主観的輪郭の応用

### 2.2.1 主観的輪郭とは

私たち人間の視覚系は、点パターンのような離散的な画像であっても、そこにあたかも線文や曲線が存在しているかのように知覚することができ、明度の差(輪郭)が存在しなくとも、「境界」「明るさ」「奥行き変位」という3つの現象特性をそこに認識することがある。ここで「明るさの変容」とは、周囲の領域との間に輝度の物理的な勾配が存在しないにもかかわらず、面が周囲の領域に比べより明るく(より白く)あるいはより暗く(より黒く)見えることである。また「奥行き変位」とは、周囲の領域との間に奥行き方向の位置の違いが物理的に存在しないにもかかわらず、面が周囲の領域よりも手前あるいは奥側に見えるというものである(図2.3、図2.4)。

主観的輪郭は、1900年代から盛んに研究されていたものの、その形成過程においては心理学の分野から説明されることが多く、その本質的な現象特性の順序が解明されていない。しかしその現象特性は、主観的輪郭を取り囲む図形(以下、誘導図形)の欠損輪郭がお互いに結びつき完結することによって、明瞭度に差こそあるものの存在するようになると推測される。

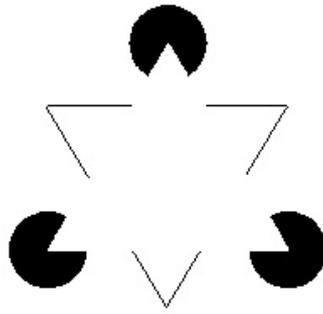


図 2.3: Kanizsa の三角形

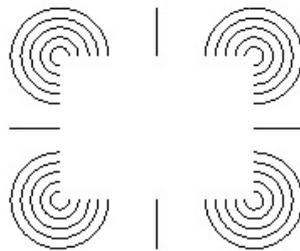


図 2.4: 明瞭度の高い主観的輪郭

## 2.2.2 主観的輪郭の解析コスト

主観的輪郭は、1900年代から盛んに研究されていたものの、その生成過程においては心理学の分野から説明されることが多く、その本質的な現象特性の順序が解明されていない。故に主観的輪郭を追跡する手法として、主観的輪郭を覆う図形（以下、誘導図形）のL字輪郭やI字輪郭を解析し、距離や輪郭の方向ベクトルを基準とした評価計算から欠損輪郭を連結していく手法や、独立した図形を誘導図形のL字形状をもとに動的に変形して答えを出す手法、人間の神経回路モデルから人間の脳が反応する輪郭点を抽出し連結する手法など、さまざまな追跡方法が試みられている。しかしいずれの手法も一定の条件下で成果を出しているものの、主観的輪郭を完全に解析できるモデルとは言えない。

また、主観的輪郭は誘導図形の欠損部分を異なる色やノイズで補う「透明視」を利用でき（図 2.4）、主観的輪郭図形の中に図形が紛れ込んでいる図形（図 2.6）であっても、その存在を維持することができるため、あらゆる種類の主観的輪郭が存在する。故に、このような応用画像に対して従来の追跡モデルが十分な精度を持つにはかなりのコストが要すると考えられる。

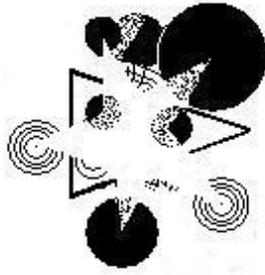


図 2.5: 星型 主観的輪郭

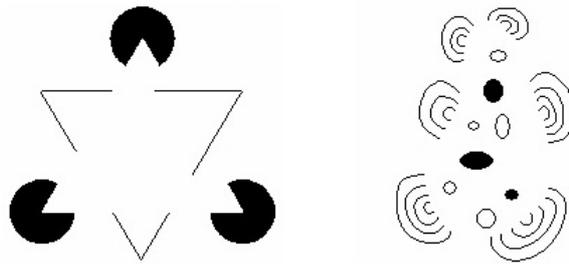


図 2.6: 主観的輪郭の存続性

### 2.2.3 主観的輪郭の Captcha への応用メリット

主観的輪郭の追跡は、もちろん 100% 安全であるとは言えないものの、従来のタイピング形式の Captcha に応用することで、OCR を用いた文字列解析が行われる前の一工程分の解析コストを引き上げることができる。また、OCR が解析する対象は「輪郭を持つ文字列」であるため、輪郭を持たない主観的輪郭図形は OCR 技術が発展しても”直接的”に追跡されることはない。さらに、実用性の観点から主観的輪郭の追跡理論はまだ十分な性能とは言えないだけでなく、必要以上の画像処理を必要とせず、Captcha に利用する文字数を減らしても高コストな Captcha 画像を生成することができる。

## 第3章 研究目的

### 3.1 錯視 Captcha の生成アルゴリズムの確立

本研究では、画像イメージ上に主観的輪郭を用いて文字列を描画し、ユーザーにその文字列をタイピングしてもらふ形式の錯視 Captcha を生成する。主観的輪郭の出現条件は、重要な特徴点を覆う誘導図形の存在とその輝度差に依存し単純であるものの、誘導図形が不足した場合は明瞭度が減衰し、誘導図形が多すぎる場合は解析コストを低下させてしまう。そこで本研究では、動的に一定の明瞭度を保ち、誘導図形を最小限に抑えた錯視 Captcha の動的生成手法を提案する。

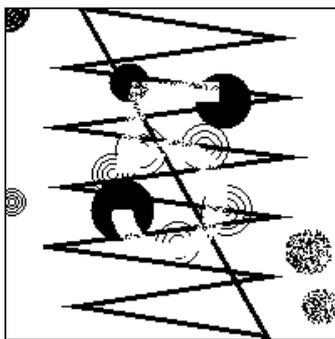


図 3.1: 錯視 Captcha 例

### 3.2 錯視の実用性評価

主観的輪郭の関連研究は、しばしば主観的輪郭の現象特性に着目され、その内容は滝浦 ([11]) の文献によくまとめられている。しかしいずれの関連研究においても、現象特性の評価方法にはばらつきが見られ、主観的輪郭の見え方に関して決定的な評価や定義を行った論文は見当たらない。というのも、主観的輪郭の現象特性が心理学的な側面から説明されることが多いため一定の評価が行えないためと考えられる。本研究では、“錯視 Captcha の実用性評価”以外にも、“主観的輪郭が人々に平等に知覚されるか否か”という点にも着目し、不特定多数の人々に継続的に被験者になってもらい、評価を行うことを目的としている。

## 第4章 提案手法

### 4.1 錯視 Captcha 生成手法の概要

描画レイヤーを”テキストレイヤー”、”誘導図形レイヤー”、”ダミーレイヤー”の3つに分けて描画する。それぞれのレイヤーには合成描画規則を設定し、他レイヤーとの重複部分をどのように描画するかなどを定めている。

テキストレイヤーには Captcha の答えとなる文字列を描画する。誘導図形レイヤーには、テキストレイヤーによって描画された文字列の特徴点を覆うように複数の誘導図形を配置・描画し、その描画規則の種類によって複数のレイヤーが存在する（特徴点抽出については後述する）。ダミーレイヤーは、他レイヤーの描画規則を無視する最も優先度の高いレイヤーであり、テキストレイヤーの文字列を直接覆わない誘導図形や、主観的輪郭に侵入する図形を描画し、解析コストを高める目的で生成する。最後に各レイヤーの画像をその合成描画規則を元に合成し、錯視 Captcha 画像とする。

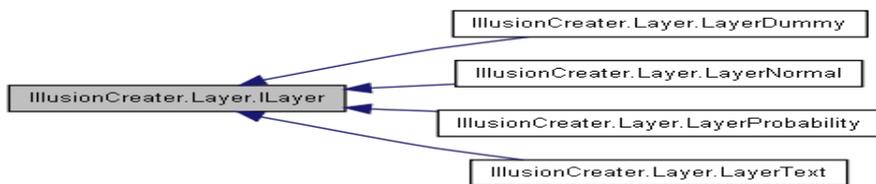


図 4.1: レイヤー構成

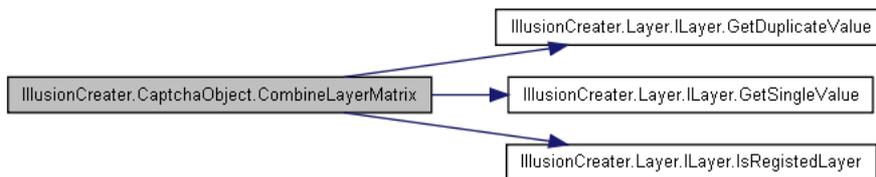


図 4.2: レイヤー描画処理

## 4.2 合成描画規則

各レイヤーを最後に合成し、錯視 Captcha を生成する際に、他レイヤーに描かれているイメージと”重複していない部分”の描画規則（以下、独立描画規則）と、”重複している部分”の描画規則（以下、重複描画規則）が、レイヤー別に存在する。この節では各レイヤーの合成描画規則について述べていく。

### 4.2.1 テキストレイヤー

テキストレイヤーには Captcha の答えとなる文字列を描画する。独立描画規則は、”何もしない”。重複描画規則は、”他のレイヤーに依存”である。基本的にテキストレイヤーの合成描画規則は、何もしないことが原則である。

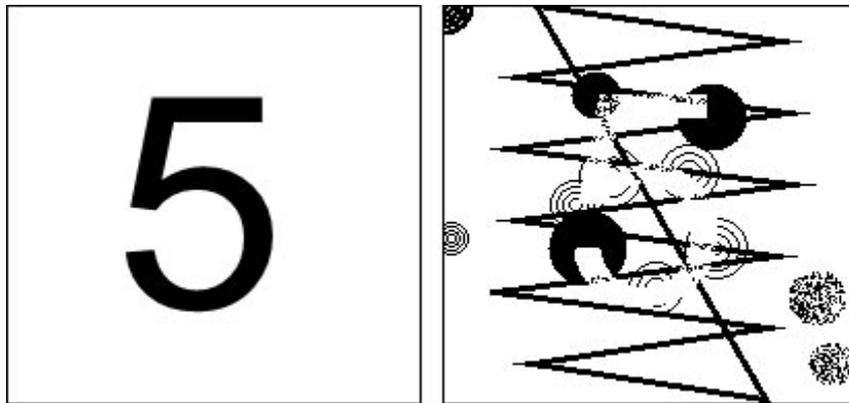


図 4.3: テキストレイヤー例

### 4.2.2 誘導図形レイヤー

誘導図形レイヤーには、テキストレイヤーによって描画された文字列の特徴点を覆うように複数の誘導図形を配置・描画する。この誘導図形レイヤーには、テキストレイヤーとの重複部分は描画しない”通常誘導図形レイヤー”と、テキストレイヤーとの重複部分を一定確率で描画させる”確率誘導図形レイヤー”が存在する。通常誘導図形レイヤーの重複描画規則は、”何もしない”。確率誘導図形レイヤーの重複描画規則は、”40%の確率で描画する”。そして、いずれのレイヤーも独立描画規則は”100%の確率で描画する”である。

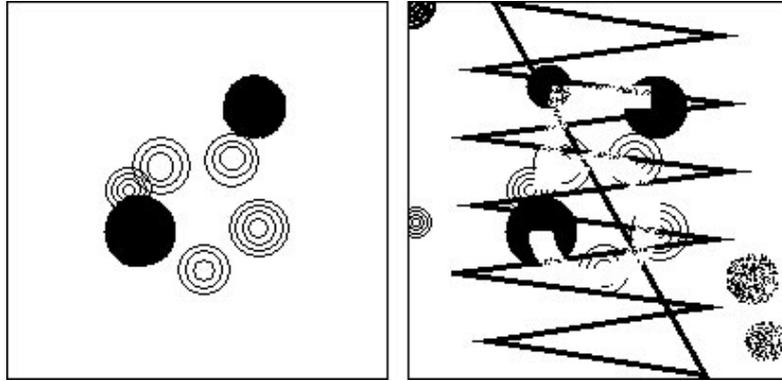


図 4.4: 通常誘導図形レイヤー例

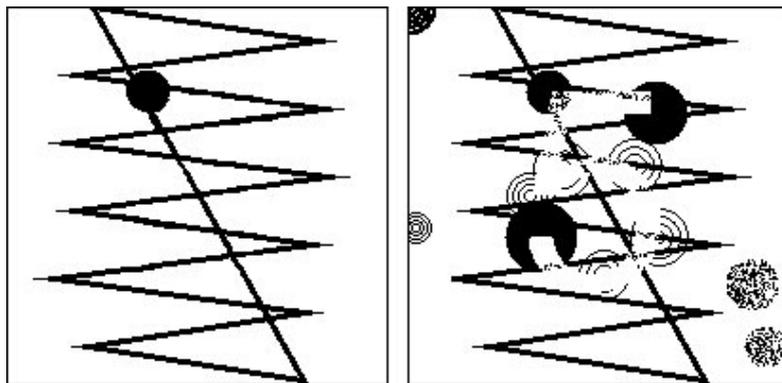


図 4.5: 確率誘導図形レイヤー例

### 4.2.3 ダミーレイヤー

ダミーレイヤーは、テキストレイヤーの文字列を直接覆わない誘導図形や、主観的輪郭に侵入する図形を描画し、解析コストを高める目的で生成する。解析が試みられた場合の陽動であるため、他レイヤーとの描画規則に原則影響されない。故に独立描画規則、重複描画規則ともに”100%の確率で描画する”とする。

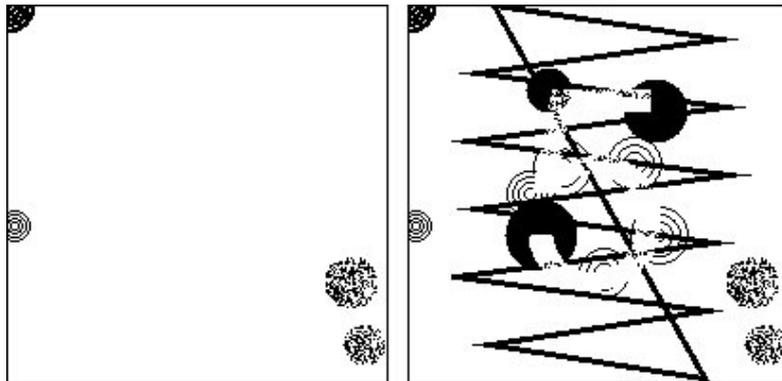


図 4.6: ダミーレイヤー例

## 4.3 特徴点

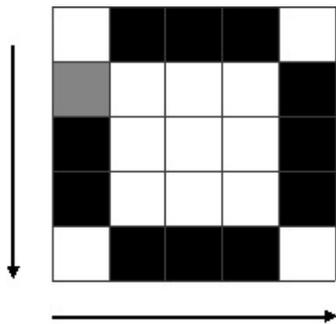
本論文で述べる特徴点とは、テキストレイヤーに描かれた文字列に誘導図形を設定する位置である。一般に、主観的輪郭図形の本輪郭の末端など、輪郭の向きが急激に変化する部分を特徴点とするが、特徴点の絶対数が少ない場合に誘導図形の数も減少し、主観的輪郭の明瞭度が低下してしまうことから、適当な場所に特徴点を追加配置する必要がある。したがって、輪郭の向きの変化による特徴点を”主特徴点”、後に追加された特徴点を”補完特徴点”とし、それぞれを動的に決定する方法をこの節で述べていく。

### 4.3.1 輪郭のチェーンコード化

特徴点を決定する前準備として、テキスト文字列の輪郭を抽出する必要がある。本研究では各イメージのチェーンコード化を行い、外周を一周できるものをエッジとして登録し、各エッジごとに特徴点を算出した。チェーンコード化とは、図 4.7 のようなチェーンコード表に従い、輪郭の方向を数値配列に変換し、後に復号化してエッジを再現できるようにしたものである（図 4.8）。

3	2	1
4		0
5	6	7

図 4.7: チェーンコード表



	5	4	4	
6				3
6				2
7				2
	0	0	1	

コード:  
667001223445

図 4.8: チェーンコード化

### 4.3.2 主特徴点の動的決定

特徴点の抽出方法には SFIRA と呼ばれる再標本化アルゴリズムを利用する。SFIRA はある頂点とその頂点の前後の点を結ぶ線分との距離が一定値以上であればそこを特徴点とみなす(図 4.9)。本研究では、SFIRA で用いる特徴点の閾値を”距離”ではなく”角度”として指定し、特徴点抽出を行った。このとき、特徴点検索間隔は 5 ピクセル、特徴点閾値角度を 150 度とした。

次に、決定された主特徴点同士の距離が近い場合が考えられるため、主特徴点の中から不要な特徴点を削除する必要がある。本研究では各特徴点から、30 ピクセルより手前に存在する特徴点をランダムに選択し、削除させることで、最終的な主特徴点とした。

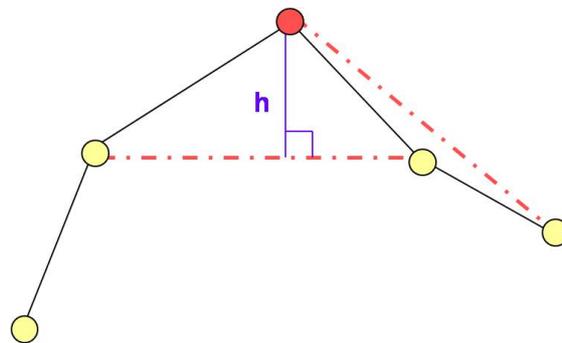


図 4.9: SFIRA

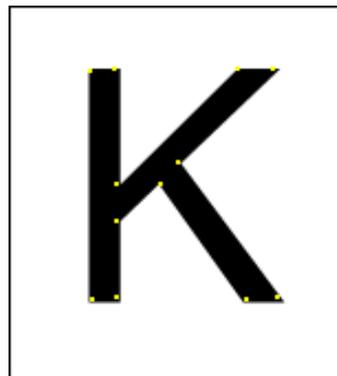


図 4.10: 主特徴点の抽出

### 4.3.3 補完特徴点の動的決定

主特徴点を決定した後、チェーンコード化されたテキストレイヤー上の文字輪郭に沿って 30 ピクセル毎に特徴点を補完する。また、補完後も主特徴点の決定時

と同様に、主特徴点も含めた距離の近い特徴点をランダムに削除したものを最終的な特徴点とした。

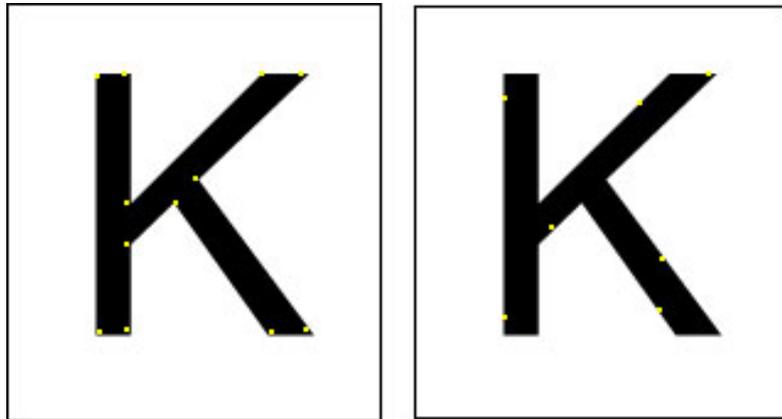


図 4.11: 補完処理後の特徴点 (右)

## 4.4 誘導図形

本研究では、円型誘導図形、多重円型誘導図形、線型誘導図形の3種類の誘導図形を用いる。各誘導図形は、.NET フレームワークの System.Drawing 名前空間に存在する FillEllipse()、DrawEllipse()、DrawPolygon() 関数で描画し、ランダムに選択された誘導図形レイヤー上に描画される。特に多重円型誘導図形の繰り返し間隔は、(誘導図形の大きさ) / ((繰り返し数) \* 2) で描画し、円型誘導図形と共に直径 20 ~ 30 ピクセルのランダムサイズで描画する。各誘導図形は、ランダムな誘導図形レイヤー上に描画されるが、多重円型誘導図形は通常誘導図形レイヤーに描画する。線型誘導図形は、主観的輪郭を複数回横断するようその描画位置を画像幅の 1/8 ~ 1/4 の位置にランダムに設定し、確率誘導図形レイヤーに描画した。

## 4.5 ダミー図形の描画手法

ダミーレイヤー上に描画する図形は、主観的輪郭の周囲にちりばめる。主観的輪郭の輪郭に沿う線分図形や、主観的輪郭の中に描かれる図形も考えられるが、本研究では主観的輪郭の周囲に塗りつぶし円形図形を描画するのみで描画した。

## 第5章 実験

### 5.1 実験環境

#### 5.1.1 データ収集

”LabyTex”という名の Tex エディタをシェアウェアとして公開し、その体験版に限り起動ダイアログに Captcha を表示させ、LabyTex の体験ユーザーを被験者としてデータを収集する。そのため同一人物による複数のデータが含まれるが、Captcha としての実用性を確認するには個別のデータに限定せず、長期的・継続的にデータを収集する必要があると考えた。なお、検証に費やす期間は2ヶ月であるが、本論文が清書された後もデータは収集し続ける予定である。

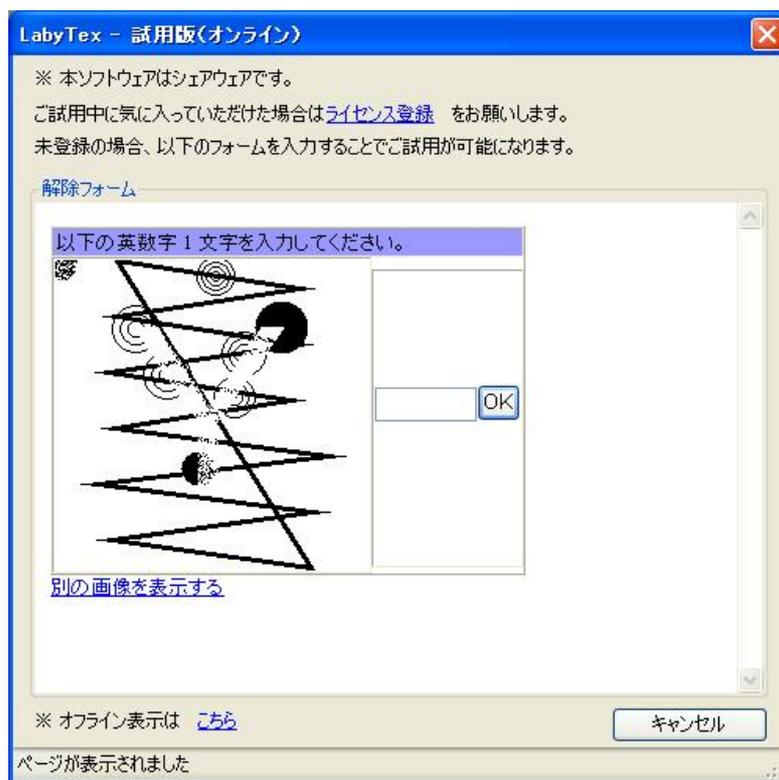


図 5.1: LabyTex 起動ダイアログ (錯視 Captcha)

## 5.1.2 Captcha の正解比較

PNG ファイルには、チャンクとして様々なデータを埋め込むことが可能である (図 5.3)。そこで Captcha 画像毎に答えを保持させるため、錯視 Captcha は PNG 形式に保存し、答え文字列と任意の key 文字列を結合した文字列を SHA-1 ハッシュ変換し、tEXt チャンクとして埋め込ませる。この Captcha 画像を任意に選択・表示するサイトを用意した後、このとき POST される文字列データを同様にハッシュ変換した値と画像に埋め込まれている tEXt チャンクのデータを比較させ、正誤の判定を行うこととする (図 5.2)。

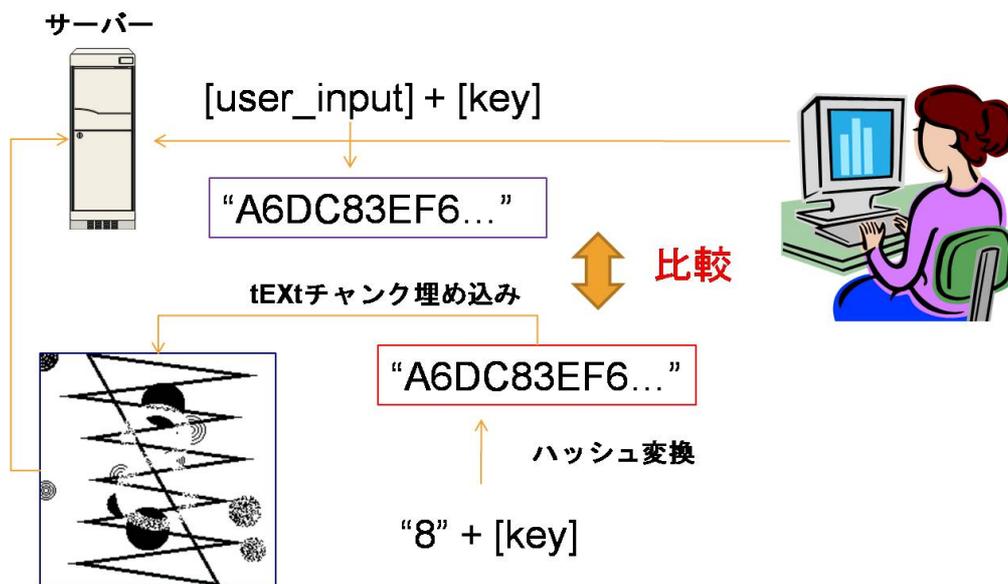


図 5.2: Captcha の正解比較

チャンクの構造			
オフセット	内容	サイズ	説明
0	データサイズ	4 bytes	データ配列のサイズ
4	チャンク名	4 bytes	チャンクの名称(ASCII)
8	データ配列	指定したサイズ	実際のデータ
8 + データサイズ	CRC	4 bytes	データの正当性をチェック

図 5.3: チャンク構造

## 5.2 評価内容

上記の提案手法に沿って作られた、半角英数字 1 文字から成る錯視 Captcha 画像 100 枚を用意する。フォントの種類は”Arial”、フォントサイズは”150 ピクセル”と

し、画像サイズは200\*200ピクセルとする。また、数字や大文字と小文字の区別が付きにくい`0`,`o`,`0`などの文字は、錯視 Captcha 画像の生成対象から省いた。

評価項目は錯視 Captcha の”正解率”および”回答時間”、そして錯視 Captcha の”生成確率”とする。”正解率”は、表示された Captcha 画像に対して、被験者が正しく答えをタイピングできた確率を表す。”平均回答時間”は、Captcha 画像が画面上に表示された時点から、被験者がタイピングを行いOK ボタンをクリックするまでの平均時間を表す。”生成確率”は、評価対象の全画像の正解率の平均値として算出する。

## 第6章 結果と考察

### 6.1 正解率

上記の実験環境において、2ヶ月間に1107回のデータを取得し、その正解率のデータを図6.1に示す。全試行回数1107回中、正解数は972回、不正解数は110、不明数は25だった。横軸を各Captchaのインデックス、縦軸を各Captchaの試行回数としてそれぞれに正解した数（塗りつぶし）、不正解だった数（網目）、別画像の表示を要求された数（塗りつぶしなし）が積み上げ棒グラフとして表示されている。全体的に正解率が高く、正解数が多いことが見て取れる。これは、今回の実験で利用したCaptchaの文字列は英数字1文字に固定しており、Captchaのタイピングミスが少なくなるからだと考えられる。また、主観的輪郭の知覚が被験者に知覚できていることも、正解率が高くなった原因のひとつであると考えられる。

### 6.2 回答時間

同様にして、Captchaが表示されてから入力が完了しOKがクリックされるまでの回答時間のデータを図6.2に示す。錯視Captchaの平均回答時間は、5.04秒であった。一般的に普及しているCaptchaの文字数が4文字程度であることに比べると、文字数が1文字であって入力の手間が減少し、やや回答時間が短いことが見てとれる。特に回答最短時間が2秒程度のCaptchaも多く、普及すればCaptchaのユーザビリティも大幅に向上すると考えられる。

### 6.3 生成確率

全試行回数1107回中、正解数972回という結果から、錯視Captchaの正解率は87.8%と算出できる。この結果からも、錯視Captchaを形成する主観的輪郭が人々に知覚されており、Captchaとして利用できるということがわかる。また、完全に自動化した錯視Captchaの生成エンジンの精度も実用レベルに達していると言えるだろう。

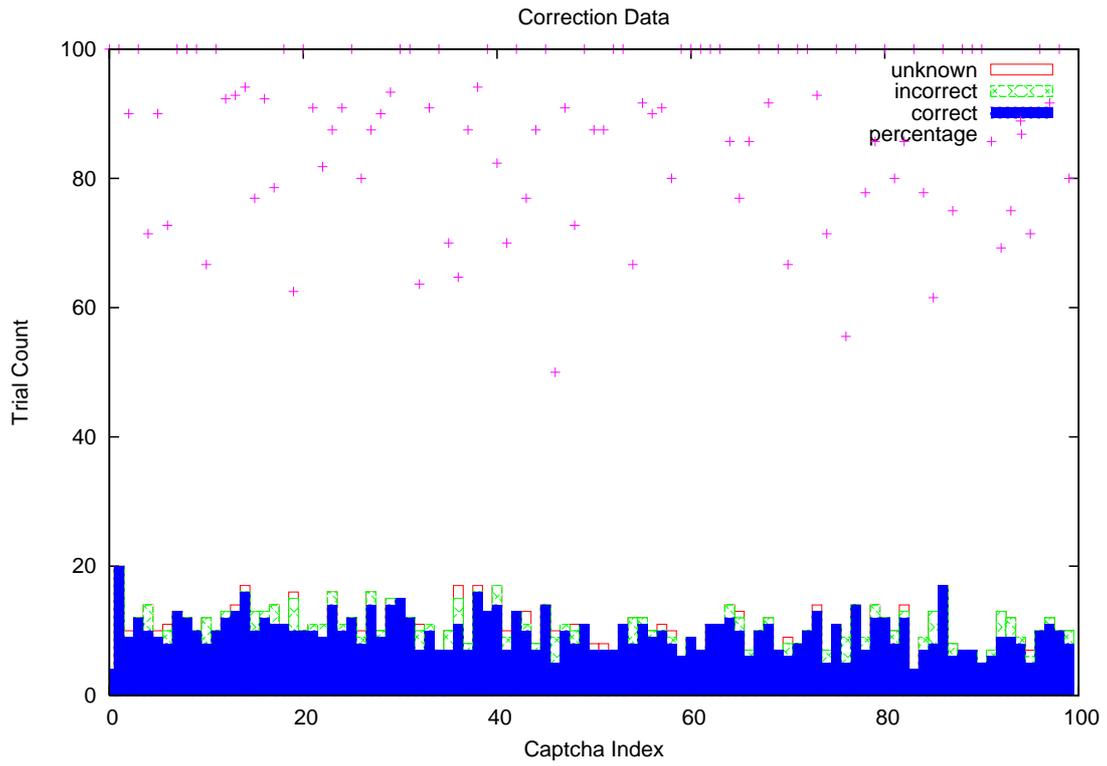


图 6.1: 錯視 Captcha 正解率

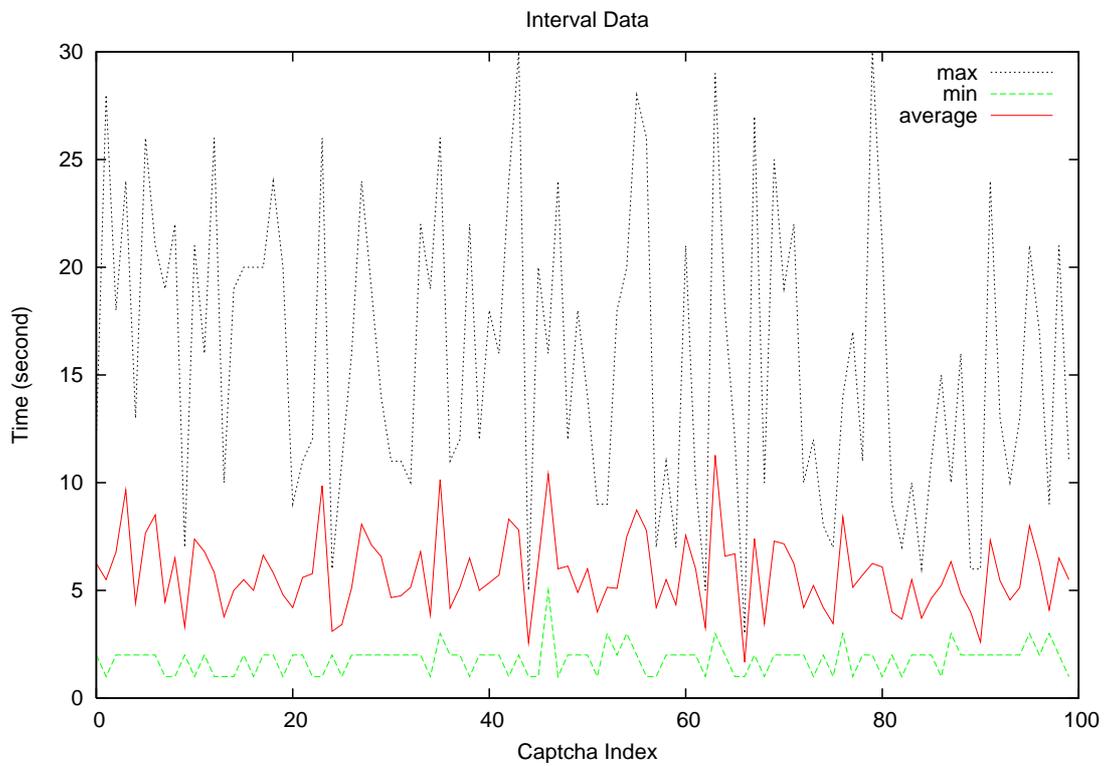


图 6.2: 錯視 Captcha 回答時間

## 第7章 結論

全試行回数 1107 回中、正解数 972 回という結果から、錯視 Captcha の正解率は 87.8%、平均回答時間は 5.04 秒だった。Captcha を実用的と定める正解率や回答時間に触れた文献は見当たらないが、主観的輪郭の解析精度が低い現状から、文字数を減らしてもある程度の安全性を保持することが可能であり、タイピングに付随するタイピングミスが減って最短回答時間が 1~2 秒と短く、正解率も高くなったと予測できる。また、この正解率から、錯覚として親しまれている主観的輪郭が人々に知覚できていることも証明でき、錯視 Captcha としての自動生成にも成功したと言える。

今後の課題は、「錯視 Captcha の画像サイズの縮小」と「錯視 Captcha 生成エンジンの複数文字への対応」が挙げられる。前者は、画像そのものを小さくすると主観的輪郭の誘導図形の配置数も減り錯視 Captcha を認識できなくなる可能性があるため、画像サイズの最適化なども今後行う必要がある。また、今回は一定のフォントでアルファベット 1 文字を対象とした実験だったため、今後あらゆるフォントや複数文字での錯視 Captcha 生成エンジンの生成を試みたい。さらに今回生成したエンジンのオープンソース化も視野にいれ、データをさらに収集していくつもりである。

## 関連図書

- [1] Luis von Ahn, Manuel Blum, Nicholas J. Hopper, John Langford: "CAPTCHA: Using Hard AI Problems For Security" Papers: Cryptology, Eurocrypt 2003.294-311
- [2] 安田浩之, 安藤和久, 大西昇: "物理的に存在しない輪郭線の抽出", 電子情報通信学会論文誌 (D-II), J73-DII,6, pp.906-913(1990-06)
- [3] Wei Zhu y Tony Chan: "Capture Illusory Contours: A Level Set Based Approach"
- [4] 生田剛一, 福島邦彦: "主観的輪郭を説明する神経回路モデル", 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, No. NC90-132 (1991.3.19).
- [5] 石寺永記, 荒井祐之, 土屋雅彦, 宮内裕子, 高橋信一, 栗田正一: "主観的輪郭の形成に関する視覚情報処理モデル", 電子情報通信学会論文誌 (D-II), J76-DII,4, pp.873-880(1993-04)
- [6] Masato Hirano and Tsuyoshi Yamamura: "Contour completion by an N-gram model" IPSJ SIG Technical Report(2004)
- [7] "視覚の文法ゲシュタルト知覚論" 著: カニツツア/訳: 野口薫 サイエンス社 (1976)
- [8] Marr D.: "Vision, Freeman"(1982), 乾敏郎、安藤広志訳: "ビジョン-視覚の計算理論と脳内表現", 産業図書 (1987)
- [9] 小山隆正, 勘敏郎: "点パターンの構造化に関する神経回路モデル", 信学情報, MBE89-104(1989)
- [10] 齊藤秀昭: "脳の生理学-b. 視覚", 日本臨床, 45,9, pp.1936-1947(1987)
- [11] 滝浦孝之: "現象特性別にみた Kanizsa 型主観的輪郭の形成過程", 広島修大論集-人文編- 第47巻 第1号 (2006.9 発行)
- [12] 大屋和夫, 高橋晋也, 荒川圭子, 石坂裕子: "図知等輝度条件カニツツア錯視配置効果の精神物理学的測定", VISION Vol.15, No.3, 197-200, 2003
- [13] Watanabe, T., & Oyama, T.(1988). Are illusory contours a cause or consequence of apparent depth in the Kanizsa square. Perception, 17, 513-521
- [14] Takiura, T.(2006). Temporal characteristics of the subjective contour formation: a preliminary report. Tohoku Psychologica Folia, 65, in press

- [15] Gregory, R. L., & Harris, J. P. (1974). Illusory contour and stereo depth. *Perception & Psychophysics*, 15, 411-416
- [16] Jory, M. K., & Day, R. H. (1979). The relationship between brightness contrast and illusory contours. *Perception*, 8, 3-9.
- [17] Halpern, D. F. (1981). The determinants of illusory-contour perception. *Perception*, 10, 199-213.
- [18] W. Zhu, T. Chan, Capture illusory contours: a level set based approach, UCLA CAM Tech. Report, 03-65, 2003.
- [19] W. Zhu, T. Chan, Illusory contours using shape information, UCLA CAM Tech. Report, 03-09, 2005.

## 付録A 外部発表

”主観的輪郭の Captcha への応用”, 情報処理学会, FIT2006, 第 5 回情報科学技術  
フォーラム, 福岡, (2006.9)

## 謝辞

本論文を作成するにあたってたくさんの方にお世話になりました。まず、最適な研究環境を御用意し御指導をしてくださった村岡洋一教授に深く感謝します。貴重なアドバイスをしてくださった村岡研究室のみなさまに深く感謝します。そして最後に、心身面から私を支えてくださった家族や友人に深く感謝します。