

I-21 コンクリート表面におけるひび割れ認識への画像処理技術の適用

Application of Digital Image Processing to Crack Recognition of Concrete Surface

○高室祐也¹ 安東克真² 河村圭³ 宮本文穂⁴
Yuya Takamuro Katsumasa Andou Kei Kawamura Ayaho Miyamoto

【抄録】本研究の最終目的は、コンクリート構造物の目視点検の省力化および効率化を行うために、デジタルカメラにより取得した画像からコンクリート構造物の表面に発生している変状を自動的に抽出し、それらを変状図として自動生成する点検支援システムの開発である。特に本論文では、コンクリート構造物の代表的な変状であるひび割れを処理対象としており、それを対話型遺伝的アルゴリズムによって自動抽出する手法の検討を行うとともに、抽出されたひび割れからの幅を計測する手法の検討を行った。さらに、ひび割れの抽出及びその幅を算出するシステムのプロトタイプを開発し、その有効性を検証した。

【Abstract】 The ultimate goal of this study is to develop an inspection support system for the concrete structures, which is capable of extracting the features of damage from digital image recorded by digital camera efficiently and drawing a damage figure automatically. In this paper, the image processing algorithm and the prototype of the support system are developed for detecting crack on the surface of the concrete structure. First, the cracks in the structure are extracted by using interactive genetic algorithm based image processing. Then, the crack width is calculated. In the end, a case study for crack identification is presented and evaluated experimentally. The results demonstrate the validity of the system.

【キーワード】 デジタルカメラ, 画像処理, 点検支援, ひび割れ, コンクリート構造物, 遺伝的アルゴリズム

【Keyword】 *Digital camera, Image processing, Inspection Support, Crack, Concrete structure, Genetic Algorithms*

1. はじめに

わが国では過去に数多くのコンクリート構造物が建設されたが、供用期間の長期化に伴って経年劣化が発生しており、その維持管理が一層重要度を増してきている。維持管理を行う上では、劣化の程度を把握する必要があるが、一般には目視点検とスケッチによる変状図作成といった点検方法が行われている。しかし、この方法は、点検者の主観による判断や技術能力の違いによって、損傷程度の記録に違いが生じる、また診断に誤りが発生するなどの問題が挙げられている。そのため現在の目視に頼る点検方法とは違った、新たな点検方法の考案が必要であると思われる。

そこで、本研究では、デジタル画像からコンクリート構造物の表面に発生している変状を自動的に抽出し、変状図を自動生成する点検支援システムの開発を最終目的としたプロトタイプシステム(以下、本システム)の開発を行った。本システムが実用化できれば、構造物の目視点検ではデジタルカメラでの撮影を行うのみで変状図が作成可能となり、作業の効率化や省力化、点検精度向上が図れる。さらに、コンピュータで処理を行うため、変状の定量評価も容易になることから、対象構造物の的確な状態評価が可能になる。特に、本論文では、近年におけるデジタルカメラおよびコンピュータの低価格化、高性能化に着目し、デジタルカメラで撮影された画像から、変状を自動抽出する手法の検討結果および抽出した

¹学生会員 工学士 山口大学大学院 理工学研究科博士前期課程 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)
²学生会員 工学士 山口大学大学院 理工学研究科博士前期課程 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)
³正会員 博士(工学) 山口大学 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)
⁴フェロー会員 工博 山口大学 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

変状を測定する手法の検討結果について記述する。なお、現在のところ本システムで扱う変状は、コンクリート構造物において重要かつ代表的な変状である「ひび割れ」に限定している。

本研究では、デジタル画像からのひび割れ自動抽出の一試行として、ひび割れ抽出に必要なとされる画像処理手法や画像処理に付随するパラメータの最適化に、対話型遺伝的アルゴリズム(以下、対話型GA)を適用した。本研究では、実画像を被験者が本システムを利用して処理した場合と、被験者が試行錯誤に処理した結果とを比較することにより、本システムのひび割れ抽出機能の有効性を検証した。

さらに、ひび割れ抽出機能によって得られたひび割れ画像から、コンクリート構造物における劣化程度の目安の一つとなるひび割れ幅を計測する手法を考案した。実際にひび割れ幅計測器で測定した値と本システムによって算出した値を比較することによって、本システムによるひび割れ幅計測の有効性を検証した。

2. 変状図作成支援システム

(1) コンクリート構造物の点検

変状図作成支援システムは、従来人間の手によって行われているコンクリート構造物の変状図作成作業を、コンピュータが支援することによって、人間の労力の軽減、費用の削減、時間の短縮を図ることを目的としている。変状図作成支援システムによって目視点検と同等以上の変状図を作成するには、「コンクリート標準示方書[維持管理編]¹⁾」に沿った目視観察すべき項目すべてにおいての変状の認識を可能とする必要がある。その中でも本研究では、特に「コンクリートのひび割れ」に注目し、コンクリート構造物点検支援システムの1つとしてデジタルカメラとコンピュータで構成される変状図作成支援システムを開発する。特に、本論文ではひび割れを扱うことから、ひび割れ図作成支援システムとする。

(2) ひび割れ図作成支援システムの構成

コンクリート構造物のひび割れ図作成支援システムは、コンクリート構造物の劣化診断に必要とされ

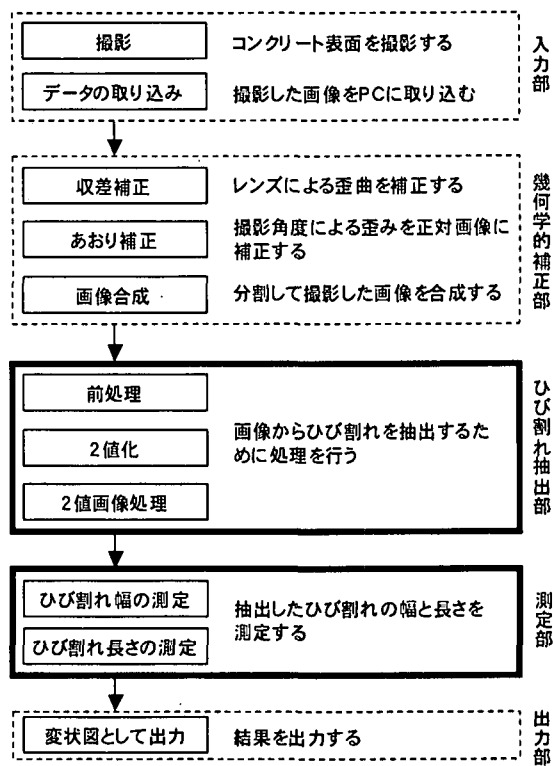


図-1 ひび割れ図作成支援システムの流れ

るひび割れの発生位置、幅、長さなどを計測し、複雑なひび割れ形状の数値化および図化を迅速に行うシステムを目的としている^{2),3),4)}。ひび割れ図作成支援システムは、コンクリート面を撮影するデジタルカメラ、入力画像の処理機材としてのパーソナルコンピュータ、およびソフトウェアで構成される。ここで、図-1には、ひび割れ図作成の流れを示す。入力部では、ひび割れの撮影を行い、原画像をコンピュータに取り込む。撮影に関しては点検する構造物により異なるが、ひび割れを鮮明に撮影するためには、高精度のデジタルカメラと適度な照度や露出が必要となる。続いて、画像の幾何学的補正を行う。これは、一枚一枚撮影した画像の歪みを補正したり、つなぎ合わせる作業である。次に、ひび割れ抽出部は、ひび割れの特徴を抽出し、ひび割れのみを図化する重要な箇所である。続いて、測定部は、抽出されたひび割れの幅や長さを計測する部分である。そして、最後にひび割れ図として出力する。

図-1のような画像処理の流れの中で、幾何学的補正部は、いくつかのアプリケーションソフトウェアの開発が進んでいる⁵⁾。しかし、ひび割れ抽出部と測定部においては、ひび割れの抽出およびその幅の算出の完全な自動化がなされてなく、基本的に手動

で画像処理が行なわれている⁹⁾。よって本研究では、ひび割れ抽出部と測定部に重点を置き、ひび割れの自動抽出およびその幅の算出を行う手法の検討およびプロトタイプシステムの開発を目的とする。

3. 対話型遺伝的アルゴリズムを用いたひび割れ抽出

本研究の目的であるひび割れの抽出は、その位置や形状を画像として出力させることであり、基本的に原画像に対して2値化処理を行うことで実現する。すなわち、これはコンクリート表面のひび割れ画像を、ひび割れの部分とそうでない部分という2値の画像に変換する処理であり、必須の処理となる。本研究では、この処理に2値化を行うための前処理と2値化処理後の画像に対する処理を加え、ひび割れ抽出のための画像処理手順を、前処理→2値化処理→2値画像処理とした。それぞれの手順で用いる画像処理は、種々の処理を比較・検討した結果、図-2に示される画像処理フローを採用した。ここで、エッジ抽出フィルタは、ひび割れをエッジとして抽出するが、同時にノイズも抽出してしまうため、画像によって処理を施すか否かを選択する必要がある。

通常、画像処理は、ユーザ（人間）の経験を生かして試行錯誤的に行なわれるが、いくつかの画像処理手法を組み合わせる場合、最終的な画像の状態はわからないため、付随するパラメータの最

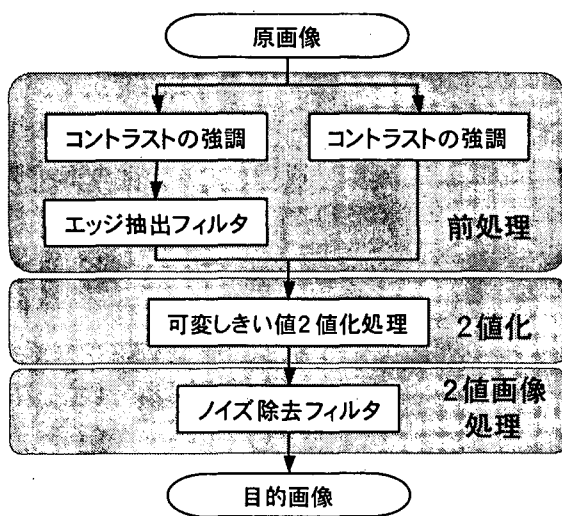


図-2 ひび割れ抽出のための処理

適化は困難である。また、ユーザは、処理した画像の良否を主観的に評価して作業を進めていくが、この画像処理を自動化する場合、自動処理された画像の良否を定量的な評価関数として表現することは難しい。これらの理由から、ひび割れ抽出に最適な画像処理パラメータを探索する手法として、対話型GAを用いた。

GAとは、生物の進化過程、つまり自然淘汰（環境に対し適合性の高い個体ほど生存確率が高い）と遺伝現象（古い個体をもとに新しい個体を生成させる）を工学的に単純化したモデルである。GAは、遺伝子をもつ仮想的な生物の集団（個体集団）を計算機内で表現し、あらかじめ定めた環境（対象問題では評価関数）に適応している個体（対象問題の解候補）が、子孫を残す確率が高くなるように世代交代シミュレーションを実行する。すなわち、個体の遺伝子および個体集団を進化させることで対象問題の最適解の探索を行う。具体的には、まず対象問題の解候補を遺伝子列（個体）として表現し、これらの個体集団に遺伝的操作（選択、交叉、突然変異）を加えながら、世代交代を繰り返すことによって優れた個体（最適解）を求めようとするものである。

対話型GAは、このGAによる近似最適解の探索をベースとしつつも、GAの処理過程における「評価」の部分人間が行う。つまり、一般的なGAでの「評価」の役割は評価関数が担うが、対話型GAはこの評価関数によって個体の適応度を決定する部

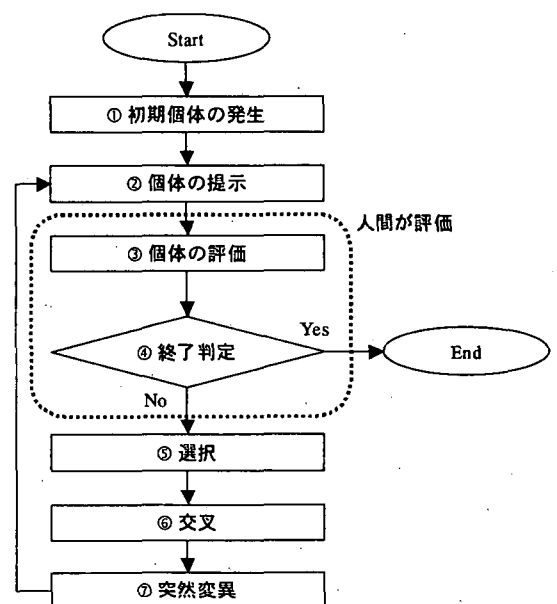


図-3 対話型GAの処理フロー

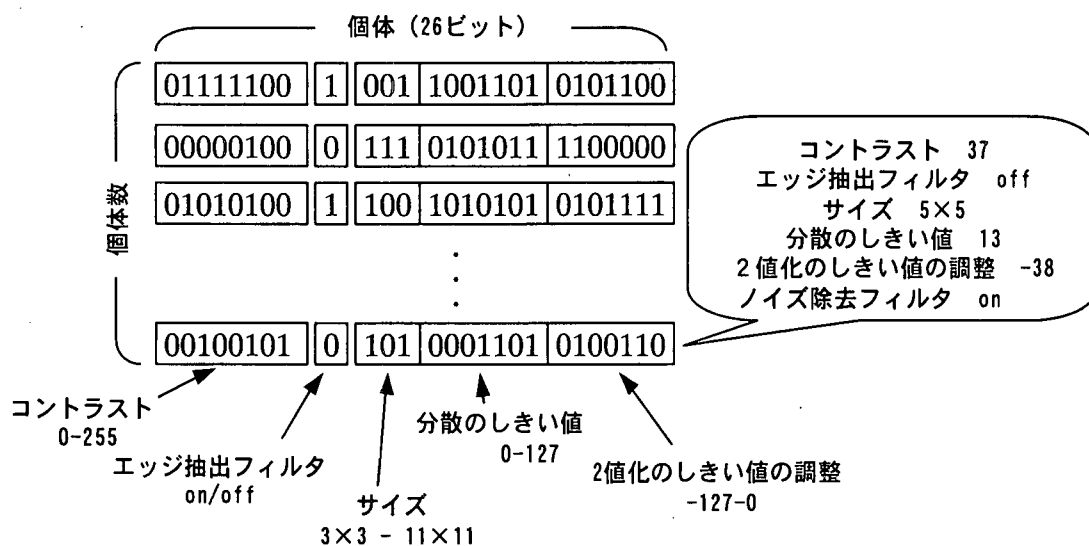


図-4 遺伝子のコーディング

分を人間による評価に置き換える。このようにユーザを評価系に組み込むことにより、評価関数を用意する必要がなく、また処理が進むにつれ、ユーザは厳しい評価を行うようになり、画像処理の最適化が進む。ここで、図-3には、対話型 GA の基本動作のフローを示す。また以下には、このフローに従って、本画像処理問題への対話型 GA の適用手法および本研究で開発した対話型 GA によるひび割れ抽出システムを、実際の実行画面を利用して解説する。

① 初期個体の発生

初期解として、乱数を用いてランダムに初期個体を発生させる。なお、本研究では、画像処理手法のパラメータを図-4に示されるコーディングにより個体を表現した。なお、ノイズ除去フィルタは、本システムの画像処理手順では常に使用することから、個体の遺伝子として on/off を表現する必要はない。

本システムは、処理を行う原画像を選択し、本システムで用いた対話型 GA を起動すると、ランダムに作成した初期個体のコードに従って画像処理を行った結果を提示する（図-5を参照）。

② 個体の提示

対話型 GA では、各個体の評価を行うのはユーザであることから、ユーザに対して個体を提示する必要がある。しかしながら、画像を画面上に表示できる面積、評価を行うユーザの疲労⁷⁾、原画像の大きさ等を考慮し、本プロトタイプシステムでは個体の集団サイズを 15 とした。

このように個体の集団サイズが小さいため、初期

個体が最適な解が存在する空間から掛け離れたものばかりだった場合には、遺伝的操作を行っても解の探索がうまくいかないケースが見られた。この問題を改善するために本研究では、図-5で示すように、「選択初期個体を残して再発生」をチェックし、残したい画像をクリックすると、選択した初期個体だけを残して、残りの初期個体をランダムに再発生させることができる機能を追加した。ただし、あまりにも似通った個体を初期個体集団として発生させると、十分な解探索を行わずに、初期収束⁸⁾に陥る可能性が高くなるという短所もある。

③ 個体の評価

ここでは、各個体について評価を行う。一般的な GA では、個体は評価関数により適応度が計算されるが、対話型 GA では、各個体に対してユーザが評価を下し、適応度を割り振る。あくまでもユーザの主観的な評価であるため、相対的な適応度しか与えられない。つまり、適応度からは解の評価は判断できない。この点も一般的な GA と大きく異なる点である。

本システムでは、ユーザは本システムにより処理された画像を 5 段階で評価する。ユーザが個々の処理画像に対して評価した 1~5 の値が、本画像処理問題の解候補を表現している各個体の適応度となり、この値が高い個体ほど次世代へ生き残る可能性が高くなる。

④ 終了判定

対話型 GA において操作の終了は、ユーザが判断

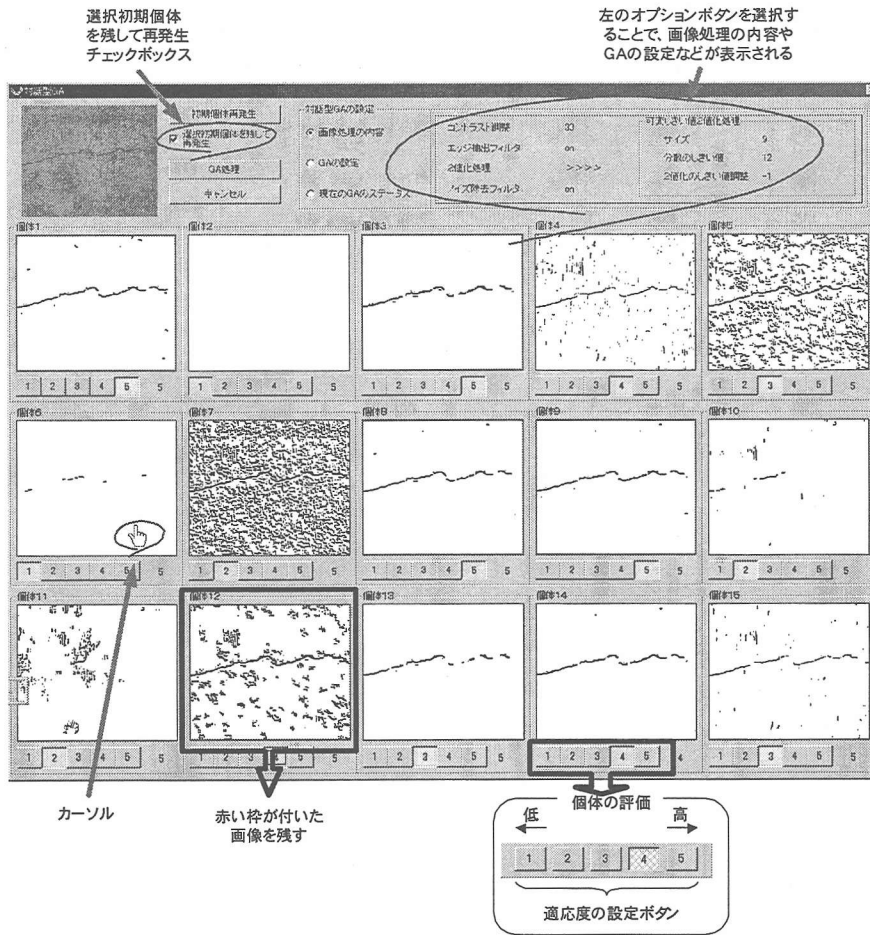


図-5 対話型 GA を利用した本システムの実行画面

する。ユーザが求める出力が得られたのであれば対話型 GA は終了し、得られていないのであれば対話型 GA は再び評価、選択、交叉、突然変異といった遺伝子操作を繰り返す。

本システムでは、ユーザが求める画像が得られ、終了したい場合は、対象の画像をダブルクリックすることで終了できる。

⑤選択

ここでは、一般的な GA と同様に適応度に依存した一定の規則に従って個体の選択を行う。本システムでは、「ルーレット選択+エリート戦略⁹⁾」を適用した。本システムでは、ユーザによる評価が「5」の個体がエリート個体とし、評価が「5」であれば、その個体を必ず次の世代へ残す。

⑥交叉

選択された個体に対して、交叉を行う。本システムでは、1点交叉を適用した。1点交叉とは、交叉点を1箇所選び、その前後で、2つの親個体の遺伝子を入れ替えることによって子個体を生成する方法

である。

⑦突然変異

個体の多様性を維持するために、各個体に対し突然変異を行う。本システムでは、全個体のすべての遺伝子(1ビット)に対して、0.00 から 1.00 のランダムな数値を発生させ突然変異率を下回っていれば、対立遺伝子(0 の場合は1, 1 の場合は0)と入れ替える方法を適用した。突然変異によって初期個体からでは存在し得ない個体を生成することが可能となる。例えば、すべての初期個体が1桁目の遺伝子として0を有する場合、突然変異以外の遺伝的操作では、1桁目に1を生成することは不可能である。

なお、本システムにおいて、交叉率と突然変異率は、既定値としてそれぞれ「0.8」、「0.05」に設定されており、ユーザは個体の状態によって、これらのパラメータを変えることも可能である。

4. ひび割れ幅の算出

ひび割れ抽出部によって抽出されたひび割れに対し、その幅を算出する。ひび割れを抽出する前の原画像と抽出後の2値画像を組み合わせることによって、精度の高いひび割れ幅を算出することが可能になる。

(1) ひび割れ幅算出までの手順

本研究のひび割れ幅算出手法はひび割れ部分とそうでない部分（背景部分）の輝度の差（以下、輝度差（*Difference of Brightness*））を求め、この輝度差からひび割れ幅を算出する。ひび割れ幅を算出するまでのフローを図-6に示し、フローに従って手順を詳細に述べる。

a) ひび割れ幅算出前処理

ひび割れ幅算出前処理では、ひび割れ幅を算出するのに適した画像に変換し、ひび割れの角度、背景部分の輝度等、幅算出に必要な情報を収集する。ひび割れ幅算出前処理の流れを図-7に示し、以下にひび割れ幅算出前処理のアルゴリズムを説明する。

なお、①～④の手順は図-7中の番号に対応している。

① 本システムのひび割れ抽出機能によって、原画

像から2値画像へ変換し、ひび割れ部分を抽出する。現在のプロトタイプシステムではひび割れ部分のみを完全に抽出することができないので、2値画像に対し、膨張処理を行うことによって、ひび割れ部分の周囲の画素も抽出する。この処理によってひび割れ部分を確実に抽出でき、また、次項で説明する輝度差の特性からひび割れ幅の誤差はさほど生じない。

- ② Hough 変換によってひび割れの近似直線を引き、この近似直線の傾きから角度を算出することによってひび割れの角度を求める。
- ③ 2値画像におけるひび割れ部分に対応する画素の輝度値を原画像から抽出する。この微妙な輝度値の濃淡の違いから、2値画像から直接ひび割れ幅を算出するよりも、精度よく求めるこ

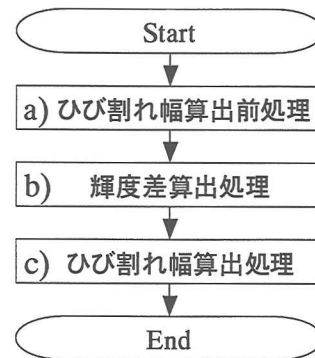


図-6 ひび割れ幅算出のフロー

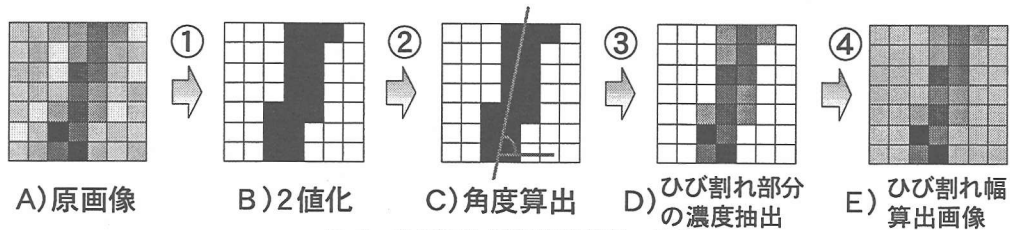


図-7 ひび割れ幅算出前処理の流れ

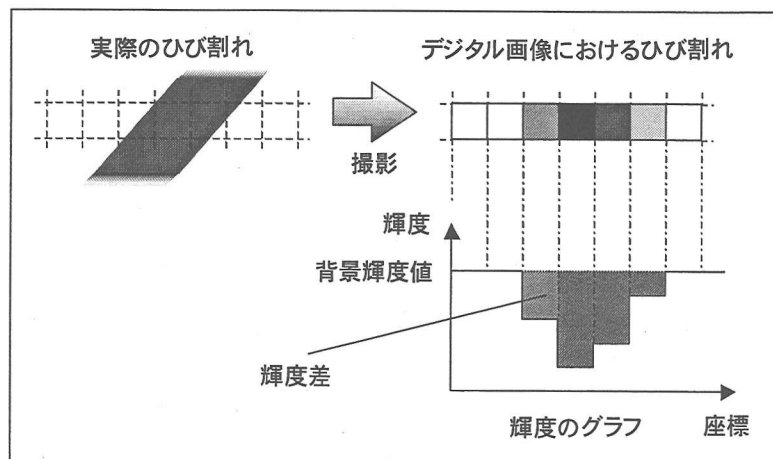


図-8 輝度差のイメージ

とができる。

- ⑤ 背景の輝度を2値画像の1画素の輪郭部分(0画素との隣接部分)から判断した輝度に統一する。背景部分が白のままでは、ひび割れ部分の画素にも背景の情報が含まれている場合があるため、背景部分の濃淡をなくし、一定の輝度に統一することによって輝度差を算出するときに生じる誤差を減少させる。

なお、ひび割れ幅は一本のひび割れ上で一定ではないので、以上のアルゴリズムはひび割れを含む局所領域を選択後その領域に含まれるひび割れの幅の平均を出力するものとする。

b) 輝度差算出処理

コンクリートを撮影した時、ひび割れ幅が1画素で表現できる幅より狭い場合や1画素の中でひび割れと背景の境界があるような場合は、図-8のように1画素の中に含まれるひび割れ部分の割合によって画素に濃淡が表される。輝度差とはコンクリート部分とひび割れ部分の輝度の差の和、つまり輝度差とは図-8の輝度のグラフにおける網掛けの部分の面積を指す。本研究では、この輝度差を求めることによってひび割れ幅を算出する。輝度差を選択された範囲内において1行又は1列毎に順番に求めていく。

以下に輝度差を求める具体的な処理手順を式を交えて説明する。

まず、選択範囲内の任意の行において、1画素毎に順番に背景輝度値とその画素の輝度値の差を加算していき、1行全ての輝度の差を加算した値がその行における輝度差となる。その処理を選択範囲内のすべての行に対して行う。輝度差を *DOB*、背景輝度値を *Back*、*x*行 *y*列の着目画素を *Pixel(x,y)*、選択範囲の幅を *Width* とすると、この処理は式(1)のように表される。

$$DOB = \sum_{x=0}^{Width-1} (Back - Pixel(x,y)) \quad (1)$$

次に、全ての行の輝度差の平均値である平均輝度差から選択範囲の平均ひび割れ幅を算出する。平均輝度差を *DOB_Ave*、選択範囲の高さを *Height* とすると平均輝度差を求める式は式(2)のように表される。

$$DOB_Ave = \frac{\sum_{y=0}^{Height-1} \sum_{x=0}^{Width-1} (Back - Pixel(x,y))}{Height} \quad (2)$$

ここで *Width*、*Height* は画素の走査方向が水平方向であるときを表している。ひび割れが画像水平方向に対して平行に近いときは操作方向を垂直方向にする。垂直方向に走査するときは *Width*、*Height* が逆になる。

c) ひび割れ幅算出処理

ひび割れ幅算出処理では、算出した輝度差を諸条件によって補正を行うことにより、ひび割れ幅を算出する。輝度差とひび割れ幅との関係に影響する項目は、以下のようなものがあると考えられる。

- イ) ひび割れ幅 (例：輝度差が大きくなるとひび割れの幅が太くなる。)
- ロ) 撮影範囲 (例：撮影範囲が大きくなると輝度差は小さくなる。)
- ハ) 背景輝度 (例：背景の輝度が大きくなると輝度差は大きくなる。)
- ニ) 角度 (例：ひび割れが画像水平方向に対して平行に近くなるほど輝度差は大きくなる。)

これらの項目を考慮すると輝度差からひび割れ幅を算出する式は、

$$Crack = DOB_Ave \times \alpha \times \beta \times \gamma \quad (3)$$

となる。ここで、*Crack* はひび割れ幅、 α は撮影範

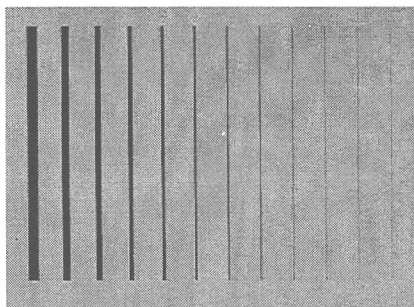


図-9 擬似ひび割れ

表-1 撮影の条件

撮影日時	2003.1.24
天候	曇り
使用カメラ	Canon EOS-D30
有効画素数	約311万画素
画像サイズ	2160×1440
画質モード	FINE
撮影範囲	0.5m~2.0m 0.25m間隔
ISO感度	ISO100

囲の違いによる補正值, β は背景輝度の違いによる補正值, γ は角度の違いによる補正值を表している。

この α , β , γ の関係を調べるために, 図-9 のような太さの異なる直線を印刷した画用紙 (以下, 擬似ひび割れ) を用いた実験を行った。擬似ひび割れをデジタルカメラで撮影し, このデジタル画像から擬似ひび割れの幅を計測することを試みた。

撮影したひび割れの画像からひび割れ幅を正確に算出するためには, 解析するデータを得るための媒体, つまりデジタルカメラの性能や撮影条件, 撮影方法にも大きく依存する。本研究で使用したデジタルカメラと, 撮影の条件について表-1 に示す。このような撮影条件の下, α , β , γ の一つを変化させ, 残りを固定させることによって変化させた条件が輝度差にどのような影響を与えているかを調べ, 輝度差からひび割れ幅を算出する式を導き出した。

(2) ひび割れ幅算出機能

ひび割れ幅算出機能は, ひび割れ抽出機能で抽出された2値画像を図-6のフローに沿って処理し, ひび割れ幅を算出する。本システムのひび割れ幅算出の実行画面を図-10に示す。また, 本システムのひび割れ幅算出機能の概要を以下に述べる。

①原画像

ファイルから開いた原画像を表示する。

②処理画像

対話型GAによって2値化された画像を表示する。

③範囲指定

ひび割れ幅を算出する範囲をユーザが指定する。

④撮影範囲・角度

範囲指定すると自動的にひび割れの角度が表示される。撮影範囲はユーザが手動で入力する。

⑤幅算出前処理

②で表示された2値画像をひび割れ幅算出画像に変換する。

⑥算出実行

輝度差を算出し, ひび割れ幅を算出する。

5. 本システムの実画像への適応

(1) 目的

本研究で開発したプロトタイプシステムの対話型GAによるひび割れ抽出機能およびひび割れ幅算出機能の有効性を検証する。

(2) 検証手法

被験者が対話型GAを用いない試行錯誤による方法で実画像を処理した結果と本システムを利用して得られた処理結果とを比較し, さらに抽出された画像からひび割れ幅を算出することによって本システムの有効性について考察する。なお, サンプル画像は311万画素のデジタルカメラを用い, 撮影範囲1mで撮影した画像の一部を利用した。なお, ここでの撮影範囲とは, デジタルカメラで撮影した長方形の画像における, 短い方の長さを指す。本研究で用い

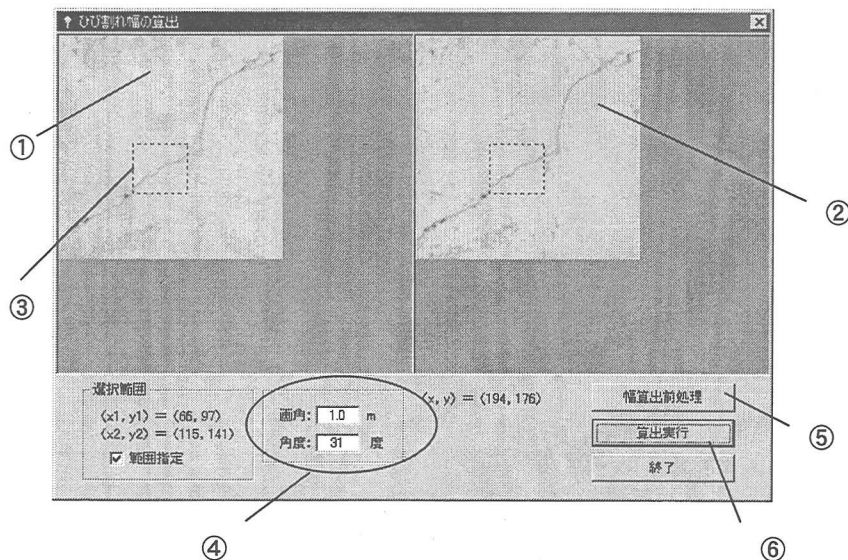


図-10 本システムのひび割れ幅算出の実行画面

たデジタルカメラでは、1画素あたりの実際のサイズは約0.7mmとなる。画像サイズは200×200画素であり、あらかじめ計測した画像中のひび割れ幅は0.35mmである。

(3) ひび割れ抽出の実験手法

実験は大学生5名に対して行った。各被験者は実験に先立ちシステムの使用方法に関する説明を受け、システムの使用練習を行った後、実験を開始した。実験は、被験者が手作業、すなわち試行錯誤で画像を処理する方法（以下、手作業）と本システムを用いて与えられた画像を処理する方法の2種類で行った。手作業と本システム利用の作業効率を比較するために、図-11に示すサンプル画像を実験に用いた。実験手順を以下に示す。

①手作業による画像処理

手作業による画像処理は、表-2に示す画像処理手法を用いて、被験者に自由に試行錯誤によって画像の処理を行ってもらい、被験者が最終的に一番良いと判断したものを出力結果とする。その際、記録するデータは、画像処理により得られた画像、画像処理手順と各種パラメータ値、また処理に要した時間とする。ただし、画像処理の手順「前処理（濃度変換、フィルタ処理）→2値化処理→ノイズ除去」は、事前に教授した。

②本システムを用いた画像処理

本システムを用いた画像処理は、被験者に本システムを用いて画像処理を行ってもらい、GAの世代数などに制限は設けず、被験者の判断でGAによる処理を進め、一番良いと判断したものを出力結果とする。記録するデータは、画像処理結果、画像処理の各種パラメータ値、画像の処理に要した時間および世代数とする。

(4) ひび割れ幅算出の検証方法

前節で抽出されたひび割れから、図-6のフローに沿ったアルゴリズムを用いてひび割れ幅を算出した算出値と、クラック幅計測器で測定した実測値（0.35mm）との差を比較した。

(5) 実験結果および考察

図-12には、実験により得られた画像、画像処理に利用された処理手法およびそれに付随するパラメータ値を示す。なお、手作業による画像処理手法および各種パラメータ値は、被験者が行った処理手順通りに示した。また、表-3には、実験によって得られた2値画像から算出したひび割れ幅、背景輝度、撮影範囲、角度を示す。

①ひび割れ抽出

本システムによって得られたひび割れ抽出結果は、被験者の手作業によって得られた結果と比較すると、同等もしくはそれ以上の良い結果を得ている。また、画像処理時間も、本システム利用において多少時間を要した被験者もいるが、全体的にはほぼ同様の処理時間であったことから、対話型GAを利用した本システムの有効性は確認された。手作業および本システムによる処理結果の特徴を以下に挙げる。

○手作業による処理結果

各被験者の手作業によって得られた画像処理結果

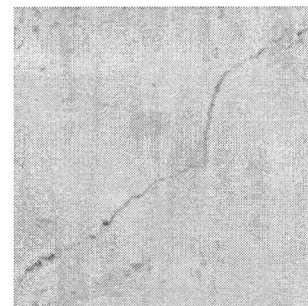
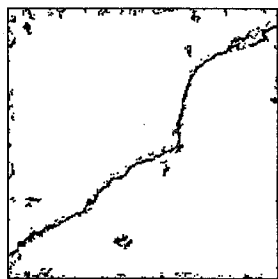


図-11 サンプル画像

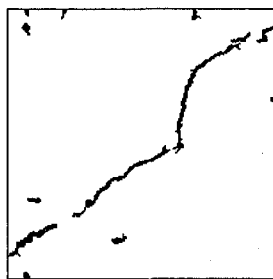
表-2 手作業で用いる画像処理一覧

濃度変換	フィルタ処理	2値化処理	ノイズ除去
明るさ コントラスト カラーバランス ネガポジ反転	加重平均フィルタ 鮮明化フィルタ エッジ抽出フィルタ メディアンフィルタ	固定しきい値 可変しきい値	膨張処理 収縮処理 ノイズ除去フィルタ



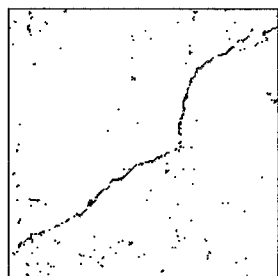
鮮明化フィルタ	on
コントラスト	92
サイズ	10×10
分散の閾値	31.5
2値化の閾値	-6
時間	1分15秒

(a-1) 被験者Aの手作業による結果



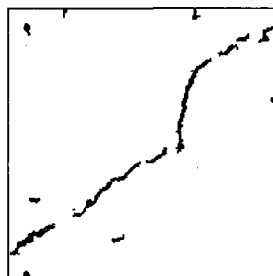
世代数	3
コントラスト	30
エッジ抽出フィルタ	off
サイズ	10
分散の閾値	20.5
2値化の閾値	-6
ノイズ除去フィルタ	on
時間	2分5秒

(a-2) 被験者Aの本システムによる結果



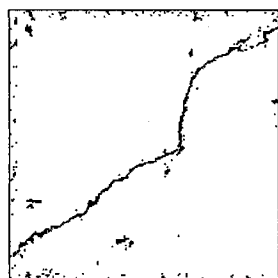
鮮明化フィルタ	on
サイズ	10
分散の閾値	0
2値化の閾値	-85
時間	3分45秒

(b-1) 被験者Bの手作業による結果



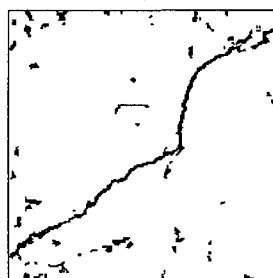
世代数	8
コントラスト	12
エッジ抽出フィルタ	off
サイズ	9
分散の閾値	24
2値化の閾値	-4
ノイズ除去フィルタ	on
時間	7分01秒

(b-2) 被験者Bの本システムによる結果



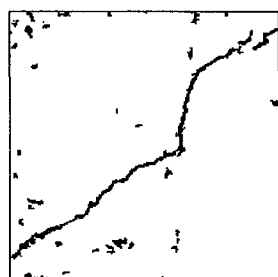
エッジ抽出フィルタ	on
明るさ	40
コントラスト	35
サイズ	10
分散の閾値	41.5
2値化の閾値	-50
時間	3分30秒

(c-1) 被験者Cの手作業による結果



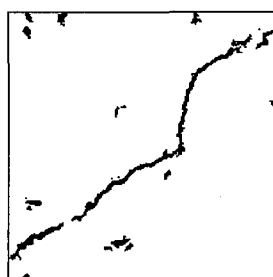
世代数	12
コントラスト	38
エッジ抽出フィルタ	off
サイズ	7
分散の閾値	8
2値化の閾値	-5
ノイズ除去フィルタ	on
時間	6分10秒

(c-2) 被験者Cの本システムによる結果



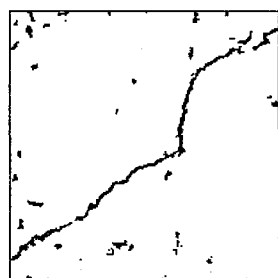
明るさ	56
コントラスト	21
グレースケール	on
サイズ	5
分散の閾値	8.5
2値化の閾値	0
ノイズ除去	on
鮮明化フィルタ	on
時間	7分12秒

(d-1) 被験者Dの手作業による結果



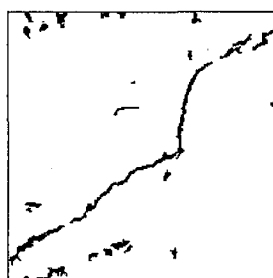
世代数	3
コントラスト	58
エッジ抽出フィルタ	off
サイズ	10
分散の閾値	16
2値化の閾値	-5
ノイズ除去フィルタ	on
時間	3分32秒

(d-2) 被験者Dの本システムによる結果



明るさ	-40
コントラスト	107
サイズ	5
分散の閾値	9
2値化の閾値	-2
ノイズ除去フィルタ	on
時間	3分27秒

(e-1) 被験者Eの手作業による結果



世代数	4
コントラスト	40
エッジ抽出フィルタ	off
サイズ	7
分散の閾値	6
2値化の閾値	-7
ノイズ除去フィルタ	on
時間	4分07秒

(e-2) 被験者Eの本システムによる結果

図-12 サンプル画像の実験結果

表-3 ひび割れ幅算出結果

	算出値(mm)	輝度差	背景輝度	角度(度)
a-1	0.35	93	196	37
a-2	0.35	94	196	37
b-1	0.25	52	187	33
b-2	0.35	91	196	37
c-1	0.25	63	190	37
c-2	0.35	93	196	37
d-1	0.35	93	196	37
d-2	0.4	94	196	34
e-1	0.35	92	196	37
e-2	0.35	93	196	37
実測値	0.35			

のばらつきが、本システムを利用して得られた結果画像よりも大きい。これは、本システムではコンピュータが処理をした最終的な画像のみを判別すれば良いのに対し、手作業では作業中は最終的な画像はわからないため、画像処理手法の選択およびこれに付随するパラメータの調整が困難なためであると考えられる。

○本システムによる処理結果

各被験者の本システムによって得られた画像処理結果は手作業を利用して得られた結果画像に比べばらつきが小さかったものの、ばらつきがないわけではないことから、十分な解探索が行えていないことが考えられる。これは、対話型GAを利用した本システムは、画面に表示できる処理画像数の制約から1世代あたりの個体数（個体の集団サイズ）に制約があり、また各個体の評価をユーザ自身が5段階に大まかに評価するために、個体の初期収束性が強くなることから、解の探索を行う世代数が極端に少なくなる傾向がある。また、すべての個体評価をユーザが行うため、さらに作業も単純であることから、ユーザの疲労も世代数が少なくなる一要因である。このために、対象とする最適化問題の解空間の広さに対して、十分な探索空間で最適解の探索が行えない場合がある。つまり、対話型GAは、世代数が少ないゆえに初期個体への依存度が高く、初期個体群が最適解から掛け離れた空間ばかりに存在した場合に、少ない世代また少ない1世代あたりの個体数では、最適解に近づくのは難しい。また、たとえ探索点の近傍に最適解が存在しても個体が最適解に収束することは困難な場合が生じる。

②ひび割れ幅算出

次に、ひび割れ幅算出結果について述べる。本シ

ステムを用いて計測されたひび割れの幅は、全てのケースにおいて実測値に近い値として算出することができた。これによって本システムによるひび割れ幅算出手法の妥当性が確認された。以下に本システムによる結果の特徴を述べる。

○算出結果の特徴

ひび割れ幅の算出において、算出するひび割れ幅の他に、輝度差、撮影範囲、背景輝度、角度がある。（本実験では撮影範囲は一定であったため省略する。）背景輝度と角度はどの画像においても大差がないが、輝度差においては(b-1)と(c-1)は他の画像に比べて大きく下回っている。この2つの画像はひび割れ抽出結果をみると他の画像よりもひび割れが細く、算出値をみても実測値より低い値が算出されている。ひび割れ幅と輝度差は密接な関係があるため、ひび割れの細い2つの画像は輝度差が低く算出され、結果ひび割れ幅も小さな値が算出されている。このことから、本システムによるひび割れ幅算出手法は、ひび割れ抽出結果に大きく依存しているといえる。

○ひび割れ抽出手法による幅算出の違い

本システムによってひび割れを抽出した画像からひび割れ幅を算出した方が、手作業によるそれよりも算出値が収束している。これは先に述べたように、本システムの方が画像処理結果においてばらつきが少ないため、ほぼ同じ値が算出されたものだと考えられる。

6. まとめ

本論文では、デジタルカメラにより取得した画像からひび割れの自動抽出および幅算出する手法を提案し、その手法に基づいたシステムのプロトタイプシステムを開発し、有効性の検証を行った。

以下、本研究で得られた主要な成果を記述する。

- ① 本システムでは、デジタル画像からのひび割れ抽出に必要とされる画像処理手法の組み合わせやこれら画像処理手法に伴う各種パラメータの最適化に対話型GAを利用した独自の手法を提案して適用を試みた。これにより、本システムのユーザは、画像処理を行う際に処理パラメータの試行錯誤過程を要さず、ユーザは自動処理

された画像(個体)を評価していくことにより、ひび割れの抽出を行うことが可能となった。

- ② 本研究の実験結果では、本システムによって得られたひび割れ抽出結果は、被験者の手作業によって得られた結果と比較すると、同等もしくはそれ以上の良い結果を得た。
- ③ コンクリートひび割れ画像からひび割れ幅を算出する手法として、ひび割れ部分(対象部分)とそうでない部分(背景部分)という2値の画像に変換された2値画像を用いて、対象部分と背景部分の輝度の差(輝度差)を求めることによって、この値からひび割れ幅を算出する手法を提案した。
- ④ 本システムを用いて算出した値と手作業でひび割れ幅を計測した値を比較することによって、その精度および有効性を検証した。その結果、実測値とは多少の差があるものの、従来の手作業による計測においても誤差は生じるため、本システムで算出したひび割れ幅の誤差は許容範囲内であり、本システムは十分に有効性があると言える。

続いて、今後の課題を以下にまとめる。

- ① 対話型GAを利用した本システムは、画面に表示できる処理画像数の制約から1世代あたりの個体数に制約が生じること、またユーザの疲労が原因となり、対象とする最適化問題の解空間の広さに対して、十分な探索空間で最適解の探索が行えないという欠点が明らかになった。本研究では、初期個体群の発生方法などの工夫を行ったが、今後さらに、解探索能力を改善させる新たなアルゴリズムの工夫が必要である。
- ② 本研究の実験結果から、処理画面にノイズが残るものやひび割れが途中で途切れるものが多く、現在の画像処理手法では、その処理能力に限界があることが明らかとなった。今後、ひび割れの抽出に特化した処理手法の追加を検討する必要がある。
- ③ 現段階では、コンクリートひび割れ画像において、撮影時にあらかじめ計測しておいた撮影範囲を手動で入力する必要がある。しかし、ひび割れ幅算出の自動化において、撮影した画像から撮影範囲の認識を行う事は困難であると考え

られる。そのため、撮影範囲以外の情報からひび割れ幅の算出する方法を考案する必要がある。

- ④ 現在のシステムでは、ユーザがひび割れのある部分を範囲指定することによってその範囲内の平均ひび割れ幅を算出している。そのため、仮に最もひび割れ幅の太い部分の位置情報が欲しいとすると、ユーザが画像内で最もひび割れが太い部分を探さなければならない。そのため、システムがひび割れのある部分を自動認識し、自動でひび割れ幅を算出させることを可能にすれば、ユーザの負荷を軽減させることができる。

謝辞：本研究をまとめるにあたり、種々のご援助をして頂いた 山口大学 中村秀明助教授に感謝の意を示します。また、実験に協力して頂いた 山口大学 知能情報システム工学科 システム設計工学研究室の皆様にご心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会【2001年制定】コンクリート標準示方書[維持管理編], 2001.1
- 2) 濱村誠彦, 佐藤仁人: デジタル画像によるコンクリートひび割れ検出方法の研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp437-438, 2000.9.
- 3) 佐々木康史, 三田村浩, 今野久志他: デジタル画像による床版劣化判定システムの開発, 土木学会第56回年次学術講演会, pp246-247, 2001.10
- 4) 岡俊蔵, 村井亮介, 勝野壽男, 佐伯輝夫他: CCDカメラを用いたコンクリート床版ひび割れ検出に関する実橋実験, 土木学会第54回年次学術講演会, pp452-453, 1999.9.
- 5) 小出博, 特殊用途カメラの研究「画像診断支援システム」開発とその活用, 映像情報メディア学会誌, pp1-4, 1999.9.
- 6) 小野定: 非破壊検査手法による診断技術の現状と今後, 橋梁と基礎, 設計図書, pp105-108, 2001.8.
- 7) 日本ファジィ学会: ファジィとソフトコンピューティング ハンドブック, 共立出版, 2000.9.
- 8) 高木英行, 畝見達夫, 寺尾隆雄: 対話型進化計算の研究動向, 人工知能学会誌vol.13no.5, pp692-703, 1998.9.
- 9) 安居院猛, 長尾智晴: ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂, 1993.9.