

平成 19 年度 修士論文

センサと扇風機群の配置に依存しない
室温の動的制御システム

電気通信大学 大学院情報システム学研究科
情報システム設計学専攻

0650032 三好 晴樹

指導教員 多田 好克 教授
岡本 敏雄 教授
大森 匡 准教授

提出日 平成 20 年 2 月 19 日

目次

第1章	はじめに	7
第2章	背景と目的	10
2.1	背景	10
2.2	目的	11
第3章	既存の温度制御システム	13
3.1	温度制御システムを提供するサービス	14
3.2	温度制御システムの構築に利用可能なシステム	14
第4章	システム設計	16
4.1	システムの概要	16
4.2	システム導入の前提条件	19
4.3	システムへの入力情報	20
4.4	適用アルゴリズム	21
第5章	実装	23
5.1	進化型計算とは	23
5.2	進化型計算の適用	24
5.2.1	アルゴリズムの流れ	25
5.2.2	染色体のコード化	27

5.2.3	初期個体生成	28
5.2.4	評価関数	29
5.2.5	選択法	30
5.2.6	交叉	31
5.2.7	突然変異	32
5.2.8	終了条件	33
第6章	シミュレーション実験	34
6.1	シミュレーションの目的と意義	34
6.2	熱流体シミュレーション	35
6.3	Excelによる数値シミュレーション	36
6.4	シミュレーション実験	42
6.4.1	実験環境	44
6.4.2	実験1	44
6.4.3	実験2	49
6.4.4	実験3	53
第7章	実世界での実験	57
7.1	実験方法	57
7.2	実験1	62
7.3	実験2	63
第8章	関連研究	66
8.1	遺伝的アルゴリズムの適用に関する研究	66

8.1.1	Using Cyclic Genetic Algorithms to Evolve Multi-Loop Control Programs	66
8.1.2	遺伝的アルゴリズムを用いた多目的光軸自動調整 システムの研究開発	67
8.2	空調機器以外による室温制御の研究	68
8.2.1	高層オフィスビルにおける自然換気利用に関する研究 ..	68
第9章 まとめ		69

図目次

図 4.1 :	システムの概要図	17
図 4.2 :	制御の流れ	18
図 5.1 :	提案アルゴリズムによる制御フローチャート.....	26
図 5.2 :	染色体のコード化	27
図 5.3 :	次世代へ受け継がれる過程	30
図 5.4 :	交叉の例	31
図 5.5 :	突然変異の例	32
図 6.1 :	アイコン化セルの配置例	43
図 6.2 :	実験 1 のシミュレーション空間	45
図 6.3(A) :	センサ A の温度変化	46
図 6.3(B) :	センサ B の温度変化	46
図 6.3(C) :	センサ C の温度変化	46
図 6.4(A) :	センサ A の温度変化	48
図 6.4(B) :	センサ B の温度変化	48
図 6.4(C) :	センサ C の温度変化	48
図 6.5 :	実験 2 のシミュレーション空間	50
図 6.6(A) :	センサ A の温度変化	51
図 6.6(B) :	センサ B の温度変化	51
図 6.7 :	改良後の次世代へ受け継がれる過程	52

図 6.8 :	実験 3 のシミュレーション空間	54
図 6.9(A) :	センサ A の温度変化	55
図 6.9(B) :	センサ B の温度変化	55
図 6.9(C) :	センサ C の温度変化	55
図 6.9(D) :	センサ D の温度変化	56
図 7.1 :	みはるぞう	59
図 7.2 :	TRI-BH82	59
図 7.3 :	AFC-110RI	59
図 7.4 :	DAT-3161R	59
図 7.5 :	センサと扇風機の配置箇所	60
図 7.6 :	4 日間の平均温度のグラフ	61
図 7.7 :	実験 1 における研究室内の温度変化	62
図 7.8 :	実験 2 における研究室内の温度変化	64

表目次

表 4.1 :	入力情報の例	21
表 5.1 :	設置した扇風機の台数と 1 世代あたりの個体数	28
表 6.1 :	1 次元非定常熱伝導の陽解法	37
表 6.2 :	定数の設定	38
表 6.3 :	初期条件の設定	38
表 6.4 :	境界条件の設定	39
表 6.5 :	計算式の入力	39
表 6.6 :	繰り返し作業の例	40
表 7.1 :	実験 2 における各温度センサの設定温度	64

第1章

はじめに

近年、センサを用いたシステムが様々な分野で導入されてきている。その理由として、センサは電池で駆動し、無線技術と連動することにより、どこにでも設置できるという自由度を持っていることが挙げられる[1]。センサの種類には温度センサ、圧力センサ、磁気センサ、加速度センサなど数多くの種類が存在し、様々な分野でシステムとして取り入れられてきている。中でも温度センサはセンサの中で一番歴史が長く、電化製品の温度制御や化学工場での温度計測だけでなく、水位・湿度・流速・圧力などの計測制御にも用いられている[2]。

温度センサを用いたセンサシステムの代表的な例は、空間にセンサを複数配置し、各センサの位置の温度監視を行うシステムである。温度監視は様々な分野で需要がある。たとえば、品質管理の目的で倉庫や施設での温度計測に導入されたり、商用データセンターのハウジングや大学・研究機関などのコンピュータ室やサーバールームにおける熱の障害のリスクを減らす目的でも導入されている[3]。それらの需要に対し、温度センサと計算機を組み合わせ、多点の場所の温度状況を利用者に目に見える形で提供するシステムが製品として数多く登場している。

本論文では、このように温度センサからの情報を利用者に提供するシステ

ムを「温度監視システム」と呼ぶことにする。また、温度監視システムを応用し、自動で温度を調節する機能を持ったシステムを「温度制御システム」と呼ぶことにする。

2つのシステムの違いを例に挙げて説明する。各温度センサの温度変化をグラフ化して利用者に目視させるものや、温度を監視し、ある一定以上の温度を感知するとアラームを鳴らしたり、指定されたアドレスにメールを送信したりするシステムをまとめて「温度監視システム」とする。一方で「温度制御システム」は、一定以上の温度を感知すると自動で空調機器稼働させ、室内の温度を下げるものや、利用者が各温度センサに要求する温度を設定し、システムがエアコンや暖房機などの機器を制御することで、観測温度を設定温度へ近づける機能を持ったシステムを指すことにする。「温度監視システム」と「温度制御システム」を比較した場合、「温度制御システム」の方が導入時にかかるシステムの設計や設定のコスト、また、金額面での負担が大きくなる。そのため、本当に厳密な温度監視が必要な場所以外では、温度制御システムを導入することは難しいのが現状である。

そこで本研究では、温度センサと扇風機を用いることで、効率的な温度調節が可能となる温度制御システムを提案する。本システムは、金銭面や導入時に必要となるシステムの設計や設定コストの関係で温度制御システムを導入できなかった環境にも、気軽に導入してもらえるようなシステムを目指す。また、従来の温度制御システムを導入する際に必要となる、システムの設計や設定を極力抑えたシステムを考える。そのため、システムを導入する空間を考慮した温度制御システムの設計を行う必要がなく、また、システムを導入した部屋の形状やセンサの設置場所といった、空間情報の入力も一切必要

ないシステムを提案する。提案するシステムは、扇風機の稼働による室内の温度変化をフィードバックし、動的に扇風機の制御方法を変えることで室内温度の制御を行う。システムの制御方法の学習には進化論的手法を用いることで、各扇風機の風量や風向を動的に変化させながら、室温環境の変化に対応していく仕組みになっている。

本論文は、次のような構成となっている。第2章では、センサシステムの普及と温度制御システムの導入の問題点に触れ、本研究の目的について述べる。第3章では、既存の温度制御システムを紹介する。第4章では、本研究で提案するシステムの設計について、第5章で進化型計算手法に基づいたアルゴリズムの実装について述べる。第6章で提案システムのシミュレーション実験を行い、アルゴリズムの性能評価と、実験結果を踏まえたアルゴリズムの改良について述べる。第7章では、実世界で行った実験について述べる。第8章で、関連研究として進化論的手法をシステムに応用した研究と、空調機器以外による室温制御の研究について述べる。最後に、第9章で本研究についてまとめる。

第2章

背景と目的

2.1 背景

現在センサを用いたシステムは，防犯・セキュリティ，災害予測，環境保全などを目的としたものだけでなく，我々の身近な分野である情報家電などにも取り入れられてきている．平成16年4月から平成17年3月の期間において245社の製造業者を対象に行ったアンケート結果によれば，家電，情報・通信，生産プロセス，医療・福祉，交通・ITS，環境など，幅広い分野でセンサシステムを生産，販売した実績が報告されている[4]．

中でも温度監視システムは，製品管理の分野では食品だけでなく医療関係や工場などで，また，身近なところでは計算機の密集したサーバールームの温度監視を目的としての需要がある．それらの需要に対して，様々な製品の開発やサービスの提供がされている．具体的な製品として，温度センサ付きRFIDタグを活用したNECの温度監視トレーサビリティシステム[5]や，パソコンと多重伝送，温度センサの組合せにより室内温度の計測と監視を行う，豊中設計の多点温度監視管理システム[6]などが存在している．

温度監視の需要のある場所は，なにも工場やサーバールームに限ったものではなく，家庭内や企業のオフィスなどにも存在している．現在，多くの家庭

やオフィスに室内の温度調節を目的として、クーラーや暖房機などの温度調節機器が設置されている。しかし設置された温度調節機器だけでは、部屋の特定部の温度を優先して下げる等の細かい温度制御を行うことは難しい。

そこで最近では、空調機器と温度センサを用いて、より細かい温度制御が可能になるシステムの導入例も増えてきている。しかしこのようなシステムの導入にはコストの問題が第一に挙げられる。金銭的なコストはもちろんのこと、温度制御システムの設計・構築にはかなりの手間がかかる。具体的には、温度センサや温度調節機器の配置位置、システムを導入する空間の広さや形などから制御方法を設定する必要がある。温度制御システムを導入する際には、こういった様々な設計や設定が必要となるため、利用者がシステムを簡単に導入出来ないのが現状である。

2.2 目的

本研究では、温度センサと扇風機を用いることで、効率的な温度調節が可能となる温度制御システムを提案する。提案するシステムは、従来の温度制御システムを導入する際に問題となっている導入にかかるコスト、主にシステムを導入する際に必要なシステムの設計や設定を極力減らすことを目的としている。システム導入時に利用者が行うシステムへの情報入力の手間を極力減らすため、導入する部屋の形状やセンサの設置場所といった、空間に関する情報の入力が一切必要ないシステムを提案する。本システムを導入することで、部屋の一部の温度を優先的に上げる等、設置された温度調節機器だけでは行うことが難しい細かい温度制御が可能となる。提案するシステムは

扇風機の稼働による室内の温度変化をフィードバックし、動的に扇風機への稼働命令を変えることで室温制御を行う。システムは、制御方法の学習に進化論的手法を用いることで、各扇風機の風量や風向を動的に変化させながら室内環境の変化に対応していく仕組みになっている。

第3章

既存の温度制御システム

本章では、既存の温度制御システムと温度制御システムを提供するサービスについて述べる。

近年、温度センサと計算機を組み合わせ、利用者に温度環境を提示する温度監視システムが数多く製品として登場し、様々な分野で利用されている。社会の温度監視に対する需要の拡大により、温度監視だけではなく、観測した温度環境によってクーラーなどの温度調節機器を自動的に稼働させ、室温を理想的な環境に保つ「温度制御システム」を導入しているケースも多く見受けられる。一般的に温度制御システムを導入しようとする時、選択肢として以下の2つのケースが考えられる。

- ・ 温度制御システムを設計・提供してくれるサービスを受ける
- ・ 温度監視システムを用いて温度制御システムを構築する

温度監視システムの導入と比較しても、温度制御システムの導入には、金銭面での負担と制御システムの設計にかなりの手間を必要とする。そのため、温度制御システムの設計や構築をサービスとして取り扱っている企業も存在している。設計や構築をサービスとして受ける以外の選択肢として、利用者

自らがシステムを構築する方法がある。その際、温度監視システムと温度調節機器を連動させることが可能となるようなシステムの利用が考えられる。

そこで以下では、温度制御システムを提供するサービスと温度制御システムの構築に利用可能なシステムの2種類について詳しく述べる。

3.1 温度制御システムを提供するサービス

温度制御システムを提供するサービスとして、東芝テクノネットワーク株式会社のマルチ空調システム[7]がある。マルチ空調システムは、中・小規模のビルに最適な空調システムを提供するサービスで、室内の空調機器がすべて個別にコントロールでき、効率的な稼働が可能となるシステムを設計する。システム設計には熱負荷計算ソフトを用いることで、室内温度にムラが生じないように適正負荷による設計を行う。導入事例として、省エネルギー全館空調システム・24時間換気システム（高性能フィルター付）を装備したケースがある。このサービスを受ける場合には、設計にかかる費用は勿論、新たに設置する機器にかかる費用も負担しなければならない。

3.2 温度制御システムの構築に利用可能なシステム

温度制御システムを構築する際に利用可能なシステムとして、株式会社エーピーシー・ジャパンが製品として販売している、サーバールーム向け環境管理システム「Environmental Management System」[8]（以下EMS）や、松尾電器産業株式会社の「電子サーモスタット」[9]などがある。

EMS は 1U サイズの本体とセンサ群から構成される、企業やデータセンターなどのサーバールーム向け温度監視・制御システムである。利用者が各センサに任意の温度を設定し、センサの観測温度がその設定した温度を超えた際に EMS から利用者へメールで通知することが可能である。また EMS は、同社の電源・空調システムとの連動も可能であるため、設定した温度を超えた際にラック内の空調を起動させるなどの温度制御を設定することも可能である。

電子サーモスタットは温度監視と電源管理を同時に行えるシステムであり、ヒーターなどの機器と組み合わせることが可能となる。電子サーモスタットの設定温度より低い温度を観測した際に、ヒーターの電源を入れるように設定することで、観測点の温度を一定以上に保つことができる。

EMS や電子サーモスタット利用すれば、一定の温度範囲を超えた場合に指定した空調機器を稼働させることができる。しかし、利用者が設定するのは、各センサと空調機器の関係だけであり、システムの制御は任意のセンサが範囲外の温度を観測した場合に、そのセンサに対応した空調機器を稼働させるだけに留まってしまう。冷房機と暖房機を組み合わせ、センサの観測温度を利用者の要求する温度範囲内に調節することも可能ではあるが、複数の箇所（センサ）を同時になると、センサと空調機器の関係を設定しただけでは、制御を行うことは難しい。温度制御システムをサーバールームなどに簡単に導入することを目的に設計されているため、複数のセンサの温度を一定温度に近づける制御を行うには不向きである。

第4章

システム設計

この章では提案システムを実現するための方法について議論する。

4.1 システムの概要

提案するシステムは温度センサ群，扇風機群，計算機の3要素から構成される。システムの概要を図4.1に示す。システムの利用者は，まず温度センサ（複数も可）を温度制御を行いたい任意の場所に配置する。利用者は各温度センサの位置を把握しているものとし，センサを配置した場所に対して，要求する設定温度を入力する。システム稼働後は，各温度センサから現在の温度状況を1台の計算機が受け取り，各扇風機への命令を構成して送信する。扇風機の稼働後に再度温度センサから温度状況を取得する。各センサに設定された利用者の要求温度と実行後の温度変化を比較し，実行された命令について評価を行う。扇風機へ命令を発行する制御プログラムの学習には進化型計算を適用することで，現在の環境（観測温度）をより良い環境（要求温度）へ近づけるために有利な命令を残していく。詳しくは次章で述べる。基本的には温度取得，扇風機への命令送信，扇風機稼働の処理を繰り返すことで，室温の制御を行うシステムである。システムの制御の流れを図4.2に示す。

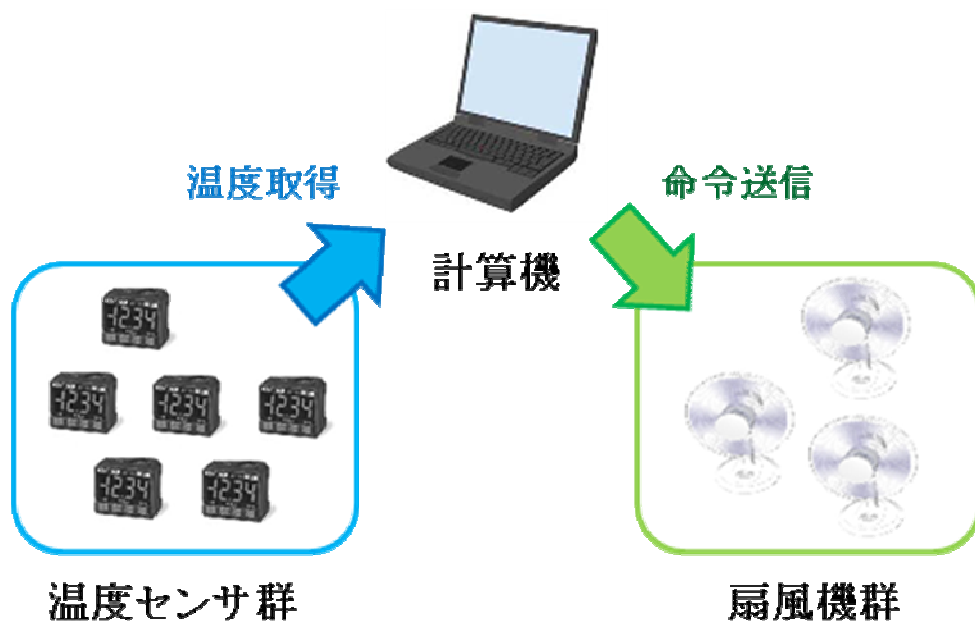


図 4.1: システムの概要図

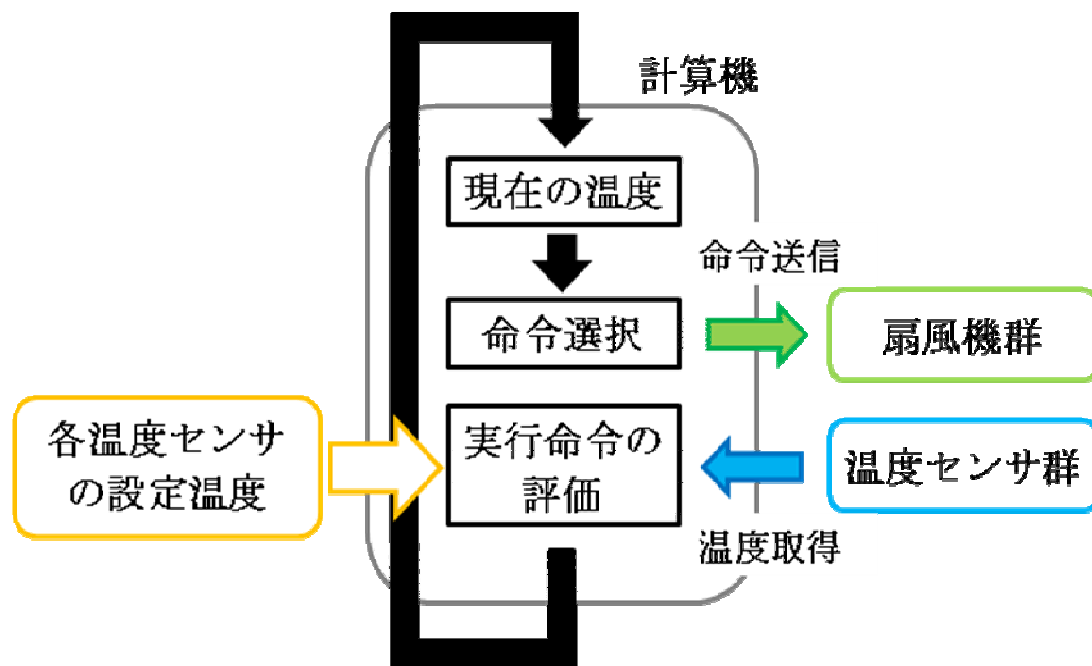


図 4.2:制御の流れ

4.2 システム導入の前提条件

提案するシステムは、扇風機の稼働により生じる空気の流れを用いて室内の温度制御を行うシステムである。したがって、システムを導入する環境は扇風機の風の影響が温度変化として反映される空間であれば、どこでも利用することが可能である。

本システムは、扇風機の稼働のみで温度制御を行うシステムであり、クーラーや暖房機といった温度調節機器へ、直接稼働や停止の命令を行うことはしない。そのため、システムを導入する空間には、予め室内の温度を上げる点（発熱点）と温度を下げる点（吸熱点）が少なくともそれぞれ1箇所以上あることが前提条件となる。ここでの発熱点・吸熱点とは、冷房機や暖房機などの温度調節機器に限らず、窓や外気の進入を許す隙間であったり、計算機の発熱などの自然発生的なものも含める。

使用する温度センサは、計算機に情報を送ることが可能なものに限定し、導入環境の温度変化の範囲をすべて認識できるものとする。配置する扇風機については、首振り機能を備え付けているものに限定する。現在市販されている扇風機には、床置き型、壁掛け型、スリムタイプ、ボックス型などの種類が存在しているが、どの種類の扇風機にも首振り機能が備え付けられていることが多い。また、首振り機能を備えた扇風機は風向を変えることで、少ない設置台数でより多くの種類の命令を実行することが出来るようになる。

システム導入の前準備として、利用者はまず温度制御を行いたい場所に温度センサを配置する。次に部屋の形や広さに応じて適当な箇所に扇風機を設置する。利用者は各センサの位置とナンバリングを認識しているものとし、

各センサごとにその場所の設定温度を決定する。システムは各センサの観測温度を要求された設定温度に近づけるために制御を行う。

4.3 システムへの入力情報

本システムは、導入の際に必要なとなるシステムの設定を極力抑えることを目的としているため、利用者が導入時にシステムに入力する情報は以下のものに限定する。

- 配置した温度センサの数
- 配置した扇風機の台数
- 各扇風機の首振り可能な範囲
- 各扇風機を選択可能な風量の段階

センサにはそれぞれ番号付けを行い、必要であれば設定温度を入力する。配置した全てのセンサに設定温度を入力する必要は無く、温度制御の方針に合わせて、任意のセンサに設定温度を入力する。設定温度が入力されていないセンサの温度変化については、システムは一切感知しない。

扇風機への命令可能な範囲を認識させるため、あらかじめシステムに各扇風機の首振り可能な角度と、選択可能な風量を入力する必要がある。一般に市販されている扇風機は、その機種によって首振りの動作可能な角度や選択可能な風量には違いがあり、導入する扇風機の稼働可能な範囲を利用者がシステムに入力する。システムへの入力情報の例を表 4.1 に示す。

表 4.1: 入力情報の例

配置した温度センサの数	3	
設定温度 (°C)	センサ A	25
	センサ B	20
	センサ C	—
配置した扇風機の台数	2	
首振り可能な角度 (度)	扇風機 1	90
	扇風機 2	180
選択可能な風量の段階	扇風機 1	3
	扇風機 2	6

4.4 適用アルゴリズム

提案するシステムは、従来の温度制御システムを導入する際に必要となる、部屋の形状やセンサの設置場所といった空間情報を一切入力データとして受け取らない状態から温度制御を行うことになる。そのためシステムには、扇風機の稼働後の温度変化をフィードバックしながら制御方法を確立していくアルゴリズムが必要となる。

温度変化をフィードバックする方法として、温度変化をデータベース化する方法を考えた。部屋の温度状況を似た環境ごとの集合に分割し、扇風機の稼働後の温度変化は、それぞれの集合ごとにデータベースに保存する。扇風機への命令は、現在の温度状況が分類されている集合の中から、過去の扇風

機の稼働結果をデータベースから引き出し、決定するアルゴリズムを考えた。しかし、システムを導入した部屋の環境は、時間とともに刻一刻と変化する。たとえば、時間経過による外気温度の変化、窓の開け閉めや温度調節機器の ON・OFF による発熱点や吸熱点の状態が変化する状況が考えられる。本システムの目的は、こうした部屋の環境変化に柔軟に対応しながら、各センサの観測温度を利用者の要求する設定温度に近づけることである。

そこで、本システムには以下のようなアルゴリズムを適用した。まず、一定数の扇風機への命令を 1 集合として用意する。集合に含まれる命令をすべて実行し、センサの観測温度が利用者の要求する温度に近づいたか否かを基準として、集合に含まれる命令を選別する。観測温度を利用者の要求する温度に近づけることに成功した命令については、再び実行することで、さらに要求する温度に近づけられる確率が高いと考えられる。そのため、集合内の命令を、それぞれ実行前と後での温度変化を基準とした関数を用いて評価し、よりよい評価値を持つ命令を適者として残していく。評価値の高い命令を次の集合へと残し、それらの命令を実行することで、観測温度を利用者の要求する温度に近づけていくアルゴリズムである。また、集合サイズを小さくする、すなわち集合に含まれる命令の数を少なくすることで、集合内の命令の入れ替わり周期を早め、空間内の環境変化にも素早く対応できるようにする。

第5章

実装

この章では本システムに採用した、進化型計算による実装について述べる。

5.1 進化型計算とは

現在、地球上に存在する生物は、30億年以上前に生まれた単純な原始細胞に由来していると考えられている。そこから生命は、地球上のあらゆる場所に見事に適応し、繁栄を遂げている。この生命の長い歴史の間に生じた変化は「遺伝」と「進化」と呼ばれる現象により説明される。環境への適応に有利な変異を生じた個体は生き残り、子孫を残す可能性が高いため、その変異が子孫に数多く受け継がれることによって進化が生じるとしている。

進化型計算とは、この生物の進化の過程を工学的に応用しようという研究分野である。進化型計算は、生物界の現象である進化とコンピュータ上での計算を融合させるという新しい可能性を秘めた計算手法であり、今までにも数多くの研究成果が報告されている[10]。

進化型計算では対象とする問題を環境として、問題の解を個体として考える。そして、優れた解を環境に適応した個体とみなして、複数の個体からなる個体群を進化させることにより、優れた解を探索する。

進化型計算にはいくつかの種類があり，代表的なものとして遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm）が存在している。

5.2 進化型計算の適用

ここでは，本システムへの進化型計算の適用について述べる。

本システムでは，進化型計算の中でも有名な遺伝的アルゴリズムを基にして，進化型計算のアルゴリズムを考案し，それを扇風機へ命令を発行する制御プログラムの学習に適用した。

提案アルゴリズムでは，個々の扇風機に指示する一連の命令を1染色体として考える。染色体には扇風機の台数分だけ，それぞれへの稼働命令となる遺伝子が含まれている。各遺伝子には扇風機への「稼働方向」・「稼働時間」・「風量」の情報が含まれている。各染色体の評価値は，扇風機の稼働前と稼働後での温度変化から評価関数を用いて計算する。

まず，複数の個体からなる個体群を用意し，この個体群を基準に探索を行う。個体群に含まれている全ての染色体に対して，扇風機への命令を実行し，評価値が決定した段階で，評価値を基に優れた染色体を選び，次世代の個体群へと受け継がせる。また，評価値を基準として，染色体中の遺伝子の値を変化させることで，世代の更新ごとにより良い個体が個体群中に増えるようにする。本システムは，このようにして世代数を重ねることで，各センサの観測温度を利用者の入力した設定温度へと近づける温度制御を行う。

染色体に含まれている情報が(扇風機の台数) × (稼働方向・稼働時間・風量)

であるため、遺伝的アルゴリズムを適用するには、探索空間は比較的狭いと考えられる。しかし、部屋の温度状況は常に変化しているため、前回と同じ命令を選択し、扇風機を稼働させたとしても、同様の結果が得られるとは限らない。

そこで、個体群に含まれる個体数を少なくして、世代の更新に必要な時間を減らすことで、部屋の温度状況の変化に素早く対応出来るようにした。

5.2.1 アルゴリズムの流れ

ここでは、アルゴリズム全体の流れについて述べる。まずシステムは以下の情報を入力データとして利用者から受け取る。

- ・ 配置した温度センサの数
- ・ 配置した扇風機の台数
- ・ 各扇風機の首振り可能な範囲
- ・ 各扇風機を選択可能な風量の段階

利用者からの入力データを基に、初期個体となる染色体を複数生成する。生成された染色体の中からひとつを選択し、その染色体の遺伝子に含まれる扇風機への命令を実行する。扇風機を稼働させた後に、再度各センサから温度を取得する。扇風機の稼働前と稼働後での温度変化から評価関数を用いて、選択した染色体の評価値を決定する。以上の処理を1世代に含まれる染色体すべてについて行い、すべての染色体の評価値を決定する。

次世代へ受け継ぐ染色体は，評価値により決定される．評価値を基準に2つの染色体を選択し，互いの遺伝子の1箇所を入れ替える「交叉」や，一定の確率で命令遺伝子の稼働方向・稼働時間・風量の値を変化させる「突然変異」を適用することで，段階的により良い染色体を次世代へと受け継がせる．

次世代へ受け継がれた染色体についても，遺伝子情報に従いそれぞれ扇風機を稼働させ，温度変化を基に評価値の決定を行う．世代に含まれるすべての染色体の評価値が計算され次第，次世代へ受け継ぐ操作を再度行う．提案アルゴリズムによる制御フローチャートを図 5.1 に示す．

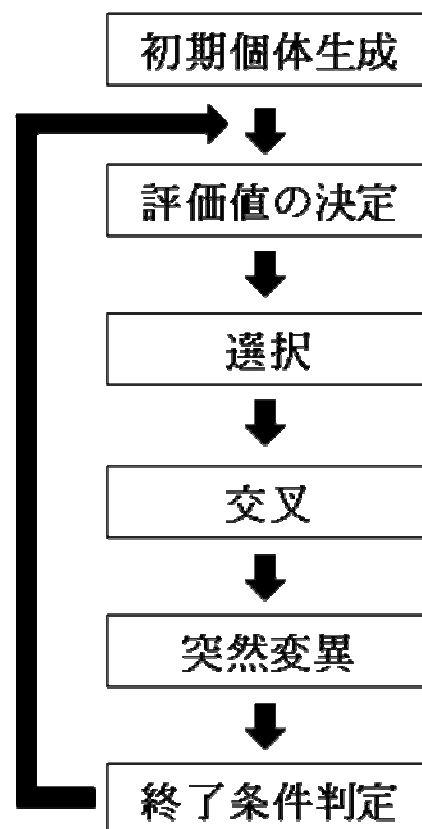


図 5.1:提案アルゴリズムによる制御フローチャート

5.2.2 染色体のコード化

染色体には設置した扇風機の台数分だけ遺伝子が含まれている。遺伝子は、扇風機の稼働方向・稼働時間・風量の情報から成り立っており、それぞれを8ビット、4ビット、4ビットの整数を2進数で表現する。

稼働方向を表現する8ビットは、扇風機的首振り可能な範囲を15度間隔で区別する。稼働時間の4ビットは、0秒～7秒の稼働命令を示しており、風量については扇風機の実可能な風量の段階ごとに4ビットで表現する。

図5.2に染色体のコード化の例を示す。

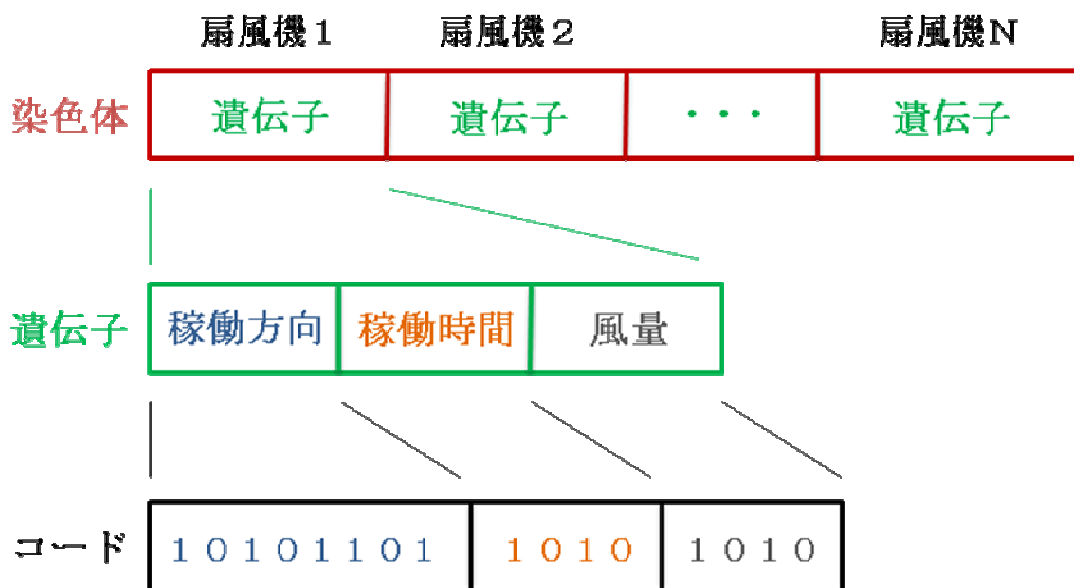


図 5.2:染色体のコード化

5.2.3 初期個体生成

設置した扇風機の台数に応じて、1世代に含まれる染色体の個数を決定する。設置した扇風機の台数と1世代あたりの個体数を表5.1に示す。

表 5.1: 設置した扇風機の台数と1世代あたりの個体数

設置した扇風機の台数	1世代あたりの個体数
1	4
2	8
3	12
4	16
5	20

初期生成される染色体については、配置した各扇風機の首振り可能な範囲と選択可能な風量の段階に応じて、すべての遺伝子パラメータがランダムに決定される。

5.2.4 評価関数

染色体の評価値は、扇風機の稼働前と稼働後での観測温度の変化から、利用者の入力した設定温度にどれだけ近づくことができたのかを数値化したものである。提案アルゴリズムにおける評価関数 h を以下のように定義する。

n 個の温度センサの設定温度をそれぞれ

$$S_1, S_2, S_3, \dots, S_n \text{ とする.}$$

初期の観測温度をそれぞれ

$$S_{1,0}, S_{2,0}, S_{3,0}, \dots, S_{n,0} \text{ とし,}$$

m 回目の扇風機への命令を実行した後の観測温度を

$$S_{1,m}, S_{2,m}, S_{3,m}, \dots, S_{n,m} \text{ と表すことにする.}$$

このとき、 k 回目の命令実行後の設定温度と観測温度の差の合計 $d(k)$ は、

$$d(k) = |S_1 - S_{1,k}| + |S_2 - S_{2,k}| + |S_3 - S_{3,k}| + \dots + |S_n - S_{n,k}|$$

となり、 k 回目を選択された染色体の評価値 $h(k)$ を

$$h(k) = d(k-1) - d(k) \text{ とする.}$$

$h(k)$ の値が大きいほど、評価値が高いことになる。

5.2.5 選択法

各世代で最も評価値の高い染色体は、そのまま次世代へと受け継がれる。その他の染色体については、必ず何らかの操作を受けることになる。まず染色体を、評価値が「正」であるものと「負」であるものの2種類に分ける。

評価値が負の染色体については、染色体の一部の遺伝子の値を変化させる操作を行う。各遺伝子の値を変化させる確率は $P_m=0.1$ とする。評価値が正の染色体は、命令実行後の設定温度と観測温度の差の合計 $d(k)$ を基準にソートし、 i 番目と $i+1$ 番目の2つの染色体を選択して、互いの遺伝子の一部を入れ替える操作を行う。その後、各染色体の遺伝子の値を $P_m=0.05$ の確率で変化させる。

次世代へ受け継がれる過程の例を図 5.3 に示す。

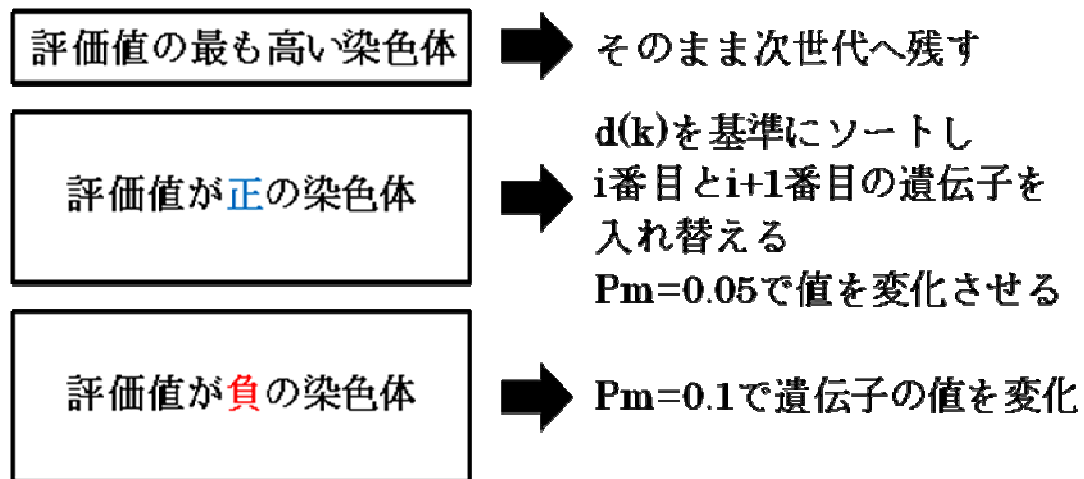


図 5.3: 次世代へ受け継がれる過程

5.2.6 交叉

交叉は、選択された2つの染色体 A, B から新たな2つの染色体 A', B' を生成する操作を行う。入れ替える遺伝子の箇所は1か所に限定する。まず、2つの染色体における対応した遺伝子 (A_i, B_i) を1か所選択する。その部分で A_i と B_i の遺伝子を入れ替え、新しく生成された染色体をそれぞれ A', B' とする。交叉の例を図 5.4 に示す。

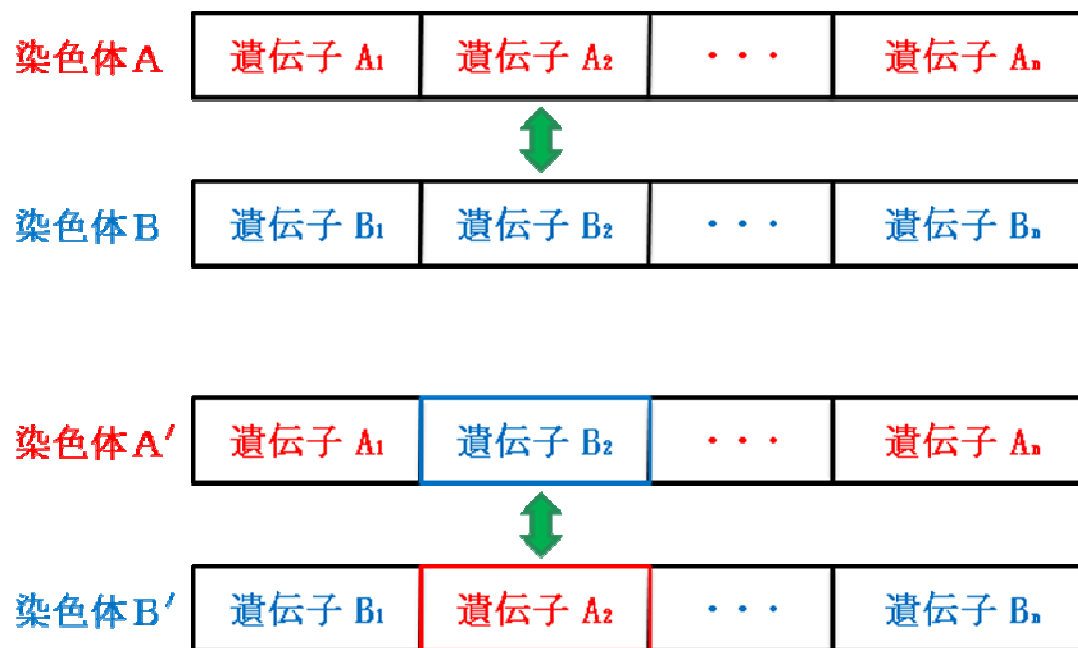


図 5.4: 交叉の例

5.2.7 突然変異

突然変異は、各染色体に一定の確率で発生し、染色体の一部を書き換える操作を行う。遺伝子に含まれる稼働方向・稼働時間・風量の値を変化させることで、交叉だけでは生まれない子個体を生成する。適用アルゴリズムでは、各遺伝子のビットを反転させる操作を行う。値を変化させる対象となった遺伝子には、稼働方向・稼働時間・風量のいずれかのビットを反転させる操作を行う。突然変異の例を図 5.5 に示す。

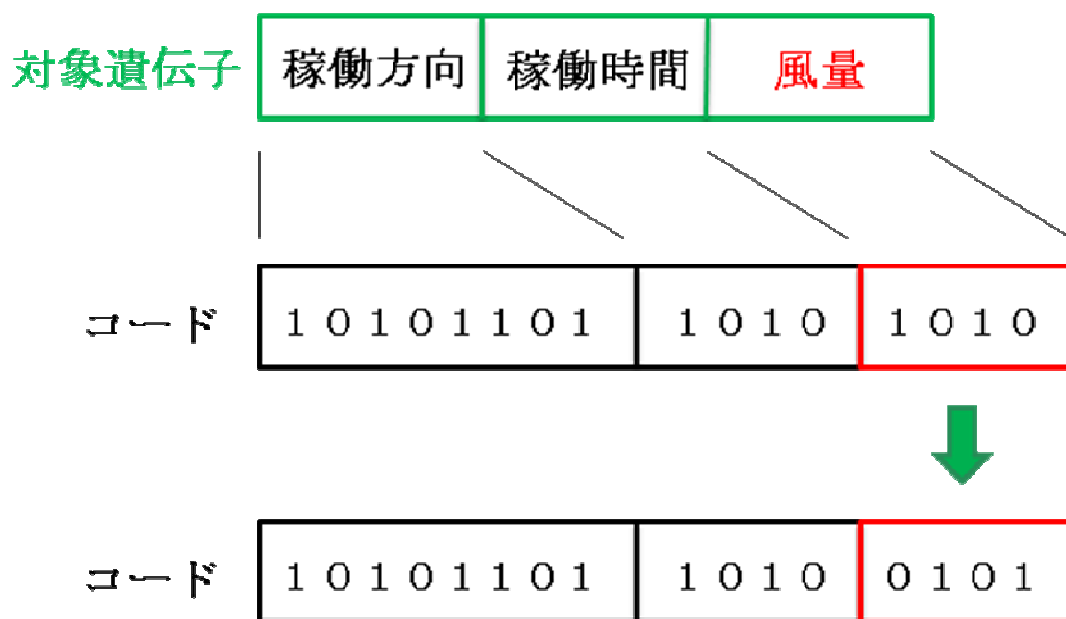


図 5.5: 突然変異の例

5.2.8 終了条件

アルゴリズムの終了条件は，システムに停止命令が出される，もしくは利用者によって設定温度が変更された場合である．設定温度が変更された場合には，現在の世代の染色体について，新たに入力された設定温度を基準に再度評価値を計算し，温度制御を再開する．

第6章

シミュレーション実験

本章では，システムのアルゴリズムの性能評価と改良を目的として行った，シミュレーション実験について述べる．まず，シミュレーション実験を行う目的と意義について述べる．次に，一般的な計算機を用いたシミュレーション方法と，本実験で採用した Excel による数値シミュレーションについて述べる．実際に行った3種類のシミュレーション実験について，実験環境と結果をまとめ，それぞれについての考察とアルゴリズムの改良について述べる．

6.1 シミュレーションの目的と意義

実世界での実験と比較して，シミュレーション実験を行う利点をまとめると以下のような点が挙げられる．

- どんな環境でもつくれる
- 同じ環境下で繰り返し実験が行える
- 短時間で多くの実験を行える
- 特殊な設備が不要
- 精密な記録が取れる

実世界での実験を行う前に、様々な環境でシミュレーション実験を行い、アルゴリズムの性能評価を行うことが目的である。しかし、シミュレーションは、物理現象が複雑になればなるほど数学モデルも複雑になるため、解析できる範囲には限界がある。そのため、数値計算を簡略化する必要がある。それでも、比較的単純な空間におけるシミュレーション実験は、アルゴリズムを改良するための良い材料になると考えた。様々な環境でシミュレーション実験を行い、適用アルゴリズムの性能評価と改良を行うことが目的である。

6.2 熱流体シミュレーション

流れを科学的に解析する分野は「流体力学」や「流体物理学」とよばれており、実用性や重要性が高いため昔より研究されてきた。その結果、流れを支配する方程式については、特殊な場合を除いて、19世紀半ばには確立された[11]。原理的には流れは方程式を解くことにより完全に理解できることになるが、現実には数学的な困難さのため、簡略化を行わない限り解を得ることができない。

こういった状況のもと、最近のコンピュータの驚異的な発展により、方程式をコンピュータを用いて数値的に解き、流れをシミュレーションしながら解析する「数値流体力学」とよばれる分野が発展してきた。計算機上での気体の流れは、空間内の各点における速度や圧力などを指定することにより決定する。速度は場所や時間によって変化すると考えられるため、場所と時間の関数となっている。したがって、流れを支配する方程式は偏微分方程式となる。この偏微分方程式を、流れを考えている領域の境界における条件およ

び初期の時間での条件の下で解くことにより、領域内での流れを知ることが出来る。しかし、流れの支配方程式は複雑な非線形の連立偏微分方程式であり、解析的に式の形で厳密に解を求めることは不可能に近い。そこで何らかの形で近似解を求めることになる。近似解法にもいろいろな種類があるが、近年コンピュータが急速に発展してきたため、数値解析法が主流となっている。

6.3 Excel による数値シミュレーション

Excel は、Microsoft 社の表計算ソフトであり、Microsoft Office の一部として提供されている。Excel はデータ分析に特化しており、会計処理や統計解析、また理工系では主に実験データ等処理しグラフを作成するために使用されている。しかし、これらの作業は Excel の持つ機能の代表的な部分を使っているに過ぎず、Excel が数値シミュレーションに活用できることは、あまり知られていない。

熱流体現象のシミュレーションを行う場合、現象を表した偏微分方程式を差分化して数値的に解く手法が広く用いられている。ここでは例として Excel を利用した 1 次元非定常熱伝達問題を取り上げて説明する。

厚さ b の無限に広い板が一様な温度 20°C に保たれている。この板を時刻 $t=0$ で温度 0°C の環境に置く。このときの板の非定常温度分布を Excel を用いて求める。

熱伝導を表す式は、伝達率を α とすると以下の式で求めることができる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \left(a = \frac{\lambda}{c_p} \right) \quad (1)$$

また，初期条件及び境界条件は

$$t=0 \text{ で, } T=20$$

$$t>0, x=0, b \text{ で } T=0$$

式(1) を陽解法を用いて差分化すると

$$\frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta t} = a \frac{T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}{\Delta x^2} \quad (2)$$

となる。

式(2) は，未来の温度 T_i^{k+1} を現在の温度 $T_{i-1}^k, T_i^k, T_{i+1}^k$ で表現できることを示している。各時刻と温度の関係を表にまとめると，表 6.1 のように記述できる。

表 6.1: 1次元非定常熱伝導の陽解法

	...	i-1	i	i+1	...
0		T_0	T_0	T_0	
...					
k		T_{i-1}^k	T_i^k	T_{i+1}^k	
k+1			T_i^{k+1}		

この表のイメージのまま，Excel の各セルに対応させて式を入力する。

Excel を使用した解析の手順について説明する.

手順 (1) : 定数の設定

各定数を, それぞれ, セル B1 からセル B3 に入力する.

ここで, $\Delta x^2 / 2\alpha \geq \Delta t$ の条件式を満たさないと, 発散する.

定数設定の入力を表 6.2 に示す.

表 6.2: 定数の設定

α	1			
Δt	0.5	$\Delta x^2 / 2\alpha$	0.5	
Δx	1			

手順 (2) : 初期条件の設定

時刻 0 における温度を, セル B5 からセル H5, セル B7 からセル H7 に入力する. 初期条件の設定を表 6.3 に示す (ここでは 20 を入力).

表 6.3: 初期条件の設定

α	1						
Δt	0.5						
Δx	1						
時刻 0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
k	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0

手順（3）：境界条件の設定

両壁面の温度を，セル B7, B8, H7, H8 に入力する．

境界条件の設定を表 6.4 に示す（ここでは 0）．

表 6.4:境界条件の設定

α	1						
Δt	0.5						
Δx	1						
時刻 0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
k	0.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	0.0
k+1	0.0						0.0

手順（4）：計算

セル C8 に，差分化した式を入力し，この式を，セル D8 からセル G8 までコピーする． $=\$B\$1*\$B\$2/\$B\$3^2*(B7+D7)-(1-2*\$B\$1*\$B\$2/\$B\$3^2)*C7$ ．

計算式の入力を表 6.5 に示す．

表 6.5:計算式の入力

α	1						
Δt	0.5						
Δx	1						
時刻 0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
k	0.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	0.0
k+1	0.0	10.0	20.0	20.0	20.0	10.0	0.0

手順（5）：繰り返し

セル C8 からセル G8 を選択してコピーし，セル C7 からセル G7 へ値を貼り付ける（[編集] → [形式を選択して貼り付け] → [値]）。

値を貼り付けると瞬時に計算が実行され，セル C8 からセル G8 に，次の時刻の結果が求まり，表示される。以降，この作業を繰り返すことにより，時刻を進めていくことができる。繰り返し作業の例を表 6.6 に示す。

表 6.6: 繰り返し作業の例

α	1						
Δt	0.5						
Δx	1						
時刻 0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
k	0.0	10.0	20.0	20.0	20.0	10.0	0.0
k+1	0.0	10.0	15.0	20.0	15.0	10.0	0.0

手順（5）：グラフの表示

セル B7 からセル H7 を選択し，グラフウィザードを用いて散布図を作成しておくとし，繰り返し計算を行うたびに，グラフの変化の様子をリアルタイムで確認することができる。

手順（7）：マクロ登録

（5）の作業をいちいち繰り返すのは大変である。そこで、一連の作業をマクロに登録し、キーを割り当てることで、キーを押すだけで時刻を進めることができる。

```
Sub Macro1 ()  
    Range("C8:G8").Select  
    Selection.Copy  
    Range("C7").Select  
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone,  
    SkipBlanks:= _  
        False, Transpose:=False  
End Sub
```

このように、**Excel** を用いると、セルに式を入力し、セルを選択してコピーするだけで瞬時にグラフや数値の変化を表示することができる。

6.4 シミュレーション実験

Excel の表計算機能を利用した解析においては、シート上のセルを格子点と見なし、そのセルの中に差分化した式を埋め込み、反復計算を実行する。したがって、Excel のシート上に物理モデルに対応したイメージで差分式を配置することが可能であり、内点や境界点に応じてセルの色分けなどを行うことによりプログラミングやデバッグを視覚的に容易に行うことができる。また反復計算が自動的に行われ、計算結果を直ちに図示して確認することもできる[12].

本研究では、“エクセルとマウスでできる熱流体のシミュレーション” [13] に紹介されている「アイコン化セル」を活用することで、Excel による熱流体シミュレーションを行う。アイコン化セルとは、基礎方程式や境界条件などの差分式が予め埋め込まれ、かつその機能がビジュアルに表示されたセルのことである。図 6.1 にアイコン化セルを内点、境界点、発熱点、吸熱点などに分類して配置した例を示す。

6.4.1 実験環境

シミュレーション空間における温度変化の数値解析はすべて Excel 上で行う。時間経過による空間内の温度変化は Excel のマクロ機能を使用して、10 秒間隔で各点の温度変化を計算する。扇風機の稼働による風の流れと、それに伴う空間内の温度変化は Excel の他に UWSC[14]で再現した。UWSC は Windows 上での作業をマクロ化し、作業を自動化できるフリーソフトである。UWSC で空間内の風の流れと、それに伴う各セルの温度変化を再現し、同時に染色体の評価値計算、ソート、交叉による遺伝子の入れ替え、突然変異による遺伝子の値の変化など、次世代へ受け継ぐ過程を全て自動化した。

実験空間は 2 次元空間での熱の移動をシミュレートするものである。熱対流における対流セルの水平パターンは、実際の流体の空間スケールに関係なく、プラントル数とレイリー数の関係によって決定される。シミュレーション実験におけるプラントル数とレイリー数は、それぞれ $Pr=0.72$ (空気), $Ra=10000$ に設定した。

6.4.2 実験 1

実験 1 で使用したシミュレーション空間は、長方形の部屋の中央に 2 つの障害物があり、発熱点が 1 か所、吸熱点が 2 か所存在している。温度センサを 3 か所に配置し、扇風機を部屋の角の 2 か所に設置した。初期の室内温度は、扇風機を稼働させずに長時間経過した状態に固定した。実験における各センサの設定温度はセンサ A を 15°C 、センサ B を 25°C 、センサ C を 20°C と

した。実験 1 に使用したシミュレーション空間を図 6.2 示す。染色体の選択、扇風機への命令は 10 秒間隔に行い、1 分間に 6 回の頻度で行った。45 世代分、合計 60 分間システムを稼働させ、各センサの温度変化を調べた（扇風機の設置台数：2、1 世代に含まれる個体数：8）。各温度センサの温度変化のグラフを図 6.3(A)～(C)に示す。

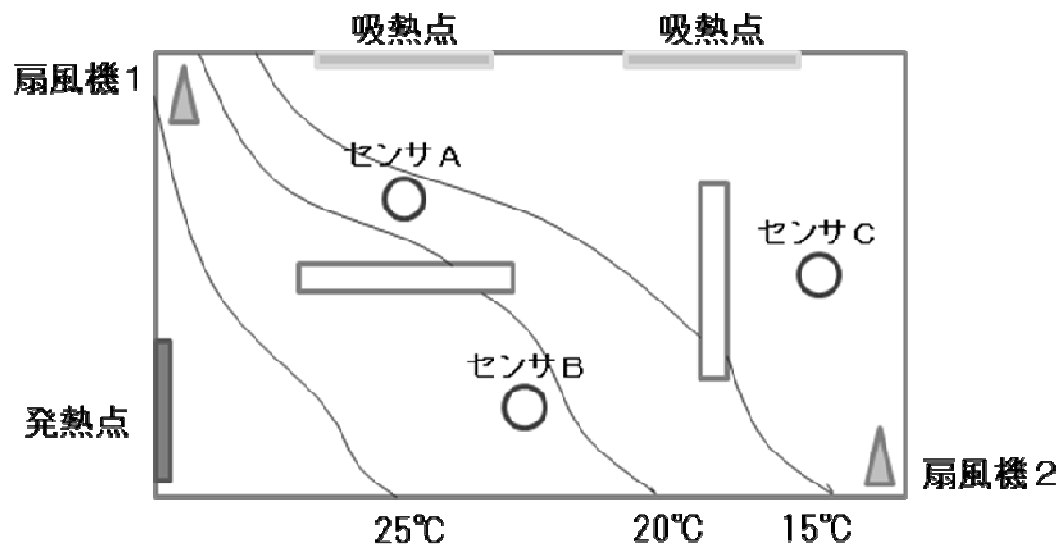


図 6.2: 実験 1 のシミュレーション空間

部屋のサイズ：10m×15m

発熱点の温度：30℃

吸熱点の温度：10℃

設定温度：センサ A 15℃，センサ B 25℃，センサ C 20℃

扇風機 1：首振り可能な角度 90 度，選択可能な風量の段階 3 段階

扇風機 2：首振り可能な角度 90 度，選択可能な風量の段階 3 段階

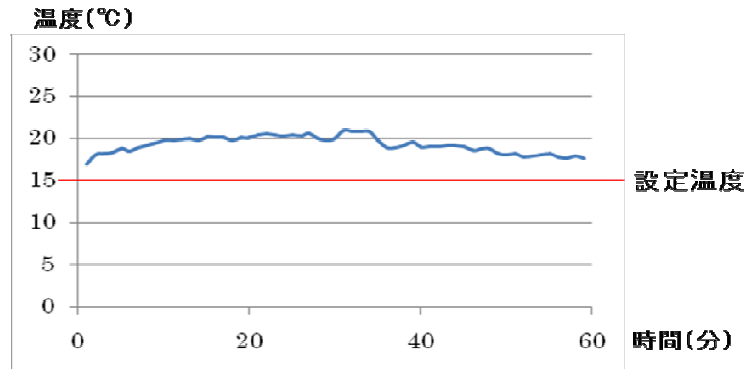


図 6.3(A): センサ A の温度変化

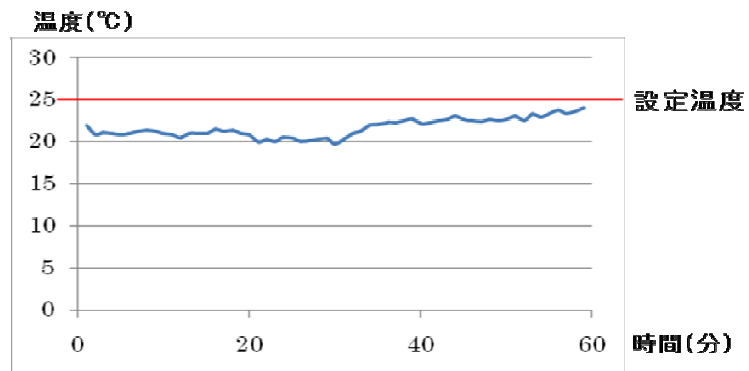


図 6.3(B): センサ B の温度変化

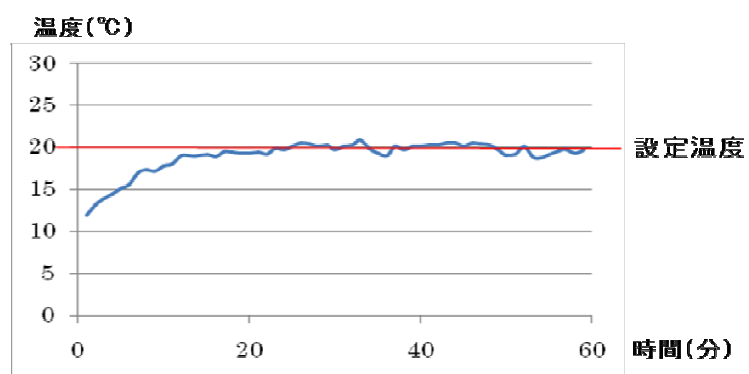


図 6.3(C): センサ C の温度変化

温度変化のグラフから、部屋全体の温度が 20°C 付近で均一化されてしまい、しばらくの間各センサ共に、温度変化が起きていない状態になっている。その原因として、システムを導入した空間の広さに対して、扇風機の稼働による風の影響が大きい場合に、扇風機の風の発生によって室内の温度が均一化されてしまうからだと考えられる。

このような利用者の要求とは異なるケースでの空間内の温度の均一化を避けるために、アルゴリズムに改良を加えた。改良を施したのは、初期個体の生成方法と、突然変異による遺伝子の値を変化させる部分である。改良前の初期個体の生成方法では、扇風機の稼働可能な範囲内の制御コードをランダムに生成していた。しかしこの場合、実験環境のように扇風機の風の影響が大きい空間にシステムが導入された時に、室内の温度が均一化してしまう問題がかなりの割合で生じてしまう。そのため、初期個体については、設置する扇風機の台数別に固定することにした。室内温度の均一化を防ぐため、生成される制御コードは稼働時間を短いものに、また、風量は一番弱い段階に固定した。

初期個体をあらかじめ扇風機の風が及ぼす影響の少ないものに限定していても、突然変異による遺伝子の値の変化によって、すぐに影響の大きい染色体が生まれてきては意味がない。そこで、世代数によって扇風機の稼働時間と風量に上限を設定し、徐々に稼働時間の長いものや、風量の強い染色体を生成するようにアルゴリズムに変更を加えた。以上の2点について、アルゴリズムを変更し再度同じ環境下で実験を行った結果を図 6.4(A)~(C)に示す。

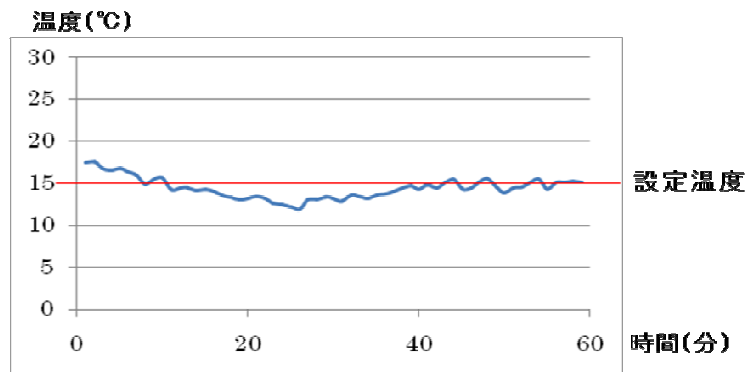


図 6.4(A): センサ A の温度変化

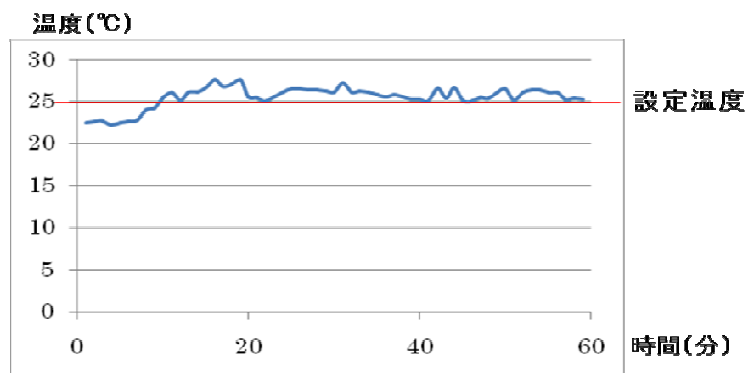


図 6.4(B): センサ B の温度変化

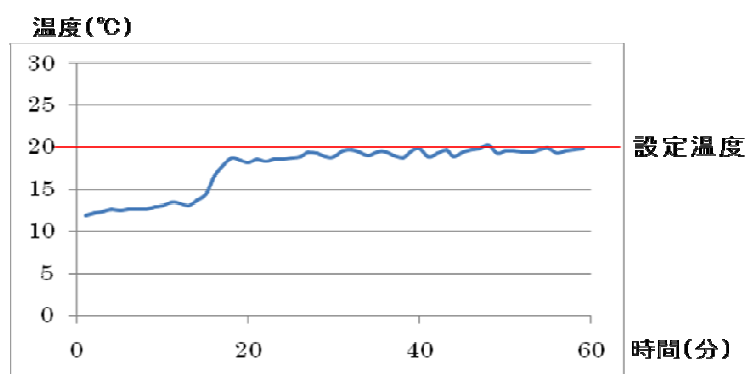


図 6.4(C): センサ C の温度変化

改良を行ったアルゴリズムの実験では、温度が均一化することなく、各センサの観測温度を設定温度に近づけることに成功した。システム導入後 20 分が経過、およそ 15 世代を過ぎたあたりで、全ての温度センサの観測温度が設定温度に収束していることがわかる。また、収束までに観測温度が設定温度付近に収束した後も、稀に設定温度から大きく離れるような稼働命令が発行されていることがわかる。これは遺伝子の値が突然変異の操作によって、一定の確率で変化し続けるために起きていると考えられる。

6.4.3 実験 2

以下の実験では、扇風機の風が空間に及ぼす影響の比較的少ない空間においてシミュレーションを行った。具体的には扇風機の風量に対して、部屋が広いケースを考える。実験 2 に用いたシミュレーション空間を図 6.5 に示す。

シミュレーション空間は、長方形の部屋に 1 枚の壁があり、壁を挟んだ左右の空間にそれぞれ発熱点と吸熱点が存在している。そのため、何もしない状態では、左右の空間における温度差はかなり大きくなっている。この空間の 2 か所に温度センサを配置し、扇風機を 3 か所に設置した。利用者の要求は左右の空間の温度を均一にするというもので、そのためにセンサ A とセンサ B の設定温度は、両方とも 20°C にした。実験 1 と同様、扇風機への命令は 10 秒間隔に行い、1 分間に 6 回の頻度で行った。45 世代分、合計 90 分間システムを稼働させ、各センサの温度変化を調べた（扇風機の設置台数：3、1 世代に含まれる個体数：12）。各温度センサの温度変化を図 6.6(A), (B) に示す。

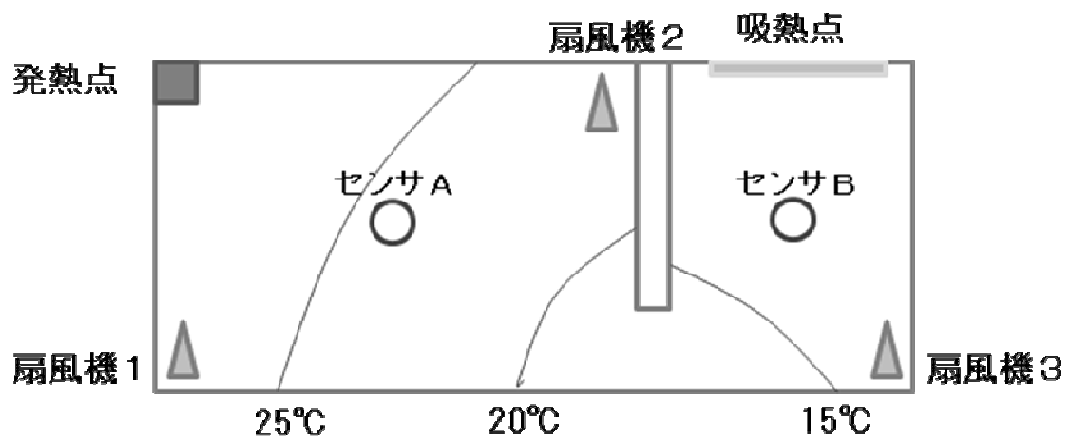


図 6.5: 実験 2 のシミュレーション空間

部屋のサイズ : 10m×20m

発熱点の温度 : 30°C

吸熱点の温度 : 10°C

設定温度 : センサ A 20°C, センサ B 20°C

扇風機 1 : 首振り可能な角度 90 度, 選択可能な風量の段階 2 段階

扇風機 2 : 首振り可能な角度 90 度, 選択可能な風量の段階 2 段階

扇風機 3 : 首振り可能な角度 90 度, 選択可能な風量の段階 2 段階

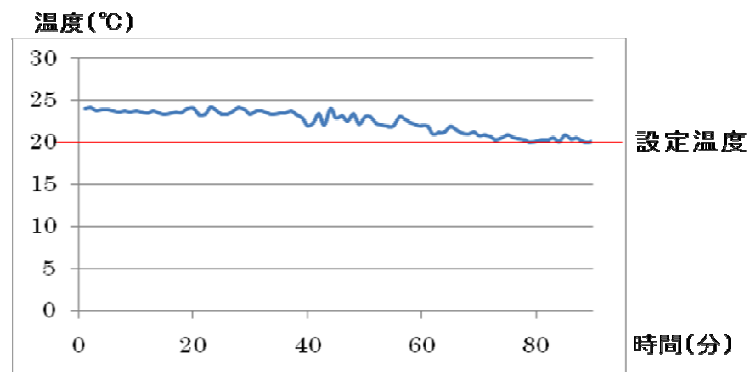


図 6.6(A): センサ A の温度変化

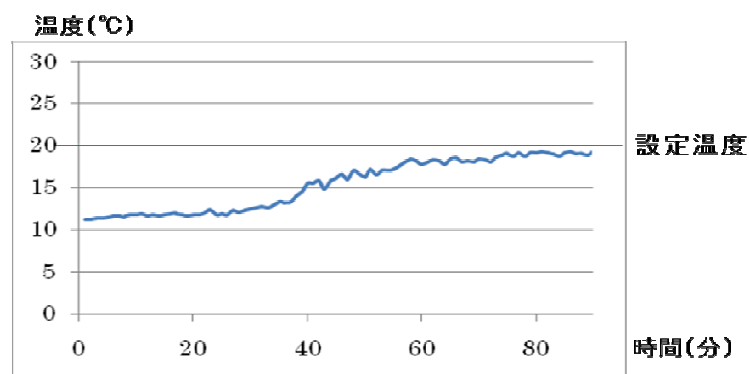


図 6.6(B): センサ B の温度変化

実験 2 で使用したシミュレーション空間の場合、扇風機 1 を扇風機 3 の方向に強めの風量で長時間稼働させさせなければ、センサ B の場所の温度を上げることができない。すなわち、そのような命令コードを持つ染色体が生まれなければ、いつまでもセンサ B の観測温度を高めることができない。実験では、世代数が 10 を超えた辺りから、扇風機 1 を扇風機 3 の方向へ長時間風を送る染色体が生成されはじめていた。この染色体はその後しばらくの間、

その世代で最も評価値が高い染色体として、そのまま後世へ残されている。しかし、適用アルゴリズムでは、各世代で最も評価値の高い染色体は変更されることが無いと同時に、遺伝子入れ替えなどの対象からも外れてしまう。そのため、また新たに扇風機1を扇風機3の方向へ長時間風を送る染色体が生成されるのを待たなければならない。

以上の実験結果を踏まえて、観測温度が設定温度に収束するまでの時間が短縮されるように、アルゴリズムに改良を施した。各世代で最も評価値の高かった染色体の複製を作成し、それらを交叉や突然変異の対象に加えることで、偶発的な染色体の生成に頼り切ることを避けることにした。改良後の次世代へ受け継がれる過程を図6.7に示す。

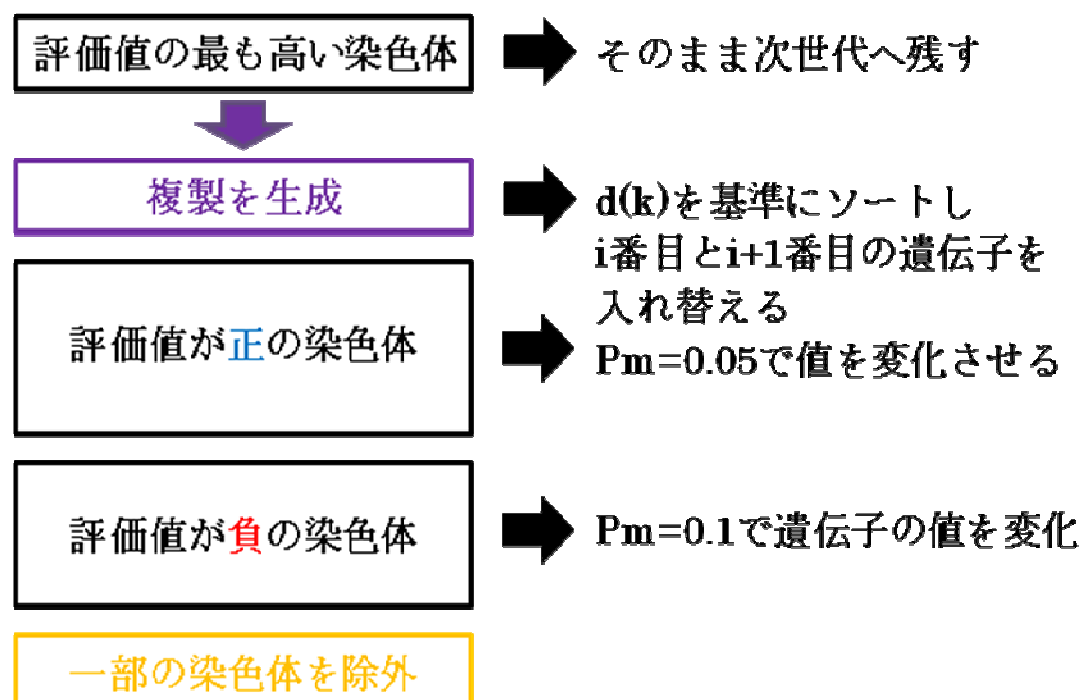


図 6.7: 改良後の次世代へ受け継がれる過程

6.4.4 実験3

以下の実験では、発熱点が多数存在する空間を作成し、シミュレーション実験を行った。またシミュレーション空間には、ランダムにドアの開閉が行われ、熱の移動が不定期に起こる要素も取り入れた。実験3に使用したシミュレーション空間を図6.8に示す。

シミュレーション空間は、参考文献[3]で取り上げられているネットワーク機器室の配置図を参考にして、その部屋を再現したものである。部屋には温度を下げるためのエアコンが1台設置されており、窓からは一定の熱が侵入してくる。ラック群A~Dにはそれぞれ複数の計算機が置かれている。ラック群A~Dの熱量は文献を参考に、それぞれA:1,920[cal/h], B:5,290[cal/h], C:5,520 [cal/h], D:1,750 [cal/h]とした。部屋にある2つのドアは、ランダムな間隔で開閉され、その都度暖かい空気が侵入してくる。この部屋に扇風機2台と温度センサ4つを設置し、部屋全体を可能な限り低温に保つように、すべての温度センサの設定温度を15°Cとした。実験1,2と同様、扇風機への命令は10秒間隔で行い、90世代分、合計120分間システムを稼働させ、各センサの温度変化を調べた（扇風機の設置台数:2, 1世代に含まれる個体数:8）。各温度センサの温度変化のグラフを図6.9(A)~(D)に示す。

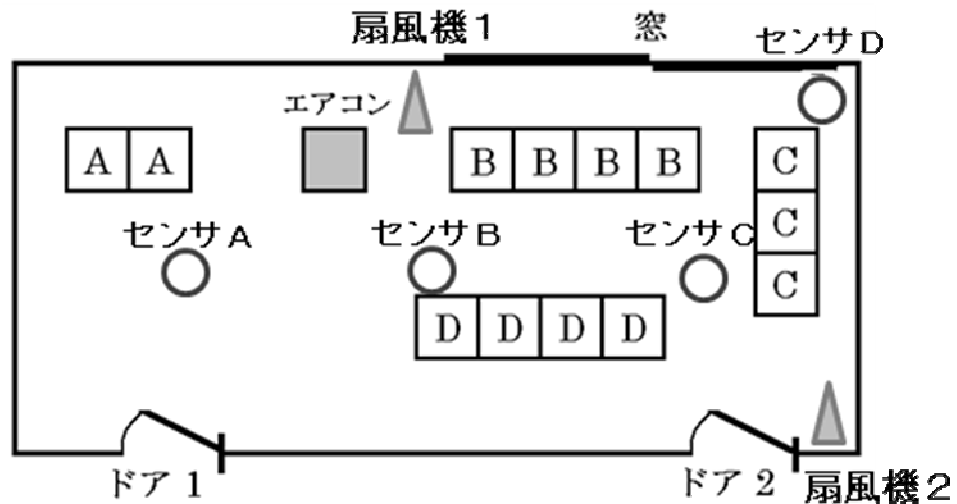


図 6.8: 実験 3 のシミュレーション空間

部屋のサイズ : 10m×20m

発熱点の温度 : 窓 30°C ドア 1 開放時 25°C ドア 2 開放時 25°C

吸熱点の温度 : エアコン 15°C

発熱点の熱量 : ラック群 A 1,920 [cal/h] ラック群 B 5,290 [cal/h]

ラック群 C 5,520 [cal/h] ラック群 D 1,750 [cal/h]

設定温度 : センサ A 15°C, センサ B 15°C, センサ C 15°C, センサ D 15°C

扇風機 1 : 首振り可能な角度 180 度, 選択可能な風量の段階 3 段階

扇風機 2 : 首振り可能な角度 90 度, 選択可能な風量の段階 3 段階

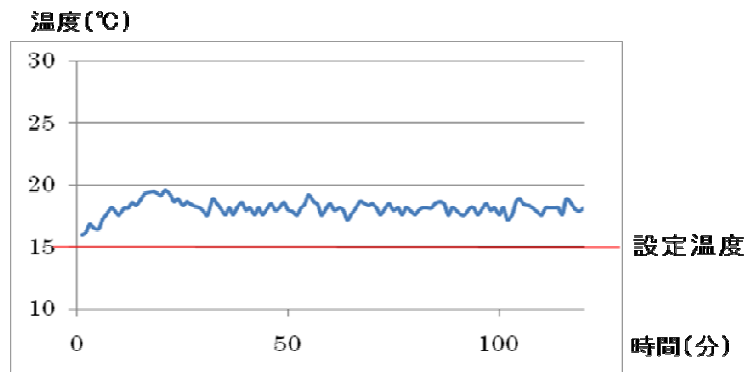


図 6.9(A): センサ A の温度変化

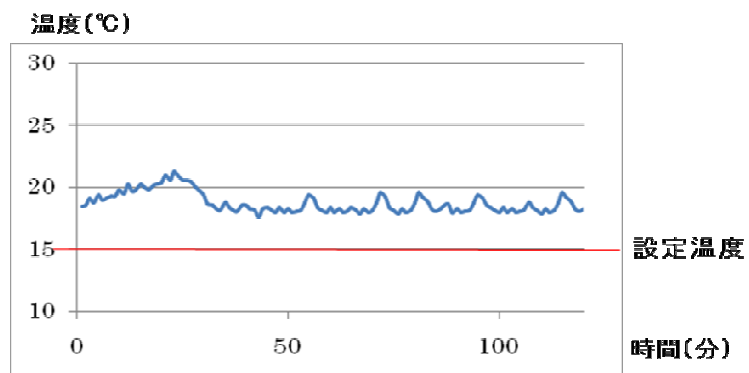


図 6.9(B): センサ B の温度変化

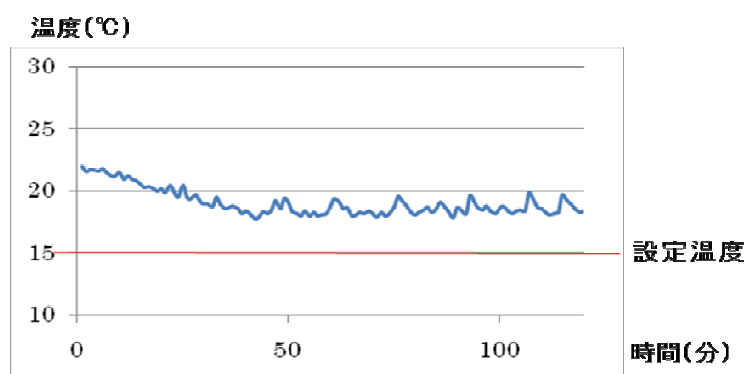


図 6.9(C): センサ C の温度変化

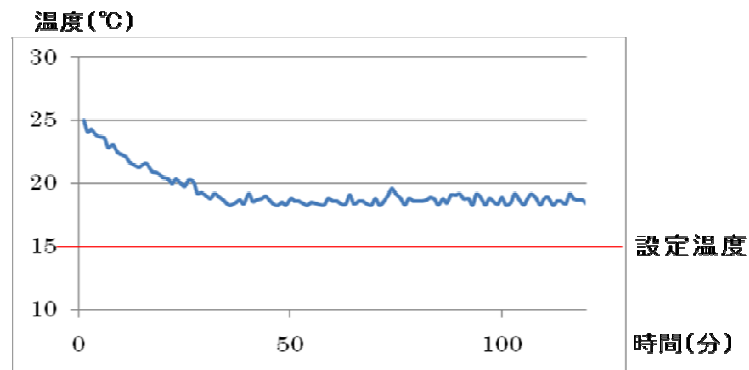


図 6.9(D): センサ D の温度変化

一時的にセンサの温度が上昇しているのは、ドアの開閉により、ランダムに熱が発生するためである。システムを導入してから 40 分、世代数が 30 を超えた辺りから温度センサの観測温度が均一化され、ランダムな熱にも対応し、温度制御を行えていることがわかる。温度の均一後に生成された染色体を見てみると、強い風量で長時間扇風機を稼働させるような染色体ばかりが残されているわけではなく、部屋の空気が循環するような 2 台の扇風機を同時に動かす染色体が多く存在していた。

以上の実験結果から、ある程度の不規則な熱が発生した場合についても、それらの熱に対応し、室内の温度を均一に保つことができていることがわかる。また、観測温度を均一にすることを目的として利用者が設定温度を入力した場合にも、扇風機を常に動かし続けるような制御を行うのではなく、空気が効率良く循環するような制御方法を選択することが可能であることがわかった。

第7章

実世界での実験

この章では、シミュレーション実験の結果を受けて改良したアルゴリズムを適用した実世界での実験について述べる。

7.1 実験方法

実験は電気通信大学 IS 棟 6 階 628 号室の多田研究室内で行った。研究室に扇風機を 3 台設置し、温度センサを 4 か所に配置した。実験に使用する温度センサにはみはるぞう[15]を採用した。みはるぞうは、設置が簡単な小型無線センサで、受信機とパソコンは USB で接続することができる。センサの無線送信距離は 5m～25m で、 -20°C ～ 55°C の範囲の温度を 0.0625°C 単位で測定可能である。温度センサの配置場所はすべて床上 30cm に統一した。実験に使用した 3 台の扇風機は、YAMAZEN スリムファン TRI-BH82, Apice TOWER FAN AFC-110RI, ZEPEAL タワー扇 DAT-3161R である。扇風機の種類にスリムファンを選択した理由として、風向調節の回転を考慮に入れた扇風機の配置に必要な面積が少なく済む点と、直線的に狭い幅で風を送ることが可能な点が挙げられる。計算機から各扇風機へ稼働命令を送る方法として、学習機能付きマルチリモコンクロッサム 2+USB[16]を使用する方法が

ある。クロッサム 2+USB は、11 社 39 種の家電リモコンの信号を内蔵し、最大 246 通りの家電機器の信号を操作することができる学習リモコンである。また、USB インタフェースを搭載しているため、計算機と接続して付属のソフトウェアを利用することで、各扇風機へ命令を送ることが可能となる。しかし、本研究の実験に使用する際には、いくつかの問題点が存在する。

まず、扇風機の仕様により、電源が入っている状態でないと風向を調節出来ないという点である。これは扇風機の風向を変えるために、首振りの命令を送る際に起きる問題で、扇風機が稼働状態、すなわち風を送っている状態でないと首振り命令を受け付けないという問題である。つまり、風向を調節してから風を送る、という命令が行えず、扇風機は風を送りながら向きを変えなければならないことになる。本システムが発行する命令は、1 台の扇風機は 1 方向へ風を送る、ということを前提としているため、アルゴリズムの性能評価を行う実験としては都合が悪い。

もうひとつの問題点は、計算機からの命令を扇風機が受信出来たかどうかの判断が、計算機側から行えない点にある。扇風機の赤外線を受信可能な角度は、現在の扇風機が向いている角度によって変化する。クロッサム 2+USB の赤外線照射角度はリモコン信号発光部より最大 30 度であるため、全ての扇風機へ安定して命令を送信し続けることは難しい。一度でも命令の受信がうまくいかなかった場合、命令と扇風機の稼働が一致しない状態になる。

そのため、本研究における実世界での実験では、扇風機への命令は人の手で扇風機の風向や風量の調節を行い、動作を確認しながら行うことにした。

実験に使用した温度センサみはるぞうと、3 台の扇風機 TRI-BH82, AFC-110RI, DAT-3161R を図 7.1~7.4 に示す。



図 7.1:みはるぞう
(参考文献[15]より引用)



図 7.2:TRI-BH82



図 7.3:AFC-110RI



図 7.4:DAT-3161R

実験の前準備として、4日間研究室内の各所に温度センサを配置し、温度変化のデータを取った。実験に際して、研究室内に配置した温度センサと扇風機の位置を図 7.5 に示す。配置した温度センサ A~D の午前 9 時~正午 12 時まで温度変化を調べ、データを取った 4 日間の平均温度を図 7.6 に示す。

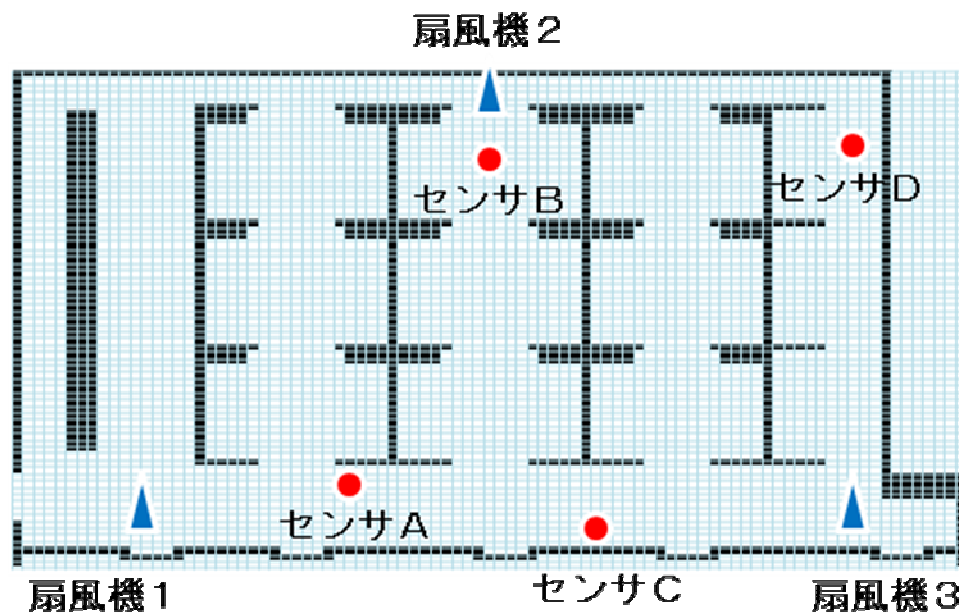


図 7.5: センサと扇風機の配置個所

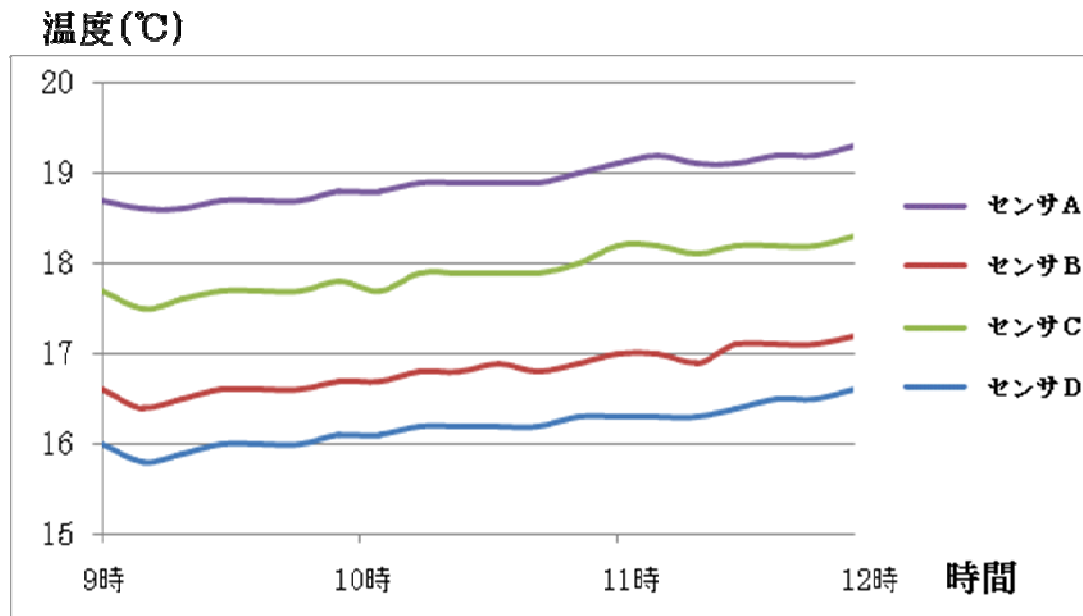


図 7.6: 4 日間の平均温度のグラフ

7.2 実験1

普段何もしない状態で、常に観測温度が一番低かったセンサの温度を、本システムを導入することで高めることが可能かどうかの実験を行った。4日間のデータを基に、常に観測温度が一番低かったセンサ D の観測温度を高めるために、センサ D の設定温度を 20°C にし、他のセンサには設定温度を入力しない状態でシステムを稼働させた。扇風機への命令は 30 秒間隔で行い、20 世代分、午前 10 時から正午 12 時までの 2 時間の間稼働させ、各センサの温度変化を計測した（扇風機の設置台数：3，1 世代に含まれる個体数：12）。実験 1 におけるシステム導入時の研究室内の温度変化のグラフを図 7.7 に示す。

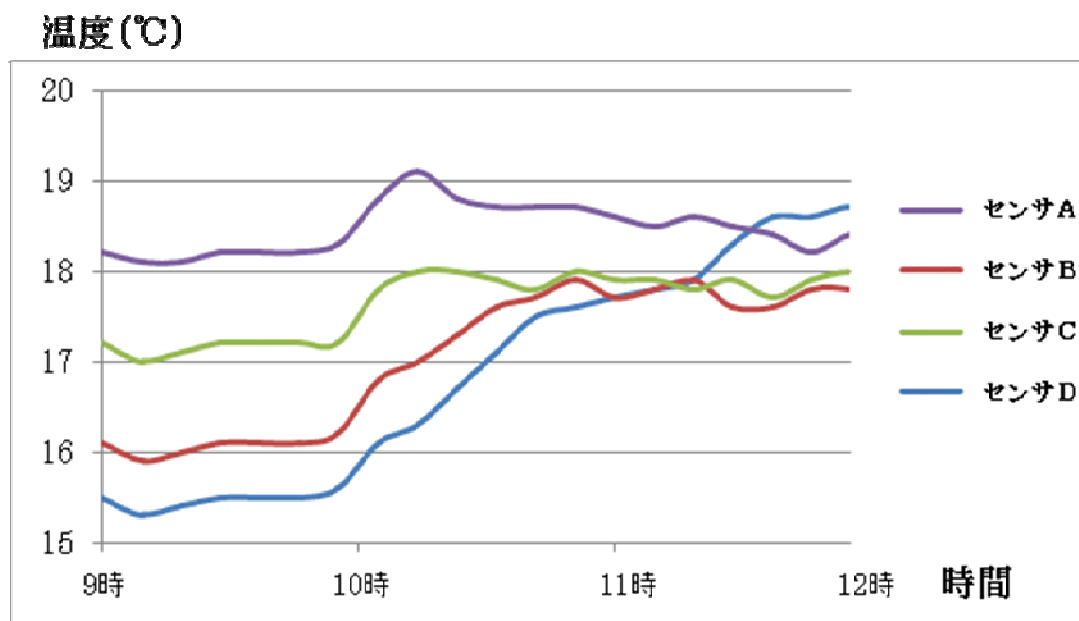


図 7.7: 実験 1 における研究室内の温度変化

扇風機への命令を 30 秒間隔にしたのは、温度変化をセンサが感知し、計算機に送信するまでにかかる時間を考慮してのことである。この時間はセンサが温度変化を感知する精度と、計算機と通信を行う頻度によって短縮することが可能であると考えられる。本研究の実験では、使用した温度センサの精度と通信頻度の関係から、扇風機へ命令を送信する間隔を 30 秒に固定した。

温度変化のグラフから、システムの導入直後に、各温度センサの観測温度が軒並み上昇していることがわかる。これは、研究室内の空調機器が天井に備え付けられていることが関係している。扇風機の稼働により研究室内の空気が循環することで、天井付近に固まっていた暖気が部屋全体に広がったためだと考えられる。一様に全てのセンサの観測温度が上昇した後、センサ B、センサ C、センサ D の観測温度が 18°C 付近に収束し、しばらくの間大きな温度変化が見られない状態が続いている。その後 30 分くらい経過した辺りから収束を抜け出し、センサ D の観測温度が上昇しているのがわかる。最終的に、システム導入後、約 90 分が経過した時点で、設置した 4 か所の温度センサの中で、センサ D の観測温度を最も高くすることに成功した。また、その後もセンサ D の観測温度が最も高い状態を維持することができた。

7.3 実験 2

実験 2 では、観測温度が比較的高かった 2 か所、センサ A とセンサ C、反対に観測温度が比較的低かった 2 か所、センサ B とセンサ D の合計 4 か所の温度センサに設定温度を入力し、実験を行った。実験 2 における各温度センサに設けた設定温度を表 7.1 に示す。

表 7.1: 実験 2 における各温度センサの設定温度

	設定温度
センサ A	15
センサ B	20
センサ C	15
センサ D	20

設定温度は、何もしない状態で観測温度の高い点の温度は低く、逆に普段の観測温度が低い点は温度を高くするように設定した。実験 2 におけるシステム導入後の研究室内の温度変化の結果を図 7.8 に示す。

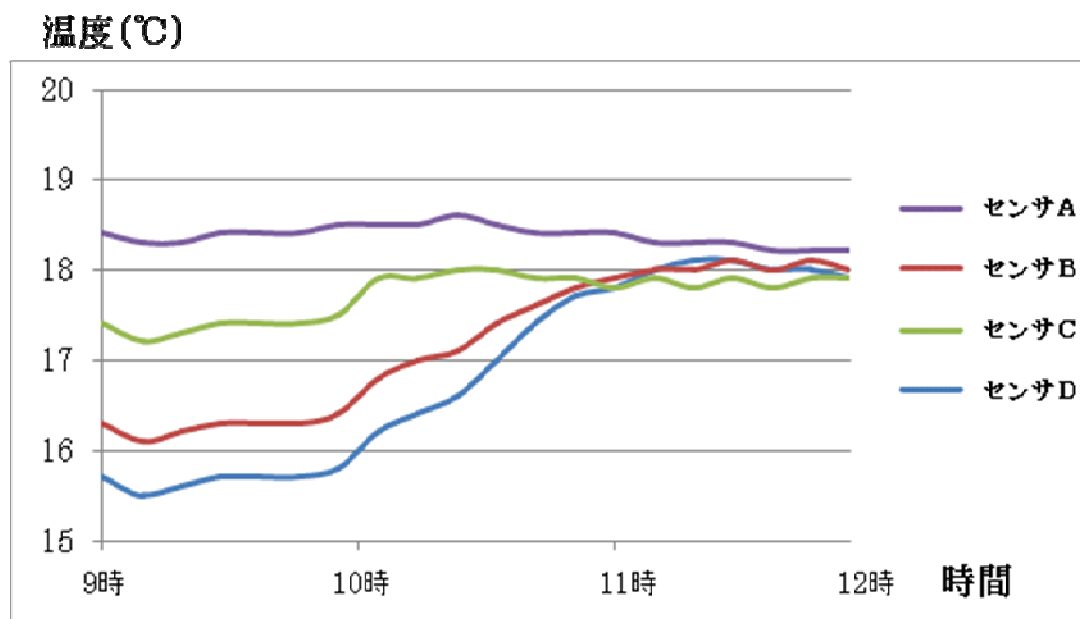


図 7.8: 実験 2 における研究室内の温度変化

実験 1 と同様，扇風機への命令は 30 秒間隔で行い，20 世代分，午前 10 時から正午 12 時までの 2 時間システムを稼働させ，各センサの温度変化を計測した（扇風機の設置台数：3，1 世代に含まれる個体数：12）。

温度変化のグラフからわかるように，システム導入後に扇風機が稼働することで，実験 1 と同様，全ての温度センサの観測温度が全体的に上昇している。その後，センサ B とセンサ D の温度が上がっていき，11 時の時点でセンサ C とほぼ同じ温度にまで上昇している。しかし，設定温度を 15°C にしたセンサ A とセンサ C については，最後まで温度が下がることは無かった。結果として設定温度を入力した 4 つの温度センサの観測温度を均一化するに留まった。

期待した実験結果が得られなかった理由として，研究室内に明確な吸熱点が無かったことが考えられる。扇風機 2 が設置されている面，窓際付近の温度は 4 日間のデータからも，比較的温度が低いことがわかる。しかし，システムを導入し，一旦温度が上がってしまうとなかなか温度が下がらないことが実験結果から推測できる。つまり，長い時間をかければ温度を下げるができるが，その場所を利用して室内の温度を下げる制御を行うには，吸熱点としては力不足だったと考えられる。

第8章

関連研究

この章では、既存の遺伝的アルゴリズムの適用に関する研究や、空調機器以外による室温制御を目的とした研究について述べる。

8.1 遺伝的アルゴリズムの適用に関する研究

システムに遺伝的アルゴリズムを適用する研究は、数多くの分野で行われており、確かな結果を得ている研究も多く見られる。ここでは、そうした研究の中から本研究に関連した研究について述べる。まず、センサから情報を受け取り、システムの制御プログラムの学習に遺伝的アルゴリズムを適用している研究について述べ、次に、多目的最適化のために遺伝的アルゴリズムを適用し、軸や角度の調節を試みた研究について述べる。

8.1.1 Using Cyclic Genetic Algorithms to Evolve Multi-Loop Control Programs

Using Cyclic Genetic Algorithms to Evolve Multi-Loop Control Programs[17]は、遺伝的アルゴリズムをロボットの制御プログラムに適用し

た研究である。研究で実験の題材となったロボットには、2つのモーターと2つの光センサが取り付けられている。ロボットには障害物の置かれたエリアを光源にもしくは壁に当たるまで進め、という命令が与えられる。ロボットは左右に取り付けられたモーターで回転、前進、後退の動作を行う。ロボットには光源における光の強さを100%として認識させ、取り付けられている左右の光センサの値から光源の角度を計算させる。光センサからの入力データを基に障害物を避けながら光源の場所を発見するために、左右のモーターへの命令プログラムの学習に遺伝的アルゴリズムを適用している。実験はまずシミュレーションを行い、アルゴリズムの性能がどの程度障害物の配置に依存しているのかを検証した。その後、実際のロボットで実験を行い、光源を見つけるまでに要した時間結果の推移などについてまとめている。

8.1.2 遺伝的アルゴリズムを用いた多目的光軸自動調整システムの研究開発

遺伝的アルゴリズムを用いた多目的光軸自動調整システムの研究開発[18]では、遺伝的アルゴリズムを用いた多目的光軸自動調整手法を提案し、自動調整システムを開発することによりその有効性を検証している。レーザシステムの光軸調整には μm 単位での精度が要求される。そのうえ、トレードオフの関係が成り立っている複数の目的を満足する必要があるため、人手による調整では非常に時間がかかってしまう。この問題を解決するために、遺伝的アルゴリズムを用いた多目的最適化手法による光軸の自動調整システムを開発した。実験の結果、従来は難しかった光軸の位置と角度を短時間で同時

に自動調整することができた。

8.2 空調機器以外による室温制御の研究

一般的に温度制御システムはクーラーや暖房機などの温度調節機器を利用し、室内温度を制御することが多いが、快適性と省エネルギーの観点から、温度調節機器のみの制御に頼らずに、快適な環境を目指す研究も行われている。ここでは、そうした空調機器以外の方法で室温の制御を目的とした研究について述べる。

8.2.1 高層オフィスビルにおける自然換気利用に関する研究

高層オフィスビルにおける自然換気利用に関する研究[19]は、タスク空調として手動制御が可能な床吹出し空調、アンビエント空調として天井吹出し空調を採用しているオフィスを対象に、自然換気利用の空調システムを提案し、従来の空調システムとの比較を行った研究である。高層オフィスビルの外部を流れる風向をパラメータとした自然換気利用時の室内の気流シミュレーションと実際の測定を行い、自然換気効果の比較を行った。

第9章

まとめ

本研究では、温度センサと扇風機を用いることで、効率的な温度調節が可能となる室温の温度制御システムを提案し、実装した。提案システムは、金銭面や導入時に必要となる設計や設定のコストの関係で温度制御システムを導入できなかった環境にも、気軽に導入してもらえそうなシステムを目指して設計した。そのため、利用者によるシステムに関する設計や設定を行う手間を極力減らすことを目的に、部屋の形状やセンサの設置場所といった、空間情報の入力は一切必要ないシステムを開発した。本システムは扇風機の稼働による室内の温度変化をフィードバックし、動的に扇風機の制御方法を変えることで温度制御を行う。そのシステムの制御方法の学習には進化型計算を適用することで、扇風機の風向や風量を動的に変化させながら室内温度の変化に対応していく仕組みを構築した。

本研究では、適用アルゴリズムの性能評価とアルゴリズムの改良を目的として、様々な環境でシミュレーション実験を行った。そして、シミュレーション実験の結果を踏まえ、改良したアルゴリズムをシステムに実装し、実世界での実験を行った。実験結果から、部屋の一部の温度を優先的に上げたり、空間内の温度を均一にするといった利用者の要求に対して、一定の成果をあげることができた。

今後の課題として、センサの観測温度が設定温度に収束するまでに要する時間の短縮が挙げられる。そのためには2つの方法が考えられる。ひとつはアルゴリズムの初期個体の生成法や遺伝子の操作の最適化を行うこと。もうひとつは、提案したアルゴリズム以外の方法で制御方法を確立していく、新たなアルゴリズムを提案することなどが考えられる。

また、扇風機の制御だけでは利用者の要求する温度に近づけることの出来ない個所にセンサが配置されていた場合に、利用者に対して扇風機の位置の変更や、温度調節機器の稼働要求をシステムが通知する機能を追加することなどが考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたっては、たくさんの方々にお世話になりました。

まず、指導教員の多田好克先生には日頃から熱心なご指導を賜りました。さらに本研究のシステムについて、発想の段階からお付き合い頂きました。また、ご多忙中にもかかわらず論文の草稿を丁寧に読んで下さり、大変貴重なご意見を頂きました。また、研究を進めるにあたり、佐藤喬助教には貴重な助言をたくさん頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

また、本研究を行うことができたことは、研究方針や方法論について議論をし、共に研究生活を送ってきた多田研、村山研、小宮研の学生諸氏のおかげでもあります。この場を借りて、皆様方に心より感謝致します。

最後に、自分を応援し、支え続けてくれた両親と家族に感謝の意を捧げます。

参考文献

- [1] 矢野和男：“センサはWebを超える 省力化から知覚化へ”，情報処理，Vol. 48, No. 2, pp. 160-170, 2007
- [2] センサの話
<http://www.line.co.jp/senserbook/thermo/>
- [3] 大江将史：“空調障害との闘い”，UNIX MAGAZINE 2004. 9, pp. 82-92.
- [4] センサ生産実績調査研究報告書XIX
- [5] 日本電気株式会社(NEC)：“温度管理トレーサビリティシステム”，
<http://www.nec.co.jp/techrep/ja/journal/g06/n02/060219.html>
- [6] 豊中設計株式会社：“多点温度監視管理システム”，
<http://toyonakakeisou.com/01EC/09Temp/09Temp.htm>
- [7] 東芝テクノネットワーク株式会社：“マルチ空調システム”，
http://www.toshiba.co.jp/tcn/c_service/air/index_j.htm
- [8] 株式会社エーピーシー・ジャパン：“Environmental Management System”，
<http://www.apc.co.jp/products/netshelter/ems.html>
- [9] 松尾電器産業株式会社：“電子サーモスタット”，
http://www.matsuo-ele.com/products/category_055.html
- [10] 松本啓之亮：“知能システム工学入門”，コロナ社，2002.
- [11] 河村哲也：“流れシミュレーションの基礎！”，インデックス出版，2005.
- [12] 富村寿夫，平澤茂樹，羽田光明：“Excelの表計算機能を利用した数値計算プロセスの可視化”，可視化情報，Vol. 23, 2003.

- [13] 富村寿夫, 岩井裕, 大村高弘: “エクセルとマウスでできる熱流体のシミュレーション”, 丸善株式会社, 2005.
- [14] UWSC
<http://www.uwsc.info/>
- [15] シリコンリナックス株式会社: “みはるぞう”,
<http://www.si-linux.co.jp/index.php?MIHARUZO>
- [16] 株式会社スギヤマエレクトロン: “マルチリモコンクロッサム2+USB”,
<http://www.sugi-ele.co.jp/index.htm>
- [17] Parker G. and Georgescu R. “Using Cyclic Genetic Algorithms to Evolve Multi-Loop Control Programs,” The 2005 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2005), 2005.
- [18] 村田信治, 野里博和: “遺伝的アルゴリズムを用いた多目的光軸自動調整システムの研究開発”, 情報処理学会数理モデル化と問題解決研究会, No. 12, pp. 163-170, 2004.
- [19] 杭瀬真知子, 相良和伸: “高層オフィスビルにおける自然換気利用に関する研究”, 大阪大学大学院, 修士論文, 2005.