

博士論文

進化計算を用いた空気調和装置の  
制御器最適設計に関する研究

平成 28 年 2 月

小島 一 恭

岡山大学大学院  
自然科学研究科



# 内容概要

近年の電子技術の急速な進歩と電子部品の低価格化により、家電製品や携帯電話、自動車など、日常的に使用する民生機器において電子制御が導入され、センサ、アクチュエータの統合にはMPUが利用されることが一般的になっている。このようなシステムの制御器は高機能・高性能の利点がある反面、制御器設計が複雑で困難なものとなる傾向がある。例えば、障害物を回避しながら室内を清掃するロボットの制御系設計はこのようなシステムの一例といえる。制御器の設計者はロボットを構成するすべての資源に多くの注意を払いながら制御プログラムや制御回路を開発しなければならない。近年開発されるシステムの多くは、前述のロボットと同様に、多くのセンサ、アクチュエータで構成され、高性能化、高効率化の背後に、設計の自由度を増したことによる設計の困難さの問題を持ち合わせている。

一方、1950年代に起源を遡ることができる遺伝的アルゴリズムをはじめとする進化計算は、安価に高性能な計算機を入手しやすくなった1990年代後半より盛んに研究が行われるようになり、その単純なアルゴリズムと様々な問題へ適用可能であるという柔軟さから、工学分野だけでなく経済など多方面への応用が研究されてきた。工学では特に認識や最適化、機械学習などの分野への応用が多く試みられてきている。実問題への応用研究も盛んに行われ、特に遺伝的プログラミングを機運として自動プログラミングや進化ハードウェアなどの工業応用を目指した研究も盛んである。

本研究では、電子制御のための制御器の設計の支援を目的として、進化計算を応用して制御プログラムおよび制御回路の自動生成を行う制御器最適設計に関する研究を行う。本研究では特に制御対象として空調装置を取上げ、この装置への進化計算への応用を通じ(1)MPUが導入された組込みシステムの制御プログラムの自動生成および(2)制御器にComplex Programmable Logic Device (CPLD) やField Programmable Logic Array (FPGA) を利用したシステムにおいて、その制御回路を記述するハードウェア記述言語 (VHDL: Very high speed integrated circuit Hardware Description Language) を自動構成する方法について明らかにする。

進化計算を応用して制御プログラムや制御回路を自動構成する枠組みでは、適

用される制御対象のモデル化，適用する際の染色体と呼ばれるデータ構造，導出解の矛盾や得られる制御器のロバスト性などが問題となる．本論文では，これらの問題に対し，それぞれの対処方法を提案する．モデル化については，(1) グラフ理論をメカトロシステムの解析に適用することで簡易にシステムのモデル表現を行い解析するための方法，(2) ニューラルネットワークを用いたシステムのモデル化手法について検討する．制御プログラムおよび制御回路の自動構成の枠組みでは，(1)MPU を搭載した制御器を対象としたプログラム自動生成法，(2) 制御器を FPGA，CPLD とした場合の制御回路の自動構成法について述べる．

第 1 章で本研究の概要を述べ，第 2 章では進化計算の概略を述べるとともに，本研究で取り扱う制御器の基本事項を述べる．また，制御器設計への進化計算の応用の概要について述べる．第 3 章，第 4 章では進化計算の枠組みで使用するモデル化手法について検討する．進化計算を実際の設計に応用する場合には，モデル化は設計解を導出する際の計算負荷や得られた最適解を実機に搭載した場合のロバスト性に影響を及ぼすため，重要である．第 3 章ではグラフ理論を用いた方法，第 4 章ではニューラルネットによる方法を説明する．ロバスト性については後の章で進化計算の応用の説明とあわせて述べる．第 5 章，第 6 章では進化計算による制御器設計手法を 2 種類の制御器設計に応用する．すなわち ( 1 ) MPU を搭載した制御器を対象とした場合 ( 2 ) FPGA あるいは CPLD を搭載した制御器を対象とした場合のそれぞれについて制御器を自動生成する．いずれの場合もシミュレーションと実験を行い，本手法により得られる制御器の性能について検討する．ここでロバスト性についても検討する．第 7 章で本研究のまとめと今後の課題について述べる．

# 目次

第1章	緒論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的	2
1.3	本論文の構成	4
第2章	進化計算の概要	7
2.1	進化計算の概要	7
第3章	モデル化手法の検討 1	
	グラフ理論を用いた熱流体系の解析	15
3.1	緒言	15
3.2	グラフ理論を用いた熱流体系の解析	15
3.3	システムグラフの生成とカットセット方程式の導出	16
3.4	配管系への適用	26
3.5	本章のまとめ	28
第4章	モデル化手法の検討 2	
	ニューラルネットを用いた車室内の快適度予測	31
4.1	まえがき	31
4.2	平均予測温熱申告 (PMV)	32
4.3	実験モデル	33
4.4	ニューラルネットを用いた快適度推定	34
4.5	本章のまとめ	41
第5章	進化計算による	
	自動車用空調の制御器設計支援	47
5.1	まえがき	47
5.2	車室内空調実験システム	47
5.3	遺伝的アルゴリズムの概要	48
5.4	プログラム自動生成への適用	50

5.5	可変長染色体の成長抑制 . . . . .	53
5.6	染色体上のプログラムの実行 . . . . .	53
5.7	結 果 . . . . .	60
5.8	本章のまとめ . . . . .	62
<b>第 6 章</b>	<b>環境の不確実性を考慮した</b>	
	ロバストな制御回路用ハードウェア記述言語の自動構成	<b>71</b>
6.1	まえがき . . . . .	71
6.2	進化計算による制御器の自動構成 . . . . .	71
6.3	不確実環境の考慮と空調システムへの応用 . . . . .	82
6.4	本章のまとめ . . . . .	92
<b>第 7 章</b>	<b>結 論</b>	<b>93</b>
	謝 辞	<b>95</b>
	参考文献	<b>97</b>

# 関連発表論文

## 1. 学術論文誌

- 1-1 小島一恭，綿貫啓一，大滝英征，グラフ理論による熱流体系解析，日本機械学会論文集（C編），61巻，590号，pp.257-263（1995）。
- 1-2 小島一恭，綿貫啓一，伊藤榮信，大滝英征，自動車空調システムの制御プログラム自動生成，設計工学，37巻，1号，pp.35-42（2002）。
- 1-3 小島一恭，綿貫啓一，ニューラルネットを用いた車室内快適度の制御，設計工学，39巻，7号，pp.381-386（2004）。
- 1-4 小島一恭，綿貫啓一，予測快適度に基づく車室内空調制御プログラムの進化的自動構成，設計工学，40巻，5号，pp.255-262（2005）。
- 1-5 小島一恭，綿貫啓一，快適性の過渡変化を考慮した室内空調制御器の進化学習，ヒューマンインタフェース学会論文誌，8巻，4号，pp.497-507（2006）。
- 1-6 小島一恭，綿貫啓一，ハードウェア進化による制御器の設計支援（第1報，空調システムへの適用の枠組みと進化シミュレーション），設計工学，41巻，11号，pp.589-598（2006）。
- 1-7 K.Kojima and K.Watanuki, Automatic Generation of VHDL for Control Logic of Air-conditioning Using Evolutionary Computation, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.11,No.7, pp.817-824（2007）。

1-8 K.Kojima and K.Watanuki, Supporting Air-Conditioning Controller Design Using Evolutionary Computation, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.2, No.1, pp.108–118 (2008).

1-9 K.Kojima, Study on Sensor Fusion for Predicting Human's Thermal Comfort Accounting for Individual Differences by Using Neural Network, International Journal of Sensor Networks and Data Communications, Vol.1, pp.1–9 (2012).

## 2. 国際会議 会議録 (査読あり)

2-1 K. Kojima, S. Itoh, H. Ohtaki and K. Watanuki, An Estimate of Temperature in a Passenger Compartment by Numerical Simulation Using the Linear Graph Theory, SAE Technical Paper, 1999-01-1188, pp.1–4 (1999).

2-2 K.Kojima and K.Watanuki, A Support for Air-conditioning Controller Design Using Evolutionary Hardware, Proceedings of Joint 3rd International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 7th International Symposium on advanced Intelligent system, CD-ROM ISSN1880-3714, pp.2220–2225 (2006).

2-3 K.Kojima, K.Watanuki, Neural Network Model of Task Ambient conditioning System, JSME-KSME Joint International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology 2007 (ICMDT2007), D04 (2007) .

2-4 K.Kojima, K.Watanuki, Supporting VHDL Design for Air-Conditioning Controller Using Evolutionary Computation, Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control(IFAC'08), CD-ROM, pp.12318–12323 (2008).



- 2-5 K.Kojima, Prediction of Individual Thermal Sensation Using Unspecified Sensors in Sensor Networks, International Conference on Control, Automation and Systems 2008(ICCAS2008), pp.123–126 (2008) .
- 2-6 K.Kojima, VHDL Design Automation Using Evolutionary Computation, 2009 International Symposium on Industrial Electronics (IEEE ISIE 2009), pp.353–358 (2009).
- 2-7 K.Kojima, Study on Sensor Networks Correlated with Human’s Thermal Sensation, ICROS-SICE International Joint Conference 2009 (ICCAS-SICE 2009), pp.123–126 (2009) .
- 2-8 K.Kojima, Dynamic Modeling of Individual Thermal Comfort Correlated with Sensor Networks, Design Engineering Workshop 2009 (DEWS 2009), pp.1–4 (2009) .
- 2-9 K.Kojima, Study on Sensor Fusion for Detecting Human’s Thermal Comfort Considering of Individuals, Proceedings of 10th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2010), pp.1355–1360 (2010) .
- 2-10 K.Kojima, Sensor Network for Detecting Human’s Thermal Comfort Considering of Individuals, Proceedings of IEEE 2011 International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA2011), pp.1–6 (2011) .
- 2-11 K.Kojima, Emergent Functions of HDL-based Controller of Inverted Pendulum in Consideration for Disturbance, Proceedings of 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2011), pp.1352–1356 (2011) .
- 2-12 K.Kojima and T.Okumura, Predictive Modeling of Thermal Comfort Based on Relationship between Occupant’s Satisfaction and Thermal Aspects Using Sensor Network, Proceedings of 2012 ASME-ISPS /

- JSME-IIP Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2012), pp.416–418 (2012) .
- 2-13 K.Kojima, Automatic Generation of VHDL for Controller of Inverted Pendulum in Consideration of Robustness, Proceedings of SICE2012 SICE Annual Conference, pp.839–844 (2012) .
- 2-14 K.Kojima and T.Okumura, Effects of electromagnetic interferences on implantable cardiac pacemakers, Proceedings of 2013 IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2013), pp.59–62 (2013).
- 2-15 K.Kojima and T.Okumura, Bayesian network-based air-conditioning control considering of occupants requests, Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE 2014), ISBN 978-1-4799-1290-2, pp.73–74 (2014).
- 2-16 M.Sato, J.Kaneko and K.Kojima, Development of Pavement Surface Inspection System for Wheel Chair Comfortability, Proceedings of 2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2014), ISBN 978-1-4799-5144-4, pp. 219–220 (2014).
- 2-17 K.Kojima and T.Okumura, Controller Design for Air-conditioners Considering of Occupant 's Requests by using Bayesian Network, Proceedings of The 3rd International Conference on Design Engineering and Science (ICDES 2014), pp.58–62 (2014).
- 2-18 H.Taniue, J.Kaneko and K.Kojima, Development of Automatic Barrier Detection System for Wheelchair, Proceedings of 2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2015), pp.374–376 (2015).
3. 国際会議 会議録 (査読なし)

3-1 K.Kojima, Development of Sensor Networks for Predicting Individual Thermal Comfort, Proceedings of the 8th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS2011), pp.70–73 (2011).

#### 4. 学術講演会 講演論文集

4-1 綿貫啓一，大滝英征，小島一恭，石川義雄，熱流体系解析へのグラフ理論の適用，日本機械学会第70期通常総会講演会講演論文集，No.930-9，pp.405–407（1993）。

4-2 小島一恭，綿貫啓一，大滝英征，石川義雄，グラフ理論によるダクト系の熱流体解析，日本機械学会山梨講演会講演論文集，pp.33–35（1993）。

4-3 小島一恭，伊藤榮信，安立秀博，大滝英征，綿貫啓一，グラフ理論による車室内空調のための温度推定，自動車技術会1996年度秋季大会学術講演会前刷集，No.966，pp.109–112（1996）。

4-4 綿貫啓一，大滝英征，伊藤榮信，小島一恭，快適性を考慮した車室内空調制御法，日本機械学会関東支部ブロック合同講演会 98 浦和 講演論文集，No.980-1，pp.13–14（1998）。

4-5 綿貫啓一，鈴木祐子，大滝英征，伊藤榮信，小島一恭，車室内の独立温度制御，日本機械学会関東支部ブロック合同講演会 98 浦和 講演論文集，No.980-1，pp.15–16（1998）。

4-6 小島一恭，伊藤榮信，綿貫啓一，大滝英征，快適性を考慮した自動車用空調システムの設計支援，第18回設計シンポジウム講演論文集，pp.10–15（2000）。

4-7 小島一恭，綿貫啓一，ネットワーク型計測制御装置の自動車用空調実験システムへの応用，日本機械学会関東支部ブロック合同講演会 2003 桐生 講演論文集，No.030-2，pp.229–230（2003）。

- 4-8 小島一恭, 綿貫啓一, ニューラルネットを用いた自動車車室内の快適度予測, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会 2003 桐生 講演論文集, No.030-2, pp.231-232 (2003) .
- 4-9 小島一恭, 綿貫啓一, 快適性を考慮した自動車用空調システムの制御プログラム自動生成, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2003 論文集, pp.847-850 (2003) .
- 4-10 小島一恭, 綿貫啓一, 進化計算による車室内空調制御器のプログラム支援, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol.6, No.1, pp.105-110 (2004) .
- 4-11 小島一恭, 綿貫啓一, 進化計算による車室内空調制御器のプログラム支援, 電子情報通信学会技術研究報告書, Vol.103, No.587, pp.43-48 (2004) .
- 4-12 小島一恭, 綿貫啓一, 車室内空調の快適性を考慮したコントローラ設計手法, Design Symposium 2004 講演論文集, pp.315-320(2004).
- 4-13 小島一恭, 綿貫啓一, システム同定を用いた車室内空調の快適性を考慮した制御器設計支援, 日本機械学会 2004 年度年次大会講演論文集, Vol.4, No.04-1, pp.183-184 (2004).
- 4-14 小島一恭, 綿貫啓一, 実システムへの実装を考慮した室内空調制御器の機能創発, 日本設計工学会平成 16 年度秋季研究発表講演会講演論文集, pp.75-78 (2004).
- 4-15 小島一恭, 綿貫啓一, 温熱的静環境下における温冷感や快適感に及ぼす時間的・心理的影響, ヒューマンインタフェース学会ヒューマンインタフェースシンポジウム 2004 論文集, pp.891-894 (2004).
- 4-16 小島一恭, 綿貫啓一, 実システムでの実時間を考慮した室内空調制御器の進化的機能形成, 日本機械学会第 14 回設計工学・システム部門講

演会講演論文集, No.04-38, pp.380–383 (2004).

- 4-17 小島一恭, 綿貫啓一, 室内空調用コントローラの進化的自動設計と実装方法の検討, 第 39 回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集, pp.95–98 (2005).
- 4-18 小島一恭, 綿貫啓一, 進化型探索手法の空調制御系最適化問題への適用分類に関する研究, 日本機械学会第 15 回設計工学・システム部門講演会講演論文集, pp.39–42 (2005).
- 4-19 小島一恭, 綿貫啓一, ハードウェア進化による室内空調制御器の自動設計, 日本設計工学会平成 17 年度秋季研究発表講演会講演論文集, pp.81–84 (2005).
- 4-20 小島一恭, 綿貫啓一, ハードウェア進化による室内空調制御器の自動設計, 日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, pp.B303-1–B303-4 (2005).
- 4-21 小島一恭, 綿貫啓一, 車室内快適度同定と進化計算による快適度を考慮した空調制御器の最適化, 日本機械学会第 1 回埼玉ブロック大会 (講演会) 講演論文集, No.050-5, pp.189–190 (2005).
- 4-22 小島一恭, 綿貫啓一, ハードウェア進化による空調制御器の自動設計と実機実装, 第 40 回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集, pp.137–140 (2006).
- 4-23 小島一恭, 綿貫啓一, 進化計算を用いた V H D L の自動構成と空調制御器設計への適用, Design シンポジウム 2006 講演論文集, No.06-05, pp.101–104 (2006).
- 4-24 小島一恭, 綿貫啓一, 人間の動的な快適性を考慮した空調制御器の進化学習, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2006 講演論文集, CD-ROM ISSN 1345-0794, pp.1121–1124 (2006).

- 4-25 小島一恭，綿貫啓一，進化計算を用いた室内空調装置の制御ロジックの自動設計，第16回設計工学・システム部門講演会講演論文集，No.06-33 (2006)，pp.373-376。
- 4-26 小島一恭，綿貫啓一，GAによるVHDLの自動生成と空調制御器設計への応用，日本設計工学会平成18年度秋季大会研究発表講演会講演論文集，pp.149-152 (2006)。
- 4-27 岡野洋二，綿貫啓一，小島一恭，GAによる全面床吹出し方式タスク・アンビエント空調のためのコントローラの自動生成，日本機械学会関東支部ブロック合同講演会 2006 桐生 講演論文集，No.060-2，pp.187-188 (2006)。
- 4-28 小島一恭，綿貫啓一，人間の温熱的快適感の過渡応答とその予測方法，日本機械学会関東支部第13期通常総会講演論文集，No.070-1，pp.137-138 (2006)。
- 4-29 岡野洋二，綿貫啓一，小島一恭，全面床吹出し方式タスク・アンビエント空調の制御系の開発，日本機械学会関東支部第13期通常総会講演論文集，No.070-1，pp.475-476 (2006)。
- 4-30 小島一恭，綿貫啓一，進化計算によるハードウェア記述言語の自動生成，日本機械学会IIP 2007 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集，No.07-7，pp.185-188 (2006)。
- 4-31 小島一恭，綿貫啓一，人間の温熱的快適感の過渡応答とその予測方法，日本機械学会関東支部第13期総会講演会講演論文集，pp.137-138 (2007)。
- 4-32 岡野洋二，綿貫啓一，小島一恭，全面床吹出し方式タスク・アンビエント空調の制御系の開発，日本機械学会関東支部第13期総会講演会講演論文集，pp.475-476 (2007)。
- 4-33 小島一恭，綿貫啓一，進化計算によるハードウェア記述言語の自動生

成とその制御系設計への応用，日本機械学会 IIP2007 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集，No.07-7，pp.185–188 (2007) .

- 4-34 小島一恭，綿貫啓一，実験データに基づく室内快適度分布の過渡変化予測モデルの構築，第 41 回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集，pp.25–28 (2007) .
- 4-35 小島一恭，綿貫啓一，室内快適度予測と居住者への提示方法，第 50 回自動制御連合講演会講演論文集，pp.583–584 (2007) .
- 4-36 小島一恭，センサネットワークを用いた複数居住者の個別快適度予測，第 43 回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集，pp.61–64 (2009) .
- 4-37 小島一恭，外乱を考慮した HDL 記述の制御器の機能創発，日本機械学会第 21 回設計工学・システム部門講演会講演論文集，(2011) .
- 4-38 小島一恭，奥村高広，環境情報と機器操作履歴に基づく温熱環境下のデマンド予測，日本機械学会 2011 年度年次大会講演論文集，pp.1–4 (2011) .
- 4-39 小島一恭，奥村高広，センサネットワークを用いた個別快適度推定，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 (ROBOMECH2011) 講演論文集，pp.1–4 (2011) .
- 4-40 小島一恭，センサネットワークを用いた居住者の活動局面に応じた快適度推定，日本機械学会第 12 回機素潤滑設計部門講演講演論文集，pp.143–144 (2012) .
- 4-41 小島一恭，室内外の環境情報に基づく居住者の個人差を考慮した快適度推定，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 (ROBOMECH2012) 講演論文集，No.12-3, 1A1-S05, pp.1–4 (2012).
- 4-42 小島一恭，奥村高広，ベイジアンネットワークを用いた室内空調機器の操作予測，日本機械学会関東支部第 20 期総会・講演会講演論文集、

10810, pp.1-2 (2014).

4-43 小島一恭, 奥村高広, 環境センサ群を用いた温熱環境下の居住者の空調機器操作予測, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 (ROBOMECH2014), No.14-2, pp.1-2 (2014).

4-44 小島一恭, 奥村高広, Web スクレイピングによる温熱データと居住者の温冷感申告との関係性, 日本機械学会第 14 回機素潤滑設計部門講演会講演論文集, No.14-6, ISSN 1348-3919, pp.129-130 (2014).



# 目次

2.1	Flowchart of Genetic Algorithm . . . . .	9
2.2	Overview of Genetic Algorithm . . . . .	10
2.3	Tree . . . . .	10
2.4	Gmutation . . . . .	12
2.5	Ginversion . . . . .	12
2.6	Gcrossover . . . . .	12
3.1	System graph for thermal and fluid system . . . . .	17
3.2	Flow model . . . . .	20
3.3	Flow model . . . . .	21
3.4	System graph for thermal conduction . . . . .	21
3.5	System graph for heat transfer . . . . .	23
3.6	System graph for fluid system . . . . .	25
3.7	Model of Straight Pipe . . . . .	27
3.8	Simulation Result (Straight pipe) . . . . .	27
3.9	Model of Piping System . . . . .	28
3.10	Simulation Result (Node # 3) . . . . .	29
3.11	Simulation Result (Node # 9) . . . . .	29
4.1	Car air-conditioning model . . . . .	34
4.2	Neural network for car air-conditioning . . . . .	35
4.3	Procedure of our framework . . . . .	37
4.4	Data for training . . . . .	38
4.5	Estimation result #1 . . . . .	42
4.6	Estimation result #2 . . . . .	42
4.7	Estimation result #3 . . . . .	43
4.8	Estimation result #4 . . . . .	43
4.9	Estimation result #5 . . . . .	44
4.10	Mixdoor opening . . . . .	44

5.1	Experimental system . . . . .	48
5.2	Outline of Genetic Algorithm . . . . .	49
5.3	Program automatic generation procedure . . . . .	51
5.4	Chromosome structure . . . . .	52
5.5	IF-THEN statement . . . . .	56
5.6	Set value statement . . . . .	57
5.7	Chromosome structure and its program decoding . . . . .	58
5.8	Flowchart of program generation . . . . .	59
5.9	Neural networks . . . . .	61
5.10	Neural networks . . . . .	61
5.11	Transient change of PMV (simulation) . . . . .	63
5.12	Transient change of PMV (experiment) . . . . .	63
5.13	Control sequence of blower speed and mixdoor opening . . . . .	63
5.14	Initial program . . . . .	64
5.15a	Auto-generated program . . . . .	65
5.15b	Auto-generated program . . . . .	66
5.15c	Auto-generated program . . . . .	67
5.15d	Auto-generated program . . . . .	68
5.15e	Auto-generated program . . . . .	69
6.1	VHDL for simple logical circuit . . . . .	72
6.2	Xilinx XC9572 Architecture . . . . .	73
6.3	I/O assignment example . . . . .	74
6.4	Auto-generated VHDL . . . . .	75
6.5	Signal difinition at first locus . . . . .	76
6.6	Substitution . . . . .	77
6.7	If-then-else statement in process body . . . . .	78
6.8	Different length chromosomes . . . . .	80
6.9	Crossover . . . . .	81
6.10	Air-conditioning system . . . . .	82
6.11	Pin assignment for air-conditioning . . . . .	83
6.12	Control volume . . . . .	83
6.13	Heat load . . . . .	86
6.14	Simulation results 1 . . . . .	87
6.15	Simulation results 2 . . . . .	88
6.16	Auto-generated circuits . . . . .	90

6.17 Fitness . . . . .	91
------------------------	----

# 表 目 次

4.1	PMV Scale . . . . .	32
4.2	Control sequence . . . . .	38
5.1	Parameter A . . . . .	54
5.2	Parameter C . . . . .	54
5.3	Parameter D . . . . .	54
5.4	Parameter F . . . . .	54
5.5	Chromosome example . . . . .	55

# 第1章 緒論

## 1.1 本研究の背景

近年の電子技術の急速な進歩，加えて電子制御で必要となるセンサー，アクチュエータの高性能化，低価格化によって，多くのシステムに電子制御が導入されている．これにより，以前にも増してシステムの高性能化，エネルギー利用の高効率化が進展している．このような電子制御システムの制御器を設計する場合，設計者はセンサやアクチュエータ，マイクロプロセッサ（MPU: Micro Processor Unit）などの資源を有機的に結合する必要がある．

### 1.1.1 MPU による制御

近年では電子技術の急速な進歩により民生機器にもより多くのセンサ，アクチュエータが導入され，これらを統合するためのマイクロプロセッサ（MPU: Micro Processor Unit）が利用されることが一般的になってきている．このような MPU を使用したシステムの制御器では，その多機能・高性能の利点がある一方で，制御器設計が複雑，困難なものとなる傾向にある．例えば，障害物を回避しながら室内を清掃するロボットの制御系設計はこのようなシステムの一例といえる．制御器の設計者はロボットを構成するすべての資源に多くの注意を払いながら制御プログラムや制御回路を開発しなければならない．近年開発されるシステムの多くはこのようなロボットと同様に多くのセンサ，アクチュエータで構成され，高性能化，高効率化の背後に設計の自由度を増したことによる設計の困難さの問題をもつ．今日では家電製品や携帯電話，自動車など，日常的に使用する数多くの製品がこのようなシステムである．

### 1.1.2 進化計算の発展

進化計算は生物の進化過程に着想を得た最適化アルゴリズムの総称である．その歴史は1950年代まで遡ることができる．Box による乱数を用いた最適化手法，Fraser による genetic system[1]，Friedberg の進化のプログラム化，Bremermann

による遺伝的アルゴリズムの原型などがある [2]。当時は計算機は高価でかつ計算処理能力が十分ではなく、実用を目指した研究が育つまでに至らなかったが、その後の計算機の処理能力向上とともに 1960 年代に Fogel の進化的プログラミング [3]、1965 年に Rechenberg や Schwefel の進化戦略 [4]、1975 年に Holand の遺伝的アルゴリズム [5] が発表され主な進化計算の枠組みが揃うと、1990 年代に入ってから計算機の処理能力の著しい向上と計算機の低価格化も相まって、進化計算の研究が急速に活発化した。1990 年には Koza は遺伝的アルゴリズムの遺伝子構造を木構造としその構造にあわせた演算子を用意して遺伝的プログラミングとして遺伝的アルゴリズムのあらたな分野を形づくった [7, 8]。安価に高性能な計算機を入手しやすくなった 1990 年代後半より盛んに研究が行われるようになり、その単純なアルゴリズムと様々な問題へ適用可能であるという柔軟さから工学から経済まで幅広い分野への応用が研究されてきた。工学では特に認識や最適化、機械学習などの分野への応用が多く試みられている。実問題への応用研究も盛んに行われ、特に遺伝的プログラミングを機運として自動プログラミングや進化ハードウェアなどの工業応用を目指した研究も盛んである [9, 10, 11, 12, 13, 14]。

進化計算のメカニズムは、生殖、突然変異、遺伝子組換え、自然淘汰、適者生存という生物の進化過程に着想を得ている。最適化問題の解の候補群が生物の個体群の役割を果たし、コスト関数によってどの解が生き残るかを決定する。初期の個体群の中から生存した複数の個体で新たな個体群を形成することを世代交代と呼び、世代交代を繰り返すことで個体群の進化、すなわち解候補の最適化を行う。生存の適者選択を確率的にすることで、各世代の解候補群に含まれる解候補の多様性を維持し、大域探索を可能としている。進化計算は適応度関数にいかなる仮定も持たないため、あらゆるタイプの問題でうまく機能し、工学分野においても様々な応用がなされている。

## 1.2 本研究の目的

今日では、先述したとおり家電製品や自動車などの電子制御装置に MPU を組込み、ソフトウェアによって制御ロジックを構成することが一般になってきているが、一方で制御機器の構成が複雑化し、制御器設計は一層、困難さを増している。本研究では、このような制御器の設計を支援するため、進化計算を応用して制御プログラムおよび制御回路の自動生成を行う。本論文では特に制御対象として空調装置を取上げ、空調制御器への進化計算の応用を通じて、(1) MPU が導入された組込みシステムの制御プログラムの自動生成および (2) 制御器に Complex Programmable Logic Device (CPLD) や Field Programmable Logic Array (FPGA) を利用したシステムにおいて、その制御回路を記述するハード

ウェア記述言語 (HDL: Hardware Description Language) を自動構成する方法について詳述する。

進化計算を応用して制御プログラムや制御回路を自動構成する枠組みでは、適用される制御対象のモデル化、適用する際の染色体とよばれるデータ構造、導出解の矛盾や得られる制御器のロバスト性などが問題である。本論文では、これらの問題に対し、それぞれ幾つかの方法を提案する。モデル化については、(1) グラフ理論をメカトロシステムの解析に適用し簡易にシステムのモデル表現を行い解析するための方法、(2) ニューラルネットワークを用いたシステムのモデル化手法について検討する。制御プログラムおよび制御回路の自動構成の枠組みでは、(1)MPU を搭載した制御器を対象としたプログラム自動生成法、(2) 制御器を FPGA, CPLD とした場合の制御回路の自動構成法について述べる。

### 1.2.1 グラフ理論を用いた熱流体系の解析

進化計算を応用した制御系設計においてシステムの特性を評価する場合には、制御対象の系が熱流体系であるとしても系の概略特性を迅速・容易に把握できることが重要である。一般に有限要素法や有限差分法などの数値解法は計算格子の細かさに応じて高い精度の近似解が得られる反面、計算負荷が高く、進化計算による制御系設計における解析手法としては不適當である。そこで、グラフ理論の適用を図る。グラフ理論は対象とする系がブロック単位で構成されるものとし、そのブロック毎の接続を枝なる概念で結び、系全体の特性を誘導する。したがって、有限要素法などのように全領域にわたってメッシュを切る必要がなく、系の特性を迅速に把握する上で適した方法である。

本研究では、熱流体解析におけるシステムグラフの構成法、カットセット行列の導出法などを新たに提案し、そこから導きだされる結果と有限要素法により導かれる結果とを比較し、その妥当性を検討する。

### 1.2.2 ニューラルネットを用いた車室内の快適度予測

進化計算で使用する前章とは異なるモデル化手法としてニューラルネットによる方法について述べる。ここではモデル化の対象として自動車用空調を取り上げ、ニューラルネットを用いた車室内快適度の予測方法について詳述する。

本研究では、ニューラルネットを用いて既存の限られたセンサ情報から車室内の乗員付近の快適度を推定し、この値に基づき車室内快適度を制御する方法を検討する。

### 1.2.3 進化計算による自動車用空調の制御器設計支援

自動車のような周囲の環境が刻々と変化し、車室内環境も大きな変化を生じるような動的な環境に対応する制御プログラムを作成するためには、設計 試作 実験のプロセスを繰り返し行い、開発のための試行錯誤に多くの時間を費やさなければならない。また、自動車の開発サイクルが早くなるにつれ、開発・設計段階でのコンピュータ支援は必要不可欠なものになっているが、制御プログラムの開発においては、有効なコンピュータ支援ツールは見当たらない。そこで本研究では進化計算の一つである GA を応用して自動車用オートエアコンの制御プログラムを自動生成し、自動車用空調システムの制御プログラムの設計支援を行う手法について述べる。まず、快適性を考慮した自動車用空調システムのコントローラの自動生成に GA を応用する際の染色体コーディング方法と評価関数の設計について述べる。次に、評価関数内で用いた自動車室内の温度推定のためのニューラルネットワークについても述べる。さらに、GA により実験システムの制御プログラムを自動生成し、そのプログラムで実機を駆動して評価実験を行い、その結果を検討する。

### 1.2.4 環境の不確実性を考慮したロバストな制御回路用ハードウェア記述言語の自動構成

進化計算による制御器設計支援の方法を踏まえ、更に環境の不確実性を考慮した制御器の自動構成方法について検討する。このような制御器の設計を支援するため、制御器に Complex Programmable Logic Device (CPLD) を利用したシステムにおいて、その制御回路を記述するハードウェア記述言語 (VHDL) を進化計算により自動構成する。進化計算を適用し、制御プログラムや制御回路を自動構成する枠組みでは、従来より、局所解の問題に起因したロバスト性を欠く制御器が設計されることが問題となっている。本論文では、環境の不規則性を考慮したロバストな制御回路用 VHDL の自動構成方法について述べる。

## 1.3 本論文の構成

第 1 章で研究の概要を述べ、第 2 章では進化計算の概略を述べるとともに、本論文で取り扱う制御器の基本事項を述べる。また、制御器設計への進化計算の応用の概要について述べる。第 3 章、第 4 章では進化計算の枠組みで使用するモデル化手法について検討する。進化計算を実際の設計に応用する場合には、モデル化は設計解を導出する際の計算負荷や得られた最適解を実機に搭載した場合のロバ



スト性に影響を及ぼすため重要である。第3章ではグラフ理論を用いた方法、第4章ではニューラルネットによる方法を詳しく説明する。ロバスト性についてはあとの章で進化計算の応用の説明とあわせて述べる。第5章、第6章では進化計算による制御器設計を前節で述べた2種類の制御器設計に応用する。すなわち、(1) MPU を搭載した制御プログラムを対象とした場合、(2) FPGA あるいは CPLD を搭載した制御器を対象とした場合のそれぞれについて制御器を自動生成する。いずれの場合もシミュレーションと実験を行い、本手法により得られる制御器の性能について検討する。ここでロバスト性についても検討する。第7章で本論文のまとめと今後の課題について述べる。



## 第2章 進化計算の概要

### 2.1 進化計算の概要

#### 2.1.1 進化計算の概要

進化計算は生物の進化過程に着想を得た最適化アルゴリズムの総称である。進化計算，進化的計算，進化的アルゴリズム，進化戦略，進化的プログラミング，遺伝的アルゴリズム，遺伝的プログラミングなどの語はよく混同して用いられることがあるが，進化計算，進化的計算，進化的アルゴリズムはほぼ同義であり総称として用いられる。進化戦略，進化的プログラミング，遺伝的アルゴリズム，遺伝的プログラミングは生物の進化過程に着想を得た異なるアルゴリズムの名称である。本論文では「進化計算」の語を総称として用い、「進化計算」が「進化戦略」「進化的アルゴリズム」「遺伝的アルゴリズム」「遺伝的プログラミング」を包含することとしている。

進化計算は生物の進化過程に着想を得た最適化アルゴリズムの総称である。進化計算の歴史は1950年代まで遡ることができる。Boxによる乱数を用いた最適化手法，Fraserによるgenetic system[1]，Friedbergの進化のプログラム化，Bremmerrmannによる遺伝的アルゴリズムの原型などがある[2]。当時は計算機は高価でかつ計算処理能力が十分ではなく，実用を目指した研究が育つまでに至らなかったが，その後の計算機の処理能力向上とともに1960年代にFogelの進化的プログラミング[3]，1965年にRechenbergやSchwefelの進化戦略[4]，1975年にHolandの遺伝的アルゴリズム[5]が発表され主な進化計算の枠組みが揃うと，1990年代に入ってから計算機の処理能力の著しい向上と計算機の低価格化も相まって，進化計算の研究が急速に活発化した。1990年にはKozaは遺伝的アルゴリズムの遺伝子構造を木構造としその構造にあわせた演算子を用意して遺伝的プログラミングとして遺伝的アルゴリズムのあらたな分野を形づくった[7, 8]。安価に高性能な計算機を入手しやすくなった1990年代後半より盛んに研究が行われるようになり，その単純なアルゴリズムと様々な問題へ適用可能であるという柔軟さから工学から経済まで幅広い分野への応用が研究されてきた。工学では特に認識や最適化，機械学習などの分野への応用が多く試みられている。実問題への応用研究も盛んに行われ，特に遺伝的プログラミングを機運として自動プログラミングや進

化ハードウェアなどの工業応用を目指した研究も盛んである [9, 10, 11, 12, 13, 14] .

進化計算のメカニズムは、生殖、突然変異、遺伝子組換え、自然淘汰、適者生存という生物の進化過程に着想を得ている。最適化問題の解の候補群が生物の個体群の役割を果たし、コスト関数によってどの解が生き残るかを決定する。初期の個体群の中から生存した複数の個体で新たな個体群を形成することを世代交代と呼び、世代交代を繰り返すことで個体群の進化、すなわち解候補の最適化を行う。生存の適者選択を確率的にすることで、各世代の解候補群に含まれる解候補の多様性を維持し、大域探索を可能としている。4つの主要な進化計算である、進化戦略、進化的アルゴリズム、遺伝的アルゴリズム、遺伝的プログラミングは本質的には同じであるが、実装形態が異なり、また、適用される問題に向き不向きがある。

1. 進化的戦略 - 実数のベクトルで解を表現し、探索と同時に自己変異用のパラメータを更新する。
2. 進化的プログラミング - 解の適応度関数に集団中におけるその解の優位性を表した確率的な関数を用いる。
3. 遺伝的アルゴリズム - 進化計算の中で最も一般的なアルゴリズムである。問題の解を数値列で表現し、選択と変異に加えて交叉と呼ばれる組換えオペレータを適用する。
4. 遺伝的プログラミング - 遺伝的アルゴリズムを基に解候補を木構造で表現したものである。数式やプログラムコードの最適化に利用されることが多い。

進化計算は適応度関数にいかなる仮定も持たないため、あらゆるタイプの問題でうまく機能する。このことは、工学、芸術、生物学、経済学、遺伝学、オペレーションズリサーチ、ロボット工学、社会科学、物理学、化学などの幅広い分野に適用されていることで裏付けられている。また、数学的な最適化手法というだけでなく、自然界の生物の進化と自然淘汰の仮説の正当性を実験検証するために使われることもある。

進化計算の懸念事項の一つとして、遺伝子型と表現型の区別が不明確という点が挙げられている。実際、自然界では受精した卵細胞は胚発生という複雑なプロセスを経て円熟した表現型になる。この間接的エンコーディングによって、間違っただけの突然変異を低減させるなどの遺伝の頑強化がなされていると考えられており、この仕組みが有機体の進化可能性を改善しているという。人工胚発生や人工発生システムの研究では、これらの懸念への対処がなされている。本論文では4つの進化計算のうち「遺伝的アルゴリズム」と「遺伝的プログラミング」を扱う。次節以降でこれらについて詳しく述べる。

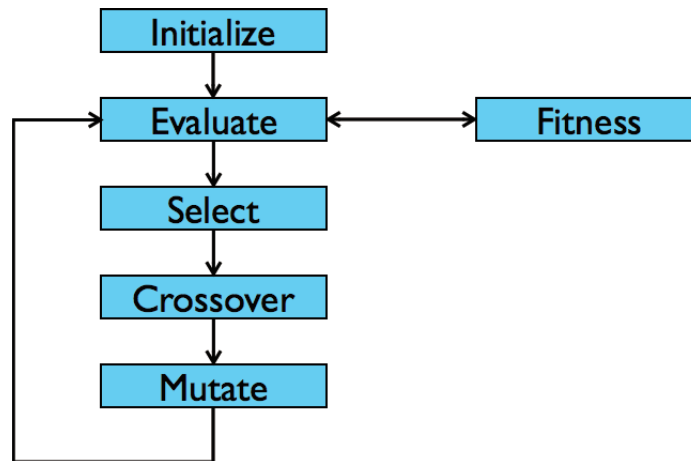


図 2.1: Flowchart of Genetic Algorithm

### 2.1.2 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) は進化計算の一手法である。図 2.1 は GA の計算手順を示す。図 2.2 は GA の計算の概念図である。GA では、解候補は染色体と呼ばれるデータ構造で表現する。初期化処理ではこの染色体をある決まった数 (個体数) だけランダムに発生させる。得られた染色体群に GA 特有の操作 (選択・交叉・突然変異) を繰り返し加え、解集合を最適解に近づける。解候補がどれくらい最適解に近いかという指標として、GA では適応度を用いる。適応度は各染色体につき評価関数を用いて計算され、適応度が高いほど最適解に近いものとする。

選択・交叉の操作では、適応度が高い染色体ほど高い確率で選ばれるように 2 つの染色体を選択し、選択された 2 つの染色体を交叉させて新たに 2 つの染色体を複製する。新たな染色体数が最初の個体数に達するまでこの操作を繰り返す。さらに、選択・交叉で得られた染色体群の中からある割合 (突然変異率) の染色体に対して突然変異を加える。再び解集合の中の各染色体の適応度を求め、通常、この中で最も高い適応度を持つ染色体がこの時点での解とする。ここで終了条件を満たしていれば計算を終了する。図 2.2 中の  $N$  は計算の繰り返し回数で、GA では世代数と呼んでいる。終了条件を満たしていなければ、世代数に 1 を加え、再度、選択・交叉・突然変異の操作を繰り返す。初期の染色体は全くランダムに生成されるが、遺伝操作 (選択・交叉・突然変異) を繰り返すことで所望の解を表現する染色体が出現する。

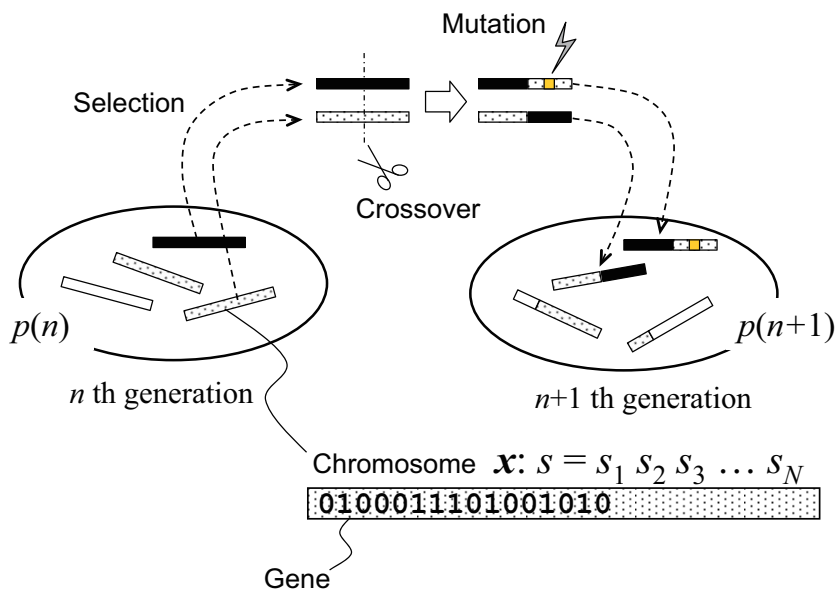


図 2.2: Overview of Genetic Algorithm

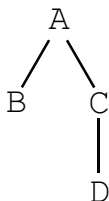


図 2.3: Tree

### 2.1.3 遺伝的プログラミング

遺伝的プログラミング (GP: Genetic Programming) は, GA の遺伝子型を拡張し構造的な表現 (木構造, グラフ構造) を扱えるようにしたものである. プログラム生成や学習, 推論, 概念形成などに応用される. 木構造は LISP の S 式で記述できるため, GP では遺伝子として LISP のプログラムを扱うことが多い. ここでは LISP を使用して木構造を表現する.

木はサイクルを持たないグラフのことであり, 図 2.3 のような構造をいう. この木構造は括弧つきの表現で記述することができ, 例えば,

(A(B)(C(D)))

もしくは簡略化して，

(A B (C D))

となる．この表記法を LISP の S 式表現という．以下では木構造と S 式を同一視する．さらにこのような木構造に関して以下の用語を用いる．

- ノード： 記号 A, B, C, D のこと
- 根 (ルート): A
- 終端ノード： B, D (終端記号, 葉ともいう)
- 非終端ノード： A, C (非終端記号, S 式の関数記号ともいう)
- 子供： A にとっての子供は B, C (関数 A の引数ともいう)
- 親： C にとっての親は A

さらに木に対する遺伝的オペレータとして，

- Gmutation： ノードのラベルの変更
- Ginversion： 兄弟の並べ換え
- Gcrossover： 部分木の取り換え

を導入する．これらのオペレータを LISP の S 式に適用した例を図 2.4, 図 2.5, 図 2.6 に示す．

- Gmutation

(+ x y)

↓

(+ x z)

- Ginversion

(progn (incf x) (setq x 2) (print x))

↓

(progn (setq x 2) (incf x) (print x))

- Gcrossover

(progn (incf x) (setq x 2) (setq y x))

(progn (decf x) (setq x (\* (sqrt x) x)) (print x))

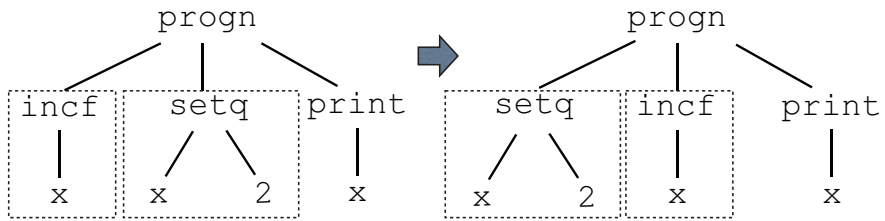
↓

(progn (incf x) (sqrt x) (setq y x))

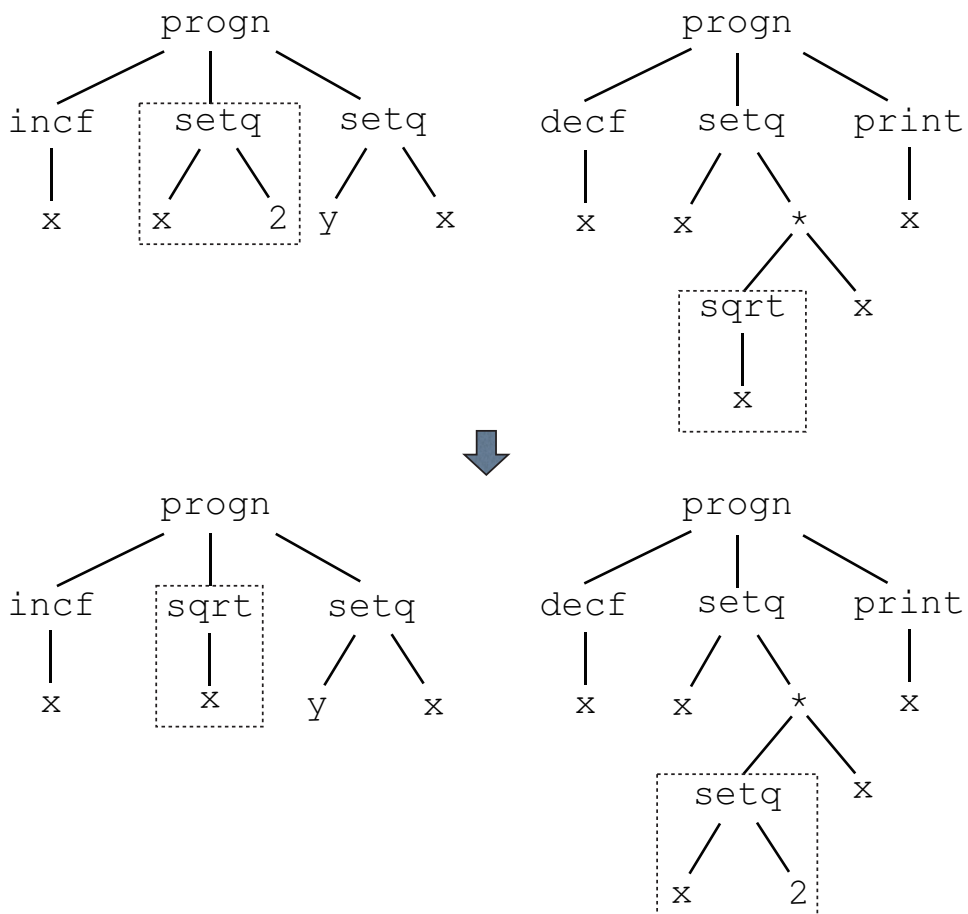
(progn (decf x) (setq x (\* (setq x 2) x)) (print x))



☒ 2.4: Gmutation



☒ 2.5: Ginversion



☒ 2.6: Gcrossover



オペレータ適用は確率的に制御される。

GP のアルゴリズムは，GA オペレータが構造的表現を操作するものであるという点を除いて通常の GA と同一である．上述のオペレータの作用により，もとのプログラムが少しずつ変化する．そして GA と同様の選択操作により，目的となるプログラムを探索する．GP では次の 5 つの基本要素を設計することで様々な応用が可能となる．すなわち，

1. 非終端記号 (LISP の S 式での関数)
2. 終端記号 (LISP の S 式でのアトム，関数の引数となる定数や変数)
3. 適合度
4. パラメータ (交叉率，突然変異率，集団サイズなど)
5. 終了条件

である．



# 第3章 モデル化手法の検討 1

## グラフ理論を用いた熱流体系の解析

### 3.1 緒言

進化計算を応用した熱流体系の制御系設計においてシステムの特性を評価する場合には、制御対象の系の概略特性を迅速・容易に把握できることが重要である。有限要素法や有限差分法などの数値解法は、計算格子（メッシュ）の細かさに応じて高い精度の近似解が得られる反面、計算負荷が高く、進化計算による制御系設計における解析手法としては不適當である。

本研究ではグラフ理論の適用を図る。本研究では対象とする系がブロック単位で構成されるものとし、そのブロック毎の接続を枝なる概念で結び、系全体の特性を誘導する。したがって、有限要素法などのように全領域にわたってメッシュを切る必要がなく、系の特性を迅速に把握することに適した方法である。ここで、枝にはブロックの属性（特性）を付帯させる。この属性には、ブロックの特性方程式の変数（通過変数および横断変数）を勘案して特徴づける。その時、バネ-質量系ではキルヒホッフの電流・電圧法則に照らし、通過変数（力）、横断変数（変位）を選択することが可能である。しかし、熱流体系に対しては、通過変数、横断変数に何を選択すればよいか、グラフの構成法をいかにすればよいかなど、従来の手法から類推できない点が存在する。そこで本研究では、熱流体解析におけるシステムグラフの構成法、カットセット行列の導出法などを新たに提案し、そこから導きだされる結果と有限要素法により導かれる結果とを比較し、その妥当性を検討する。

### 3.2 グラフ理論を用いた熱流体系の解析

本手法は、系を流線に沿って幾つかの領域に分割し、その個々をブロックとして考える。その際、ブロックの特性方程式は、熱系、流体系にそれぞれ存在するので、系ごとに通過変数、横断変数も考慮しなければならない。そこで、まずブ

ロックの両端に，熱，流体系に対応した節点を一つずつ生成し，通過変数，横断変数を，熱系では熱量，温度，流体系では運動量と流速と選ぶことにした．ここで，熱，流体力学的特性に関しては，

熱系：エネルギー保存式

$$\underbrace{\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right)}_{\text{時間微分項} + \text{対流項}} = \underbrace{\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}}_{\text{熱伝導項}} + \underbrace{Q}_{\text{発熱項}} \quad (3.1)$$

流体系：運動量保存式

$$\underbrace{\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right)}_{\text{時間微分項} + \text{対流項}} + \underbrace{\frac{\partial P}{\partial x}}_{\text{圧力項}} = \underbrace{\mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}}_{\text{粘性項}} + \underbrace{\rho g}_{\text{重力項}} \quad (3.2)$$

で表現する．上式からもわかるように，エネルギー保存則に関しては，対流，熱伝導，発熱などの要因を，運動量保存則に関しては，対流，圧力，粘性，重力などの要因を考慮しなければならない．

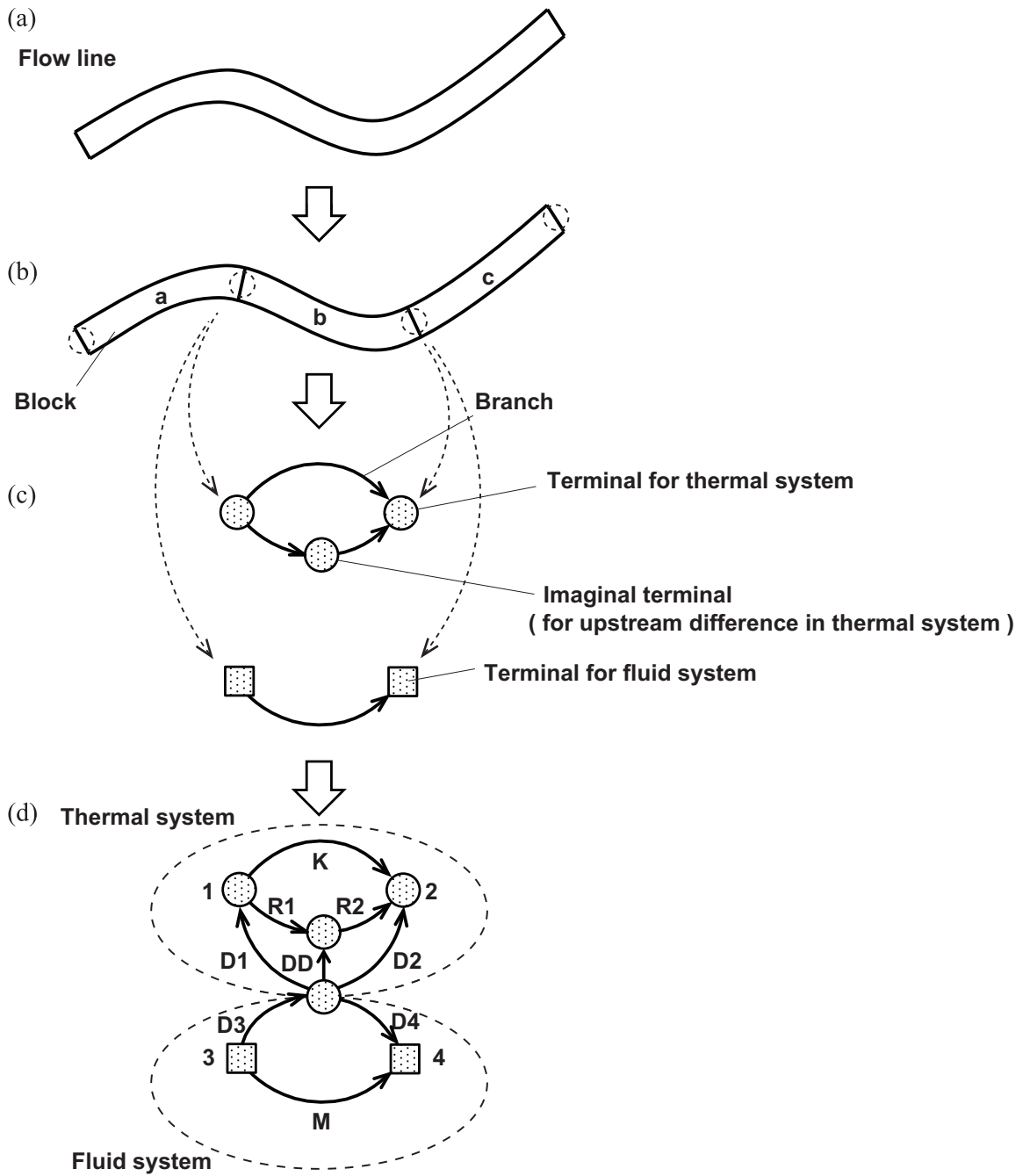
グラフ理論を熱流体系に適用するのに際し，当面の条件として，前者では対流，熱伝導が，後者では対流が他の要因に比べ大きな影響を有すると仮定した場合について解析する．上記のようにして生成した枝，節点により系全体をシステムグラフで表現する．そして，システムグラフの接続行列を求める．ついで，この接続行列に木に関する正則行列を掛けることによりカットセット行列，カットセット方程式が誘導できる．上述したような通過変数，横断変数を選んでいるため，導かれたカットセット方程式はエネルギー保存式および運動量保存式に該当するものとなる．すなわち，上記のように解析対象をグラフ表現し，そこから得られるカットセット方程式を解けば，熱・流体系の解析が可能となる．

### 3.3 システムグラフの生成とカットセット方程式の導出

#### 3.3.1 システムグラフの生成

図 3.1 にシステムグラフの生成法を示す．流路を図 3.1(a) のように一次元流れのブロックに分割し，そのブロックの両端に図 3.1(b) のごとく，熱，流体系ごとに節点を一つずつ生成する．ついで，同じ系に属する節点同士を第 3.2 章で述べた要因を代表するいくつかの枝で接続する．

ここで，枝の特性方程式は差分方程式で表現する．熱流体解析では数値計算上の安定性を維持するために一般に上流差分の考え方が利用されている．ここでは対流項のみを加味し，粘性項を無視しているので，数値計算上の安定性を考慮す



☒ 3.1: System graph for thermal and fluid system

る必要から，枝には上流差分の考えを導入する．そこで，熱系の対流を表す枝の途中に仮想の節点を生成し，この節点前後で上流差分式を満足するように，次節で述べる式を用いることとした．次にグランドとなる節点を別に設け，この節点と各節点とを枝で結ぶが，この枝はエネルギー方程式および運動量方程式中の時間微分項を表すものとする．いま，図 3.1(c) に示したシステムグラフの枝に対して，記号と節点番号を以下のように定義する．記号の頭文字の  $D, R, K, M$  はそれぞれ「時間微分」「熱系の対流」「熱系の熱伝導」「流体系の対流」を表す．そして，枝は，属性値として流路長  $L$ ，流路幅  $W$ ，流体の密度  $\rho$ ，比熱  $C_p$ ，熱伝導率  $\kappa$  を保有しているものとする．

以下では，このように出来上がったシステムグラフに対するカットセット行列とループ行列の求め方，カットセット方程式の導出法について述べる．

### 3.3.2 カットセット行列とループ行列

図 3.1(c) のシステムグラフの接続行列  $A_c$  を求めると，

$$A_c = \left( \begin{array}{ccccc|cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \quad (3.3)$$

ここで，グラフ節点 G を基準にとり，既約接続行列を求めると，

$$A = \left( \begin{array}{ccccc|cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{array} \right) \quad (3.4)$$

となる．節点数を  $m$ ，枝数を  $n$  とすると，既約接続行列の階数は  $(m-1)$  である．ここで木として，基準節点 G を含む枝を選ぶと，木は  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_D$  となる． $A$  を木に関する列と補木に関する列をまとめあげると，

$$\tilde{A} = \left( \begin{array}{ccccc|cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{array} \right) = (K | C) \quad (3.5)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{tree: } (m-1)\text{order}}$ 
 $\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{cotree: } (n-m+1)\text{order}}$

と書換えられる．この  $A$  に，木に関する  $(m - 1)$  次の正則行列，

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

を掛けることにより基本カットセット行列

$$D = K\tilde{A} = \left( \begin{array}{ccccc|cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{array} \right) \quad (3.7)$$

が得られる．ついで，基本ループ行列

$$B = \left( \begin{array}{ccccc|cccc} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \quad (3.8)$$

が得られる．

### 3.3.3 カットセット方程式

各枝の通過変数を成分とする行列  $e$ ，横断変数を成分とする行列  $T$  をそれぞれ，

$$e = (e_{D1}, e_{D2}, e_{D3}, e_{D4}, e_{DD}, e_{\kappa}, e_{R1}, e_{R2}, e_M) \quad (3.9)$$

$$T = (T_{D1}, T_{D2}, T_{D3}, T_{D4}, T_{DD}, T_{\kappa}, T_{R1}, T_{R2}, T_M) \quad (3.10)$$

とすると，

$$De^T = 0 \quad (3.11)$$

$$BT^T = 0 \quad (3.12)$$

が成り立つ．また，ブロックの熱流体力学的特性方程式を表す行列は，

$$F_e = [f_{ij}] \quad (3.13)$$

$$F_T = [g_{ij}] \quad (3.14)$$

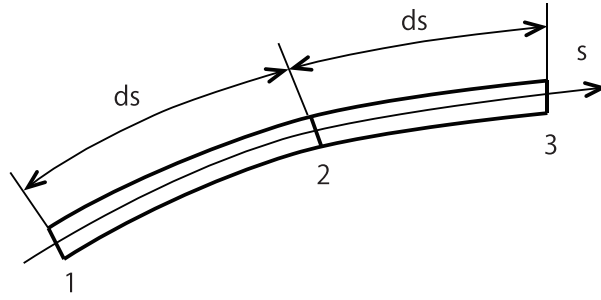


図 3.2: Flow model

( $i=D1, D2, D3, D4, DD, K, R1, R2, M$ )

( $j=D1, D2, D3, D4, DD, K, R1, R2, M$ )

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{D1} \\ h_{D2} \\ h_{D3} \\ h_{D4} \\ h_{DD} \\ h_{\kappa} \\ h_{R1} \\ h_{R2} \\ h_M \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

とすると,

$$\mathbf{F}_e \mathbf{e}^T + \mathbf{F}_T \mathbf{T}^T = \mathbf{H} \quad (3.16)$$

と表すことができる．これより，最終的にタブロー方程式として，

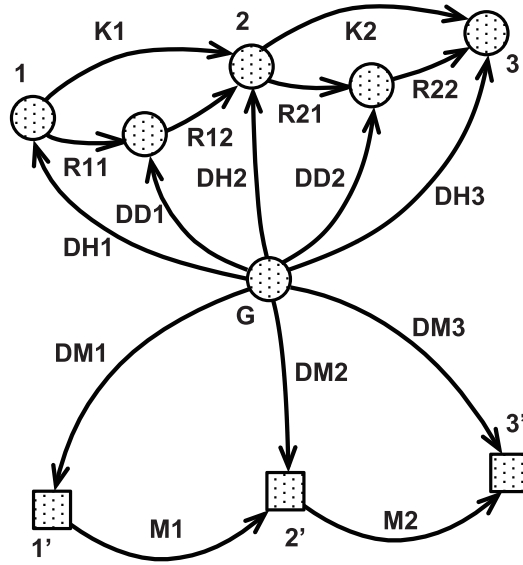
$$\begin{pmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B} \\ \mathbf{F}_e & \mathbf{F}_T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{e}^T \\ \mathbf{T}^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

が導き出される．この方程式により対象とするシステムを解析することができる．

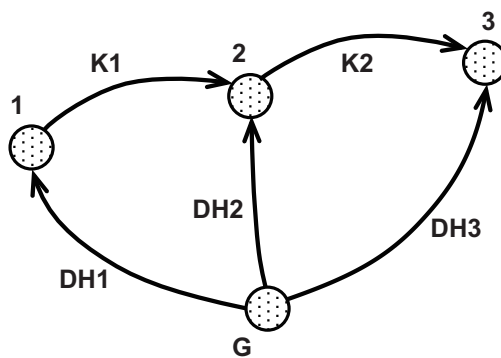
### 3.3.4 熱系の熱伝導の特性方程式

次に図 3.2 のようにブロックを複数個接続した場合について，熱，流体系の特性方程式  $\mathbf{F}_e, \mathbf{F}_T$  を具体的に述べる．





☒ 3.3: Flow model



☒ 3.4: System graph for thermal conduction

この場合，図 3.2 の流路のシステムグラフは，それぞれのブロックのシステムグラフを連結し，図 3.4 のようになる．枝 K1, K2 に特徴づける特性（熱量）を，

$$Q_{\kappa 1} = \kappa \frac{W_{\kappa 1}}{L_{\kappa 1}} T_{\kappa 1} \quad (3.18)$$

$$Q_{\kappa 2} = \kappa \frac{W_{\kappa 2}}{L_{\kappa 2}} T_{\kappa 2} \quad (3.19)$$

とする．節点 2 のカットセット（これは節点 2 のコントロールボリュームの熱収支になる）をとると，節点 2 の単位時間あたりの温度変化が求まる．したがって，式 (3.1) の熱伝導項は式 (3.18)，(3.19) を枝に特徴づければよいことがわかる．これより，

通過変数とした熱量

$$\mathbf{e} = (Q_{DH1}, Q_{DH2}, Q_{DH3}, Q_{K1}, Q_{K2}) \quad (3.20)$$

横断変数とした温度

$$\mathbf{T} = (T_{DH1}, T_{DH2}, T_{DH3}, T_{K1}, T_{K2}) \quad (3.21)$$

の間の特性を表す行列は，

$$\mathbf{F}_e = \begin{pmatrix} \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{\kappa 1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{\kappa 2} \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{F}_T = \begin{pmatrix} -\rho C_p V_{DH1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\rho C_p V_{DH1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\rho C_p V_{DH1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} -\rho C_p V_{DH1} T_{DH1}^{(n-1)} \\ -\rho C_p V_{DH2} T_{DH2}^{(n-1)} \\ -\rho C_p V_{DH3} T_{DH3}^{(n-1)} \\ \kappa W_{K1} T_{K1}^{(n-1)} \\ \kappa W_{K2} T_{K2}^{(n-1)} \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

上記の特性を示す式 (3.36) ~ (3.38) の行列は，一般に次の要領で作成する． $\mathbf{F}_e$  は，時間微分項を表す枝に対応する行の対角成分を  $\Delta t$ ，他の成分を零とし，熱伝導を

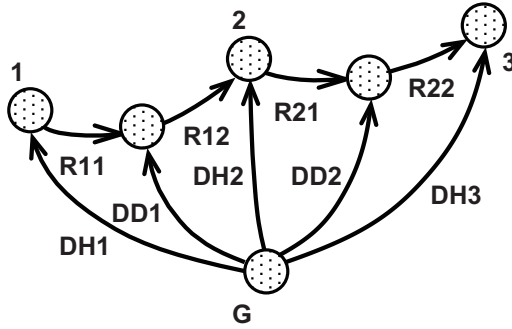


図 3.5: System graph for heat transfer

表す枝に対応する行の対角成分を  $L$ ，他の成分を零とする． $F_T$  は，時間微分項を表す枝に対応する行の対角成分を  $-\rho C_p V$ ，他の成分を零とし，熱伝導を表す枝に対応する行のすべての成分を零とする． $H$  は，時間微分項を表す枝に対応する成分を  $-\rho C_p V T^{(n-1)}$  とし，熱伝導を表す枝に対応する成分を  $\kappa W T^{(n-1)}$  とする．

### 3.3.5 熱系の対流の特性方程式

図 3.1 では，上流差分を可能とするような枝  $R1$  は節点 1 と仮定の節点を接続し，枝  $R2$  は仮定の節点と節点 2 を接続した．ここで，一般に差分法では，摂動の影響が速度方向にのみ対流で運ばれる場合，流れの方程式の差分形式に移動性を持たせるため，上流差分形式を用いている．そこで，本研究では仮定節点では上流の節点と同じ速度，温度にし，上流差分形式をとれるようにした．すなわち，枝の特性は上流の枝  $R1$  に対しては，

$$Q_{R1} = \rho C_p T_{R1} W_{R1} v_1 = 0 \quad (3.25)$$

下流の枝  $R2$  に対しては，

$$Q_{R2} = \rho C_p T_{R2} W_{R2} v_D \quad (3.26)$$

とする．ここで，図 3.3 のシステムグラフから熱系の対流の影響を表す枝  $R$  とエネルギーに関する時間変化を表す枝  $D$  からなるグラフを抽出し，図 3.5 に示す．節点 2 のカットセット（これは節点 2 のコントロールボリュームの熱量収支になる）をとると，節点 2 の単位時間あたりの温度変化が求まる．したがって，式 (3.1) の対流項は式 (3.25)，(3.26) を枝に特徴づければよいことがわかる．

通過変数とした熱量

$$e = (Q_{DH1}, Q_{DH2}, Q_{DH3}, Q_{DD1}, Q_{DD2}, Q_{R11}, Q_{R12}, Q_{R21}, Q_{R22}) \quad (3.27)$$

横断変数とした温度

$$\mathbf{T} = (T_{DH1}, T_{DH2}, T_{DH3}, T_{DD1}, T_{DD2}, T_{R11}, T_{R12}, T_{R21}, T_{R22}) \quad (3.28)$$

の間の特性を表す行列は，

$$\mathbf{F}_e = \begin{pmatrix} \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

$$\mathbf{F}_T = \begin{pmatrix} -\rho C_p V_{DH1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\rho C_p V_{DH2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\rho C_p V_{DH3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.30)$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} -\rho C_p V_{DH1} T_{DH1}^{(n-1)} \\ -\rho C_p V_{DH2} T_{DH2}^{(n-1)} \\ -\rho C_p V_{DH3} T_{DH3}^{(n-1)} \\ 0 \\ 0 \\ \rho C_p v_{R11}^{(n-1)} W_{R11} T_{R11}^{(n-1)} \\ \rho C_p v_{R12}^{(n-1)} W_{R12} T_{R12}^{(n-1)} \\ \rho C_p v_{R21}^{(n-1)} W_{R21} T_{R21}^{(n-1)} \\ \rho C_p v_{R22}^{(n-1)} W_{R22} T_{R22}^{(n-1)} \end{pmatrix} \quad (3.31)$$

となる．このように， $\mathbf{F}_e$  の時間微分項を表す枝に対応する行の対角成分を  $\Delta t$ ，他の成分を零，熱系対流を表す枝に対応する行の対角成分は 1，他の成分は零，仮想節点とグラウンド節点を結ぶ枝に対応する行の成分はすべて零とすればよい． $\mathbf{F}_T$  は，熱系対流を表す枝に対応する行の成分はすべて零とする．仮想節点とグラウンド節点を結ぶ枝に対応する行の成分は，対角成分を 1 とし，上流に接続する節点

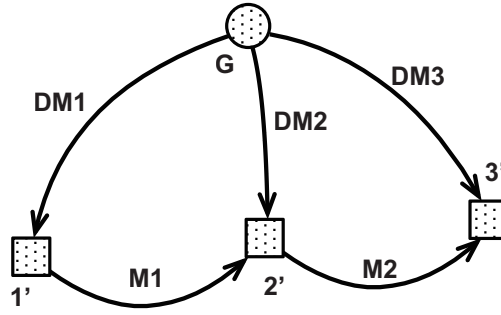


図 3.6: System graph for fluid system

の時間微分項に相当する列の成分を - 1 とする． $H$  は，熱系対流を表す枝に対応する行の成分を  $\rho C_p v^{(n-1)} W T^{(n-1)}$  とし，仮想節点とグランド節点を結ぶ枝に対応する行の成分を零とする．

### 3.3.6 流体系の対流の特性方程式

図 3.1(c) において，枝  $M$  の特性は，

$$M_{M1} = \rho v_1 v_1 W_{M1} \quad (3.32)$$

$$M_{M2} = \rho v_1 v_2 W_{M2} \quad (3.33)$$

である．しかし，対流の影響を表すための仮想節点は必要とせず，上流のみの節点を用いて特性方程式を構成する．図 3.3 に示すシステムグラフから，流体系の対流の影響を表す枝  $M$  と運動量に関する時間変化を表す枝  $D$  からなるグラフを取出し，図 3.6 に示す．節点 2 のカットセット（これは節点 1，2，3 間の運動量収支になる）をとると，節点 2 の単位時間あたりの運動量の変化が求まる．したがって，式 (3.2) の対流項は式 (3.32), (3.33) を枝に特徴づければよいことがわかる．

すると，

通過変数とした運動量

$$\mathbf{e} = (M_{DM1}, M_{DM2}, M_{DM3}, M_{M1}, M_{M2}) \quad (3.34)$$

横断変数とした流速

$$\mathbf{T} = (v_{DM1}, v_{DM2}, v_{DM3}, v_{M1}, v_{M2}) \quad (3.35)$$

の間の特性を表す行列は，

$$\mathbf{F}_e = \begin{pmatrix} \Delta t & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.36)$$

$$\mathbf{F}_T = \begin{pmatrix} -M_{DM1} & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -M_{DM2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M_{DM3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.37)$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} -M_{DM1}v_{DM1}^{(n-1)} \\ -M_{DM2}v_{DM2}^{(n-1)} \\ -M_{DM3}v_{DM3}^{(n-1)} \\ \rho v_1 v_1 W_{M1} \\ \rho v_2 v_2 W_{M2} \end{pmatrix} \quad (3.38)$$

となる．このようにして， $F_e$  は時間微分項を表す枝に対応する行の対角成分を  $\Delta t$ ，他の成分を零とする．そして，流体系の対流を表す枝に対応する行の対角成分を 1，他の成分を零とする． $F_T$  は，時間微分項を表す枝に対応する行の対角成分を  $-M$ ，他の成分を零とする．そして，流体系の対流を表す枝に対応する行のすべての成分を零とする． $H$  は，時間微分項を表す枝に対応する成分を  $Mv^{(n-1)}$  とし，流体系の対流を表す枝に対応する成分を  $\rho v_i v_i W$  とする．

## 3.4 配管系への適用

### 3.4.1 直線流路

一例として図 3.7 の系について解析する．この系は，長さ 2m，幅 0.15m の直線流路を想定したものである．流体は左方より流速 0.05m/s で流入し，右方より流出する．入口の温度は 283K で，出口温度は 293K とする．また，内部の初期温度は 293K である．この条件下で時間 0s から 6s までの温度変化を求める．そして，現在一般に熱流体解析に用いられている有限要素法により解析した結果と比較する．

本理論を用いた解析では，流路を等間隔で長手方向にのみ 9 ブロックに分割し，システムグラフ表現した．一方，有限要素法では長手方向に 40，幅方向に 10，合

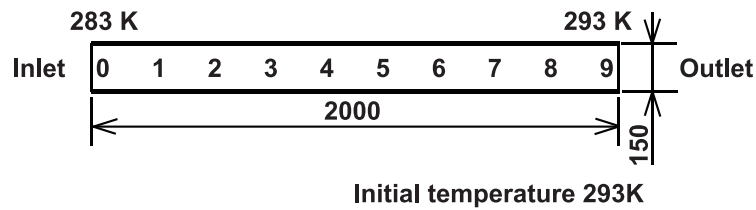


図 3.7: Model of Straight Pipe

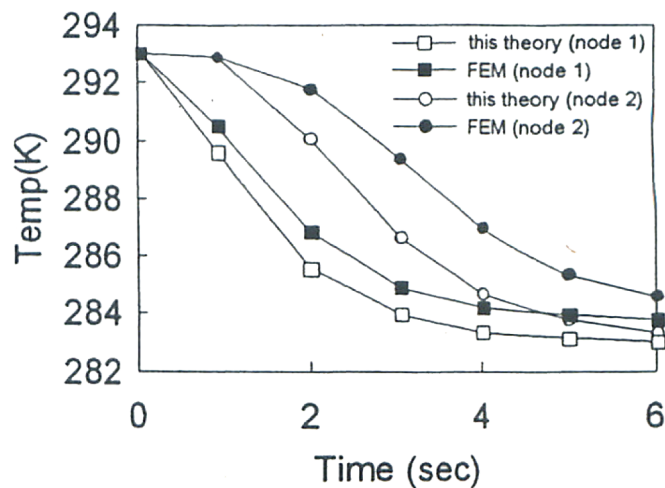


図 3.8: Simulation Result (Straight pipe)

計 400 のメッシュ分割を行った．結果の比較は有限要素法による結果を断面方向に平滑化を行って，本理論によるブロック接続点（節点）での値と比較する．図 3.8 は図 3.7 中の節点 1 ， 2 の位置における比較結果である．有限要素法の結果が若干高めめの値を示したが，同時刻の結果を見ると傾向は一致している．

### 3.4.2 分岐合流流路

次に図 3.9 の分岐合流流路について，本理論による解析結果と有限要素法による結果を比較する．系は，直線部の幅 0.15m，斜め部の幅 0.1m の流路を接続し，全長 3.15m としたものである．左側の流入口から流入し，途中分岐合流を経て右側の三つの流出口から流出する．流体の流入速度は 0.5m/s で，流入口，流出口の温度を 283K とする．系全体の初期設定温度は 293K とする．この条件下で時間 0s から 10s までの温度変化を求める．本理論を用いた解析では，流路を図中に示したように 12 分割し，システムグラフ表現した．一方，有限要素法に於いては 649 節点のメッシュ分割を行った．また，結果の比較は直線流路と同様に有限

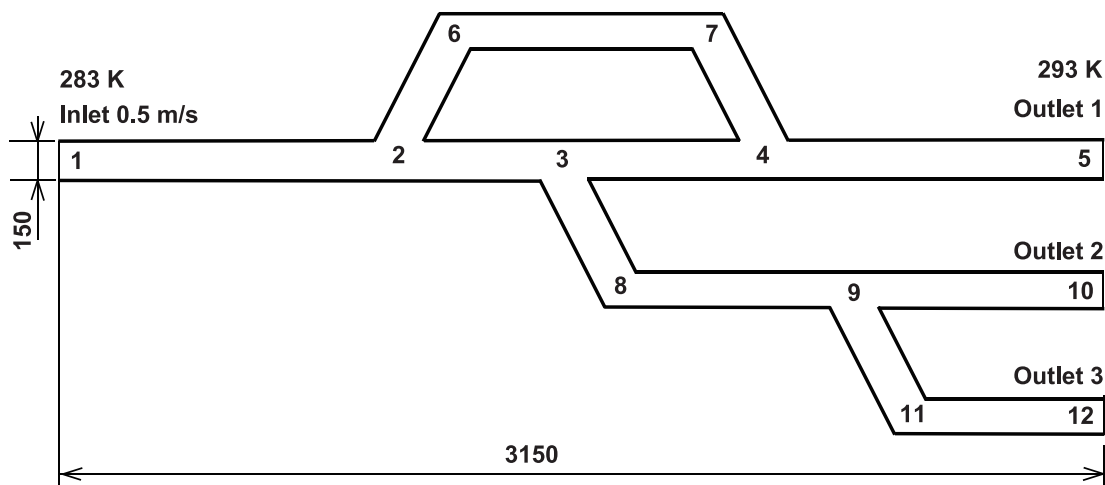


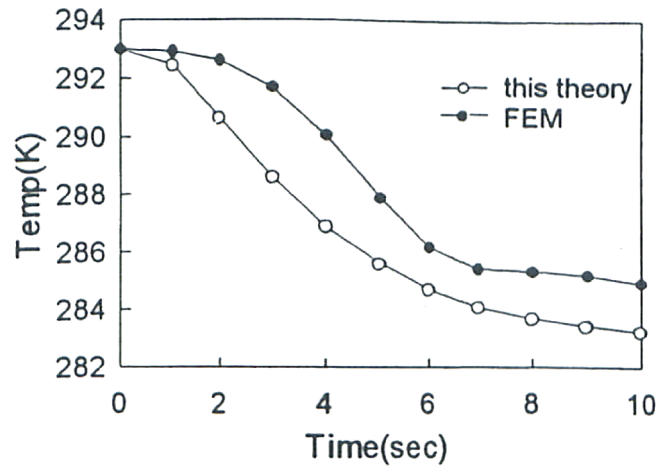
図 3.9: Model of Piping System

要素法による結果を断面方向に平滑化して行った．図 3.10，3.11 に解析結果を示す．両結果とも初期温度 293K から時間の経過とともに温度が下がり，10 秒後には図 3.10 では 284～286K，図 3.11 では 286～288K となっている．本実験結果では FEM の結果に対し同時刻では 2K 程度低い結果が得られており，温度の下がり始める応答時刻が 2 秒程度早くなっている．有限要素法の結果が本手法の結果より高い温度を示す点は直線流路と同じである．分岐流路では直線流路に比べ同時刻での温度差が大きく，2K の温度差は温度帯によっては空気調和装置における温冷感，快適感に影響するため本手法の更なる検討が必要である．

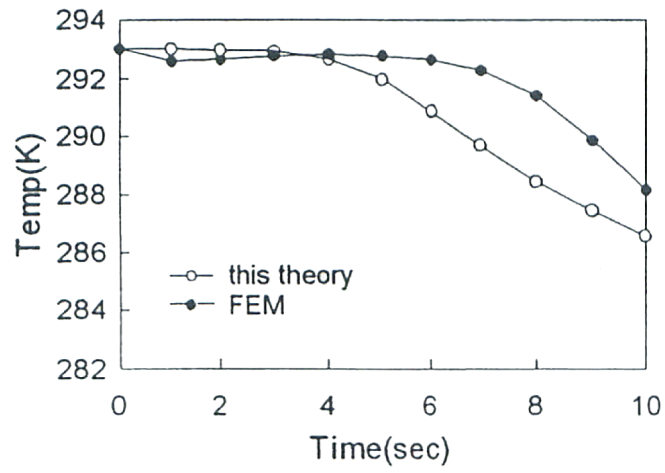
### 3.5 本章のまとめ

進化計算を応用した熱流体系の制御器設計においてシステムの特性を評価する場合には，制御対象の系の概略特性を迅速・容易に計算できることが重要である．有限要素法や有限差分法などの数値解法は厳密解が得られるものの計算負荷が高く，進化計算による制御系設計における解析手法としては不適當である．そこで，熱流体系の解析にグラフ理論の適用を図った．対象とする系をブロック単位で構成されるものとし，そのブロック毎の接続を枝なる概念で結び，系全体の特性を誘導した．枝にはブロックの属性（特性）を付帯させ，この属性には，ブロックの特性方程式の変数（通過変数および横断変数）を勘案して特徴づけた．熱流体系に対しては，熱系の通過変数を熱量，横断変数を温度，流体系の通過変数を運動量，横断変数を速度と選択し，グラフの構成方法ならびにカットセット行列の導出方法を新たに提案した．そこから導き出される結果と有限要素法により導か





☒ 3.10: Simulation Result (Node # 3)



☒ 3.11: Simulation Result (Node # 9)

れる結果とを比較し，その妥当性を検討した．

## 第4章 モデル化手法の検討 2

### ニューラルネットを用いた車室内の快適度予測

#### 4.1 まえがき

本章では，進化計算で使用する前章とは異なるモデル化手法としてニューラルネットによる方法について述べる．ここではモデル化の対象として自動車用空調を取り上げ，ニューラルネットを用いた車室内快適度の予測方法について詳述する．

近年の自動車用空調システムはフルオート化が進み，ひとたび温度設定を行えば乗員数や刻々と変化する外気の温度状況に対応して，車室内を設定温度に保つような制御がなされる．我々は車室内空調における快適性向上のため，ニューラルネットを用いて車室内温度の過渡変化を推定し，その推定値に基づいて空調制御を行う方法を提案している．その際，乗員の快適度は単に温度のみに依存するわけではなく，一般に心理的・生理的要因が影響するといわれている．また，温熱感覚に関する快適度も，温度だけでなく相対湿度や気流速などの影響を受ける．このため，たとえフルオートエアコンで設定した温度が保持されたとしても，温度以外の要因が温冷感に影響し，快適と感じられない状況に遭遇することは多い．

快適度に影響するもののうち，空気調和に係る温熱的快適についてはISOで人間の温熱感覚を規格化した平均予測温熱申告 (PMV: Predicted Mean Vote) を指標として定量的に扱うことができる．PMVは，外部への仕事を無視すると，温熱感に影響を及ぼす (1) 気温，(2) 放射温度，(3) 気流速，(4) 相対湿度，(5) 代謝率，(6) 着衣量の温熱環境 6 因子から求めることができる．しかしながら，既存のセンサからはこれら全ての値を計測することはできない．また，既存のセンサの設置位置は乗員位置とは異なるため，直接，乗員付近の温熱状態を示すものではない．

そこで，新たにセンサを付加するなどして各乗員位置または室内の代表点においてこれらの値を計測し，PMV 値を算出し，算出された PMV に基づいて空調制御を行えば，乗員の快適性を考慮した空調制御が期待できる．現実にはコストやスペースなどの問題から PMV 算出に必要なセンサを付加することは難し

表 4.1: PMV Scale

PMV	Thermal sensation
3	Hot
2	Warm
1	Slightly warm
0	Neutral
-1	Slightly cool
-2	Cool
-3	Cold

いことから，本研究では，ニューラルネットを用いて既存の限られたセンサ情報から車室内の乗員付近の快適度を推定し，この値に基づき車室内快適度を制御する方法を検討する．

## 4.2 平均予測温熱申告 (PMV)

まず，温熱快適度指標としてよく用いられる平均予測温熱申告 (PMV: Predicted mean vote) について説明する．PMV は，人体の定常熱収支式と温冷感や快適感に関する 1000 人の被験者の実験結果を基に導出された温熱指標で，PMV = 0 のとき快適と感じる人の割合が最大となり，この場合の温冷感が中立とされる．PMV = 0 以外の場合は，表 4.1 に示すように - 3 から 3 の値に対して 7 段階の温冷感が対応付けられている．例えば PMV = 1 の場合は「少し暖かい」，PMV = 2 の場合は「暖かい」と温冷感が示される．PMV は，人の温冷感に影響を及ぼす (1) 気温  $t$  [°C]，(2) 放射温度  $t_{mrt}$  [°C]，(3) 気流速  $v$  [m/s]，(4) 相対湿度  $\phi$  [%]，(5) 代謝量  $M$  [W/m]，(6) 着衣量  $I_{cl}$  [clo] をもとに，

$$\begin{aligned}
 \text{PMV} = & \{0.33 \exp(-0.036M) + 0.028\} \left[ (M - W) \right. \\
 & - 3.05 \{5.73 - 0.007(M - W) - P\} \\
 & - 0.42 \{(M - W) - 58.1\} \\
 & - 0.0173M(5.87 - P) \\
 & - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \{ (T_{cl} + 273.15)^4 \\
 & \quad \left. - (T_{mrt} + 273.15)^4 \right\} \\
 & \left. - f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \right] \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

と求められる．ここで， $W$  は外部への仕事を表す．また， $f_{cl}$  は着衣状態の体表面積と裸体表面積の割合で，

$$\begin{aligned} f_{cl} &= 1.0 + 0.2I_{cl} \quad (I_{cl} \leq 0.5) \\ f_{cl} &= 1.05 + 0.1I_{cl} \quad (I_{cl} > 0.5) \end{aligned} \quad (4.2)$$

で与えられる．ここで，着衣量の単位 [clo] は衣服の断熱性を示し，熱抵抗値で表すと， $1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$  となる． $p_a$  は水蒸気分圧で飽和水蒸気圧  $p_s$  と湿度  $\phi$  から式 (4.3) により求められる．

$$p_a = p_s \times \frac{\phi}{100} \quad (4.3)$$

衣服表面温度  $T_{cl}$  は，式 (4.4) により反復計算によって求められる．

$$\begin{aligned} T_{cl} &= 35.7 - 0.028(M - W) \\ &\quad - 0.155I_{cl} \left[ 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \{ (T_{cl} + 273.15)^4 \right. \\ &\quad \left. - (T_{mrt} + 273.15)^4 \} + f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \right] \end{aligned} \quad (4.4)$$

対流熱伝達率  $h_c$  は，

$$h_c = \max\{2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25}, 0.0121\sqrt{v}\} \quad (4.5)$$

である．

### 4.3 実験モデル

本研究では，車室内高さ約 260 mm，長さ約 550 mm の縮小した車室内空調モデルを使用する．ただし，本モデルは車室内の温度分布や流れ場などの測定を目的としたものではなくシステムの特性の学習と制御性の検証を目的としているため，相似則については特に考慮していない．

図 4.1 に実験システムの概略を示す．本システムの空調装置はいわゆるリヒートエアミックス方式で，流入口 (A) から流入した空気は冷却装置 (C) により一旦すべての空気が冷却・除湿される．その後，ミックスドア (D) の開度に応じた配風比で分岐され，一部がヒータ (E) で加熱され高温空気となる．残りの冷気と再び混合し，空調に必要な温度の空気を生成する．この空気はモードドア (F) の角度に応じた配風比で，車室内前面パネルの上下の吹出し口から室内に送り込まれる．

本システムでは，車室内外，空調装置ダクト内の合計 11ヶ所の温度 ( $t_1 \sim t_{11}$ ) および気流速 ( $v_1 \sim v_{11}$ ) が計測可能である．また，車室内の 4ヶ所 (前列頭部，

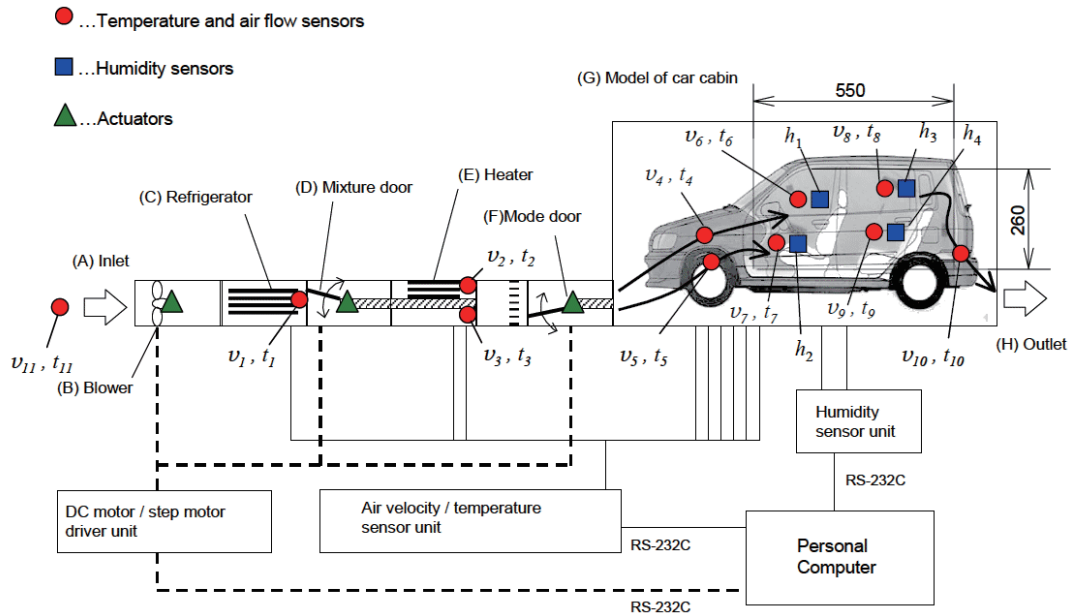


図 4.1: Car air-conditioning model

前列脚部，後列頭部，後列脚部)の湿度 ( $h_1 \sim h_4$ ) を計測することができる．各種センサは RS-232C を介してパーソナルコンピュータに接続され計測データのログをとることができる．また，ブロウモータ，ミックドアも同様に RS-232C によりパーソナルコンピュータに接続されており，計測データに基づいたフィードバック制御を行うことも可能である．

## 4.4 ニューラルネットを用いた快適度推定

### 4.4.1 ニューラルネットの構成

図 4.2 にニューラルネットの構成を示す．入力層 6，隠れ層 10，出力層 2 の階層型ネットワークである．入力は，ブロウ開度，外気温，ミックドア開度，温風温度，冷風温度，室内温度，出力は，前列頭部付近 PMV，脚部付近 PMV である．

### 4.4.2 快適度推定の概要

本研究では，ニューラルネットを用いてセンサの情報からだけでは直接算出することができない PMV を推定する．本研究では，次の 6 つの値を既知の情報としてニューラルネットの入力データとして使用し，PMV を推定する．

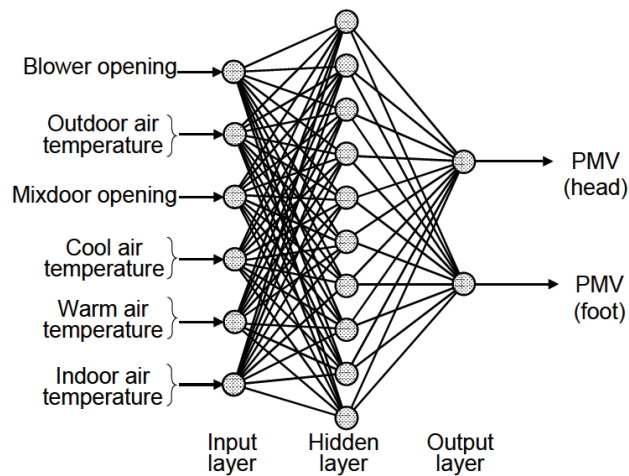


図 4.2: Neural network for car air-conditioning

1. ブロワ開度
2. 外気温度センサ値
3. ミックスドア開度
4. 温風温度センサ値
5. 冷風温度センサ値
6. 室内温度センサ値

本来、快適度を算出する場合は、4.2節で述べた温熱境6因子を必要とする。上述のセンサ、アクチュエータの情報からだけでは6因子を得ることはできないため、更に気流速と湿度を計測する必要がある。そこで、ニューラルネットの学習の際にはこれらのを計測し、PMVを算出して、教師データを作成する。ただし、PMV算出の際の代謝量は「着座での軽作業」を想定して1.2 metとし、着衣量は「標準的なビジネススーツ」を示す1.0 cloとする。以下に快適度推定のためのニューラルネットを作成する手順を示す。

1. ブロワ開度、ミックスドア開度を種々に変更しながら実機にて実験をおこない、温度、気流速、湿度の過渡状況を測定しながら、PMVを算出しログをとる。これらのデータがニューラルネットの入力信号、教師信号の候補となる。

2. 候補データから矛盾するデータを取り除く．すなわち，同じ入力に対して異なる出力となるデータを削除し，実際の学習で使用する入力データと教師データを作成する．
3. 2. で得られたデータを教師データとしてニューラルネットの学習を行う．

図 4.3 に本研究で行う実験の流れをまとめる．本研究では，ニューラルネットの学習以外にも検証や制御実験のため，上述のものも含め合計 4 回の実験を行った．同じ実験装置を使用するが，目的や計測データが異なる．(A) 学習フェーズでは，ニューラルネットの入出力にかかわるデータをすべて計測する．(B) 予測フェーズでは，ニューラルネットの入力に必要なデータのみを計測し，そのデータを基に (A) で学習したニューラルネットで PMV を推定する．(C) 検証フェーズでは PMV 算出に必要なデータを計測し，そのデータから PMV を算出して，(B) で予測した PMV の検証を行う．(D) 制御フェーズでは，検証したニューラルネットを基に車室内 PMV を予測し，それをフィードバックしてブロワ開度，ミックストア開度を決定し，空調制御を行う．

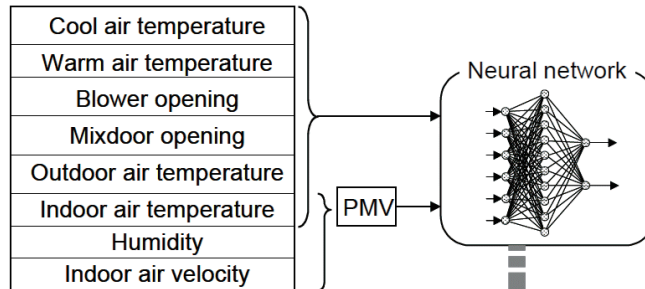
#### 4.4.3 学習用データの計測

学習用データを収集するため，PMV 算出に必要なセンサ値も含めたデータ計測を行う．この作業は実車においても同様で，もともと自動車に搭載されているセンサのみでは PMV 算出ができないため，学習用データを収集するときだけは必要なセンサを導入してデータ計測を行う必要がある．表 4.2 に学習データ収集時の制御シーケンスを示す．この表は起動からのある時刻におけるブロワ開度とミックストア開度を示しており，例えば起動から 5 分～10 分の間はブロワ開度 80%，ミックストア開度 50%となる．5 分毎にブロワ開度とミックストア開度を変え，温度，気流速，湿度の時系列データを計測し記録する．本研究ではサンプリング間隔は 5 秒としている．表 4.2 のシーケンスを 4 周期繰り返し，データを計測する．

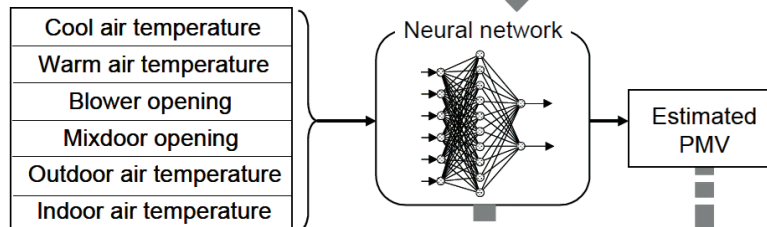
図 4.4 は測定したデータから前列頭部付近の PMV と前列脚部付近の PMV を算出した時系列のデータである．全 4 周期のデータのうち 1 周期目のデータのみが，ほかの周期のデータと比して明らかに特性が異なる．そこで，起動直後の 1 周期を除いた 3 周期分のデータ，ここでは図の破線で囲まれた部分の合計 1620 サンプルを計測データとして使用する．実測したデータを処理し，入力データと教師データを作成する．まず，計測されたデータから前列頭部付近の PMV と前列脚部付近の PMV を算出する．次に，同じ入力に対して異なる出力となるような



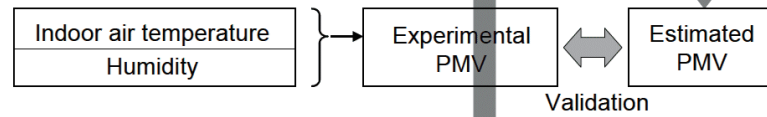
(A) LEARNING PHASE



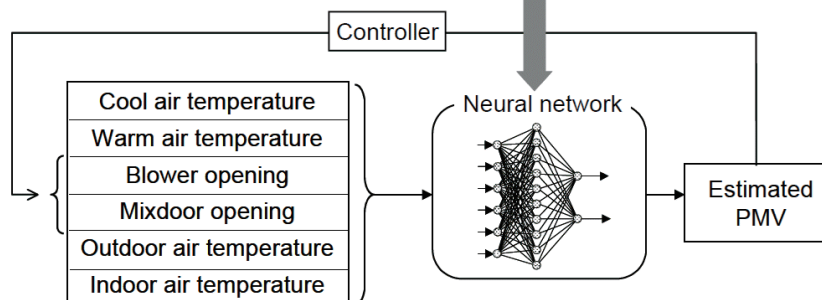
(B) PREDICTION PHASE



(C) VALIDATION PHASE



(D) CONTROL PHASE



4.3: Procedure of our framework

表 4.2: Control sequence

Time[s]	Blower open [%]	Mixdoor open [%]
0-300	80	0
300-600		50
600-900		100
900-1200	33	0
1200-1500		50
1500-1800		100
1800-2100	0	0
2100-2400		50
2400-2700		100

矛盾したデータを取り除き，ここでは 1620 サンプルのうち 688 サンプルを入力データ，教師データとして使用する．

#### 4.4.4 誤差逆伝播アルゴリズム

ニューラルネットワークでは，提示パターン  $m$  での入力層  $i$  への入力信号を  $O_{mi}$  とすると，中間層  $j$  の出力信号  $O_{mj}$  および出力層  $k$  の出力信号  $O_{mk}$  はそれぞれ，

$$O_{pj} = f(\text{net}_{pj}) \quad (4.6)$$

$$\text{net}_{pj} = \sum_i (w_{ji} \cdot O_{pi}) + b_j \quad (4.7)$$

$$O_{pk} = f(\text{net}_{pk}) \quad (4.8)$$

$$\text{net}_{pk} = \sum_j (w_{kj} \cdot O_{pj}) + b_k \quad (4.9)$$

と求めることができる．ただし， $f(x)$  はシグモイド関数，

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4.10)$$

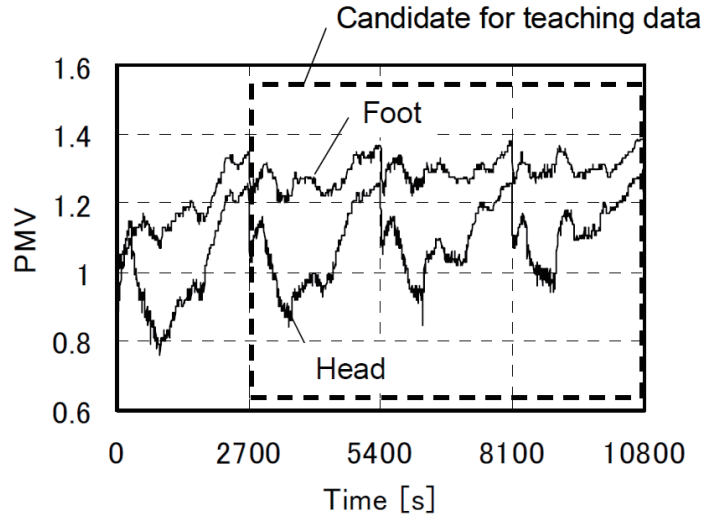


図 4.4: Data for training

である．ここで，

- $N_i$  : 入力層個数
- $N_h$  : 中間層個数
- $N_o$  : 出力層個数
- $m$  : 提示パターン数
- $w_{kj}$  : 出力層  $k$  と中間層  $j$  との結合係数  $j = 1 \sim N_h, k = 1 \sim N_o$
- $w_{ji}$  : 中間層  $j$  と入力層  $i$  との結合係数  $i = 1 \sim N_i, j = 1 \sim N_h$
- $b_k$  : 出力層  $k$  のバイアス  $k = 1 \sim N_o$
- $b_j$  : 中間層  $j$  のバイアス  $j = 1 \sim N_h$

である．式 (4.6) ~ 式 (4.9) で求めた各層への出力と教師信号から，出力層の出力誤差は，

$$\delta_k = (T_k - O_k) \cdot O_k \cdot (1 - O_k) \quad (4.11)$$

と求める．出力層の結合荷重修正は，

$$\Delta w_{kj}^{(n)} = \eta \cdot \delta_k \cdot O_j + \alpha \cdot \Delta w_{kj}^{(n-1)} \quad (4.12)$$

$$w_{kj}^{(n+1)} = w_{kj}^{(n)} + \Delta w_{kj}^{(n)} \quad (4.13)$$

である．出力層のバイアス修正は，

$$\Delta b_k^{(n)} = \eta \cdot \delta_k + \alpha \cdot \Delta b_k^{(n-1)} \quad (4.14)$$

$$b_k^{(n+1)} = b_k^{(n)} + \Delta b_k^{(n)} \quad (4.15)$$

となる．ここで，

- $T_{mk}$  : 提示パターン  $m$  での出力層  $k$  への教師信号
- $(n)$  : 学習繰返し回数 (エポック数)
- $\eta$  : 学習係数
- $\alpha$  : モーメント項係数

である．さらに，中間層の出力誤差は，

$$\delta_j = \left( \sum_k \delta_k \cdot w_{kj}^{(n)} \right) \cdot O_j \cdot (1 - O_j) \quad (4.16)$$

$$\Delta w_{ji}^{(n)} = \eta \cdot \delta_j + \alpha \cdot \Delta b_j^{(n-1)} \quad (4.17)$$

$$w_{ji}^{(n+1)} = w_{ji}^{(n)} + \Delta w_{ji}^{(n)} \quad (4.18)$$

であり，隠れ層のバイアス修正は，

$$\Delta b_j^{(n)} = \eta \cdot \delta_j + \alpha \cdot \Delta b_j^{(n-1)} \quad (4.19)$$

$$b_j^{(n+1)} = b_j^{(n)} + \Delta b_j^{(n)} \quad (4.20)$$

である．式 (4.6) ~ 式 (4.20) を繰返し，ネットワークの学習を進めるのが誤差逆伝播学習法である．また，ここでは誤差逆伝播の計算は収束の安定化を図るためモーメント法を使用する．

#### 4.4.5 PMV 推定結果

500000 エポック学習したニューラルネットを用いて，前席頭部付近の PMV と脚部付近の PMV を推定した．図 4.5 に表 4.2 のシーケンスを 3 周期行った場合の結果を示す．誤差は PMV のとりうる  $-3 \sim 3$  の値の範囲に対して最大 4%，平均 0.65% であり，よく近似されているといえる．

次に，学習した環境とは異なる環境下での推定実験を行った．具体的には外気温が異なる環境下での PMV を推定する．図 4.6 はその推定結果であるが，ニューラルネットの汎化性能により PMV としては  $-3 \sim 3$  に収まる妥当な値を推定しているものの，実測値とは大幅に異なる値しか推定できない結果を示している．このことは，本ニューラルネットが学習した環境と異なる環境下の PMV は推定できないことを示している．

そこで，学習データとしてさらに 2 つの環境下のデータを加え，そのデータをもとにニューラルネットの学習を行う．図 4.7，図 4.8 は 3 つの環境下のデータをもとに学習したニューラルネットを用いて推定した結果で，図 4.7 が図 4.5 に，図

4.8 が図 4.6 に対応する．この結果では前席頭部付近の PMV と脚部付近の PMV の推定値と実測値の差は温冷感の標語が変化する 1 に対して十分小さな値となる．このことは，より広範な環境においても学習データを用意することで PMV の推定が可能となることを示唆している．しかしながら，ニューラルネットへの入力に対してとりうる全ての範囲について教師データを作成して学習することは，実験回数の増加と学習自体の計算回数の増加を招き，現実的ではない．そこで，適正な実験方法や実験回数についての検討が今後の課題である．

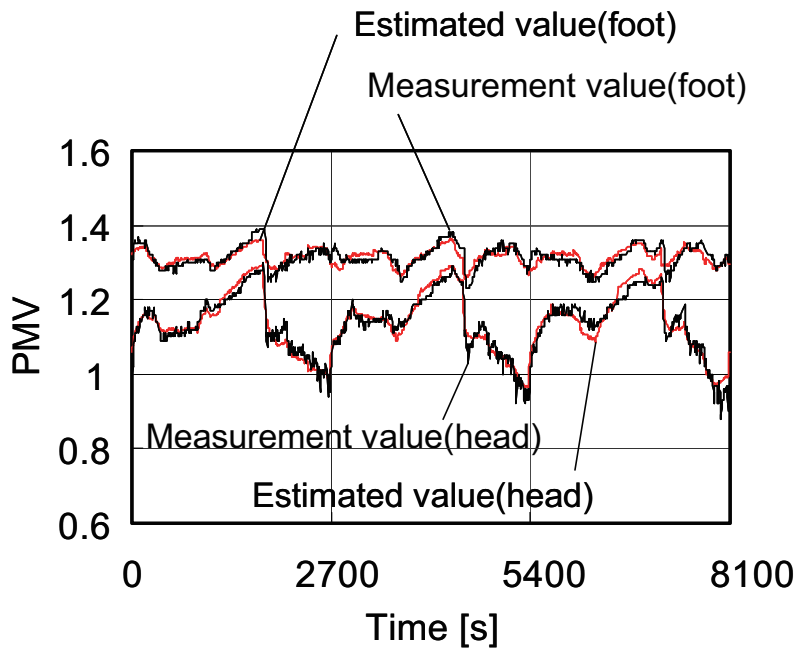
#### 4.4.6 車室内快適制御実験

前節で学習したニューラルネットを使用して，(1) ブロワ開度，(2) 外気温度，(3) ミックスドア開度，(4) 温風温度，(5) 冷風温度，(6) 室内温度から室内の PMV 値を推定し，その推定値をもとに制御を行う．推定値が正しいものと仮定すれば，車室内空調において，快適度を考慮した制御が可能となる．PMV で快適度を考慮する場合，PMV 値は  $\pm 0.5$  の値に入ることが望ましいとされている．

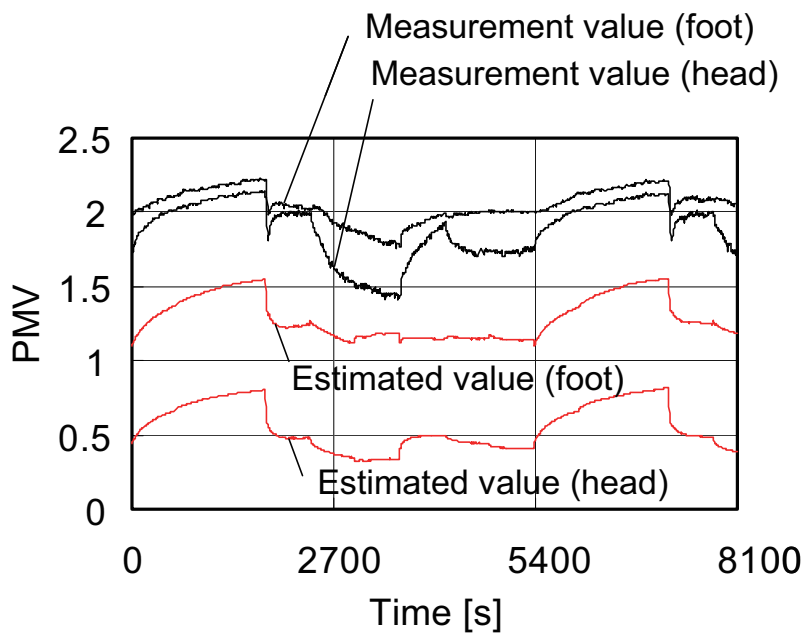
ここでは PMV 値に基づく制御ができるかどうかを確認するため，一例として目標 PMV 値を 0 とした場合を検討する．ブロワの回転数 50% は一定とし，目標 PMV と推定 PMV の偏差に比例してミックスドア開度を決定し，制御を行う．図 4.9 に目標 PMV に対する，推定値と実測値の変化を示す．また，図 4.10 にそのときのブロワ開度の変化を示す．PMV の推定値は実測値によく近似しており，その差は PMV で考慮する -3 から 3 までの値域に対して最大 5%，平均 1.7% 程度である．また，PMV が上昇した場合には，ミックスドア開度を変更し，PMV を目標値に近づける制御がなされていることが確認できる．以上より，車室内空調においてニューラルネットによる PMV の推定値に基づいて，快適度を考慮した制御が可能であるといえる．

### 4.5 本章のまとめ

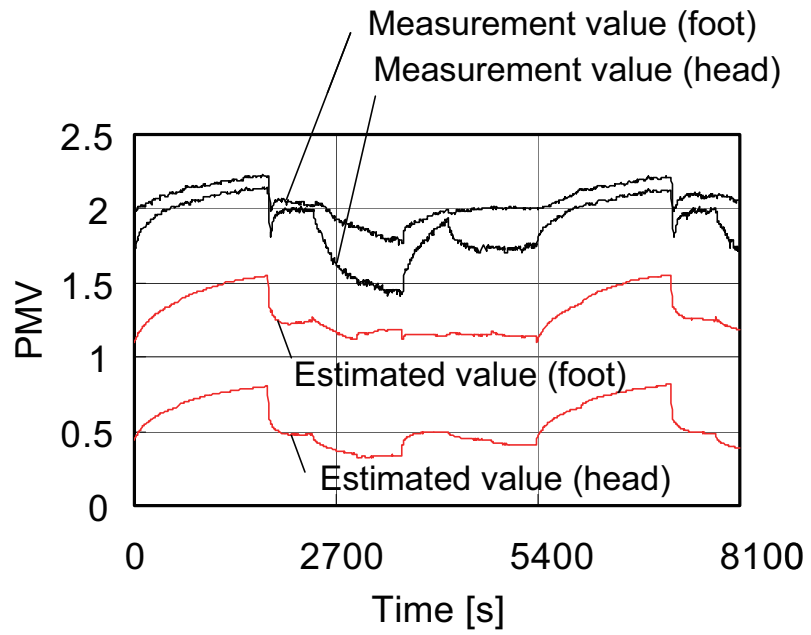
本章ではニューラルネットを用いて自動車に搭載されている既存のセンサの情報から車室内の快適度を推定し，この値に基づいて車室内快適度を制御する方法を検討した．制御シーケンスに応じた車室内の PMV 値を実験的に求め，それを教師データとして誤差逆伝播法によりニューラルネットの学習を行った．本実験で得られたニューラルネットによる PMV の推定値と実験値はよく近似しており，本推定方法が有効であることを確認した．さらに，本実験で得られたニューラルネットを用いて PMV を推定し，この値に基づいて空調制御を行い，快適度を考慮した制御が可能であることを実験的に確認した．



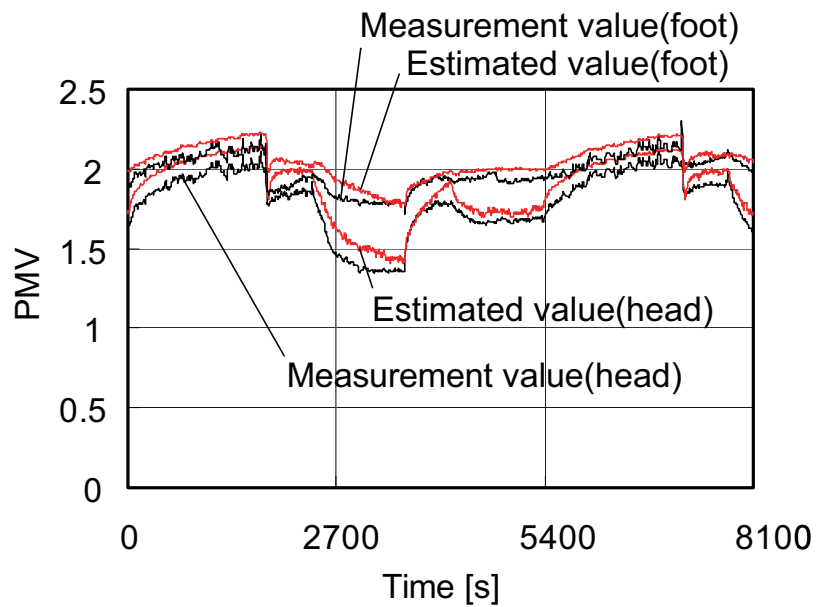
☒ 4.5: Estimation result #1



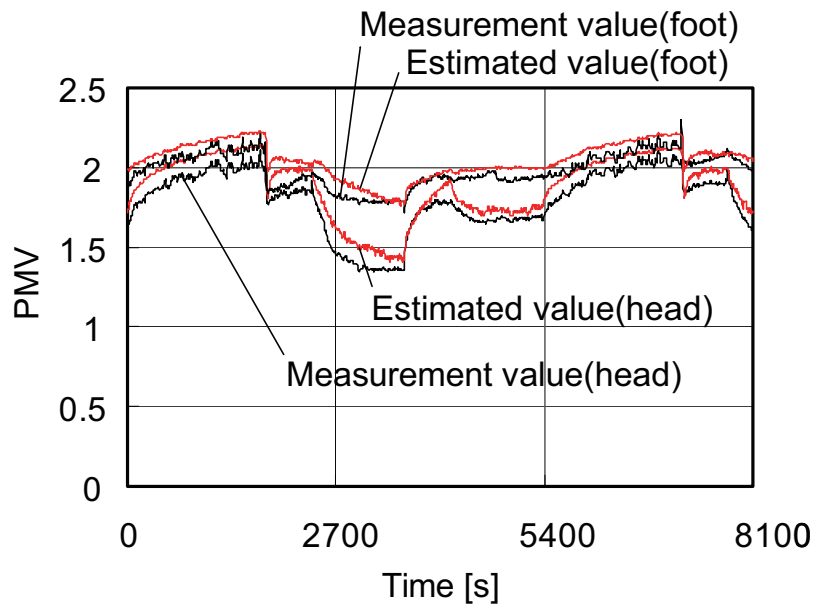
☒ 4.6: Estimation result #2



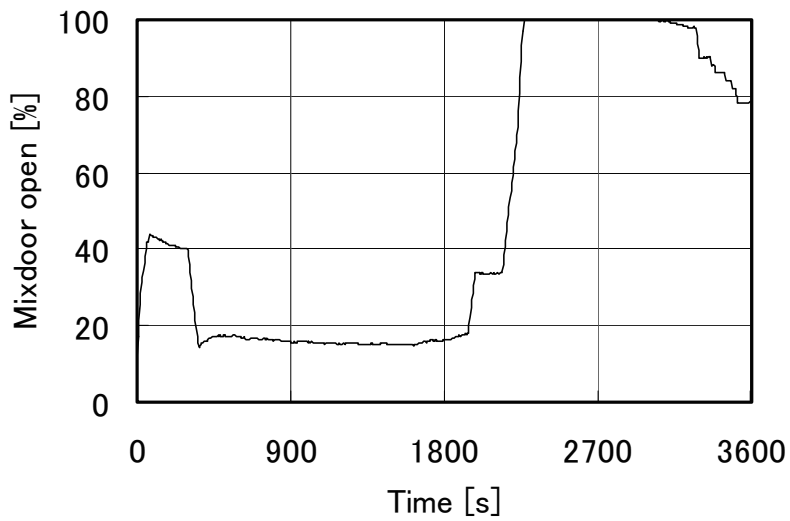
☒ 4.7: Estimation result #3



☒ 4.8: Estimation result #4



☒ 4.9: Estimation result #5



☒ 4.10: Mixdoor opening



今後の課題として次のことが挙げられる．本研究ではニューラルネットの入力としてPMVに関連すると思われるデータを適当に選択したが，ニューラルネットへの入力と出力の相関関係を考慮し，例えば相関の高いものからニューラルネットの入力として採用するなどの検討が必要である．また，現状では限られた環境下のPMVは推定可能であり，学習する環境を増やせばより広範な環境に対応したニューラルネットを構成可能であることが確認されているが，その場合，実験回数や学習自体にかかる時間が増加し問題となる．適正な実験方法や実験回数の検討が必要である．



# 第5章 進化計算による 自動車用空調の制御器設計 支援

## 5.1 まえがき

自動車のような周囲の環境が刻々と変化し、車室内環境も大きな変化を生じる動的な環境に対応する制御プログラムを作成するためには、設計 試作 実験のプロセスを繰り返し行い、開発のための試行錯誤に多くの時間を費やさなければならぬ。一方、自動車の開発サイクルが早くなるにつれ、開発・設計段階でのコンピュータ支援は必要不可欠なものになっているが、制御プログラムの開発においては、有効なコンピュータ支援ツールは見当たらない。

本章では遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) を応用して自動車用オートエアコンの制御プログラムを自動生成し、自動車用空調システムの制御プログラムの設計支援を行う手法について述べる。まず、快適性を考慮した自動車用空調システムのコントローラの自動生成に GA を応用する際の染色体コーディング方法と評価関数の設計について述べる。次に、評価関数内で用いた自動車室内の温度推定のためのニューラルネットワークについても述べる。さらに、GA により実験システムの制御プログラムを自動生成し、そのプログラムで実機を駆動して評価実験を行い、その結果を検討する。

## 5.2 車室内空調実験システム

図 5.1 は本研究のために製作した 5 分の 1 の車室内空調実験システムである。本研究では現在市販されている自動車用エアコンの多くで採用されているリヒートエアミックス方式による車室内空調を行う。リヒートエアミックス方式は、取入口から取入れた空気を一度すべて冷却し、その一部をリヒートして高温空気を作り、残りの低温空気と混合することによって所望の温度の空気を作る方式である。図 5.1 の左側のインレット (A) から流入した空気は、まず冷却ユニット (C) で冷却される。冷却された空気はミックスドア (D) により二つの流路に分岐し、一

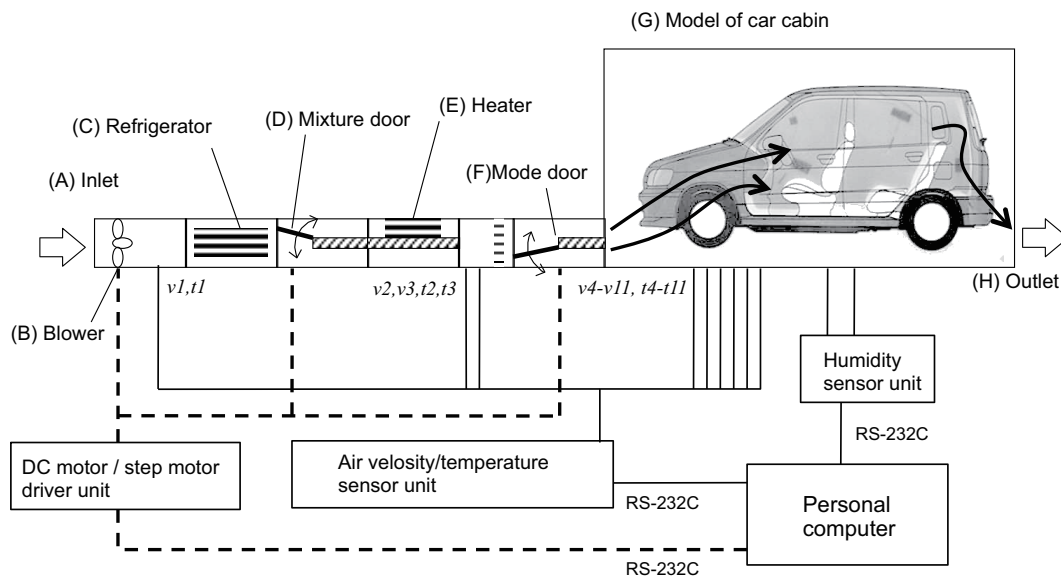


図 5.1: Experimental system

方はヒータ (E) によりリヒートされ, 他方はそのままバイパスされて再び混合される. ミックスドアの開度により高温側の空気と低温側の空気の混合量を調整し, 車室内へ送り込む空気の温度を制御する. モードドア (F) は室内上下の配風比を変えるためのものである. ブロワモータ, ミックスドア, モードドアはインターフェースを介してパーソナルコンピュータに接続され, 制御可能になっている. また, 車室内モデル内の合計 11 箇所に風速温度計を設置し温度・風速をモニタすることが可能である.

### 5.3 遺伝的アルゴリズムの概要

第 2 章で述べた通り GA は生物進化に着想を得た組合せの最適化手法で, その探索性能と適用柔軟性の高さから, 近年, 多くの分野に応用されている. GA は勾配などを明示的に用いない直接法で, 複雑な目的関数にも容易に適用できる. また, 解集合を保持しながら探索を行う確率的多点探索法であることから, 多峰性探索空間において大域的探索を行うことができる. しかし, 通常, GA では解探索に 100 ~ 1000 の大きさの解集合全てについて繰返し目的関数を計算するため, 目的関数の計算コストを大きくすることはできない.

図 5.2 は GA の計算手順の概略を示す. GA では, 解候補は染色体と呼ばれるデータ構造で表現する. 初期化処理ではこの染色体をある決まった数 (個体数) だけランダムに発生させる. 得られた染色体群に GA 特有の操作 (選択・交叉・突

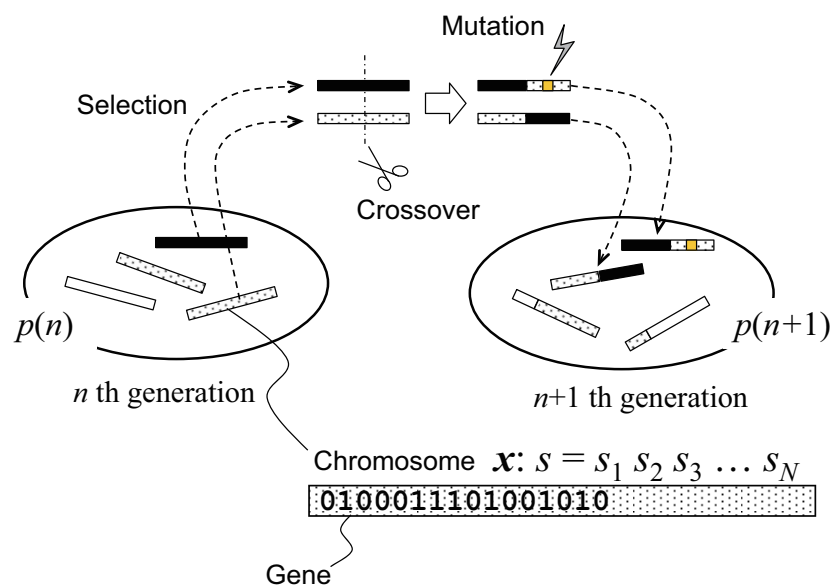


図 5.2: Outline of Genetic Algorithm

然変異)を繰返し加え, 解集合を最適解に近づける. 解候補がどれくらい最適解に近いかという指標として, GA では適応度を用いる. 適応度は各染色体につき評価関数を用いて計算され, 適応度が高いほど最適解に近いものとする. 選択・交叉の操作では, 適応度が高い染色体ほど高い確率で選ばれるように2つの染色体を選択し, 選択された2つの染色体を交叉させて新たに2つの染色体を生成する. 新たな染色体数が最初の個体数に達するまでこの操作を繰り返す. さらに, 選択・交叉で得られた染色体群の中からある割合(突然変異率)の染色体に対して突然変異を加える. 再び解集合の中の各染色体の適応度を求め, 通常, この中で最も高い適応度を持つ染色体が, この時点での解となる. ここで終了条件を満たしていれば計算を終了する. 図中の  $n$  は計算の繰返し回数で, GA では世代数と呼んでいる. 終了条件を満たしていなければ, 世代数に1を加え, 再度, 選択・交叉・突然変異の操作を繰り返す. 初期の染色体は全くランダムに生成されるが, 遺伝操作(選択・交叉・突然変異)を繰り返すことで所望の解を表現する染色体が出現する.

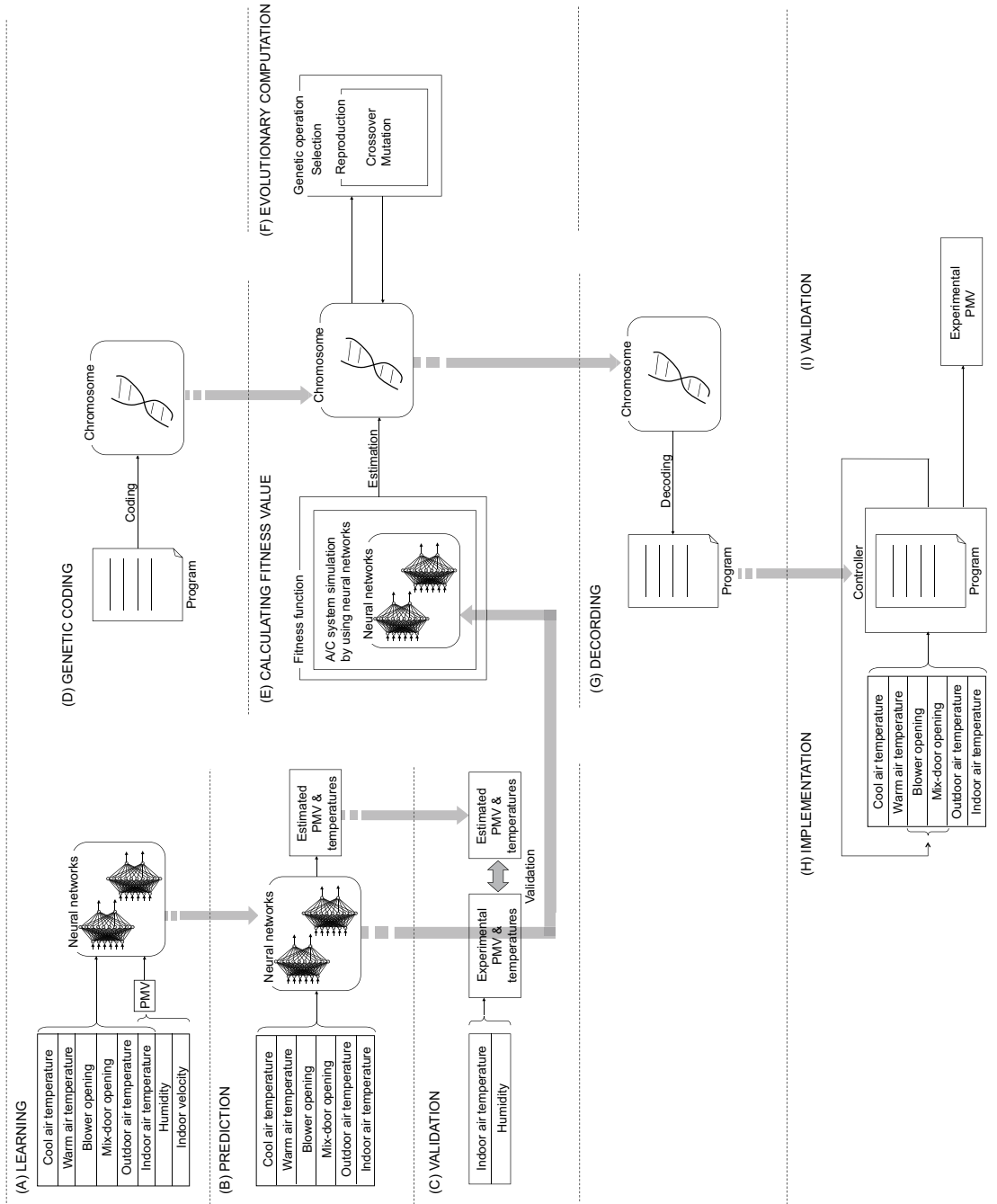
## 5.4 プログラム自動生成への適用

### 5.4.1 計算の流れ

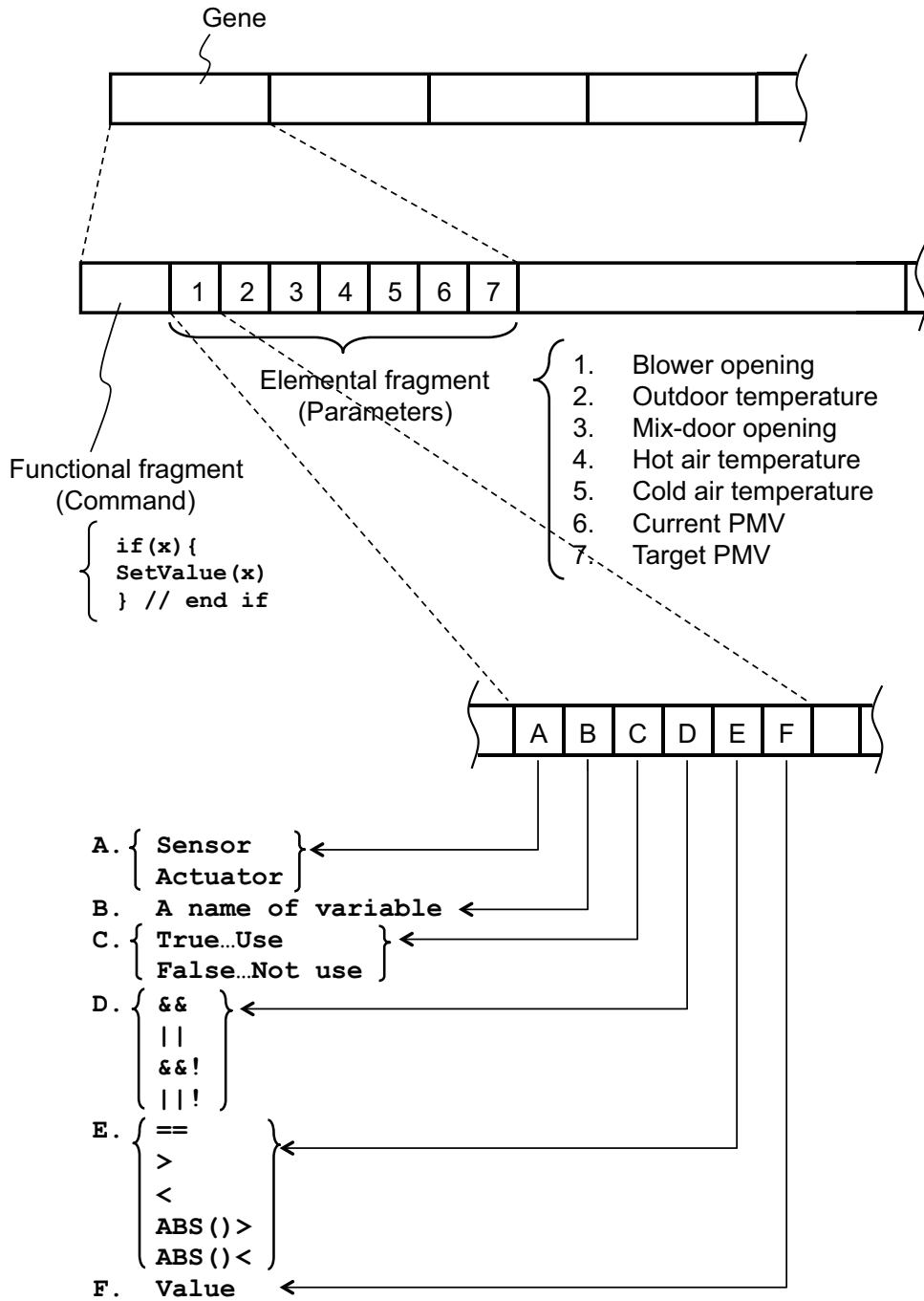
図5.3に空調制御プログラム自動生成の流れを示す。図で(A)～(C)および(E)はニューラルネットに関連し、(D)～(G)はGAに関連する。GAはプログラムの自動生成に使用し、ニューラルネットは車室内PMVおよび実験システムの3箇所の温度を推定し、GAの評価関数内で行われる空調制御シミュレーションで使用する。(A)学習フェーズでは、ニューラルネットの入出力にかかわるデータをすべて計測し、これらのデータを教師データとしてニューラルネットの学習を行う。(B)予測フェーズでは、ニューラルネットの入力に必要なデータを計測し、そのデータを入力として(A)で学習したニューラルネットを使用し、PMVおよび温度を推定する。(C)検証フェーズでは、実験で求めたPMVと温度とニューラルネットで予測した値を比較し、得られたニューラルネットが有用であるかの検証を行う。(D)コーディングフェーズでは、制御プログラムを染色体にコーディングする。(E)評価関数の計算フェーズでは、(A)～(C)で得られたニューラルネットを使用して、コーディングされたプログラムの空調制御シミュレーションを行い、その結果に基づいて染色体の評価を行う。(F)進化計算フェーズではGAを使用して染色体コーディングされたプログラムを進化させる。(G)進化計算が終了したら染色体をデコードし、(H)得られたプログラムを実機に搭載して空調制御を行う。(I)自動生成されたプログラムは実験などを通じて信頼性を評価する必要がある。

### 5.4.2 染色体コーディング

制御プログラムの自動生成にGAを適用するため、図5.4に示す染色体で表現する。染色体は一つのプログラムを表しており、その各遺伝子がプログラム上の一つの命令に相当する。染色体は複数の遺伝子で構成されている。さらに、染色体上の遺伝子は1つの関数断片と複数の要素断片で構成されている。関数断片が遺伝子の先頭に一つだけ存在し、要素断片がその後ろにセンサとアクチュエータの合計数だけ続く。本研究の場合、遺伝子上に配置される要素断片は、プロワ開度、冷却装置直後温度、ミックスドア開度、ヒータ直後温度、室内代表温度、外気温、目標温度の7つに対応している。さらに要素断片を細分化し、図5.3に示すように仮にA, B, C, D, E, Fと呼ぶ6つの部分に分ける。関数断片はIF, ENDIF, SETのいずれかでIFの場合は条件文としてデコードされる。SETの場合は、アクチュエータの操作量を設定するプログラムとしてデコードされる。A, C, D, Eのとりうる値とその意味を表5.1～表5.4にまとめる。A値は要素断片の値



5.3: Program automatic generation procedure



☒ 5.4: Chromosome structure



がセンサ値なのかアクチュエータの操作量なのかを表す．B 値は変数名を表す．C 値は染色体を制御プログラムにデコードする際に，この要素断片を使用するか否かを示す．C 値が TRUE ならばプログラム内の条件文に C の含まれる要素断片をデコードする．D 値と F 値は遺伝子上の関数断片が IF の場合に使用する．D 値は条件文の中で要素断片を使用する際に，他の要素断片が示す条件と AND をとるのか OR をとるのかを規定する．E 値は条件文が大小不等号，等号のどれを表現しているのかを示す．F は 0 F 1 の任意の値をとり，センサ値もしくはアクチュエータの操作量としてデコードする．染色体コーディングのときにはセンサ値およびアクチュエータの操作量が 0~1 の範囲に入るように適当にスケールすることが必要になる．

遺伝子からプログラムへのデコードの例として，表 5.5 のごとくエンコードされた遺伝子を考える．この遺伝子は，制御プログラムとして次のようにデコードされる．

```
if((t_out>0.456)||!(abs(t_hot)<0.012)&&!(pmv_cur==0.678)){
```

図 5.7 に染色体の一部とそこに対応するプログラムを例示する．関数断片と 7 つの要素断片が図に示すようなものである場合には，これに対応する制御プログラムの一部分が，

```
if((blw_open==0.23)|| (t_out>0.456)&&(abs(t_cold)<0.345)
    ||(pmv_cur==0.678)){
```

## 5.5 可変長染色体の成長抑制

使用する染色体は可変長である．一般に可変長の染色体は計算を進めるにともない解集合の染色体長が増大することが問題となる．本研究では長さに上限を設定することで，染色体長が過度に増加することを抑制する．

## 5.6 染色体上のプログラムの実行

染色体上のプログラムは図 5.8 に示すフローチャートにしたがって一定の時間間隔で 1 ステップずつ実行される．本研究でのサンプリング時間は  $\Delta t=5$  秒とした．関数断片には IF，SET，ENDIF のいずれかの関数が格納され，要素断片にその引数が格納される．遺伝子上の関数が IF の場合はセンサ値による条件分岐を表現しており，条件文が真ならば染色体上の次の遺伝子の関数が実行される．偽

表 5.1: Parameter A

A 値	意味
0	センサ
1	アクチュエータ

表 5.2: Parameter C

C 値	意味
TRUE	使用
FALSE	未使用

表 5.3: Parameter D

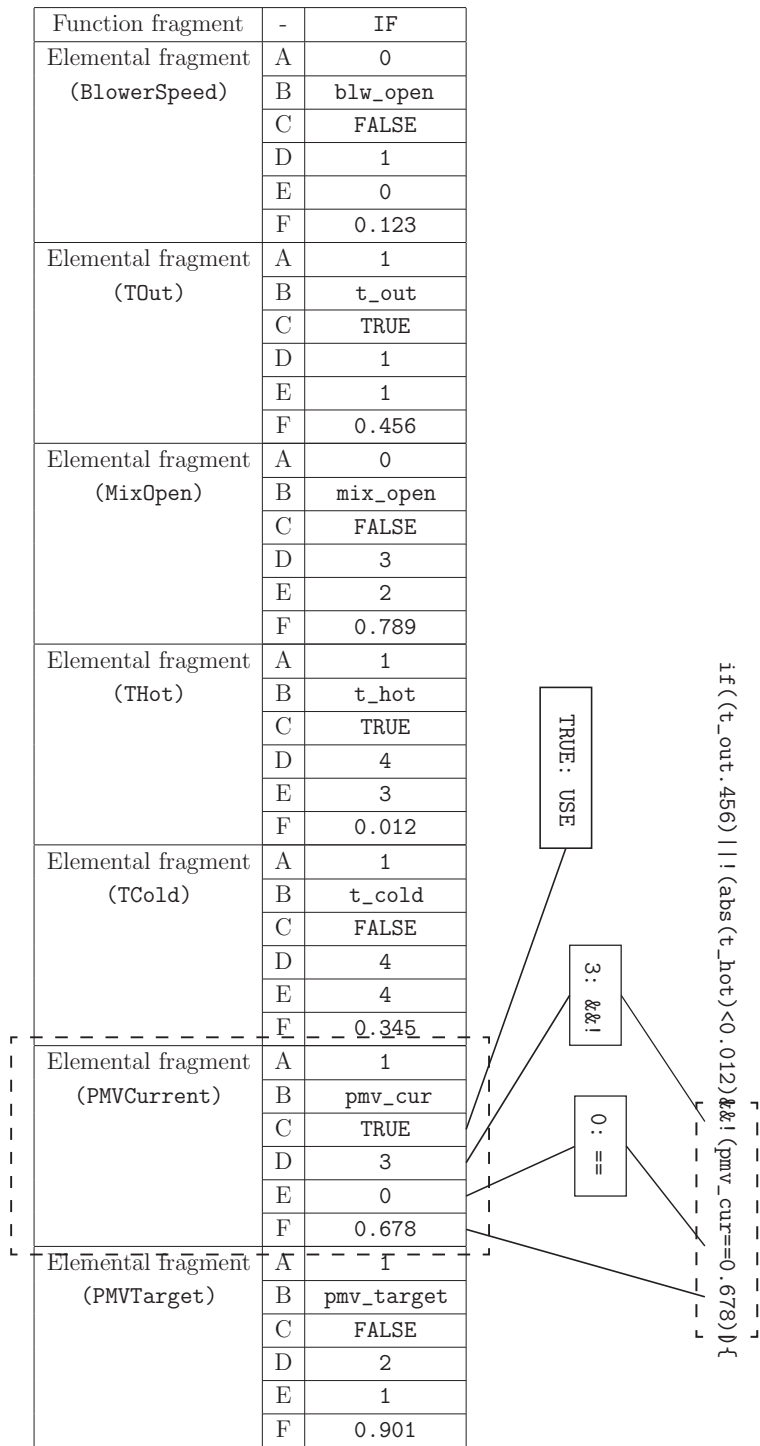
D 値	意味
1	&&
2	
3	&&!
4	!

表 5.4: Parameter F

F 値	意味
0	==
1	>
2	<
3	< (絶対値が小)
4	> (絶対値が大)

表 5.5: Chromosome example

Function fragment	-	IF
Elemental fragment (BlowerSpeed)	A	0
	B	blw_open
	C	FALSE
	D	1
	E	0
	F	0.123
Elemental fragment (TOut)	A	1
	B	t_out
	C	TRUE
	D	1
	E	1
	F	0.456
Elemental fragment (MixOpen)	A	0
	B	mix_open
	C	FALSE
	D	3
	E	2
	F	0.789
Elemental fragment (THot)	A	1
	B	t_hot
	C	TRUE
	D	4
	E	3
	F	0.012
Elemental fragment (TCold)	A	1
	B	t_cold
	C	FALSE
	D	4
	E	4
	F	0.345
Elemental fragment (PMVCurrent)	A	1
	B	pmv_cur
	C	TRUE
	D	3
	E	0
	F	0.678
Elemental fragment (PMVTarget)	A	1
	B	pmv_target
	C	FALSE
	D	2
	E	1
	F	0.901



☒ 5.5: IF-THEN statement

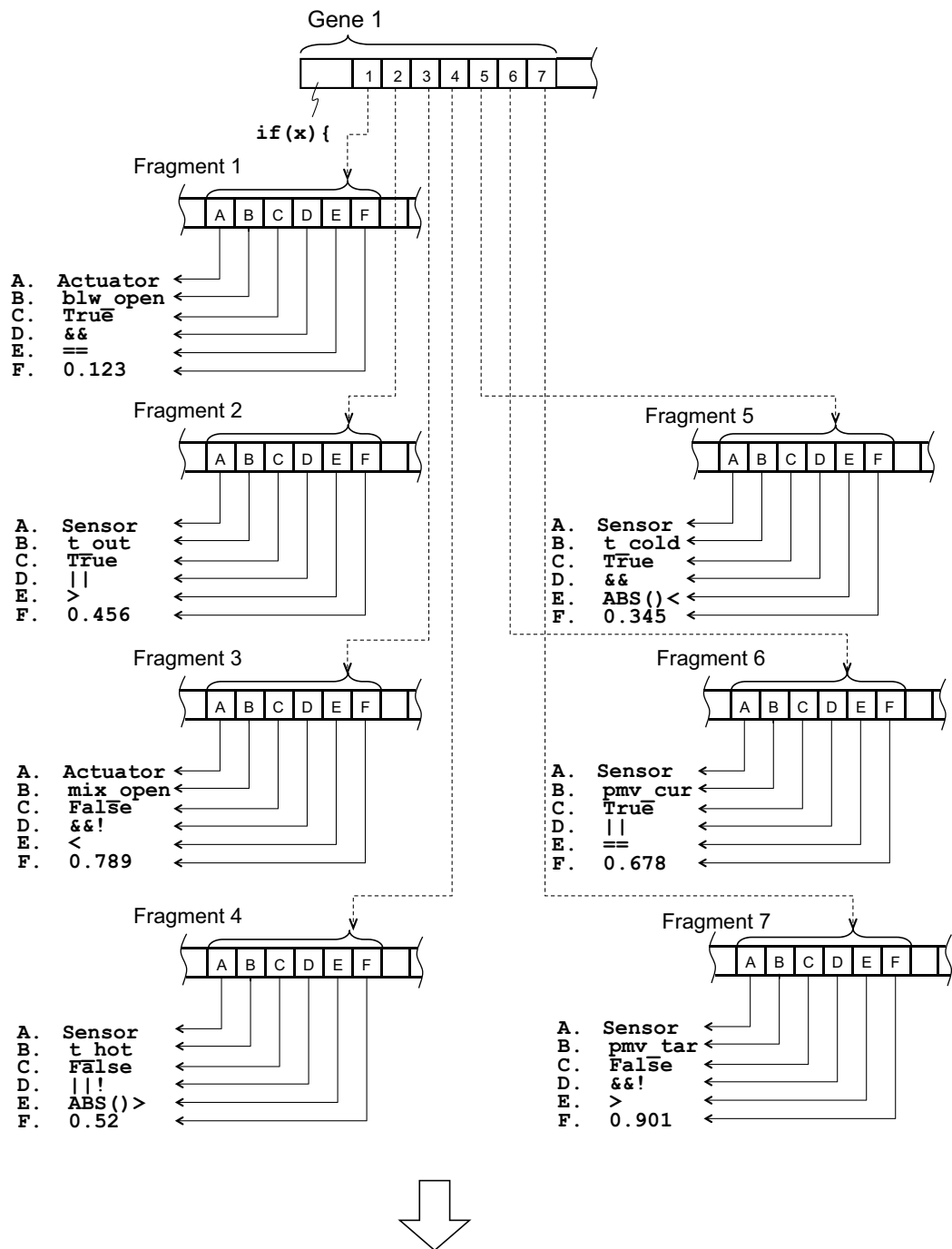
Function fragment	-	IF
Elemental fragment (BlowerSpeed)	A	0
	B	blw_open
	C	FALSE
	D	1
	E	0
	F	0.123
Elemental fragment (TOut)	A	1
	B	t_out
	C	TRUE
	D	1
	E	1
	F	0.456
Elemental fragment (MixOpen)	A	0
	B	mix_open
	C	FALSE
	D	3
	E	2
	F	0.789
Elemental fragment (THot)	A	1
	B	t_hot
	C	TRUE
	D	4
	E	3
	F	0.012
Elemental fragment (TCold)	A	1
	B	t_cold
	C	FALSE
	D	4
	E	4
	F	0.345
Elemental fragment (PMVCurrent)	A	1
	B	pmv_cur
	C	TRUE
	D	3
	E	0
	F	0.678
Elemental fragment (PMVTarget)	A	1
	B	pmv_target
	C	FALSE
	D	2
	E	1
	F	0.901

```

SetValue(blw_open, 0.123);
SetValue(mix_open, 0.789);

```

☒ 5.6: Set value statement



```
if((blw_open==0.23)|| (t_out>0.456) &&(abs(t_cold)<0.345) || (pmv_cur==0.678)) {
```

☒ 5.7: Chromosome structure and its program decoding

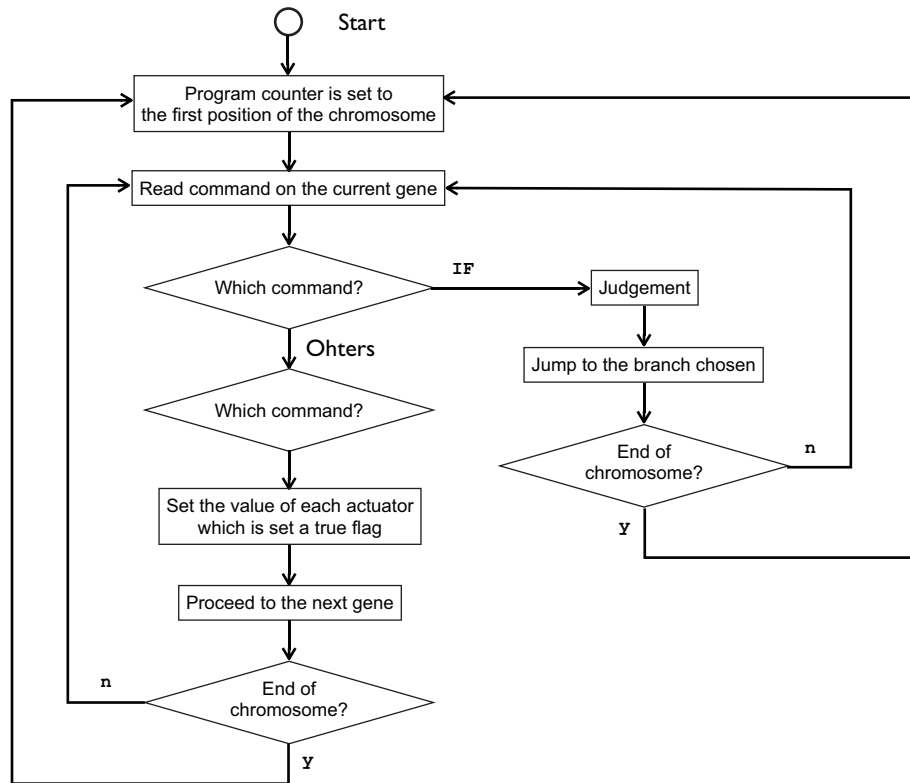


図 5.8: Flowchart of program generation

の場合には次に同レベルのネストの ENDF が現れる位置の次の遺伝子の関数が実行される。遺伝子上の関数が SET のときは、ブロワモータやミックドア、モードドアの開度が設定される。

### 5.6.1 評価関数の計算

評価関数は染色体の適応度を計算する関数で、特に GA の選択操作において重要である。選択操作ではより適応度の高い染色体を解集合の中から選択する。この操作により、解集合全体の適応度は GA の計算を進めるに従い上昇する。本研究では、実験システムを 30 分間運転したときの設定温度と室内の温度の偏差が少ないほど適応度が高くなるように評価関数を設計する。このため、適応度を算出するためには各解候補について、実験システムを 30 分間運転した場合の車室内温度の過渡応答のシミュレーションが必要になる。評価値を算出するためのシミュレーションは FDM や FEM などの数値解法を用いることも可能であるが、1 個体あたりの計算コストが大きくなるため、適応度算出のためのシミュレーションとしては不適である。そこで、本手法では第 4 章で述べた実測値に基づく温度

推定用ニューラルネットを構成し，車室内温度の過渡状況を推定し，適応度の算出を行う．

### 5.6.2 ニューラルネットの計算

本研究で使用するニューラルネットは図 5.9, 図 5.10 に示す入力層 6, 出力層 2, 中間層 10 の階層型ニューラルネットワークである．このニューラルネットを 2 系統使用し，4 値を推定する．2 つのニューラルネットワークはともに (1) 各時間でのヒータ直後温度，(2) 冷却装置直後温度，(3) 室内平均温度，(4) ブLOWER回転数，(5) ミックスドア開度，(6) 外気温度の 6 つを入力データとする．また，教師データは，一方のニューラルネットが入力データに対して 5 秒後の (1) 頭部付近温度，(2) 脚部付近温度，他方のニューラルネットが入力データに対して 5 秒後の (1) 冷却装置直後温度，(2) ヒータ直後温度である．これらのデータを得るために，運転条件を種々に変え，サンプリング間隔 5 秒で 3710 組（約 5 時間分）のデータを計測した．このデータから，同じ入力に対して違う出力となるデータなど矛盾したデータを削除し，実際に学習に使用したデータは 2793 組である．

### 5.6.3 適応度の計算

出来上がったニューラルネットを使用して 5 秒後の車室内温度を次々に求め，2700 秒間の過渡状況を推定する．エアコンシステムは染色体上の制御プログラムにより駆動されているものとする．目標 PMV を 0 として，設定時間内の空調制御シミュレーションを行い，目標 PMV と推定 PMV の偏差を積算し，その積算値の小さいものほど評価値が高くなるようにする．本研究では次式に示すように積算値の逆数を評価値とする．但し，積算値が 0 の場合はそのプログラムが目的のプログラムとなり，その時点で進化計算は終了する．

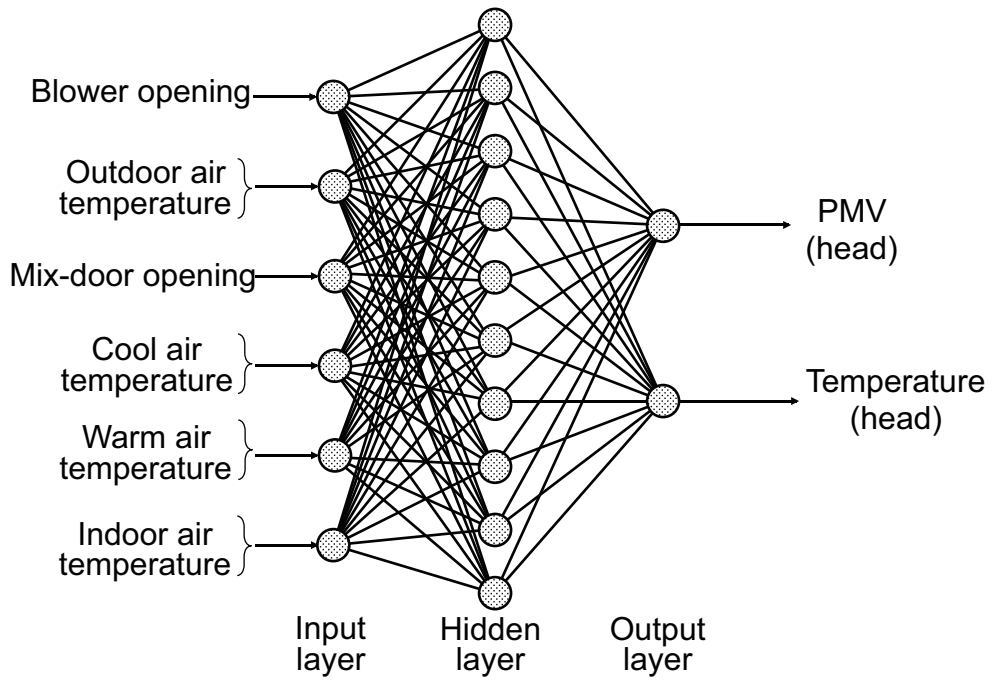
$$\text{fitness} = \frac{1}{\int_0^T |V_{\text{tar}}(\tau) - V_{\text{cur}}(\tau)| d\tau} \quad (5.1)$$

ここで， $V_{\text{cur}}(\tau)$ ， $V_{\text{tar}}(\tau)$  はそれぞれ時刻  $\tau$  における推定 PMV，目標 PMV を表す． $T$  はシミュレーションの終了時間を表し，本研究の場合は 2700 である．

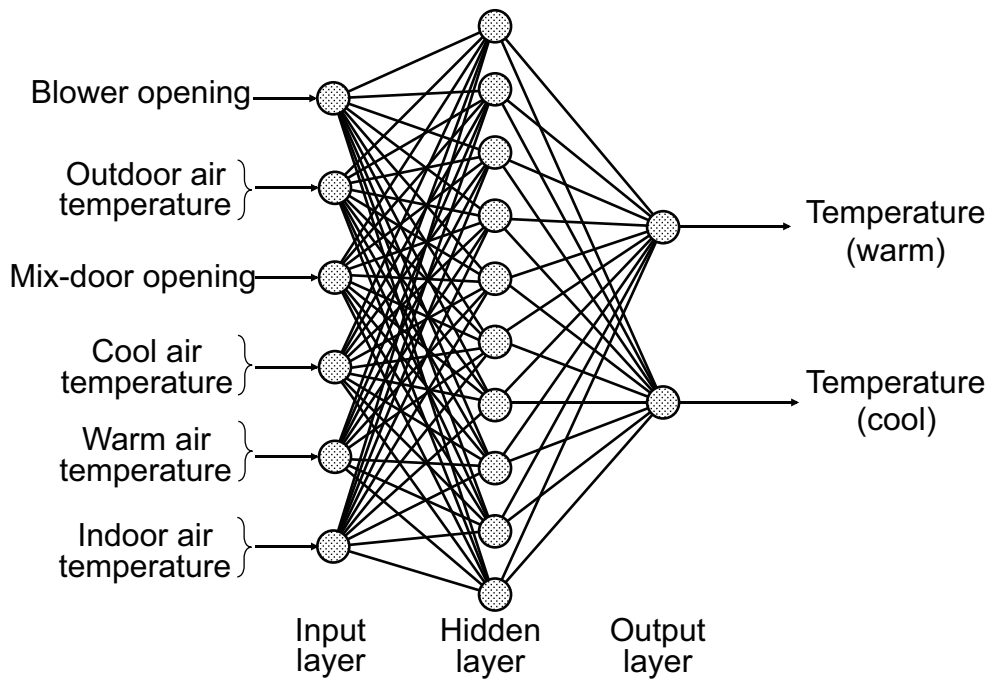
## 5.7 結果

図 5.11 に個体数 10，突然変異率 0.2，交叉率 1.0，1000 世代の進化計算にて得られたプログラムで制御シミュレーションを行ったときの PMV の過渡変化を示





☒ 5.9: Neural networks

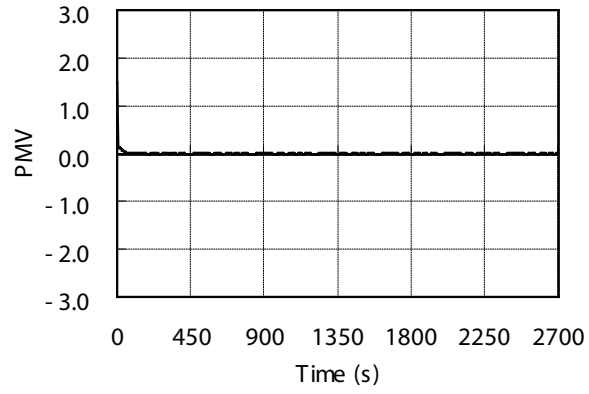


☒ 5.10: Neural networks

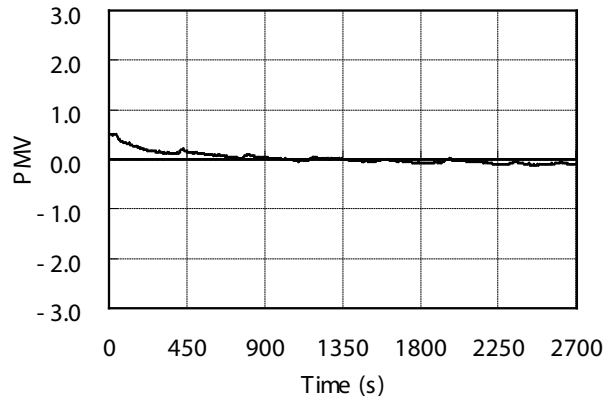
す．初期状態で2（暖かい）であったPMVは，得られたプログラムによりブロ  
ワ開度，ミックスドア開度を変化させ，PMVが0（ニュートラル）になるように  
制御されていることが確認できる．図5.12に同プログラムで実機実験を行った結  
果を示す．このグラフから実機においてもPMVが0を保つような制御が行われ  
ていることがわかる．図5.13は実験時のブロワ開度とミックスドア開度の変化を  
示したものであるが，今回の進化計算ではブロワ開度を頻繁に変化させ，ミッ  
クスドア開度はあまり変化させずに車室内の快適度を保つ制御プログラムが得られ  
ている．

## 5.8 本章のまとめ

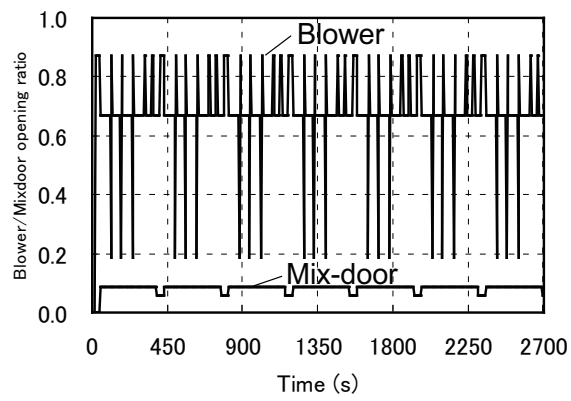
本章では車室内空調制御器のプログラミング支援のため，進化計算により空調  
制御プログラムを自動生成する手法を提案した．オフライン学習に基づくニュー  
ラルネットを用い，GAを用いた制御プログラムの進化的自動生成の際に快適性  
シミュレーションを行うこととした．本研究では，まず，ニューラルネットを用  
いて自動車の既存のセンサ情報から車室内の快適度および温度を推定する方法を  
提案し，実験的にその有用性を確認した．次に，GAの評価関数内での空調制御  
シミュレーションを前述のニューラルネットを用いて行い，評価値を求めた．さ  
らに，染色体のコーディング方法を提案し，以上で述べた評価関数と染色体を使  
用して進化計算を行い空調制御プログラムを自動生成した．最後に，自動生成さ  
れたプログラムを実機実験より検証した．この結果，本手法は車室内空調制御器  
のプログラム支援が可能であることが確認された



☒ 5.11: Transient change of PMV (simulation)



☒ 5.12: Transient change of PMV (experiment)



☒ 5.13: Control sequence of blower speed and mixdoor opening

```

1: /*[7]*/ Wait(5SEC); SetValue( Device#1, 0.31); SetValue(Device#3, 0.93);
2: /*[7]*/ Wait(5SEC); SetValue(); SetValue(Device#3, 0.21);
3: if (&&(Device#1.abs()>0.20)&&(Device#3.abs()<0.64)&&!(Device#4<0.57)&&(Device#6>0.93)&&(Device#7.abs()<0.72)){ 4: }
5: if (&&!(Device#1.abs()<0.58)&&!(Device#2<0.61)&&!(Device#4>0.75)){
6: /*[7]*/ Wait(5SEC); SetValue(); SetValue(Device#3, 0.30);
7: /*[7]*/ Wait(5SEC); SetValue( Device#1, 0.81);
8: }
9: /*[7]*/ Wait(5SEC); SetValue( Device#1, 0.44);
10: if (&&(Device#1<0.42)&&!(Device#3.abs()>0.28)&&(Device#4<0.98)&&(Device#6<0.88)){
11: if (&&(Device#2<0.31)&&(Device#3.abs()<0.22)){
12: /*[7]*/ Wait(5SEC); SetValue( Device#1, 0.65); SetValue(Device#3, 0.49);
13: /*[7]*/ Wait(5SEC); SetValue();
14: }
15: /*[7]*/ Wait(5SEC); SetValue( Device#1, 0.60); SetValue(Device#3, 0.24);
16: }
17: if (&&(Device#1.abs()>0.62)&&(Device#5<0.98)&&(Device#7<0.26)){
18: if (&&(Device#4.abs()<0.65)&&!(Device#5<0.47)){
19: if (&&!(Device#2<0.61)&&!(Device#3<0.71)&&!(Device#5>0.71)&&!(Device#7>0.10)){
20: if (&&(Device#2<0.31)&&(Device#3.abs()<0.22)){
21: /*[7]*/ Wait(5SEC); SetValue( Device#1, 0.65); SetValue(Device#3, 0.49);
22: }
23: }

```

☒ 5.14: Initial program















# 第6章 環境の不確実性を考慮した ロバストな制御回路用ハード ウェア記述言語の自動構成

## 6.1 まえがき

本章では，制御器に Programmable Logic Device (PLD) を利用したシステムにおいて，その制御回路を記述するハードウェア記述言語 (VHDL) を進化計算により自動構成する．進化計算を適用し，制御プログラムや制御回路を自動構成する枠組みでは，従来より，局所解の問題に起因して，ロバスト性を欠く制御器が設計されることが問題となっている．本研究では，環境の不規則性を考慮したロバストな制御回路用 VHDL の自動構成方法について述べる．

## 6.2 進化計算による制御器の自動構成

### 6.2.1 PLD と VHDL

本研究では，Programmable Logic Device (PLD) と呼ばれる，設計者が半導体内部の論理回路を手許で書換え可能な大規模集積回路 (LSI) を進化計算を用いて自動構成する．PLD には，Complex Programmable Logic Device (CPLD) と Field Programmable Gate Array (FPGA) の 2 種類が存在し，双方とも VHDL により内部の論理回路を記述する．FPGA の場合は，内部ロジックに直接関与するのは，Configurable Logic Block (CLB) と呼ばれる論理ブロックの機能を選択するためのビット情報とインターコネクトと呼ばれる複数の CLB の接続状態を表すビット情報である．CPLD では，マクロ・セルと呼ばれる複数の機能ブロック同士の接続関係を規定する接続領域のビット情報がこれにあたる．VHDL は内部ブロックの接続関係を表すビット情報を直接記述するのではなく，よりメタな，抽象的なレベルで言語表現し，PLD のハードウェアと切り離して論理回路を設計することもできる．VHDL で表現される論理回路は論理合成ツールを使用して，ハードウェアに適したビット情報に変換し，目的のハードウェアに書き込む．目的の

```

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity HALF_ADDER is
  port(
    A,B : in std_logic;
    S,CO : out std_logic);
end HALF_ADDER;

architecture DATAFLOW of HALF_ADDER is
  signal C, D : std_logic;
begin
  C <= A or B;
  D <= A nand B;
  CO <= not D;
  S <= C and D;
end DATAFLOW;

```

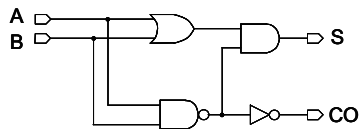


図 6.1: VHDL for simple logical circuit

ハードウェアが CPLD や FPGA の場合には，ダウンロードケーブルを介して得られた論理回路をハードウェアに書き込み，目的の論理回路をもつ半導体を手許で直ちに得ることができる．簡単な論理回路とこれを表現する VHDL を図 6.1 に示す．

## 6.2.2 進化計算による制御器自動構成の枠組み

進化計算を用いて PLD を最適化する研究が多く行われている．従来研究では進化計算で使用する遺伝子に論理ブロック機能選択のビット情報とインターコネクタの接続状態を表すビット情報に対応させて PLD の内部ロジックを自動構成されている．このようにすると，進化計算で使用する遺伝子の表現が簡便であり，また，ハードウェアに依存して染色体長が決定されるため，自動構成の計算における解探索範囲を狭める効果も期待できる．その一方で，設計者は使用するハードウェアの規模とピン配置をあらかじめ決定しておかなければならないというデメリットがある．設計の初期段階でそれらを決定することは難しい．

そこで，本研究ではこれらのビット情報を自動構成の対象とするのではなく，ハードウェアとは切り離して論理回路を表現することのできる VHDL を自動構成の対象とし，VHDL を進化計算の染色体として表現する．この方法では，染色体表現は複雑になるが，ロジックが自動構成された後に論理回路の規模に応じて適切なハードウェアを選択することができ，また，ピン配置も自由に選択することが可能となる．さらに，CPLD や FPGA だけではなく，ASIC など HDL で設計可能な他の半導体への転用も可能である．その際，染色体の再コーディングや進化計算の再計算は全く必要ない．

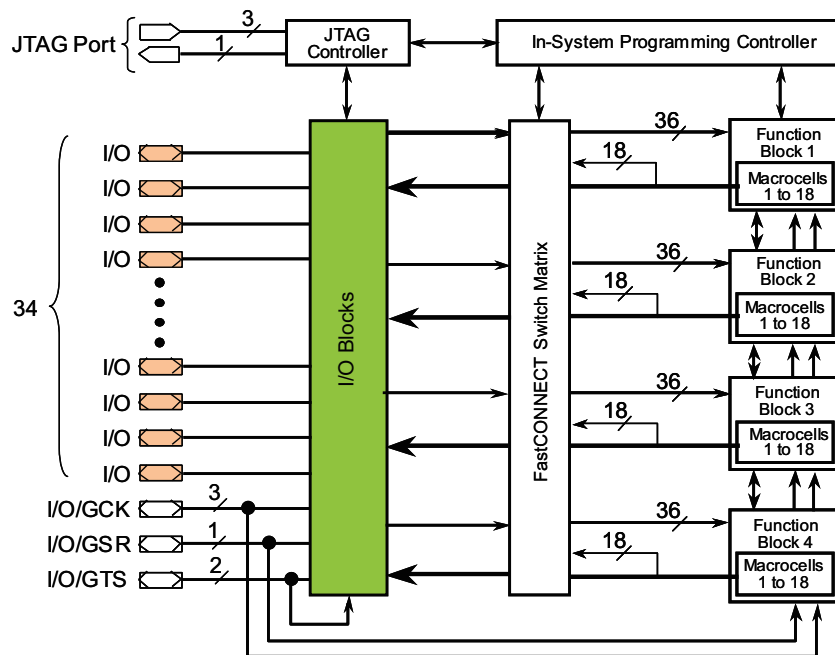
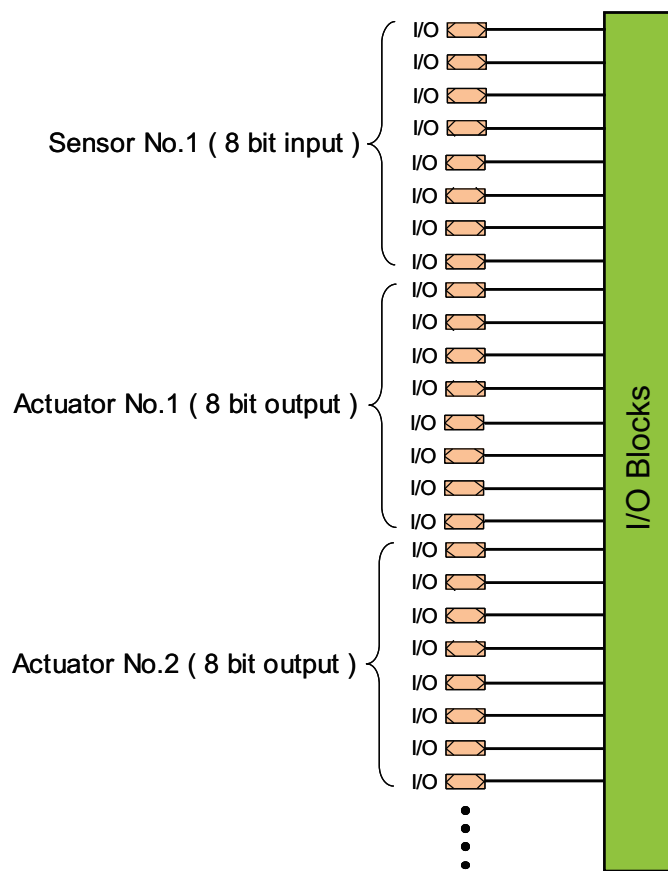


図 6.2: Xilinx XC9572 Architecture

Xilinx 製 XC957 を一例に適用の枠組みを述べる．図 6.2 に 44 ピンの XC9572 の内部ブロック図を示す．この CPLD は 72 個のマクロセルと 1600 個のゲートをもち，44 ピンのうち 34 ピンを入出力 (I/O) として利用できる．これらの I/O をどのようなピン数でセンサやアクチュエータの信号として割付けるかは，設計者に委ねられる．図 6.3 の例では，1 個のセンサに 8 ビット，2 個のアクチュエータにそれぞれ 8 ビットを割当てている．制御器として自動構成された VHDL の一例を図 6.4 に示す．この VHDL は，図 6.3 で例示した I/O に対応している．VHDL は，

- エンティティ
- 信号宣言
- アーキテクチャ

の 3 つの部分で構成され，(a) エンティティに PLD の I/O を，(b) 信号宣言に内部信号をそれぞれ定義する．また，信号の型として「std\_logic」という単純な 1 ビットの論理を表す型のほか，多ビットの論理を表す「std\_logic\_vector」という型を使用できる．ここでは「std\_logic」型のみ取り扱うが，後述の染色体表現は「std\_logic\_vector」を取り扱うことも可能である．また，「std\_logic\_vector」



☒ 6.3: I/O assignment example

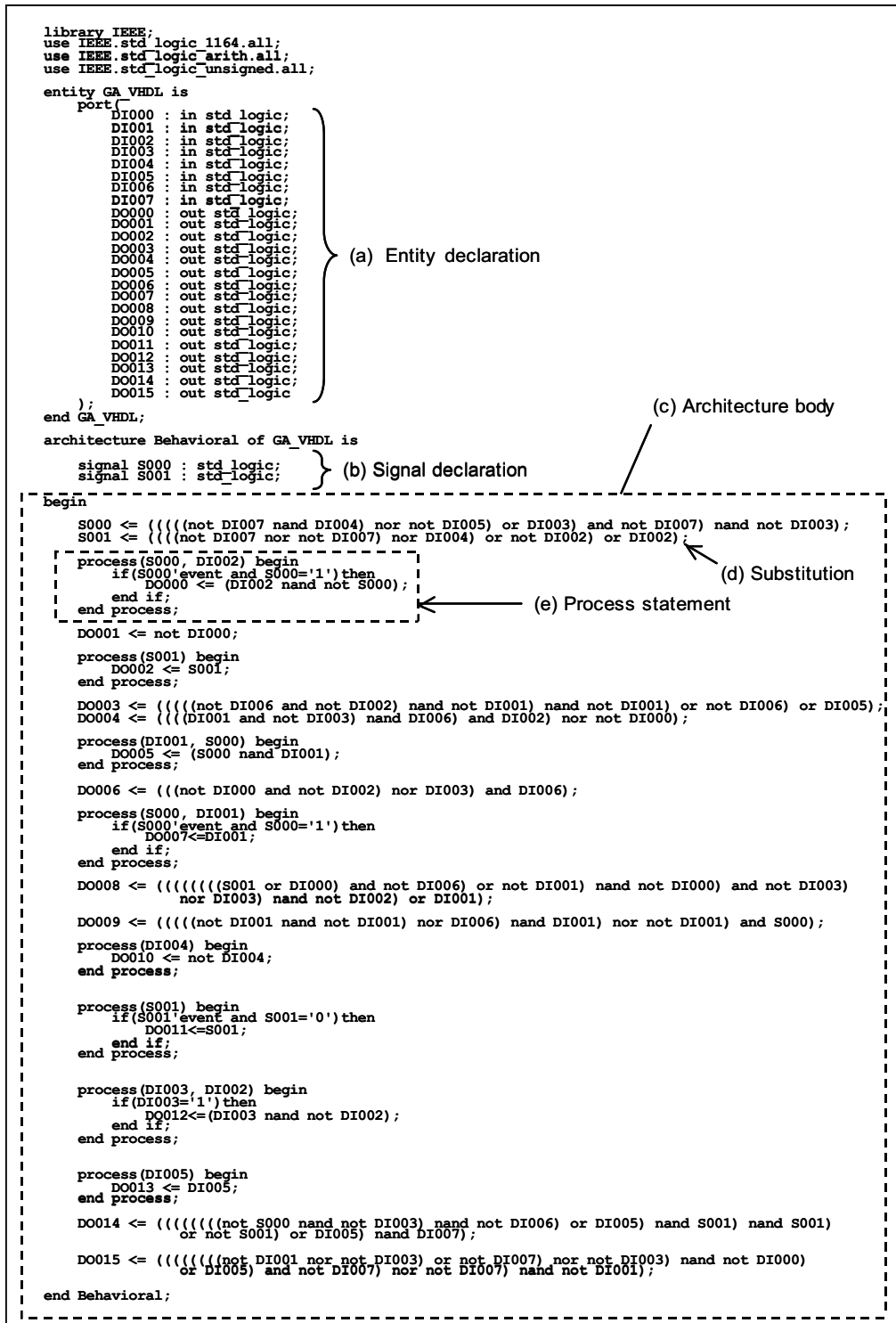


图 6.4: Auto-generated VHDL

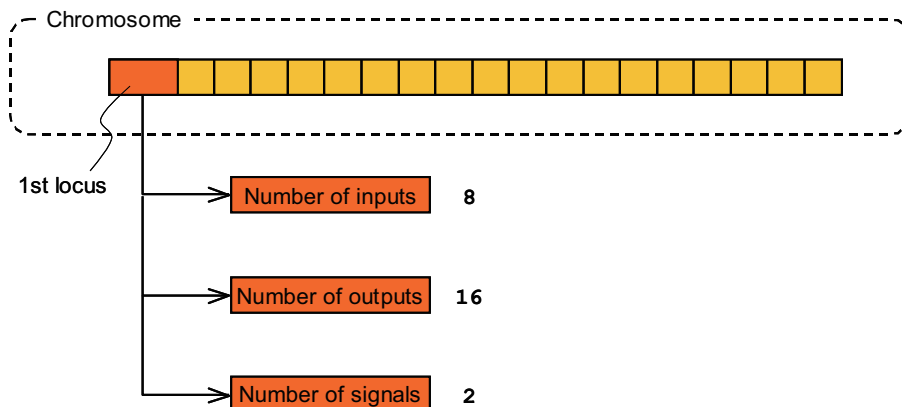


図 6.5: Signal definition at first locus

型は複数の「std\_logic」型で表現できるため、「std\_logic」型のみ取り扱いによって、自動構成される論理回路が制限されるわけではない。図 6.5 ~ 6.7 に染色体構造の一部を示す。VHDL の記述を表現するために、染色体を可変長の木構造とする。染色体の先頭には図 6.5 に示す通り、入力数、出力数、信号数の 3 つの値を格納する。すべての入出力信号、内部信号が同じ「std\_logic」型である場合には、信号数から入出力信号と内部信号の VHDL の記述を復元することができる。図 6.5 では入力信号数が 8、出力信号数が 16、内部信号数が 2 であることを意味しており、染色体上のこの数から VHDL の入出力信号の記述（図 6.4(a)）と内部信号の記述（図 6.4(b)）が復元される。

図 6.6 は VHDL の代入文を表す染色体構造で、図 6.4(d) に対応する。また、図 6.7 は VHDL のプロセス文における条件文を表す染色体構造で、図 6.4(e) のセンシティブリティリストに「S000」、「DI002」をもつにプロセス文に対応する。この例では、プロセス文の中にさらに条件文があり、ネストレベルが高く、その分、染色体の階層も深くなっている。プロセス文のセンシティブリティリストやプロセス文内の複数行の記述に相当する染色体は可変長になっており、センシティブリティリストに列挙される変数が変化したり、プロセス文内の記述が複数行にわたっても対応することができる。このように、染色体を木構造とし、各階層の遺伝子座によって可変長の構造を採用することにより、複雑な VHDL の記述を染色体として表現することが可能となる。



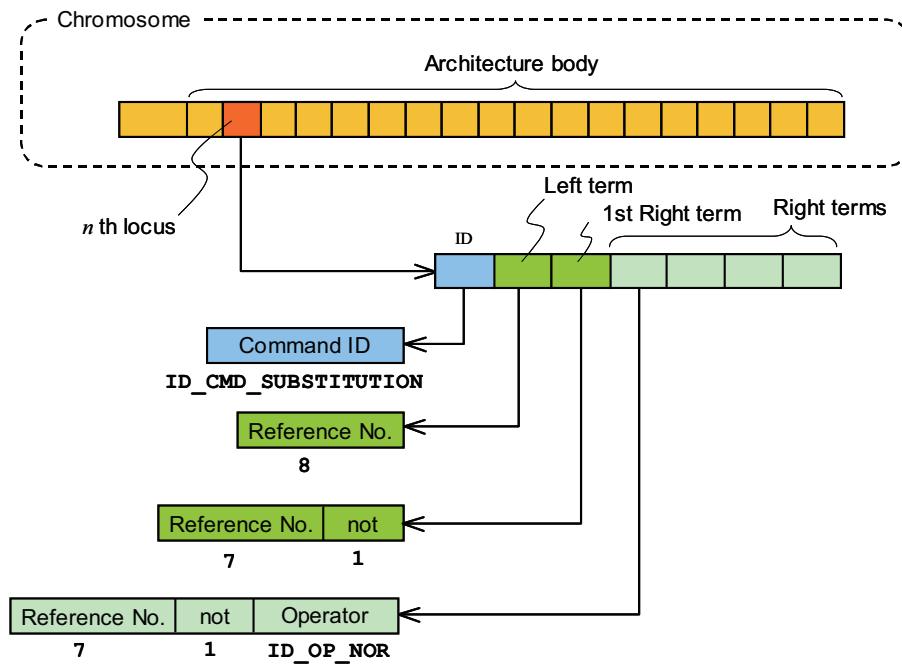


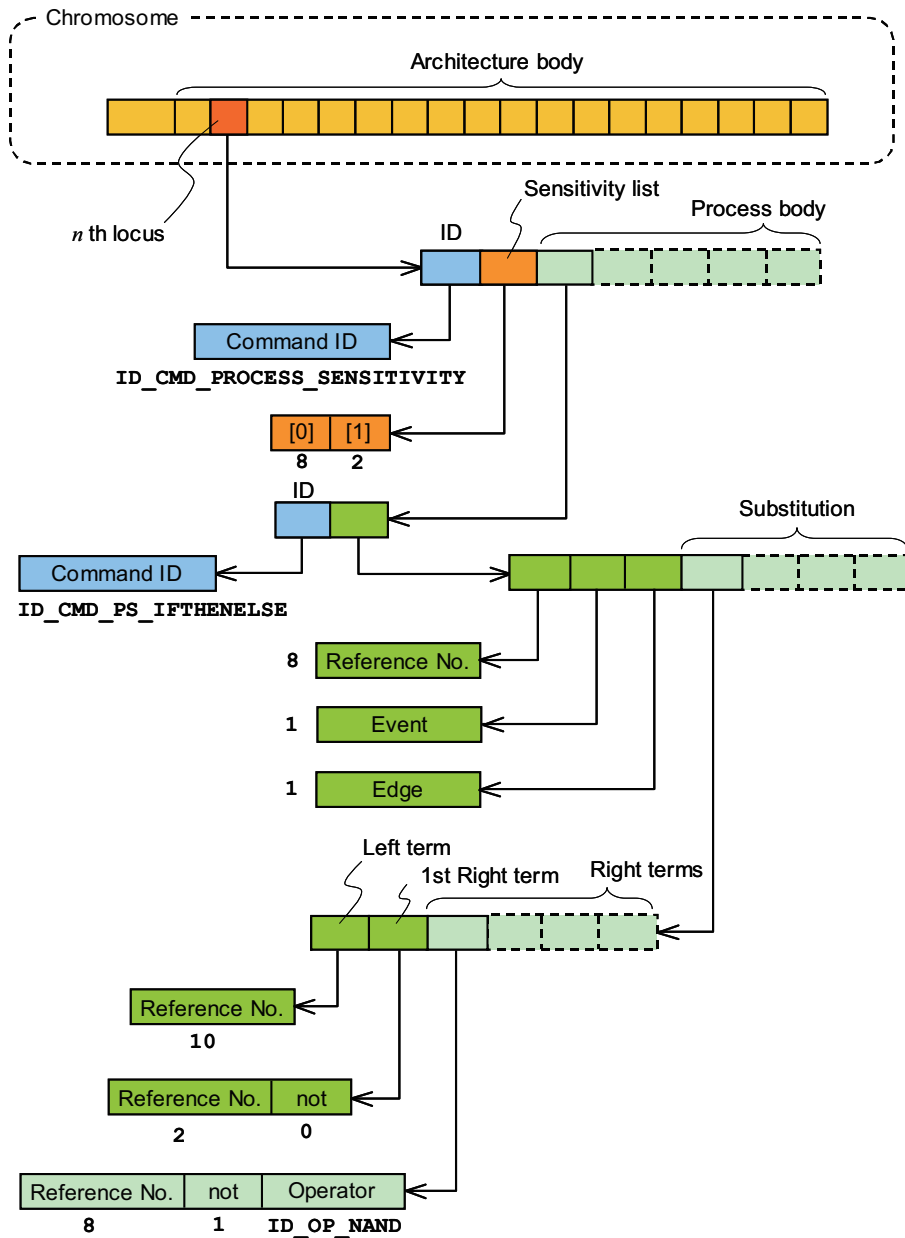
図 6.6: Substitution

### 6.2.3 遺伝的操作

GA では、複数の染色体からなる集団を形成し、その中から適応度の高い2つの染色体を選択し、交叉、突然変異の遺伝的操作を加え、新たな染色体を複製する。この遺伝的操作を繰り返すことで元の集団の持つ良い形質を維持しつつ新たな形質をもつ集団を生成し、集団全体の適応度を上げ、目的の解を探索する。交叉は選択された2つの染色体をそれぞれある位置で分割し一部を入れ替える操作、突然変異は1つの染色体の一部を変化させる操作である。いずれの操作を加える場合も、染色体上の遺伝子座に矛盾が生じないようにする必要がある。

本章のように複雑な階層構造をもつ染色体では、単純にランダムに染色体上の位置を決定し、交叉・突然変異の遺伝的操作を作用させると、直ちに染色体に矛盾を生じる。そこで、染色体の生成と遺伝的操作に関して次の5つの制限を課す。

1. 染色体長に関する制限：最上位層における染色体長は、内部信号数と出力信号数の和に1だけ加えた長さとする。これは、内部信号と出力信号を決定する回路記述をそれぞれ1回づつに制限する意図があり、また、信号数を決定する遺伝子を先頭に1つ追加しているためである。
2. 参照番号を用いた符号化：すべての信号は直接染色体上に符号化せず、参



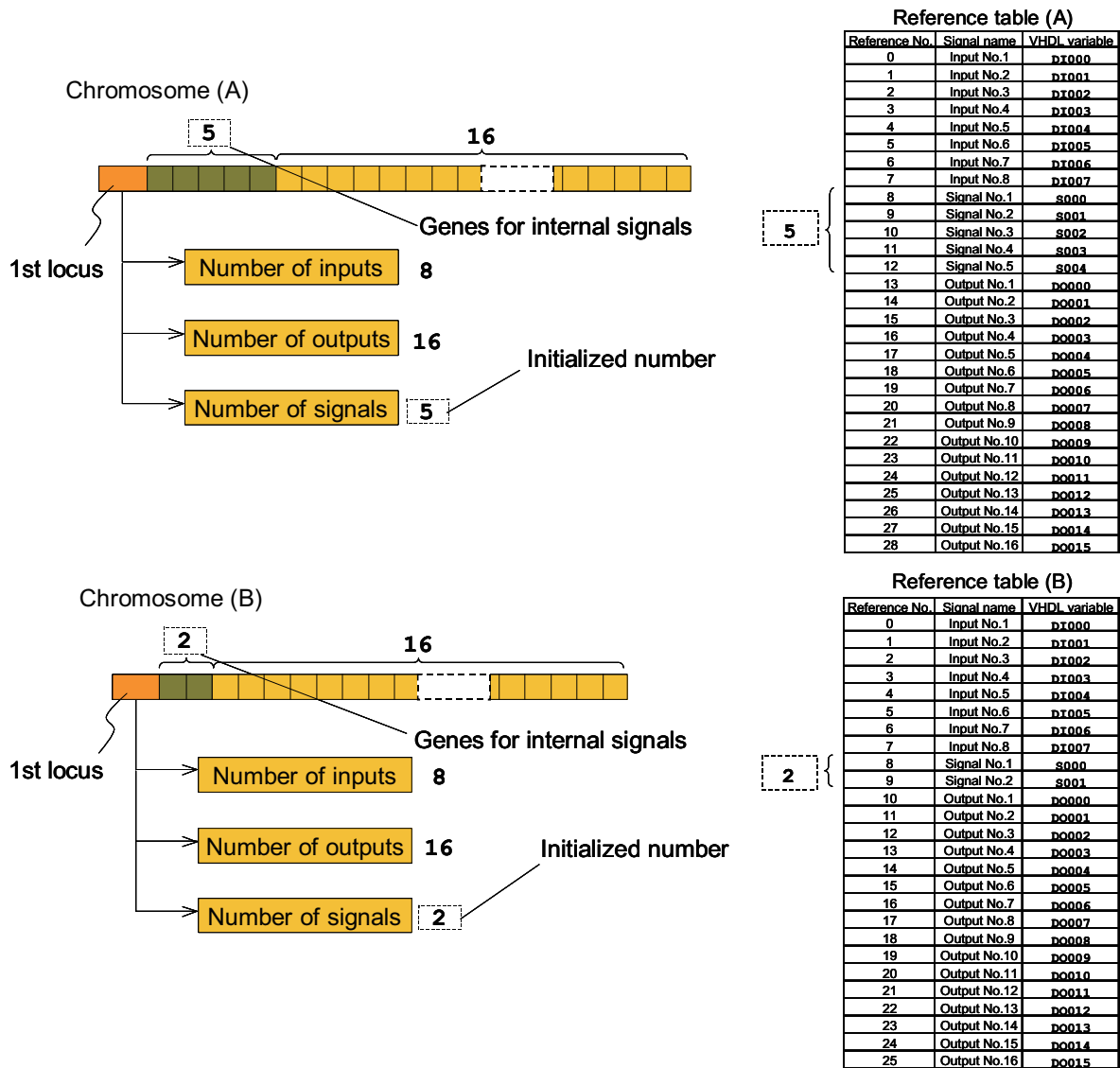
☒ 6.7: If-then-else statement in process body

照番号を用いて符号化する．この制限と以下の2つの制限は，長さが異なる染色体に対して交叉や突然変異の操作を加えた際に，各信号に対する記述の過不足が生じることを防ぐ目的がある．

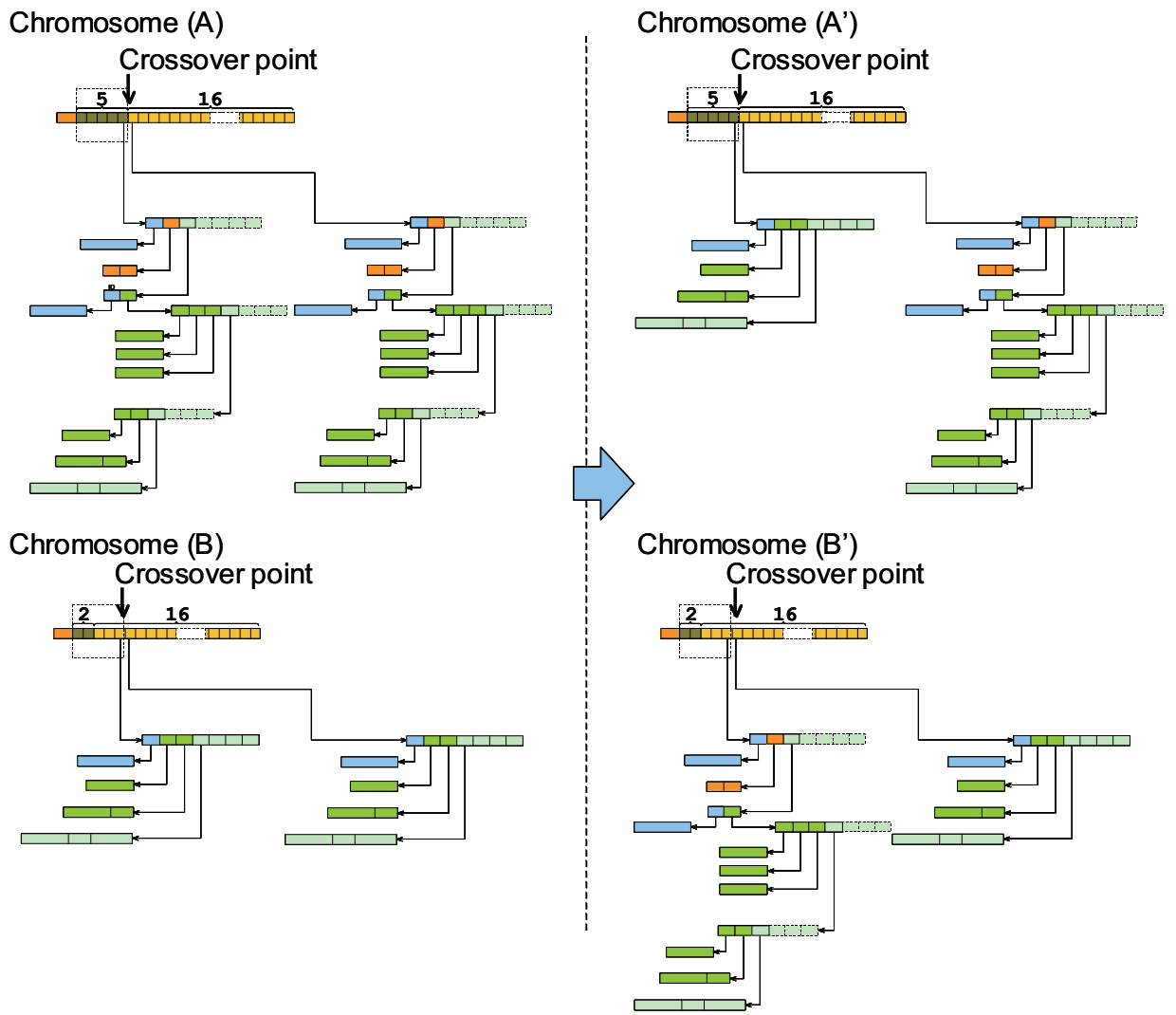
3. 信号の記述順序と符号化数の制限：エンティティとアーキテクチャの記述順を決定する最上位層の遺伝子は内部信号，出力信号の順で，かつ，優先度の低い順に符号化する．
4. 信号の優先度と記述の制限：すべての内部信号に対して優先度を決め，優先度の高い内部信号は優先度の低い内部信号と入力信号のみで記述する．
5. 交叉に関する制限：交叉は染色体の最上位層でのみ行い，交叉点は選択された2つの染色体のうち，短い側の染色体長を超えない位置で行う．また，交叉点が奇数の場合は，先頭の遺伝子を入れ替える．これは，各遺伝子が表現するVHDLの記述は様々あり，記述に応じて下位層の構造が異なり，下位層での交叉が実質的に不可能であることによる制限である．また，先頭遺伝子は染色体長に関わる内部信号数を保持しているため，交叉点が奇数の場合は染色体長を矛盾なく表現できるように先頭遺伝子を入れ替える．

以上の制限を設けることで，矛盾を生じさせることなく，初期化，交叉，突然変異が可能となる．図6.8に長さの異なる2つの染色体を例示する．それぞれの染色体の右側の表は染色体への符号化で使用される参照番号を示す．染色体(A)は，内部信号が5，出力信号が16であるため，染色体長はこの和に1を加えた22となる．同様に染色体(B)では19となる．出力信号数は設計者が決定するため，長さの違いは初期化時にランダムに決定される内部信号数に依存する．遺伝的操作によりこの長さは変化する．

染色体の交叉の例を図6.9に示す．ここでは，左側の2つの染色体(A)，(B)を交叉し，右側の(A')，(B')が得られるものとする．例えば第6番目の遺伝子の直後を交叉点とする場合，図示のごとく最上位層の6番目の遺伝子直後で染色体を分断し，下層の構造をまとめて交換する．染色体(A)，(B)は長さとは異なるが，このように最上位層のみで交叉を行うことでVHDLに復元しても矛盾のない新たな染色体(A')，(B')が得られる．



☒ 6.8: Different length chromosomes



6.9: Crossover

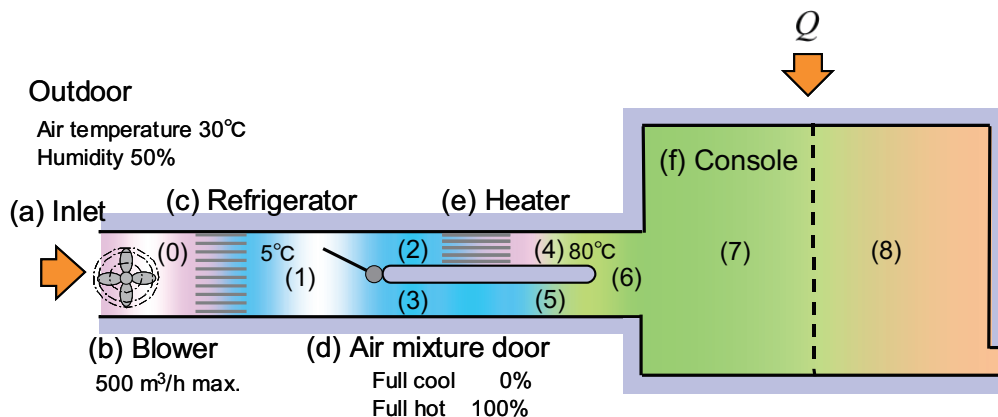


図 6.10: Air-conditioning system

## 6.3 不確実環境の考慮と空調システムへの応用

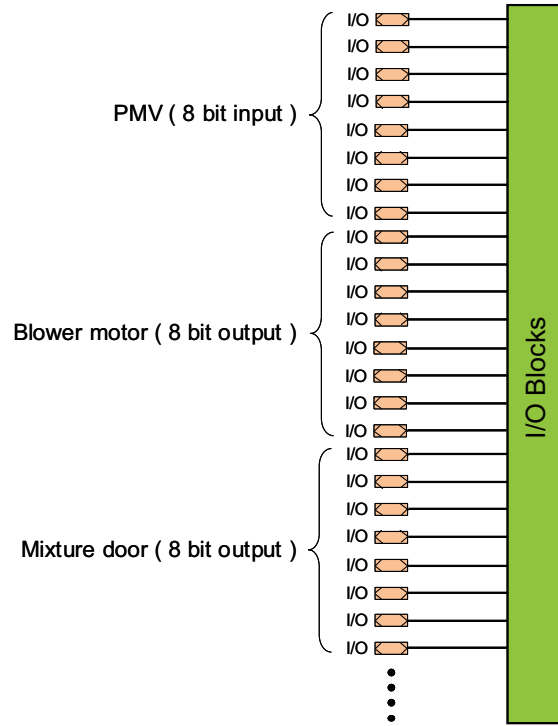
### 6.3.1 空調システム

本研究では、制御器の一例として空調制御器を取上げ、進化計算を用いた制御ロジックの自動構成手法の適用例を示す。図 6.10 に対象となる実験装置を示す。ファンの回転数に応じた量の外気が空調装置内に取り込まれ、一度、すべての空気が冷却され、同時に除湿される。その後、一部がヒータにより再加熱される。再加熱された暖気と冷気との混合比はエアミックスドアの開度により調整される。室内の温度は、ファンの回転数とエアミックスドアの開度を制御することにより調整される。VHDL による制御器の構成を図 6.11 に示す。ここでは、温冷感を 8 ビットの入力、ファン回転数、ミックスドア開度をそれぞれ 8 ビットの出力とする制御器を考える。

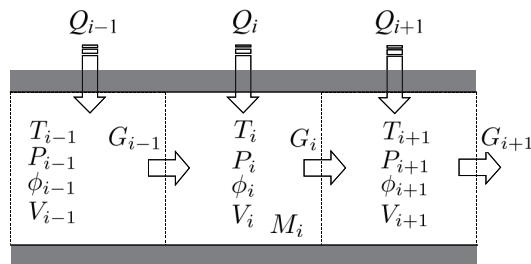
### 6.3.2 空調システムのモデル化

VHDL による制御器の制御性能をシミュレーションにより評価するため、空調システムを次のようにモデル化する。空調システムの流路を図 6.10 の (0) ~ (8) で示す検査体積に分割し、各検査体積における熱収支を考える。図 6.12 に 3 つの検査体積で構成される流路を示す。この流路における質量流量  $G_i$  kg/s は、ファンモータの開度を  $n$ 、全開時の質量流量を  $G_{\max}$  kg/s として、

$$G_0 = G_i = \alpha G_{\max} \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (6.1)$$



☒ 6.11: Pin assignment for air-conditioning



☒ 6.12: Control volume

と表される．全質量流量  $G_0$  kg/s は，空気の質量流量  $G_{a0}$  kg/s と水蒸気の質量流量  $G_{w0}$  kg/s の和であるので，

$$G_0 = G_{a0} + G_{w0} \quad (6.2)$$

となる．検査体積  $i=0$  における水蒸気圧  $P_{w0}$  は，湿度をとして，

$$P_{w0} = \phi_0 \cdot P_{s0} \quad (6.3)$$

となる．ここで， $P_{s0}$  は飽和水蒸気圧で，Tetens の式 (25) により求める．

$$P_{s0} = 610.78 \times e^{\frac{17.2694(T_0-273.15)}{(T_0-273.15)+238.3}} \quad (6.4)$$

相対湿度  $x_0$  は，水蒸気  $P_{w0}$  から次式により求められる．

$$x_0 = 0.622 \frac{P_{w0}}{P_0 - P_{w0}} \quad (6.5)$$

空気の質量流量  $G_{a0}$  は気体の状態方程式より，

$$G_{a0} = P_{a0} \cdot \frac{V}{R_a T_0} \quad (6.6)$$

と求められる．ここで， $R_a$  は気体定数である．また，水蒸気の質量流量  $G_{w0}$  は次式で与えられる．

$$G_{w0} = x_0 \cdot G_{a0} \quad (6.7)$$

空気の質量流量は流路内では一定であり，水蒸気の質量流量は除湿される場合には減少し，それ以外は一定とする．単位時間  $dt$  秒後の検査体積  $i$  の温度  $T'_i$ ，湿度  $x'_i$ ，質量  $M'_i$  は，

$$T'_i = \frac{G_{i-1}C_{i-1}T_{i-1}dt + (M_i - G_i dt)C_i T_i}{G_{i-1}C_{i-1}dt + (M_i - G_i dt)C_i} + \frac{Q_i dt}{M_i C_i} \quad (6.8)$$

$$x'_i = \frac{M_i x_i + (1 + x_i)(G_{wi-1} - G_{wi})dt}{M_i + (1 + x_i)(G_{ai-1} - G_{ai})dt} \quad (6.9)$$

$$M'_i = M_i + (G_{i-1} - G_i)dt \quad (6.10)$$

となる．ここで，比熱  $C_i$  (kJ/kg·K) は，次式により与えられる．

$$C_i = \frac{1.005 + x_i \{ (2501.6/T_i) + 1.859 \}}{1 + x_i} \quad (6.11)$$

ミックストアでの分岐流路では，ミックストアの開度  $m$  に応じてそれぞれの流路の質量流量を決定する．図 6.10(1) の分岐流路では，分岐後の図 6.10(2)，(3) の位置の質量流量  $G_2$ ， $G_3$  と，分岐前の質量流量  $G_1$  との間に次式が成り立つ．

$$G_2 = \beta G_1 \quad (6.12)$$



$$G_3 = (1 - \beta)G_1 \quad (6.13)$$

同様に，合流流路（図 6.10(4), (5), (6)）において次式が成り立つ．

$$G_6 = G_4 + G_5 \quad (6.14)$$

以上より得られた温度，湿度，流量に加え，代謝量，着衣量を設定し，温熱的快適指標 PMV を求める．PMV ( Predicted Mean Vote ) は，人体の定常熱収支式と温冷感や快適感に関する 1000 人の被験者の実験結果を基に導出された温熱指標で，空調制御でよく用いられる指標の一つである．PMV=0 のとき快適と感じる人の割合が最大となり，この場合の温冷感が中立とされる．また，+3 は暑い，+2 は暖かい，+1 はやや暖かい，-1 はやや涼しい，-2 は涼しい，-3 は寒いと温冷感が対応づけられている．

### 6.3.3 不規則環境を考慮した適応度の算出

評価関数は目標 PMV を 0 として，一定時間の空調制御シミュレーションを行い，目標 PMV との偏差を積算し，積算値の最小のものほど評価値が高くなるようにする．

$$\text{Fitness} = \int_0^{t_{\text{end}}} |\text{PMV}_{\text{ctrl}} - \text{PMV}_{\text{target}}| dt \quad (6.15)$$

進化計算による最適化の枠組みを制御システムに応用しようとする場合，従来の多くの研究では進化過程で使用した環境と実際に使用する環境の不整合や環境の不規則性のため，制御器がうまく機能しないことが問題となることがあった．簡単なフィードバック系からロボットの歩行まで様々なシステムに進化計算の枠組みが応用されてきているが，同種の問題を孕んでいる．多くの研究ではこの問題を明示していないが，進化計算の実システムへの応用では潜在的にこの問題をもつものと考えられる．

そこで，本研究ではシミュレーションレベルで不規則環境を考慮した適応度の計算を試みる．染色体の適応度計算の際に不規則性を取り入れる．本研究の空調システムへの応用の場合には，外乱として与えている熱負荷を，適応度計算する度に不規則に与える．このように適応度計算を行うと，同じ染色体であっても計算するごとに適応度が異なり，また，同じ集団内の染色体に対して異なる尺度で適応度を求めることになるが，このことによって染色体の集団の多様性を維持するとともに，集団として不規則環境に対するロバスト性能を蓄積することとなり，結果として，不規則環境に対して頑健性の高い制御器を得ることが期待できる．

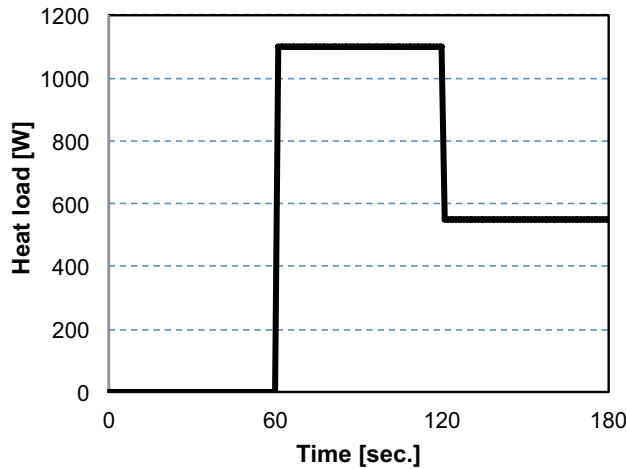
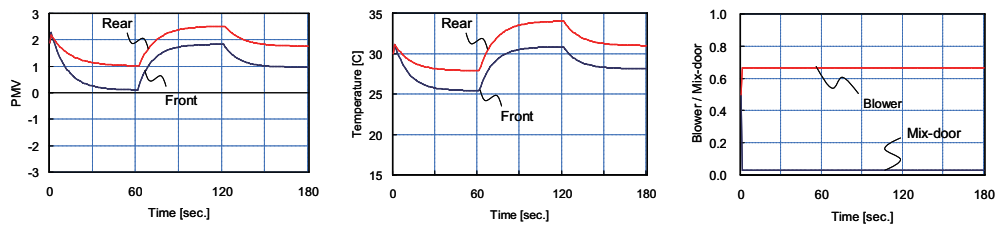


図 6.13: Heat load

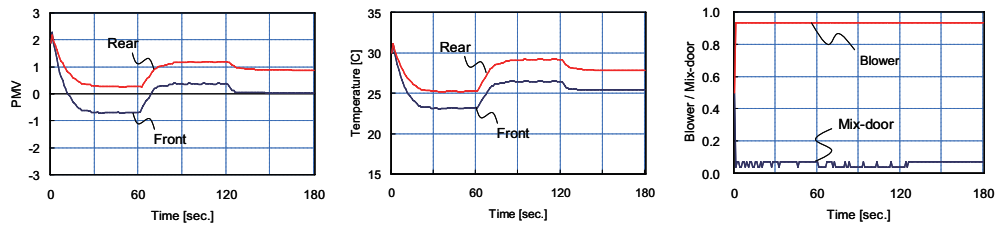
#### 6.3.4 自動構成された制御器の制御性能

個体数 50，交叉率 1.0，突然変異率 0.5，トーナメント戦略，トーナメントサイズ 10 で進化計算を行い制御器を自動構成した．自動構成された制御器による制御シミュレーションの結果を図 6.14，図 6.15 に示す．図 6.13 の熱負荷が与えられている．

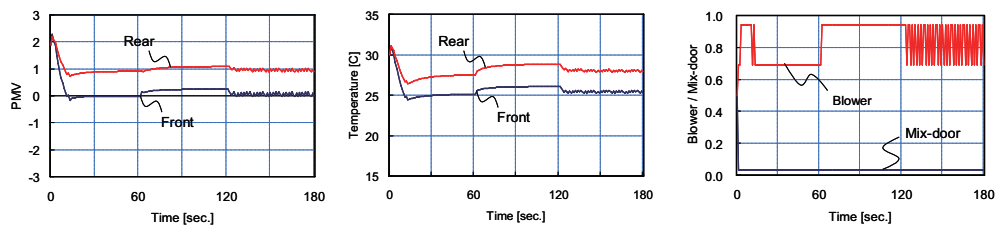
図 6.14 は進化計算の計算世代が 0 世代，100 世代，10000 世代の場合の制御シミュレーション結果を示す．すべてのグラフにおいて確認できる，30 秒，60 秒，120 秒のグラフの傾向の変化は熱負荷が変化したことによるものである．左側の PMV のグラフに注目すると，0 世代では，Front と示される PMV のグラフが目標 PMV の 0 から外れ，熱負荷の増減に応じて上下に変化している．このとき，ブロワ回転数，ミックスドア開度は適切な制御がなされていない．100 世代，10000 世代の進化計算で得られた制御器では，熱負荷の変動に応じてブロワ回転数，ミックスドア開度の運転モードが変化し，目標 PMV の 0 付近で安定するよう機能していることが確認できる．図 6.15 は同一の制御器を用い 3 つの異なる熱負荷環境下で制御シミュレーションを行った結果を示す．このシミュレーションで使用した制御器は 10000 世代の進化計算により自動構成されたものである．いずれの熱負荷に対しても，ブロワ回転数，ミックスドア開度を変化させ，目標 PMV の 0 付近で安定する制御が行われていることが確認できる．図 6.16 に 0 世代，100 世代，10000 世代の回路図を示す．左側の 8 つの入力から右側の 16 の出力までの論理回路は 0 世代より 10000 世代のほうがやや複雑になっているが，この 3 例では 100 世代の回路が最も複雑であり，世代が進むに連れて必ずしも回路が複雑する



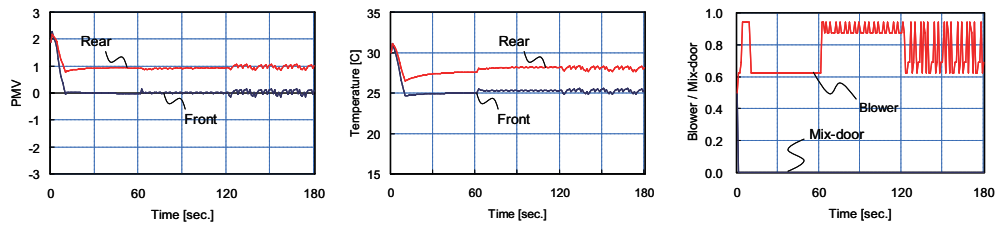
(a) 0 generations



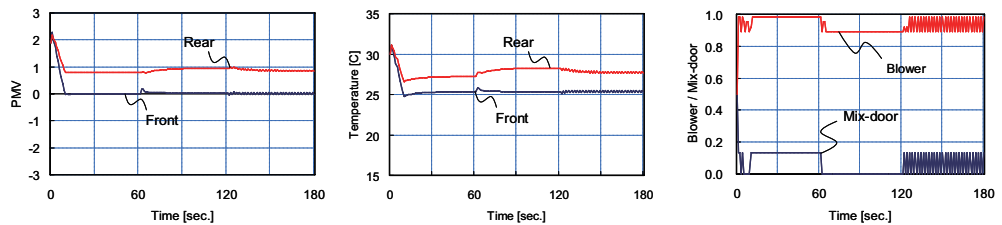
(b) 10 generations



(c) 100 generations

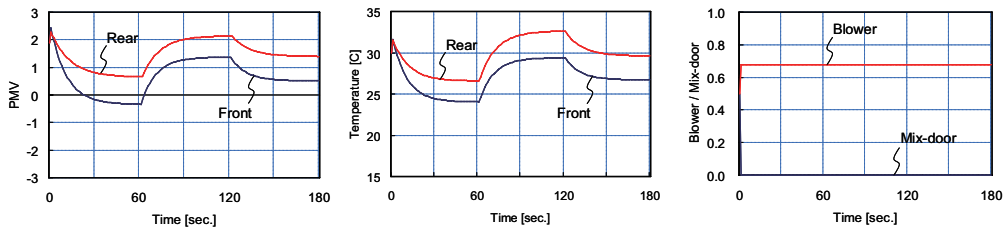


(d) 1000 generations

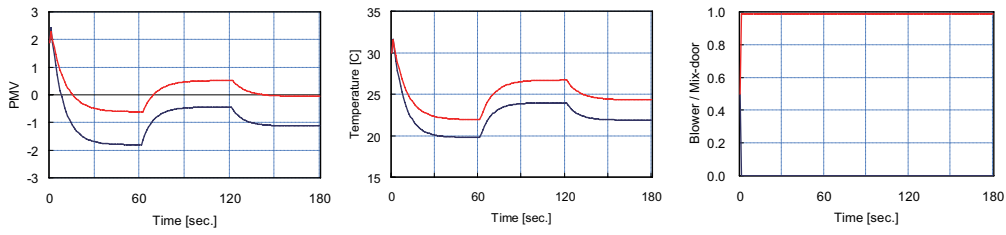


(e) 10000 generations

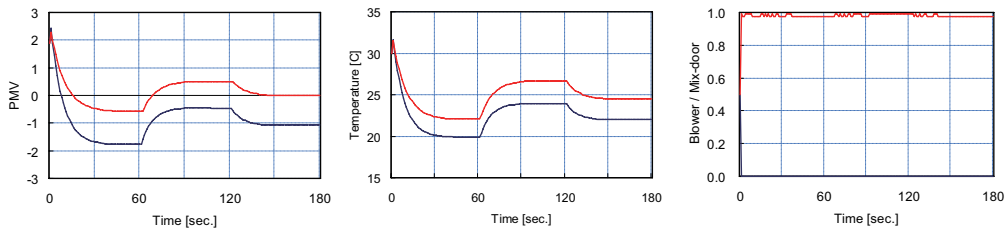
☒ 6.14: Simulation results 1



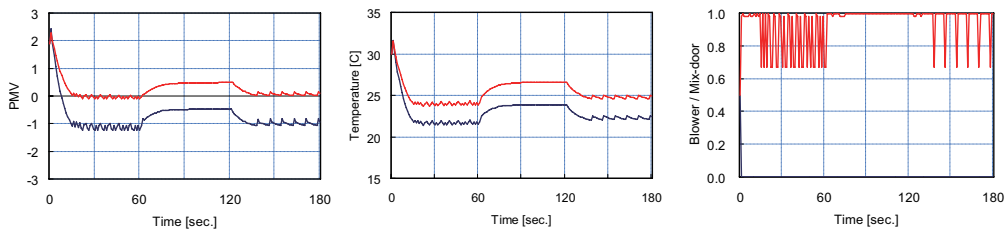
(a) 0 generations



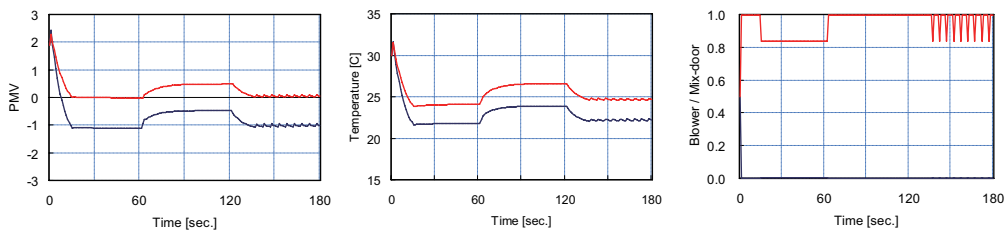
(b) 10 generations



(c) 100 generations



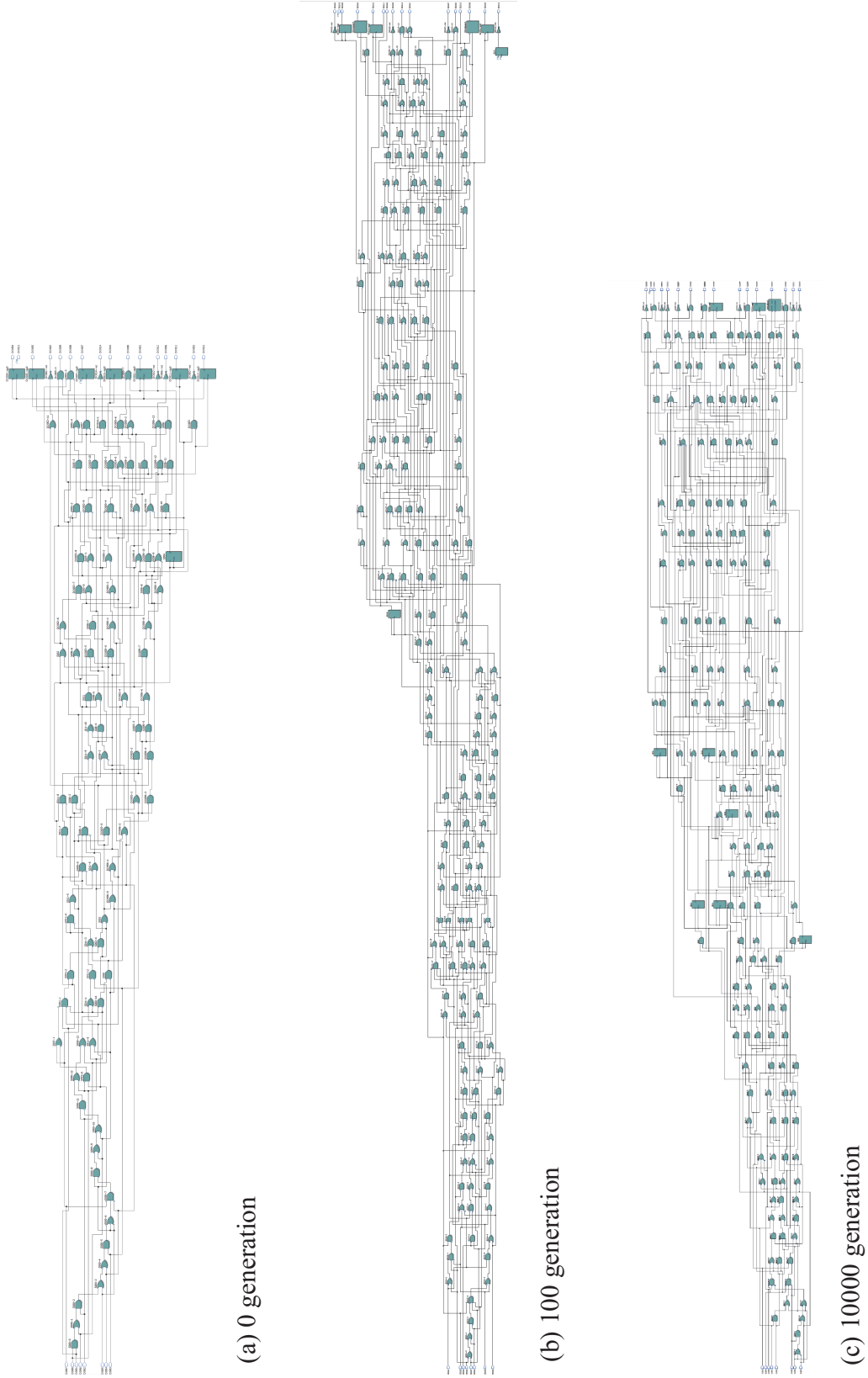
(d) 1000 generations



(e) 5000 generations

☒ 6.15: Simulation results 2

わけではない。前章のプログラムの生成ではプログラムが際限なく長くなる問題が生じていたが、本章の回路の自動構成では5つの制限がうまく機能し回路規模が世代とともに複雑化することを防いでいる。



⊗ 6.16: Auto-generated circuits

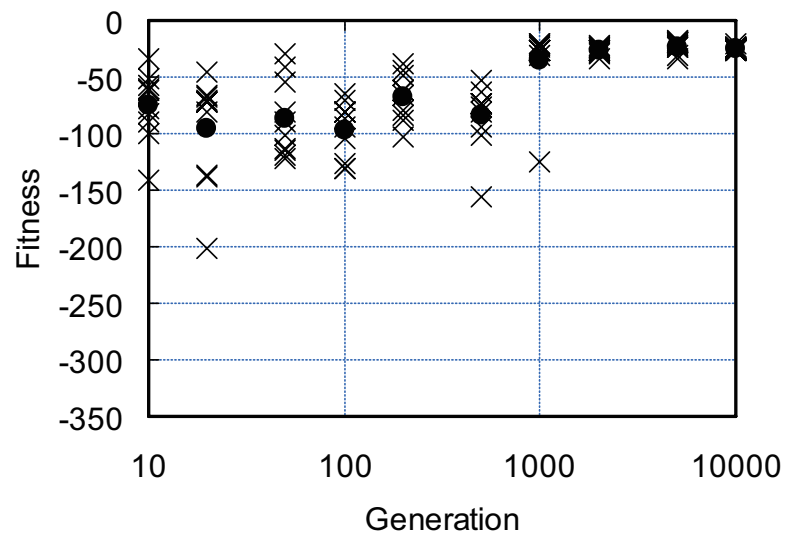


Figure 6.17: Fitness

## 6.4 本章のまとめ

本章では、制御システムの制御器設計支援のため、制御器に CPLD や FPGA を利用したシステムにおいて、その制御回路を記述する VHDL を進化計算により自動構成する方法について述べた。VHDL を多重の可変長の木構造をもつ染色体で表現することを提案し、染色体構造と遺伝的操作に 5 つの制限を設けることで、進化計算を進めても常に染色体が表現する VHDL に矛盾を生じさせない方法を示した。また、進化計算を適用して制御プログラムや制御回路を自動構成する枠組みで問題となっている不規則環境に対するロバスト性を解決するため、適応度計算に不規則性を導入する方法を提案した。空調システムを例にシミュレーションを行い、本枠組みの有用性を確認した。

今後の課題として、空気調和装置の実機に搭載して空調制御の検証実験を行うことが挙げられる。また、本枠組みで自動構成される制御回路は現在の入力のみから出力が決定される組み合わせ回路となっている。このため過去の入力の影響を考慮することができないため、制御目標に対して定常偏差が残るなどの懸念がある。自動構成される回路が順序回路となるように、単純な論理演算だけではなくフリップフロップやラッチなど値を保持する機能を持った素子やエッジを検出する回路が含まれるような検討が必要がある。



## 第7章 結論

近年の電子技術の目覚ましい発展と電子部品の低価格化に伴い、自動車や家電製品など様々な製品にセンサやアクチュエータを搭載しそれらをMPUを用いて制御することが一般的になっている。本研究ではこのようにMPUを実装した制御器の設計を支援するため、進化計算を適用し制御プログラムおよび制御回路の自動生成を行った。本研究では特に制御対象として空調装置を取上げ、この装置への進化計算への応用を通じ(1)MPUが導入された組込みシステムの制御プログラムを自動生成する方法、および(2)制御器にCPLDまたはFPGAが用いられたシステムを対象として、その制御回路を記述するハードウェア記述言語(VHDL)を進化計算による自動構成する方法について検討した。

進化計算を適用し制御プログラムや制御回路を自動構成する枠組みでは、適用される制御対象を簡便にモデル化し迅速に計算できることが要求される。また、適用する際の染色体とよばれるデータ構造、導出解の矛盾や得られる制御器のロバスト性などが問題となる。モデル化に関しては、以下の2つの方法、(1)グラフ理論をメカトロシステムの解析に適用し簡易にシステムのモデル表現を行い、迅速に概略的な解析をするための方法、(2)ニューラルネットワークを用いて既存のセンサ群からだけでは計算が困難な人間の温冷感を迅速に推定する方法について検討した。

グラフ理論の適用した熱流体系のモデル化手法では、対象とする系をブロック単位で構成されるものとし、そのブロック毎の接続を枝なる概念で結び、系全体の特性を誘導した。枝にはブロックの属性(特性)を付帯させ、この属性には、ブロックの特性方程式の変数(通過変数および横断変数)を勘案して特徴づけた。熱流体系に対しては、熱系の通過変数を熱量、横断変数を温度、流体系の通過変数を運動量、横断変数を速度と選択し、グラフの構成方法ならびにカットセット行列の導出方法を新たに提案した。そこから導きだされる結果と有限要素法により導かれる結果とを比較し、その妥当性を検討した。

ニューラルネットワークを用いた人間の温冷感の推定手法では、自動車に搭載されている既存のセンサの情報から車室内の快適度を推定し、この値に基づいて車室内快適度を制御する方法を検討した。制御シーケンスに応じた車室内のPMV値を実験的に求め、それを教師データとして誤差逆伝播法によりニューラルネット

の学習を行った。本実験で得られたニューラルネットによる PMV の推定値と実験値はよく近似しており、本推定方法が有効であることを確認した。さらに、本実験で得られたニューラルネットを用いて PMV を推定し、この値に基づいて空調制御を行い、快適度を考慮した制御が可能であることを実験的に確認した。

進化計算を用いたプログラムや制御回路の自動生成手法では、染色体表現において独自の多重リスト構造を提案し、さらに進化計算をすすめる上で5つの条件を設定することで、自動生成しようとするプログラムや制御回路を矛盾なく表現できるようにした。さらに得られたプログラムや制御回路が進化計算の際に設定したシミュレーションとは異なる条件では上手く機能しなくなるというロバスト性の問題に対しては、進化計算をすすめる際の評価関数に不規則性を取り入れることにより、シミュレーションとは異なる条件下でもプログラムや制御回路が機能するようにした。

このようにセンサやアクチュエータを MPU や CPLD/FPG で統合するような制御対象のモデル化から制御器の自動生成にいたる一連の処理を示し、その実現可能性を示したことが本研究の主たる成果である。

一方で、実際の空気調和装置に搭載しての検証実験は実施されておらず、その点に課題が残されている。また、制御プログラムでは単にシーケンシャルにプログラムを実施するのみにとどまり、一般の制御器で行われているような割り込み処理やマルチプロセス・マルチスレッドによるリアルタイム処理は実現されておらず、今後の課題である。自動構成される制御回路は現在の入力のみから出力が決定される組み合わせ回路となっており、このため過去の入力の影響を考慮することができない。したがって、制御目標に対して定常偏差が残るなどの懸念が残る。今後、自動構成される回路が順序回路となるように、単純な論理演算だけではなくフリップフロップやラッチなど値を保持する機能を持った素子やエッジを検出する回路が含まれるような検討が必要がある。

# 謝辞

本研究をまとめるにあたり主査を勤めていただきました，岡山大学大学院自然科学研究科産業創成工学専攻教授 船曳信生先生に，厚く御礼申し上げます．先生には，本研究をまとめるにあたり，深いご理解と大きなご助力を賜りました．大変ご多忙の折に，多くの時間を割いてご指導を賜り，心より感謝申し上げます．

また，本論文の副査を勤めていただきました，岡山大学大学院自然科学研究科産業創成工学専攻教授 渡辺桂吾先生，同専攻教授 平田健太郎先生に，心より感謝申し上げます．研究につきまして，先生方それぞれのご専門の立場から大変貴重なご意見を頂きました．

本研究は埼玉大学大学院理工学研究科 綿貫啓一先生のもとで始められました．綿貫先生には心より感謝申し上げます．

また，本論文を取りまとめるにあたり大きなご助力を賜りました龍谷大学理工学部情報メディア学科教授 長谷智弘先生に心より感謝申し上げます．

くわえて，埼玉大学大学院理工学研究科教授 久野義先生に心より御礼申し上げます．同研究科名誉教授 大滝英征先生に御礼申し上げます．長期にわたりご指導，叱咤激励くださいました埼玉大学副学長 佐藤勇一先生に厚く御礼申し上げます．埼玉大学大学院理工学研究科教授 高崎正也先生，同研究科准教授 金子順一先生，同研究科准教授 荒木稚子先生，九州大学工学研究院准教授 森博輝先生，久留米工業大学大学院准教授 澁谷秀雄先生には大変お世話になりました．ここに厚く御礼申し上げます．

IEEE GCCE 運営委員会でお世話になりました湘南工科大学工学部人間環境学科講師 野中誉子先生，筑波大学システム情報系准教授 菟川友宏先生，山口大学大学院理工学研究科准教授 山口真悟先生，名古屋工業大学大学院情報工学専攻助教 後藤富朗先生に心より感謝申し上げます．本委員会の活動なくして本論文をまとめる機会を得ることはありませんでした．

また，研究に協力いただきました，日産自動車株式会社 岡野洋二氏，トヨタ自動車株式会社 堀竹直氏に感謝申し上げます．

最後に，いつも辛抱強く待っていてくれる家族にお礼と感謝を申し上げます．



## 参考文献

- [1] Fraser, AS., Simulation of Genetic Systems by Automatic Digital Computers VI. Epistasis, Australian Journal of Biological Sciences Vol.13, No.2, pp.150–162 (1960).
- [2] H. J. Bremermann, "The evolution of intelligence. The nervous system as a model of its environment, " Technical report, no. 1, contract no. 477(17), Dept. Mathematics, Univ. Washington, (1958).
- [3] Fogel, L. J. et al., Artificial Intelligence through Simulated Evolution, John Wiley & Sons (1966).
- [4] Rechenberg, I., Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution, Frommann-Holzboog, Stuttgart, Germany, (1973). H.-P. Schwefel, Numerical Optimization of Computer Models, John Wiley, Chichester, U. K., 1981.
- [5] J. H. Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems, Univ. of Michigan Press (1975).
- [6] John H. Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems, MIT Press (1992) .
- [7] Koza, J., Genetic Programming, On the Programming of Computers by means of Natural Selection, MIT Press (1992) .
- [8] Koza, J., Genetic Programming, II: Automatic Discovery of Reusable Subprograms, MIT Press (1994) .
- [9] 北野宏明編 , 遺伝的アルゴリズム , 産業図書 (1993) .
- [10] 北野宏明編 , 遺伝的アルゴリズム 2 , 産業図書 (1995) .
- [11] 北野宏明編 , 遺伝的アルゴリズム 3 , 産業図書 (1997) .

- [12] 北野宏明編，遺伝的アルゴリズム 4，産業図書（2000）。
- [13] Erick Cantú-Paz et al. (Eds.), Genetic and Evolutionary Computation-GECCO 2003, Springer (2003).
- [14] Kalyanmoy Deb et al. (Eds.), Genetic and Evolutionary Computation-GECCO 2004, Springer (2004).
- [15] 三宮信夫・喜多一・玉置久・岩本貴司，遺伝的アルゴリズムと最適化，朝倉書店（1998），13。
- [16] 伊庭斉志，情報科学セミナー遺伝的プログラミング，東京電機大学出版局（1996）。
- [17] 伊庭斉志，遺伝的プログラミング入門，東京大学出版会（2001），pp.11-15。
- [18] Randy L. Haupt and Sue Ellen Haupt, Practical Genetic Algorithms Second Edition, Wiley-interscience（2004）。
- [19] 伊庭斉志，遺伝的アルゴリズムと進化のメカニズム 岩波講座 物理の世界，岩波書店（2002）。
- [20] 米澤保雄，遺伝的アルゴリズム，森北出版（1993）。
- [21] Hitoshi Iba, Topon Kumar Paul and Yoshihiko Hasegawa, Applied Genetic Programming and Machine Learning, CRC Press（2010）。
- [22] 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）。
- [23] 伊藤一之，図解ロボット技術入門シリーズ ロボットインテリジェンス 進化計算と強化学習，オーム社（2007）。
- [24] 中山弘隆，岡部達哉，荒川雅生，尹禮分，多目的最適化と工学設計 - しなやかなシステム工学アプローチ - ，現代図書（2009）。
- [25] 稲垣伸吉，湯浅秀男，新井民夫，グラフ上の波動による歩行パターンの生成に関する研究，計測自動制御学会論文集，38，2，(2002)。
- [26] T. Higuchi et al., Evolvable Hardware with Genetic Learning: A First Step Towards Building a Darwin Machine, Proceedings of the 2nd International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior, MIT Press, pp. 417, (1992).

- [27] H. Hemmi, J. Mizoguchi and K. Shimohara, AdAM: A Hardware Evolutionary System, Proc. 1997 IEEE Conf. Evolutionary Computat.(ICEC'97), pp. 193–196, (1997).
- [28] I. Kajitani and T. Higuchi, Developments of Myoelectric Controllers for Hand Prostheses, Proc. of the Myoelectric Controls Symposium 2005, pp. 107–111, (2005).
- [29] H. Sakanashi, M. Iwata and T. Higuchi, Evolvable Hardware for Lossless Compression of Very High Resolution Bi-level Images, IEEE Proceedings-Computers and Digital Techniques, Vol.151, No.4, pp.277–286, (2004).
- [30] D. A. Gwaltney and M. I. Ferguson, Hardware Evolution of Analog Speed Controllers for a DC Motor, Proc. of the Genetic and Evolutionary Computation Conference 2003(GECCO-2003), pp. 442–453, (2003).
- [31] Xilinx, XC9572 In-System Programmable CPLD Product Specification, Xilinx, pp. 2, (1998).
- [32] O.Tetens, Uber einige meteorogogische Begriffe, Zeitschrift fur Geophysik, Vol.6, pp.297, (1930).
- [33] P. O. Fanger, Thermal Comfort, McGraw-Hill, (1970).
- [34] D. E. Goldberg, Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, (1989).
- [35] T. Higuchi, T. Niwa, T. Tanaka, H. Iba, H. Garis, and T. Furuya, “ Evolvable Hardware with Genetic Learning: A First Step Towards Building a Darwin Machine ”, Proceedings of the 2nd International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior, pp. 417, (1992).
- [36] 山村雅幸, 小林重信, 遺伝的アルゴリズムの工学的応用, 人工知能学会誌, 9, 4, pp.506–511, (1994).
- [37] 伊庭斉志, 遺伝的プログラミングと進化論的な学習, 人工知能学会誌, 9, 4, pp.512–517, (1994).
- [38] 久保田直行, 伊達惇, 福田敏男, 遺伝的アルゴリズムにおける年齢構造の導入とその収束性, 計測自動制御学会論文集, 31, 5, pp.560–568, (1995).

- [39] 飯間等, 三宮信夫, 遺伝的アルゴリズムの動作に対する致死遺伝子の影響, 計測自動制御学会論文集, 31, 5, pp.569–576, (1995).
- [40] 菊池康裕, WF オペレータを用いた揺動淘汰 GA におけるパフォーマンス方程式, 計測自動制御学会論文集, 31, 5, pp.569–576, (1995).
- [41] 村田忠彦, 石淵久生, 田中英夫, 遺伝的アルゴリズムによるフローショップ・スケジューリングと多目的最適化問題への応用, 計測自動制御学会論文集, 31, 5, pp.583–590, (1995).
- [42] 免疫機構を取り入れた遺伝的アルゴリズムの VLSI フロアプラン設計への応用, 計測自動制御学会論文集, 31, 5, pp.615–621, (1995).
- [43] 山田雅之, 世木博久, 伊藤英則, 遺伝的アルゴリズムに基づく網目模様表示の並列処理, 並列処理シンポジウム JSP'95 講演論文集, pp.345–352, (1995).
- [44] 遺伝的アルゴリズムを用いた擬似濃淡表示法, 電子情報通信学会論文誌, J78-D-II, 10, pp.1450–1459, (1995).
- [45] 浜本義彦, 古里眞理, 金山知余, 富田眞吾, 遺伝的アルゴリズムを用いた特徴選択法, 電子情報通信学会論文誌, J78-A, 10, pp.1385–1389, (1995).
- [46] 芦田義朗, 大西薫, 大森浩充, 佐野昭, 遺伝的アルゴリズムを利用したラインおよび連続スペクトルの分離推定, pp.1800–1809, (1995).
- [47] 近藤誠, 渡邊隆男, 安田恵一郎, 横山隆一, パレート最適解の多様性維持を目的とした遺伝的アルゴリズムの構成法, SICE'96 講演論文集, pp.883–884, (1996).
- [48] D. H. Ackley, and M. L. Littman, Interactions between Learning and Evolution, Artificial Life II, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Proc. Vol. X, pp.487–59, Addison-Wesley, (1991).
- [49] H. Iba, S. Akiba, T. Higuchi and T. Sato, BUGS: A Bug-Based Search Strategy Using Genetic Algorithms, Parallel Problem Solving from Nature 2, Elsevier Science Publishers, pp. 165–174, (1992).
- [50] 坂無英徳, 鈴木恵二, 嘉数侑昇, フィルタリング GA による多峰性関数の最適化, 情報処理学会論文誌, 36, 8, pp.1800–1809, (1995).



- [51] 吉田晋, 鎌野琢也, 鈴木茂行, 安野卓, 片岡雄, 遺傳的アルゴリズムに基づく非線形サーボシステムのフィードフォワード制御, システム制御情報学会論文誌, 9, 11, pp.511-519, (1996).
- [52] 山本哲彦, 吐合隆弘, 中園邦彦, 金城寛, 玉城史朗, 非厳密な評価規準をもつGAによる自転車のニューロ制御, 日本機械学会論文集(C編), 62, 601, pp.3486-3491, (1995).
- [53] 平俊男, 田中正夫, 遺傳的手続きによるゆらぎを導入した知識/事例に基づく構造物概念設計アシスタント, 日本機械学会論文集(C編), 62, 601, pp.3420-3427, (1995).
- [54] 永井正夫, 音田稔, 片桐正大, 遺傳的アルゴリズムによる車両運動制御に関する研究, 日本機械学会論文集(C編), 62, 599, pp.2648-2653, (1995).
- [55] 横田孝雄, 玄光男, 区間係数を含む信頼性設計問題に対する遺傳的アルゴリズムによる一解法, 日本ファジー学会誌, 8, 2, pp. 378-387, (1996).
- [56] 下中賢, 森光武則, 藪田哲郎, 遺傳的アルゴリズムを用いた小口径トンネルロボットの最適ゲインオートチューニング, 日本機械学会論文集(C編), 62, 601, pp.3572-3579, (1996).