

学 位 論 文 題 名

A Study on a Cytokine Reaction based Artificial Immune System for a Selector Problem

（選択器問題向きサイトカイン反応ベースド人工免疫系に関する研究）

学位論文内容の要旨

選択器とは、問題解決システムがその環境入力情報に対してシステム内部に有している問題解決要素集合（ここではこれを項目と呼ぶ）から最適な解集合を選択する装置のことである。選択器はロボットの行動を選択や、インターネット上の被接続 IP アドレスのフィルタリングなど様々な場面で使用されている。従来の工学的設計法では、設計者が、対象としての選択器という問題領域で起こり得るすべての事象を把握し、この事象間で満たされるべき原理を当てはめるといような作業を行ってきた。このような設計手法により決定された選択器は、問題領域の範囲内で、普遍的で制御可能であり、その振る舞いは予測可能で、頑健で信頼性の高いものとなる。しかし、問題領域が常に変化する可能性がある動的環境では、設計者が事前にすべての事象の変化を把握することは、フレーム問題を引き起こすため困難であり、それゆえ、事象間に成り立つ原理を当てはめることもまた、困難である。そのため従来は、予測可能な範囲に問題を分割し、別箇の問題としてそれぞれを解くことなどにより対処してきたが、問題が複雑化・肥大化するにつれ、設計者によって複雑に絡み合った事象を分類することが困難となっている。

本論文は、問題が動的に変化し、入力情報に対して最適な項目集合を選択するような「選択器」を設計する際に生じる課題に対して、サイトカイン反応の原理を導入した人工免疫系（AIMS）によるアプローチした結果をまとめたものである。

このような動的環境での選択器設計の際には、(1) 入力情報集合、(2) 入出力写像関数、(3) 出力項目集合などを、考慮する必要がある、それぞれが動的に変化することもまた、考慮する必要がある。本論文において、これら 3 要素を考慮した動的環境における選択器設計に関する問題を、選択器問題として定義している。

本論文は、6 章から構成されている。以下にその概要を示す。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、従来手法、現状の問題点などについて述べた後に問題の定式化および、研究目的について述べている。選択器問題における既存アプローチの特徴を分類し、比較することで従来法の問題点を明らかにしている。提案するアプローチの概略を述べ、本手法と従来法との関係性を示している。

第 2 章では、生体免疫系においての抗原入力に対する抗体選択反応の仕組みを概括し、

その特徴をまとめている。これらは、選択器への応用という観点においてモデル化が行われている。

第 3 章では、既存の人工免疫モデルの特徴をまとめ、分類することで従来モデルの問題点を明らかにしている。前章で提案したモデルに対し、新たに工学分野への適用を考慮して機能を追加した、人工免疫モデル (AIMS) を提案し、既存モデルとの関係を示している。AIMS が、イディオタイプネットワーク部、進化的アルゴリズム部、そして、抽出・評価部の大きく 3 部から構成されることを示し、各部の背景や性質等について述べている。選択器として適用する際に求められる諸条件を、各部について基礎実験を行うことでまとめている。強親和関係抗体数 (nRS) を定義し、抽出部についての実験結果から、これと選択確率との関係には、弱い負の相関があることを明らかにしている。また、イディオタイプネットワーク部についての実験結果から、ネットワークの反応性に関するパラメータ値 (環境変数) によって、選択される部分抗体集合が様々に変化することを明らかにしている。これらの結果をもとに、AIMS の選択器としての性質について考察を行っている。

第 4 章では、自律移動ロボットの行動選択器に関する背景、現状の問題点、および、従来手法について述べている。特に、大域的振る舞い (単位時間当たりのアクチュエーターに対する動作命令の積和) の調整に関する問題点について言及している。提案モデルを、ケペラ様の、測距センサおよび 2 車輪からなる自律移動ロボットの、行動選択器に適用し、壁伝い行動生成の実験を行っている。抗原としての測距値は既知の範囲であり、被選択項目としての各アクチュエーターの動作命令も既知の範囲に収められるが、問題が、左手壁伝い行動生成や右手壁伝い行動生成のように変化するため、本問題は、動的環境における選択器問題である。本実験では、いくつかの静的な問題環境に対して本モデルの有効性を検証し、それぞれの実験で生成されたイディオタイプネットワークの違いについても検証している。また、環境変数によって、問題の変化に対して、ロボットの大域的振る舞いが調節可能であることを明らかにし、AIMS の有効性を検証している。この実験において、本提案システムが、環境変動に対し、環境変数を調節し、行動選択確率を変えることで、変動への対処が可能であるという知見を得ている。

第 5 章では、IP ネットワークにおける被接続 IP アドレスの選択器に関する、背景、現状の問題点、および、従来手法について述べ、提案モデルを従来手法の関係性の中で位置づけている。抗原としての被接続先 IP アドレス空間は、非常に大きいため事前に知り得ることはできず、そのため、入力情報一項目間の写像関数も未知であること、また、被接続先の優先度は、その状況によって動的に変化することから、本問題は選択器問題であることが述べられている。本実験では、いくつかの静的な問題環境に対して本モデルの有効性を検証し、また、それぞれの実験で生成された IP アドレス群の違いについての有効性を検証している。環境変数によって問題の変化に対して、IP アドレス群の移送が変わることを明らかにし、ネットワークセキュリティ分野へ AIMS の有効性を検証している。

第 6 章において、論文全体のまとめと、総括を行っている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	嘉数 侑 昇
副査	教授	大内 東
副査	教授	和田 充 雄
副査	教授	大森 隆 司
副査	助教授	吉井 伸一郎

学 位 論 文 題 名

A Study on a Cytokine Reaction based Artificial Immune System for a Selector Problem

(選択器問題向きサイトカイン反応ベースド人工免疫系に関する研究)

選択器とは、問題解決システムがその環境入力情報に対してシステム内部に有している問題解決要素集合（ここでは項目と呼ばれる）から最適な解集合を選択する装置のことである。選択器はロボット行動の選択や、インターネット上の被接続 IP アドレスのフィルタリングなど様々な場面で使用されている。従来の工学的設計法では、設計者が、対象としての選択器決定という問題領域で起こり得るすべての事象を把握し、この事象間で満たされるべき原理を当てはめる作業を行ってきた。このような設計手法により決定された選択器は、問題領域の範囲内で、普遍的で制御可能であり、その振る舞いは予測可能で、頑健で信頼性の高いものとなる。しかし、問題領域が常に変化する可能性がある動的環境では、設計者が事前にすべての事象の変化を把握することは、フレーム問題を引き起こすため困難であり、それゆえ、事象間に成り立つ原理を当てはめることもまた、困難である。そのため従来は、予測可能な範囲に問題を分割し、別箇の問題としてそれぞれを解くことなどにより対処してきたが、問題が複雑化・肥大化するにつれ、設計者によって複雑に絡み合った事象を分類することが困難となっている。本論文は、問題が動的に変化し、入力情報に対して最適な項目集合を選択するような「選択器」を設計する際に生じる課題に対して、サイトカイン反応の原理を導入した人工免疫系 (AIMS) によるアプローチした結果をまとめたものである。

本論文は、6 章から構成されている。以下にその概要を示す。

まず、定義から始まる。動的環境での選択器設計の際には、(1) 入力情報集合、(2) 入力写像関数、(3) 出力項目集合などを、考慮する必要がある、それぞれが動的に変化することもまた、考慮する必要がある。本論文において、これら 3 要素を考慮した動的環境における選択器設計に関する問題を、選択器問題として定義している。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、従来手法、現状の問題点などについて述べた後に問題の定式化および、研究目的について述べている。選択器問題における既存アプローチの特徴を分類し、比較することで従来法の問題点を明らかにしている。提案するアプローチの概

略を述べ、本手法と従来法との関係性を示している。

第2章では、生体免疫系における抗原入力に対する抗体選択反応の仕組みを概括し、その特徴をまとめている。これらは、選択器への応用という観点においてモデル化が行われている。

第3章では、既存の人工免疫モデルの特徴をまとめ、分類することで従来モデルの問題点を明らかにしている。前章で提案したモデルに対し、新たに工学分野への適用を考慮して機能を追加した、人工免疫モデル (AIMS) を提案し、既存モデルとの関係性を示している。AIMS が、イディオタイプネットワーク部、進化的アルゴリズム部、そして、抽出・評価部の大きく3部から構成されることを示し、各部の背景や性質等について述べている。選択器として適用する際に求められる諸条件を、各部について基礎実験を行うことでまとめている。強親和関係抗体数 (nRS) を定義し、抽出部についての実験結果から、これと選択確率との関係には、弱い負の相関があることを明らかにしている。また、イディオタイプネットワーク部についての実験結果から、ネットワークの反応性に関するパラメータ値 (環境変数) によって、選択される部分抗体集合が様々に変化することを明らかにしている。これらの結果をもとに、AIMS の選択器としての性質について考察を行っている。

第4章では、自律移動ロボットの行動選択器に関する背景、現状の問題点、および、従来手法について述べている。特に、大域的振る舞い (単位時間当たりのアクチュエーターに対する動作命令の積和) の調整に関する問題点について言及している。提案モデルを、ケペラ様の、測距センサおよび2車輪からなる自律移動ロボットの、行動選択器に適用し、壁伝い行動生成の実験を行っている。抗原としての測距値は既知の範囲であり、被選択項目としての各アクチュエーターの動作命令も既知の範囲に収められるが、問題が、左手壁伝い行動生成や右手壁伝い行動生成のように変化するため、本問題は、動的環境における選択器問題である。本実験では、いくつかの静的な問題環境に対して本モデルの有効性を検証し、それぞれの実験で生成されたイディオタイプネットワークの違いについても検証している。また、環境変数によって、問題の変化に対して、ロボットの大域的振る舞いが調節可能であることを明らかにし、AIMS の有効性を検証している。この実験において、本提案システムが、環境変動に対し、環境変数を調節し、行動選択確率を変えることで、変動への対処が可能であるという知見を得ている。

第5章では、IP ネットワークにおける被接続 IP パケットの選択器に関する、背景、現状の問題点、および、従来手法について述べ、提案モデルを従来手法の関係性の中で位置づけている。抗原としての IP パケット空間は、非常に大きいため事前に知り得ることはできず、そのため、入力情報一項目間の写像関数も未知であること、また、被接続先の優先度は、その状況によって動的に変化することから、本問題は選択器問題であることが述べられている。本実験では、いくつかの静的な問題環境に対して本モデルの有効性を検証し、また、それぞれの実験で生成された IP パケット群の違いについての有効性を検証している。環境変数によって問題の変化に対して、IP パケット群の部分集合が変わることを明らかにし、ネットワークセキュリティ分野へ AIMS の有効性を検証している。

第6章において、論文全体のまとめと、総括を行っている。

これを要するに、著者は、サイトカインベースド人工免疫システムの統合モデル AIMS を提案し、AIMS が各種選択器決定問題、特に環境変動を伴う領域において、選択器の振る舞いを提案した環境パラメータを調節することで、環境変化に対してもより高い柔軟性、統合

性を有するようなメカニズムが創発されることを各種応用問題を通して実証した。これらの結果は複雑系工学および情報工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。