

## 学位論文題名

## Studies on Emergence of Behavior Intelligence on Artificial Creature in Virtual Fluid Environments

(仮想流体環境下における人工生物の行動知能創発)

## 学位論文内容の要旨

本論文では、人工生命の技術を用いて、人工生物の行動獲得実験を行い、人工生物が獲得した行動を解析することで、生物が獲得する行動に影響を与える要素を明らかにすることを研究目的としている。従来の人工生物の行動獲得実験では、一部を除いてコンピュータ上で環境を考慮することなく人工生物の挙動獲得をシミュレーションすることが多く行われていた。しかしながら、実際の生物の振る舞いをシミュレートする場合、物理法則に従う環境をコンピュータ上で構築し、人工生物に影響させる必要がある。また、人工生物の歩行のような自律行動獲得では、地上行動での行動獲得が行われているが、そこでは摩擦力和衝突回避が考慮される場合が多く、そのような研究では空気や水など流体による影響を考慮していない。そこで本研究では、液体や気体のような流体の影響を考慮した人工生物の自律行動獲得の実現が取り扱われている。そのために、実時間でシミュレーション可能な仮想近似流体環境の構築を最初に提案している。このようにして構築した環境下で、簡易な形状の剛体を関節で繋げた人工生物モデルを作製し、Neuro-evolution を人工生物の関節制御に適用し、構築した環境及び人工生物の形状に応じて、人工生物が自律的な移動行動を獲得可能であることをシミュレーション実験により明らかにしている。また、人工生物の行動獲得には、環境と人工生物自体の形状が影響を及ぼすことから、『環境』や『人工生物の形状』が変化した場合に、人工生物の行動獲得にどのような影響を与えるのかを明らかにしている。

本論文は全5章で構成されている。第1章では序論として研究背景、目的及び関連研究が述べられている。ついで、人工生物の行動獲得を実現するために適用される人工ニューラルネットワーク(ANN)及びその行動最適化を学習として実現する最適化アルゴリズムについて概観している。

第2章では、コンピュータ上で計算量が小さい物理法則に従う流体環境を構築する方法が提案されている。この方法は、翼型のプロペラやタービンブレードの設計式に使用される経験式を基にしたものである。このようにして構築した擬似水中環境において、魚を模倣して作製した人工生物が、実際の魚のような遊泳行動を獲得できるかを検証している。このために、Neuro-evolution を作製した人工生物の関節制御に適用し、構築した水中環境で人工生物が形状に適した行動を獲得可能であることを明らかにしている。

第3章では、人工生物の形状、すなわち形態と関節数が人工生物が獲得する行動に与える影響に関して述べられている。形態と行動については、地球上の生物の体重と移動速度の関係がべき乗則に従うことが報告されており、体重が増加するにつれ移動速度が増加することが報告されている。しかしながら、流体中における形状、すなわち形態と関節数が遊泳の移動速度に影響を持つかどうかは明らかにされていない。そこで、「遊泳する魚」に注目し、流体の影響力すなわち流体抗力を実現した仮想環境内で、簡易的な形態を持つ人工生物の遊泳行動獲得実験を実施し、人工生物の関節の数を一定とし人工生物の形態をアフィン変換させた場合と、形態に関して全長を一定とし人工生物の関節数を変化させた場合の行動獲得実験を実施している。前者の実験では、形態の大きさが人工生物の体

重に関連するので、遊泳には人工生物の体重と遊泳のために獲得する移動速度の関係が、実際の生物の体重と移動速度の関係と同様にべき乗則に従うことが明らかにされた。後者の実験については、全長に応じて速く遊泳するための最適な関節数が存在することが明らかにされた。

第4章では、異なる流体環境が人工生物が獲得する獲得する行動に与える影響に関して述べられている。この影響を調べるため、人工生物の密度と流体の密度を等しく置き、その密度を変化させて、簡易的な形状の人工生物の行動獲得実験が実施されている。その結果は、密度が小さくなればなるほど、獲得する移動速度がより速くなることが示されている。また、人工生物の密度を一定とし、流体の密度のみを変化させた環境において鳥を模倣した人工生物の上昇行動獲得実験も実施されている。この場合は、水中環境で獲得する行動と空気環境で獲得する行動とは異なる行動が創発されることが検証されている。

最後に、第5章では、本論文の結果をまとめ、今後の展望が述べられている。

# 学位論文審査の要旨

主査	特任教授	古川正志
副査	教授	栗原正仁
副査	教授	鈴木恵二
副査	教授	小野哲雄
副査	教授	山本雅人

## 学位論文題名

# Studies on Emergence of Behavior Intelligence on Artificial Creature in Virtual Fluid Environments

(仮想流体環境下における人工生物の行動知能創発)

生物の行動は、生存する環境と共に生物の形態(形状とトポロジー)に依存する。これは、近年盛んに研究されている人工生物(生命)に対しても同様と推論される。特に、人工生物の行動獲得は、ロボットと同じような物理的制御体系に於いて、シミュレーションを通して実施される。しかし、生息する場に存在する環境の物理場としての力学をモデル化し、その場において形態が人工生物の行動獲得にどのような関係を持つかは、調べられていない。例えば、行動生物学に置いては、飛翔を行う生物の翼の面積は、体重の2/3乗に従うことが報告されているが、これは重力場に於ける空気抗力で生まれる数字であって、これまでの人工生物の行動獲得では考慮されていない。

本論文の視点は、水中や大気中におけるの力学場をモデル化し、そのような場で形態が変化すると、人工生命がどのような行動獲得を行えるかに対し、新しい知見を与えようとするものである。

そのために、まず、環境構築には、重力、歩行時の地上の摩擦力、水中や大気中の浮力及び移動(飛翔)にともなう抗力のモデル化を行う方法を構築する方法を提案している。水中や大気中の抗力は現象が複雑なため、こうした力のモデリングの方法が必要となる。特に、人工生命の分野においては、行動獲得に Neuro-evolution が使用されるために、莫大なシミュレーション数が必要となり、厳密な抗力の計算よりは実用的に精度が保たれれば高速な近似計算法が望まれる。この問題に対しては、本論文においては、ヘリコプター等の空力機械の設計に用いられる抗力の高速な計算法を採用可能であることを示し、十分に実用的であることを検証している。

ついで、先に提案した環境構築の下で形態と行動獲得の関係をシミュレーションにより調査している。ここでは、同じ形態である場合の水中と大気中での行動獲得の違い、同じ形態であっても、形態をモデル化するプリミティブジョイント数の違いによる獲得される行動の違い、形態の2次元アスペクト比を一定にした場合の残り1次元の変化による行動の違い、等を明らかにした。

本論文は全5章で構成されている。第1章では序論として研究背景、目的及び関連研究が述べられている。ついで、人工生物の行動獲得を実現するために適用される人工ニューラルネットワーク(ANN)及びその行動最適化を学習として実現する最適化アルゴリズムについて概観している。

第2章では、コンピュータ上で計算量が小さい物理法則に従う流体環境を構築する方法が提案されている。この方法は、翼型のプロペラやタービンブレードの設計式に使用される経験式を基にしたものである。このようにして構築した擬似水中環境において、魚を模倣して作製した人工生物が、

実際の魚のような遊泳行動を獲得できるかを検証している。このために、Neuro-evolution を作製した人工生物の関節制御に適用し、構築した水中環境で人工生物が形状に適した行動を獲得可能であることを明らかにしている。

第3章では、人工生物の形状、すなわち形態と関節数が人工生物が獲得する行動に与える影響に関して述べている。形態と行動については、地球上の生物の体重と移動速度の関係がべき乗則に従うことが報告されている。しかし、流体中における形状、すなわち形態と関節数が遊泳の移動速度に影響を持つかどうかは明らかにされていない。そこで、「遊泳する魚」に注目し、流体の影響力すなわち流体抗力を実現した仮想環境内で、簡易的な形態を持つ人工生物の遊泳行動獲得実験を実施し、人工生物の関節の数を一定とし人工生物の形態をアフィン変換させた場合と、形態に関して全長を一定とし人工生物の関節数を変化させた場合の行動獲得実験を実施している。前者の実験では、形態の大きさが人工生物の体重に関連するので、遊泳には人工生物の体重と遊泳のために獲得する移動速度の関係が、実際の生物の体重と移動速度の関係と同様にべき乗則に従うことが明らかにしている。後者の実験については、全長に応じて速く遊泳するための最適な関節数が存在することが明らかにされた。

第4章では、異なる流体環境が人工生物が獲得する行動に与える影響に関して述べている。この影響を調べるため、人工生物の密度と流体の密度を等しく置き、その密度を変化させ、簡易的な形状の人工生物の行動獲得実験が実施している。その結果は、密度が小さくなればなるほど、獲得する移動速度がより速くなることを示している。また、人工生物の密度を一定とし、流体の密度のみを変化させた環境において鳥を模倣した人工生物の上昇行動獲得実験も実施し、この場合は、水中環境で獲得する行動と空気環境で獲得する行動とは異なる行動が創発されることを検証している。

最後に、第5章では、本論文の結果をまとめ、今後の展望を述べている。

これを要するに、著者は、人工生命の環境と形態の視点に於いて、行動獲得が異なることを明らかにし、特に、流体抗力の働く場に置いては、人工生命の移動速度(遊泳能力)と形態は、抗力の受ける形態の面積が移動速度とべき乗法則にあり、また、トポロジーの違いによっても獲得される行動が異なることを具体的に明らかにした。従って、本学位論文は人工生命技術や複雑系工学の発展に寄与するところ大であり、博士(情報科学)の学位を授与するに値するものと認める。