

氏 名	^{ムハンマド} ^{アジズ} ^{ムスリム} Muhammad Aziz Muslim (インドネシア)
学 位 の 種 類	博 士 (工学)
学 位 記 番 号	生工博甲第86号
学位授与の日付	平成20年3月25日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学 位 論 文 題 目	Segmentation of Environment and Formation of Graph-based Maps in Mobile Robots (移動ロボットにおける環境の分節化とグラフベース地図の構築)
論 文 審 査 委 員	主 査 教 授 森 江 隆 ” 山 川 烈 ” 石 川 眞 澄 ” 林 初 男 ” 永 松 正 博

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、移動ロボットにおける環境の分節化とこれに基づいたグラフベース地図の構築に関する研究について述べる。

第一章は、序論として本論文の位置づけを与えている。エージェントと環境の相互作用を重視するニューAIは、古典的AIが解決できない諸問題を解決することが期待されている。環境との相互作用の結果、エージェントは設計者が事前にプログラムしていない行動を創発することが可能となる。これは哺乳類やヒトなどの生物エージェントが日常的に行っている。本論文では、このために必要なメカニズムを見つけることを目的とし、テストベッドとして移動ロボットを用いる。

実世界は、古典的AIがしばしば用いる仮想世界とは大きく異なる。実世界には、常に、複雑さ、ノイズ、非線形性がある。実世界に関する情報はしばしば時空間情報であり、実時間で情報処理をするのが困難である。実世界の課題を解こうとすると、固有の困難さのため、満足な結果が得られないことが多い。これに対する一つの解決案は、時空間情報を意味のある塊に分節することである。本論文の目的は世界を分節し、効率的処理のためグラフベース地図を構築することである。

移動ロボットの感覚信号に基づくタスク分節化は効率的ナビゲーション実現のために重要であり、広く関心が持たれている。本研究では、モジュラーネットワーク自己組織化マップ(mnSOM)を用いて、移動ロボットのデータに基づく分節化を行う新しいアプローチを提案する。移動ロボットへの適用に際し、標準的mnSOMは適用できない、何故ならば標準的mnSOMはクラスラベルが事前に既知であるという仮定を用いているからである。しかし移動ロボットにおいては、未分節のデータ系列しか与えられない。そこでクラスラベルが部分系列中には変化しないとの仮定の下に、系列を多数の部分系列に分割することを提案する。標準的mnSOMの学習がクラス毎に行われるのとは対照的に、mnSOMの学習は部分系列毎に行われる。

得られたmnSOMに基づいてグラフベース地図を構築する。センサー・モーター信号の確率的特性により、決定的方法の代わりに、隠れマルコフモデル(HMM)を用いることを提案する。データ系列が与えられた場合、mnSOMによりラベル系列が得られるが、これにはノイズによる誤りが含まれるかも知れないからである。最後に、得られたラベル系列から、L字路やT字路の場所が同定され、ノードとして用いる。これによりグラフベース地図が直ちに構築できる。比較のためセンサー・モーター信号に基づくベクトル量子化を隠れマルコフモデルに適用する実験も行った。これによっても得られた隠れマルコフモデルからグラフベース地図を生成することができる。

第二章では、関連研究の紹介を行う。モジュール型競合学習ネットワーク、モジュール型競合学習リカレントネットワーク、自己組織化マップ、モジュラーネットワーク自己組織化マップ(mnSOM)などについてその定式化を紹介するとともに、それぞれの長所・短所などについても論ずる。

第三章では、まずケペラロボットおよびそのソフトウェアシミュレータである Webots について説明する。続いて標準的な mnSOM は移動ロボットにそのまま適用できないことを述べ、センサーモーター信号系列を部分系列に分割し、この部分系列内部ではラベルが変わらないという仮定の下に、部分系列毎に学習することを提案する。これにより環境の分節化を実現できる。これは同じクラスに属する部分系列に対応する勝者モジュールが同じラベルを持つという非現実的な仮定を用いて得られたものである。これでは実際の役に立たないので、本研究ではこのような非現実的な仮定を用いずに分節することを提案する。

まず得られた mnSOM に対して通常の階層的クラスタリングを適用する。階層的クラスタリングは任意のモジュール対間の距離が正確に与えられるという前提を用いているが、mnSOM の場合はこの前提は妥当とは言えない。そこで次に空間的に隣接したモジュール間の距離に空間的近接性、さらに時間的・空間的近接性を加味した距離を定義し、この距離に基づくクラスタリングを提案する。

第四章は、隠れマルコフモデル (HMM) を用いてグラフベース地図を構築する方法を提案する。HMM の観測シンボルとして、k-means を用いてセンサーモーター信号を量子化する方法と、mnSOM の学習により得られたラベルを用いる方法とを提案する。得られたグラフベース地図を用いて、ゴールまでのナビゲーションを行う方法も提案する。

第五章では、環境の分節化に関する実験結果を述べる。まず mnSOM の学習を用いた環境の分節化により、新規データに対して 94.05% の分節化正答率が得られた。次に得られた mnSOM に対して通常の階層的クラスタリングを適用する。上記の非現実的な仮定を用いなくても、分節化正答率は 1.2% 減少しただけであった。階層的クラスタリングは任意のモジュール対間の距離が正確に与えられるという前提を用いているが、mnSOM の場合はこの前提は妥当とは言えない。そこで次に空間的に隣接したモジュール間の距離に時間的近接性も加味した距離を定義し、この距離に基づくクラスタリングを提案する。この時空間近接性を導入したクラスタリングは通常の階層的クラスタリングよりも優れた性能を示すことが分かった。

第六章では、得られた mnSOM に基づいてグラフベース地図を構築する。センサー・モーター信号の確率的特性により、決定的方法の代わりに、隠れマルコフモデル (HMM) を用いることを提案する。データ系列が与えられた場合、mnSOM によりラベル系列が得られるが、これにはノイズによる誤りが含まれるかも知れないからである。K-means によるセンサーモーター信号の量子化を観測シンボルと考えた k-means-HMM および mnSOM により得られたラベルを観測シンボルと考えた mnSOM-HMM を提案する。HMM 推定に際し、系列の終了時点を決定する方法として、正規化尤度が最大となる時点を定める。k-means HMM により、103 部分系列中 86 個が正しく分類され、HMM のモデル選択に関しては誤りがなかった。また mnSOM-HMM により、103 部分系列中 92 個が正しく分類され、HMM のモデル選択に関しては 1 個の誤りがあった。データ数が少ないので断定的な結論を出すことは避けたいが、k-means-HMM の方が優れていることが示唆される。なお、先験確率を導入することによりこれらの分類性能を向上させることができないかと検討したが、難しいことが判明した。

最後に、得られたラベル系列から、L 字路や T 字路の場所が同定され、ノードとして用いる。これによりグラフベース地図が直ちに構築できる。得られたグラフベース地図はゴール行動にも役立つ。シミュレーション結果によると、得られたグラフベース地図は、環境変化にも新しい地図を作る必要がなく、ゴール行動にも効率的に用いることが出来ることが分かった。

第七章では、本論文全体のまとめを述べる。本論文では、mnSOM およびクラスター化により環境が分節化できること、k-means によるセンサーモーター信号の量子化に基づく HMM、および mnSOM により得られたラベルに基づく HMM により、グラフベース地図が構築できることを実証した。また得られたグラフベース地図によりナビゲーションが効率的に行えることを示した。併せて今後に残された課題や今後の研究の展望を述べた。

以上のように、本論文は自律移動ロボットのセンサー情報に基づく環境の分節化およびグラフベース地図の構築を行い、その有効性をさまざまな角度から実証し、現実的な有効性を明らかにすることに成功しており、移動ロボットの分野の発展に貢献するところが大きい。

学位論文審査の結果の要旨

本論文に関し、論文調査員および公聴会出席者から、用いた mnSOM とオリジナルの mnSOM の相違点、部分系列の作成法、隠れマルコフモデルにおける観測シンボル、モデル構造と関数、状態はそれぞれ何か、状態数増加はどのような場合に起きるのか、神経科学との接点は何かなどに関する質問が出されたが、いずれも著者の的確な説明により質問者の理解が得られた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が、博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。