

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 上田 隆一

本論文では、ロボットの行動決定則（方策）をロボットのランダムアクセスメモリ（RAM）に小容量で記述する手法を提案した。提案した手法では、動的計画法（dynamic programming, DP）で計算されて配列上に記述された行動決定則（状態行動地図）を、ベクトル量子化（vector quantization, VQ）で圧縮するという手順により、少メモリ消費で高効率の方策が作成される。

1章では、研究背景、関連研究、本論文の目的について述べた。本論文ではロボットの行動決定問題としてマルコフ決定過程と最適制御問題を扱ったため、それらを定式化して方策の最適性に関して説明を行った。その後、任意の問題に対して、1) ロボットの行動が瞬時に読み出せる（反射の方策である）、2) 最適制御問題の観点から高効率、3) 記述に必要なメモリ量が少ない、の3点を満たす方策を作成する課題を提起した。このような問題に対する関連研究は多数存在するが、実装時のメモリ容量に注目した研究は行われていない。関連研究の多くでは、行動決定問題を解く際に必要な関数近似手法に注目しているが、好ましい方策が得られなかったり、近似方法が複雑でむしろメモリ量が増大したり、副作用も存在する。そこで、本論文ではメモリ消費に対して高効率な反射型方策を作成する手法の提案を目的とした。

2章では、反射型方策の表現方法として状態行動地図について定義し、人工知能の標準問題である水たまり問題を例に DP による地図作成方法について説明した。状態行動地図は、ロボットや環境のあらゆる状態に対して分類、番号付けし、その番号順にロボットの行動を記述した配列として定義される。このような表現はメモリ量の点で非効率であると見られがちであるが、本章では、場合によっては他の有名な方策表現方法よりも、状態行動地図の方がビット当たりの効率が良いことを明らかにした。

3章では、VQ による状態行動地図の不可逆圧縮手法が提案された。本手法を適用することでメモリ量を削減できる一方、圧縮された地図（VQ 地図と呼ぶ）の効率は下がる。画像や音声の VQ 圧縮では、圧縮で生じるデータの差異（劣化）を数値化する尺度：歪み測度が定義され、それを最小化するように圧縮が試みられる。これらの場合、歪み測度は各要素の数値の変化量で定義できる。一方、状態行動地図の場合は一つの行動変化が地図中で連鎖的に影響を及ぼすため、歪み測度の定義、あるいは圧縮自体が非常に困難となる。そこで VQ を状態行動地図の圧縮に適用するために「状態価値歪み」を新たに提案した。

4章では、VQ 地図のビットあたりの効率を向上させるためのいくつかの手法を提案、評価した。

5章では 2 リンクに対して 1 つのアクチュエータを持つ劣駆動マニピュレータの一種、アクロロボットに対して提案手法を適用し、評価を行った。本章ではアクロロボットの振り上がり問題を扱った。非線形で複雑な挙動が原因で、アクロロボットの制御は一般に難しい。しかし本章では、提案手法を水たまり問題と同様にマルコフ決定過程として定式化し、提案手法を水たまり問題と同じく適用できる（圧縮率 0.15%）ことを示した。

6章では、提案手法をロボットサッカー（ロボカップ）に適用した。ロボカップは、現在最も有名なロボット工学・人工知能の標準問題となっている。本章では、2 種類の異なる性質を持つタスクを定義し、提案手法を適用した。

一方のタスクは、4 足ロボット ERS-210 がボールに最小歩数で到達する問題を扱い、実機実験を行った。この実験では実機において、圧縮率 1.5% の VQ 地図が、もとの状態行動地図とほぼ同じ効率を有することを確認した。もう一方のタスクでは、2 台の ERS-210 が最短時間で得点する問題を扱った。このように状態変数の多い問題は、DP を含めて提案手法にとっては不向きな問題であり、本論文の定式化では状態行動地図の要素数は 6 億状態に達した。しかし提案手法により、

計算機 (3.2GHz Pentium D と 3.0GB の RAM 搭載) で解き, ERS-210 に搭載可能なメモリ量 (16MB 以下) の VQ 地図の作成に成功した. そして, シミュレーション上で VQ 地図がロボットを協調させて効率よくボールをゴールに運ぶことを確認した.

7 章では, これまでの適用例を踏まえて, 提案手法中の各アルゴリズムや概念について評価, 議論を行った. 特に, 状態価値歪みの汎用性について詳しく議論した. 8 章では本論文の結論を述べ, 地図作成後に VQ 圧縮をすることの利点を明示した.

以上のように, 本論文はロボットの制御則を実装するための実際的で新しい手法を示した. これは, ロボットや制御工学の分野において価値ある成果だと言え, 工学全般の発展に大きく寄与するものである.

よって本論文は博士 (工学) 学位請求論文として合格と認められる.