



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Development of Spatial Cognition through Visuomotor Integration in Hierarchical Recurrent Neural Networks [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	野口, 渉
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第13727号
Issue Date	2019-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/75954
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Wataru_Noguchi_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（情報科学） 氏名 野口 渉

学 位 論 文 題 名

Development of Spatial Cognition through Visuomotor Integration in Hierarchical Recurrent Neural Networks

（階層型リカレントニューラルネットワークを用いた視覚・運動統合による空間認知の発達）

自身の空間位置を認識し目的の場所までナビゲーションする空間認知能力は生物の生存に必要な能力である。特に、生物は脳内の認知地図と呼ばれる空間構造の内部モデルを用いることで空間認知能力を実現していると考えられている。実際にラットなどの哺乳類の脳内に個体の空間的位置を表現する場所細胞や格子細胞のような神経細胞が発見されているが、そのような空間認知能力が、いかにして後天的な経験を通して発達するのかは十分にはわかっていない。本論文では、生物と同様に、経験を通して空間認知能力を発達可能なシミュレーションモデルの構築を試みる。特に、認知地図的な空間構造・位置関係の認識と空間的位置の認識を利用した空間ナビゲーション能力の発達を考えている。

空間認知能力の発達のシミュレーションを試みた研究は過去に多数存在するが、モデルに空間的场所とその空間的位置関係を直接教示するものがほとんどで、生物が得ているような感覚情報の経験のみから空間認知の発達するシミュレーションは実現されていなかった。空間位置の直接教示なく一人称的な視覚経験を通して場所の認識を発達するモデルも提案されているが、単に場所の同一性を認識するのみで場所間の空間的位置関係、つまり空間構造の認識の発達は実現されていなかった。本論文では、空間構造に関する教示なく、視覚・運動経験の学習のみを通じた空間認知能力の発達をシミュレーションしている。空間認知の発達をシミュレーションするモデルは深層学習の手法をベースにして構築することで、視覚・運動経験の学習のみによる空間認知能力の発達を可能とする。特に、時系列情報を認識する Recurrent Neural Network が階層的に結合した Hierarchical RNN (HRNN) を用いている、HRNN の上位レベルの RNN は、局所的に変化する視覚・運動感覚の入出力を直接扱わないため、視覚・運動経験に含まれる大域的な情報を認識することが可能である。この大域的な情報として空間構造の認識が発達すると期待される。本論文で行ったシミュレーションでは、HRNN を用いた視覚・運動経験の学習によって、空間的構造・位置の認識の発達と空間的位置の認識を用いた空間ナビゲーション能力の発達の実現している。

本論文は全 4 章で構成される。第 1 章では、研究背景と目的を述べている。特に、既存の空間認知の発達を扱ったシミュレーションモデルについてまとめ、本論文で提案する視覚・運動経験からの空間認知発達のシミュレーションの必要性について述べている。

第 2 章では、HRNN を用いた視覚・運動経験の学習からの空間構造の認識の発達がシミュレーションされる。ここで用いる HRNN は上位と下位の 2 層の RNN から構成され、視覚・運動系列の予測学習を行う。まず、計算機上の仮想のシミュレーション環境における移動ロボットの視覚・運動経験をj用いた発達シミュレーションを行っている。HRNN が移動ロボットの視覚・運動の予測学習を行うことによって、上位 RNN の内部状態に空間構造の内部モデルが発達することが示される。特に、移動ロボットが学習中に通ったことのない場所を通った場合においても、空間的位置を認識して

いることをもって、空間構造の認識が獲得されたことを示している。また、視覚・運動の学習条件によって発達する内部状態の違いを比較することによって、視覚の外部入力がない状況において運動情報のみから視覚を長期的に予測する学習が、空間構造の認識の発達には必要であることを示している。また、様々な行動のランダムさに伴う視覚・運動経験において獲得される内部状態の表現を比較し、空間構造の認識の発達には、適度な行動のランダムさが必要であることも示している。また、視覚特徴を扱う RNN モジュールをもつことによって、視覚的特徴の異なる複数の環境間で共通する空間構造の認識の発達が可能であることも示した。さらに、実世界で取得したヒトの空間的移動に伴う視覚・運動系列においても空間的位置の認識の発達のシミュレーションを行い、HRNN が理想的なシミュレーション環境に限らず、実世界における空間構造の認識の発達シミュレーションも可能であることを示している。

第 3 章では、第 2 章で用いた HRNN にナビゲーションをコントロールするための上位レベル RNN を追加して、計 2 つの上位 RNN をもつ Navigational HRNN (NHRNN) モデルを提案し、視覚・運動の経験からの空間ナビゲーション能力の発達がシミュレーションされる。NHRNN は、目的地を示す視覚画像を元に、教師として与えられるナビゲーション行動に伴う視覚・運動系列を模倣して生成するように学習する。まず、障害物が存在しないオープンスペースにおける仮想移動ロボットのナビゲーションを NHRNN に学習させたところ、2 つの上位レベル RNN に空間構造の表現と目的地に応じて変化する内部状態が獲得された。このときに内部状態に表現される空間的位置は移動ロボット自身の位置のみであった。次に、障害物が存在し、障害物配置が変化することによって構造を変化させる環境においてナビゲーション学習を行ったところ、目的地の空間的位置の表現が発達していることが確認された。さらにこの場合、目的地の空間的位置を考慮することによって、通ったことのない場所を通過してナビゲーションするショートカット行動をとることが確認された。以上の結果より、様々な構造の環境において、効率的なナビゲーションを行うための表現として、空間的位置の認識、さらに、空間的位置を考慮したナビゲーション能力が発達することが示された。

第 4 章においては、シミュレーションの結果から空間認識の発達過程について考察し、本論文の結論を述べている。特に、空間認知の発達における視覚・運動統合学習の重要性、実際の生物と本論文で用いたモデルとの違いについて考察し、本論文のシミュレーションが空間認知の発達に関する研究にもたらした知見をまとめ、今後の展望についても述べている。