

審査の結果の要旨

氏 名 山田 康智

本論文は「ヒト胎児シミュレーションを用いた発達における身体性寄与の構成論的解明」という題目で、計測データに基づく筋骨格身体と脳神経系、子宮環境のモデルから構成されるヒト胎児シミュレーションを構築し、これを用いてヒト胎児の感覚運動経験に基づく神経系、運動認知発達について身体・環境・運動・神経系基質・身体表象の各種要因が正常発達と異常な発達を導く仕方について構成論的に示している。論文は七章から成る。

第一章は序論である。ここでは、早産児を含む胎内環境経験の短縮や異常と発達障害との関係性が指摘されており生後の発達ケアの重要性が一層強く認識されつつある一方で、胎児の発達において何が重要な要因であるのかを含む発達メカニズムについての知見が不足している背景について説明した。この背景を受け、欧米では発達障害と胎生期の関係を探る複数の大規模プロジェクトが急速に展開しつつあるが、ヒト胎児における操作的実験や詳細な計測が困難であることから、遺伝子や脳の構造要因を中心に据えており、胎内環境経験に基づく発達メカニズムについては未だ研究が行われていない。そこで本論文では、胎児シミュレーションの構築に基づく構成論的方法によって、発達メカニズム解明として、胎内環境における感覚運動経験を構成し正常な発達を導く身体性要因とその仕方について明らかにする事を目的として設定した。

第二章では、胎生期環境経験に基づく発達についての近年の知見を整理するとともに、この発達に寄与が想定される身体性要因について選定を行った。その結果、脊髄神経系における自発運動及びロコモーション様運動の発達、皮質一次体性感覚野における身体表象発達、皮質における複数モダリティ統合による認知発達の三つを本研究で扱う発達過程とした。これらの発達に寄与が想定される要因としてはそれぞれ、筋骨格身体、早産児に異常が観察される環境・運動・神経系基質の要因、後続の発達における基盤を提供する身体表象をその候補として選定した。

第三章では、構築した胎児シミュレーションについて説明した。胎児標本のMR画像をベースとし、胎児骨格標本レプリカと大人の全身筋骨格モデルを総合して胎児筋骨格身体モデルを作成した。このモデルに基づき、剛体シミュレーションの為に生体筋、深部感覚、触覚、視覚の生体モデルを導入するとともに、子宮膜と羊水から成る胎内環境モデルを作成した。脳神経系モデルとしては、脊髄神経系モデルと新生児MR画像解析に基づく大規模皮質モデルから構築している。これを用い、第四章から第六章でそれぞれ実験をおこなっている。

第四章では、脊髄神経系において生成される自発運動、その発達的变化及び脊髄神経系発達とロコモーション様運動の発達について、筋骨格身体構造によって再現・説明できる事を示している。更に、筋骨格身体がこの自発運動を通じて感覚運動情報を身体部位に応じて構造化し、次章以降で検証する発達において足場を提供している事を示している。

第五章では、第一に、筋骨格身体によって構造化された感覚情報に基づく皮質一次体性感覚野での身体表象発達が、従来にない複数の観点で生体のそれを再現・説明できる事を示した。第二に、早産児に観察される異常をシミュレートする事により胎外環境への暴露、運動パターンの複雑性・多様性減少、神経系の興奮性抑制性不均衡がそれぞれ身体表象発達に影響を与える事、及びその仕方について明らかにしている。

第六章では、胎児シミュレーションからの体性感覚、視覚の入力のもとで皮質全域での学習をシミュレートし、第五章の結果である身体表象発達の構造・機能的低下が、正常想定 of 身体表象を用いた学習状況下に比して、感覚統合及び予測的な神経活動の学習を顕著に阻害する事を示している。ここまでの結果を総合して、早産児に観察される異常が身体表象発達の構造・機能的低下を起し、その後の感覚統合を含む皮質発達に影響を与え、発達障害の一要因となっている可能性について議論している。

第七章では、以上を総括してヒト胎児発達における身体性寄与について得られた知見を整理し結論とした。

以上これを要するに、本論文では、計測データに基づく詳細かつ精密なヒト胎児シミュレーションを新規に構築し、これを用いた構成論的方法により、脊髄から皮質へ至る感覚運動経験に基づくヒト胎生期発達について、これを左右する身体性要因とその仕方を実証的に示すとともに、発達障害と胎生期環境経験の関係性について予測を提示した。これにより、社会問題化している発達障害との関連から重要性が強く認識されつつも、技術的倫理的困難さゆえ未だ研究が十分に進んでいないヒト胎生期発達について、新たな研究方法論とそれに基づく科学的知見を実証的に提示しており、学問的にも社会的にも重要な先導的貢献といえる。

以上の成果は、情報理工学分野の発展に寄与するところ大である。よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。