

造船建造工程に対する三次元シミュレーション技術の研究

谷口 智之*, 松尾 宏平*, 森下 瑞生*

Three-dimensional Simulation Technology Based on Multi-agent System for Shipbuilding Construction Process

by

TANIGUCHI Tomoyuki*, MATSUO Kohei* and MORISHITA Mizuki*

Abstract

In this paper, we introduce a 3D simulation technique based on a multi-agent system for precisely simulating shipbuilding processes, specifically sub-assembly and assembly processes. Furthermore, we use a parametric model to validate this simulation method in terms of required man-hours. We propose a method in which the environment in a multi-agent system is a virtual factory and the agents are considered as workers. The virtual factory consists of models of products, facilities, and tasks as data structures, which can be observed by the agents during the simulation. In addition, we propose a modeling method in which tasks are represented as a combination of basic tasks in order to precisely reproduce even incidental tasks. This enables detailed simulation of incidental tasks such as movement.

*構造・産業システム系

原稿受付 令和6年10月8日

審査日 令和6年11月14日

目 次

1. まえがき	106
2. 建造工程のシミュレーション技術	107
2.1 概要	107
2.2 環境のモデル化	107
2.3 タスクのモデル化	108
2.4 エージェントのモデル化	108
3. シミュレーション結果	109
3.1 小組立工程のシミュレーション例	109
3.2 大組立工程のシミュレーション例	109
3.3 パラメトリックモデルを用いた応用計算例	110
4. まとめ	111
謝 辞	111
References	111

1. まえがき

本報は海上・港湾・航空技術研究所 第1期中長期計画 海上技術安全研究所の重点研究分野「海上輸送を支える基盤的な技術開発」の重点11「造船業の競争力強化や新たなニーズに対応するための新しい生産システムの構築並びに新材料利用技術に関する研究」において令和3年度～令和4年度の2年間に実施した建造工程のシミュレーション技術に関する研究内容をまとめたものである。令和5年度以降、本研究は第2期中長期計画 海上技術安全研究所の重点研究として引き継がれて研究を実施している。

世界の海上荷動き量は年々増加の一途をたどっており、今後増々建造需要が伸びていくことが長期的には予測される。一方で、建造量の総トン数に対する割合は、中国・韓国に次ぎ、日本は第3位で2割程度となっており、国際的な競争力強化が望まれる。また、GHG排出削減を目的として新型の船を設計し建造する機会も増加しており、より複雑な船を効率的に建造する必要性が出てきている。

このような中、造船の建造工程を仮想空間上で再現することは、事前の作業性の評価、作業の効率化や最適化、工数の正確な把握、設備投資時の判断など様々な場面において、造船の生産性を向上させるために必須の技術といえる。既存研究や市販シミュレーション技術においては、作業時間の見積もりに主作業の管理物量・能率といった推定法や過去の実績を用いたやり方が行われている。管理物量の代表例としては溶接線長や重量、個数といったものがある。能率は過去の実績からこれら管理物量を用いて算出したものを用いることが多い。簡易的に実施でき、主作業が多くを占める工程やサイクリックな作業が多い工程では有用であるが、多品種少量生産が現状の造船分野では、完全にサイクリックな作業といえる部分は少ない。さらに、造船における主作業率は、職種にもよるが一般に30～40%との報告¹⁾もあるため、主作業の管理物量に比例しない要素を正確に考慮できていない。松尾・谷川²⁾はこの主作業以外で大きな割合を占める付随作業（それをしないと主作業を進められないが、それ自体ではワークが完成に向かって進まない作業）は、作業者が各々で判断して実行していると述べている。この付随作業は、大きな製品による空間的な制約やクレーンの干渉といった立体的な制約を考慮する必要がある。作業時間や作業の先行関係にまで影響を及ぼすため、事前の詳細な取扱いが難しいものであった。しかしながら、このような付随作業と空間的制約、および作業者の自律的なふるまいといった要素は、造船工程の緻密な再現のためには必要不可欠な項目といえる。

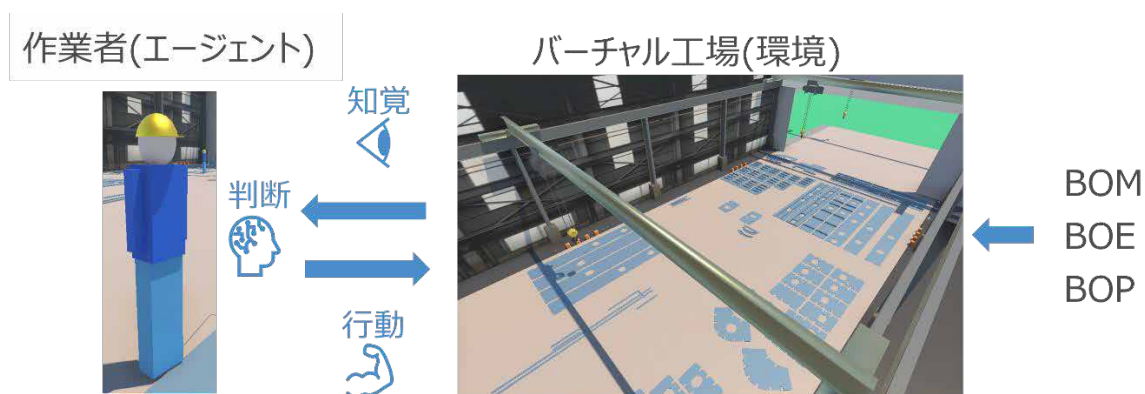
本研究では、これら主作業のみならず、付随作業にまで着目して建造工程を緻密に再現・予測できるシミュレーション技術の開発を行った。以降、2章ではその建造シミュレーション技術のロジックに関する説明を行い、3章にていくつか例題を紹介する。

2. 建造工程のシミュレーション技術

1章の背景のとおり，造船現場において作業者が自律的に判断して行動する付随作業要素が多くを占める．本研究ではこの付随作業までを緻密に再現する造船作業のモデル化手法と，空間的な制約を考慮した作業者の自律的な判断を再現するマルチエージェントベースの建造シミュレーション手法の研究開発を実施してきた．以降2.1にて本システムの概要について説明し，2.2では工場等の環境のモデル化，2.3では仕事に相当するタスクのモデル化，2.4では作業者に相当するエージェントのモデル化について説明する．

2.1 概要

図1に本建造シミュレータの概要を示す．まず，エージェントとは環境を知覚し，なんらかの判断メカニズムに基づいて行動する主体である．そしてこれらエージェントが集まった集団をマルチエージェントと呼ぶ．本報では，このエージェントを作業者，環境を仮想的な工場と見なす．仮想的な工場はプロダクトモデル，ファシリティモデル，タスクモデルの3つから構成され，エージェントはこれら仮想的な工場の情報を観測・知覚することができる．また，これらの情報を基に自身がすべき行動を判断し，実際に行動を起こすことで環境が変化する．例えば製品が組みあがるといった変化が生じる．この変化は次の観測・知覚時に反映されているため，自律的に製造工程を再現することが可能である．複数の作業員がそれぞれ別々で作業を実施するような工程のシミュレーションではマルチエージェントシステムが適切であると考えられる．



BOM(Bill of Materials) ⇒ プロダクトモデル（設計データから）
 BOE(Bill of Equipment) ⇒ ファシリティモデル
 BOP(Bill of Process) ⇒ タスクモデル

図1 マルチエージェントベースの建造シミュレータ

2.2 環境のモデル化

環境を表すデータのうち，プロダクトとファシリティについて本節では説明する．タスクについては2.3節にて説明する．まず，プロダクトについて大きく Engineering-BOM(E-BOM)と Manufacturing-BOM(M-BOM)の情報に分かれる．E-BOMは完成状態における製品を構成する部品自身の属性情報および結合情報を定義する．小山ら³⁾の Entity-Relationship³⁾での定義を参考にしつつ，グラフデータ構造の観点から構成部品をノード，結合関係をエッジとして定義する．これらは3次元の形状データを含む．次に，M-BOMは中間製品と構成部品および組立の情報をツリー構造として定義する．ノードに構成部品もしくは中間製品の名称を定義する．中間製品を構成する製品から中間製品に向かう向きを持ったエッジを構築する．

ファシリティについては，設備を表す3次元の形状データと，固有の能力値，初期位置と角度を定義する．例えば，クレーンについては横行，走行，巻き上げ，巻き下げの速度などが固有の能力値として定義される．

2.3 タスクのモデル化

タスクに必要な情報とタスク間の先行関係を定義する。タスクモデルのノードは、タスク名、タスクの種類、カスタムタスク、対象オブジェクト、利用ファシリティ、必要なファシリティ種類と個数、タスク固有のパラメータ、実行完了か否か、実行主体者を属性値として定義し、タスク間には、先行関係をあらわすエッジを定義する。ここにカスタムタスクとは仮想空間上におけるプロダクト、ファシリティ、エージェントのふるまいを定義した関数である。

松尾・谷川ら²⁾が述べるように、造船の作業は階層的にとらえることができる。造船作業は大きな順に、オーダーレベル（ブロック単位）、ワークレベル（小組単位）、作業レベル（配材、溶接といった作業単位）、要素作業レベル（道具の取得や設置など）、動作レベル（手を動かすなど）の5つの階層に分類している。このとき、付随作業まで表現するためには、少なくとも要素作業レベルまでの再現が必要となる。作業レベルは要素作業の積み重ねとして表現できることから、本報では、作業レベルのタスクをカスタムタスク、要素作業レベルのタスクをベーシックタスクとして定義した。

まず、ベーシックタスクとして以下の7つを定義した。

- ① タスクの実行確認と終了
- ② リソースの占有と解放
- ③ 移動
- ④ 線に沿った移動
- ⑤ 指定時間の待ち
- ⑥ オブジェクトの位置と親子関係の変更
- ⑦ 中間製品オブジェクトの生成

カスタムタスクはこれら7つのベーシックタスクの組合せにより定義され、造船での様々なタスクを付随作業まで含めて表現できる。例えば図2は溶接自動台車を用いた溶接のカスタムタスクのモデル化イメージを示している。作業者は③移動と⑥親子関係の変更のベーシックタスクを用いて道具の取得や配置を表現し、⑤指定時間の待ちや④線に沿った移動のベーシックタスクを用いてセッティングの時間や溶接作業を表現する。また、途中で条件分岐を用いて表現することで汎用性を上げた表現が可能である。

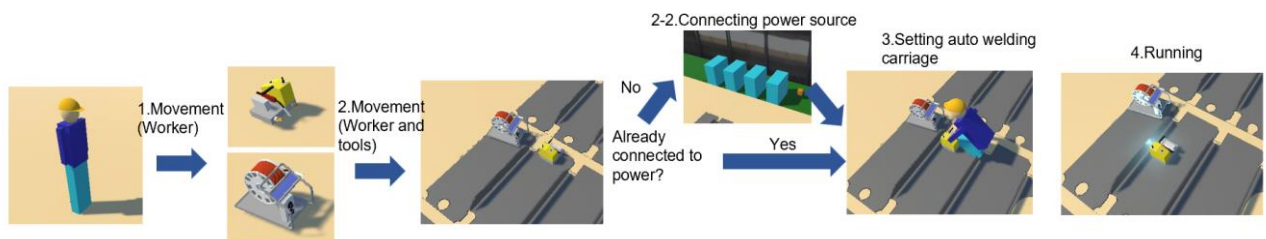


図2 溶接自動台車を用いた溶接のカスタムタスクのモデル化イメージ

2.4 エージェントのモデル化

2.2-2.3 節で述べたように、環境にはプロダクト、ファシリティ、タスクに関するデータが存在しており、それらはシミュレーション中に変動するパラメータを持っている。エージェントはそれらパラメータをシミュレーション中に取得でき、どのタスクを実行するべきか判断する。この判断については次の式(2.1)で表される評価値 V を用いて実施する。

$$V = \left(\frac{1}{k} Wp + b \right) \times \prod_{p_j \in cp} \text{sgn}(p_j) \quad (2.1)$$

ここに、 W は重み係数、 b は定数、 p は環境から取得される様々なパラメータ、 k はパラメータの個数、 cp はパラメータの中でも特定のパラメータ群を示し、これらのパラメータが一つでも0となった場合評価値自体も0となるようなクリティカルなパラメータである。この評価値を実施可能なタスクすべてに対して計算し、評価値が最大となるタスクを選択する。

また、一部のタスクについては配置場所も判断として決定する必要がある。例えば製品を定盤上のどこに配置するかといった問題がある。これは、参考文献4)の手法を用いて2次元の配置問題を解くことで実施している。

3. シミュレーション結果

実際の造船所における小組立工程と大組立工程を対象として本建造シミュレータを適用した計算を実施した。浅川造船株式会社のご協力のもと実施している。

3.1 小組立工程のシミュレーション例

図3は小組立工程のシミュレーション結果の外観図を示している。左図が実際の様子、右図がシミュレーション結果の様子を示している。本工程を対象としたシミュレーションを実施するにあたり、ビデオ撮影を行うことで本工程を構成するタスクを事前に整理した。主に、製品の移動、グラインダ作業、面取り作業、ジंक塗り、取付け、本溶接（自動台車を含む）、ひずみとり、治具の取付・取外し作業の9種類のタスクを構築した。詳細は参考文献⁵⁾⁹⁾を参照されたいが、タスクあたりの再現は高精度に実施できている。一方で、全体としての比較では、同一時間で実施した作業量はシミュレーション結果の方が多かった。これは実際の作業では現場で考える時間や情報伝達のために集まって会話をする時間などが発生しているためと考えられる。この結果から、本シミュレーション結果は高精度に理論的な工数を予測することが可能といえる。



図3 小組立工程の建造シミュレーション（浅川造船株式会社）
（左：実際の造船所の様子、 右：建造シミュレータによる計算）

3.2 大組立工程のシミュレーション例

大組立工程に対しても同様に本建造シミュレータを適用した。図4にその結果の外観図を示す。図に示すように、小組立工程とは異なり、大きなブロック構造に対して作業員が入って溶接などの作業を実施する必要がある。本シミュレーションでは、マンホールなども判別して作業員が歩行可能なエリアをランタイムに計算しており、空間的な制約を考慮した再現が可能である。これは造船などの大きな構造物を製作する工程に対しては重要な再現といえる。

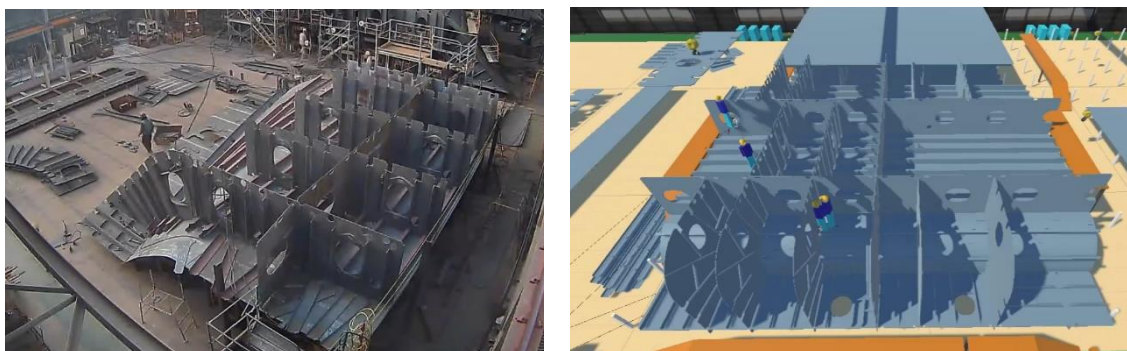


図4 大組立工程の建造シミュレーション（浅川造船株式会社）
（左：実際の造船所の様子， 右：建造シミュレータによる計算）

3.3 パラメトリックモデルを用いた応用計算例

3.1 節および3.2 節では具体的な構造物を対象とした計算を実施したが、本節ではパラメトリックモデルを用いた仮想的なブロック構造物に対してシミュレーションを実施した結果をまとめる。まず、図5に今回対象としたパラメトリックモデルを示す。ブロック長さや高さ、ロングスペースなどをパラメータとして設定し、これらを変更することで3Dモデルが適切に変更されるパラメトリックモデルを構築した。また、構築されたモデルに対して建造シミュレータによる大組立工程のシミュレーションを実施し、作業にかかった工数をプロットしたものが図6となる。横軸は大組立工程の溶接線長、縦軸は工数を示しており、パラメータを変更した4パターンをプロットしている。この図からわかるように、必ずしも溶接線長に比例するわけでは無く、パラメータによってはその影響が異なることが分かる。例えばロングスペースを短くするとカラープレートなどの部品が増えるため、付随作業が増え、溶接線長の増加よりもより大きく工数が増加する。このように付随作業まで考慮したシミュレーションにより、より緻密に理論工数のシミュレーションが可能となる。

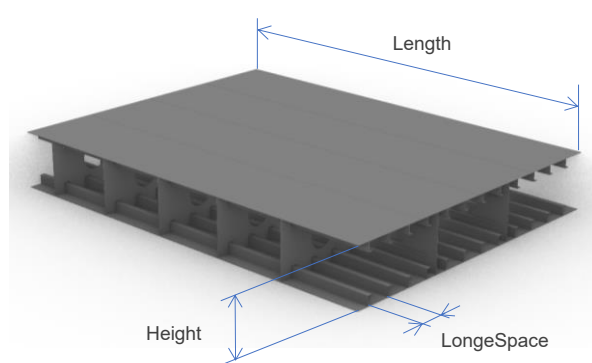


図5 造船ブロックのパラメトリックモデル

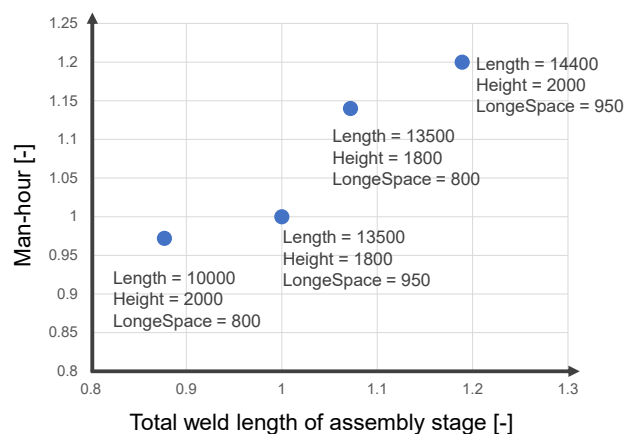


図6 パラメトリックモデルに対するシミュレーション結果

4. まとめ

本報では、造船工程の緻密なシミュレーションの実現を目指して、マルチエージェントシステムに基づく3次元シミュレーション技術の開発状況について紹介した。具体的な実際の工程である小組立工程と大組立工程に対しても適用し、さらにパラメトリックモデルを用いた全体的な工数の傾向まで本シミュレーションで把握できることを示した。マルチエージェントシステムにおける環境を仮想的な工場、エージェントを作業者と見立てた手法を提案した。仮想的な工場はプロダクト、ファシリティ、タスクのモデルをデータ構造として持っており、それらをシミュレーション中にエージェントが観測することが可能である。また、付随作業まで緻密に再現するためにタスクをより細かなベーシックタスクの組合せとして表現するモデル化手法を提案した。これにより移動などの付随作業まで緻密にシミュレーションを行うことが可能となる。

謝 辞

本研究の計算結果は、浅川造船株式会社様より提供いただいたビデオデータおよびCADデータを用いて実施しました。深く感謝いたします。

References

- 1) Matsuo, K., and Tanigawa, F.: Study on Modeling of Works in Shipbuilding by Production Simulation, 18th Research Seminar of National Maritime Research Institute, 2018 (in Japanese).
- 2) Matsuo, K., and Tanigawa, F.: Modelling of Work in Shipbuilding by Production Simulation, Proceedings of Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries 2020, 2020.
- 3) Koyama, T., Yamato, H., Tachikui, M., and Ueno, Y.: A Study on the Process Planning Expert System, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.168, pp.639-643, 1990 (in Japanese).
- 4) Burke, E.K., Hellier, R.S.R., Kendall, G., and Whitwell, G.: Complete and robust no-fit polygon generation for the irregular stock cutting problem, European Journal of Operational Research, Vol 179, pp.27-49, 2007.
- 5) Taniguchi, T., and Matsuo, K.: A study of process simulation based on a multi-agent system for shipbuilding, Proceedings of International Conference on Computer Applications in Shipbuilding 2022.
- 6) Taniguchi, T., Takezawa, M., and Matsuo, K.: Development of High Precision Process Simulation Based on Multi-Agent System for Shipbuilding, Journal of Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineer, Vol.36, p.89-100, 2022. (in Japanese)