

屋内空間でのロボット配送システムにおける 効率的な運用方法

瀧上 昂希¹ 福島 悠人¹ 浅井 悠佑¹ 浦野 健太¹ 青木 俊介³ 米澤 拓郎¹ 河口 信夫^{1,2}

概要：

自律移動ロボットの進歩に伴い、屋外・屋内環境でのロボット利用が拡大している。特に現在の電子商取引の増加を考慮に入れると、物流倉庫のような屋内空間での自律移動ロボットによる配送システム構築は重要な課題として存在する。屋外空間と比較したときの屋内空間の特徴としては、限定的な空間、階層的な建物構造、エレベータのような建物機構の存在が挙げられる。これらの特徴により、物流倉庫で効率的な配送システムを構築するには、空間の活用の仕方、フロア状況を考慮したロボットへの配送タスク割り振り、エレベータを利用した荷物やロボットの階層移動のタイミングなど、複雑な相互作用を及ぼし合う複数の要素を考慮する必要がある。これら要素の変化によって配送効率が受ける影響は建物条件ごとに異なることが予測されるが、実空間の複数の建物でそれらを検証することは手間とコストがかかり困難である。そこで本研究では、建物の動的な生成と、その建物での移動ロボットとエレベータを利用した配送タスクを行うマルチエージェントシミュレータを開発し、配送システム運用におけるいくつかの条件を変更したときに、配送効率やロボット・エレベータの稼働状況がどの程度変化するかを定量的に評価した。

Efficient Operation Methods in Robot Delivery Systems in Indoor Spaces

KOKI TAKIGAMI¹ YUTO FUKUSHIMA¹ YUSUKE ASAI¹ KENTA URANO¹ SHUNSUKE AOKI³
TAKURO YONEZAWA¹ NOBUO KAWAGUCHI^{1,2}

1. はじめに

自律移動ロボットの進歩に伴い、少子高齢化などの影響による労働力不足の解決や様々なシステムを効率化する手段としてのロボット利用が拡大している。主な導入先には物流倉庫、病院、商業・公共施設や街なかなどがあり、その目的は配送、配膳、警備、施設案内など多岐に渡るが、ここでは配送の観点から自律移動ロボットに注目する。配送の環境には、大きく分けて物流倉庫や病院などの屋内環境と宅配便配送などの屋外環境があるが、その中でもモノの

中継地点である物流倉庫は重要な要素である。ここで近年の電子商取引の増加は、物流需要の多様性やリアルタイム性、流動性の増加として現れ、これにより高度にシステム化されていない環境での人間によるピッキング作業効率が悪化している [1]。その作業費用は倉庫運営費全体の 55 % にも上ると推定されており [2]、倉庫運用の自動化は今や不可欠とされている [3]。

ここで、倉庫の種類には 1 階層のみで形成される平屋倉庫と複数の階層からなる多層階倉庫がある。多層階倉庫は平屋倉庫と比べて敷地面積を抑えながら大量の荷物が保管可能である一方、荷物を階層間で移動させる必要性が生じるため、その配送過程が複雑化するという課題がある。平屋倉庫では、荷物の配送を一人の人、あるいは一台のロボットにより完結させることができる。しかし多層階倉庫では、各フロアで配送タスク分割して行う必要があり、そ

¹ 名古屋大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University

² 名古屋大学 未来社会創造機構
Institutes of Innovation for Future Society, Nagoya University

³ 国立情報学研究所
National Institute of Informatics

の時々各階の状況に応じて作業員やロボットを階層移動させる必要があると考えられる。また、荷物の階層移動は、荷物の集まり具合に応じて適切なタイミングでエレベータを呼び出しを行う必要がある。そこで本研究では、ロボット・エレベータにより配送が自動化された多層階倉庫シミュレータを開発し、開発したシミュレータを用いて各フロアのロボット稼働状況の調査と、荷物を階層移動させるタイミングが配送効率に与える影響の評価を行う。

2. 関連研究

本章では、自律移動ロボット運用による多層階倉庫の配送システム自動化とそのシミュレーションに関連して、屋内環境でのロボット運用、効率的な倉庫システムの構築とそのシミュレーションといった観点から先行研究について述べる。

2.1 屋内環境でのロボット運用

屋内環境全般における自律移動ロボット運用の障壁としては、a. 狭い通路のような限定的な空間、b. 施設の階層構造、c. エレベータや自動ドアのような建物機構の存在が挙げられる。a は複数の移動ロボットを同時に運用する上で問題となり、ロボット同士を互いに衝突されることなく目標地点に移動させる、マルチエージェント経路探索問題として研究されている [4],[5]。b,c は移動ロボットを施設内で自由に移動させる上で問題となり、ロボット・建物間連携の必要性を生じさせる。このような連携の取り組みとしては、RRI からのロボット・エレベータ連携規格 [6] の公開や、Ville-feuille [7] によるビル内のロボット移動支援サービスの展開が存在する。研究としては、ロボット・エレベータ連携により、マンションの住人へ配送サービスを行うシステムの開発とユーザからの受容性評価を行ったものがある [8]。このように屋内環境での自律移動ロボット運用は盛んに研究されており、多層階倉庫における自律移動ロボット運用が現実的な課題となりうる事がわかる。

2.2 倉庫システム構築とシミュレーション

物流倉庫環境での配送システム構築の大きな課題としては、電子商取引による複雑な需要に応じた荷物のピッキング作業などが挙げられる。この課題の解決に向けては、倉庫管理システム (Warehouse Management System: WMS) と呼ばれる、倉庫内の荷物の移動と保管を管理することでピッキングなどの作業効率を高めることを主目的としたシステムの研究 [1],[9] がなされており、さらには、複数の自律移動ロボットと WMS を利用し、注文の入った荷物に対して最短距離にあるロボットをピッキング作業に割り当てることで、荷物回収時間の短縮を図った事例がある [3]。

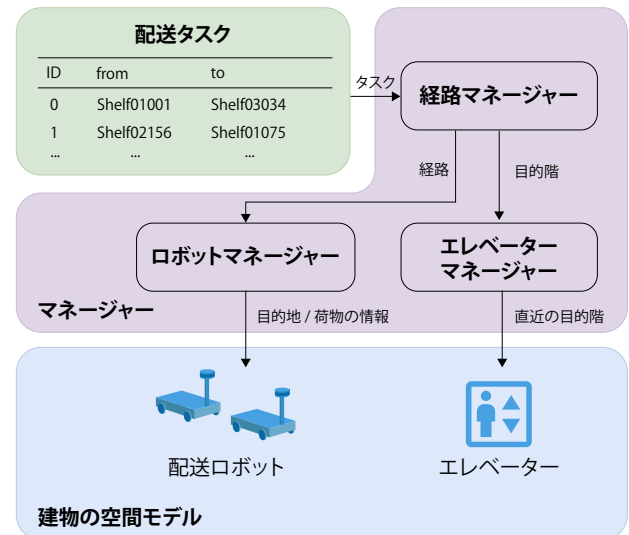


図 1 シミュレータ設計

また、シミュレータを用いて物流倉庫における配送システムの効率改善を図った研究はいくつもなされている。人による作業を想定した研究として、LIONG らは、洗剤工場において外部からやってくるトラックへの荷物受け渡しに伴う待ち時間が、トラックのスケジューリングとフォークリフト台数の追加により減少することを示した。また、Gagliardi らは、ベルトコンベアがピッキングの一部を担う菓子生産工場を対象に、製品の注文頻度に基づきピッキングに優先順位を与えることが効率改善に有効であることを示した [10]。ロボットを用いた配送システムのシミュレーション研究について、Lee らは自動倉庫においてレール上を走行する無人搬送車 (AGV) の導入台数が生産性に与える影響を評価した [11]。また Peixoto らは、AGV を用いた倉庫システムにおいて、いくつかの運用モデルが配送効率に与える影響を検証した [12]。いずれもシミュレータ上で倉庫運用システムの効率化を行い、その定量的な評価を行っているが、対象とする環境は階層の存在しない平屋倉庫のみである点に本研究との差異が存在する。

3. 提案シミュレータ

本章では多層階倉庫シミュレータの設計と実装を述べる。シミュレータの目的は、多層階倉庫に特有の課題である「荷物やロボットの階層移動」に関連する以下 2 点の評価である。

- (1) 各フロアのロボット稼働状況
- (2) 荷物を階層移動させるタイミング

3.1 設計

多層階倉庫シミュレータを設計する上では、(1) 配送タスク、(2) 配送エージェント、(3) 建物全体の空間情報をモデル化する必要がある。(1) のモデル化には、「荷物の大

きさ」,「期限」,「ピックアップ位置」と「配達先」が必要になる。配送エージェントは作業者やロボットを指し,「移動」,「荷物の積み込み」,「荷物の積み下ろし」,「判断」といった機能が必要とされる。建物全体の空間情報のモデル化には,「フロアの数」や「広さ」,フロア上の「荷物棚」や「荷物置き場」などの要素がある。また,(2)と(3)にまたがる存在としてエレベータがある。エレベータは荷物や配送エージェントを運び,かつ建物の立体的なつながりを構築する。その他にシミュレータの設計に必要な要素としては,各エージェントの「判断」を担う存在としてのエージェントマネージャと荷物が次にたどるべき経路を生成する経路マネージャがある。これらは建物全体を見渡しながらエージェントを効率的に動かすために設計した。以上をまとめて,本シミュレータの設計を図1に示し,次節では各要素の詳細を説明する。

3.2 各要素の詳細

はじめに各要素がやり取りする詳細な情報を図2に示す。図の点線は通信的な情報交換や命令を,実線はロボットが荷物を積み込むなどの物理的なつながりを表現している。

3.2.1 建物とエリア

建物とエリアは,建物全体の空間情報を表現する。建物は階層数に応じた数のフロアエリアを保持し,さらにフロアの中に4つのエリアを設定した。その構成を図3に示す。各エリアは設定された面積に応じて,物理的にエージェントや荷物の受け入れが可能化を判定する。

また,荷物を一時的に保管するプールエリアとエレベータエリアについては,空き容量に基づく4つのイベント通知ルールを設けた。そのタイミングを以下に示す。これらは図2のように建物に送信される。

- (1) 発火: 空き容量が20%以下になったタイミング
- (2) 鎮火: 空き容量が50%以上確保されたタイミング
- (3) 受け入れ不可: 空き容量が0%になったタイミング
- (4) 受け入れ可: 荷物が取り出されて空き容量が0でなくなったタイミング

3.2.2 配送タスク

荷物の搬入作業を建物の1階で行うことを想定し,配送タスクを1階の棚→N階の棚,またはN階の棚→1階の棚にランダムに割り当てるよう設定した。時間的な制限は設定していない。タスクはシミュレーションの開始時に生成されて経路マネージャに渡される。

3.2.3 経路マネージャ

経路マネージャは,各荷物の位置を管理し,最終的な配達先エリアと荷物位置を元に各荷物がたどる経路を生成する。棚Aから棚Bへ向けての配送タスクが合ったときに経路マネージャは,図4の例のように,経路(a,b,c,d,e)を生成する。

表1 フロアの状態に応じたタスクの優先順位

プール エリア	エレベータ	エレベータ エ リ ア	優先度 1	優先度 2	優先度 3	優先度 4
鎮火	なし	鎮火	a,e	-	-	-
鎮火	あり	鎮火	d	b	a,e	-
鎮火	あり	発火	d	a,e	d	-
発火	なし	鎮火	e	-	-	-
発火	あり	鎮火	b	e	d	-
発火	あり	発火	d	e	a	e

- a. ピックアップ先の棚エリア→プールエリア
- b. プールエリア→ピックアップフロアのエレベータエリア
- c. ピックアップフロアのエレベータエリア→配達フロアのエレベータエリア
- d. 配達先フロアのエレベータエリア→プールエリア
- e. プールエリア→配達先の棚エリア

3.2.4 ロボットマネージャ

ロボットマネージャは,スタンバイ状態のロボットに対して「目的地,アクション,荷物情報」からなる命令を与える。ロボットマネージャはフロアの状態を6つに分類し,経路マネージャからの経路に表1に示すような優先順位をつけてロボットに命令を下す。

このようなフロア状態に応じたタスクの優先順位付けは,「すべてのプールエリア・エレベータ・ロボットが荷物で飽和する」といったデッドロック状態を回避することを目指すとしており,その基本ルールは以下に示す3点である。

- 発火エリアから荷物を外へ運び出すタスクを最優先すること
- エレベータがフロアに存在する場合はエレベータに絡んだタスクを優先すること
- エレベータからの荷物の運び出しを,エレベータへの荷物の運び入れよりも優先すること

ここでマネージャがロボットに命令を割り振るアルゴリズムを以下に示す。

- (1) 荷物マネージャからのタスクを,ロボットへの積み込みを待つPICKUPタスクと,現在ロボットに積み込まれてどこかのエリアに運ばれている最中のPOPタスクに分類する。
- (2) ロボットが実行可能なタスクのうち,優先度1のものを抽出する。
- (3) 抽出されたタスクから,受け入れ不可エリアへのPOPタスクを取り除く
- (4) タスクが抽出されなかった場合,優先度を1つ下げ(2)に戻る。
- (5) 優先度を下げきってもタスクが抽出されなかった場合,ロボットに待機を命令する。
- (6) タスクが抽出された場合,ロボットの位置座標から,移動先エリア中心点までの距離が最短のタスクを選ぶ
- (7) 選ばれたタスクから,「移動先座標,移動先でのアク

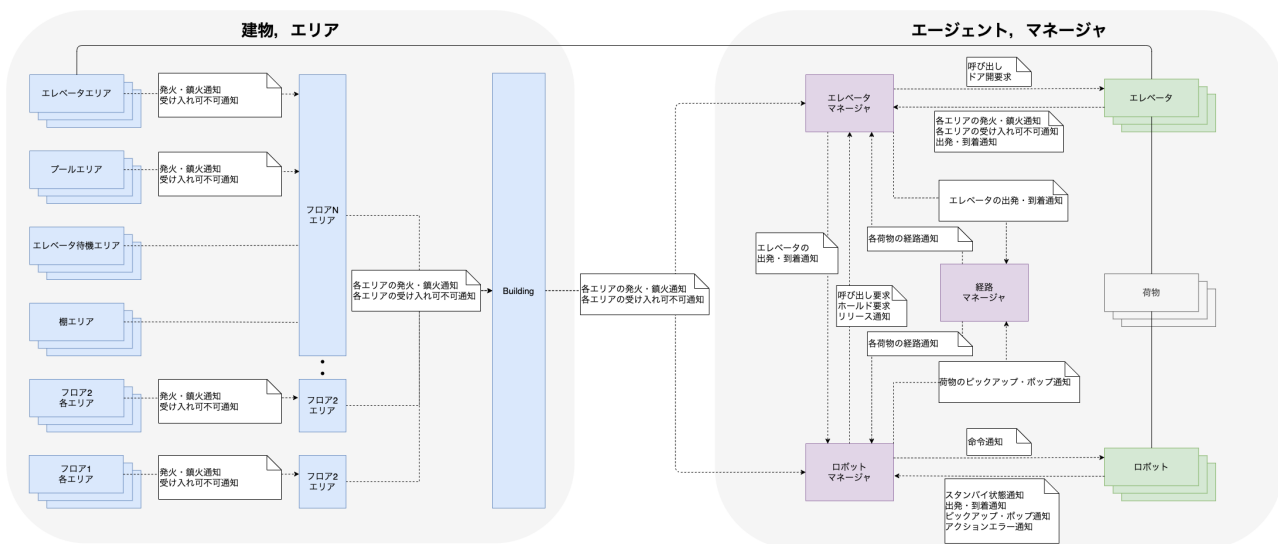


図 2 全体のコミュニケーション図

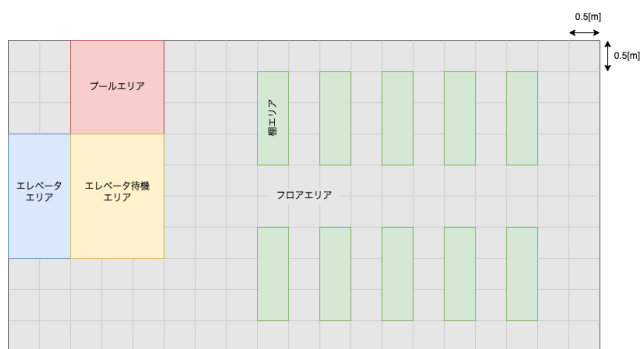


図 3 エリア構成

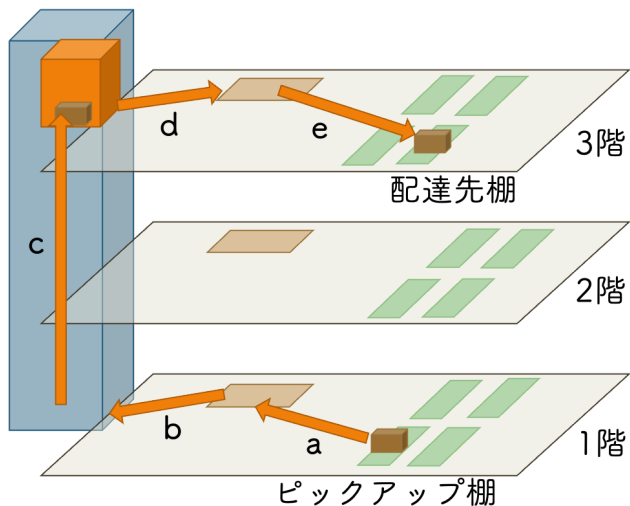


図 4 現在位置と配達先に応じて生成される荷物の経路

ション, 対象とする荷物情報」からなる命令を決定しロボットに与える。

また, ロボットに与えられる命令の移動先がエレベータエリアである場合は, エレベータマネージャに対して, エレベータをそのフロアにとどめて置くことを指すホールド

要求を出す。ホールド要求は, そのロボットが命令を完了するまで継続され, 命令完了のタイミングでエレベータマネージャにリリース通知を出す。

3.2.5 エレベータマネージャ

エレベータマネージャは, 建物・ロボットマネージャと連携しながら, エレベータの仮想的なボタンを押すことによって, エレベータの動きを管理する。マネージャはエレベータの空き容量と, ロボットマネージャからのホールド要求・リリース通知, 経路マネージャからの目的階情報をもとにエレベータ運用を行う。マネージャからエレベータへのホールドは以下の条件を満たすときに行われ, リリースはその条件を満たさなくなったタイミングで行われる。

- エレベータが載せている荷物の中に, エレベータが存在するフロアを配達先とする荷物がある状態。
- ロボットマネージャからのホールド要求を受けていて, かつエレベータが鎮火している状態。

また, マネージャからエレベータへの呼び出し (移動要求) は以下のタイミングで行われる。

- 建物から別フロアのエリア発火通知を受けたとき
 - エレベータがリリース状態かつ発火しているとき
 - ロボットマネージャから呼び出し要求を受けたとき
- エレベータはリリース状態のときに, マネージャからの呼び出しに従って階層移動を行う。

3.2.6 ロボットエージェント

本シミュレータでは, ロボットを図5に示す「停止」・「移動」・「アクション」の3状態を遷移する抽象的なモデルとして定めている。抽象化のため, 現在はロボット同士の衝突判定を行っていない。図中の枠で囲まれた部分が状態を表し, 枠の間を結ぶ矢印上の [] で囲まれ部分が状態遷移の条件である。枠内の「entry」, 「exit」はそれぞれ, その状態に遷移したときと別の状態に遷移するときに行われる

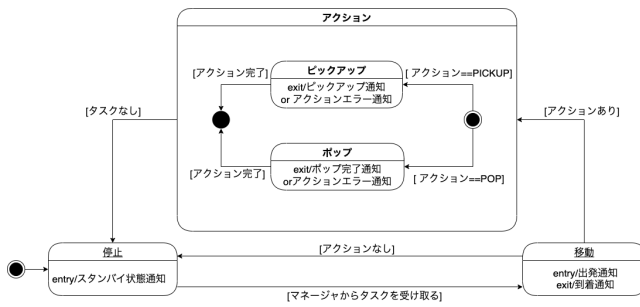


図 5 ロボット状態遷移モデル

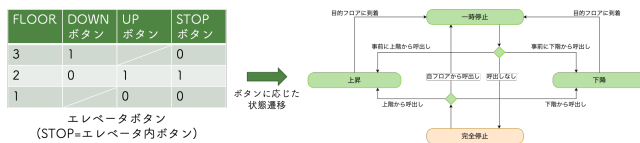


図 6 エレベータ状態遷移モデル

行動を示す。

ロボットはスタンバイ状態にあるときにマネージャから、「移動先座標，移動先でのアクション，対象とする荷物」で構成される命令を与えられると、「移動」に遷移する。「移動」中は， A^* アルゴリズム [13] で計画された経路上を走行し，移動先座標に到着すると，命令に応じて「アクション」状態に遷移する。「アクション」はピックアップとポップのどちらかであり，ピックアップは荷物をロボットに積み込む処理を，ポップは荷物をロボットから取り出す処理を指す。なお，それぞれの荷物の積み込み，積み下ろしには 1 秒から 10 秒のランダムな処理時間を設定した。アクションが終わると，ロボットは再び「スタンバイ」状態に遷移する。

ロボットは各状態でマネージャに対して自状態や空き容量などを通知し，その通知内容を元にマネージャはロボットを管理する。

3.2.7 エレベータエージェント

エレベータについても，図 6 のように 4 状態からなる状態遷移モデルを定めた。エレベータ特有の変動パラメータとしては STOP, UP, DOWN の 3 つのボタンキューと開閉ボタンを定めており，STOP ボタンはエレベータ内部のボタンを，UP・DOWN ボタンは各フロアにある矢印ボタンを表現する。これらのボタンは，エレベータマネージャからの通信を介して押されることを想定しており，ボタンを介してのマネージャからの指示をもとに状態を遷移する。なお，ボタンキューに応じた状態遷移の主なルールは以下の 2 つである。

- 進行方向からの呼出しがない場合のみ，進行方向の逆転を検討する
- どのフロアからも呼出しがない場合，最寄りの階で完

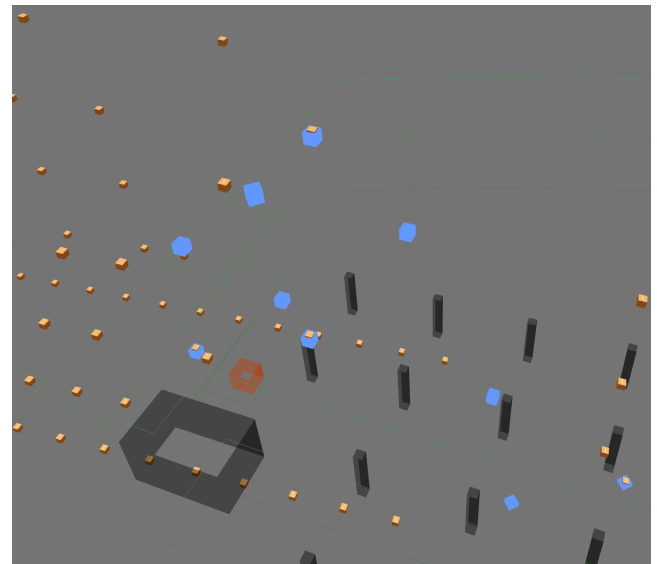


図 7 シミュレーション可視化の様子

全停止する

またエレベータは各フロアで停止中，フロアのエレベータエリアと結びつき，3.2.1 節で示した，発火・鎮火・受け入れ不可の通知を建物とエレベータマネージャに出す。また，「上昇」，「下降」状態では出発，到着通知をマネージャに送信する。

3.3 可視化

各エージェントの行動に目に見える不自然さがいないか，動作に整合性が取れているかを直感的に確認する手段として，Three.js ライブラリ [14] によるシミュレーションの可視化を行った。各ステップごとにすべてのエージェントの位置座標を取り出し，それを $1step = 1[sec]$ のタイムスケールで websocket 通信 [15] でブラウザに送信することにより，リアルタイムにエージェントの振る舞いを確認することが可能になる。

図 7 中の青い立方体がロボットを，茶色の立方体が荷物を，奥にあるオレンジの立方体がエレベータを表しており，ロボットが荷物を載せて移動している様子が確認できる。

4. 実験

本章では，シミュレータへの入力パラメータを 1 つずつ変化させながら実験を行い，各入力パラメータの組み合わせが出力結果に与える影響を評価する。

4.1 パラメータ条件

実験は，入力パラメータの組み合わせ方を 1 つずつ変化させてシミュレータに与えることで行った。ここで入力パラメータの各組み合わせ方をシナリオと呼ぶ。また，特に (1)，(2) の 2 条件を合わせて建物条件と呼ぶ。

(1) 建物の階層数：3，6，9 階

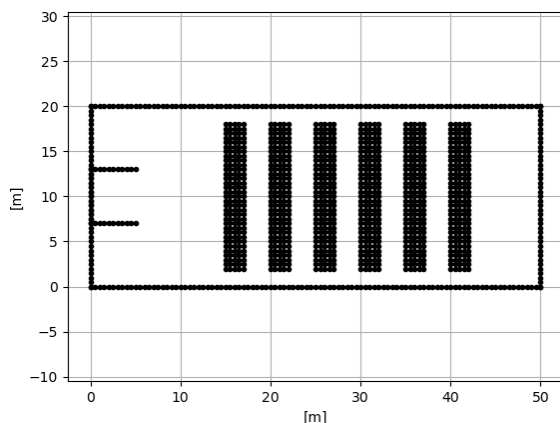


図 8 フロア小の壁と障害物位置 (50 × 20[m²])

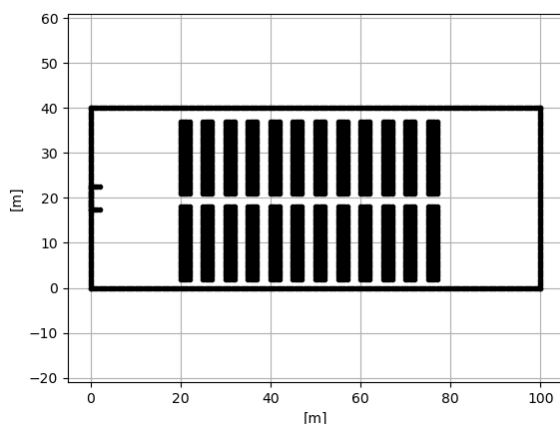


図 9 フロア大の壁と障害物位置 (100 × 40[m²])

(2) フロア構成：フロア小 (図 8)，フロア大 (図 9)

(フロアに存在する各エリアは図 10 のように配置される。)

(3) プールエリアの一边の長さ：1, 2, ..., 7[m]

(4) エレベータ底面積：6, 10, 14, 18, 22.5[m²]

(5) 各フロアに与えるロボット台数：1 台，2 台，3 台
シナリオの総数は次に示す全 231 シナリオであり，それぞれのシナリオについて最低 10 回を試行した。各試行は，1 階 → n 階，n 階 → 1 階の荷物棚を行き来する配送タスクをランダムに 500 個生成することから始まり，そのすべてを終えたときに出力を返す。このような配送タスク生成は，1 階で荷物の搬入，出荷作業が行われることを想定したためである。

A 群(4):9 に固定，(1),(2),(3),(5) の全組み合わせ方 (3 × 2 × 7 × 1 × 3 = 126 通り)

B 群(2): フロア小，(5):2 台に固定，(1),(2),(3) の全組み合わせ方 (3 × 1 × 7 × 5 × 2 = 105 通り)

A 群は，主にロボット台数とプールエリア面積が，各建物条件において出力に与える影響を評価するために設定し

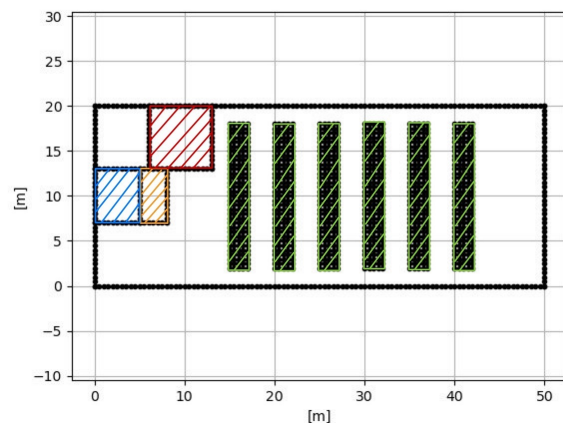


図 10 フロアの各エリア配置 (青：エレベータエリア，黄：エレベータ待機エリア，赤：プールエリア，緑：棚エリア)

表 2 ロボット・エレベータ・荷物の固定パラメータ

	最大速度 [m/s]	サイズ [m ³]	容量 [m ³]
ロボット	1.5	0.5 × 1.0 × 0.5	1.5
エレベータ	3.0	入力パラメータ	底面積 × 1.5
荷物	-	1.0 × 1.0 × 0.5	-

た。B 群は A 群の結果から，効率的な配送にはエレベータ面積とプールエリア面積の兼ね合いが重要であると予想をたて，その評価を行うために設定した。

また，各フロアの高さは 9.0[m] としており，プールエリア容量，エレベータ容量は，面積 × 1.5[m³] とした。各エージェント・荷物の設定パラメータは表 2 のとおりである。

4.2 結果

まず，A 群の各シナリオにおける全配送タスク処理時間を図 11 に示す。まず，横軸方向の変化に着目すると，フロア面積・階層数・ロボット台数に関わらない共通した傾向として，処理時間はプールエリア面積が 1 × 1[m²] のときに大きく，プールエリア面積が 4[m²] のときに短くなっており。その後，プールエリア面積が大きくなるにつれて，なだらかな上昇傾向を示すことがわかる。また，各建物条件に共通してロボット台数の増加にともなって処理時間が削減されている。次に，全配送タスク処理時間に対するエレベータの待機時間割合を，図 12 に示す。エレベータは全処理時間中の 85 % 以上をいずれかのフロアで停止していることがわかる。その割合はロボット台数や階層数が少ないほど大きくなっているが，プールエリア面積に対しては大きな変動がない。

また，フロアごとのロボットの総待機時間を図 13 と図 14 に示す。各フロアに注目すると，配送タスクが集中する 1 階に割り当てられたロボットは待機時間が短い，他フロアのロボットは待機時間が長い。特に各階層に割り当てるロボット台数を少なくすると，その傾向が顕著であった。またグラフの棒全体が表す総待機時間は，プールエリア面

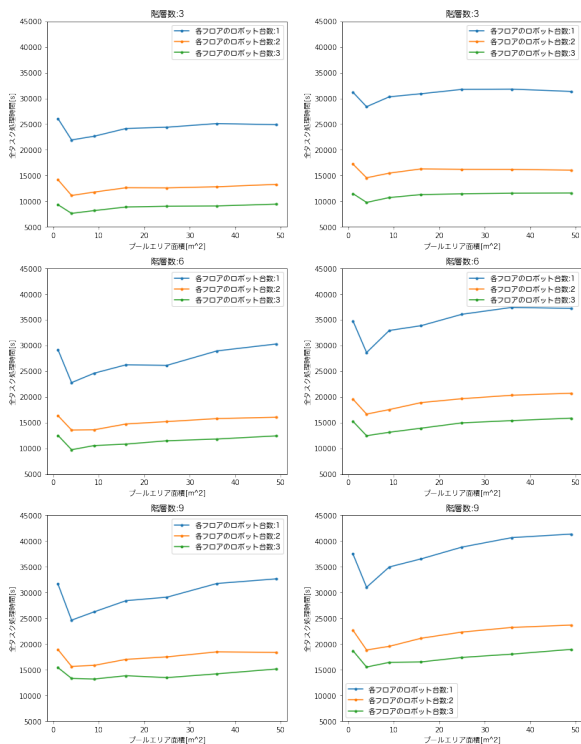


図 11 階層数ごとの全タスク処理時間（フロア小：左列，フロア大：右列）

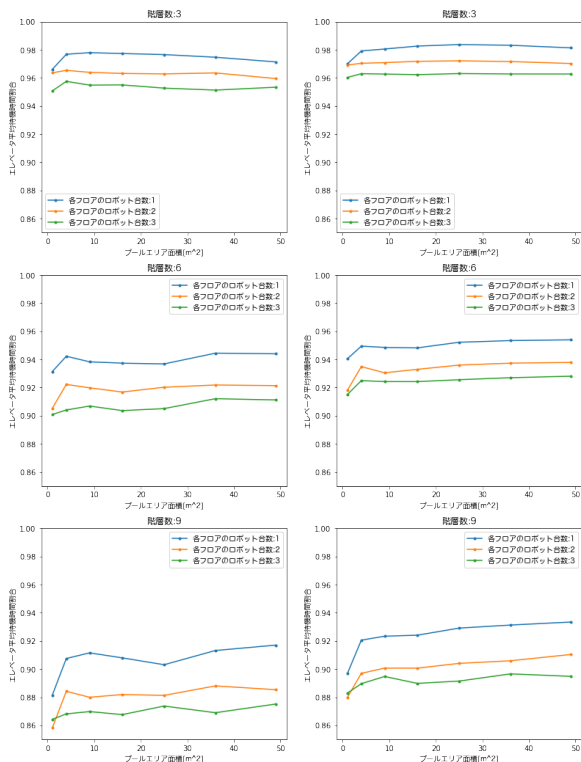


図 12 階層数ごとのエレベータ待機時間割合（フロア小：左列，フロア大：右列）

積が $1[m^2]$ のときに大きく、プールエリア面積が $4[m^2]$ のときに最小となっており、それ以上の面積では増加傾向になった。

最後に B 群の各シナリオから、フロア小、階層数 9、各フ



図 13 階層ごとのロボット待機時間（フロア小）



図 14 階層ごとのロボット待機時間（フロア大）

ロアのロボット台数を 2 台に設定したシナリオについて、全配送タスク処理時間の推移を図 15 に示す。縦軸を図 11 と同じスケールに合わせたグラフと、見やすさのため縦軸スケールを変更したもの（拡大）を並べた。図から、エレベータ面積の増加に従って処理時間の最小値が右にずれる傾向があるとわかり、また、底面積が $14[m^2]$ までは、エレベータ面積増加に従って処理時間が減少する傾向も確認できる。

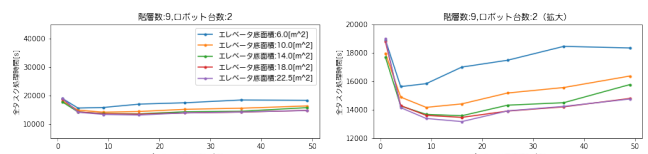


図 15 エレベータの底面積ごとの全タスク処理時間（同じデータについて縦軸スケールを変更して表示した）

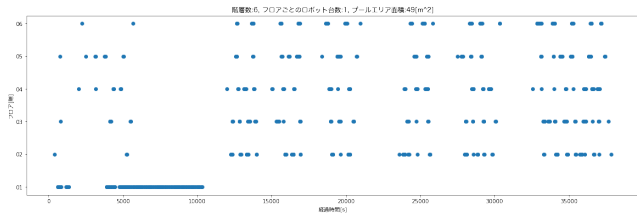


図 16 各配送タスクの配達完了時刻（フロア大，階層数 6，フロアごとのロボット台数 1）

4.3 考察

まず A 群の結果から，プールエリア面積，ロボット台数が配送効率に与える影響を考察する．まず，プールエリア面積について，A の各シナリオはエレベータ面積を $10[m^2]$ に設定したことに注目する．得られた結果と合わせると，本シミュレータのアルゴリズムでは，エレベータ呼び出しタイミングを，エレベータ容量に対して半分以下程度の荷物が収集されたときに設定すると配送効率の改善につながると考えられる．逆に，プールエリア面積を過剰に狭くする，エレベータ容量に対して荷物を集めすぎる，といった設定ではエレベータの移動速度や容量がボトルネックとなって配送効率が悪化したと考えられるが，これは B 群の結果から考察する．また，ロボット台数の増加は配送効率の改善に大きく寄与したが，ロボット待機時間の結果は，本研究で実装したアルゴリズムがロボットを有効に活用できていないことを示している．

ここで図 16 を踏まえてアルゴリズムの無駄を考察する．なお図の縦軸は配達先フロアを，横軸は時間をあらわしている．まずはじめに 1 階が配達先であるタスクが全体の 3 割ほどの時間で完了するという偏りが生じていることがわかる．これは 2 階以上でピックアップされる荷物はすべて 1 階に配達されることと，エレベータから荷物を運び出すタスクを最優先に設定したアルゴリズムが原因であると考えられる．また，10000 秒以降のタスク完了タイミングを見ると，一定の時間間隔で固まってタスクが完了していることがわかる．これはプールエリア面積を大きくしすぎたことによって，エレベータ呼び出しの間隔が長くなったためであると考えられ，20000 から 25000 秒のような空白区間は 1 階のロボットがプールエリアに荷物を収集している区間であると推察される．そうであれば，この区間中，1 階以外に存在するロボットは待機状態であるためロボット運用上のムダとなっており，これらの考察からは，ロボットを各フロアの配送需要に応じて階層移動させる必要性が示唆される．

次に B 群についての結果から，プールエリア面積とエレベータ面積が全タスク処理時間に与える影響を考察する．結果から，エレベータ呼び出しを行うタイミングは，エレベータ容量を上回らない範囲内で荷物を収集した時点で設定するべきであると考えられる．しかし，その影響は全体

ん処理時間から見ると微々たるものであった．また，エレベータ面積の増加による処理時間の削減効果は，エレベータ面積を広くするほど弱まり， $18[m^2]$ 以上の設定ではほとんど効果が見られなかった．ここで本実験の荷物体積やエレベータ容量のパラメータ設定では， $18[m^2]$ のエレベータは $18 \times 1.5 \div 0.5 = 54$ 個の荷物を一度に運ぶ能力を持つ．今回設定した配送タスク数は 500 であり，さらに各配送タスクがそれぞれのフロアに振り分けられることを考慮すると，設定した配送タスク数が少なかったために，エレベータ面積が配送効率に与える影響を評価しきれなかったと考えられる．

5. 結論

本研究では，建物の階層数やフロア面積・エレベータサイズがある程度動的に設定可能な配送システムシミュレータを開発し，これを用いた実験により，建物の構成や，エレベータ呼び出しのタイミング，運用するロボット台数などが配送効率に与える影響を評価した．実験の結果，多層階倉庫で配送効率を高める上では，エレベータの容量を上回らない程度に荷物を収集したのちにエレベータを呼び出すことや，導入するロボット台数の増加が必要であることを示した．また，ロボットの待機時間や配送タスク完了時間の分析から，ロボットを十分に活用するためには，各フロアの配送需要に応じてロボットを階層移動させる必要性があることが示唆された．

今後の展望としては，配送タスク数を増やしエレベータ面積が配送効率に与える影響の評価，各フロアの配達需要に応じたロボット・エレベータ運用アルゴリズムの構築，ロボット同士の衝突判定実装や実在の倉庫環境センシングなどによる，より現実に即したシミュレータの構築を行う予定である．

謝辞

本研究の一部は，NICT 委託研究，科研費 22H03696 に支援いただいています．

参考文献

- [1] Carman KM Lee, Yaqiong Lv, KKH Ng, William Ho, and King Lun Choy. Design and application of internet of things-based warehouse management system for smart logistics. *International Journal of Production Research*, Vol. 56, No. 8, pp. 2753–2768, 2018.
- [2] René De Koster, Tho Le-Duc, and Kees Jan Roodbergen. Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European journal of operational research*, Vol. 182, No. 2, pp. 481–501, 2007.
- [3] Robert Bogue. Growth in e-commerce boosts innovation in the warehouse robot market. *Industrial Robot: An International Journal*, 2016.
- [4] 福島悠人, 浅井悠佑, 浦野健太, 青木俊介, 米澤拓郎, 河口

信夫ほか. 時空間ルーティングを用いた複数自律移動ロボットの協調走行. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2021 論文集, Vol. 2021, No. 1, pp. 672–679, 2021.

- [5] Jiaoyang Li, Andrew Tinka, Scott Kiesel, Joseph W Durham, TK Satish Kumar, and Sven Koenig. Lifelong multi-agent path finding in large-scale warehouses. In *AAMAS*, pp. 1898–1900, 2020.
- [6] ロボット革命イニシアティブ—ロボット・エレベーター連携インタフェース定義 rri b0001 :2021 (draft rev.2.0) 公開. <https://www.jmfri.gr.jp/info/rri/1904.html>. (Accessed on 05/21/2022).
- [7] スマートシティ・ビルソリューション | ビル iot プラットフォーム ville-feuille (ヴィルフィーユ) | 三菱電機ビルソリューションズ株式会社. <https://www.mitsubishielectric.co.jp/smartbuilding/ville-feuille/>. (Accessed on 05/21/2022).
- [8] Filippo Cavallo, Raffaele Limosani, Alessandro Manzi, Manuele Bonaccorsi, Raffaele Esposito, Maurizio Di Rocco, Federico Pecora, Giancarlo Teti, Alessandro Saffiotti, and Paolo Dario. Development of a socially believable multi-robot solution from town to home. *Cognitive Computation*, Vol. 6, No. 4, pp. 954–967, 2014.
- [9] A Ramaa, KN Subramanya, and TM Rangaswamy. Impact of warehouse management system in a supply chain. *International Journal of Computer Applications*, Vol. 54, No. 1, 2012.
- [10] Jean Philippe Gagliardi, Jacques Renaud, and Angel Ruiz. A simulation model to improve warehouse operations. In *2007 Winter Simulation Conference*, pp. 2012–2018. IEEE, 2007.
- [11] Carman KM Lee, Kin Lok Keung, KKH Ng, and Daniel CP Lai. Simulation-based multiple automated guided vehicles considering charging and collision-free requirements in automatic warehouse. In *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, pp. 1376–1380. IEEE, 2018.
- [12] Robson Peixoto, Luís Dias, Maria Sameiro Carvalho, Guilherme Pereira, and Carla AS Geraldés. An automated warehouse design validation using discrete simulation. In *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 199–204. IEEE, 2016.
- [13] Peter E Hart, Nils J Nilsson, and Bertram Raphael. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics*, Vol. 4, No. 2, pp. 100–107, 1968.
- [14] Three.js – javascript 3d library. <https://threejs.org/>. (Accessed on 05/20/2022).
- [15] Websocket. <https://developer.mozilla.org/ja/docs/Web/API/WebSocket>. (Accessed on 05/20/2022).