

## 5 ロボット配送の取り組み

# モバイルオーダーによるロボット配送サービスの 実現に向け「ロボット最適制御技術」を開発

ビル街区においてロボットのような屋内モビリティを活用し、サービスの運用コストを削減する動きがある。本稿では、忙しいワーカーがオフィスに居ながら小売購買が可能なモバイルオーダーによるロボット配送サービスの実現に向け NTT コンピュータ&データサイエンス研究所 (CD 研) が研究開発を進める「ロボット最適制御技術」について紹介する。

### ロボット配送サービスによるさまざまな価値の実現に向けた課題

受取地点・時刻を自由に選択して注文した商品がロボットにより配送されるサービスを「ロボット配送サービス」と呼ぶ。利用者はスマートフォンなどから専用のモバイルオーダーサービスを使って注文と支払いを行い、店舗からの集荷および指定箇所への配送をロボットが行う。ロボットは配送完了後に所定の場所に戻り、必要に応じて充電しながら待機。配送へ出発後に新しい注文が来た場合は待機中の別のロボットを用いる。

買い物に行く時間がない忙しいワーカーに対しては、希望の地点・時刻に商品をお届けする新しい価値体験を提供する。また人手不足の店舗に対しては追加人員不要で配送サービスが提供可能という新たな販売機会の創出という形での価値提供が期待されている。

ロボット配送サービスを実現するには、五月雨に発生する注文に対し最小限のロボットかつ最短時間で配送すること、利用者がスムーズに商品を受け取れるよう配送所要時間を予測して提示することが要件とな

る。ここで重要な要素であるロボットの走行時間に影響を与える要因が大きく3点ある。

1 点目は障害物。障害物の接近を検知した場合に減速または一時停止により衝突の回避を試みることで、走行時間が長くなる。このため経路上の混雑状況やエレベータなどビル設備の利用状況を考慮する必要がある。

2 点目は店舗における作業時間。店員は注文内容を見ながら対象商品を集め、ロボットが店舗に到着すると商品を積み込む。商品により温めるといった追加作業も必要だ。作業時間は注文された商品の特徴や店舗の混雑状況によって大きく変化する。

3 点目はロボット同士の競合。たとえばロボット2台が並走した場合、お互いを動く障害物と判定し減速や一時停止を繰り返す。またロボット2台がすれ違う場合、回避できずにスタックし配送自体が停止する危険性がある。ロボットの並走やすれ違いが街区への来訪者の邪魔



NTT コンピュータ&データサイエンス研究所  
スマートデータサイエンス研究プロジェクト  
(左から) 研究員 應治 沙織 氏 研究主任 福本 佳史 氏  
主任研究員 松浦 伸彦 氏

になる可能性が高く、そもそも競合を発生させないことも重要だ。

### 課題解決に向け4つの技術の 集合体「ロボット最適制御技術」を開発

CD 研は上記の課題を解決するため、4種類の技術の集合体である「ロボット最適制御技術」を考案した。ロボット配送サービスの経路をグラフ化し、各経路・各地点の走行時間および複数ロボットの競合関係を考慮して最適な経路を探索する技術だ。従来は専用のオペレータが注文内容を見ながらロボットの走行経路を手動で算出・設定していたが、本技術により人手を介さない自動的かつ効率的な経路算出を可能にした。

以下、4種類の技術について概説

する。例示するグラフのノードはロボットの待機地点、店舗の詰込地点、利用者の受取地点およびエレベータ乗込のため待機地点を含む経路の分岐地点を示している。

### 1. 経路の所要時間予測技術

概要を図1に示す。まず人流情報やエレベータの稼働状況などを収集し、各地点の混雑状況を数値化する。そして過去の実績値を元に未来の混雑状況を機械学習によって予測し、その結果を用いて各経路の走行時間を予測する。これにより配送開始時刻における経路（エッジ）毎の走行時間を取得できる。この走行時間をグラフ構造上で対応するエッジのコストとして利用する。

ランダムに動く人との衝突を回避するため急停止が繰り返されると、停止なく走行した場合に比べて多くの走行時間を要する。そのため走行時間は経路上の混雑状況によって大きく変化する。グラフ上での最適経路探索でも同様のことが言え、最適経路および正確な所要時間の見積もりには、混雑状況に応じた経路選択が必須だ。本技術は環境や時間変化を考慮した配送時間の見積もりにより、実測値と見積もり値の乖離を抑制し、正確な所要時間を用いた運行

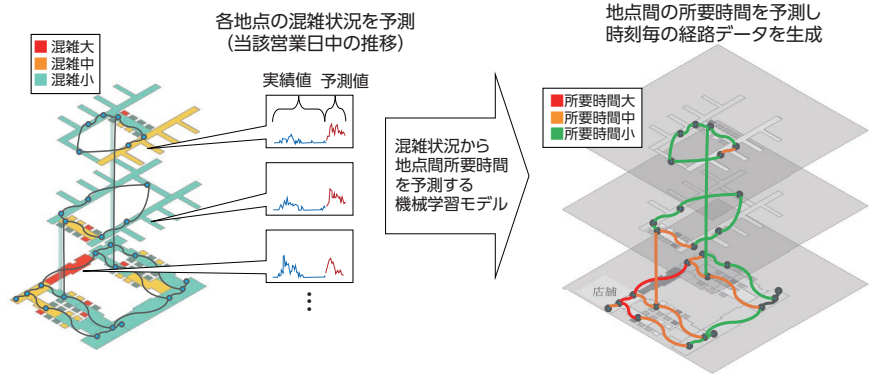


図1 経路の所要時間予測技術

計画の立案を実現する。

### 2. 店舗の積込作業時間予測技術

商品に応じた積込作業時間を予測し、実測値と見積もり値の乖離を抑制する技術。注文された商品の名前や説明文などの基本情報を元に、作業時間を予測する。たとえば温める必要がある、ドリンクホルダーで固定化する必要がある、といった商品の特徴別に分類を行い、その特徴と店舗の混雑状況を元に予測を行う。予測した積込作業時間をグラフ構造上の各店舗に対応したノードのコストとして利用する。

### 3. グラフ上での最適経路探索技術

上記2種類の技術で算出したコスト付きグラフを用いて、走行時間が最小となる経路を算出する技術。環境や時間変化を考慮して複数ある経

路の中から最適な経路を選択し、無駄のない運行計画を立案可能にする。注文情報にもとづき配送されるタイミングでのグラフを予測・作成し、経由する地点（待機地点、詰込地点、受取地点、待機地点）のそれぞれの間で最短となる経路を算出する。複数の注文が同時にあった場合は、配送先が近い注文を順にグルーピングし、各ロボットに割り当てた場合の最短経路・走行時間を算出し、合計時間が最小化するように割り当てを行う。

### 4. ロボット競合解消のための優先制御技術

複数ロボットが同時に稼働する場合の走行経路の重複・競合とそれに伴う走行時間の遅延という、グラフ上での最適経路探索では抑制できない運行計画の遅延要因を抑制する技術。図2に示す例では、2台のロボットが地点Cから地点Nに移動するにあたり複数の重複箇所が存在する。同一時間に同じ経路を通らないよう迂回経路を採用したり待機時間を設定したりすることで、競合を解消する。ロボットが3台以上ある場合も同様の手順で競合を解消する。

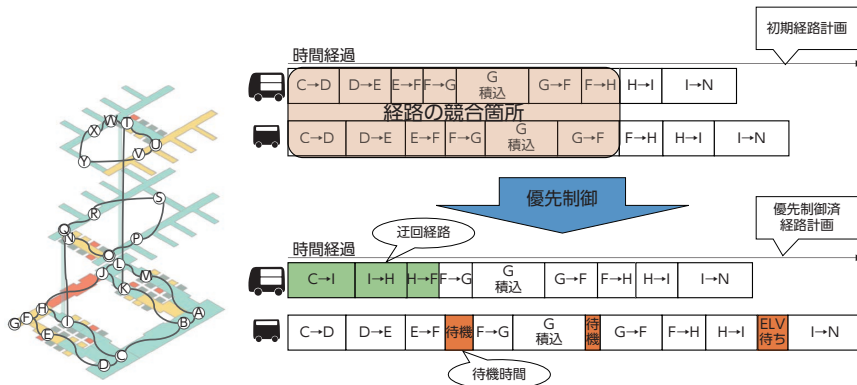


図2 ロボット競合解消のための優先制御技術

## ロボット最適制御技術を活用したロボット配送サービスの実証実験と評価

2022年10月から2023年3月にかけて、ロボット最適制御技術によるロボット配送サービスの実証実験※1が実施され、「経路の所要時間予測技術」、「グラフ上での最適経路探索技術」の評価が行われた。

実証ではオフィスビルに勤務するワーカーを利用者とし、専用のモバイルオーダーサービスを用いてビル内の飲食店の商品を注文できるシステムを構築した。ロボットは飲食店前の積込地点から利用者による受取地点まで自立走行し、エレベータと連携して階をまたがり移動する。受取地点への到着から10分経過しても商品が受け取られない場合、ロボットは店舗に戻り、商品は取り置く。

また、注文時に希望時間配送と即時配送を選択する方式とした。30分を1スロットとし、利用者が希望する時間のスロットを選べる。即時配送では配送可能な最も早いスロットが自動的に選ばれる。受注後はロボット最適制御技術により最適な経路を探索し、ロボットがそれに従って動作するようスケジュールリングされる。到着予定時間を算出し前もって利用者に提示する機能も実装された。

混雑状況の把握には、人の放射熱を検知・測定可能な非接触の温度センサを内蔵するサーモパイル型センサを活用した。天井に設置したセンサから検知範囲内の人数を計測し、当該地点における混雑度とした。

実証は前半と後半に分け、前半は主に基礎データ収集と店舗の運用フロー確認および利用者のヒアリング

表1 各パターンにおける予測値と実測値の比較結果

予実比較	パターン1 ロボット設定	パターン2 誤差抑制	パターン3 下振れ抑制
MAE (平均絶対誤差)	215.0	25.8	49
下振れオーダー数 (予定より到着が遅くなったオーダー数)	190	99	25
1分以上の下振れ オーダー数	177	19	4

を、後半は実際に利用者からの注文を受けながら評価を行った。

評価では利用者に提示する到着予定時間と実際の到着時間の比較を行った。その結果を表1に示す。各パターンの狙いを以下に示す。

パターン1：ロボットベンダが初期設定時に設計した走行時間を元に算出した到着時間と、実際の到着時間を比較。ロボット最適制御技術を適用しなかった場合の参考とした。

パターン2：単純に誤差を少なくするようチューニングしたモデル（誤差抑制モデル）を用いて予測した到着時間と、実際の到着時間を比較。

パターン3：利用者が商品を受け取れる可能性が高くなるよう、予測値が実測値よりも小さくならないようにチューニングしたモデル（下振れ抑制モデル）を用いて予測した到着時間と、実際の到着時間を比較。「予定時間前にロボットが到着する分には問題ない」という声を受けて用意したパターンであった。

パターン1とパターン2の比較では、誤差の大きさを示す指標（MAE）が215秒から25.8秒に改善。また予定より到着が遅く利用者を待たせた下振れオーダー数が190件から99件と、ロボット最適制御技術により大幅に改善した。

パターン2とパターン3の比較

では、下振れ抑制モデルの利用により誤差は大きくなるが、下振れオーダー数を4分の1程度に削減可能であることがわかる。状況に応じて適切なモデルを採用することが重要であり、利用者視点では下振れ抑制モデルの方が待ち時間が少なく有効なことが多いと考えられる。一方、運用者視点では誤差抑制モデルの方が無駄なくロボットの運行計画を立案できると考えられる。

## さらなる最適化に取り組み、街区全体の最適化に向け配送以外のロボット制御も検討

ロボット最適制御術により正確に走行時間を予測し、最適な経路を探索可能であることが確認された。CD研は今後、「店舗の積込作業時間予測技術」および「ロボット競合解消のための優先制御技術」に関しても実証実験による評価・改善を行い、さらに最適化されたロボット最適制御技術の実現をめざす。

また今後、異なる用途のロボットの最適制御や街区全体でのロボットの最適制御によりさまざまなサービスを提供し、人々の生活をより豊かにしていくことをめざす考えだ。

※1： <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/10/03/221003a.html>