

スマートファクトリにおける通信品質向上のための 衝突回避を考慮した柔軟な経路計画

棚木 拓海[†] 安達 宏一[†]

[†] 電気通信大学 先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター
〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
E-mail: †{tanagi,adachi}@awcc.uec.ac.jp

あらまし 屋内工場で自動搬送車 (AGV: Automated Guided Vehicle) を用いた製品や材料の運搬はマテリアルハンドリングと呼ばれ、マテリアルハンドリングを含む物流業務プロセスはスマートファクトリにおいて重要な役割を担うと期待されている。特に Industry4.0 で、スマートファクトリにおける無線通信技術の利活用が期待されている一方、金属体が多数存在する劣悪な屋内伝播環境での通信品質の保証が必要不可欠である。本研究では、マテリアルハンドリングにおける高い通信品質の達成を目的とし、大域的最適化と局所的最適化を組み合わせた AGV の経路計画を提案する。計算機シミュレーションにより、提案手法がベンチマークと比較して通信品質を向上できることを示す。
キーワード 自動搬送車, 経路最適化, 資源割当, 動的計画法, DWA, A*アルゴリズム

Dynamic Path Planning for QoS Improvement in Multiple Automated Guided Vehicles

Takumi TANAGI[†] and Koichi ADACHI[†]

[†] Advanced Wireless & Communication Research Center, The University of Electro-Communications
1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan
E-mail: †{tanagi,adachi}@awcc.uec.ac.jp

Abstract Logistics business process including material handling, which is the transportation of products and materials using automated guided vehicles (AGVs) in indoor factories, are expected to play an important role in smart factories. In particular, while the utilization of wireless communication technology in smart factories is expected in Industry 4.0, it is essential to guarantee communication quality in harsh indoor propagation environments where many metallic objects are placed. This paper proposes a path planning method for AGVs that combines global and local optimization with the aim of achieving high communication quality in material handling. Simulation results provide the high communication quality achieved by the proposed algorithm compared to the benchmark algorithms.
Key words Automated guided vehicle, Path planning, Resource allocation, Dynamic programming, Dynamic window approach, A* algorithm

1. はじめに

近年の企業の急速な DX (Digital Transformation) 化に伴い、製造業においても競争優位性の確保のために、制御、無線通信ネットワーク、モノのインターネット (IoT: Internet of Things), デジタルツイン, コンピューティング技術, 人工知能などを統合した CPS (Cyber-Physical System) の活用が重要となっている [1]~[4]. CPS では、あらゆる情報収集に基づきサイバー上で仮想構築されたフィジカル空間にて学習した最適制御を現実世界へフィードバックすることができ、製造

現場において生産ラインを柔軟に最適化したり動作機器の保守点検や異常予知および熟練技術者の知見や勘による作業の分析や若手への早期習熟支援などが可能となる。これらの最適な制御により、競争優位性の確保に必要な同時多品種少量生産を達成し製造の柔軟性、生産性、収益性を向上させたスマートファクトリを実現する [5], [6].

スマートファクトリでは製品を生産する機器と製品や材料を運搬する機器 (自動搬送車 (AGV: Automated Guided Vehicle) など) が存在し、それら機器に対して適切な制御を行う必要がある。工場内における製品や材料の運搬はマテリアルハンドリ

ングと呼ばれ、マテリアルハンドリングを含む物流業務プロセスはスマートファクトリにおいて特に重要である [7]~[9]。マテリアルハンドリングにおいては各 AGV に目的地への運搬を命令するタスク割当やその目的地への経路計画を決定する必要がある [8]、いくつかの既存研究にてそれらの適切な決定手法が検討されている。文献 [10] では、マテリアルハンドリングにおける A*アルゴリズムによる経路計画が提案され、実機評価にて高い障害物回避性能が示されている。文献 [8] では、マテリアルハンドリングにおける改良型マルチエージェント強化学習によるタスク割当が提案され、シミュレーション評価より、総タスク実行完了時間が短縮されるが示されている。既存研究の多くでは、システムの運用効率向上のために、A*アルゴリズム等を用いた最短経路に基づく経路計画や適切なタスク割当によりタスクの実行時間を低減している。

一方、Industry4.0 において、スマートファクトリでは頻繁に発生するシステムの動的再編成への対応のため柔軟性や拡張性が要求され無線通信ネットワークの活用が期待されている。しかし、屋内工場環境下にて無線通信技術を適用する場合、閉鎖的な空間に配置された多数の金属体での電波の遮蔽や強い反射により、通信品質の面でいくつかの問題が生じる可能性がある [5]。そのため、既存研究 [8], [10] では考慮されていない通信品質も考慮したマテリアルハンドリングの検討が急務である。通信品質を考慮した経路計画は無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) ネットワークにおいて多く議論されている [11], [12]。文献 [11] では、単一 UAV を用いた複数の固定地上ユーザへの下り (DL: Down-Link) ネットワークシステムを想定し、最適な UAV 軌道と DL 資源割当により UAV での単位消費エネルギーあたりの通信容量を最大化する手法が提案されている。文献 [12] では、複数 UAV を用いた複数の固定地上ユーザからの上り (UL: Up-Link) ネットワークシステムにおいて、ユーザへの要求通信品質 (QoS: Quality-of-Service) の達成及び UAV 間衝突回避制約の下での最適な UAV 軌道と UL 資源割当により地上ユーザでの総消費エネルギーを最小化する手法が提案されている。これらを含む多くの既存研究では、通信品質を考慮し、大域的最適化による経路計画や無線資源割当により、UAV 同士の物理的衝突回避や通信品質指標の最大化または要求通信品質の達成を実現している。しかし、大域的最適化は全ての UAV の経路を同時に最適化する必要があり、要求される拡張性や柔軟性に欠けている [6]。また、マテリアルハンドリングで運用される AGV は空中よりも比較的障害物の多い地上を走行するため、衝突回避を考慮した全ての AGV 経路の同時最適化は計算困難である。加えて、一般に、UAV と AGV の運動方程式や消費エネルギーの制約が異なるため、研究が盛んな UAV ネットワークにおける提案を AGV の経路計画へそのまま適用することは困難である。従って、AGV の運動モデルや走行環境および通信品質を考慮した経路計画を新たに提案する必要があると考える。

本研究では、マテリアルハンドリングにおける高い通信品質の達成を目的とし、大域的最適化と局所的最適化を組み合わせた AGV の経路計画を提案する。具体的に、大域的最適化にて

各 AGV の各割当タスク実行中における周波数利用効率の総和を最大化する問題を定式化する。定式化された NP 困難な問題を離散化及び制約緩和を用いて計算が簡易な経路最適化問題へ再定式化し、動的計画法 (DP: Dynamic Programming) [13] により大域的最適経路を求解する。求解された最適経路は制約を満たさないため、全ての制約を考慮しつつ大域的最適経路に沿った経路を局所的最適化にて求解する。これは、AGV の運動方程式に従った DWA (Dynamic Window Approach) [14] に基づく提案アルゴリズムにより求められる。この時、局所的最適化にて各 AGV は自身の近傍の物理環境のみを考慮した簡易な物理的衝突回避を達成する。

本稿は以下の構成になっている。第 2 章にシステムモデル、第 3 章に提案手法について記す。第 4 章に計算機シミュレーションに用いる指標、諸元、及びその結果を示し、第 5 章に結論をまとめる。

2. システムモデル

本稿では、一辺 D [m] の通信 (移動) エリア内に I 台の AGV、単一の基地局、壁や柱や加工用機械を模した複数の静的障害物が存在する屋内工場環境を想定する。通信エリア内では、シミュレーション時間 T_{ALL} [sec] 中、全 AGV は基地局と通信しながら各々の目的地まで移動し続ける。

一般性を失うことなく、通信エリア内における任意の位置を 2 次元直交座標系 $\mathbf{u} = (x, y)$ で表す。この時、障害物や基地局は固定配置、時刻 $t \in [0, T_{ALL}]$ における AGV $i \in \mathcal{I} = \{1, 2, \dots, I\}$ の位置は $\mathbf{u}_i(t) = (x_i(t), y_i(t))$ とする。ただし、位置 $\mathbf{u}_i(t)$ は以下の運動方程式 [14] で制約されると仮定する。

$$x_i(t) = x_i(0) + \int_0^t v_i(t) \cdot \cos \theta_i(t) dt \quad (1a)$$

$$y_i(t) = y_i(0) + \int_0^t v_i(t) \cdot \sin \theta_i(t) dt \quad (1b)$$

$$v_i(t) = v_i(0) + \int_{t_0}^t \dot{v}(\hat{t}) d\hat{t} \quad (1c)$$

$$\theta_i(t) = \theta_i(0) + \int_0^t \left(\omega_i(0) + \int_0^{\hat{t}} \dot{\omega}(\hat{t}) d\hat{t} \right) d\hat{t} \quad (1d)$$

ここで、 $v_i(t)$ [m/sec]、 $\omega_i(t)$ [rad/sec] はそれぞれ時刻 t における AGV i の並進速度と回転速度、 $\theta_i(t)$ [rad] は進行方向、 (\cdot) は微分演算子を表す。ただし、AGV の実現可能な並進及び回転の速度・加速度は移動のためのモーターによって制限されるものとする [14] [15]。

$$-V \leq v_i(t) \leq V \quad (2a)$$

$$-\Omega \leq \omega_i(t) \leq \Omega \quad (2b)$$

$$-A^v \leq \dot{v}_i(t) \leq A^v \quad (2c)$$

$$-A^\omega \leq \dot{\omega}_i(t) \leq A^\omega \quad (2d)$$

ここで、 V [m/sec]、 Ω [rad/sec]、 A_v [m/sec²]、 A_ω [rad/sec²] はそれぞれ並進と回転の最大速度・最大加速度を表す。

2.1 AGV の目的地への移動

図 1 に目的地の割当および目的地を基に移動経路を決定する

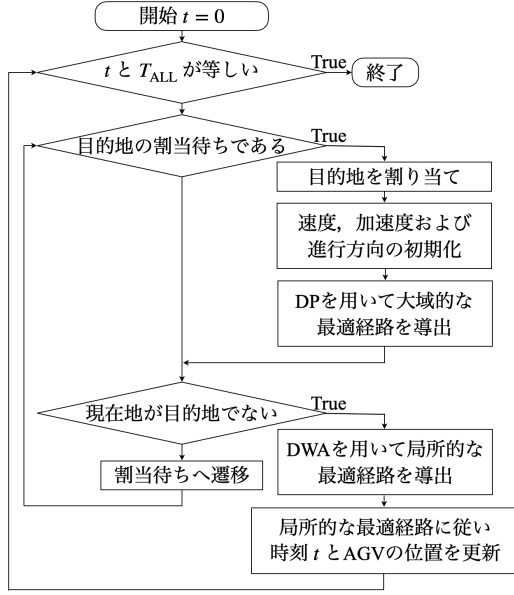


図1 目的地の割当および経路計画の流れ

動作の主な流れを示す。各 AGV は、割当待ちの場合はランダムな目的地 $\mathbf{u} \in \mathcal{U}_E$ が割り当てられ進行方向が目的地へ向くように初期化される。この時、時刻 t において AGV i へ割り当てられている目的地を $\mathbf{u}_{i,E}(t)$ とする。目的地へ到着した場合は並進と回転の速度・加速度の値をゼロへ初期化し割当待ちとなる。各 AGV は割り当てられた目的地を基に決定された局所的に最適な経路に従って移動する。

2.2 AGV の通信

AGV の通信モデルに関して、AGV から基地局への UL 通信のみを想定する。各 AGV は常にデータ (センシング情報やビデオ映像など) 伝送のためのパケットを生起後、自身のバッファに保持しているものと仮定する。ただし、バッファサイズは無限長とする。全 AGV はシステム帯域幅が B [Hz] のチャネルを用いて基地局と通信する。この時、各 AGV-基地局間の通信は時分割多元接続 (TDMA: Time Division Multiple Access) を想定する。従って、時刻 t における AGV i の信号対雑音電力比 (SNR: Signal-to-Noise Ratio) $\Gamma_i(t)$ は以下で与えられる。

$$\Gamma_i(t) = \frac{P\gamma(\mathbf{u}_i(t))}{\sigma^2} \quad (3)$$

ここで、 P [W] は AGV の送信電力、 $\gamma(\mathbf{u})$ は位置 \mathbf{u} でのチャネル利得、 σ^2 [W] は雑音電力を表す。

2.3 最適化問題

AGV i が移動開始位置から目的地まで移動する期間で達成可能な周波数利用効率の総和を最大化する経路最適化問題 (P1) を以下のように定式化する。

$$\max_{\{\mathbf{u}_i(t), \forall t\}} \int_{t_0}^{t_0 + \tau_{t_0}} \log_2(1 + \Gamma_i(t)) dt \quad (4a)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{u}_i(t_0 + \tau_{t_0}) = \mathbf{u}_{i,E}(t_0) \quad (4b)$$

$$v_i(t_0) = 0 \quad (4c)$$

$$\omega_i(t_0) = 0 \quad (4d)$$

$$\theta_i(t_0) = \arg(\mathbf{u}_{i,E}(t_0) - \mathbf{u}_i(t_0)) \quad (4e)$$

$$\|\mathbf{u}_i(t) - \mathbf{u}\| \geq D_{\text{HIT}}, \forall \mathbf{u} \in \mathcal{U}_{\text{OBS}} \quad (4f)$$

$$\|\mathbf{u}_i(t) - \mathbf{u}_j(t)\| \geq D_{\text{HIT}}, \forall j \in \mathcal{T} \setminus i \quad (4g)$$

$$(1a) - (2d)$$

ここで、 t_0 [s]、 $t_0 + \tau_{t_0}$ [s] はそれぞれ移動開始時刻と終了時刻、 D_{HIT} [m] は衝突回避のための最小距離を表す。制約 (4b) は移動終了時刻に目的地へ到着すること、(4c)-(4e) は速度、加速度及び進行方向の初期化、(4f)(4g) は衝突回避、(1a)-(2d) は AGV の運動方程式を表す。問題 (P1) は非凸な目的関数や組み合わせ制約及び複雑な運動方程式から NP 困難である。

3. 提案手法

離散化や制約緩和により問題 (P1) を再定式した問題を DP で解き、元の制約条件を考慮しつつ DP で求めた大域的な最適経路に沿う経路を DWA に基づくアルゴリズムで解く。

3.1 大域的な最適化

制約を緩和 (AGV の複雑な運動方程式を単純な運動へ近似、他 AGV との衝突を無視) し DP が適用可能な最適化問題 (P2) は以下のように再定式化する。ただし、時間 τ_{t_0} は N 個の時間スロット (間隔 Δ_{DP} [s]) で表現され、エリアは間隔 Δ_d [m] で離散化され任意の位置 \mathbf{u} は格子点 $g(\mathbf{u})$ で表されるとする。また、各時間スロットにおける制御入力を $\delta \mathbf{u}$ とする。

$$\max_{\{\delta \mathbf{u}_i[n], \forall n\}} \sum_{n=1}^N \log_2(1 + \Gamma_i[n]) \quad (5a)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{u}_i[n+1] = \mathbf{u}_i[n] + \delta \mathbf{u}_i[n], \forall n \in \mathcal{N} \setminus N \quad (5b)$$

$$\|\delta \mathbf{u}\| \leq V \Delta_{\text{DP}}, \forall \delta \mathbf{u} \in \mathcal{U}_{\text{DIFF}} \quad (5c)$$

$$\mathbf{u}_i[1] = g(\mathbf{u}_i(t_0)) \quad (5d)$$

$$\mathbf{u}_i[N] = g(\mathbf{u}_{i,E}(t_0)) \quad (5e)$$

$$\|\mathbf{u}_i[n] - \mathbf{u}\| \geq D_{\text{HIT}} + D_{\text{SAFE}}, \forall \mathbf{u} \in \mathcal{U}_{\text{OBS}} \quad (5f)$$

ここで、 $\mathcal{U}_{\text{DIFF}}$ は任意の時間スロットでとりうる制御入力の場合であり制約 (5c) を考慮して次式のように与える。

$$\mathcal{U}_{\text{DIFF}} = \left\{ (x, y) = (p\Delta_d, q\Delta_d), \forall p, q \in \mathbb{Z} \mid \sqrt{x^2 + y^2} \leq V \Delta_{\text{DP}} \right\} \quad (6)$$

制約 (5b) は単純な運動、(5c) は移動量が移動可能範囲内であること、(5d)(5e) は経路の開始と終了位置が初期及び目的地であること、(5f) は局所最適化における解の安定性を考慮してマージン距離 D_{SAFE} [m] だけ緩和された障害物との衝突回避を表す。

制御入力の組すなわち経路 $\pi_i = \{\delta \mathbf{u}_i[1], \dots, \delta \mathbf{u}_i[N]\}$ が与えられた際の初期地に関するコスト $J_{\pi_i}(\mathbf{u}_i[1])$ を以下で与える。

$$J_{\pi_i}(\mathbf{u}_i[1]) = J(\mathbf{u}_i[N]) + \sum_{n=1}^{N-1} \log_2(1 + \Gamma_i[n]) \quad (7)$$

ここで、 $J(\mathbf{u}_i[N])$ は終端コストを表す。今回は $\mathbf{u}_i[N]$ に目的

地を与えられた場合 0 を、それ以外の場合 $-\infty$ を返すものとする。従って、初期地に関するコストは経路の開始及び終了位置が初期及び目的地である場合に周波数利用効率の総和を示し、このコストを最大化する最適経路 π_i^* は以下となる。

$$\pi_i^* = \operatorname{argmax}_{\pi_i \in \Pi_i} J_{\pi_i}(\mathbf{u}_i[1]) \quad (8)$$

ここで、 Π_i はとりうる経路の集合を表し次のように与えられる $\Pi_i = \{\delta \mathbf{u}_i[n], n = 1, \dots, N \mid \delta \mathbf{u}_i[n] \in \mathcal{U}_{\text{DIFF}}\}$ 。初期地に関するコストは以下のベルマン方程式に従い時間を逆行 ($n = N - 1, \dots, 1$) させ再帰的に計算される。ただし、障害物の近傍にある位置のコストは $-\infty$ とし、実行不可能とする。

$$J(\mathbf{u}_i[n]) = \max_{\forall \delta \mathbf{u}_i \in \mathcal{U}_{\text{DIFF}}} \log_2(1 + \Gamma_i[n]) + J(\mathbf{u}_i[n + 1]) \quad (9)$$

3.2 局所的な最適化

次に、元の制約を考慮しつつ大域的な最適経路に沿う経路の最適化問題 (P3) を以下のように定式化する。ただし、AGV の最適な位置を求めるのではなく各移動時刻 t (間隔 Δ_t [s]) における最適な並進速度 $v_i^*(t)$ [m/s] と最適な回転速度 $\omega_i^*(t)$ [rad/s] を求める。

$$(v_i^*(t), \omega_i^*(t)) = \operatorname{argmax}_{\forall v_i(t), \forall \omega_i(t)} G(v_i(t), \omega_i(t)) \quad (10a)$$

$$\text{s.t. } x_i(t + \Delta_t) = x_i(t) +$$

$$v_i(t) (\sin(\theta_i(t) + \omega_i(t)\Delta_t) - \sin \theta_i(t)) / \omega_i(t) \quad (10b)$$

$$y_i(t + \Delta_t) = y_i(t) -$$

$$v_i(t) (\cos(\theta_i(t) + \omega_i(t)\Delta_t) - \cos \theta_i(t)) / \omega_i(t) \quad (10c)$$

$$\theta_i(t + \Delta_t) = \theta_i(t) + \omega_i(t)\Delta_t \quad (10d)$$

$$(2a) - (2d)$$

制約 (10b)-(10d) は移動時刻の間隔 Δ_t が十分に小さい場合に近似される AGV の運動方程式を表す。また、 $G(\cdot)$ は評価関数を表し、衝突回避や大域的な最適経路を辿るために今回は次のように与える。

$$G(v_i(t), \omega_i(t)) = \alpha \cdot \text{prog}(v_i(t), \omega_i(t)) + \beta \cdot \text{stob}(v_i(t), \omega_i(t)) + \epsilon \cdot \text{dyob}(v_i(t), \omega_i(t)) \quad (11a)$$

$$\text{prog}(v_i(t), \omega_i(t)) = - \frac{\|\mathbf{u}_i(t + \Delta_t) - \mathbf{u}_{i,\text{DP}}\|}{\max_{\forall v_i(t), \forall \omega_i(t)} \|\mathbf{u}_i(t + \Delta_t) - \mathbf{u}_{i,\text{DP}}\|} \quad (11b)$$

$$\text{stob}(v_i(t), \omega_i(t)) = \min \left(1, \frac{\min_{\forall \mathbf{u} \in \mathcal{U}_{\text{OBS}}} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_i(t + \Delta_t)\|}{D_{\text{SAFE}}} \right) \quad (11c)$$

$$\text{dyob}(v_i(t), \omega_i(t)) = \min \left(1, \frac{\min_{\forall j, \forall k} \|\mathbf{u}_j(t + k\Delta_t) - \mathbf{u}_i(t + k\Delta_t)\|}{D_{\text{SAFE}}} \right) \quad (11d)$$

ここで、 $\text{prog}(\cdot)$ は目的地への進行度合いを、 $\text{stob}(\cdot)$ は静的障害物との衝突回避度合いを、 $\text{dyob}(\cdot)$ は他 AGV との衝突回避度合いを表し、 α, β, ϵ はそれぞれ評価関数の各項の重みを表

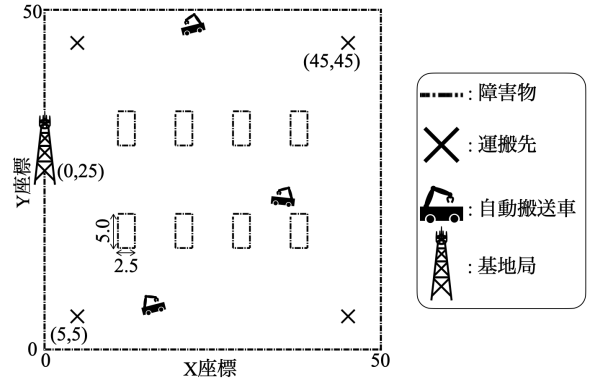


図 2 想定する屋内工場環境

す。 $\mathbf{u}_{i,\text{DP}}$ は大域的な最適経路を構成する格子点集合のうちの 1 点を表す。 $k \in \mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$, K は衝突回避のための計算分解能を表し、今回は $K = 2$ とする。

4. 計算機シミュレーション

4.1 評価手法

AGV が移動開始位置から目的地まで移動する期間で移動経路長の総和を最小化する経路最適化問題を A* アルゴリズム [16] を用いて解く。この時、A* アルゴリズムを適用可能にするため、エリアを間隔 Δ_d [m] で離散化し格子点で表現する。また、制約の緩和 (AGV の運動方程式の単純化及び他 AGV との衝突回避の無視) も行なう。A* アルゴリズムにおける任意の格子点でのコストは初期位置からその格子点までを最短の移動距離で結ぶ格子点間のユークリッド距離の総和であり、ヒューリスティックコストは初期位置からその格子点までのユークリッド距離とする。ここで、AGV は提案手法と同様で局所的に最適な経路に従い移動し、その経路は元の制約を考慮しつつ最短経路に沿う経路を DWA に基づくアルゴリズムで解くことで求められるものとする。

4.2 評価諸元

主なパラメータ値を表 1 に示す。その他のパラメータについて、屋内工場環境に関するものを図 2 に示す。静的障害物のサイズは柱や加工用機械による立ち入り禁止区域を模した $2.5 \text{ [m]} \times 5.0 \text{ [m]}$ 及び外壁を模した $50 \text{ [m]} \times 50 \text{ [m]}$ としそれらの障害物及び基地局のレイアウトは図 2 に従う。また、衝突距離 1 [m] 以上離れたランダムな運搬先をそれぞれの初期地にもつ 3 台の AGV も配置される。チャンネルは単純化のため見通し外 (NLoS: Non Line-of-Sight) のみを想定し [17], 3GPP のモデル化に従うパスロス [18] 及び空間相関を有したシャドウイングを考慮する [19]。DP における時間スロット数は最短経路の移動に要する最小時間スロット数以上の値である必要があり、本稿では最小時間スロット数の 1.3 倍の値とする。DWA における各項の重み α, β, ϵ は局所解に陥るのを防ぐため慎重に設定する必要があり、事前評価にて解の安定性が確認された 0.2, 1.0, 0.25 をそれぞれ設定する。ただし、本稿で設定された DWA における評価関数及び各項の重みでも 1 回程度の AGV 同士又は AGV と障害物間の衝突が発生する。

表 1 主なパラメータ諸元

パラメータ	値
エリアサイズ	50×50 [m ²]
エリア格子間隔	0.5 [m]
試行時間	1 [h]
試行回数	10 ³
AGV台数	3
AGVアンテナ高	1 [m]
衝突回避の最小距離	1 [m]
衝突回避のマージン	2 [m]
最大並進・回転 速度及び加速度	1 [m/s], 20 [rad/s], 0.2 [m/s ²], 50[rad/s ²]
DWAの移動時間間隔	1 [s]
DPの時間スロット長	1/√2 [s]
基地局台数	1
基地局アンテナ高	15 [m]
送信電力	20 [mW]
搬送波周波数	6 [GHz]
システム帯域幅	100 [MHz]
雑音電力	-94 [dBm]
パスロス指数	2.19
パスロスオフセット	33.63
伝播周波数係数	2.0
シャドウイング分散	5.9 [dB]
空間相関係数	1/20

4.3 結果と考察

各割り当てられた目的地への移動に要した時間を DP で設定された離散移動時間 $N\Delta_t$ で正規化した正規化所要移動時間の累積分布関数 (CDF: Cumulative Distribution Function) を図 3 に示す。また、AGV 間平均及び最小の達成可能な周波数利用効率の時間経過をそれぞれ図 4、図 5 に示す。凡例の提案経路は AGV の経路計画に提案手法を、最短経路は比較手法を用いる場合を表す。

図 3 について、“最短経路”より、最短経路を与えた経路計画にも関わらず CDF が 0 または 1 以外の値を取ることが分かる。これは、与えた最短経路で未考慮であった制約（加速度や回転速度を含む複雑な運動や他 AGV との衝突回避）を局所最適化にて考慮することで加速時間や迂回が生じ移動時間が増大するためである。さらに、初期地と目的地が対角位置にあるか否かで障害物との衝突回避が局所的な最適化にて作用するかが変わるため、CDF が 2 段階的に変化する。また、“提案経路”は“最短経路”と比較して平均の正規化時間が 6% 程度長いものの、最良の特性である“最短経路”に特性が漸近していることが分かる。これは、DP による与えた最適経路が最短経路の 1.3 倍長い移動時間を要するためである。

図 4 について、“最短経路”による周波数利用効率は、全ての時刻においてエリア内の任意の位置で達成可能な周波数利用効率即ち $t = 0$ における周波数利用効率とほぼ等しいことが分かる。一方、“提案経路”は $t > 0$ において周波数利用効率が増大し、“最短経路”と比較して周波数利用効率を 5% 程度向上している。これは、“提案経路”における局所的な最適経路は周波数利用効率の総和を最大化する大域的な最適経路に沿って計画されるためである。ただ、本特性の改善度合いは小さく、これは、本稿で想定した小規模なエリアでは任意の位置同士での達成可能な周波数利用効率があまり変わらず特性の上界が低いと

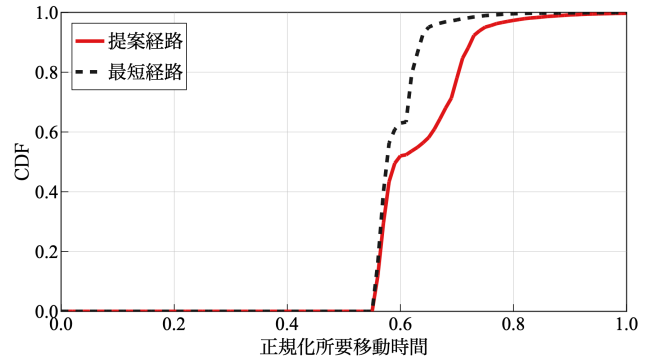


図 3 割り当てられた各目的地への移動に要した正規化時間

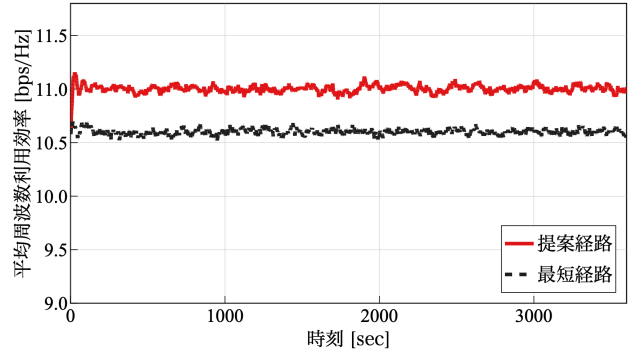


図 4 各時刻に対する平均周波数利用効率

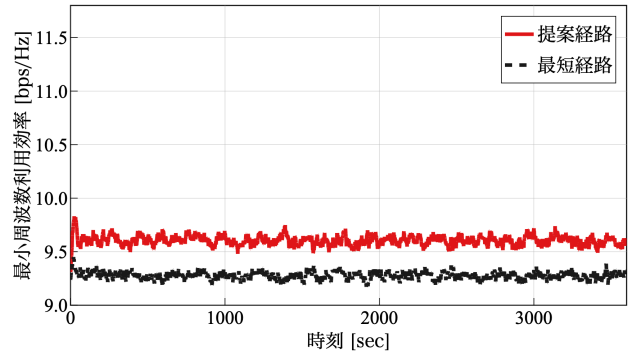


図 5 各時刻に対する最小周波数利用効率

考える。

図 5 について、図 4 の結果と同様、“最短経路”は $t = 0$ の周波数利用効率からあまり時間変動せず“提案経路”は $t > 0$ で周波数利用効率が增大していることが分かる。これは、“最短経路”では局所的な最適化へ通信品質を考慮しない大域的な最適経路を与えており、“提案経路”では DP により周波数利用効率の総和を最大化する大域的な最適経路を与えるためである。また、“提案経路”は“最短経路”と比較して周波数利用効率を 3% 程度向上しており、図 4 よりも更に改善度合いが小さくなっている。これは、制約（移動の開始位置が初期地である及び終了位置が目的地であるや他 AGV との衝突回避）により周波数利用効率の低い位置を経路に含まざるを得ない場合があるためと考える。

図 4 及び図 5 の“提案経路”について、AGV 間最小の周波数利用効率は AGV 間平均の周波数利用効率よりも 13% 程度劣化していることが分かる。これは、DP で周波数利用効率の総和

を最大化するため時刻間の周波数利用効率に差が生じ、各時刻において周波数利用効率の高いAGVと低いAGVが存在するためである。AGV間平均と最小の特性差を改善するためには、経路の最適化だけでは図5の結果の考察より改善は期待されず無線資源割当との共同最適化を行なう必要があると考える。

5. まとめ

本研究では、マテリアルハンドリングにおける高い通信品質の達成を目的とし、大域的最適化と局所的最適化を組み合わせたAGVの経路計画を提案した。特性評価より、提案手法は比較手法よりも目的地への移動に要した時間が6%程度長くなるがAGVが達成可能な平均周波数利用効率が5%程度向上することを示した。今後は、既存手法との比較により、シャドウイングを考慮して最適化可能である提案手法の優位性を確かめる。また、更なる特性改善のための無線資源割当との共同最適化について検討する。

謝辞 本研究開発はNICT委託研究(採択番号07301)によるものである。

文献

- [1] D. Jewapatarakul and P. Ueasangkomsate, "Digital Transformation: The Challenges for Manufacturing and Service Sectors," in *Proc. 2022 Joint Int. Conf. on Digital Arts, Media and Technology with ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering (ECTI DAMT & NCON)*, pp. 19-23, Jan. 2022.
- [2] D. Wu and Y. Xiao, "Digital Driven Global Manufacturing Industry Transition and Innovative Development," in *Proc. 2021 Int. Conf. on Digital Society and Intelligent Systems (DSInS)*, pp. 138-142, Dec. 2021.
- [3] T. Kalsoom, N. Ramzan, and S. Ahmed, "Societal Impact of IoT-Lead Smart Factory in the Context of Industry 4.0," in *Proc. 2020 Int. Conf. on UK-China Emerging Technologies (UCET)*, pp. 1-5, Aug. 2020.
- [4] K. -C. Chen, S. -C. Lin, J. -H. Hsiao, C. -H. Liu, A. F. Molisch, and G. P. Fettweis, "Wireless Networked Multi-robot Systems in Smart Factories," in *Proc. of the IEEE*, vol. 109, no. 4, pp. 468-494, Apr. 2021.
- [5] F. Otori, S. Itaya, T. Osuga, and F. Kojima, "Estimating Wireless Link Quality using Multiple Remote Sensors for Wireless Control of AGV in a Factory," in *Proc. 2020 23rd Int. Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, pp. 1-6, Oct. 2020.
- [6] W. Xia, J. Goh, C. A. Cortes, Y. Lu, and X. Xu, "Decentralized coordination of autonomous AGVs for flexible factory automation in the context of Industry 4.0," in *Proc. 2020 IEEE 16th Int. Conf. on Automation Science and Engineering (CASE)*, pp. 488-493, Aug. 2020.
- [7] J. Wan, S. Tang, Q. Hua, D. Li, C. Liu, and J. Lloret, "Context-Aware Cloud Robotics for Material Handling in Cognitive Industrial Internet of Things," *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 4, pp. 2272-2281, Aug. 2018.
- [8] J. Zhang, Y. Lv, Y. Li, and J. Liu, "An Improved QMIX-Based AGV Scheduling Approach for Material Handling Towards Intelligent Manufacturing," in *Proc. 2022 IEEE 20th Int. Conf. on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)*, pp. 54-59, Dec. 2020.
- [9] *IEEE Standard for Logistics Operation Process in a Smart Factory*, IEEE Std 2934-2022, vol., no., pp.1-62, Sept. 2022.
- [10] S. Chainarong and K. Yaovaja, "Development of an Obstacle Avoidance System for Autonomous Material Handling Vehicles," in *Proc. 2022 20th Int. Conf. on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE)*, pp. 1-6, Nov. 2022.
- [11] Y. Li, H. Zhang, K. Long, C. Jiang, and M. Guizani, "Joint Resource Allocation and Trajectory Optimization with QoS in NOMA UAV Networks," in *Proc. GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Commun. Conf.*, pp. 1-5, Dec. 2020.
- [12] M. T. Nguyen and L. B. Le, "Multi-UAV Trajectory Control, Resource Allocation, and NOMA User Pairing for Uplink Energy Minimization," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 23, pp. 23728-23740, Dec. 2022.
- [13] D. Bertsekas, *Dynamic Programming and Optimal Control*, Athena Scientific, 2012.
- [14] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, "The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance," *IEEE Robotics Automation Mag.*, Mar. 1997.
- [15] H. Gao, Z. Ma, and Y. Zhao, "A Fusion Approach for Mobile Robot Path Planning Based on Improved A* Algorithm and Adaptive Dynamic Window Approach," in *Proc. 2021 IEEE 4th Int. Conf. on Electronics Technology (ICET)*, pp. 882-886, May 2021.
- [16] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. 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, Jul. 1968.
- [17] C. S. M. Garcia et al., "Cooperative Resource Allocation for Proximity Communication in Robotic Swarms in an Indoor Factory," in *Proc. IEEE WCNC*, pp.1-6, Apr. 2021.
- [18] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 ghz*, 3GPP TR 38.901 V16.1.0, Dec. 2019.
- [19] Claussen, "Efficient modelling of channel maps with correlated shadow fading in mobile radio systems," in *Proc. 2005 IEEE 16th Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp.512-516, Sept. 2005.