単方向リング型AGVシステムにおける搬送スケジューリング

02201913　豊橋技術科学大学電子・情報工学専攻 日本学術振興会特別研究員　°佐々木 淳　SASAKI Atsushi
01603863　豊橋技術科学大学知識情報工学系　増山 繁　MASUYAMA Shigeru
01702854　高松大学経営学部産業経営学科　山川 栄樹　YAMAKAWA Eiki

1 はじめに

最近の工場においては，多様な搬送要求にも柔軟に対応できるAGV (Automated Guided Vehicle) システムの導入が進められている[1]．その走行レールは，移動する台車間の競合を抑えるために，有向閉路を骨格とした形状である場合が多い．例えば文献[2]では，複数の有向閉路の間に荷物の受渡し場所を設け，それぞれの有向閉路を走行する台車群を独立に制御する方式を提案している．これに対して本稿では，ひとつの有向閉路に荷物の積み降ろしのための無向辺を複数付加した走行レールに対して，与えられた荷物を効率よく搬送するための台車の移動方法を定めることを試みる．

荷物の搬送スケジュールを考える際には，最大完了時刻の最小化を図ることが多い．しかし，定められたレール上に限られた数の台車を走行させることによって荷物の搬送を行う場合には，台車のやりくりや走行レールへの進入順序の適切な制御が，効率よい搬送を実現するための前提条件となる．具体的には，

1. 台車の空走（荷物を載せずに移動する）距離の総和を最小化，
2. 台車の実走（荷物を載せて移動する）距離の最大値を最小化，
3. 台車間の競合回数の総和を最小化

する台車の移動方法を定めることにより，最適な搬送を実現できるものと考えられる．実際，評価基準1は，最大完了時刻を最小化する搬送スケジュールにおける空走距離の下界値を与える．一方，評価基準2はpartition問題と良く似ているため，NP 困難である可能性が高い．そこで本稿では，1および3を評価基準として台車の移動方法を考える．

2 モデル

AGVシステムの走行レールは，一方通行部分を有向辺，双方向通行可能な部分を無向辺とし，それらの交差点および末端部分を頂点とするグラフで表現できる[3]．なお，各辺は長さ1の一つ以上の「区間」から構成され，各台車は1単位時間ごとに隣接する空き区間へ移動できるものとする．但し，各区間には高々1台の台車しか進入できず，各頂点を同時に通過できる台車も高々1台であると仮定する．

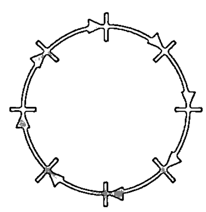

図1：単方向リング型走行レールの形状 ($n=8$).

本稿では，走行レールが図1に示すような唯一の単方向リング型のグラフGで表現できる場合を考える．グラフGは，1以上の任意の長さをもつn本の有向辺から成る時計回りの閉路と，各頂点に付加された積込地および荷揚地に対応するn本ずつの長さ1の無向辺によって構成される．積込地を時計回りに$S_1, S_2, \cdots, S_n$とし，時刻0にそれぞれ相異なる無向辺を荷揚地とする荷物がひとつずつ与えられるものとする．また，S_iで積込まれる荷物の荷揚地をD_iと書く．なお，台車数をN，時刻0におけるN台の台車の位置は任意とし，他の台車との競合が発生しない限り，移動可能ないずれかの区間へ移動するものと仮定する．さらに，各台車は少なくとも一つの荷物を搬送するものとし，荷物の積み降ろしに要する時間は0と仮定する．

3 空走距離の最小和問題

まず，無向辺の添字集合$L = \{1, 2, \cdots, n\}$を，つぎの条件を満たすような要素数最小の部分集合$L_1, L_2, \cdots, L_m$に分割することを考える．

$$\forall i \in L_\ell \text{ に対して } \exists j \in L_\ell \text{ such that } S_i \text{は} D_j \text{に隣接する} \qquad i = 1, 2, \cdots, m.$$

このとき，L_ℓのある積込地S_iに移動した空の台車は，有向辺を空走することなくL_ℓに対応するすべての積込地に与えられた荷物を荷揚地まで次々に搬送することができる．とくに，1台の台車で搬送する場合には，これらの荷物の搬送が完了したとき，台車はS_iに隣接する荷揚地D_jに戻ってくる．よって，あるL_ℓに対応するすべての積込地S_iと荷揚地D_iを同一視できることがわかる．そこで，区間pと部分集合L_ℓの距離$r_\ell(p)$を$\min\{\mathrm{dist}(p, S_i) \mid i \in L_\ell\}$により定義する．$N = 1$のとき，次の定理が成立つ．

定理 1 $N = 1$で台車の初期位置をpとする．さらに，一般性を失うことなく$r_1(p) \leq r_2(p) \leq \cdots \leq r_m(p)$と仮定する．このとき，$L_1, L_2, \cdots, L_m$に対応する積込地に与えられた荷物を順に搬送することにより，空走距離の総和を最小値$r_m(p)$にすることができる．□

次に，$2 \leq N \leq n$の場合を考える．このとき，搬送を始める前に必要な空走距離の和を最小にするためには，各台車を初期位置から順次動かして，搬送すべき荷物が残っている最初の積込地へただちに進入させればよい．一方，搬送開始後の空走距離の和を最小にするために，ある部分集合の荷物を，複数の台車で搬送する場合と，1台の台車で搬送する場合とに分けて考える．まず，複数の台車で搬送する場合には，それらの台車はい

ずれも他の部分集合の荷物を搬送しないものとする．これは，同じ部分集合に属する積込地に複数の台車が進入して搬送を始めた後，そのいずれかが他の部分集合へ移動する場合に必要な空走距離は，その台車が初めから他の部分集合の搬送を行う場合を下回らないからである．次に，１台の台車で搬送している場合には，最初に搬送を始めた部分集合の荷物を搬送した後，まだ全く搬送を始めていない部分集合のうちで最も近いものへ移動させることにする．実際，別台車が既に搬送を始めている他の部分集合へ応援に行くと，別台車に任せる場合よりも部分集合間の移動分だけ空走距離の和が増加する．

ここで，各有向辺の長さがいずれも１のグラフに対し，$N = 2, L = \{1,2,3,4,5,6\}, L_1 = \{1\}, L_2 = \{2,4\}, L_3 = \{3,6\}, L_4 = \{5\}$ で，台車 v_1 の初期位置 p_1 が S_1 に隣接する荷揚地，台車 v_2 の初期位置 p_2 が S_4 に隣接する荷揚地である場合を考える．このとき，上記の方法で台車の移動方法を定めると，v_1 は S_1, S_3, S_6 にある L_1, L_3 の荷物をこの順番で搬送し，v_2 は S_4, S_2, S_5 にある L_2, L_4 の荷物をこの順番で搬送する．その結果，v_1 の空走距離は５区間，v_2 の空走距離は４区間になる．一方，v_1 は S_1 にある L_1 の荷物だけを搬送し，v_2 は S_4, S_2, S_5, S_6, S_3 にある L_2, L_4, L_3 の荷物をこの順番で搬送すると，v_1 の空走距離は１区間，v_2 の空走距離は７区間となり，空走距離の和が前者に比べ１区間減少している．そこで，複数の部分集合の荷物を搬送する台車を対象にして，必要に応じて部分集合の荷物の搬送割り当ての変更を試みる．

このとき，次の定理が成り立つ．

定理 2 上記に従って台車の移動方法を決定すれば，その空走距離の和は最小になる． □

なお，この移動方法の決定に要する時間計算量は $O(nN) \leq O(n^2)$ である．

4　競合回数の最小化

本節では，$N = 2$ の場合に限定して，グラフ G 上の v_1, v_2 の初期位置，荷物の割り当て，その搬送順序が与えられたとき，競合回数を最小にする移動方法を求めることを考える．

時刻０から搬送完了までの間に，２台の台車は何度かお互いに競合を起こしながら G 上を移動する．これは，時刻０を初期状態，搬送完了時刻を最終状態とし，発生し得るすべての競合をそれらの中間状態とする状態遷移過程と考えることができる．そこで，各状態を頂点，状態遷移を辺とする補助的なグラフ G' を描くことを考える．２台の台車が競合したとき，どちらの台車が停止するかによって次の状態は変化するため，中間状態を表す頂点からは２本の辺が出ている．すべての辺の長さを１とすれば，初期状態と最終状態を結ぶ経路の長さは，競合回数 +1 となる．従って，グラフ G' 上で最短路問題を解くことによって，競合回数を最小にするような台車の移動方法を求めることができる．実際，グラフ G' は次のような手続きによって生成される．

1. グラフ G' の始点 s と終点 t を生成する．また，有向辺 e_1 を生成し，始点 s から出るように付加する．辺 e_1 は，グラフ G において各台車が初期位置を出発したことを表すものと考えて，辺 e_1 について2を実行する．
2. 処理対象とする有向辺を e_j とする．辺 e_j の表す移動の後，競合を起こすことなく搬送を完了できる場合は，辺 e_j を終点 t に入るように接続する．競合が起こり，競合を起こす G 上の頂点に対応した G' 上の頂点 g_i が既に生成されている場合，辺 e_j を g_i に入るように接続する．さもなければ，グラフ G' に頂点 g_j を生成し，辺 e_j を g_j に入るように接続する．さらに，有向辺 e_{2j} と e_{2j+1} を生成し，頂点 g_j から出るように付加する．辺 e_{2j} はグラフ G 上で新たに発生した競合において台車 v_1 を優先すること，辺 e_{2j+1} は台車 v_2 を優先することを表すと考えて，辺 e_{2j} と e_{2j+1} との双方について，2を再帰的に実行する．
3. 頂点に未接続の辺がなくなれば終了する．

定理 3 グラフ G' 上で最短路問題を解くことで，競合回数が最小になる２台の台車の移動方法が得られる． □

一方，辺の長さを状態間の経過時間とすれば，経路の長さは搬送完了時刻を与える．よって，各台車が搬送すべき荷物とその搬送順序が予め与えられているとき，最大完了時刻を最小にするような台車の移動方法を求めることができる．なお，このグラフの生成に必要な時間計算量は，$O(n^2)$ である．

5　おわりに

本稿では，単方向リング型 AGV システムにおいて，効率のよい搬送を実現する台車の移動方法について考察した．具体的には，空走距離の最小和問題から，最大完了時刻を最小化する搬送スケジュールにおける空走距離の下界値を与えた．さらに，台車数が２の場合について，台車間の競合回数を最小化することにより，与えられた搬送スケジュールの中から最大完了時刻を最小化するスケジュールを選ぶことを可能にしている．

なお，台車数が３を越える場合には台車間の競合はさらに複雑になる．また，各台車の実走距離を最小化するような移動方法を求めない限り，最大完了時刻の最小化は達成できない．これらの解決は，今後の課題である．

参考文献

[1] 穴吹　他：電磁鋼板精整ラインの自動搬送エキスパートシステム；川崎製鉄技報，Vol. 23, No. 3, pp. 239-246 (1991).

[2] Yavuz A. Bozer et al.:Tandem Configurations for Automated Guided Vehicle Systems and the Analysis of Single Vehicle Loops；IIE Transactions，Vol. 23, No. 1, pp. 72-82 (1991).

[3] 佐々木 他：AGV (Automated Guided Vehicle) システムにおける最悪移動完了時間の理論的解析；電子情報通信学会論文誌，Vol. J79-A, No. 8, pp. 1433-1443 (1996).