搬送システムの自動評価の一手法*

加賀美 亮** 古川 進***

A Method of Evaluating Distribution Systems

Ryo KAGAMI and Susumu FURUKAWA

It is required to consider efficiencies of distribution of luggages when a factory is designed or a job scheduling is made. Various simulation methods for checking efficiencies of transporting luggages have been developed. However, designers have to analyze the results by themselves whether the design or the scheduling is acceptable or not. A new simulation method with a function for detecting problems in the design or the scheduling is presented. This method consists of the following three procedures. (1) Obtaining a result by a conventional simulation method (e.g. discrete event simulation method). (2) Simulating by the new simulation method named Time-Skipping method. (3) Comparing those two results. If there are differences between them, some problems exist in the design or the scheduling. Two types of conveyor systems for transporting luggages have been tested by using this new simulation method. The results show that this new Time-Skipping method can be used for evaluating distribution systems and job scheduling.

Key words: FA, physical distribution, simulation, automated evaluation, distribution scheduling

1. 序 論

近年、工場や物流センタ等の搬送システムを構成する機器は高速、高性能になり、システムの構成や制御方式もより複雑になってきた。そのため、ちょっとしたシステムのトラブルや運用計画のミスが工場や物流センタの運営に重大な影響を及ぼすといったことがそれほど珍しいことではなくなってきた。このような状況に対処するために、システムを稼働する前になんらかの方法によって、その評価を行っておくことが必要である。システム全体の能力や運用計画を評価するために、数理計画法やダイナミックプログラミング等の手法を利用した方法を始め、多くの研究がなされてきた^{1)~4),10)~12)}。

しかし、システムの複雑さが増すにつれて、システムやスケジューリングの評価は難しくなり、コンピュータによるシミュレーションに頼らざるを得なくなった。システムの運用を開始する前に、コンピュータ・シミュレーションを行うことによって、システムの効率、計画の良し悪しなどが評価でき、よりよいシステム構築への手がかりを得ることが出来るのである。そのため、コンピュータ・シミュレーションは多くの大規模システムにおいて広く利用されている。実際、種々のシミュレーションプログラムが開発され、FAシミュレータとして市販されているものを目にする機会が多くなってきた^{5)~9)}。

ところで、現在のコンピュータ・シミュレーションの方法は、
(a) システム全体をその構成要素の集合と考え、搬送すべき荷物が時間とともにどのように変化するかを個々の荷物に対し微小時間ごとに調べる、
(b) 構成要素個々の状態が変化する時間を調べ、システム全体のスケジューリングを行う、
などの方法が考えられている。(a)の方法では時間間隔が小さ

ければ小さいほど現実には即した結果が得られるが、その代わりに膨大な計算量が要求される。また、(b)の方法では計算量は(a)の方法ほど多くないが複雑なシステムでは正確なスケジューリングが困難であるなど、いずれの手法も長所と短所を合わせて持っている。これらの方法に共通した課題として、

- (1) シミュレーション結果の解析・評価をユーザ自身が行う必要がある、
- (2) 搬送システムのどこに問題があるのかについてもユーザ自身が考えなければならない、
- (3) 運用計画の変更等に柔軟に対応できない、
などがあげられる。

著者らは自動倉庫を含む搬送システムの設計時における事前評価と既に稼働している自動倉庫システムの評価と運用計画の見直しに対する資料を提供するため、上記の課題を解決する手法の考案に取り組んでいる。本論文では、上記の課題、特に(1)と(2)を解決するために、タイム・スキッピング法と呼ぶ新しい手法を提案する。タイム・スキッピング法は、新しい手法でシミュレーションを行い、この結果と従来のシミュレーション手法の結果を比較することで搬送システムや運用計画の評価を行おうとするものである。

種々の搬送システムに対して、タイム・スキッピング法を適用して実験を行ってみた。その結果、荷物が滞留しない場合は2つのシミュレーション結果に差がないこと、また、荷物の滞留が増大するのに伴って、両者の差が大きくなっていくことが確認できた。このことから、本手法は搬送システムや運用計画の評価を自動的に行うための有力な手段を提供するものであることがわかった。

以後、2節ではタイム・スキッピング法の基本的な考え方について述べ、3節でシミュレーションの対象となる搬送システムの構成を、4節でアルゴリズムを説明し、5節でタイム・スキッピング法を使った実験とその結果について考察する。最後に6節でまとめを行い、今後の課題についても述べる。

*原稿受付 平成10年6月5日

**学生会員 山梨大学大学院(甲府市武田4-3-11)

***正会員 山梨大学工学部

2. タイム・スキッピング法の基本的な考え方

道路を走行する車の場合を例として考えてみると、“渋滞”の起こる原因にはいろいろな種類のものが考えられる。最もわかりやすい原因の一つは信号機が設置されている場所において交通量がある限度以上になる場合である。

もう一つの原因はいわゆる“自然渋滞”の原因といわれるもので、道路上に過密な交通量が課されたときに見られるものである。更に、上記二つの原因の相乗効果によると考えられる渋滞が発生するが、それは他の原因によるものかどうかも含めてよくわかっていない、というのが実状であろう。シミュレーションが、その原因の究明は別にして、いつ、どこで渋滞が発生するかを見出す有力な手段の一つであると考えられているのも上記の事情によるからである。

本論文で提案するタイム・スキッピング法の発想は単純である。車の走行を例にとりて考えてみれば、一本道を移動しているだけの場合には任意時間後の車の位置を計算することは容易であり、シミュレーションの結果も理論値と一致するはずである。交差点がある場合でも通行量が少なく、渋滞が起らないような場合には、時間の経過を考えないで理論的に計算を行って得た結果とシミュレーションの結果は一致する。交通量が増えてくると、現実の状況は徐々に理論値と異なってくると考えられる。シミュレーションの結果と理論値を比較して、車の通過時間、あるいは交通量に(大きな)差が認められるときは交通量が多すぎる、あるいは道路の設計が悪いということが推察される。

搬送システムの場合も道路の場合と同様である。例えば、無人搬送車(以下、AGVと記す)同士がある搬送経路上で出会い、共に回避行動をとるとしても、搬送量が少ない場合にはAGVの行動が結果に与える影響は全くないか、あるいは極めて小さいであろう。一方、搬送量が増大してくるに従って、回避行動をとるための時間的なロスが結果に重大な影響を及ぼすこともあると考えられる。この場合、時間の経過を考慮しない理論値とシミュレーションの結果には搬送できた量や搬送に要した時間に差異が生じているはずである。タイム・スキッピング法の基本的な考え方はこの差を利用して、システムや搬送計画の問題点を見い出そうとするものである。

システムがある程度複雑になると、理論的な計算を行うことは極めて困難となり、大規模システムでは事実上不可能であると考えられる。理論的な計算ができる範囲でシミュレーションの時間間隔をなるべく大きくとり、流量や搬送時間等を推定するのが現実的な方法であろう。具体的には、ある程度大きな時間間隔を想定し、この時間内に起こる状態の変化は無視して、1) 搬送経路上での荷物の待ち時間や荷物間距離等の状態を正しく評価する、2) 荷物の合流・分岐点においては、荷物の優先順や到着順等のあらかじめ定められた合流則、分岐則に則って処理する、のである。時間間隔の大小にかかわらず、上述の手法によれば、シミュレーションの結果は一本道あるいは通行量が少ない場合には理論値と完全に一致する。一方、交通量が多い場合には時間間隔を大きくしていくと理論値に、また時間間隔を小さくしていくと現実と近づく。したがって、理論値の代わりに上述の手法の結果と従来のシミュレーション手法の結果を比較し、一致する場合には搬送量が多くなっても搬送システムあるいは搬送計画に問題がないと、逆に結果に差がある場合には何らかの問題があるということがわかる。

Fig.1 Example of stations

3. 搬送システムの構成

本論文においては、コンベヤや無人搬送車などの搬送機器および作業員から構成される搬送システムについて考察する。搬送システムの模式図の例を図1に示す。図中、円は荷物の合流・分岐を行う装置あるいは人が仕分け・組立て等の作業を行う場所を意味し、これらをステーションと呼ぶことにする。システム中の i 番目のステーションを以下では ST_i と表記する。また、矢印のついた直線は荷物の搬送経路 L_j を示し、荷物は矢印の方向に速度 $v_j(t)$ で搬送されるものとする。各搬送経路 L_j には、両端点のステーション間の距離 l_j がそれぞれ定義されているものとする。

矢印の始点側のステーションを入力元、終点側のステーションを出力先という。

連続して搬送される荷物同士の最小間隔を最小荷物間距離と呼ぶ。これは搬送機器ごとに定義される定数であると仮定しておく。前節で述べたように本論文で提案するシミュレーション手法では、従来のような微小時間間隔ごとの計算は行わず、ある程度大きな時間間隔をとる。この時間間隔を以下ではステップ幅と呼び、これを T_h と記す。

4. タイム・スキッピング法で用いるシミュレーション・アルゴリズム

タイム・スキッピング法のシミュレーション・アルゴリズムの詳細について述べる。本アルゴリズムで最も重要なことは各ステーションにいつ、どんな荷物が到着するかを正確に把握することである。

荷物の搬入口に対応するステーションから計算を始め、荷物の搬送される方向へ順次その計算結果を引き継いでいくことが出来れば良いが、図1の例のステーション ST_3 、 ST_4 、 ST_5 、 ST_7 のようにシステムの内部に閉経路が形成されている場合や計算上ではステーションに許容量以上の荷物が到着してしまうということもあり得るので、このような問題を考慮した荷物の状況の評価法を考慮しておくことが必要である。

最初に、閉経路内のステーションの計算順位について考察する。閉経路は外部のステーションとの接続の仕方でも図2に示されるような3種類に分類される。

タイプ1：外部から閉経路へ荷物の搬入(以下、入力と記す)がある場合(図2(a))。

タイプ2：外部からの入力がなく、閉経路外のステーションへの搬出(以下、出力と記す)がある場合(図2(b))。

タイプ3：外部からの入力も、また外部への出力もない場合(図2(c)).

以下、各タイプ別に計算順位を決定する方法について述べる。

(a) タイプ1の場合

閉経路外部のステーションを入力元とするステーション(図2(a)の例では ST_2)を見つけ、これを閉経路内の第一計算順位とする。第一計算順位のステーションを入力元とするステーション(図2(a)の例では ST_3)を第二位の計算順位とする。閉経路内の全ステーションに対し、同様な処理を行えば、各ステーションの計算順位は一意に決定される。ただし、閉経路外部のステーションを入力元とするステーションが複数ある場合には、最初に見つけたものを第一計算順位とすることにする。

(b) タイプ2の場合

外部への出力があるステーション(図2(b)の例では ST_3 あるいは ST_4)を探し、このステーションから搬送経路を逆順に一周し、元に戻る直前のステーション(図2(b)の例では ST_4 あるいは ST_1)をこの閉経路内の第一計算順位とする。以下、このステーションから始め、順次計算順位を決める。ただし、外部への出力が複数のステーションから行われる場合は、タイプ1の場合と同様に最初に見つけたステーションから搬送経路を遡るものとする。

(c) タイプ3の場合

このタイプの搬送システムは著者らの知る限り、現実には設備されていない。したがって、この場合の計算順位については特に考慮する必要はないと思われる。仮に、このようなシステムが構築されたとしても計算順位を決定する合理的な法則は見い出せない。したがって、ここでは仮に以下の方法で計算順位を定めるということにする。つまり、任意のステーションを選び、これを閉経路内の第一計算順位として、他のステーションの計算順位を確定するということである。

合流点に許容量以上の荷物が到着する場合の処理について述べる。この場合には複数の入力経路において、経路上の搬送待ちの荷物が最も多い方の荷物から搬送するのが自然な考え方であろう。しかし、現実の搬送システムでは合流点における待ち行列の長さを把握する方法を持っていないので、シミュレーションにおいてもこの方法を採用することは非現実的である。

搬送システムにおいて、実際に採用されている方法は主に以下の2つである。

(1) 経路によって優先順位を決定する方法。

合流点に入るあるいは出ていく経路によって搬送する順番を決定する方法である。例えば、図1の ST_5 では常に ST_2 の荷物を優先して搬送するというものである。

この方法では優先順位の低い経路から来る荷物を優先的に搬送し、優先順位の低い経路の荷物は搬送され難く、この経路の待ち行列が際限なく長くなってしまふ恐れがある。実際、この方法のみで合流点を処理するシステムは極めて限られた形態のものである。

(2) 荷物の種類によって優先順位を決める方法。

例えばりんごの入った箱とみかんが入った箱が合流点に同時に到着した場合は、いずれか一方の荷物(例えばりんごの箱)を先に搬送する、あるいは2つの荷物(みかんとりんご)を交互に搬送するといった規則を決めておき、この規則に従って合流するという方法である。

上述の荷物の優先順位を決定する規則を以下においては合流則と呼ぶことにする。本論文においては上述の(2)の方法(交

Fig.2 Examples of loop systems

互に搬送する方法)を用いることにする。

分岐点において搬送先を決定する方法について述べる。搬送システムにおいて、用いられている方法は主に以下の2つである。

(1) 荷物の種類により経路が定められる方法。

この方法は荷物ごとにあらかじめ搬送経路が定められている場合に用いられる。

(2) 搬送先のステーションの状態を見て搬送先を決める方法。

搬送開始時には搬送経路が定められず、経路上のステーションの状態を見ながら空いている経路を選ぶ方法である。

上述の分岐点における搬送先を決定する規則を分岐則と呼ぶことにする。本論文においては上述の(1)の方法を用いる。

合流・分岐点に対応するステーション ST_i に許容量以上の荷物が到着すると計算される場合には、搬入口から ST_i に至る搬送経路上にある荷物の位置(あるいは時間)をそれぞれ論理的に矛盾がない位置(時間)になるように修正しなければならない。

したがって、滞留の影響の有無を上述の計算順位とは逆の順で調べ、影響がある場合には荷物のステーションへの到着時間を修正することになる。

以上をまとめるとタイム・スキッピング法で用いるシミュレーション・アルゴリズムは、以下のようになる。

(1) 荷物の搬入口から始めて、閉経路の部分を除いたステーションごとの計算順位を定める。

(2) 閉経路内のステーションは前述の手順で計算順位を決める。

上記、(1)、(2)で定めたステーション計算順位を利用して、今度は以下の手続きを行う。

(3) 各ステーション ST_i に荷物が到着する時間を計算する。同時に到着する荷物がある場合には前述の合流・分岐則によ

Fig. 3 Layout of experiment No.1

Table 1 Results of experiment No.1

Interval time sec	$T_h = 60$ sec		Confirmation of congestion
	Load1	Load2	
2	- 24.6	15.9	×
4	- 24.6	15.9	×
8	0.0	15.3	△
16	0.0	0.0	○

○ : no congestion △ : congestion × : extreme congestion

て荷物の優先順位を決定し、優先順位の低い荷物の到着時間を修正(遅く)する。このとき、各荷物が同時に同じ位置を占めないように荷物の大きさや最小荷物間距離等を考慮して到着時間の修正を行う。

(4)ステーション ST_i で荷物の滞留による影響がある場合には、優先順位の低い荷物の搬送経路を搬入口まで廻り、それぞれ荷物の到着時間を修正する。このとき、(3)と同様に荷物の大きさや最小荷物間距離等を考慮するのは当然である。

5. 実験とその結果

前節までに述べられたシミュレーション手法を図3、図4に示す搬送システムにそれぞれ適用して、実験を行った。この実験では、タイム・スキッピング法で用いるシミュレーション・アルゴリズムによる平均搬送時間 T_i 、および、従来のシミュレーション法による平均搬送時間 T_c とその差 $T_d = T_i - T_c$ を求めた。数値 T_d が正の時はタイム・スキッピング法で用いるシミュレーション法の方が搬送に時間がかかることを、逆に負の時は従来のシミュレーション手法の方が搬送に時間がかかることを意味する。なお、各実験ではあらかじめ搬送する荷物の個数が定められているものとした。

実験では従来のシミュレーション方法として、序論で述べた(a)の方法を使った。微小時間間隔は0.01秒と定めた。

また、最小荷物間距離をすべて0mとして計算を行った。荷物間距離を非零の値に設定しても、シミュレーションの結果(滞留の状況の傾向など)には大きな影響を及ぼさないからである。

実験1 (図3の場合)

図3に示されるように荷物の搬送経路には、 ST_1 、 ST_2 、 ST_5 、

Fig. 4 Layout of experiment No.2

ST_6 、 ST_7 のRoute1と ST_3 、 ST_4 、 ST_5 、 ST_6 、 ST_7 のRoute2がある。

(1) 条件

荷物の搬送速度：毎分10m

荷物の種類：荷物はRoute1を通るLoad1とRoute2を通るLoad2の2種類。

ステーション ST_5 における荷物の合流則：2種類の荷物が同時に ST_5 に到着する時はこれらの荷物を交互に搬送する。

荷物の搬送要求時間間隔：2秒、4秒、8秒、16秒の計4種類。

1回の搬送要求で搬送される荷物の個数：2種類とも1個。

ステップ幅 T_h (本アルゴリズム)：60秒

(2) 結果と考察

実験の結果を表1に示す。Route1を通る荷物に対する T_d の値を表1のLoad1の欄に、Route2を通る荷物に対する T_d の値をLoad2の欄に示す。また、表の右端の欄には目視にて確認した滞留の状況を記す。○は滞留が起きていないことを、△は滞留が若干発生していると認められたことを、×は滞留が発生していることを意味する。

表1より、搬送要求の時間間隔が16秒(16秒間隔で荷物が搬入口に到着する)の場合には結果に差はないが、時間間隔が短くなるにつれて差が大きくなっていることがわかる。これは目視にて確認した滞留の状況と良く一致している。

また、4秒間隔の搬送要求があると、システム能力の上限であると判断される。二つの手法(従来のシミュレーション法とタイム・スキッピング法で用いるシミュレーション法)で得た結果の差が2秒と4秒の場合で変わらないからである。

実験2 (図4の場合)

この搬送システムは、 ST_1 、 ST_2 、 ST_3 、 ST_8 、 ST_9 、 ST_{10} 、

Table 2 Results of experiment No.2

Number of requests	$T_h = 60 \text{ sec}$		Confirmation of congestion
	Load1	Load2	
2	0.0	0.0	○
4	4.5	10.5	△
6	5.0	11.0	×
8	5.25	11.25	×
12	5.5	11.5	×

○ : no congestion △ : congestion × : extreme congestion

ST_{11} , ST_{12} の Route1 と ST_1 , ST_2 , ST_3 , ST_4 , ST_5 , ST_6 , ST_7 , ST_{10} , ST_{11} , ST_{12} の Route2 の二つの経路があり、かつ、分岐点 ST_3 と合流点 ST_{10} を持つ。

(1) 条件

荷物の搬送速度：毎分 10 m

荷物の種類：荷物は Route1 を通る Load1 と Route2 を通る Load2 の 2 種類。

荷物が搬送要求を出すタイミングとその個数：すべての荷物はシミュレーション開始時に搬送待ちの状態であるとする。最初に Load1 を搬送し、次に Load2、以後 2 種類の荷物を交互に搬送するものとする。また、搬送待ちの荷物の個数を Load1, Load2 ともに 2 個、4 個、6 個、8 個、12 個とする計 5 通りで実験を行った。

ステーション ST_{10} における荷物の合流則：2 種類の荷物が同時に ST_{10} に到着する時はこれらの荷物を交互に搬送する。

ステップ幅 T_h (本アルゴリズム)：60 秒

(2) 結果と考察

実験結果を表 2 に示す。2 つの手法 (従来のシミュレーション法とタイム・スキッピング法で用いるシミュレーション法) の差が大きくなるにつれ、滞留が発生し、また、その傾向が顕著になっていくことがわかる。

上記 2 つの実験以外にも閉経路を有するシステムなどについて実験を行った。いずれも 2 つのシミュレーション手法で得られる結果に差があるときに限って荷物の滞留が発生していることを確認した。

また、本アルゴリズムのステップ幅 T_h を 2 秒から 60 秒の間でいろいろ変更してシミュレーションを行ってみた。その結果、ステップ幅を変えても差が認められなかった。

6. 結 論

搬送システムの能力や搬送スケジュールを事前に評価するための新しい方法として、タイム・スキッピング法と呼ぶ手法を

提案し、いくつかの搬送システムに適用してみた。その結果、本論文で提案したシミュレーション法と従来の微小時間間隔ごとに現象を追跡するシミュレーション法を比較することにより、ユーザ自身が行わなければならない、システムに問題があるかどうかの判定を自動的に行うことが可能であることが分かった。

今後は、

(1) 問題点を更に詳細に見つけ出す方法、つまり、滞留の発生したステーションを見つけ出す方法や、

(2) 問題があるスケジュールの修正方法、

(3) 搬送システムのレイアウトの見直しが可能かどうかなどの検討を行うことが必要であろう。

参 考 文 献

- 1) O.M.Beltcheva and I.K.Georgiev : A Simulation Method Based on Conditional Events, EUROSIM'95 Simulation Congress, (1995) 129.
- 2) W.P.Darrow and J.N.D.Gupta : Integrating Group Technology and MRP Systems through Lot Sizing and Scheduling, Computers Tnd.Eng., **16**, 2 (1989) 287.
- 3) K.Heitmann : Using Statistical Methods to Improve Prediction in Simulation-Based Scheduling, EUROSIM'95 Simulation Congress, (1995) 1041.
- 4) 森戸 晋, 今泉 淳, 朴宰完: 厳しい制約を有するスケジューリングに対する数理計画アプローチ生産, スケジューリングシンポジウム '96 講演論文集, 日本経営工学会, (1996) 85.
- 5) 中西俊男: 離散系シミュレーション言語 GPSSV および GPSSWORLD, 情報処理, **37**, 3 (1996) 219.
- 6) 中西俊男: 離散系シミュレーション言語 SIMSCRIPT2.5, 情報処理, **37**, 3 (1996) 226.
- 7) 日比野陽一: 統合型シミュレーションフレームワーク ARENA, 情報処理, **37**, 3 (1996) 246.
- 8) 相沢りえ子: 離散型・連続型記述言語 SLAM 2, 情報処理, **37**, 3 (1996) 254.
- 9) 木崎健太郎: バーチャル空間でモノ作り, part2 生産準備, 日経メカニカル別冊, 日経 BP 社, (1997) 52.
- 10) J.Potamianos and A.J.Orman: An Interactive Dynamic Inventory-Production Control System, J. Operational Soc., **47**, 8 (1996) 1017.
- 11) F.H.Muge and N.A.Sentos: Application of Dynamic Programming to the Grade Control and Scheduling in a Cut-and-Fill Mining Method, 21st APCOM, (1984) 479.
- 12) 田村坦之: 生産スケジューリングとメタ戦略, 日本鉄鋼協会計測・制御・システム工学部会シンポジウム, (1997) 9.