

自動搬送ラインの設計支援のための準具象物流シミュレータ

高橋圭一[†] 鈴木幸司[†]
佐賀聡人[†] 前田純治[†]

本論文では、まず、自動搬送ラインの設計支援に適した物流シミュレータの具象性について検討する。その結果、自動搬送ラインの実体である材料や搬送機器およびセンサのセンシング範囲については、ある程度自由な大きさと2次元形状を有する必要があることを示す。また、材料の移動については、運動方程式に基づいた過渡現象まで表現する必要はなく、静止摩擦力に基づいた移動でよいことを示す。次に、このような具象性を有するシミュレータとして、準具象物流シミュレータ QC-SIM (Quasi-Concrete materials flow SIMulator) を提案する。さらに、本シミュレータの有効性を確認するため、Windows上に実装したQC-SIMを用いた自動搬送ラインの設計例を示し、QC-SIMが、試行錯誤的な自動搬送ラインの設計支援に有効であることを示す。

A Quasi-concrete Materials Flow Simulator to Assist in the Design of Automatic Materials Handling Line

KEIICHI TAKAHASHI,[†] YUKINORI SUZUKI,[†] SATO SAGA[†]
and JUNJI MAEDA[†]

We studied concreteness to construct materials flow simulator to assist in the design of an automatic materials handling line (AMHL) that mainly consists of materials, handling apparatuses, sensors, and computer. As a result of studies, the concreteness is indicated as: it is required to have adequate sizes and shapes as properties in two-dimensional space for materials, handling apparatuses, and sensing area of sensors. Moreover, it is sufficient to move materials using static friction. Based on the above concreteness, we propose a quasi-concrete materials flow simulator (QC-SIM) in this paper. The QC-SIM is implemented on Microsoft Windows to demonstrate its effectiveness. Furthermore, we showed that the QC-SIM is useful for designing an AMHL interactively by trial error.

1. はじめに

自動搬送ラインは、材料の加工や運搬を自動化する設備であり、材料を運ぶ搬送機器、材料の位置を検出するセンサ、センサ情報を基に搬送機器を制御する制御用コンピュータなどの機器で構成される。自動搬送ラインの設計者は、搬送機器やセンサを適切に配置し、各機器を制御する条件やタイミングを整理し制御プログラムを作成する。

ここで、自動搬送ラインの設計者は、搬送機器やセンサの詳細な設計には立ち入らず、それらを比較的簡単な機能ユニットとして扱う。しかし、個々の機能ユニットは単純であっても、それらは互いに密接に関係しているため、自動搬送ラインの設計は複雑となる。たとえば、搬送対象とする材料の形状を変更しただけでも、センサや搬送機器の配置を変更し、

さらにそれにとまって関連する制御プログラムのロジックや動作タイミングを全面的に見直す必要が生じる場合もある。

このように自動搬送ラインの設計は複雑であるにもかかわらず、現場の設計者の多くがバッチ的な設計作業を行っているという現状がある。すなわち、(1) 大まかな物流イメージに基づいて、CAD、状態遷移図、フローチャートなどを用いて各機器の配置や制御プログラムを暫定的に設計し、(2) タイムチャートなどを用いて物流をグラフ化して設計内容を検証し、(3) その検証結果に基づいて設計内容を修正し、(4) 最終的に設計内容を検証するため実際の機器を用いて材料を搬送する、という作業を段階的に行っている。要求仕様を最終的に満たすためには、初期にイメージした物流に基づく設計内容を検証・修正する作業が避けられず、経験者であってもこれら段階的な作業を時間と労力をかけて繰り返すことになる。経験が少ない設計者においては、初期に適切な物流イメージを得ることが困難であるため、さらに多大な時間と労力が必要となる。

[†] 室蘭工業大学情報工学科
Department of Computer Science and Systems Engineering, Muroran Institute of Technology

このような問題を解決するためには、現場の設計者が行っている試行錯誤的な設計作業を机上で手軽に行える環境が必要だと考えられる。この環境を利用すれば、熟練者であっても効率的に設計が行えるうえ、経験が少ない設計者であっても、試行を通して仮想的に経験を蓄積することが期待できる。そこで、我々はこうした環境を実現するため、準具象物流シミュレータ QC-SIM (Quasi-Concrete materials flow SIMulator) を提案する。

以下、2章では自動搬送ラインの設計支援に適したシミュレーションモデルの具象性について検討し、3章では、この検討に基づいた準具象物流シミュレータ QC-SIM を提案する。次に4章では、本手法の有効性を確かめるため、QC-SIM を用いた自動搬送ラインの設計例を示す。さらに5章では、QC-SIM の具象性が自動搬送ラインの設計作業に寄与している点を考察する。最後に6章にてまとめを行い、今後の課題を示す。

2. シミュレーションモデルの具象性の検討

近年のコンピュータハードウェアの高速化により、3次元グラフィクスを用いたシミュレーションが身近なものとなってきている^{1)~7)}。しかし、必ずしもシミュレーションモデルを3次元で表現することがよいとは限らない。シミュレーションモデルの具象性を高くすると実物に近い高精度の検証ができるものの、シミュレーションモデルに入力する情報が多くなり、それらの調査や検証に多くの時間が必要となる。そのため、必要以上に具象性が高いシミュレータは、自動搬送ラインの設計現場では受け入れられない場合がある。そこで、本章では、自動搬送ラインの設計支援に適したシミュレーションモデルの具象性について検討する。

2.1 自動搬送ライン

自動搬送ラインは、工場における加工機器間を連結するシステムであり、材料をコンベアなどの搬送機器に積載して自動的に搬送する。搬送される材料の主な例としては、図1の鋼板をはじめ、パルプ、自動車、飲食品などがあげられる。

自動搬送ラインでは、搬送機器のローラやベルトが回転することにより、搬送機器上の材料が運搬される。材料の移動はセンサで把握され、このセンサ情報を基に制御用コンピュータが各搬送機器を制御する。ここで、材料は、搬送機器の配置や大きさと比較して無視できない大きさや形状を有している。そのため、自動搬送ラインの設計では、材料や搬送機器について大きさや形状を考慮する必要がある。一方、センサについては、リミットスイッチのように、1点でセンシング

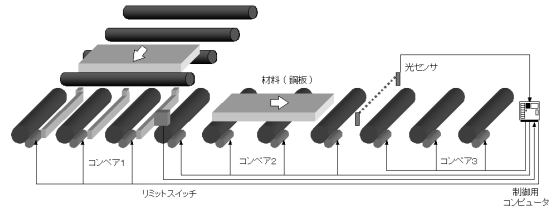


図1 自動搬送ライン

Fig. 1 An automatic materials handling line (AMHL).

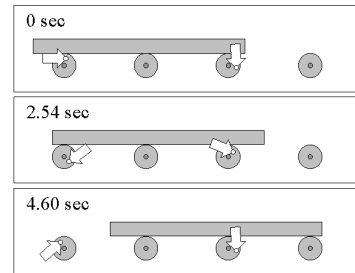


図2 力学シミュレータ

Fig. 2 A dynamics-based simulator.

するセンサもあるが、光センサのように直線区間で材料の位置をセンシングするセンサや、超音波センサのように幅広い範囲で材料の位置をセンシングできるセンサも存在する。そのため、自動搬送ラインの設計では、センサのセンシング範囲についても、その大きさや形状を考慮する必要がある。

なお、自動搬送ラインは、3次元形状を有しているが、その多くは2次元平面で設計されることから、本論文では、本質的に2次元形状で表現できる自動搬送ラインのみを対象とする。

2.2 既存のシミュレーションモデルの適用検討

2.1節のような自動搬送ラインの設計支援に、既存のシミュレーションモデルを適用した場合について検討する。物体の動きを表現するシミュレーションモデルには、力学シミュレータ^{8)~10)}と離散系シミュレータ^{11)~18)}がある。

力学シミュレータは、運動方程式に基づいて物体の動きを計算するため、搬送機器や材料の動きを実物に近い精度で表現することができる。図2は、力学シミュレータを用いて搬送機器上の材料の挙動をシミュレーションした例である。このシミュレーションモデルを構築するためには、材料や搬送機器の大きさや形状、そして摩擦係数や重量などの多くのパラメータを入力する必要があり、それらのデータを調査するのに多大な時間を要する。しかし、自動搬送ライン全体を設計する段階では、個々の機器の設計は完了しており、過渡現象まで考慮した材料の動きをシミュレーション



図3 離散系シミュレータ
Fig. 3 A discrete simulator.

する必要はない。つまり、力学シミュレータのシミュレーションモデルは、具象性が高すぎるため、2.1節のような自動搬送ラインの設計支援には必ずしも適さない。

一方、離散系シミュレータは、各工程の搬送機器の処理能力を単位時間あたりの処理数やバッファ容量などの値としてシミュレーションモデルに入力するだけで、簡単に物流を表現することができる。図3は、離散系シミュレータを用いて塗装工程を含む自動搬送ラインをシミュレーションした例である。このシミュレーションモデルは、搬送時間やバッファ容量といった少数のパラメータを入力するだけで構築できる。また、シミュレーション結果から各工程ごとの稼働時間、最大待ち時間、最大滞留長などの統計量を得ることができる。しかし、離散系シミュレータのシミュレーションモデルの多くは、待ち行列を基本としているため¹⁹⁾、搬送機器や材料を大きさを持たない情報または情報用バッファと見なすことから、搬送機器や材料およびセンサのセンシング範囲について、その大きさと形状を扱うことができない。つまり、離散系シミュレータのシミュレーションモデルは、具象性が低すぎるため、2.1節のような自動搬送ラインの設計支援には必ずしも十分ではない。

2.3 自動搬送ラインの設計支援に適したシミュレーションモデルの具象性

力学シミュレータおよび離散系シミュレータのシミュレーションモデルの具象性が、自動搬送ラインの設計支援には必ずしも適切でないことを2.2節で示した。そこで、以下に、2.1節のような自動搬送ラインの設計支援に適したシミュレーションモデルが満たすべき具象性について、物流実体と物流処理に分けて検討する。

2.3.1 物流実体の具象性

図4に示すように、自動搬送ラインの物流実体を、センサ層、材料層、搬送機器層および制御用コンピュータに分けて考える。センサ層は、センサ部品を配置する空間であり、センサ部品は、各センサのセンシング範囲を表す。材料層は、材料部品を配置する空間であり、材料部品は、搬送機器によって運搬される材料

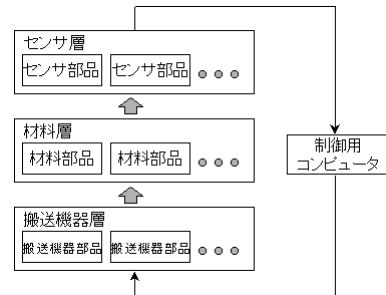


図4 自動搬送ラインの物流実体
Fig. 4 Subjects to comprise the AMHL.

を表す。搬送機器層は、搬送機器部品を配置する空間であり、搬送機器部品は、ベルトコンベアやローラコンベアのように材料を搬送する機器を表す。制御用コンピュータは、センサ部品の情報を基に搬送機器部品を制御する制御プログラムを実行する機器を表す。ここで、自動搬送ラインの設計支援のためには、2.1節のような自動搬送ラインを考えればよい。物流実体の各部に要請される具象性は以下ようになる。

- (1) 搬送機器部品、材料部品、センサ部品は、ある程度自由な2次元形状として各層に表現される。
- (2) 搬送機器部品は、材料部品を一定の搬送方向および搬送速度で搬送する機能を持つ。
- (3) 制御用コンピュータは、形状情報を持たず、制御プログラムの動作を模倣する機能を持つ。

2.3.2 物流処理の具象性

自動搬送ラインの物流処理を、センサ部品の状態を取得する処理、センサ部品の状態に基づき搬送機器部品を制御する処理、搬送機器部品の状態に基づき材料部品を移動する処理の3段階に分けて考える。ここで、自動搬送ラインの設計では、材料部品の移動を運動方程式に基づく過渡現象として厳密に検証する必要はない。したがって、過渡現象を無視すれば、物流処理の各段階に要請される具象性は以下ようになる。

- (1) センサ部品の状態取得処理は、センサ部品と材料部品との重なりを検知し、センサ部品の状態をON/OFFの2値のいずれかの状態として取得する。
- (2) 搬送機器部品の制御処理は、制御プログラムに従って、搬送機器部品の稼働状態を稼働/停止の2値のいずれかの状態としてセットする。
- (3) 材料部品の移動処理は、静止摩擦力に基づき、材料部品を搬送機器部品の持つ搬送方向、搬送

ここでいう「センサ部品」とは、リミットスイッチや光センサなどのセンサ装置そのものではなく、あくまで、センサのセンシング範囲を表すことに注意する。

加工機器も材料を移動させるという点では搬送機器と同様に扱えるため、本論文では両機器をともに搬送機器と呼ぶ。

速度に従って移動させる．ただし，ここで以下の2点を考慮する必要がある．

- (a) 搬送機器部品や材料部品は大きさを持っているため，材料部品が複数の搬送機器部品上をわたって移動する場合があります，このとき，どの搬送機器部品に従って移動するか決定する．
- (b) 材料部品どうしの衝突に際しては，非弾性衝突として取り扱い，材料部品を一体化して移動させる．

3. 準具象物流シミュレータ

2.3 節に示した，自動搬送ラインの設計支援に適したシミュレーションモデルの具象性は，力学シミュレータの具象性と離散系シミュレータの具象性の中間的なものとなった．そこで，2.3 節の具象性を有するシミュレーションモデルを準具象モデルと呼ぶことにする．本章では，この準具象モデルの1つの実装として準具象物流シミュレータ QC-SIM を提案する．以下，QC-SIM のシミュレーションモデルを物流実体と物流処理に分けて示す．

3.1 物流実体の準具象モデル

2.3.1 項に示した各部品をシミュレーションモデルで扱うため，図4の各層を図5に示すように正方メッシュで表し，各部品を一辺の長さが d の正方ブロックの組合せで表す．各層をそれぞれ，センサ層マップ，材料層マップ，搬送機器層マップと呼び，各部品を構成するブロックをそれぞれ，センサブロック，材料ブロック，搬送機器ブロックと呼ぶ．

図5は，図6に示す自動搬送ラインの各部品を，マップとブロックを用いて表した例である．このように，材料部品と搬送機器部品は，それぞれ正方ブロックを組み合わせて表現できる．また，光センサの直線的なセンシング範囲や超音波センサの広がりを持つセンシング範囲も，同様に正方ブロックを組み合わせて表現できる．一方，制御用コンピュータに関しては，形状情報を持たないため，マップやブロックによる表現は行わず，制御プログラムの動作を模倣する機能のみを持たせる．

3.1.1 搬送機器ブロック

搬送機器ブロックには，以下の属性を持たせる．

- 機器部品 ID

各部品を正方ブロックを組み合わせて表現する方法は，ある程度自由な部品形状を設計できるため汎用性に優れているうえ，各層間の部品どうしの重なりを，層マップ上の正方メッシュのアドレスのみで判定できるため計算効率に優れている．

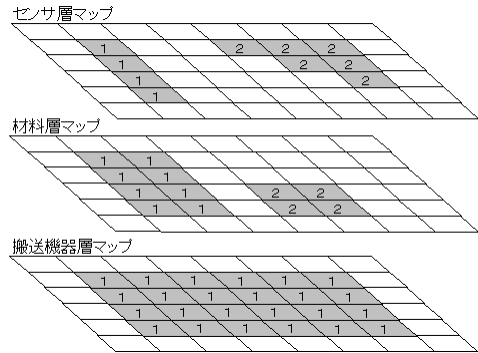


図5 自動搬送ラインのマップとブロックによる表現例
Fig. 5 Graphical illustration of the AMHL with maps and blocks.

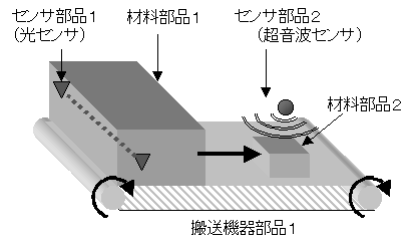


図6 自動搬送ラインの部品による表現例
Fig. 6 Graphical illustration of the AMHL with components.

- 搬送方向
- 搬送時間

機器部品 ID は，搬送機器ブロックが属する搬送機器部品の ID である．搬送方向は，材料ブロックを移動させる方向であり，本論文では属性値として上下左右のいずれかの値を持たせる．搬送時間は，材料層マップの同一位置にある材料ブロックを隣接するブロックへ移動させる時間である．搬送機器の搬送能力が搬送速度 v で与えられる場合，搬送時間は d/v となる．

3.1.2 材料ブロック

材料ブロックには，属性として，材料ブロックが属する材料部品 ID を持たせる．このほか，属性として摩擦係数や重量なども考えられるが，本論文では簡単のため，これらの値は均一であると考えられる．

3.1.3 センサブロック

センサブロックには，属性として，センサブロックが属するセンサ部品 ID を持たせる．

3.2 物流処理の準具象モデル

図7に物流処理の手順を示す．この手順の(1)センサ状態取得処理から(4)シミュレーション時刻の進行までを1ステップと呼び，1ステップ実行したときに経過する時間をステップ時間と呼ぶことにする．

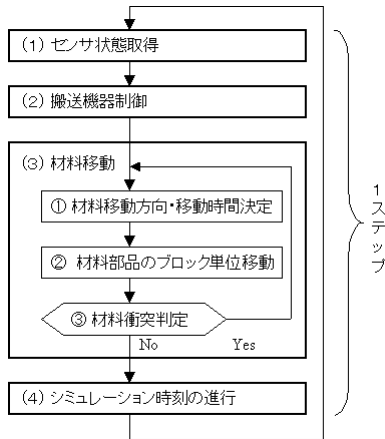


図7 物流処理の流れ

Fig.7 Flowchart of the processing of a material flow.

なお、このステップ時間は、設計者が指定できる任意の定数である。以下に各処理について示す。

3.2.1 センサ状態取得処理

センサ部品と材料部品の重なりを調べる。もし重なりがあれば、そのセンサ部品のセンサ状態を ON 状態とする。このように、センサ状態はセンサ部品単位に管理するため、同一のセンサ部品 ID を持つセンサブロックが 1 つでも材料ブロックと重なっていれば、そのセンサ部品 ID のセンサ状態は ON 状態となる。これらセンサ状態は、センサ状態変数である $sensor_ [$ センサ部品 ID] に保存する。

図 5 を例とすると、センサ部品 ID が 1 のセンサブロックは、材料ブロックと重なっているため、センサ部品 ID が 1 のセンサ状態変数 $sensor_ [1]$ は ON 状態となる。一方、センサ部品 ID が 2 のセンサブロックは、材料ブロックとの重なりがないため、センサ状態変数 $sensor_ [2]$ は OFF 状態となる。

3.2.2 搬送機器制御処理

センサ状態取得処理で得たセンサ状態を基に制御プログラムを 1 回実行する。制御プログラムは、搬送機器部品の稼動/停止状態を決定する。具体的には、センサ状態変数 $sensor_ [$ センサ部品 ID] の値を基に、機器部品 ID 別に管理する搬送機器状態変数 $machine_ [$ 機器部品 ID] の ON/OFF 状態を決定する。

図 8 に制御プログラムの例を示す。図 5 のシミュレーションモデルに対し、この制御プログラムを適用した場合、センサ状態変数 $sensor_ [1]$ は ON 状態であるため、3 行目の制御文が実行され、機器部品 ID が 1 の搬送機器状態変数 $machine_ [1]$ は ON 状態となる。

3.2.3 材料移動処理

搬送機器制御処理で決定した搬送機器部品の状態に

```

1: void ENGINE::plc()
2: {
3:   if (sensor_[1] == ON) machine_[1] = ON;
4:
5:   if (sensor_[1] == OFF && sensor_[2] == OFF)
6:   {
7:     machine_[1] = OFF;
8:   }
9: }

```

図8 制御プログラムの例

Fig.8 Example of control a program.

材料層	材料部品ID	1	1	1
搬送機器層	搬送方向 搬送時間	→ 3	→ 3	→ 4

図9 材料部品の移動方向および移動時間の決定例

Fig.9 Example of determination of the moving direction and time for a material component.

従って材料部品を移動する。これは、以下の 3 段階の処理で行う。

(1) 材料移動方向・移動時間決定処理

2.3.2 項において、材料の移動について過渡現象を無視するものとしたため、材料は静止摩擦力に従って移動する。ここで、材料が単一の搬送機器上を移動する場合は、材料はその搬送機器に従って移動するため、単にその搬送機器の搬送方向、搬送時間を材料の移動方向、移動時間とすればよい。一方、材料が複数の搬送機器にわたって移動する場合は、複数の異なる搬送方向、搬送時間の搬送機器領域と接する場合がある。この場合、材料は、最大の静止摩擦力を与える領域に従って移動するため、その領域の搬送方向、搬送時間を材料の移動方向、移動時間とすればよい。

本論文では、材料ブロックの重量および静止摩擦係数を均一としたため、静止摩擦力は、材料と搬送機器が接する領域の大きさに比例する。したがって、最大の静止摩擦力を与える領域は、材料部品と接する搬送機器ブロックを搬送方向および搬送時間ごとにグルーピングし、そのうちブロック数が最も多いグループの領域となる。

図 9 に材料部品の移動方向と移動時間を求める例を示す。材料部品 1 は、搬送方向が右方向で搬送時間が 3 の搬送機器ブロックと搬送方向が右方向で搬送時間が 4 の搬送機器ブロックに重なっている。材料部品 1 が重なっている搬送機器ブロックを搬送方向および搬送時間でグルーピングすると、ブロック数が最も多いグループは、搬送方向が右方向で搬送時間が 3 であるから、材料部品 1 の移動方向は右方向、移動時間は 3 と決定される。

(2) 材料部品のブロック単位移動処理

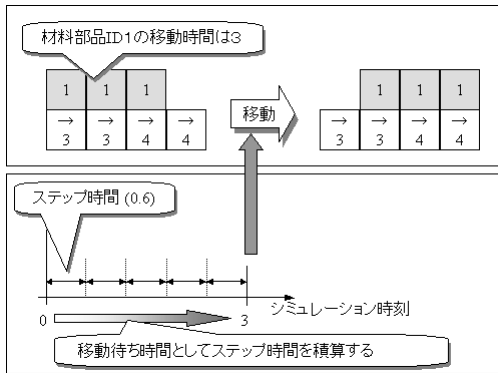


図 10 ブロック単位移動処理の例

Fig. 10 Example of the processing of material movement per block.

シミュレーションを 1 ステップ実行したとき、ステップ時間を材料部品ごとに管理する移動待ち時間に加算する。この移動待ち時間が、材料移動方向・移動時間決定処理によって決定された移動時間以上となったとき、その材料部品を移動方向に 1 ブロック分移動（ブロック単位移動）する。

図 10 にブロック単位移動処理の例を示す。材料移動方向・移動時間決定処理の結果、材料部品 1 の移動方向は右方向、そして移動時間は 3 と決定される。ここで、ステップを 1 回実行すると、材料部品 1 の移動待ち時間は、ステップ時間分進行し 0.6 となる。この時点で材料部品 1 の移動時間と材料部品 1 の移動待ち時間を比較すると、移動時間の方が大きいので、材料部品 1 は、シミュレーション時刻が 0.6 の時点ではブロック単位移動することができない。このあと、ステップを計 5 回実行すると、材料部品 1 の移動時間と材料部品 1 の移動待ち時間が等しくなる。したがって、シミュレーション時刻が 3 となった時点で、材料部品 1 は右方向にブロック単位移動することになる。

(3) 材料衝突判定処理

2.3.2 項で述べたとおり、材料部品どうしが衝突した場合、衝突した部品を一体化して移動させることになる。そのため、衝突した材料部品を 1 つの材料部品と見なして、つまり、衝突した材料部品の材料部品 ID を同一であると見なして、材料部品の搬送方向および搬送時間を再度決定する。

4. 実験

準具象シミュレータ QC-SIM を実装し、本手法の有効性を検証するため、自動搬送ラインの設計例を示す。

4.1 実装

QC-SIM をインプライズ社の C++Builder3.0 を

用いてマイクロソフト社の Windows 上に実装した。図 11 に QC-SIM のメインウィンドウを示す。この実装でのユーザインタフェースは以下のようにした。ツールボックスウィンドウから搬送機器ブロック、材料ブロック、センサブロックをマウスで選択してマップ上に配置できるようにした。このとき、マウスでドラッグ操作することにより、1 つずつブロックを配置することなく、1 操作で複数ブロックを配置できるようにした。また、シミュレーションの実行操作は、シミュレーションコントローラウィンドウより行うことができ、さらに、機器センサ状態ウィンドウより、搬送機器部品およびセンサ部品の状態を知ることができるようにした。

4.2 自動搬送ラインの設計例

QC-SIM を用いて自動搬送ラインを段階的に設計していく具体例を示す。設計対象は、図 12 に示す鋼板の表面塗装機器を含む自動搬送ラインである。この自動搬送ラインは、鋼板を搬送機器 1 上方より 12 秒間隔で給材し、搬送機器 2 で運搬して搬送機器 3 で表面塗装する。そして、塗装が完了した鋼板を搬送機器 4 で運搬して自動搬送ラインから搬出する。鋼板の大きさは、幅 6,000 mm × 奥行き 3,000 mm × 厚さ 10 mm であり、塗装機器である搬送機器 3 の搬送速度は 0.1 m/秒、これ以外の搬送機器の搬送速度は 0.5 m/秒である。搬送機器 3 の搬送速度は、他の搬送機器の 1/5 と差異があるため、搬送機器 1 は、鋼板を 4 つバッファリングできる大きさを持つ。この設計の場合、以下に示す 3 段階で設計を完了した。

4.2.1 設計第 1 段階（暫定配置の決定と材料脱落現象の発見）

図 12 に示した自動搬送ラインを QC-SIM 上で表現するため、ブロックサイズ d とステップ時間を決定した。各機器の大きさを考慮して d を 1 m、ステップ時間を 1 秒とした。また、4 つの搬送機器を表すため、それぞれ機器部品 ID が 1 から 4 の搬送機器部品を配置した。搬送機器部品 3 の搬送速度は 0.1 m/秒、これ以外の搬送機器部品の搬送速度は 0.5 m/秒であるから、搬送時間に変換し、搬送機器部品 3 の搬送時間を 10 秒、これ以外の搬送機器部品の搬送時間を 2 秒とした。ここまでを QC-SIM 上でモデリングすると図 13 のようになった。搬送機器部品をすべて ON 状態とし、搬送機器部品 1 上方に材料部品を 1 つ置きシミュレーションを開始した。その結果、シミュレーション開始 24 秒後に、搬送機器部品 1 と搬送機器部品 2 の間で材料部品が搬送ラインから外れてしまう現象が見られた（図 14 中の）。

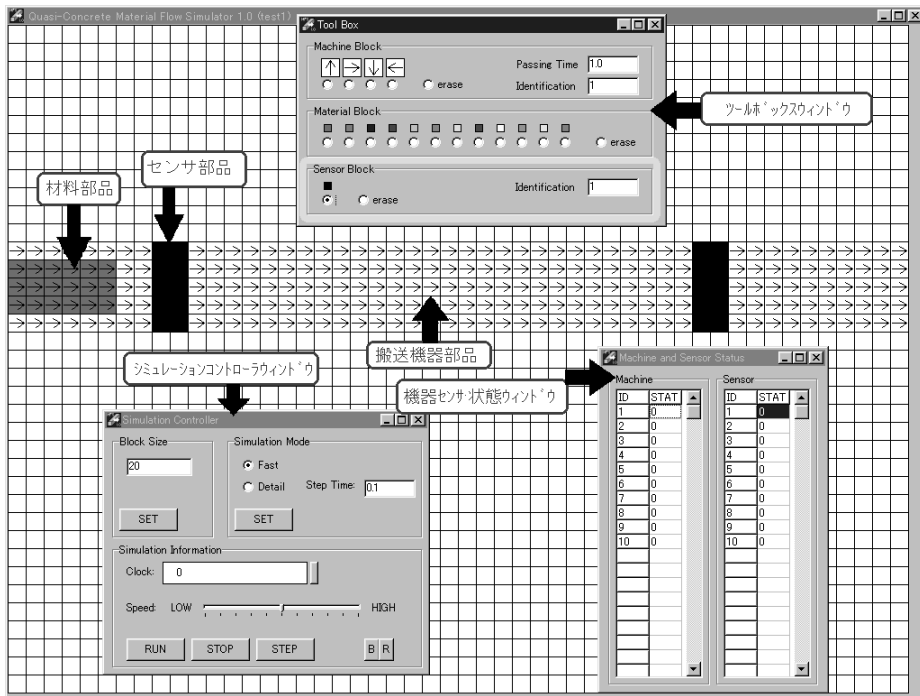


図 11 QC-SIMのメインウィンドウ
Fig. 11 Main window of the QC-SIM.

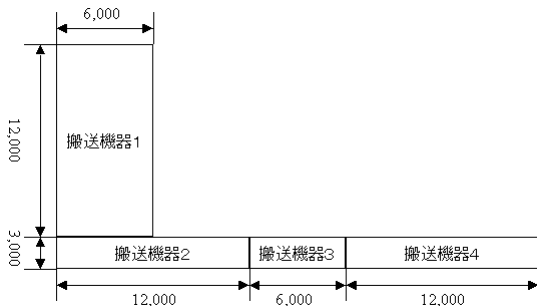


図 12 塗装機器を含む自動搬送ラインの設計例
Fig. 12 Example of the design of an AMHL including a painting apparatus.

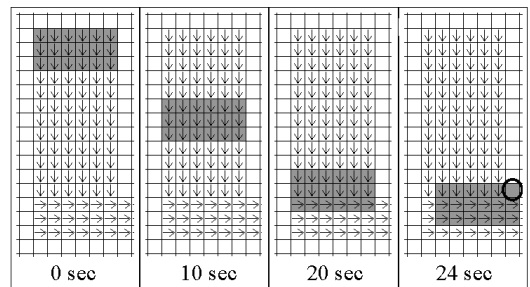


図 14 材料部品が搬送ラインから外れた様子
Fig. 14 Example of a material component being off the material handling line. The open circle shows the component of steel sheet being off the handling line.

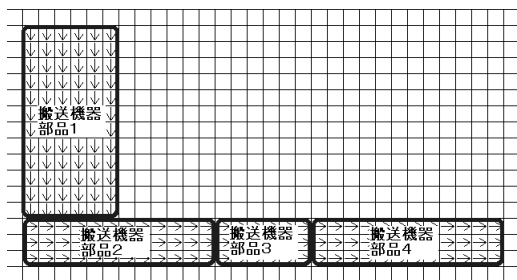


図 13 QC-SIMでの設計例
Fig. 13 Design example using QC-SIM.

4.2.2 設計第2段階 (単一材料搬送の実現と材料間干渉の発見)

第1段階では、搬送機器の制御機構がなかったため、図14のように材料が搬送ラインから外れた。この現象は、搬送機器部品がすべてON状態であったため発生した。この問題を解決するためには、材料部品が搬送機器部品1から搬送機器部品2に完全に乗り移るまで搬送機器部品2を停止状態としなければならない。そこで、材料部品が搬送機器部品2に完全に乗り移ったことを検知するため、リミットスイッチを想定したセンサ部品1を搬送機器部品2下方に配置した

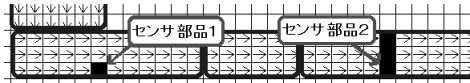


図 15 センサ部品の配置例

Fig. 15 Example of the arrangement of sensor components.

```

1: void ENGINE::plc()
2: {
3:   if (sensor_[2] == ON)
4:   {
5:     machine_[2] = OFF;
6:   }
7:   if (sensor_[1] == ON)
8:   {
9:     machine_[2] = ON;
10:  }
11: }

```

図 16 搬送機器部品 2 を制御する制御プログラム

Fig. 16 Control program for the component of material handling apparatus 2.

(図 15: センサ部品 1). このセンサ部品 1 が ON 状態になった時点で、搬送機器部品 2 を ON 状態とするように制御プログラムを記述した (図 16: 7~10 行目). ここで、搬送機器部品 2 が ON 状態となった後、再び OFF 状態に戻す機構がないため、後続する材料部品が搬送ラインから外れることが考えられる. 搬送機器部品 2 を OFF 状態に戻すタイミングは、材料部品が搬送機器部品 3 で塗装を終えたときであるから、塗装が完了したことを検知するため、光センサを想定したセンサ部品 2 を搬送機器部品 4 上に追加した (図 15: センサ部品 2). また、センサ部品 2 が ON 状態となったとき、搬送機器部品 2 を OFF 状態とするように制御プログラムを追加した (図 16: 3~6 行目). ここまで、搬送機器部品 2 を停止状態、これ以外の搬送機器部品を稼動状態とし、搬送機器部品 1 の上方に材料部品を 1 つ置いてシミュレーションを実行してみた. その結果、前述にて実装した制御機構が働き、材料部品が搬送ラインから外れることなく、シミュレーション開始 120 秒後に搬送機器部品 4 の右端に到着した.

次に実際の操業を想定して、搬送機器部品 1 上方より材料部品を連続的に流してみた. ここで、材料部品を給材する間隔は 12 秒ごととした. 搬送機器部品の状態は先ほどの実験と同様に、搬送機器部品 2 を停止状態、これ以外の搬送機器部品を稼動状態とした. その結果、図 17 に示すように、シミュレーション開始 32 秒後に、後から搬送機器部品 2 へ進入してきた材料部品 2 によって、材料部品 1 が押し出されてしまった.

4.2.3 設計第 3 段階 (複数材料搬送の実現)

第 2 段階では、制御機構を追加することで材料を落とさず搬送することができたが、材料を連続的に投入

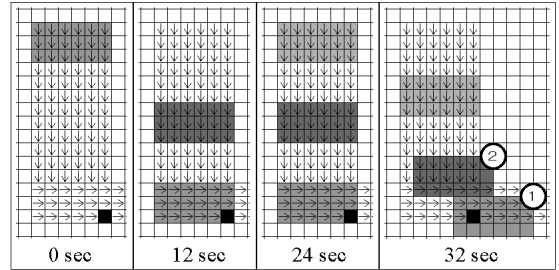


図 17 材料部品が後続する材料部品によって押し出される様子
 Fig. 17 Example of a material component (open circle 1) being pushed by the succeeding material component (open circle 2).

```

1: void ENGINE::plc()
2: {
3:   if (sensor_[2] == ON)
4:   {
5:     machine_[2] = OFF;
6:   }
7:   if (sensor_[1] == ON)
8:   {
9:     machine_[2] = ON;
10:  }
11:  if (machine_[2] == ON)
12:  {
13:    machine_[1] = OFF;
14:  } else {
15:    machine_[1] = ON;
16:  }
17: }

```

図 18 搬送機器部品 1 および搬送機器部品 2 の制御プログラム
 Fig. 18 Control program for the components of material handling apparatuses 1 and 2.

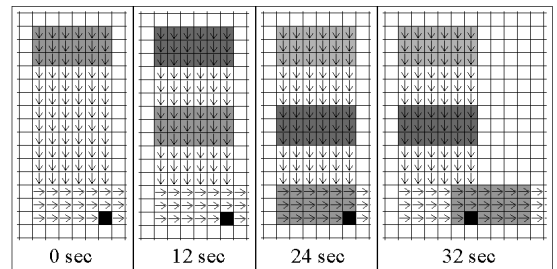


図 19 後続する材料部品が待ち状態となっている様子
 Fig. 19 Example of the succeeding material being stopped by the control program.

した場合は問題があった. 図 17 に示した現象は、搬送機器部品 2 上に材料部品があるにもかかわらず、搬送機器部品 1 が稼動状態であったため生じたと考えられる. そこで、搬送機器部品 2 が稼動状態であるうちは、搬送機器部品 1 を停止状態とする制御プログラムを追加した (図 18: 11~16 行目). ここまでを QC-SIM に入力して、再度シミュレーションを実行したところ、図 19 に示すように、搬送機器部品 2 が材料部品を搬送している間は、搬送機器部品 1 が停止しているため、搬送機器部品 2 上の材料部品が、後続する材料部品に

よって押し出される問題が解決された。結局、材料部品を搬送機器部品 1 上方より 12 秒間隔で 3 つ流したところ、シミュレーション開始 312 秒後に、3 つめの搬送機器部品が搬送機器部品 4 の右端に到着した。ここまでの設計で、鋼板を 12 秒間隔で投入して搬送できたため、自動搬送ラインの設計は完了した。

なお、QC-SIM を用いて図 13 をモデリングするのに要した時間は 3 分、また、設計時間を含め、ここまで示した実験を終えるまでに要した時間は 30 分であった。

5. 考 察

4.2 節の設計例から、設計者が思い浮かべた断片的な設計ノウハウを組み合わせて、段階的に設計を進めていることが分かる。これは、QC-SIM を用いると、自動搬送ラインのモデリングやその変更が容易なためと考えられる。また、従来、実機を用いた試験によらないと判明しなかった、材料が自動搬送ラインから外れる現象や材料どうしが衝突する現象を発見し、その現象を解析して設計誤りを修正していることが分かる。これは、QC-SIM を用いると、設計者の頭の中だけでは思いつかないような物流状況をアニメーションとして見ることができるためと考えられる。

以下に、QC-SIM の具象性が、自動搬送ラインの設計にどのように寄与しているか整理する。

- 搬送機器部品、材料部品に大きさと形状を持たせたこと、材料部品が複数の搬送機器部品をわたる移動を静止摩擦力に基づいてシミュレーションしたことにより、材料部品が搬送機器部品から外れる現象を表現できた(図 14)。このことは、材料を搬送ラインから落とさずに目的地まで運搬するという、自動搬送ラインの基本的な設計の検証に寄与している。
- センサ部品に対して大きさと形状を持たせたため、センサの配置やセンサのセンシング範囲をモデリングし、それに応じた制御プログラムを記述できた(図 15)。このことは、センサの種類や特性に応じた現実的な制御プログラムの設計に寄与している。
- 材料部品どうしの衝突を非弾性衝突としてシミュレーションし、材料部品が衝突によって自動搬送ラインから押し出される現象を表現した(図 17)。このことは、実際の操業状態を想定した材料どうしの干渉をシミュレーションすることができるため、定常的な物流状態の検証に寄与している。
- 具象性を制限したことにより、設計例において、

シミュレーションモデルを構築するのに 3 分、鋼板を 12 秒間隔で投入できるように設計するまで 30 分程度と短時間でシミュレーションし設計を終えることができた。このことは、インタラクティブな設計支援の実現に寄与している。

さらに、鉄鋼関係の自動搬送ラインを 2~3 システム設計した経験を有する設計者 2 名に対し、4.2 節に示した設計例をデモンストレーションし意見を聞いた。その結果、いずれの設計者からも、従来の設計作業に照らして本手法の具象性が基本的に妥当であるという意見が得られた。個々の設計者から、搬送機器部品に加速度パラメータを付加する、自動干渉チェック機能や外部機器との接続機能を付加するなどの要望があったが、いずれも QC-SIM の構造の変更を要求するものではなく、比較的簡単な機能の拡張により対応できるものと考えられる。

6. ま と め

自動搬送ラインの設計作業を効果的に支援するためのシミュレーションモデルの具象性を検討した。その検討に基づき、準具象物流シミュレータ QC-SIM を提案した。QC-SIM は、自動搬送ラインの実体である搬送機器、センサ、材料をある程度自由な大きさと 2 次元形状の部品として表した。また、材料の移動は、静止摩擦力に基づいた移動として表現した。そのため、QC-SIM は、必要最小限の情報をシミュレーションモデルに入力することで、設計の検討に必要な情報をシミュレーション結果から得ることができた。さらに、それを Windows 上に実装し、設計例を通して QC-SIM が試行錯誤的な設計支援に有効であることを示した。また、自動搬送ラインの設計経験者に QC-SIM をデモンストレーションしたところ、具象性に関して肯定的な意見が得られた。

自動搬送ラインの設計現場で QC-SIM を実務に用いるため、今後、実際の設計作業から得られる現場の意見に則して、QC-SIM の基本的構造の枠内で、必要な機能の取捨選択について検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 木村文彦：ビジュアルエンジニアリング—その意義と基礎技術の展望，電気学会，Vol.120, No.10, pp.586-589 (2000)。
- 2) 高田良祐，山田滋己：CAD/CAM/CAE を中核としたデジタルエンジニアリングプロセス実現への取り組み，情報処理，Vol.41, No.8, pp.945-950 (2000)。
- 3) Freedman, S.: An Overview of Fully In-

egrated Digital Manufacturing Technology, *Proc. 1999 Winter Simulation Conference*, pp.281–285 (1999).

- 4) 石井 充: プラント用 3 次元 CAD システム「EYECAD」最新バージョンの開発と今後の展望, *オートメーション*, Vol.45, No.12, pp.82–87 (2000).
- 5) 杉野 徹: デジタルファクトリ, *オートメーション*, Vol.45, No.3, pp.76–82 (2000).
- 6) FJVPS/Digital Mochup Homepage
<http://www.fns.co.jp/fjvps/>
- 7) ENVISION/ASSEMBLY Homepage
http://www.delmia.com/solutions/html/process_planning.htm
- 8) Working Model 2D Homepage
<http://www.workingmodel.com/products/wm2d.html>
- 9) Interactive Physics Homepage
<http://www.vndesktop.com/products/ip.html>
- 10) Kawachi, K.H.S. and Kimura, F.: Simulation of Rigid Body Motion with Impulsive Friction Force, *Proc. IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, pp.182–187 (1997).
- 11) 中西俊男: シミュレーション, コロナ社 (1994).
- 12) 中西俊男: 最近のシミュレーション技術と動向, *情報処理*, Vol.37, No.3, pp.214–233 (1996).
- 13) 三留和幸, 津原 進, 関 進: 汎用生産工程シミュレータ MAFLOS の開発, *日立評論*, Vol.55, No.8, pp.799–803 (1973).
- 14) 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*, Vol.37, No.3, pp.246–253 (1996).
- 15) 大場 茂: 物流・生産シミュレータ「QUEST」, *情報処理*, Vol.38, No.4, pp.317–323 (1997).
- 16) Thomson, N.: FACTOR/AIM による生産・物流シミュレーション入門, 共立出版 (1998).
- 17) O'Reilly, J.J. and Lilegdon, W.R.: Introduction to AWESIM, *Proc. 1999 Winter Simulation Conference*, pp.196–200 (1999).
- 18) O'Reilly, J.J. and Lilegdon, W.R.: Introduction to FACTOR/AIM, *Proc. 1999 Winter Simulation Conference*, pp.201–207 (1999).
- 19) Schriber, T.J. and Brunner, D.T.: Inside Discrete-Event Simulation Software: How It Works and Why It Matters, *Proc. 2000 Winter Simulation Conference*, pp.90–100 (2000).

(平成 12 年 12 月 22 日受付)

(平成 13 年 9 月 12 日採録)



高橋 圭一 (学生会員)

1992 年室蘭工業大学第二部電気工学科卒業。1994 年同大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年ニッテツ北海道制御システム(株)入社。製鉄ラインを主体とした FA 計算機システムの開発に従事。1997 年より室蘭工業大学工学部生産情報システム工学博士後期課程在学中。



鈴木 幸司 (正会員)

1980 年室蘭工業大学電気工学科卒業。1985 年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了。室蘭工業大学助手を経て、1990 年より室蘭工業大学情報工学科助教授。工学博士。ソフトウェアとその応用に関する研究に従事。電子情報通信学会, 電気学会, IEEE 各会員。



佐賀 聡人 (正会員)

1982 年北海道大学工学部電子工学科卒業。1987 年同大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程修了。同年 4 月より 1989 年 8 月まで青年海外協力隊員としてフィリピンのナガ大学にてコンピュータサイエンスの指導。1989 年 9 月より 1994 年 9 月まで(株)テクノバにおいて図形処理システムのヒューマンインタフェースに関する研究に従事。現在、室蘭工業大学情報工学科助教授。工学博士(北海道大学)。主にソフトウェアに基づくヒューマンインタフェースの研究に従事。IEEE, ACM, 電子情報通信学会, ファジィ学会, 音響学会各会員。



前田 純治 (正会員)

1972 年北海道大学理学部物理学科卒業。1974 年同大学大学院工学研究科修士課程修了。北海道大学工学部助手, 室蘭工業大学助教授を経て、1994 年より同大学情報工学科教授。工学博士。画像処理, ソフトウェア等の研究に従事。電子情報通信学会, 応用物理学会, IEEE 各会員。