

医用検体搬送システムの処理性能解析 ——検体経路のばらつきとの関係

兒玉 隆一郎^{1,a)} 田野 俊一^{2,b)}

受付日 2014年8月25日, 再受付日 2014年10月7日/2014年11月30日,
採録日 2015年1月9日

概要: 本論文は, 医用検査で利用される分析装置を搬送路で結合したシステムの処理時間性能を解析して定量的な評価を行う. 搬送路沿いに並んだ分析装置が搬送路上に並んだ検体を吸い取る方式 (PLS: Pipe Line System) は, 検査項目のばらつきが少ない検体を処理する方式として 1990 年代まで活躍した. その後, 検査項目数が増え, その依頼にばらつきが出てくると, バッファおよび追い越し機能を付加した方式 (STS: Side Track System) が考案され現在も稼働している. STS のポテンシャルは高く, その性能の可能性を追求することは今後の開発にとって意義深い. そこで以下 3 点につき解析, 数値実験を通して明らかにした. 1) STS では搬送路の 1 検体あたりの搬送時間が (検体の分析処理時間)/(装置数+1) を超えると処理時間性能が大きく劣化する. 2) 引き込みラインの入口出口それぞれにバッファを 1 個持つ装置 4 台構成において, ランダムな分析装置間経路を持つ全 200 検体を検査処理終了するまでの時間は, STS が PLS に対して平均 30% 圧縮する. 3) STS のバッファを 2 個以上にしてもさらに 30% 圧縮するほどではない. 性能解析では, ランダムな検体列において特定装置に立ち寄らない検体が連続して出現することに着目し, 立ち寄らないことで発生する空きを圧縮するアーキテクチャとして STS を位置づけた. 本研究により STS の可能性を定量的に確認し, 搬送路およびバッファの設計基準を構築した.

キーワード: 医用検査, 検体搬送, 確率分布, バッファ

Performance Analysis of Clinical Specimen Transportation System ——Relationship with Sample Path Deviation

RYUICHIRO KODAMA^{1,a)} SHUN'ICHI TANO^{2,b)}

Received: August 25, 2014, Revised: October 7, 2014/November 30, 2014,
Accepted: January 9, 2015

Abstract: This paper reports quantitative performance analysis for the processing time of clinical instrument system connected by a conveyor. PLS (Pipe Line System) is one of the architectures to implement the system where clinical instruments are aligned along the conveyor and each instrument pipettes samples on the conveyor. PLS was used to deal with almost uniformly requested tests for samples in the 1990s. After that, as a variety of tests is made wide and requested tests are deviated in sample by sample, STS (Side Track System) was devised and is now working. STS has a buffer function and passing function for samples to skip unrequested instrument. STS has its potential capacity in processing performance so that it is of great significance to pursue its possibility. This paper clarifies the following: 1) The performance significantly diminishes when the conveyance time per one specimen for a conveyor exceeds (the processing time of a specimen) / ((number of the devices) + 1) in STS, 2) the processing time of STS is 30% shorter than the one of PLS in average where both systems process the same 200 samples which drop in four instruments randomly and those instruments have one buffer in each of entrance and exit of the side track, and 3) the increase of buffers does not have impact more than 30% performed by one buffer. Our performance analysis focuses the sequence of random specimen samples which skip a specific instrument, and placed STS as the architecture to compress the space caused by skipping. This study confirms possibility of STS quantitatively and in this way builds the design guideline for the conveyor and the buffer of STS.

Keywords: clinical test, sample transportation, probability distribution, buffer

¹ 株式会社日立ハイテクノロジーズ
Hitachi High-Technologies Corporation, Hitachinaka,
Ibaraki 312-8504, Japan

² 電気通信大学大学院情報システム学研究所
Graduate School of Information Systems, The University of
Electro-Communications, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

a) ryuichiro.kodama.wj@hitachi-hightech.com

1. はじめに

医療の検査業務においては様々な自動化が導入されている。人体から採取した血液などの検体は検査対象の 1 つで

b) tano@is.uec.ac.jp

ある。検査では、血液を自動的に分析する分析装置だけでなく、複数の分析装置に検体が効率良く配送されるような搬送システムも利用されている [1]。

このような搬送システムでは、検体が検査室に到着した順にまとめて投入され、搬送路入り口において検体に添付されたバーコードを読み込んで初めてどんな検査が必要で、どの分析装置に搬送されるべきかが分かる。このため検体と分析装置をジョブショップ・スケジューリング問題 [2] におけるジョブと機械の関係と見立てて事前に配送順番をスケジュールすることは難しい。また、スケジュールするために投入された検体を一時的にプールして人手で順序を入れ替えるとなると、本来自動搬送は検査室のワークフローを自動化して医療機関の経営効率を向上させることを目指しているため [3]、自動搬送導入目的に逆行する。検体の順序入れ替えを自動化するには分析装置以外にそれ相当以上のスペースが必要となり、医療費抑制政策に従ってスペースを含む検査室経費を削減している現状 [4] では現実的ではない。さらに、医療機関では採血から結果報告までの時間を短縮化することを分オダで課題としており [5]、検体の順序入れ替えのために、たとえば朝から昼過ぎまでなど何時間にもわたって検体をプールすることは現実的ではない。そこで、随時流れてくる検体をリアルタイムに分析装置へ配送するためのリアルタイムスケジューリングの問題としてとらえる。

搬送路と分析装置を組み合わせた典型的なシステムを図 1 に示す。分析装置は搬送路上に停止した検体容器からピペットにより検体を一定量吸い取り、分析装置内の反応容器に吐出する（以下、このような吸い取りと吐出の一連動作を分注と呼ぶ）。検査項目ごとに反応容器が用意され、分注は検査項目数分繰り返され、反応後に結果が報告される。搬送路沿いにはこのような分析装置が複数個並び、搬送路上に複数個並んだ検体のうち分注時間が一番長い検体を待って、搬送路がシフトする。検体はシフトによって順次異なる分析装置の前に送られ分注が行われる。このようなシステムをパイプライン方式 (Pipe Line System: PLS) と呼ぶ。

このようなシステムにおいて分析装置間で分注時間に大きな差が生じると一番時間のかかる分析装置がボトルネックとなる。このため、システムを導入する前に、分注時間が均一になるように分析装置の種類や分析装置の検査項目

レパトリーを最適化設計するのが一般的である。このような最適化では検査室での平均的な検査項目の依頼状況を参考にする。PLS は同種の分析装置を同期して接続する形で 1990 年代まで、分析装置を搬送路で結合してシステム全体の処理能力を向上させてきた。

しかし、検査項目の種類も増えて、複数の分析装置で処理するとき経由する装置がばらつくような検体に対処して、1990 年中ごろに新しい接続方式であるサイドトラック方式 (Side Track System: STS) が開発され、今日現在も製品に実装されている。STS はモジュール組合せ方式として日立の生化学・免疫統合型自動分析システムに採用されており、世界市場でのシェアは 20% と非常に強いポジションを維持している [6]。

STS にはばらつきのある検査項目に対応するため 2 つの改良点に加えられている。1 つはバッファ機能である。分析装置は搬送路上とは別のバッファに検体を引き込み、そこから分注が行われる。よって、バッファ経由で分注が行われる限り他の分析装置に影響を与えない。もう 1 つは追い越し機能である。検体はある分析装置で分注を終えると、後続の任意の分析装置のバッファに運ばれる。途中の不要な分析装置があれば、これを追い越して運ばれる。

PLS では特定の分析装置で処理が長引けば全体の渋滞を引き起こし他の分析装置の稼働率が低下するのに対して、STS ではよほど特定の分析装置に検体が集中しない限り分析装置の稼働率を最大化できる。これが STS の利点である。

STS は異種の分析装置 4 台構成までの組合せを可能にしたが、そのポテンシャルは高く、今後の設計開発にとってその性能の可能性を追求することは重要である。

そこで、本論文は、バッファ数および搬送能力がシステム処理性能に与える影響を明らかにして、STS がばらつきある検査項目に対処する様子を定量的に明らかにすることを目的とする。具体的には、

課題 1: STS における搬送路の搬送能力とシステム処理性能との関係、

課題 2: 検査項目にばらつきがある検体列を処理完了するまでの時間は STS が PLS に対して何%短縮するか、

課題 3: バッファ数がシステム処理性能に影響を与える度合い

を明らかにする。特に課題 2 の解析では、ランダムな検体列における空きの分布を導出し、それが搬送システムによって縮小されるモデルを導出する。

搬送システムの挙動はシミュレーションにより求めることができる。しかし、より客観的に搬送システムを評価するためには性能評価が個別の検体系列や検体数に依存しない値であることが望ましい。そこで入力検体系列と出力となる分析装置稼働時間を空きの確率分布としてモデル化し、搬送システムを入力分布から出力分布に変換するフィ

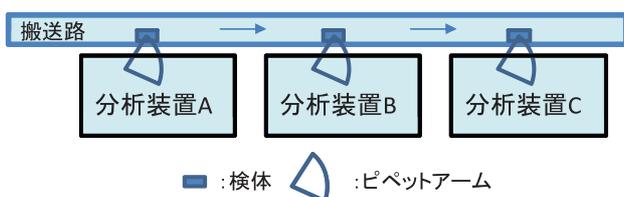


図 1 パイプライン方式

Fig. 1 Pipe line system (PLS).

ルタ式として定式化する．これにより搬送システムの空き確率分布に着目した数理モデルが構築され，客観的な性能評価が得られる．

以下，2章で関連する研究を述べ，3章ではサイドトラック方式について述べる．4章ではサイドトラック方式における搬送能力とシステム性能を解析する．5章では数値実験で解析結果を検証考察し，バッファ数についても実験考察し，6章でまとめを述べる．モデルについては4章で導出し，5章で検証する．

2. 関連する研究との比較

搬送システムについては，生産設備において複数のコンベアベルトを組み合わせて実現する例が報告されている [2]．これによると，搬送路に隣接する加工分析装置に製品を運ぶにあたり，複数の経路計画を同時に実現するために，複数のコンベアベルトの動作タイミングを決定している．整数計画法を用いて動作タイミングを計算しているため，流れる全製品の経路が事前に分かっている必要があり，リアルタイムなスケジューリングには適さない．

スケジューリング理論ではジョブを機械に割り当てる問題としてジョブショップ問題が論じられている [7]．本研究における検体をジョブに，分析装置を機械に対応させるとジョブショップ問題と定式化できる．しかし，1章で前述したように検体は到着して初めてその依頼された検査項目が分かる．このため事前に全ジョブの機械割当て計画が分かっただけで割当て計画を最適化するジョブショップ問題にはそぐわない．

ばらつきについては，需要のばらつきが直列型待ち行列の生産システムに与える影響を文献 [8] が報告している．ばらつきは変動係数を使って表現しているが，本研究で扱うような，空きの分布の解析をしていない．

バッファに関しては，文献 [9] がジョブショップ型生産システムの各工程においてスループットの最大化を目的関数にして，与えられた総バッファ量を各工程に割り付ける割合を決定している．工程に割り付けられるバッファ容量は工程の処理能力，流れる部品固有の経路に依存して決定されている．本研究では，検体がどの分析装置で分析されるかはランダムであるため，ランダム検体列のうち，分析装置をどの程度スキップするかという空き情報を基に，分析装置内のバッファ数がシステム性能に与える影響を解析している．その点で，検体の経路や装置に固有なバッファ数ではなく，より一般的なランダム列のものを対象としている．

搬送に関しては，文献 [10] が複数の搬送機器をルールに基づき選択してジョブショップ型生産システムの総所要時間を最小化する手法を論じている．本研究の主題となるSTSは，搬送手段が1つであり，全検体がこれを共有する点で異なる．

このほか，搬送システムのリアルタイムスケジューリングにおいてバッファと搬送能力を検討する研究は筆者が知る限りない．また，試行列内で連続して出現する要素列（連と呼ぶ）の確率分布について文献 [11] が報告している．与えられた試行列から連の確率分布を効率的に算出する方法が論じられている．本研究は，ランダムな装置を選択する検体を対象にしており，その出現分布がモデル化されることを想定しており，個別の計算は不要となる点で異なる．

3. サイドトラック方式 (STS)

3.1 分析装置の性能課題

搬送路に接続される分析装置は一定の周期で検体を分注している．その基本的な機構は文献 [12] に紹介されており，以下その仕組みを説明する (図 2)．

分析装置に検体が運ばれると，検体容器内の検体液がピペットにより一部吸い出され，それが分析装置内の反応容器に分注される．分注とは1章で述べたように，検体容器からピペットにより検体を一定量吸い取り，分析装置内の反応容器に吐出する一連の動作である．この反応容器には検査項目に応じた試薬が添加され，一定時間，たとえば10分間，反応させ，反応によって生じる光学上の強度変化を電気変換して濃度値として計算する．分注さえ完了すれば反応容器は反応工程に入るため，その反応の完了を待たずに次の反応容器の分注が行われる．この分注周期 T はたとえば6秒であればこの場合装置の処理性能は $3,600/6 = 600 \text{ test/h}$ となる．分析装置内には複数の反応容器が円周状に並び，順次一定の周期で分注位置に移送されては分注が行われる．検体がこの周期に間に合って順次運ばれる限りは，次々と移送される反応容器すべてに検体が分注され分析装置の稼働率は100%となる．

しかし，検体の到着がこの周期に間に合わない場合には，空きの反応容器が生じる．このような遊休の反応容器が多

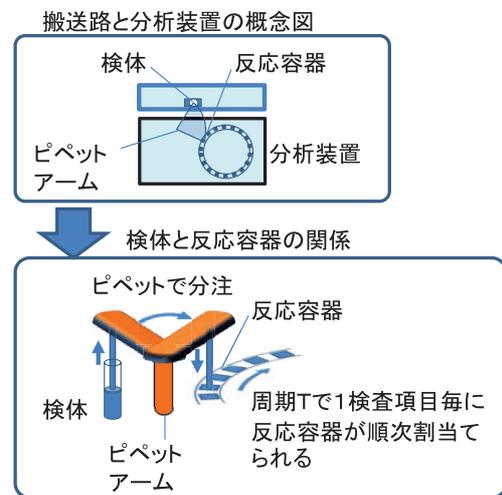


図 2 分析装置における分注機構

Fig. 2 Aliquot mechanism inside clinical instrument.

表 1 反応容器の空きによる処理能力の劣化

Table 1 Performance decline by unused reaction vessels.

100% 処理能力	実効 処理能力
$\frac{1}{T}$	$\frac{N}{(N+d) \times T}$

T: サンプル周期
N: サンプルした検査項目数
d: 遊休が生じた周期の数

くなると装置が持つ処理能力ポテンシャルを損なうことになる。周期を T とすれば、分析装置の単位時間あたりの処理検体数は $1/T$ (100%処理能力) となるが、 N 検体流したときに反応容器の空きが d 回発生すると実質は $N/(N+d)$ だけ処理検体数が劣化 (実効処理能力) する (表 1)。

このような処理能力の劣化を最小限にするために、できるだけ早く連続に検体を搬送して分注を行い、分注が終わった検体もできるだけ早く次の分析装置に搬送する必要がある。搬送システムはこのような要件を満たす必要がある。

3.2 搬送プラットフォーム

1章で述べたパイプライン方式 (Pipe Line System: PLS) は分析装置を搬送路で結合する一般的な方式といえる。しかし、この方式では搬送路沿いに並ぶ分析装置のうち、すべての分析装置が分注を終了しないと搬送路を動かさないため、一番遅い分注時間に合わせて搬送路が動く。したがって、一番遅い分注を待つ他の分析装置には反応容器の空きが生じ、処理能力が劣化する。

そこで分析装置間で大きな分注時間の差を生まないように、搬送システムを導入する前には分注時間が均一になるようにシステム設計が行われる。施設で1日に依頼される検査項目の統計値を用いて、分析装置で扱う検査項目種類の数を増減させて分析装置の分注時間が均一になるように設計する。

このようなシステム設計は負荷分散のために有効で重要であるが、一方で局所的にはやはり分注時間のばらつきが発生する。医療検査を必要とする人が個別の理由で医療施設で検査を受けることを考えれば、依頼される検査項目の種類と数が検体ごとに独立であると想定できる。独立である以上依頼検査項目のばらつきは不可避であり、このばらつきによる処理能力の劣化を改善する余地がある。

そこで、検査項目のばらつきに対処できるプラットフォームとして、引き込みラインを有する複数分析装置を1つの搬送路に接続したシステムであるサイドトラック方式 (STS) が考案された [13] (図 3(a))。

分析装置内には搬送路から検体を搬入・搬出する経路が用意されている。STSにおいて検体は搬送路入口から任意の分析装置に搬送される。また、任意の2分析装置間で上流から下流に向けて (図 3(a)の左から右へ) 検体を搬送することができる。したがって、検体の流れにループがなくデッドロックは起こらない。検査を全部終えた検体は任

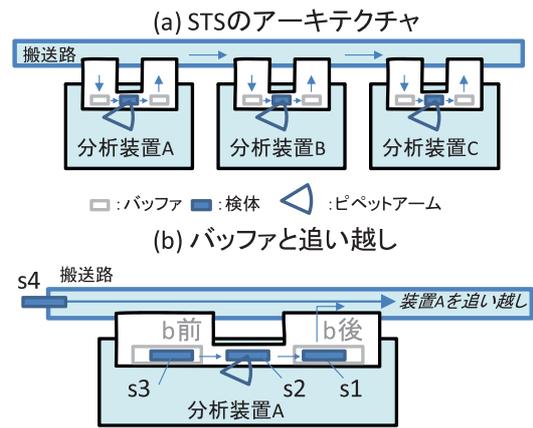


図 3 サイドトラック方式

Fig. 3 Side track system (STS).

意の分析装置から搬送路出口に直接搬送される。

PLSが検体を搬送路上に複数縦列させる方式であったのに対して、STSでは縦列がない。STSでは任意の分析装置間で搬送が必要となった時点で検体が搬送路を占有して搬送が実行される。これはちょうどネットワークバスにおけるデータ伝送と類似している、つまり、検体の搬送がない限りSTSでは搬送路上に検体は存在しない。搬送能力が分析装置の処理時間に比べて十分速ければ、搬送路を複数の分析装置で競合することはきわめて少なく、あったとしても順次実行することによりシステム性能に影響がないことが期待される。

このように任意の分析装置間で搬送が可能となるため、検体の追い越しが可能となる (図 3(b)の検体s4)。PLSでは搬送路上に検体が縦列している場合、検体は分注が終了しても隣接する分析装置以外には直行できない。STSでは搬送路の投入口から必要な分析装置の搬入口に検体が直行する。また、分析装置の搬出口からは任意の下流の分析装置の搬入口に検体が搬送される。縦列する検体が搬送路上で進路を塞ぐことがないため、1つの検体の遅れが他の分析装置の空気を招くような事態を抑制できる。

STSにおけるもう1つの特徴はバッファである (図 3(b)内の薄墨で「b前」「b後」と示されている薄墨矩形)。分析装置には、搬入口と搬出口にそれぞれ最低1つのバッファが用意される。1バッファには1検体だけが格納される。検体がこのバッファに搬送されるため、搬送路をつねにクリアな状況に維持することができる。加えて、このバッファにより検査項目のばらつきが平滑化される。たとえば、図 3(b)の検体s1は分注を終えてb後の位置にいますが、s2が分注を終えるまでにs1が次の装置に出れば、s2は分注を終えてb後に、s3は分注位置に分析装置の周期に空気を与えず連続して移動する。このように分注位置に遅れて入って分析装置に空気を与えたり、前が詰まって分注位置から出られずに分析装置に空気を与えたりすることをバッファが防止する。STSにはバッファが分注位置の前後

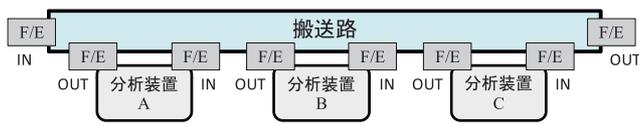


図 4 F/E フラグ方式のシステム模式図
Fig. 4 Illustration of F/E flag method.

に1つずつ配置される(図3(b)のb前とb後)が, 本論文では後にこれを増やした場合のシステム処理性能を検討する. バッファ数を増やすことは装置寸法の制限から現実的には難しいので, 本論文では数値実験でバッファ数とシステム処理性能の関係について論じている.

以上のようにSTSでは追い越し機能とバッファにより検査項目のばらつきによる処理能力劣化を抑制する.

3.3 制御方式

STSの搬送を制御する方式にもばらつきによる処理能力劣化を抑制する仕組みがある. STSでは搬送路に検体を搬入する位置に検体が存在するか, 搬送路から検体が搬出される位置が空かをつねに把握する. この検体有無情報を参照して制御する方式をF/Eフラグ方式と呼ぶ. これを模式的に表したのが図4である.

図中INと示される位置(IN位置)が搬送路に検体が搬入される位置, OUTと示される位置(OUT位置)が搬送路から検体が搬出される位置である. IN位置とOUT位置にF/Eフラグが配置される. F/Eフラグは1ビット情報であり, 1ならばFull, つまり検体が存在することを意味し, 0ならばEmpty, つまり検体が存在しないことを意味する.

システムでは全F/Eフラグを監視し, 以下の3条件を満足する*i, j*の組を常時走査する.

条件1 IN位置*i*がFull

条件2 IN位置*i*から出る検体の行き先が*j*

条件3 OUT位置*j*がEmpty

このような*i, j*の組が見つかりしだい, 次の制御を間断なく順次行う.

Step 1: IN位置*i*から搬送路に検体を搬入.

Step 2: 搬送路を動かしてIN位置*i*にある検体をOUT位置*j*の前まで搬送する.

Step 3: 搬送路からOUT位置*j*に検体を搬出.

この間, 搬送路は占有される. もしこのような*i, j*の組合せが複数競合する場合には搬送要求を待ち行列に入れて順次搬送を実行する.

F/Eフラグ方式による搬送制御は検体搬送の需要と供給をマッチングさせる形でシステム性能を引き出している. マッチングにおいて時間差があれば待ちが生じる. その状況を図5に示す.

FullフラグとEmptyフラグが立つ時刻の前後関係により2種類の待ちが発生する. FullよりもEmptyが遅い場合(図5(a)), 検体を出す側が行き先の空きを待つ, すな

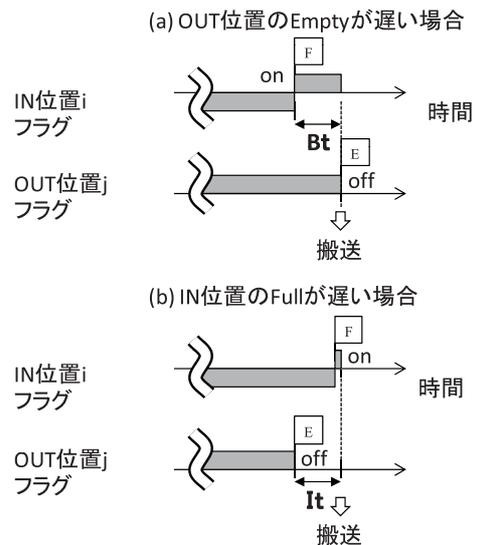


図 5 搬送制御で発生する待ち時間
Fig. 5 Waiting time produced in transfer control.

わちブロッキング時間[14](図中Bt)が発生する. その逆で, EmptyよりもFullが遅い場合(図5(b)), 検体を受け入れる側が仕事なく待つ, すなわち空き時間(図中It)が発生する.

F/Eフラグ方式ではブロッキング時間や空き時間が遅延しないよう上述のタイミングをつかんで, 搬送を実行する. 検体を出す側において検体の行き先は確定しているが, 検体を受け入れる側は一般に検体が競合する可能性がある. この競合においてはつねに一番古くFullフラグが上がった検体が優先搬送されるため, 搬送されずに検体が放置される状態, すなわち飢餓状態が回避される.

4. システム性能解析

追い越し機能が有効に働くために必要な搬送路の搬送能力, PLSに比べてSTSの処理能力がどの程度向上するかについて解析する. 装置の最大構成を4台として解析する.

4.1 性能尺度と検査系列

本研究においてシステム性能の評価尺度としてmakespanを用いる. すなわち, 一定の検体列をシステムに投入してから, 全検体が分注処理を終えて搬送路出口に出てくるまでの時間を比較する. 実際, 1日分の全検体がどれくらいの時間で処理されるかは, 搬送システムを導入する顧客の重要な関心事となる. この時間を基礎に1日のタイムスケジュールが生まれ, 業務効率向上の程度が決まるためである.

2つのシステムを比較するには同じ依頼の検査項目を持つ検体列(以下, 検査系列と呼ぶ)を流してmakespanを比較する. 比較すべき点は, 複数の分析装置にまたがる検査項目を持つ検体の検査系列をSTSがPLSに比べてどのくらい短い時間で処理するかである. ここで, 検体が分注

されるために經由する分析装置列を装置経路と以下呼ぶ。比較に使う検査系列は、(1) 平均として装置の処理時間が均衡している、かつ、(2) 装置経路がランダムである必要がある。前者(1)の要件から、分析装置ごとに1検体が処理される時間をすべて同じ時間とする。つまり、1検体の処理時間は一律に固定の値とする(以下、1単位時間と呼ぶ)。これは、装置あたりの平均処理時間に相当する。

後者(2)の要件を満たす例をあげれば、2つの分析装置A, Bが搬送路に接続されている場合、2つの装置のいずれかで処理されることを前提に装置経路としては3通りがある。すなわち、A単独({A}と表記)、B単独({B}と表記)、A処理の後B処理({A,B}と表記)である。このような3種類の装置経路を持つ検体が一様確率分布に従って到着し、A, Bそれぞれで1単位時間処理されるとすると、局所的には不均衡が発生するものの、平均的にはA, Bともに稼働が均一化される。一方、装置経路としてはすべての経路を一樣に処理していることになり、装置経路の多様性は維持されている。

そこで、図6に示すような装置経路の組合せを考える。図6(a)は分析装置が2台の場合の装置経路3種{A}, {B}, {A,B}が示されている。2進法における2ビット列の組合せのうち、'00'を除いた構成になっている。本論文において、検査系列はこの図が示すような装置経路を持つ検体がランダムに並んだ列とする。装置数は2台から4台までを対象とし、図6(a)と同様に3台構成、4台構成の装置経路はそれぞれ図6(b), (c)とする。検体数をn個、分析装置をm台とすれば、検査系列は、mビットによって表現される装置経路を並べた長さnの配列になる。

4.2 PLS と STS の差

同じ検査系列を PLS と STS に投入したとき、どのよう

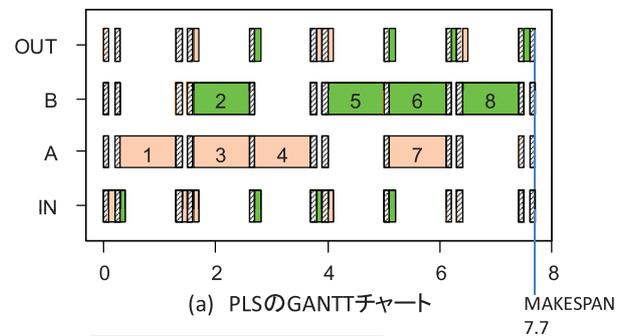
(a) 2台構成	(b) 3台構成	(c) 4台構成																																																																																																																												
<table border="1"><tr><td></td><td>A</td><td>B</td></tr><tr><td>S1</td><td>✓</td><td></td></tr><tr><td>S2</td><td></td><td>✓</td></tr><tr><td>S3</td><td>✓</td><td>✓</td></tr></table>		A	B	S1	✓		S2		✓	S3	✓	✓	<table border="1"><tr><td></td><td>A</td><td>B</td><td>C</td></tr><tr><td>S1</td><td>✓</td><td></td><td></td></tr><tr><td>S2</td><td></td><td>✓</td><td></td></tr><tr><td>S3</td><td>✓</td><td>✓</td><td></td></tr><tr><td>S4</td><td></td><td></td><td>✓</td></tr><tr><td>S5</td><td>✓</td><td></td><td>✓</td></tr><tr><td>S6</td><td></td><td>✓</td><td>✓</td></tr><tr><td>S7</td><td>✓</td><td>✓</td><td>✓</td></tr></table>		A	B	C	S1	✓			S2		✓		S3	✓	✓		S4			✓	S5	✓		✓	S6		✓	✓	S7	✓	✓	✓	<table border="1"><tr><td></td><td>A</td><td>B</td><td>C</td><td>D</td></tr><tr><td>S1</td><td>✓</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>S2</td><td></td><td>✓</td><td></td><td></td></tr><tr><td>S3</td><td>✓</td><td>✓</td><td></td><td></td></tr><tr><td>S4</td><td></td><td></td><td>✓</td><td></td></tr><tr><td>S5</td><td>✓</td><td></td><td>✓</td><td></td></tr><tr><td>S6</td><td></td><td>✓</td><td>✓</td><td></td></tr><tr><td>S7</td><td>✓</td><td>✓</td><td>✓</td><td></td></tr><tr><td>S8</td><td></td><td></td><td></td><td>✓</td></tr><tr><td>S9</td><td>✓</td><td></td><td></td><td>✓</td></tr><tr><td>S10</td><td></td><td>✓</td><td></td><td>✓</td></tr><tr><td>S11</td><td>✓</td><td>✓</td><td></td><td>✓</td></tr><tr><td>S12</td><td></td><td></td><td>✓</td><td>✓</td></tr><tr><td>S13</td><td>✓</td><td></td><td>✓</td><td>✓</td></tr><tr><td>S14</td><td></td><td>✓</td><td>✓</td><td>✓</td></tr><tr><td>S15</td><td>✓</td><td>✓</td><td>✓</td><td>✓</td></tr></table>		A	B	C	D	S1	✓				S2		✓			S3	✓	✓			S4			✓		S5	✓		✓		S6		✓	✓		S7	✓	✓	✓		S8				✓	S9	✓			✓	S10		✓		✓	S11	✓	✓		✓	S12			✓	✓	S13	✓		✓	✓	S14		✓	✓	✓	S15	✓	✓	✓	✓
	A	B																																																																																																																												
S1	✓																																																																																																																													
S2		✓																																																																																																																												
S3	✓	✓																																																																																																																												
	A	B	C																																																																																																																											
S1	✓																																																																																																																													
S2		✓																																																																																																																												
S3	✓	✓																																																																																																																												
S4			✓																																																																																																																											
S5	✓		✓																																																																																																																											
S6		✓	✓																																																																																																																											
S7	✓	✓	✓																																																																																																																											
	A	B	C	D																																																																																																																										
S1	✓																																																																																																																													
S2		✓																																																																																																																												
S3	✓	✓																																																																																																																												
S4			✓																																																																																																																											
S5	✓		✓																																																																																																																											
S6		✓	✓																																																																																																																											
S7	✓	✓	✓																																																																																																																											
S8				✓																																																																																																																										
S9	✓			✓																																																																																																																										
S10		✓		✓																																																																																																																										
S11	✓	✓		✓																																																																																																																										
S12			✓	✓																																																																																																																										
S13	✓		✓	✓																																																																																																																										
S14		✓	✓	✓																																																																																																																										
S15	✓	✓	✓	✓																																																																																																																										

図6 投入する検査系列

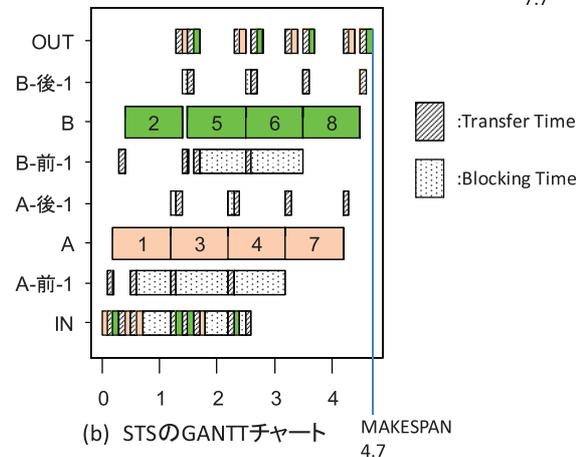
Fig. 6 Inspection sequence to be tested.

な差が生まれるであろうか。たとえば、分析装置A, Bの2台構成において、{A}{B}{A}{A}{B}{B}{A}{B}の順で8検体の検査系列を投入するケースを考える。列の先頭から検体番号を1, ..., 8に、検体識別子をa1, b2, a3, a4, b5, b6, a7, b8(接頭子a, bはそれぞれ分析装置A, Bで検査依頼された検体を意味する)と名付ける。PLSにこの検査系列が投入されると、PLSの搬送路のA, Bの分注位置には、(a1,null), (b2,a1), (a3,b2), (a4,a3), (b5,a4), (b6,b5), (a7,b6), (b8,a7), (null,b8)の検体の組が停止してはシフトする。ここでnullは検体が存在しないことを意味する。このうち、(b2,a1), (b5,a4), (b8,a7)はA, Bいずれの分析装置とも分注を行わない。分注がなくても搬送路の入口出口においてそれぞれ搬入準備、搬出準備が動作するので、その準備時間分搬送路は停止する。分注する検体の組、たとえば(a3,b2)ではa3は分析装置Aに、b2は分析装置Bに分注される。搬送路上の全検体において分注が終了すると搬送路はシフトする。

この動きを図7(a)にガントチャートで示す。横軸が時間、縦軸には下から搬送路入口(IN)、分析装置A、分析装置B、搬送路出口(OUT)の位置であり、斜線矩形で搬送路が動作している時間帯、数字入り矩形で分注が行われている時間帯を示す。矩形内の数字は検体番号である。分注が行われていない検体は空白になっている(たとえば、(b2,a1)のb2,a1や(a4,a3)のa3)。この例でmakespanは7.7単位時間となっている。



(a) PLSのGANTTチャート



(b) STSのGANTTチャート

図7 PLS と STS の検体処理動作

Fig. 7 Sample flow in PLS and STS.

一方、同じ検査系列を STS に投入した場合のガントチャートは図 7(b) になる。

この例では分析装置の搬入口・搬出口それぞれに 1 個のバッファ（たとえば、分析装置 A の場合、図中の A-前-1 と A-後-1）が設置されている。検体 a1 について説明すると、搬送路入口で搬入準備が行われた後、搬入口（IN）から分析装置 A の搬入口バッファ（A-前-1）に検体 a1 は運ばれる。この際、IN、搬送路、A-前-1 は検体 a1 の搬送に占有され、IN と A-前-1 はともに搬送時間を費やす（図中、斜線矩形）。次に、A-前-1 から分析装置 A の分注位置まで検体 a1 は空き時間なしで運ばれる。バッファから装置分注位置への搬送は分析装置の分注周期内で十分に処理できるため、分析装置内の反応容器に空きを生じない。したがって、バッファ内の検体は空き時間なく分析装置の処理に移る。ただし、装置分注位置ですでに別検体が処理中であれば、バッファの検体は当然待たされる（ブロッキング）。検体 a1 は分注処理後、A-後-1 に運ばれるが、ここで一定時間ブロッキングされている（図中、A-後-1 の点描矩形）。これは a4 が A-前-1 に入るために搬送路がちょうど占有されているためである。a4 の搬送が終了すると a1 の搬送が行われ、a1 は A-後-1 から搬送路出口（OUT）に運ばれる。a1 は分析装置 B での分注が不要のため、直接出口に送られて追い越しが発生する。このような追い越しにより、出口 OUT に現れる検体の順番は a4 と b5 が投入順番と逆転している。

この例では makespan は PLS が 7.7、STS が 4.7 であり、STS が PLS の 61% であり、したがって STS が PLS を 39% 圧縮している点で STS は PLS に比べてシステム性能が優れているといえる。実際、チャートで確認すると PLS の (a) では 1 単位時間の空きが A で 2 個、B で 2 個発生しているが、STS の (b) では 1 単位時間の空きは見られない。このような空きの違いが現れる理由は、検査系列における装置経路のばらつきに対して STS のバッファおよび追い越し機能が作用しているためと考えられる。検査系列が {A}、{B} の交互繰返しであれば、PLS でも 2 台の分析装置ともに分注処理を中断する 1 単位時間の空きは発生しない。しかし、装置経路に偏りがある場合、たとえば {A}{A}{B}{B} が来た場合には、{A}{A} が来た時点で分析装置 B に空きが生じる。STS は、このような偏りがあっても 2 個の {A} を分析装置 A のバッファ内に取り込み、さらに後続の {B} は分析装置 A を追い越して搬送される。いったんバッファに搬送された検体は他の分析装置に干渉されず分注処理される。装置経路のばらつきで発生する空きを STS はバッファおよび追い越し機能により抑制しているといえる。

4.3 STS の限界搬送能力

STS では検体が分析装置間で搬送されるたびに、搬送路は占有される。搬送路はただか 1 検体を搬送するために

占有されるので、搬送能力があまりに遅ければ搬送時間がシステム性能を劣化させてしまう。そこで、どの程度の搬送能力が許容されるかが課題となる。ここで搬送能力とは 1 検体を運ぶ時間であり、具体的には、検体が搬送路入口または分析装置搬出口から出てから、分析装置搬入口または搬送路出口に至るまでの時間である。

分析装置が m 台あるとすれば、全装置を装置経路とする検体であれば $m + 1$ 回の搬送時間を費やし、1 装置を搬送経路とする検体であれば 2 回の搬送時間を費やす（このような回数を以下 **hop 数** と呼ぶ）。検体が n 個あればこれらを n 倍した時間を全搬送時間として費やす。しかし、STS においては全搬送時間がシステム全体の makespan に加算されるわけではない。

図 8 を用いて説明する。図は装置 A に始まり、A の搬出口バッファ（A-out）、B の搬入口バッファ（B-in）、装置 B にまで至る経路を検体 s2 が流れる様子を横軸時間のガントチャートで示している。A-out から B-in への搬送は搬送路を占有して行われるが、装置 B は検体 s1 の処理中であるため、s1 の処理が終了するまでバッファ B-in 内で検体 s2 は待機する。検体 s1 が終わり検体 s2 は連続的に装置 B 内で処理される。

検体 s2 の経路を時間軸上で眺めると、s2 は s1 の処理時間を待つだけで、A-out から B-in への搬送時間が makespan に加算されていないことが分かる。バッファによって搬送と分注処理が並行に動作することから、この例のように搬送時間が隠れる。STS においては空きを圧縮して検体の密度が高くなるほど、このような並行処理の効果が現れる。

ここで、搬送時間を増やしていくと、どこかの限界を超えた時点で隠すことができなくなり、分注処理時間に空きを生じてしまう。それはバッファによって並行処理される全搬送時間が全分注時間を超えるときである。平均的には以下の式となる。

$$T_{conv} = \frac{T_s}{(\text{検体あたりの平均 hop 数})} \quad (1)$$

ここで T_{conv} は限界搬送時間（それを超えるとシステム性能が搬送処理により大きく劣化するような搬送時間。逆数が限界搬送能力）、 T_s は平均検体処理時間である。これは

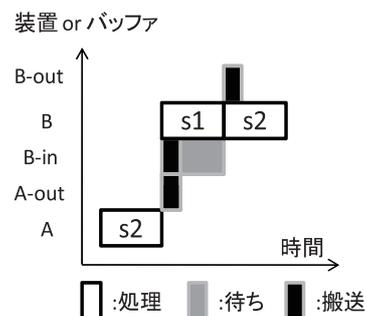


図 8 バッファにより隠れる搬送時間
Fig. 8 Conveying time hidden by buffer.

バッファ数に依存しない。バッファ間およびバッファと分注位置との間で検体が運ばれる時間は、分注周期内に行われることを想定しており、全体時間に影響を与えないためである。

ここで m を搬送路につながる分析装置の数とすると、平均 hop 数は $(m + 1)$ を超えない。したがって、より厳しい条件（十分条件）としては以下のように表現できる。

$$T_{conv} < \frac{T_s}{m + 1} \quad (2)$$

実際には図 6 の検査系列から計算すれば、平均 hop 数は $m = 2$ で 2.33, $m = 3$ で 2.71, $m = 4$ で 3.13 となるが、設計として分かりやすい式として、検体処理時間（1 単位時間）を（装置数 + 1）で除した値を搬送時間の上限としている。たとえば、装置が 2 台であれば、平均処理時間の 1/3 が上限となる。装置数を最大 4 台とすると、平均検体処理時間の 1/5 以下で 1 検体を処理すればシステム性能を劣化させない。

この条件はシステム設計のうえで好材料となる。すなわち、搬送能力には尤度が与えられている。搬送の対象は液体が入った容器であり、あまりに高速にすれば液体がこぼれてしまう。実際に液体容器を高速に搬送する研究もある [15]。尤度があることで、システム性能の劣化を考えないで済む搬送能力設計の目標が設定され、設計自由度が上がる。

4.4 検査距離、圧縮率、および前提条件

システム性能の差は、空き時間の差に起因する。本研究では空き時間情報を引き出すために、検査距離という指標を導入する。そこで、検査距離および関連する指標について定義する。

図 9 を参照しながら、以下のように定義する。検査系列は検体ごとに依頼される装置経路の列である。たとえば、分析装置が 2 台の場合には、検査系列の要素である装置経路は 2 ビットの数値で表現され、LSB (Least Significant Bit) が搬送路の最初に接続されている分析装置 A に、MSB

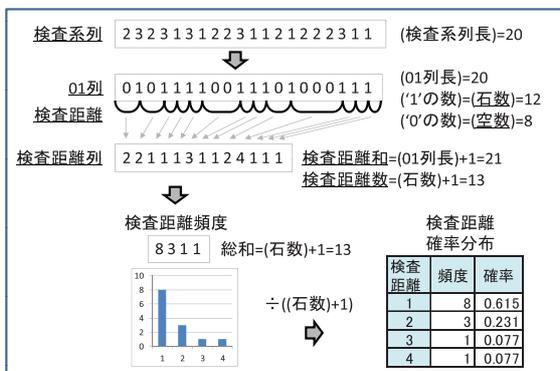


図 9 検査距離と確率分布の定義

Fig. 9 Definition of testing distance and probability distribution.

(Most Significant Bit) が後続の分析装置 B に対応して、オンであれば経由しオフであれば経由しないことを示す。ここで特定の分析装置に着目して、そこに経由するか否かは、たとえば、分析装置 A については LSB が 1 か 0 かで表現され、その列を 01 列とする。この 01 列中の '1' の数を石数、'0' の数を空数とする。01 列中、'0' を挟む 2 つの '1' の距離を検査距離、その検査距離の列を検査距離列と定義する。'1' が隣り合っているならば検査距離を 1 として、'0' を n 個挟んでいれば $n + 1$ とする。01 列の両端境界は検査距離計算上 '1' と見なす。たとえば、図の 01 列の最初は '01' で始まるので、境界を '1' と見なすため検査距離は 2 となる。検査距離列における要素の和は 01 列長 + 1 であり、検査距離列の要素数は石数 + 1 になっている。検査距離列は検査距離頻度にとめることができ、検査距離数で割ることにより検査距離確率分布が作られる。

以上が検査距離確率分布の導出までの流れとなる。次に、図 10 (a) を使って、確率分布から空き時間情報を導出する。確率分布から平均空数（検査距離あたりの空数平均）、平均検査距離（検査距離あたりの長さ平均）が求まる。式はそれぞれ図中の式 a, b にあたる。 $b = a + 1$ なので、a, b の一方が求まれば他方が計算される。この値により石率（01 列内の '1' 出現率）、空率（01 列内の '0' 出現率）が求まる。a, b 式内には +1 が現れて正確には一致しないが、この +1 が無視できる十分に大きい検査系列を扱うため、a, b を利用できる。また、石数に対する空数の割合を空石比と定義する。この指標は圧縮率の計算上活用できる。

この空き時間情報から圧縮率を導出する。システム S1 とシステム S2 に同じ検査系列を流し、それぞれの装置で 01 列を観測する。S2 の圧縮率は 01 列長の差が占める S1 の 01 列長の割合となる。

圧縮率 R_{cmp} は、式 (3) により各システムの空石比から導出される。

$$R_{cmp} = \frac{(S1 \text{ の makespan}) - (S2 \text{ の makespan})}{(S1 \text{ の makespan})}$$

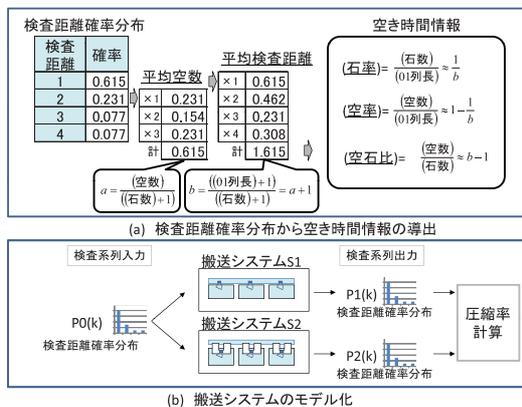


図 10 確率分布と空率

Fig. 10 Probability distribution and hole rate.

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(S1 \text{ の } 01 \text{ 列長}) - (S2 \text{ の } 01 \text{ 列長})}{(S1 \text{ の } 01 \text{ 列長})} \\
 &= \frac{(S1 \text{ 石数} + S1 \text{ 空数}) - (S2 \text{ 石数} + S2 \text{ 空数})}{(S1 \text{ 石数} + S1 \text{ 空数})} \\
 &= \frac{(S1 \text{ 空石比}) - (S2 \text{ 空石比})}{1 + (S1 \text{ 空石比})} \quad (3)
 \end{aligned}$$

式 (3) に至る第 1 式から第 2 式に至る過程で, makespan を 01 列長に入れ替えている. 01 列長は装置 1 台について検査系列を切り出したものであり (図 9), makespan は装置台数分ある 01 列長の中から一番遅いものの最終時刻になる. したがって makespan と 01 列長は厳密には異なるが, 検体が各装置を均一に経過していること, よって装置間で 01 列長が均一化していることにより makespan は 01 列長の平均に近くなることを仮定している. 第 2 式では S1 石数と S2 石数が現れるが, 同じ系列を流しているため相殺される. 第 2 式の分母分子を S1 石数で割ることで式 (3) に至る.

以上をまとめると, 2 つのシステムにおける検査距離確率分布が分かれば, 圧縮率が求まる (図 10 (b)). 搬送システムはフィルタのように作用して, 検査距離確率分布を変換する. 実際には, 分析装置が m 台あれば m 本の 01 列が観測され, その中で一番遅いもの (つまり, 一番長い 01 列) が makespan に貢献する. 解析的には確率分布を変換するフィルタ式を搬送システムのモデルとして導入する.

本節の最後に, PLS と STS を比較するために設定する 2 つの前提条件を述べる. 1 つ目の条件として, 搬送時間を 0 にする. 4.3 節で説明したように, STS では搬送時間がある範囲以内に設定することにより, makespan に搬送時間が大きくは加算されない. 一方 PLS では一般に検体数に比例して搬送時間が makespan に加算される. 今回の比較では, バッファおよび追い越し機能が寄与する圧縮率をテーマとしている. 過度に STS に有利になることなく, また, 比較結果を検体数から独立にするために搬送時間を 0 とする.

2 つ目の条件として, 搬送路の入口における搬入準備または出口における搬出準備の時間を 0 とする. PLS では搬送路上の全検体が検査なしの場合, 準備時間は makespan に加算され, 有限にすれば過度に STS が優位となる. そこで前の条件と同様の理由により, 準備時間を 0 とする. ちなみに, この準備時間は, システム全体のスループットに歩調を合わせる必要がある. 搬入準備があまりに遅いと, システム内の検体の流れは疎になり空き時間が頻発して本来の性能が出ない. また, 搬出準備があまりに遅いと, システム内の検体は出口が塞がれブロッキングされ, やはり本来の性能が出ない. 検体の処理時間はどの装置でも 1 単位時間 (T) としているので, 装置が m 台とすれば準備時間は T/m 以内に設定する必要がある. 準備時間 0 は当然この条件を満たしている.

表 2 検査距離列の例

Table 2 Examples of testing distance sequence.

(a) 長さ3の01列			(b) 検査距離分布			(c) 長さ4の01列			(d) 検査距離分布		
No.	01列 長さ3	検査 距離列	検査 距離	個数	%	No.	01列 長さ4	検査 距離列	検査 距離	個数	%
1	●000●	4	1	12	60	1	●0000●	5	1	28	58
2	●100●	1,3	2	5	25	2	●1000●	1,4	2	12	25
3	●010●	2,2	3	2	10	3	●0100●	2,3	3	5	10
4	●110●	1,1,2	4	1	5	4	●1100●	1,1,3	4	2	4
5	●001●	3,1	5	1	5	5	●0010●	3,2	5	1	2
6	●101●	1,2,1	計	20		6	●1010●	1,2,2	計	48	
7	●011●	2,1,1				7	●0110●	2,1,2			
8	●111●	1,1,1,1				8	●1110●	1,1,1,2			
						9	●0001●	4,1			
						10	●1001●	1,3,1			
						11	●0101●	2,2,1			
						12	●1101●	1,1,2,1			
						13	●0011●	3,1,1			
						14	●1011●	1,2,1,1			
						15	●0111●	2,1,1,1			
						16	●1111●	1,1,1,1,1			

この 2 つの前提条件により, 搬送システムから出力される検査距離がすべて整数化 (1 単位時間の倍数) され, 分布計算が簡易になるという利点も生まれる.

4.5 圧縮率解析

ランダムに検体が投入されるとき検査系列上にはどのような空きが発生し, それはどのような検査距離確率分布を構成するであろうか. 解析の端緒として, 長さ 3 および 4 の 01 列を考察する (表 2).

表 2 (a) は長さ 3 の, (c) は長さ 4 の 01 列における '1' の検査距離をすべての組合せにおいて一覧している. 検査系列の表において, ●は境界を意味する. たとえば, 表 2 (a) の 4 行目は●110●であり, ●1 が距離 1, 11 が距離 1, 10●が距離 2 と計量されて, 検査距離列は 1,1,2 となる. このような (a), (c) の検査距離を頻度集計した表がそれぞれ (b), (d) である. たとえば, 表 2 (d) は, 長さ 4 の検査系列には検査距離 1 が 58%, 2 が 25% 含まれていることを示す. これは長さが有限であるが, 長さが無限または有限でも無限に繰り返されたときの出現確率として以下が導出される.

$$P(k) = (1 - q)q^{k-1} \quad (4)$$

$P(k)$ は, 01 列中に検査距離 k が出現する確率であり, q は '0' の出現確率である. これは, $P(k+1)$ は $q \cdot P(k)$ であること, および, $P(k)$ の級数が 1 となることより導かれる. 投入する検査系列 (図 6) を見れば, 装置台数によって '0' の出現確率が異なることが分かる. これを反映して, 装置ごとに検査距離確率関数を表 3 にまとめる. P のサフィックスは装置台数を示す.

以上の確率関数は入力検査系列の性質になる. この検査系列がシステムに投入され, リアルタイムスケジューラされると空きが圧縮されて, 確率分布に変化が現れる. その変化の様子を以下説明する.

STS において, バッファは後続の検体のスループットを向上させる. 分析装置の搬入口にあるバッファ数を 1 つとすれば, 分析装置はバッファと分注位置の 2 カ所に検体を

表 3 入力検査系列の検査距離

Table 3 Testing distance of input testing sequence.

装置台数	検査距離の確率関数	平均検査距離長	石率	空率	空石比
2	$P_2(k) = \binom{2}{3} \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{k-1}$	$\sum_{k=1}^{\infty} kP_2(k) = \frac{3}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$
3	$P_3(k) = \binom{4}{7} \cdot \left(\frac{3}{7}\right)^{k-1}$	$\sum_{k=1}^{\infty} kP_3(k) = \frac{7}{4}$	$\frac{4}{7}$	$\frac{3}{7}$	$\frac{3}{4}$
4	$P_4(k) = \binom{8}{15} \cdot \left(\frac{7}{15}\right)^{k-1}$	$\sum_{k=1}^{\infty} kP_4(k) = \frac{15}{8}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{7}{15}$	$\frac{7}{8}$

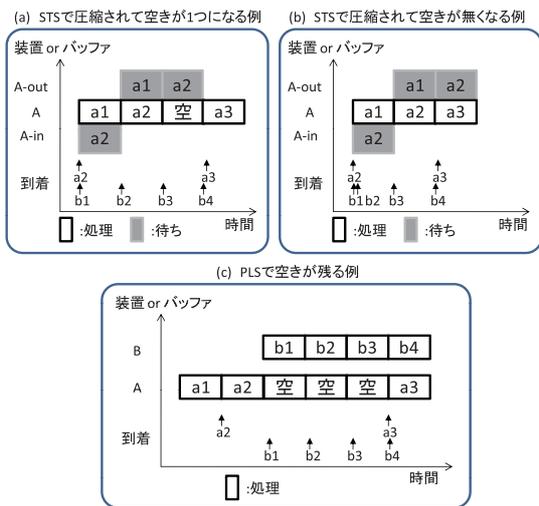


図 11 STS と PLS における空き

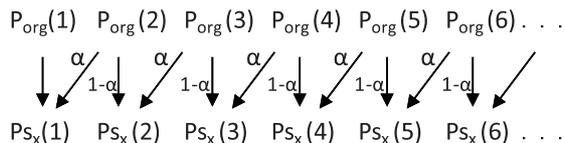
Fig. 11 Idle time slots in STS and PLS.

受け入れることができ、両者が空いていれば続けて2検体を受け入れることができる。その後1単位時間が過ぎればバッファから分注位置に検体がシフトして、バッファは空になり、次の検体を受け入れる。

このことにより、到着する検体間に空きがあっても、分析装置の空きは回避される。図 11 でその仕組みを説明する。図 11 の (a), (b) とともに6検体 a2, b1, b2, b3, b4, a3 (接頭子 a, b はそれぞれ分析装置 A, B で検査依頼された検体を意味する) が STS に到着した例である。ここで、図では搬送時間を 0 としている。6 検体の検査系列を見ると、分析装置 A から見れば検査系列に4検体の空きが生じている。しかし、図 11 (a) のケースでは、分析装置の空きは1単位時間に収まっている。これは検体 a2 が到着したときに a1 が稼働中のため a2 はバッファに入ったこと、b1 から b4 が1単位時間ごとに順次処理されたことに起因している。さらに図 11 (b) は、同じ検査系列が投入されて空きが生じない例である。この違いは、分析装置 B が続けて2検体 b1, b2 を受け入れたことによる。以上のように、検体系列に分析装置 A に4単位時間の空きが生じているにもかかわらず、条件によっては分析装置 A の処理の空きは1単位時間あるいは0となる。STS ではこのように検査系列上の空きを圧縮するという効果がある。

一方 PLS では、追い越しもバッファもないため、同じ検

(a) 空列slide1



(b) 空列slide2

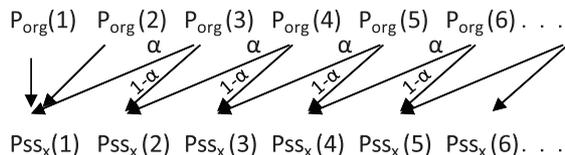


図 12 フィルタの構造

Fig. 12 Filter structure.

査系列を流すと図 11 の (c) が示すように3単位時間の空きが生じる。空きが1単位時間削減されたのは、最後の工程で b4 と a3 が並列に処理されたためである。

以上から、入力検査系列をシステムに投入すると、検査距離分布における検査距離 2 以上 (空きが 1 以上) の頻度が縮退して、少ない検査距離に移動することが推定される。その移動をフィルタ式に表現すると以下の2式が考えられる。

$$P_{S_x}(n) = \begin{cases} P_{org}(1) + \alpha \cdot P_{org}(2) & (n = 1) \\ (1 - \alpha) \cdot P_{org}(n) & \\ + \alpha \cdot P_{org}(n + 1) & (n \geq 2) \end{cases} \quad (5)$$

$$P_{SS_x}(n) = \begin{cases} P_{org}(1) + P_{org}(2) & \\ + \alpha \cdot P_{org}(3) & (n = 1) \\ (1 - \alpha) \cdot P_{org}(n + 1) & \\ + \alpha \cdot P_{org}(n + 2) & (n \geq 2) \end{cases} \quad (6)$$

式 (5) はただか1個空きが減少するフィルタ式、式 (6) は空きが1から2個減少するフィルタ式になっている。

これらを模式的に描いたのが図 12 である。前者を空列 slide1、後者を空列 slide2 と名付ける。式中、 $P_{org}(n)$ は入力検査系列における検査距離分布を示す。空列 slide1 におけるパラメータ α が1のフィルタと空列 slide2 のパラメータ α が0のフィルタは等価である。空列 slide1 におけるパラメータ α が0であればフィルタは入力列を何も変更しない。空列 slide2 のパラメータ α が1であれば、空列は2段階跳びでシフトする。搬送システムの入力検査距離確率分布に対して上式がフィットするようにパラメータを調整することで、搬送システムはフィルタ式として抽象化される。

5. 数値実験と結果考察

数値実験に用いたシミュレータの説明を行った後に、前述した解析結果を数値実験により検証・考察する。

5.1 シミュレータの構成

数値実験に用いるシミュレータ構成の概略を述べる。検体数を n 個、分析装置を m 台とすると、入力検査系列は m ビットからなる装置経路を n 個並べた待ち行列 Q になる。PLS のシミュレータでは以下のステップを実行する。

- (Step 1) 搬送路に見立てた長さ m の配列を用意して、その配列インデックスを分析装置に対応させる。
- (Step 2) 待ち行列 Q から先頭 m 個の要素（装置経路）を取り出し配列に割り当てる。
- (Step 3) 搬送路配列の全インデックスにおいていずれかの装置経路が同インデックスの装置を含んでいれば、時間を 1 単位時間更新する。
- (Step 4) 搬送路配列を 1 要素分シフトし、待ち行列 Q から 1 要素取り出して、シフトして空いた配列に割り当て (Step 3) に戻る。待ち行列 Q が空であれば終了する。

STS のシミュレータについては、3.3 節で述べた制御を実行する。装置は、遊休、分析中、ブロッキングの 3 状態の遷移によってモデル化される。また、バッファは、遊休、ブロッキングの 2 状態でモデル化される。

以上の 2 シミュレータには、図 6 に基づいてランダムに発生された入力検査系列が投入される。出力は makespan (全検査系列の終了時刻) と各装置における空き情報になる。シミュレータの動作結果は PLS/STS のいずれもガントチャートに出力され、視覚的に動作を確認することができる。なお、シミュレータは統計処理用言語 [16] を用いて実装している。

5.2 STS の限界搬送能力

図 13 に実験で得た、搬送能力と makespan の関係を示す。装置台数 2, 3, 4 (図中 $m = 2$ などの表示) のそれぞれに関係曲線を描いている。投入した検査系列の長さは

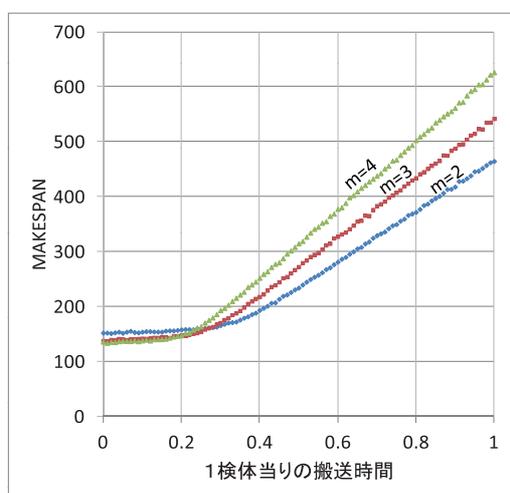


図 13 搬送能力と makespan

Fig. 13 Transfer performance and makespan.

200, 搬送能力として検体 1 個あたりの搬送時間を 0 から 1 (1 単位時間) まで 0.01 刻みに変化させている。それぞれの搬送時間ごとに 20 回シミュレータを動作させ、20 点の makespan の平均を図にプロットしている。

図から分かるように、搬送時間は 3 曲線ともに搬送時間 0.2 から 0.3 あたりを境 (CP: Critical Point) にして、傾きが大きく変化している。つまり、この限界搬送能力より低い (限界搬送時間より長い) と makespan が大きくなりシステム性能が劣化している。

解析結果では、この CP の値が $1/((装置数)+1)$ であると結論したが、曲線では必ずしも CP が明らかではない。そこで、搬送時間の前半 0 から 0.15 まで、および後半 0.65 から 1 までのそれぞれに回帰直線を求め、その交差点として CP を計算した。その結果を限界搬送能力として表 4 に示す。

表 4 には回帰直線 1 (前半), 2 (後半) の傾き a と切片 b , これらが交差する点から求めた実験 CP, 解析結果による解析 CP が記されている。回帰直線 1 が若干の傾きを持っているが、これは検査系列を実行したときにできる空き時間個数に比例している。空きが発生中の装置に検体が到着して空き時間が解消される直前には搬送時間が makespan に反映されるためである。また、回帰直線 2 の傾きは、(平均 hop 数) × (検体数) に比例する。また、バッファ数を 2 にして同実験を行った結果、回帰直線 1 の傾きが減少 (空き時間個数の減少による) が確認されたほかは表 4 と優位な差がなかった。バッファ数と限界搬送時間とは独立であると考えられる。

実験 CP と解析 CP は近い値を示している。搬送機構の設計条件として、最大 4 台構成を想定すれば、平均検体処理時間 (1 単位時間) の 1/5 (0.2) 以内であればシステム性能が劣化しないという結果が得られた。この実験結果は、解析結果と一致する。

5.3 STS の PLS に対する圧縮率

図 14 に PLS/STS に検査系列を投入した結果を示す。

図は検査距離の 1 から 4 までを抜粋して装置台数構成ごとにグラフ化している。ORIGIN と表記のあるグラフは入力系列の分布、PLS/STS と表記のあるグラフは PLS/STS の出力系列の分布である。検査系列の長さは 400, いずれの装置構成も 40 回投入しており、出力された全検査距離頻度分布を加算した後全頻度数で割り確率を求めている。PLS/STS とともに、搬送時間および搬送路の搬入準備時間

表 4 限界搬送能力

Table 4 Critical point of transfer performance.

	回帰直線1(ax+b)		回帰直線2(ax+b)		実験CP	解析CP $1/((装置数)+1)$
	a	b	a	b		
m=2	17.0	152	461	5.75	0.331	0.333
m=3	40.7	138	538	4.21	0.269	0.250
m=4	37.0	135	625	1.60	0.227	0.200

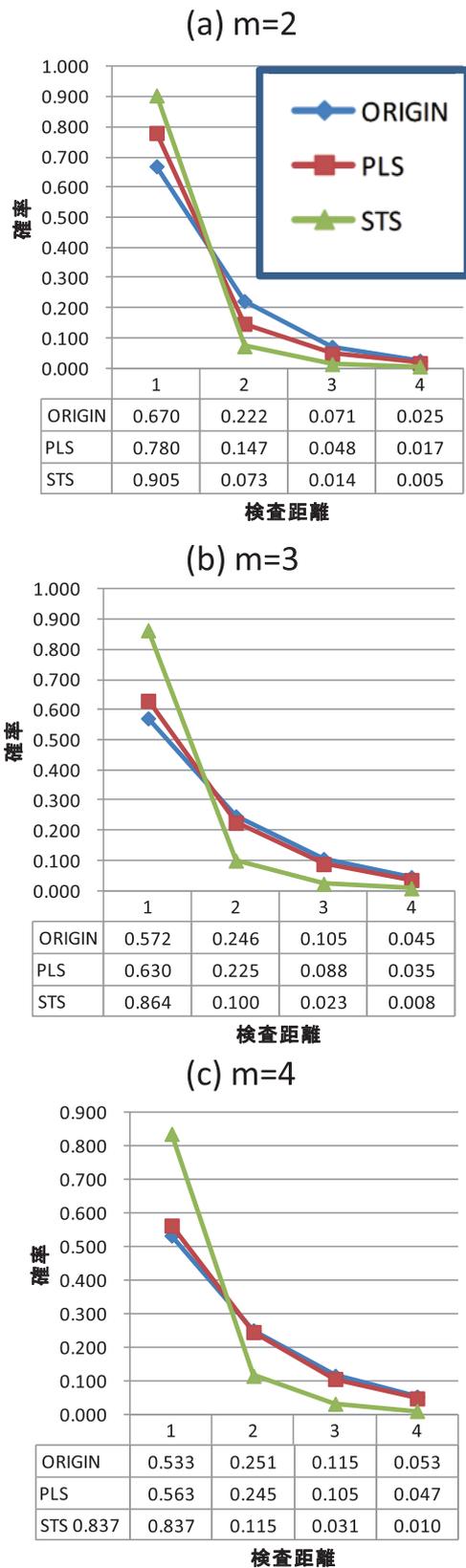


図 14 検査距離分布出力
Fig. 14 Output of testing distance distribution.

および搬出準備時間は 0 である。STS のバッファ数は 1 つである。

図 14 のグラフによると、いずれの分布も、入力 (ORI-

GIN) に対して、PLS, STS の順に検査距離 1 (空き 0) の比率が向上し、検査距離 2 以上 (空き 1 以上) の比率が低下している。これは空きの圧縮の結果である。グラフ下段の ORIGIN の確率分布を見ると表 3 に示した確率分布に近いことが分かる。

ORIGIN の確率分布から PLS/STS の確率分布を得るフィルタ式を検討した結果、4.5 節で述べた空列 slide を改良した形となった (式 (7), (8))。

$$P_{PLS}(n) = \begin{cases} P_{org}(1) + \alpha \cdot P_{org}(2) & (n = 1) \\ (1 - \alpha) \cdot P_{org}(2) \\ \quad + \alpha \cdot P_{org}(3) \\ \quad + \beta \cdot P_{org}(3) & (n = 2) \\ (1 - \alpha) \cdot P_{org}(3) \\ \quad + \alpha \cdot P_{org}(4) \\ \quad + \beta \cdot P_{org}(4) \\ \quad - \beta \cdot P_{org}(3) & (n = 3) \\ (1 - \alpha) \cdot P_{org}(n) \\ \quad + \alpha \cdot P_{org}(n + 1) \\ \quad + \beta \cdot P_{org}(n + 1) \\ \quad - \beta \cdot P_{org}(n) & (n \geq 4) \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{STS}(n) = \begin{cases} P_{org}(1) + P_{org}(2) \\ \quad + \alpha \cdot P_{org}(3) & (n = 1) \\ ((1 - \alpha) \cdot P_{org}(3) \\ \quad + \alpha \cdot P_{org}(4))(1 + \beta) & (n = 2) \\ ((1 - \alpha) \cdot P_{org}(4) \\ \quad + \alpha \cdot P_{org}(5))(1 + \beta) \\ \quad - \beta \cdot (1 - \alpha) & (n = 3) \\ \cdot P_{org}(3) \\ ((1 - \alpha) \cdot P_{org}(n + 1) \\ \quad + \alpha \cdot P_{org}(n + 2)) \\ \cdot (1 + \beta) \\ \quad - \beta \cdot P_{org}(n) & (n \geq 4) \end{cases} \quad (8)$$

このフィルタ式は空列 slide に対してパラメータ β を付加している。 β が 0 のときはちょうど空列 slide と一致する。 β により、空列のシフトを加速している。

表 5 に圧縮率の結果を一覧する。表 5(a) は式 (7), (8) に ORIGIN の確率分布を与えて、PLS/STS の確率分布にベストフィット (誤差の二乗和が最小化) するよう α と β を調整した結果である。それぞれの空石比から式 (3) により圧縮率を求めている。

表 5(b) はシミュレータに検査系列を投入して得られた確率分布から空石比および圧縮率を計算している。また、表 5(c) は別途検査系列長 400 を 40 回シミュレータに流して、空石比を使わず、直接 makespan から圧縮率を求めている。

表 5(a), (b), (c) の圧縮率はかなり近い値を示しており、その差は表 5(c) の標準偏差 (SD) 内に収まっている。

表 5 圧縮率

Table 5 Compression rate.

(a) フィルタ式から求めた圧縮率

	PLS			STS			圧縮率
	alpha	beta	空石比	alpha	beta	空石比	
m=2	0.50	0.01	0.328	0.18	0.16	0.128	0.151
m=3	0.23	0.10	0.627	0.43	0.26	0.193	0.267
m=4	0.11	0.08	0.804	0.42	0.30	0.253	0.306

(b) 頻度分布から求めた圧縮率

	PLS 空石比	STS 空石比	圧縮率
m=2	0.330	0.132	0.149
m=3	0.608	0.195	0.257
m=4	0.784	0.238	0.306

(c) makespanから求めた圧縮率

	PLS makespan		STS makespan		圧縮率	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD
m=2	355.8	5.79	302.8	6.64	0.149	0.014
m=3	369.0	6.13	275.4	7.98	0.253	0.018
m=4	383.5	3.93	265.4	5.29	0.308	0.015

表 6 バッファ数と圧縮率

Table 6 Buffers and compression rate.

	PLS	STS			
		bn=1	bn=2	bn=3	
m=2	空石比	0.330	0.132	0.085	0.066
	圧縮率	-	0.149	0.181	0.196
m=3	空石比	0.608	0.195	0.128	0.100
	圧縮率	-	0.257	0.296	0.315
m=4	空石比	0.784	0.238	0.157	0.121
	圧縮率	-	0.306	0.356	0.364

この点で、フィルタ式 (7), (8) は PLS/STS をモデル化していること、つまり解析で述べたように、搬送システムがフィルタ式としてモデル化されていることを示す。また STS は PLS に比べて 4 台構成において処理時間を 30% 圧縮 (表 5 (a), (b) 内 0.306, 表 5 (c) 内 mean (平均) 0.308) することが分かった。

5.4 バッファ数とシステム性能

前節と同じ条件でバッファ数を 2 と 3 に変更して実験した結果を表 6 に示す。

バッファ数が bn とは、分析装置の搬入口、搬出口それぞれにバッファが bn 個存在することを意味する。表 6 中、 $bn = 2$, $bn = 3$ の列がその結果であり、PLS および STS の $bn = 1$ の列は表 5 (b) の再掲値である。

バッファ数が増えると一般に圧縮率が高まる。入口のバッファが 1 つ増えることにより 1 つ余分に検体を取り込めるので、ゼロ時間で分注位置に運べる検体が増え、空きなく処理することができる。

空石比を見ると、バッファ数が 2 以上になると 0 に近い値を示している。空石比は、検体数 (石) に対する空きの割合に相当するから、空石比が 0 に近いとは空きが 0 に近いことを意味する。したがって、圧縮率もバッファ 3 個ではバッファ 2 個に比べて大きな効果が得られていない。また、バッファ数 2 もバッファ数 1 の効果ほどの圧縮率向上は見られない。

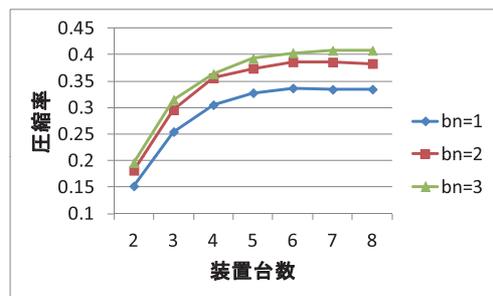


図 15 装置台数とバッファ数と圧縮率

Fig. 15 Instruments, buffers and compression rate.

図 15 に装置台数を 8 台まで増やして、バッファ数が 1 から 3 (図中、 $bn = 1$ から $bn = 3$) まで圧縮率をプロットしたグラフを示す。すべての台数において $bn = 2$ と $bn = 3$ では圧縮率の大きな改善はない。装置 8 台構成では $bn = 1$ で 33%, $bn = 2$ で 38% で、5 ポイントの差は装置 4 台構成と変わらない。

まとめると、バッファ数 3 つは 2 つに比べて効果を期待すべきではなく、バッファ数 2 つは 1 つに比べて圧縮率を 4 台構成以上で 5 ポイントほど改善する。

一般に、分析装置の寸寸法による限界からバッファの数を多くすることは設計上難しい。バッファ増設によるインパクトが推定できることで、バッファ数設計を助ける。バッファ 1 個で十分な圧縮率を達成できるとも評価できる。

6. おわりに

医療の検査業務に使われる検体搬送システムの性能を解析し、それを実験により検証した。検体搬送システムには、搬送路沿いに分析装置を並べる PLS 方式に対して、追い越し機能・バッファ機能を付加した STS 方式がある。STS は検体の装置経路ばらつきによる空きを削減する効果を有しており、検体列を処理するスピードにおいて STS が PLS に対してどの程度優位かを検討した。その結果、STS における搬送時間にはシステム性能を劣化させない上限の限界搬送時間が存在し、その限界搬送時間は平均検体処理時間の $1/((装置数)+1)$ であること、STS は PLS に比べて 4 台構成において処理時間を 30% 圧縮すること、分析装置内の搬入口・搬出口にあるバッファ数は 2 個を超えると装置台数によらず大きい圧縮率の改善は得られないことが分かった。

STS と PLS の比較実験では、搬送時間を 0 に設定している。もし現実に合わせて搬送時間を有限にすれば、PLS は検体数に比例して搬送時間が処理時間に加算されるのに対して、STS は搬送時間が限界搬送時間内であれば搬送時間は処理時間に加算されない。したがって、有限な搬送時間のもとでは、STS はさらに優位となる。

本研究は、既存の 4 台を超えた構成における搬送能力および 2 つ以上のバッファ数がシステム性能に与える影響を明らかにして、将来の開発への展望を与えている。

参考文献

- [1] 高畑藤也, 池田俊幸, 松本孝一ほか: 検査の全自動化を目指した検体検査トータルシステム, 日立評論, Vol.73, No.11, pp.1003-1008 (1991).
- [2] 桶野 励, 原田倫孝: 複数台のコンベアベルトを組み合わせた搬送システムの構築, 精密工学会誌, Vol.78, No.12, pp.1105-1111 (2012).
- [3] 亘 重範, 神原克宏, 浜地和弘, 渋谷武志: 中規模病院向け生化学・免疫統合自動分析システム, 日立評論, Vol.93, No.3, pp.40-45 (2011).
- [4] 渡邊 卓: 大学病院検査部長の立場から, Laboratory and Clinical Practice, Vol.24, No.1, pp.45-47 (2006).
- [5] 岡田正彦, 中村 明: 即時報告をめざした検査室の設計指針: 採血から結果出力まで, 医科器械学, Vol.67, No.12, pp.575-579 (1997).
- [6] (株)日立ハイテクノロジー: もっと日立ハイテク 製品紹介 ライフサイエンス (科学・医用システム) (オンライン), 入手先 <http://www.hitachi-hitec.com/ir/products_info/2008.2.html> (参照 2013-10-01).
- [7] 木瀬 洋, 関口恭毅: スケジューリング理論の基礎と応用-II: ジョブショップ問題とその計算複雑さ, システム制御情報学会誌, Vol.44, No.10, pp.601-608 (2000).
- [8] 今泉 淳, 森戸 晋: 需要を考慮した直列型有限バッファ待ち行列: 近似的アプローチによるシステム挙動の分析, 日本経営工学会誌, Vol.44, No.2, pp.102-109 (1993).
- [9] ZAHNG Heng, 石塚 陽, 山下英明ほか: 固定された加工順序および経路を持つジョブショップ型生産システムにおけるバッファ容量配分問題, 日本経営工学会論文誌, Vol.54, No.1, pp.11-18 (2003).
- [10] 岩田一明, 大場史憲, 室津義定ほか: 搬送およびバッファを考慮した大規模ジョブショップ・スケジューリング, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.49, No.437, pp.133-141 (1983).
- [11] 山本久志, 浜田康平, 長塚豪己: s 種類の結果を有する試行列における連の分布の効率的な算出方法: オーバラップを許さない場合, 日本経営工学会論文誌, Vol.60, No.4, pp.218-225 (2009).
- [12] 三卷 弘, 高橋克明, 内藤茂昭ほか: 多目的用途に迅速に対応できる小形血液自動分析装置 (医療の高度化・総合化に対応する医用機器・医療情報システム〈特集〉), 日立評論, Vol.73, No.11, pp.995-1002 (1991).
- [13] 三卷 弘, 児玉隆一郎, 栗山裕之: 臨床検査の効率的な運用に適したモジュール組合せ方式の血液自動分析装置, 日立評論, Vol.79, No.10, pp.757-762 (1997).
- [14] 森戸 晋: モデルが見えるとき (〈特集〉モデリング—最適化モデリング), オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, Vol.50, No.4, pp.225-228 (2005).
- [15] 大塚弘文, 岩井善太, 水本郁朗: 強正実性に基づく離散時間適応状態フィードバック制御とその液体搬送制御への応用, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.63, No.611, pp.2296-2301 (1997).
- [16] R Core Team: R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, available from <<http://www.R-project.org/>> (2013).



児玉 隆一郎 (正会員)

昭和 32 年生。昭和 56 年東京大学工学部計数工学科卒業。同年 (株)日立製作所入社。平成元年米国ロチェスター工科大学大学院修士課程修了。平成 13 年 (株)日立ハイテクノロジーズ入社。組み込みソフトウェアの研究開発に

従事。



田野 俊一 (正会員)

昭和 33 年生。昭和 56 年東京工業大学工学部制御工学科卒業。昭和 58 年同大学大学院総合理工学研究科システム科学専攻修士課程修了。同年 (株)日立製作所システム開発研究所入社。平成 2 年カーネギーメロン大学客員研究

員。平成 3 年国際ファジィ工学研究所。平成 8 年電気通信大学大学院情報システム学研究科助教授。平成 12 年マサチューセッツ工科大学客員研究員。平成 14 年電気通信大学教授。工学博士。主として、人工知能、知識工学、自然言語理解、あいまい理論、知的ユーザインタフェースの研究に従事。人工知能学会、日本ファジィ学会、言語処理学会、AAAI, IEEE, ACM 各会員。