T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	計算資源割り当てスケジューリングのための直方体パッキング表現手法の検討
Title(English)	Evaluation of 3D-Packing Representation for Scheduling of Dynamically Reconfigurable Systems
著者(和文)	小平行秀, 児玉親亮, 藤吉邦洋, 高橋篤司
Authors(English)	Yukihide Kohira, Chikaaki Kodama, Kunihiro Fujiyoshi, Atsushi Takahashi
出典(和文)	第18回 回路とシステム軽井沢ワークショップ 論文集, Vol. , No. , pp. 211-216
Citation(English)	Proc. the 18th Workshop on Circuits and Systems in Karuizawa, Vol. , No. , pp. 211-216
発行日 / Pub. date	2005, 4
URL	http://search.ieice.org/
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は電子情報通信学会に帰属します。 Copyright (c) 2005 Institute of Electronics, Information and Communication Engineers.

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

第18回　回路とシステム
軽井沢ワークショップ
The 18th Workshop on Circuits and Systems
in Karuizawa, April 25-26, 2005

計算資源割り当てスケジューリングのための直方体パッキング表現手法の検討
Evaluation of 3D-Packing Representatoin for Scheduling of Dynamically Reconfigurable Systems

小平 行秀 †,　児玉 親亮 ‡,　藤吉 邦洋 ‡,　高橋 篤司 †
† 東京工業大学　‡ 東京農工大学

Yukihide KOHIRA†, Chikaaki KODAMA‡, Kunihiro FUJIYOSHI‡ , Atsushi TAKAHASHI†
† Tokyo Institute of Technology
‡Tokyo University of Agriculture and Technology

1　はじめに

2 次元平面上に計算資源が配置された動的に再構成可能なシステムにおいて，全体タスクが少ない計算資源で短時間に完了するよう部分タスクを矩形状の計算資源にある期間割り当てる問題は，計算資源を 2 次元平面とし時間軸を第 3 軸とする 3 次元空間に，部分タスクに対応する直方体を互いに重なることなく埋め込む直方体パッキング問題と見立てることができる．しかし，部分タスクは独立した処理ではなく処理順序に制約が課されるため，その制約を満足するようなパッキングを求めなければならない．我々は，処理順序の制約を考慮した直方体パッキング問題を 3 次元スケジューリング問題と呼ぶこととする．

3 次元スケジューリング問題は，直方体パッキング問題がそうであることからも分かるように，NP 困難である．したがって，3 次元スケジューリング問題に対しては，処理順序制約を考慮しながら，直方体パッキング表現手法と確率的探索手法とを組み合わせて準最適解を求めるアプローチが考えられる．

これまで提案された直方体パッキング表現手法は，順列による表現，木構造による表現，BSG 構造による表現，グラフによる表現に大別される．順列による表現には，2 次元パッキングを表現する Sequence-Pair [4] を 3 次元に拡張した，直方体名の順列を 3 つ用いることで直方体対の相対位置制約を表現する Sequence-Triple [6]，順列を 4 つ用いて表現する Sequence-Quadruple [9]，順列を 5 つ用いて表現する Sequence-Quintuple [6] がある．木構造による表現には，2 次元パッキング表現として有名なスライス木を 3 次元に拡張した手法 [1] が提案されている．また，2 次元パッキング表現手法の O-Tree [2] を直方体パッキングへ拡張した手法 [10] がある．BSG 構造による表現には，2 次元パッキング表現手法の BSG [5] を 3 次元に拡張した 3D BSG [8] が提案されている．グラフによる表現には，2 次元パッキング表現手法の TCG(Transitive Closure Graph) を 3 次元に拡張した 3D-subTCG [7] が提案されている．これらの手法は，どんな直方体パッキングでも表現可能であるが良いパッキング結果を得にくかったり，良いパッキング結果を得やすいが表現できないパッキングが存在したりと，一長一短である．

これまでに提案された 3 次元スケジューリング手法は，3D-subTCG を用いた手法 [7] と，Sequence-Quintuple を用いた手法 [3] がある．しかし，3D-subTCG を用いた手法は，[7] で提案されている隣接解の生成手法では非許容解を生成してしまうことがある．また，Sequence-Quintuple を用いた手法 [3] は，我々が仮定している問題設定と異なり，各タスクの処理時間が可変で，指定されたタスク対が時間的に重ならなければならないという制約を与えている．

本稿では，各直方体パッキング表現手法が表現するパッキングの特徴や，各手法同士を比較することにより表現可能なパッキングの包含関係を示す．また，3 次元スケジューリング問題において使用する計算資源の大きさを指定する場合，指定しない場合に対して，どの表現が有効であるかを実験的に示す．

2　直方体パッキング表現と 3 次元スケジューリング

2.1　直方体パッキング問題

直方体パッキング問題とは，直方体の集合 M が与えられたとき，各直方体を互いに重なることなく最も小さい体積の直方体内に配置せよ，という問題である．説明の都合上，x 軸の増加 (減少) 方向を右 (左)，y 軸の増加 (減少) 方向を後 (前)，z 軸の増加 (減少) 方向を上 (下) と呼ぶ．また，直方体 a の右端の x 座標が直方体 b の左端の x 座標と同じか小さいとき，直方体 a は直方体 b の左にあるという．右，前後，上下の相対位置関係に関しても同様に定義する．直方体パッキングでは，任意の直方体対は左右前後上下の少なくとも 1 つ，高々3 つの相対位置関係を持つ．図 1(a) に示すパッキングでは，a は c の左右前後上のいずれでもなく下にあり，同様に c は b の下にある．一方，a は b の下でありかつ前にある．

ここで，4 つの直方体 a, b, c, d の任意の直方体対に相対位置関係を制約として与えるだけで図 1(a) に示すパッキングを表現する方法について考える．a は c の下，c

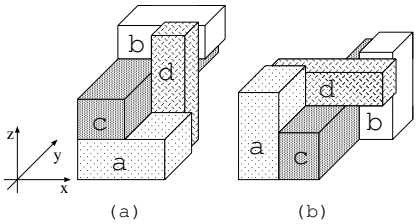


図 1: a と b に間接的に 2 方向の相対位置制約が与えられる直方体パッキング.

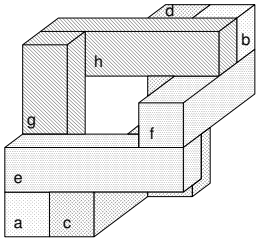


図 2: a と b に間接的に 3 方向の相対位置制約が与えられる直方体パッキング.

は b の下という制約が与えられなければ，a と c，c と b の相対位置関係を満たすことができず，このパッキングを表現することができない．このとき，c を介して間接的に a は b の下という制約が与えられる．同様に，d を介して間接的に a は b の前という制約が与えられる．つまり，直方体パッキング表現手法がこのパッキングを表現するとき，間接的に a は b の下かつ前という 2 方向の相対位置制約を与える．このような間接的な 2 方向の相対位置制約は，上下方向かつ左右方向，上下方向かつ前後方向，左右方向かつ前後方向の場合があり，間接的な 3 方向の相対位置制約は，上下方向かつ左右方向かつ前後方向の場合がある．

【性質 1】　与えられた直方体の任意の直方体対に相対位置制約を与えるだけで直方体パッキングを表現する場合，表現手法が任意の直方体パッキングを表現できるならば，その表現手法は直方体対に対して間接的に 2 方向や 3 方向の相対位置制約を与えることがある．　■

2.2　3 次元スケジューリング問題

3 次元スケジューリング問題では，幅 (x 軸方向の長さ)，長さ (y 軸方向の長さ)，処理時間 (時間軸方向の長さ) を持つタスク集合 M と，あるタスク b の処理が開始される前に，タスク a の処理が完了していなければならないというタスクの処理順序の制約を表す順序対 (a, b) の集合 C が与えられる．ここで，タスクを点に，処理順序制約を有向枝に対応させたグラフについて考える．もし，このグラフにサイクルが存在した場合，全ての処理順序制約を満たすスケジューリングを行なうことは不可能である．したがって，与えられる処理順序制約を表すこのグラフは DAG となる．3 次元スケジューリング問題は，このような入力が与えられたときに，タスクの処理時間を変えずに全ての処理順序制約を満たし，各タスクが 3 次元的に重なりがないという制約の下で，全タスクが出来るだけ少ない計算資源で短時間に完了するような各タスクの x-y 平面への配置と処理の開始時間を求める問題である．

3 次元スケジューリング問題は，直方体パッキング問題を解く手法において処理順序制約を考慮することで解くことができる．例えば，処理順序制約 (a, b) が与えられたとき，直方体パッキングにおいて，a は b の下という相対位置制約を与える表現のみを探索すれば良い．本稿では，全ての処理順序制約に対し，処理順序制約を満たすように上下制約を与える直方体パッキング表現を処理順序制約許容解と呼び，この処理順序制約許容解空間のみで，確率的探索手法を用いて準最適解を探索することにする．

2.3　順列を用いた表現手法

順列を用いた表現手法は，2 次元パッキング表現手法の Sequence-Pair [4] を 3 次元へ拡張した手法である．Sequence-Triple (ST) [6] は，3 つの順列の組 $(\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3)$ により，Sequence-Quadruple (SQuad) [9] は，4 つの順列の組 $(\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4)$ により，Sequence-Quintuple (SQuin) [6] は，5 つの順列の組 $(\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5)$ により，直方体対に対し相対位置制約を与え，直方体パッキングを表現する手法である．それぞれの表現手法において，任意の直方体対 a, b の相対位置制約は表 1 のように与えられる．説明の都合上，[6] で提案されている ST や SQuin の制約の与え方とは異なるが，直方体パッキングの性質は変わらないことに注意されたい．また，SQuad，SQuin と同様，上下制約を Γ_1, Γ_2 により制約を与えるように ST を変更した表現手法を Rotated ST とする．

順列を用いた表現手法から，各相対位置制約に基づいて x, y, z 軸それぞれの制約グラフを作成し，それらから最長パス長を計算して各直方体の座標値を定めることで直方体パッキングを得ることができる．与えられた順列を用いた表現に対応する直方体パッキングは必ず存在することが知られている [6, 9].

ST と Rotated ST は，各直方体対に対して 1 方向の相対位置制約を直接与える．この制約は推移律を満たすため，間接的に与えられる相対位置制約が直接与える相対位置制約と異なることはない．つまり，ST と Rotated ST は直方体対に 2 方向以上の相対位置制約を与えることはない．したがって，図 1，図 2 のようなパッキングを表現できないことが知られている [6, 9].

SQuad は，各直方体対に対して 1 方向の相対位置制約を直接与える．しかし，この制約は推移律を満たさないため，間接的に与えられる相対位置制約が直接与える相対位置制約と異なることがある．このため，直方体対に 2 方向以上の相対位置制約を与えることがある．Γ_1, Γ_2 の 2 つの順列で上下制約を，Γ_3, Γ_4 の 2 つの順列で左右，前後制約を与えるので，上下方向かつ左右方向，上下方向かつ前後方向の相対位置制約を与えること

表 1: 直方体 a, b の相対位置制約の与え方．各順列において前にある直方体名を表記している．() は制約を与える条件を，–はなし，$*$ はどちらが前でも良いことを示している．

表現手法	相対位置制約	Γ_1	Γ_2	Γ_3	Γ_4	Γ_5	a は b の
ST	左右	a	a	$*$	–	–	左
	前後	a	b	a	–	–	前
	上下	a	b	b	–	–	下
Rotated ST	左右	a	b	a	–	–	左
	前後	a	b	b	–	–	前
	上下	a	a	$*$	–	–	下
SQuad	左右	(上下制約がない)		a	a	–	左
	前後	(上下制約がない)		a	b	–	前
	上下	a	a	$*$	$*$	–	下
SQuin	左右	$*$	$*$	a	a	$*$	左
	前後	(x-z 平面で重なる)				a	前
	上下	a	a	$*$	$*$	$*$	下

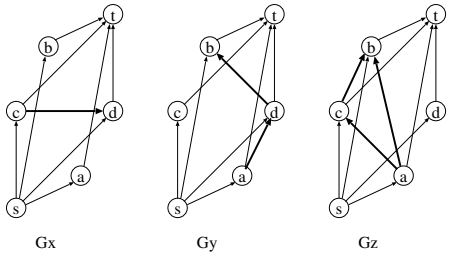


図 3: SQuad $(acbd, dacb, cadb, bcda)$ の制約グラフ．

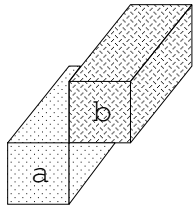


図 4: SQuin (ab, ab, ab, ab, ab) に対応するパッキング．

ができる．しかし，左右方向かつ前後方向の相対位置制約と，3 方向の相対位置制約を与えることができない．例えば，図 1(b) は a は b の左かつ前という 2 方向の相対位置制約を与えなければならないので SQuad では表現できない [9]．

【定理 1】 SQuad は Rotated ST より多くの直方体パッキングを表現できる．

（証明） Rotated ST $(\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3)$ が与えられたとする．このとき，SQuad $(\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_1, \Gamma_3)$ は Rotated ST と同じ制約を与えるのは明らかである．

また，SQuad $(acbd, dacb, cadb, bcda)$ について考える．このとき，図 3 の制約グラフを得る．これより，図 1(a) のパッキングを得ることができる．図 1(a) のパッキングは，Rotated ST では表現できないパッキングである．ゆえに，SQuad は Rotated ST より多くの直方体パッキングを表現できることが証明された． ■

SQuin は，与えられた任意の直方体パッキングに対応する表現が必ず存在することが知られている [6]．しかし，SQuin は直方体対に対して 2 方向の相対位置制約を直接与えることがある．直方体が 2 つの場合を考えてみよう．図 4 に，SQuin (ab, ab, ab, ab, ab) に対応するパッキングを示す．この順列の組が表す制約は Γ_1, Γ_2 より a は b の下，Γ_3, Γ_4 より a は b の左となり，a と b に 2 方向の相対位置制約が直接与えられる．しかし，一次元圧縮により，このパッキングより小さなパッキングが生成される．ST，Rotated ST，SQuad では，先に述べたように，直方体対に 2 方向の相対位置制約が直接与えられることがないので，このようなパッキングを得ることがない．

Rotated ST，SQuad，SQuin は，Γ_1, Γ_2 によって上下制約を表す．3 次元スケジューリング問題において処理順序制約を表す順序対 (a, b) が与えられているとき，Γ_1, Γ_2 で b より a の方が前にあれば，直方体パッキング問題で a は b の下という制約が与えられ，3 次元スケジューリング問題での処理順序制約 (a, b) を必ず満たす．全ての処理順序制約が Γ_1, Γ_2 で上記の関係にあるとき，その順列の組は処理順序制約許容解である．

本稿では，確率的探索手法として，Simulated Annealing(SA) を用いる．SA において，順列を用いた表現の中で処理順序制約許容解空間のみを探索するために，以下の隣接解の生成手法を用いる．

1. タスクを 1 つ選び，幅と長さを交換する．(直方体パッキング問題における z 軸を中心に 90° 回転させることに対応する．)
2. タスクを 2 つ選び，全ての順列において選んだ 2 つのタスクを交換して得られる順列の組が処理順序制約許容解ならば，交換する．
3. タスクを 2 つと順列を 1 つ選び，その順列において選んだ 2 つのタスクを交換して得られる順列の組が処理順序制約許容解ならば，交換する．

タスクを z 軸のみを中心に 90° 回転させるのは，x-y 平面でのタスクの向きは変えることができるが，各タスクの処理時間は変えられないとしたからである．

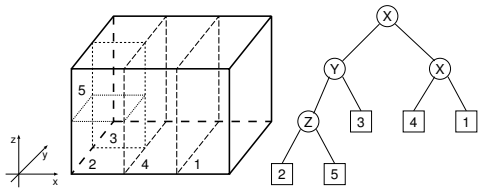


図 5: スライス構造とスライス木.

【定理 2】 ([9]) 順列を用いた表現手法において，上記の隣接解の生成手法を用いることにより，処理順序制約許容解空間の任意の解から他の任意の解を生成できる. ■

実際に処理順序制約を満たす順列を得るには，全ての処理順序制約を満たすようにタスクに全順序をつけ，その全順序に対応する順列を Γ_1, Γ_2 とすれば良い．また，処理順序制約許容解の隣接解が処理順序制約許容解であるかどうかは，$O(1)$ 時間で判定できる [9].

2.4 スライス木を用いた表現手法

スライス木を用いた表現手法 [1] では，X, Y, Z のラベルによりスライス面の向きを表す $|M|-1$ 個の内部点と，各直方体に対応する $|M|$ 個の葉を持つ 2 分木により，直方体パッキングを表現する (図 5)．例えば，内部点のラベルが Y ならば，その内部点の左側の子孫は右側の子孫より前，という相対位置制約が与えられる.

順列を用いた表現手法から直方体パッキングを得るためには $O(|M|^2)$ 時間を要するのに対し，スライス木を用いた表現手法では $O(|M|)$ 時間となり，高速に直方体パッキングを得ることができる．しかし，スライス構造は一般構造と比べ限定された構造であり，表現できないパッキングが ST や Rotated ST より多く存在する．これは，スライス構造から ST や Rotated ST へ容易に変換できることから明らかである.

【定理 3】 ST や Rotated ST は，スライス木を用いた表現手法より多くの直方体パッキングを表現できる. ■

例えば，スライス木を用いた表現手法は図 1 に示したパッキングを表現できず，図 1(a) から直方体 b を取り除いたパッキングさえも表現できない.

3 次元スケジューリング問題においては，処理順序制約が与えられている 2 つのタスクに最も近い共通先祖のラベルが Z で，処理順序制約の順序対における前のタスクが左側の子孫に，後のタスクが右側の子孫にあれば，その処理順序制約を満たす．全ての処理順序制約において上記の関係を満たすとき，そのスライス木は処理順序制約許容解である.

SA において，スライス木を用いた表現の中で処理順序制約許容解空間のみを探索するために，以下の隣接解の生成手法を用いる.

1. スライス木の 1 点 (内部点または葉) を選び，幅と長さを交換する．(直方体パッキング問題において，選んだ点とその子孫からなる全ての直方体を z 軸を中心に 90° 回転させることに対応する．)
2. スライス木の中から，先祖と子孫の関係にない 2 点 (内部点または葉) を選び，それぞれの点を根とした 2 つの部分木を交換して得られるスライス木が処理順序制約許容解ならば，交換する.
3. スライス木の内部点を 1 つ選び，その点のラベルをランダムに付け替えて得られるスライス木が処理順序制約許容解ならば，ラベルを付け替える.

[1] では，x, y, z 軸を中心にした 90° 回転と (2) の隣接解の生成手法のみが提案されている．しかし，我々は 3 次元スケジューリング問題では各タスクの処理時間を変えないとしたため，x 軸と y 軸を中心にした 90° 回転は行わない．すると，(1) と (2) の隣接解の生成手法のみでは Z とラベル付けされている内部点の数が変わらない．つまり，初期解に依存した 3 次元スケジューリング結果しか得られなくなってしまう．そこで，これを避けるために (3) の隣接解の生成手法を加えた．しかし，この隣接解の生成手法は，順列を用いた表現の隣接解の生成手法と異なり，任意の処理順序制約許容解から他の任意の処理順序制約許容解を必ずしも生成できない．また，処理順序制約許容解であるかを判定するためには，$O(|C| \cdot |M|)$ 時間を要してしまう.

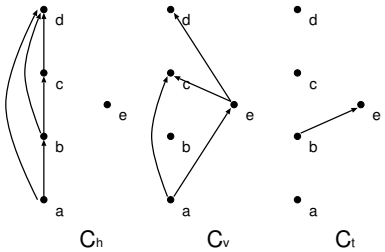
2.5 木構造データを用いた表現手法

O-Tree [2] を基にして提案された木構造データを用いた直方体パッキング表現手法 [10] は，兄弟関係を区別しない根付き多分木である x 制約，及び y 制約を表す 2 つの制約木と，z 制約を表す 1 つの順列により，直方体パッキングを表現する手法である．与えられた左下前詰め直方体パッキングに対応する木構造データを用いた表現が必ず存在する [10]．また，SQuin の解の総数が $(|M|!)^5$ に対して，この表現手法の解の総数は $(|M|+1)^{2(|M|-1)} \cdot |M|! < (|M|!)^5$ となり解空間が小さい．しかし，SQuin と同様，直方体対に 2 方向の相対位置制約が直接与えられる場合がある．また，DAG を木構造に埋め込むのが難しいため，3 次元スケジューリング問題に拡張するのは，困難であると考えられる.

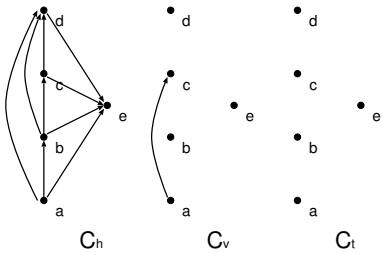
2.6 3D BSG

2 次元パッキング表現手法の BSG [5] を 3 次元に拡張した 3D BSG [8] は，部屋と呼ばれる立方体と，部屋対の相対位置制約を与えるセグと呼ばれる仕切り板により，直方体パッキングを表現する手法である．$|M|$ 以上の部屋からなる 3D BSG を用意しておき，部屋に高々1 個の直方体を割り当てることで直方体パッキングを表現する．[8] では，部屋数を $O(|M|)$ に抑えることにより，直方体パッキングを $O(|M|)$ 時間で得ている.

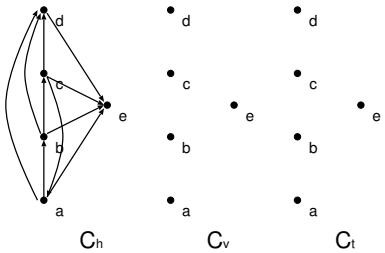
3D BSG 構造を y 軸に垂直な平面へ y 軸に平行に投射すると，2 次元の BSG と同じ構造になる．2 次元の BSG 構造は任意の部屋対に 1 方向の相対位置制約を与え，この制約が推移律を満たすため，間接的な 2 方向の相対位置制約を与えることはない．ゆえに，3D BSG は，上下かつ左右方向の相対位置制約と，3 方向の相対位置制約を与えることができないので，表現できないパッキングが存在する．また，SQuin や木構造データを



(a) 初期の 3D-subTCG (許容解).



(b) C_v の (e, d) を C_h に Transpositional Move.



(c) C_v の (a, c) を C_h に Transpositional Move. サイクル (a, b, c) により非許容解.

図 6: 3D-subTCG が非許容解を生成する例.

用いた表現手法と同様，直方体対に 2 方向の相対位置制約が直接与えられる場合がある．さらに，3 次元スケジューリング問題において，相対位置制約が与えられている部屋に処理順序制約を満たすようにタスクを割り当てることは，困難であると考えられる．

2.7 3D-subTCG

3D-subTCG [7] は，順列を使わず，推移律が成り立つ 3 つの DAG から一部の推移的な枝を省略した制約グラフにより直方体パッキングを表現する手法である．しかし，与えられた 3 つの DAG が 3D-subTCG であると判定することが難しく，解空間を探索する際に許容な隣接解の生成も困難である．[7] で提案されている隣接解の生成手法では非許容解を生成してしまう場合がある (図 6).

3 実験結果

3 次元スケジューリング問題における各直方体パッキング表現手法の有効性を調べるため，処理順序制約許容解

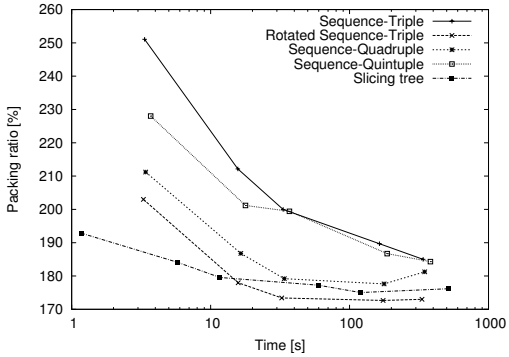


図 7: 計算資源の大きさを指定しない場合の処理順序制約数 40 における探索時間とパッキング率の関係.

空間のみを探索する順列を用いた表現手法とスライス木を用いた表現手法を SA に組み込んで実験した．SA の各パラメータは，[11] を参考に設定した．具体的には，初期温度と終了温度は予備実験を基に定めて，温度降下係数を変更することによって探索時間を変更して実験を行なった．入力には [10] で用いられたデータと同じである，幅，長さ，処理時間をそれぞれ 5 から 50 の整数値からランダムに決めて作成した 30 個のタスクを用いた．処理順序制約はグラフで表現したときに DAG になるように，ランダムに決めたものを用いた．実験には，Pentium4 3.06GHz/512K，512MB RAM の計算機を使用した．

まず，使用する計算資源の大きさを指定せずに実験を行なった．SA の評価関数はパッキング率とした．パッキング率とは，得られた直方体パッキングの外周直方体体積を直方体の体積の総和で割った値である．処理順序制約数を 40 とし，それぞれの表現手法，及び探索時間で，SA を 50 回適用したときの平均の結果を図 7 に示す．

探索時間を短く設定したときは，スライス木を用いた表現手法のパッキング率が最も良くなる傾向にあることが分かった．しかし，探索時間を長く設定したときは，スライス木を用いた表現手法は，探索時間を短く設定したときからの改善がそれほど大きくなく，Rotated ST のパッキング率の方が良くなる傾向にあった．また，探索時間をどのように設定しても，SQuad や SQuin よりも Rotated ST のパッキング率の方が良くなる傾向にあった．このような結果は処理順序制約数を 10,20,30 に変えて実験を行なった場合にも見られた．

次に，使用する計算資源の大きさを指定して，実験を行なった．計算資源の幅と長さが指定されているとき，直方体パッキングの外周直方体の幅と長さから，幅の違反量，長さの違反量が求まる．そこで，SA の評価関数は，$\alpha\cdot$(幅の違反量＋長さの違反量)＋$\beta\cdot$高さ＋$\gamma\cdot$パッキング率 とした．(第 1 項) $\gg$ (第 2 項) $\gg$ (第 3 項) とすることにより，計算資源の大きさ指定を満たし，高さをより低くしつつ，より良いパッキング率となる解が得ら

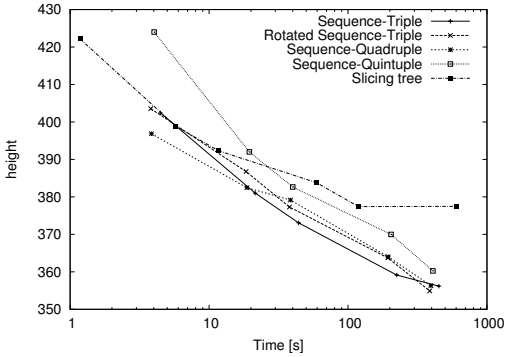


図 8: 計算資源の大きさを指定する場合の処理順序制約数 40 における探索時間と高さの関係.

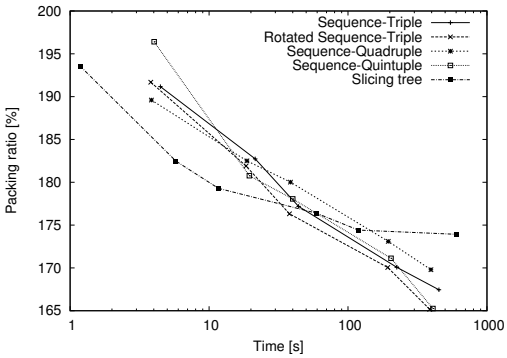


図 9: 計算資源大きさを指定する場合の処理順序制約数 40 における探索時間とパッキング率の関係.

れると考えられる．実際には，第 1 項 $\simeq 100 \cdot$ (第 2 項) $\simeq 10000 \cdot$ (第 3 項) となるように設定し，実験を行なった．

処理順序制約数を 40，計算資源の幅と長さを 50 に指定し，それぞれの表現手法，及び探索時間で，SA を 50 回適用した．探索時間が 3 秒のときに，ST では 39 回，SQuin では 5 回，大きさの指定を違反するパッキングが得られた．そこで，大きさの指定を満たしたパッキングの平均の高さの結果を図 8 に，平均のパッキング率の結果を図 9 に示す．

計算資源の大きさを指定する場合においても，指定しない場合と同じような結果が得られた．ただし，全ての直方体パッキング表現手法において，計算資源の大きさを指定する場合の方が，指定しない場合より，パッキング率が良くなっている．これは，大きさを指定することにより SA にて探索する解空間が小さくなり，より効率良く解の探索が行なわれたからであると考えられる．

4 まとめ

本稿では，直方体パッキングの各表現手法の特徴を示し，3 次元スケジューリング問題において，各直方体パッキング表現手法の有効性を比較した．探索時間を短く設定したときには，解空間が小さく，短時間でより多くの解を探索できるスライス木を用いた表現手法が良い結果になった．しかし，探索時間を長く設定すると，順列を用いた表現手法の方が良い解を得る傾向にあった．この理由は，順列を用いた表現手法の方がより多くの解が表現できること，スライス木を用いた表現手法は任意の処理順序制約許容解を生成できるとは限らないこと，などが考えられる．また，順列を用いた表現手法の中では，Rotated ST が最も良い結果を得た．このことから，直方体パッキング問題に対しては，表現できる直方体パッキングが最も少ないスライス木を用いた手法で十分である [1] ことと同様に，3 次元スケジューリング問題に対しては，順列を用いた手法の中でも表現できる直方体パッキングが最も少ない Rotated ST で十分であると考えられる．

今後の課題は，他に良い隣接解の生成手法がないか，別の制約が課された場合でも，用いる直方体パッキング表現は Rotated ST で十分であるのか，他の直方体パッキング表現手法が 3 次元スケジューリング問題に応用できないか，などを検討することである．

参考文献

[1] L. Cheng, L. Deng, and D.F. Wong. Floorplan Design for 3-D ICs. In *Proc. The 12th Workshop on SASIMI*, pp. 395–401, 2004.

[2] P.N. Guo, T. Takahashi, C.K. Cheng, and T. Yoshimura. Floorplanning Using a Tree Representation. *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.*, Vol. 20, No. 2, pp. 281–289, 2001.

[3] M. Kaneko, J. Yokoyama, and S. Tayu. 3D Scheduling Based on Code Space Exploration For Dynamically Reconfigurable Systems. In *Proc. ISCAS*, Vol. 5, pp. 465–468, 2002.

[4] H. Murata, K. Fujiyoshi, S. Nakatake, and Y. Kajitani. VLSI Module Placement Based on Rectangle-Packing by the Sequence Pair. *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.*, Vol. 15, No. 12, pp. 1518–1524, 1996.

[5] S. Nakatake, K. Fujiyoshi, H. Murata, and Y. Kajitani. Module Packing Based on the BSG-Structure and IC Layout Aplications. *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.*, Vol. 17, No. 6, pp. 519–530, 1998.

[6] H. Yamazaki, K. Sakanushi, S. Nakatake, and Y. Kajitani. The 3D-Packing by Meta Data Structure and Packing Heuristics. *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E82-A, No. 4, pp. 639–645, 2000.

[7] P.H. Yuh, C.L. Yang, Y.W. Chang, and H.L. Chen. Temporal Floorplanning Using 3D-subTCG. In *Proc. ASP–DAC*, pp. 725–730, 2004.

[8] 山岸弘和, 二宮洋, 浅井秀樹. 3D BSG 構造を用いた 3 次元パッキング表現手法. 信学技報, VLD2004-65, pp. 25–30, 2004.

[9] 小平行秀, 児玉親亮, 藤吉邦洋, 高橋篤司. 動的再構成可能なシステムのための計算資源割り当てスケジューリング手法. 信学技報, VLD2004-67, pp. 37–42, 2004.

[10] 川井英教, 藤吉邦洋. 木構造データを用いた直方体パッキング表現手法. 信学技報, VLD2004-29, pp. 49–54, 2004.

[11] 壷井雅史, 坂主圭史, 高橋篤司. Q-sequence と SA 法を用いて高品質な配置を高速に得るためのパラメータ設定に関する一考察. 第 15 回 回路とシステム (軽井沢) ワークショップ, pp. 125–130, 2002.