

特別研究報告書

コンテナ積載計画問題における 重量バランスを考慮した解の ZDDによる列挙

指導教員：川原 純 准教授

京都大学工学部情報学科

古渡 健太

2024/01/30

コンテナ積載計画問題における
重量バランスを考慮した解の
ZDD による列挙

古渡 健太

内容梗概

☒ 内容梗概 (和文) ☒

english title

KOWATARI Kenta

Abstract

☒ 内容梗概 (英文) ☒

コンテナ積載計画問題における 重量バランスを考慮した解の ZDD による列挙

目次

1	はじめに	1
2	準備	2
2.1	BDD	2
2.2	ZDD	3
2.3	BDD・ZDD の演算	4
2.4	BDD・ZDD による \Rightarrow の表現	4
2.5	ZDD による線型重み最小化	4
2.5.1	各種関数	4
3	既存手法	6
3.1	CSPP の定式化	6
3.2	解集合を表現する BDD の構築方法	7
3.2.1	バイナリエンコード	7
3.2.2	制約条件の表現	7
3.2.3	解集合を表現する BDD の構築	10
4	提案手法	11
4.1	解集合を表現する ZDD の構築方法	11
4.1.1	制約条件の表現	11
4.1.2	解集合を表現する ZDD の構築	12
4.2	コンテナ重量の表現と重心の最適化	13
4.2.1	コンテナ重量の表現	14
4.2.2	重心の最適化	15
5	実験結果	17
5.1	BDD と ZDD による解集合の表現	17
5.1.1	インスタンス	17
5.1.2	結果	18

5.1.3	考察	19
5.2	重量バランスを考慮した解の ZDD による列挙	19
5.2.1	インスタンス	19
5.2.2	結果	19
5.2.3	考察	19
6	おわりに	19
	謝辞	19
	参考文献	19

1 はじめに

コンテナ積載計画問題 (CSPP; Container Stowage Planning Problem) とは、各種の制約条件を満たしながら、コンテナ船へのコンテナの最適な積載配置を決定する問題である。古くは1984年のJ. J. Shieldsによる研究で、コンテナ船の能力を最大限活用するためにコンテナの積載計画を最適化させる重要性が述べられている [1]。最適化の目的は、荷役コストを最小化しながらコンテナ船の利用効率を最大化することであるが、この目的に従ってコンテナの配置を決定することは、非常に幅広く複雑な制約条件と目的を併せ持つ最適化問題である。

この複雑性を具体的に述べると、まずコンテナには次のような性質の幅広さがある。すなわち長さ (主に20ft, 40ft, 45ft)、高さ (主に8.6ft, 9.6ft)、種類 (DRY; 通常のコンテナ, REEFER; 冷蔵・冷凍機能を備えたコンテナ, OOG; 上部や側部に天井や壁が存在しないコンテナ, TANK; タンク形状のコンテナ)、内容物の重量、内容物の種類 (IMDG Codes; The International Maritime Dangerous Goods Codes に定められたコンテナ内容物の区別) [2] などの性質が存在し、その性質に伴う船との間の制約条件や、コンテナ同士の制約条件が存在する。また、コンテナが船から下される予定の港と、コンテナ船がある港を出港してからが寄港する港の順番との兼ね合いによって生まれる、コンテナの積載順番の制約なども存在する。これら以外にも、コンテナ船の構造の違い、港によって異なる荷役機器の種類など、現実のCSPPには考慮しなければならない制約条件が非常に多く存在する。

また、このような制約条件複雑の他に、目的の複雑さも存在する。具体的には、荷役機器の動きにかかる時間の最小化、シフト回数 (積み下ろしたい対象のコンテナ以外のコンテナを移動させる作業) の最小化、使うことができなくなるスペースの最小化、重量の分配の最適化、などを目的とした研究が存在するほか、多目的最適化の研究も存在する。

こういった複雑なCSPPを解く研究では、様々なアプローチと問題の単純化の手法が試されている。

問題の単純化の手法としては、REEFERの存在を考慮しないもの、OOGの存在を考慮しないもの、IMDGによる内容物の違いを考慮しないもの、などが存在する。また、CSPPを解くアプローチとしては、厳密アルゴリズム、貪欲法、ヒューリスティクス、決定木ベースのアルゴリズム、機械学習など、様々なア

アプローチが検討されている．中でも，決定木ベースのアプローチの1つとして，R. M. Jensen らによる，決定木の一種である BDD (Binary Decision Diagram) を用いた CSPP の解列挙の研究 [3] があり，制約条件を満たすコンテナ配置の解を表現する BDD の構築を行なっている．

本研究では，BDD の派生系である ZDD (Zero-suppressed BDD) を用いた CSPP の解列挙とそれを用いた最適化の手法を提案する．重量を考慮しない問題設定において，同じ解集合を表現する BDD・ZDD について，ほとんど全ての場合で ZDD の節点数が BDD の節点数よりも少なくなることを確認した．また，ZDD を用いた線型重み最適化の手法によって，コンテナ重量を考慮して重心が最適な解の取得を行なった．

2 準備

2.1 BDD

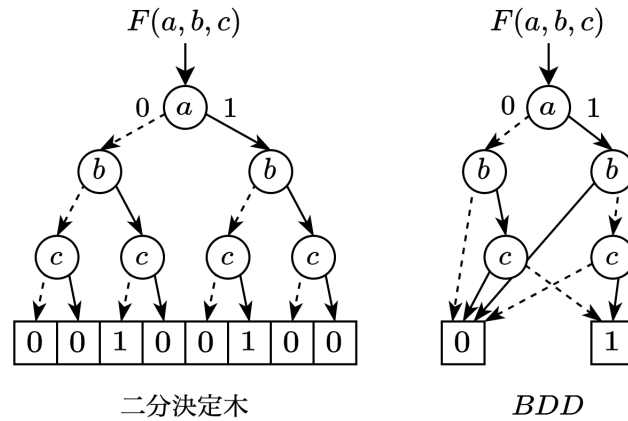


図 1: 二分決定木, BDD

BDD は論理関数を DAG (Directed Acyclic Graph; 有効非巡回グラフ) で表現する手法である． $F(a, b, c) = abc \vee \bar{a}b\bar{c}$ を二分決定木・BDD で表現した例を図 1 に示す．破線の矢印が 0-枝，実線の矢印が 1-枝を表す．BDD は，論理関数の値を全ての変数について場合分けした結果を表す二分決定木に対して，簡約化処理を可能な限り加えることによって得られる．これによって，論理関数をコンパクトかつ一意に表せることが知られている．まず，二分決定木においては，各節点の 1-枝と 0-枝は，その節点が表現する変数に 1 を割り当てるかどうかの

場合分けを表し、値の0である葉 (0-終端節点) と1である葉 (1-終端節点) はそれぞれその葉に対応する変数割り当てが偽となるか真となるかに対応する。この二分決定木に対して、場合分けする変数の順序を固定し、(1) 冗長な節点を削除する、(2) 等価な節点を共有する、という簡約化規則を可能な限り加えることで、BDDを得ることができる。

また、BDDを用いて組合せ集合を表現することもできる。組合せ集合は、特性関数と呼ばれる論理関数に対応付けることができるが、この特性関数をBDDで表すことにより、その組合せ集合を非明示的に表現できる。

2.2 ZDD

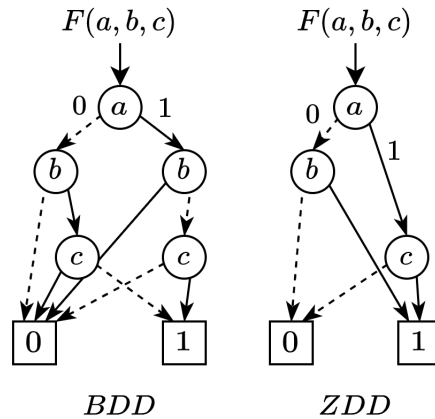


図 2: BDD, ZDD

ZDDは、組合せ集合データを表現・操作するのに特化したBDDの派生系である。 $F(a, b, c) = abc \vee \bar{a}bc$ をBDD・ZDDで表現した例を図2に示す。等価な節点を共有する規則はBDDと同様であるが、冗長な節点を削除する規則が異なる。ZDDの場合は、1-枝が0-終端節点を指している場合に、これを取り除くという規則を用いる。この規則を用いた場合でも、表現の一意性は失われない。

一般に、組合せ集合に類似する部分組合せが多数含まれる場合、それを表現するBDDには等価なサブグラフが多く出現する。これらが互いに共有されることによって、コンパクトに圧縮された表現が可能となる、特に疎な組合せ集合の場合、ZDDではその簡約化規則から、組合せ集合に登場しない要素に関する節点が削除されるため、同じ組合せ集合を表現するBDDよりも効率よく組

合せ集合を表現・操作することができる。BDD と ZDD のデータ圧縮率の違いは、組合せ集合の各要素に含まれるアイテムの出現頻度に依るが、例えばアイテムの出現頻度が 1%である場合、ZDD は BDD よりも 100 倍コンパクトになる可能性がある。

2.3 BDD・ZDD の演算

論理関数を BDD・ZDD で表現したとき、この論理関数の AND/OR 演算は、同じ論理関数を特性関数とした組合せ集合の交わり (intersection)/結び (union) の演算にそのまま対応する。従って、多数の要素を含む集合同士の演算を、BDD 処理系で一挙に実行することが可能である。

ZDD の場合も同様であり、ZDD は ZDD 同士の様々な演算を、圧縮されたデータ量にほぼ比例する計算時間で実行できるという利点も持つ。すなわち、圧縮されたデータを、元のデータ量に戻すことなく、圧縮されたままの状態でも高速に演算処理が可能である。

2.4 BDD・ZDD による \Rightarrow の表現

論理関数 f と g が与えられたとき、 $f \Rightarrow g$ は $\bar{f} \vee g$ と等価である。また、論理関数は BDD で表現することができ、 \wedge や \vee の論理演算を BDD のまま計算するアルゴリズムが知られている。従って、 f と g を表現する BDD が与えられたときに、 $\bar{f} \vee g$ を計算することで、 $f \Rightarrow g$ を表現する BDD が構築できる。

2.5 ZDD による線型重み最小化

ZDD を用いることで、線型重み最適化が可能である。ZDD の各変数に対して重みを設定することで、ZDD が表現する組合せ集合の中から、重みの総和が最小・最大の組合せを取得したり、上位複数個の解を表現する ZDD を取得したり、重みの総和が指定した値以上・以下・未満・より大きい組合せを表現する ZDD を取得したりすることができる。

本研究では、SBDD_helper ライブラリに用意された `getMinimum` 関数、`weightGE` 関数、そして `getKLightest` 関数を使用する。以下に、それぞれの関数のアルゴリズムを説明する。

2.5.1 各種関数

`getMinimum` 関数

ZDD 変数毎の重みを指定するための、整数を要素とするベクトル $weights$ と ZDD 変数を要素とする空の集合を引数とするメソッドで、 $ZDDf$ に含まれる集合のうち、重み最小の集合とその重みを返す。

Algorithm 1 getMinimum

1: something

weightGE 関数

$ZDDf$, 整数 $bound$, そして ZDD 変数毎の重みを指定するための、整数を要素とするベクトル $weights$ を引数とし、 f に含まれる集合のうち、重みが $bound$ 以上の集合からなる ZDD を返す関数である。

内部的には、区間メモ化探索技法 [4] と呼ばれる手法を用いている。区間メモ化探索技法を用いて、まず f に含まれる集合のうち、重みが $bound - 1$ 以下の集合からなる ZDD を構築し、これを $weightLE(bound - 1)$ とする。 f と $weight(bound - 1)$ の差集合を求めることで、目的の ZDD を得る。

Algorithm 2 weightGE

1: something

weightRange 関数

$ZDDf$, 整数 $lower_bound$, 整数 $upper_bound$, そして ZDD 変数毎の重みを指定するための、整数を要素とするベクトル $weights$ を引数とし、 f に含まれる集合のうち、重みが $lower_bound$ 以上、 $upper_bound$ 以下である集合のみからなる ZDD を返す関数である。

Algorithm 3 weightRange

1: something

getKLightest 関数

ZDD 変数毎の重みを指定するための、整数を要素とするベクトル $weights$ と整数 k , 整数 $strict$ を要素とする空の集合を引数とするメソッドで、 $ZDDf$ に含まれる集合のうち、重み最小の集合とその重みを返す。

Algorithm 4 getKLighestest

1: something

3 既存手法

3.1 CSPP の定式化

CSPP の解列挙の問題を, Jensen に基づき定式化する. セル (コンテナが置かれる可能性がある位置) の配置については簡単のため 2 次元とし, 水平方向 T , 垂直方向 V の $T \times V = M$ 箇所のセルとする. セルの位置を表現する変数として $c_i (i \in \{1, 2, \dots, M\})$ を用意する. 図に示す通り, 添え字は下左端セルを 1 として水平方向に増えていき, T 個ずつ垂直方向に重なるように並ぶ.

コンテナは 1 つずつ個別にではなく, コンテナ複数を含むグループ単位で区別されるものとし, グループの番号を $1, 2, \dots, G$ とする. また, 値 0 を ”コンテナが置かれていない” を表現する特別なグループ番号とする. $c_i = g (g \in \{0, 1, \dots, G\})$ によってセル c_i にグループ g のコンテナが置かれていることを表現する. グループごとのコンテナの個数については, インスタンスごとに定められているものとし, グループ 0 も含めたグループ毎のコンテナの数の合計がセルの総数 M になるものとする.

以上のように表現されるセルへのコンテナの配置に対して, 様々な制約条件を考え, 制約条件を満たすコンテナの配置を全て求める問題が, CSPP の解列挙の問題である.

先行研究において考慮される制約条件としては, 次のようなものが存在する.

1. 1 つのセルに 20ft と 40ft のコンテナを同時に置くことはできない.
2. 20ft コンテナは 40ft コンテナの上に置くことはできない.
3. あるセルに 20ft コンテナが置かれるならば, 同じセルにもう 1 つの 20ft コンテナが必ず置かれる.
4. コンテナは宙に浮かない (高さ 2 以上の位置のセルにコンテナが置かれたとき, その下には必ず別のコンテナが置かれている).
5. 1 つのコンテナは 1 つのセルにのみ置かれる.
6. 1 つの列 (水平座標が等しいセルの集合) に置かれるコンテナの総重量は, 重量上限を超えない.
7. 荷下ろしされる港の番号を, 寄港する順番に $1, 2, \dots$ とすると, 水平座標が

等しいセル集合の中で、垂直座標が小さい方から順に、コンテナの荷下ろし港の番号は降順に並ぶ。

本研究では簡単のため、コンテナのサイズの 20ft と 40ft を区別しないこと、コンテナを個別にではなくグループで区別すること、列ごとの重量制限を考慮しないこと、コンテナの輸送先港を区別しないこととする。従って、上記 4. の制約条件のみを採用する。

3.2 解集合を表現する BDD の構築方法

以上の問題設定の上で、解集合を表現する BDD を構築するための方法を述べる。

3.2.1 バイナリエンコード

セルを表現する変数 c_i に割り当てるグループ番号は 2 値よりも多い場合がある。一方、BDD と ZDD はともに 0-1 論理変数のみを扱うことができる。取りうる値が 2 値よりも多い変数を BDD・ZDD で扱うことは、次のように変数のバイナリエンコードを行うことによって実現できる。

1. 変数 x_i が取りうる値の数を N とした時、1 変数あたり $\log[N] + 1$ 個の 0-1 変数を用意して、 $x_i^{\log[N]}, x_i^{\log[N]-1}, \dots, x_i^0$ とする。
2. $x_i^{\log[N]}, x_i^{\log[N]-1}, \dots, x_i^0$ とした時、これを x_i がとる値の 2 進数表示であるとする。

以上より、取りうる値が 0 から G である本問題設定では、1 つのセルあたり $\log[G] + 1$ 個の 0-1 論理変数でバイナリエンコードを行う。

3.2.2 制約条件の表現

次の 2 つの制約条件を BDD で表現する。

(1) コンテナは宙に浮かない

(2) あるグループのコンテナの数を k_g とした時、値 k を取る変数 c_i の数は k_g 個である。

まず、(1) の制約条件条件については、コンテナは下から床または別のコンテナによる支えがない限り、置くことはできないということを意味するものである。この制約条件は、次のように言い換えることができる。すなわち、あるセルにコンテナが置かれないならば、その上のセルにもコンテナは置かれない、ということである。さらにこれを言い換えると、あるセル変数にグループ番号 0 が割り当てられたならば、垂直方向でそのセルの 1 つ上のセルを表す変数にも、

グループ番号0が割り当てられなければならない、と言い換えることができる。
これを論理式で表現すると、

$$c_i = 0 \Rightarrow c_{i+T} = 0, \forall i$$

と表現できる。この論理式に対応する BDD を構築する。

続いて、(2) の制約条件については、インスタンス毎に定められたグループ毎のコンテナの数に対し、セル変数に割り当てられるグループ番号との間に、誤差が生まれないようにする、というものである。これは、次のように表現できる。

まず、 n 個の論理変数のうち、 k 個の論理変数が1を取る時に真、それ以外るとき偽となる論理関数を考える。図3のように、論理変数に対応する節点を規則的に配置し、また、0-枝と1-枝は、0-終端節点と1-終端節点を配置するようにする。この時、終端節点を左端から $0, 1, \dots, k, \dots, n$ 番目の終端節点とすると、 k 番目の終端節点のみを1-終端節点、それ以外を0-終端節点とする。こうして構築された DAG に対して BDD の簡約化規則を用いて得られた BDD は目的の論理関数を表現している。これを、 ${}_nC_k$ を表現する BDD であることから $nCk\text{BDD}$ と呼ぶこととする。

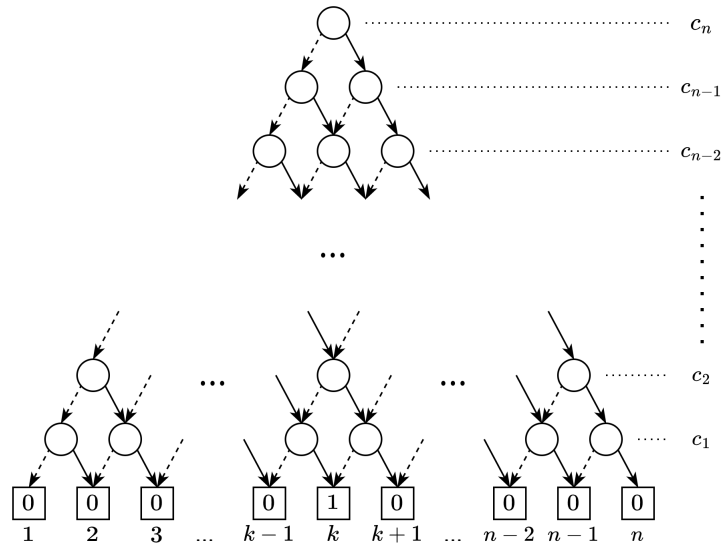


図3: ${}_nC_k$ を表現する DAG

次に、変数がバイナリエンコードされている場合を考える。ここでは、バイナリエンコードする前の変数をメタ変数、バイナリエンコードした変数をバイナリ変数と呼ぶこととする。 n 個のメタ変数のうち、 k 個のメタ変数が値 v を取る

とき真, それ以外のとき偽となる論理関数を考える. 例として1つのメタ変数あたり, 3個のバイナリ変数によってバイナリエンコードがされている場合に, 図4のようなBDDは, 「メタ変数が5すなわち2進数表示で101を取る時に真, それ以外のとき偽となる」という論理関数を表現する. これを, バイナリエンコードする前の, $_nC_k$ BDDの簡約化前のDAGの節点の位置にそれぞれ配置することで, 図5のようなDAGを得る. これは $n = 3, b = 3, k = 2, v = 5$ の場合の例である. このDAGに対してBDDの簡約化規則を用いて得られたBDDは, 目的の論理関数を表現している. 任意の $n(n \leq 1), k(k \leq n), b(1 \leq b), v(0 \leq v \leq 2^b - 1)$ に対して, 「1個のメタ変数あたり b 個のバイナリ変数でバイナリエンコードされた n 個のメタ変数のうち, k 個のメタ変数が値 v を取るとき真, それ以外のとき偽となる」という論理関数を $_nC_k(b, v)$ とし, 以降, これを表現するBDDを $_nC_k(b, v)$ BDDと呼ぶこととする.

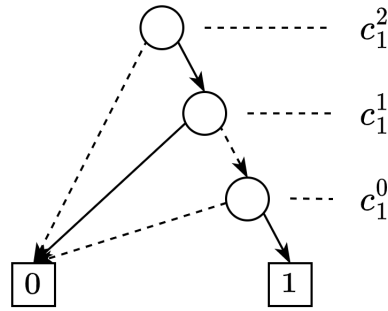


図 4: $c_1 = 5 = 101_2$ を表現する BDD

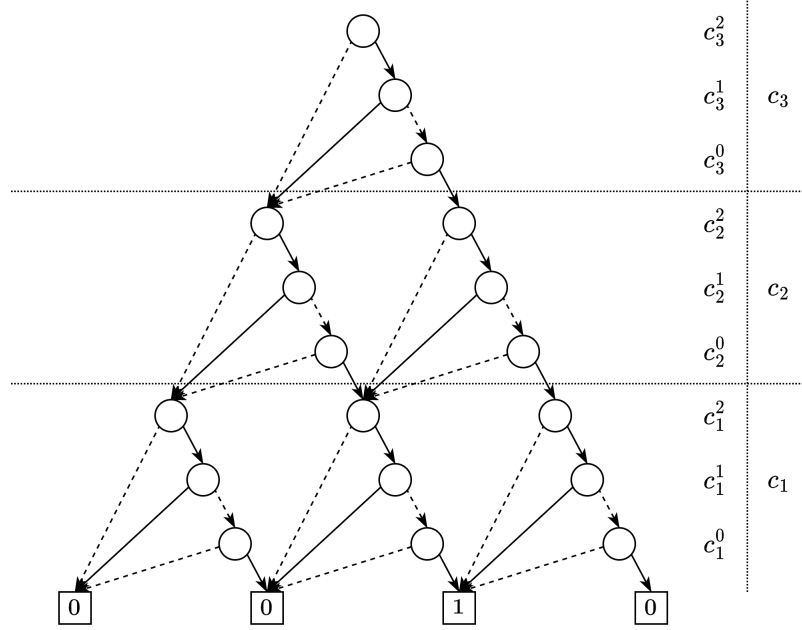


図 5: ${}_3C_2(3,5)$ を表現する DAG

3.2.3 解集合を表現する BDD の構築

解集合を表現する BDD は、次の疑似コードで示すように、解が満たすべき制約条件を表す BDD 全ての intersection を取ることで得られる。

Algorithm 5 解集合を表現する BDD の構築

- 1: {コンテナは宙に浮かない を表現する BDD の構築}
 - 2: $BDDNoFloating \leftarrow BDD(1)$
 - 3: **for** $i = 1; i \leq M - T; i++$ **do**
 - 4: $NoFloating \leftarrow NoFloating \text{ and } (c_i = 0 \Rightarrow c_{i+T} = 0 \text{ を表現する BDD})$
 - 5: **end for**
 - 6: { 解集合を表現する BDD の構築 }
 - 7: $BDDtargetBDD \leftarrow NoFloating$
 - 8: **for** $g = 0; g \leq G; g++$ **do**
 - 9: $targetBDD \leftarrow targetBDD \text{ and } (nCk(b, g) \text{ を表現する BDD})$
 - 10: **end for**
-

4 提案手法

既存手法の場合と同様の問題設定に対して、ZDD によって解集合を表現する手法と、コンテナに対して重量を導入し、線型重み最適化を行う手法を提案する。

4.1 解集合を表現する ZDD の構築方法

既存手法の場合と同様の問題設定に対して、ZDD によって解集合を表現する手法を提案する。

4.1.1 制約条件の表現

BDD の場合と同様、以下 2 つの制約条件を考える。(1) コンテナは宙に浮かない

(2) あるグループのコンテナの数を k_g とした時、値 k を取る変数 c_i の数は k_g 個である。

まず、(1) については、 $c_i = 0 \Rightarrow c_{i+T} = 0, \forall i$ に論理式に対応する ZDD を構築する。続いて、(2) については、nCkBDD を元に考える点は BDD の場合と同じであるが、バイナリエンコードされている場合の ZDD の構築方法が異なる。例として 1 つのメタ変数あたり、3 個のバイナリ変数によってバイナリエンコードされているとき、例えば図 6 のような ZDD は、「メタ変数が 5 すなわち 2 進数表示で 101 を取る時に真、それ以外るとき偽となる」という論理関数を表現する。これを、バイナリエンコードする前の、 $_nC_k$ BDD の簡約化前の DAG の節点の位置にそれぞれ配置することで、図 7 のような DAG を得る。この DAG に対して ZDD の簡約化規則を用いて得られた ZDD は、目的の論理関数、すなわち $_nC_k(b, v)$ を表現している。以降、 $_nC_k(b, v)$ を表現する ZDD を $_nC_k(b, v)$ ZDD と呼ぶこととする。

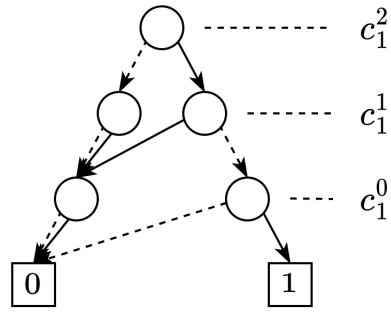


図 6: $c_1 = 5 = 101_2$ を表現する ZDD

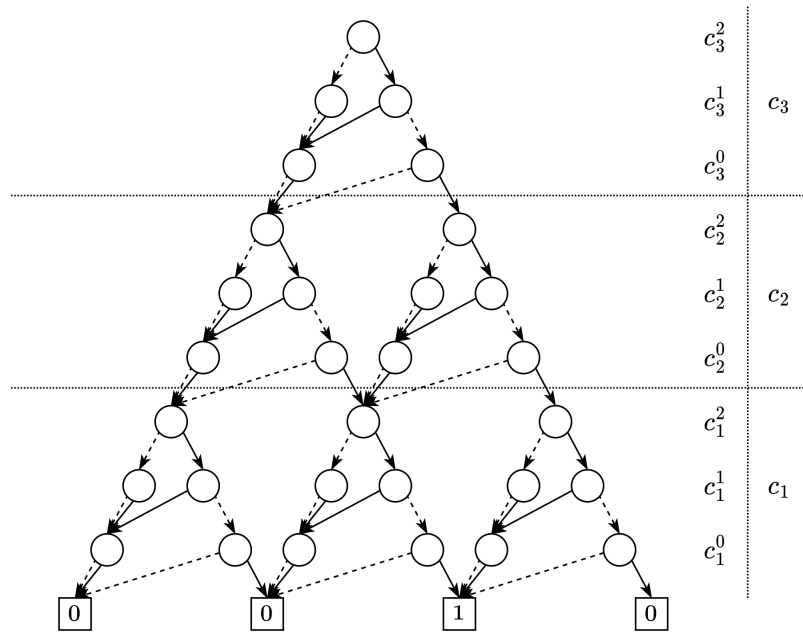


図 7: ${}_3C_2(3, 5)$ を表現する DAG

4.1.2 解集合を表現する ZDD の構築

解集合を表現する ZDD は，次の疑似コードで示すように，解が満たすべき制約条件を表す ZDD 全ての intersection を取ることで得られる．

Algorithm 6 解集合を表現する ZDD の構築

```
1: {コンテナは宙に浮かない を表現する ZDD の構築}
2:  $ZDDNoFloating \leftarrow getPowerSet(M \times b)$  {初期 ZDD として, }
3: for  $i = 1; i \leq M - T; i++$  do
4:    $NoFloating \leftarrow NoFloating \text{ and } (c_i = 0 \Rightarrow c_{i+T} = 0 \text{ を表現する BDD})$ 
5: end for
6: { 解集合を表現する ZDD の構築 }
7:  $BDDtargetBDD \leftarrow NoFloating$ 
8: for  $g = 0; g \leq G; g++$  do
9:    $targetBDD \leftarrow targetBDD \text{ and } (nCk(b, g) \text{ を表現する BDD})$ 
10: end for
```

4.2 コンテナ重量の表現と重心の最適化

ここまでの問題設定では、グループ毎の値は、「コンテナを置かない」を表現する 0 という値を除いて、グループ間の区別以上の情報を持たないものだった。そこで、グループ毎の値に何らかの意味を付与することによって、より複雑な問題設定を検討する。ここでは、グループ毎の値がコンテナの重量に対応した値であるという設定を導入する。コンテナの重量は、コンテナが持つ情報の中でも、船の安定性や構造上の制約を考える上で重要な性質である。これを考慮することで、現実に近い問題を考えることができる。

本研究では、グループ番号 g のコンテナは $5 \cdot g$ トンであるとする。

コンテナの重量を導入した際に、制約条件と目的のそれぞれで新たに考慮すべき点が生まれる。

まず、新たな制約条件として、

(3) あるコンテナの上には、そのコンテナより重いコンテナをおいてはならない

という制約条件を考える。これは、コンテナの構造上の制約条件や積まれたコンテナ集合の安定性などを考慮する上で用いられる制約条件である。この制約条件は、あるセル変数にグループ番号 $j (j \in \{1, 2, \dots, G\})$ が割り当てられたならば、垂直方向でそのセルの 1 つ上のセルを表す変数には、グループ番号 $0, 1, \dots, j$ のいずれかが割り当てられなければならない、と言い換えることがで

きる．これを論理式で表現すると，

$$c_i = j \Rightarrow \bigvee_{k=0, \dots, j} c_{i+T} = k, i \in \{1, 2, \dots, M-T\}, j \in \{1, 2, \dots, G\}$$

と表現できる．この論理式に対応する ZDD を構築する．

続いて，重心の位置が最適になるようにするという目的を考える．重心の位置は船の航行の安全上重要な指標の一つである．垂直方向と水平方向2つの重心を考えることとし，それぞれ次のように定義する． i 番目のセルに置かれたコンテナの重量を w_i とし， i 番目のセルの垂直方向の座標を $v_i (0 \leq v_i \leq V, \forall i)$ ，水平方向の座標を $t_i (t_i \text{ は整数, } T \text{ が偶数のとき } (-T/2 \leq t_i < 0, 0 < t_i \leq T/2), T \text{ が奇数のとき } (-T - 1/2 \leq t_i \leq T - 1/2), \forall i)$ とし，

$$\text{垂直重心} = \frac{\sum_{i=1, \dots, M} w_i \cdot v_i}{\sum_{i=1, \dots, M} w_i} \quad (1)$$

$$\text{水平重心} = \frac{\sum_{i=1, \dots, M} w_i \cdot t_i}{\sum_{i=1, \dots, M} w_i} \quad (2)$$

とする．また，本問題設定においては，インスタンス毎のコンテナの総重量は，コンテナの積載の仕方によらず定数であるため，最適化のための計算の際には，

$$\text{垂直モーメント} = \sum_{i=1, \dots, M} w_i \cdot v_i \quad (3)$$

$$\text{水平モーメント} = \sum_{i=1, \dots, M} w_i \cdot t_i \quad (4)$$

を用いる．

4.2.1 コンテナ重量の表現

b 個のバイナリ変数によってバイナリエンコードされたセル変数 c_i の $l (1 \leq l \leq b)$ 桁めが $5 \cdot 2^{l-1}$ トン分の重量を表現しているものとし，これをバイナリ重量と呼ぶことにする．グループ番号 g のコンテナは $5 \cdot g$ トンであるとしている設定と，次の等式によって結びつく．

$$i \text{ 番目のセルに置かれたコンテナの重量} = \sum_{l=1, 2, \dots, b} c_i^l \cdot (5 \cdot 2^{l-1}), \forall i \quad (5)$$

すると，このバイナリ重量と垂直方向の座標および水平方向の座標の積によっ

て、垂直方向と水平方向それぞれにおける、最適化のためのバイナリ変数毎の重みを次のように設定することができる。すなわち、

$$\text{垂直重み} = 5 \cdot 2^{l-1} \cdot v_i, \forall i, \forall l \quad (6)$$

$$\text{水平重み} = 5 \cdot 2^{l-1} \cdot t_i, \forall i, \forall l \quad (7)$$

とする。

4.2.2 重心の最適化

ZDD を用いると、getMinimum 関数を利用することで線型重み和が最小の解を得られるだけでなく、weightGE 関数や getKLightest 関数を用いることで、線型重み和が一定の値以上の複数の解を表現する ZDD を得たり、線型重み和最小化の複数の上位解を表現する ZDD を得ることができる。また、weightRange 関数を用いることで、線型重み和が一定の範囲内の値を取る複数の解を表現する ZDD を得ることができる。実用上、多様な解を選択肢として提示することができることは、解の決定を行う上で有用であると考えられる。

次の方法で、解集合を表現する ZDD の中から、垂直モーメントが最小の解を1つおよび上位解を複数、水平モーメントの絶対値が最小の解を1つおよび上位解を複数取得する。また、水平モーメントが一定の範囲内の値を取る解を取得したのち、その中から垂直モーメントが最小の解を1つおよび上位解を複数取得する。

1. 垂直モーメントが最小の解1つの取得は、次の方法で行う。
 - (a) 解集合を表現する ZDD を構築する。これを targetZDD とする。
 - (b) 式6で定められるバイナリ変数毎の重みを引数とし、getMinimum 関数を targetZDD に適用する。
2. 垂直モーメント最小化における複数の上位解の取得は、次の方法で行う。
 - (a) 解集合を表現する ZDD を構築する。これを targetZDD とする。
 - (b) 式6で定められるバイナリ変数毎の重みを引数とし、K=1, strict=1 として getKLightest 関数を targetZDD に適用する。
3. 水平モーメントの絶対値が最小の解1つの取得は、次の方法で行う。
 - (a) 解集合を表現する ZDD を構築する。これを targetZDD とする。
 - (b) 式7で定められるバイナリ変数毎の重みを引数とし、bound を0として

- weightGE 関数を targetZDD に適用する．これによって得られる水平重み和が 0 以上の解集合を表現する ZDD を GE0_targetZDD とする．
- (c) 式 7 で定められるバイナリ変数毎の重みを引数とし，getMinimum 関数を GE0_targetZDD に適用する．
4. 水平モーメントの絶対値最小化における複数の上位解の取得は，次の方法で行う．
- (a) 解集合を表現する ZDD を構築する．これを targetZDD とする．
- (b) 式 7 で定められるバイナリ変数毎の重みを引数とし，bound を 0 として weightGE 関数を targetZDD に適用する．これによって得られる水平重み和が 0 以上の解集合を表現する ZDD を GE0_targetZDD とする．
- (c) 式 7 で定められるバイナリ変数毎の重みを引数とし，K=1, strict=1 として getKLightest 関数を GE0_targetZDD に適用する．
5. 水平モーメントが一定の範囲内の値を取る解の中からの，垂直モーメントが最小になる解の取得は，次の方法で行う．
- (a) 解集合を表現する ZDD を構築する．これを targetZDD とする．
- (b) 式 7 で定められるバイナリ変数毎の重みを引数とし，lower_bound を -10 ，upper_bound を 10 として weightRange 関数を targetZDD に適用する．これによって得られる水平モーメントが -10 以上 10 以下の解集合を表現する ZDD を AbsLE10_targetZDD とする．
- (c) 式 6 で定められるバイナリ変数毎の重みを引数とし，getMinimum 関数を AbsLE10_targetZDD に適用する．
6. 水平モーメントが一定の範囲内の値を取る解の中からの，垂直モーメント最小化における複数の上位解の取得は，次の方法で行う．
- (a) 解集合を表現する ZDD を構築する．これを targetZDD とする．
- (b) 式 7 で定められるバイナリ変数毎の重みを引数とし，lower_bound を -10 ，upper_bound を 10 として weightRange 関数を targetZDD に適用する．これによって得られる水平モーメントが -10 以上 10 以下の解集合を表現する ZDD を AbsLE10_targetZDD とする．
- (c) 式 6 で定められるバイナリ変数毎の重みを引数とし，getMinimum 関数を AbsLE10_targetZDD に適用する．

5 実験結果

5.1 BDD と ZDD による解集合の表現

5.1.1 インスタンス

表1で示すインスタンスに対して，実験を行った．

インスタンス	T	V	b	M	n	n_0	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7
1	3	3	2	9	18	3	3	3	0	-	-	-	-
2	3	3	2	9	18	0	3	3	3	-	-	-	-
3	3	3	2	9	18	2	2	2	3	-	-	-	-
4	3	3	3	9	27	3	3	3	0	0	0	0	0
5	3	3	3	9	27	0	0	0	3	0	0	3	3
6	3	3	3	9	27	2	1	1	1	1	1	1	1
7	4	4	2	16	32	4	4	4	4	-	-	-	-
8	4	4	3	16	48	4	4	4	4	0	0	0	0
9	4	4	3	16	48	2	2	2	2	2	2	2	2
10	5	5	2	25	50	7	6	6	6	-	-	-	-
11	5	5	3	25	75	7	6	6	6	0	0	0	0
12	5	5	3	25	75	4	3	3	3	3	3	3	3
13	6	6	2	36	72	9	9	9	9	-	-	-	-
14	6	6	2	36	72	18	9	9	0	-	-	-	-
15	3	12	3	36	108	5	5	5	5	4	4	4	4
16	4	9	3	36	108	5	5	5	5	4	4	4	4
17	6	6	3	36	108	5	5	5	5	4	4	4	4
18	9	4	3	36	108	5	5	5	5	4	4	4	4
19	12	3	3	36	108	5	5	5	5	4	4	4	4

表1: インスタンス

5.1.2 結果

インスタンス	BDD		ZDD	
	time (μs)	節点数	time (μs)	節点数
1	193	214	74	112
2	59	161	131	147
3	251	228	597	165
4	266	305	246	112
5	113	260	135	246
6	1,076	1,542	766	1,052
7	1,391	3,361	957	2,673
8	5,318	4,698	7,267	2,673
9	12,281	21,395	14,601	16,903
10	13,001	26,995	23,992	23,882
11	72,437	37,623	76,532	23,882
12	1,131,134	817,167	968,694	675,249
13	155,246	175,701	147,714	160,599
14	98,911	71,054	96,424	43,150
15	1,224,631	1,065,986	1,042,252	934,274
16	2,848,767	2,472,732	2,430,412	2,053,327
17	16,620,412	11,476,057	13,193,775	9,959,210
18	101,059,689	48,450,191	113,317,629	45,461,165
19	timeout(>2min.)	-	timeout(>2min.)	-

5.1.3 考察

5.2 重量バランスを考慮した解の ZDD による列挙

5.2.1 インスタンス

5.2.2 結果

5.2.3 考察

6 おわりに

本研究では、CSPP の解列挙の問題に ZDD を用いて、BDD を用いた場合と比較して多くの場合でノード数が少なくなることを確認した。また、適切に重みを設定し、ZDD を用いた線形重み最適化の手法を用いることで、水平・垂直方向での重心が最適である解や複数の上位解を取得できることを確認した。

今後の課題としては、本研究で考慮できなかった制約条件の考慮が挙げられる。具体的には、3次元座標の導入のほか、位置ごとの重量上限の考慮、コンテナのサイズ (20ft, 40ft, 45ft) の区別、コンテナの種類 (DRY, REEFER, OOG, etc.) の区別、コンテナの内容物の IMDG に基づく区別と、それらの区別に基づく制約条件、などが挙げられる。

これらの条件を考慮する拡張を行えば、現実のコンテナ積載計画を考える業務の支援を行うシステムの構築が検討できる。

謝辞

本論文の執筆にあたりご指導頂きました指導教員の川原純先生に深く感謝いたします。また、研究を進める上でご助言を頂いた湊真一先生をはじめ、研究会を通して様々な意見を下さり、議論を共にさせていただきました湊研究室の皆様にも心よりお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Shields, J. J.: Containership stowage: A computer-aided preplanning system, *Marine Technology and SNAME News*, Vol. 21.04, pp. 370–383 (1984).
- [2] International Maritime Organization: IMDG code : International maritime dangerous goods code, Vol. 41-22.
- [3] Jensen, R. M., Leknes, E. and Bebbington, T.: Fast Interactive Decision

Support for Modifying Stowage Plans Using Binary Decision Diagrams,
Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2012.

- [4] Minato, S., Banbara, M. et al.: Interval-Memoized Backtracking on ZDDs for Fast Enumeration of All Lower Cost Solutions, *arXiv:2201.08118*.