

修士論文

DAG パス幅に基づく種々のアルゴリズムの
設計及び DAG 木幅への拡張

指導教員 川原 純 准教授

京都大学大学院情報学研究科
修士課程 情報学専攻 通信情報システムコース

伊豆 真哉

2025 年 1 月 31 日

DAG パス幅に基づく種々のアルゴリズムの設計 及び DAG 木幅への拡張

伊豆 真哉

内容梗概

有向グラフがどれだけ有向パスに近い構造をしているかを表すパラメータとして DAG パス幅が存在する。DAG パス幅は、既存の幅で表現することが難しい DAG に対しても非自明な幅を与えることができ、DAG 上で NP 困難な問題に対するパラメータ化アルゴリズムの構築に役立っている。

今回の研究では、まず最初に DAG 上でも NP 困難である様々な問題に対し、DAG パス幅を使ったパラメータ化アルゴリズムを提案する。具体的には Directed Dominating Set Problem, Max Leaf Outbranching Problem の 2 つの問題に対し、頂点数 n の DAG と幅が w である DAG パス分解が与えられたときに共に $O(2^{wn})$ 時間で厳密解を与える FPT アルゴリズムを提案する。Directed Steiner Tree Problem や k -Disjoint Path Problem に対しても同様にパラメータ化アルゴリズムを提案する。

次に DAG パス幅に対し、 $O(\log^2 n)$ の近似比をもつ多項式時間アルゴリズムを提案する。DAG パス分解を構成する問題は one-shot Black Pebbling game を解く問題と等価であることを示し、これによりさらに近似比を $O(\log^{3/2} n)$ まで小さくできることを示す。

DAG パス幅の計算は NP 困難であることが知られており、小さな DAG パス幅を求めるアルゴリズムは我々の知る限り知られていなかった。本研究では最大出次数、根数がそれぞれ d, l の DAG G と整数 t が与えられたとき、幅が高々 $O(ld^t)$ である G の DAG パス分解か、もしくは G の DAG パス幅が t よりも大きい証拠である DAG パス分解のいずれかを返すアルゴリズムを提案する。

最後に DAG パス幅の一般化となる概念である DAG 木幅を新たに定義する。DAG 木幅は有向グラフが有向木からどれだけ近いかを表すパラメータであり、DAG 木幅の値が小さいほどグラフが有向木に近い構造をしていることを表す。DAG 木幅を与える最適な DAG 木分解の構成が NP 困難であることを示し、その後 DAG 木幅をパラメータとして Directed Dominating Set Problem を解く $O(2^w(k+w)n + n^2)$ 時間の FPT アルゴリズムを提案する。

Designing various algorithms based on DAG-pathwidth and extension to DAG-treewidth

Shinya Izu

Abstract

DAG (directed acyclic graph)-pathwidth is a parameter that measures how closely a directed graph resembles a directed path. This parameter provides a non-trivial width even for DAG, which is difficult to parameterize using existing width. DAG-pathwidth is useful for designing parameterized algorithms to solve NP-hard problems on DAGs.

In this thesis, we first design parameterized algorithms with DAG-pathwidth for various NP-hard problems even on DAGs. Specifically, we design fixed-parameter tractable (FPT) algorithms for the Directed Dominating Set Problem and the Max Leaf Outbranching Problem. Given a DAG with n vertices and a DAG-path-decomposition of width w , both problems can be solved exactly in $O(2^{w}wn)$ time. Similarly, we propose parameterized algorithms for the Directed Steiner Tree Problem and the k -Disjoint Path Problem.

Next, we design a polynomial-time approximation algorithm for DAG-pathwidth that achieves an $O(\log^2 n)$ approximation ratio. We further improve this ratio to $O(\log^{3/2} n)$ by demonstrating the equivalence between constructing DAG-path-decomposition and solving one-shot Black Pebbling game.

It is known that computing DAG-pathwidth is NP-hard, and, as far as we know, no algorithm has been known for finding small DAG-pathwidth. In this thesis, we also design an algorithm that, given an integer t and DAG G with l roots and at most d outdegree, either computes a DAG-path-decomposition of G with width at most $O(ld^t)$ or provides an evidence that the DAG-pathwidth of G is greater than t .

Finally, we define a new parameter DAG-treewidth as a generalization of DAG-pathwidth. DAG-treewidth is a parameter that measures how similar is the structure of a directed graph to that of a directed tree. We show that constructing an optimal DAG-tree-decomposition that minimizes DAG-treewidth is NP-hard. After that, we design an FPT algorithm for the Directed Dominating Set Problem in $O(2^w w^2 n)$ time, with the DAG-treewidth w as a parameter.

DAG パス幅に基づく種々のアルゴリズムの設計 及び DAG 木幅への拡張

目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	準備	4
2.1	DAG	4
2.2	様々なパス分解とパス幅	4
2.3	Black Pebbling game	7
第 3 章	DAG パス幅を用いた様々な NP 困難問題に対するアルゴリズム	9
3.1	Directed Dominating Set Problem の $O(2^w w n)$ 時間アルゴリズム	9
3.2	Max Leaf Outbranching の $O(2^w w n)$ 時間アルゴリズム	12
3.3	Disjoint Path の $O((k+1)^w (w^2 + k)n + n^2)$ 時間アルゴリズム .	13
3.4	有向シュタイナー木問題の $O(2^w (k+w)n + n^2)$ 時間アルゴリズム	16
3.5	木分解と比較したときの DAG パス分解の利点	19
第 4 章	DAG パス分解を求める $O(\log^2 n)$ -近似アルゴリズム	21
4.1	定義と補題	21
4.2	$O(\log^2 n)$ -近似アルゴリズム	22
4.3	$O(\log^{3/2} n)$ -近似アルゴリズム	25
第 5 章	$O(ld^t)$ の幅の DAG パス分解を求めるアルゴリズム	26
第 6 章	DAG 木幅	40
6.1	DAG 木幅と DAG 木分解の定義	40
6.2	co-DAG 木幅	43
第 7 章	co-DAG 木幅を用いた FPT アルゴリズム	46
7.1	Directed Dominating Set Problem の $O(2^w w^2 n)$ 時間アルゴリズム	46
第 8 章	結論	48
	謝辞	49
	参考文献	50

付録	A-1
A.1 Lemma 1の証明	A-1
A.2 Lemma 4の証明	A-2
A.3 Theorem 2に対する関数 LOB 及びアルゴリズム Compute の定義	A-2
A.4 Lemma 5の証明	A-3
A.5 Lemma 6の証明	A-5
A.6 Lemma 7の証明	A-5
A.7 Lemma 9の証明	A-7
A.8 Lemma 11, 12及び Theorem 6の証明	A-9
A.9 Lemma 13, 14の証明	A-10
A.10 Lemma 16の証明	A-11
A.11 Theorem 10の証明	A-12
A.12 Theorem 12の証明	A-18
A.13 Lemma 23の証明	A-20

第1章 はじめに

NP 困難な問題に対して高速に解を求める方法の一つとして木分解という手法が存在する。木分解とは、一般のグラフに対して全頂点をいくつかの頂点集合に分解し、それぞれを一つの節点と見なして木のような構造に変換する操作である。木分解を行うと、一般のグラフでも木に対するアルゴリズムが適応できるため、NP 困難な問題でも比較的高速に解を求めることができる。木分解を行ったとき、一つの節点に含まれる最大の頂点数を幅といい、あるグラフに対して全ての木分解を試したときの幅の最小値を木幅という。木幅が小さいほど木に近い構造をしていることを表す。この木幅が定数で抑えられる場合、NP 困難な問題に対しても頂点数の多項式時間で解くことができる場合がある。

木分解と同様に、グラフ上の頂点をいくつかの頂点集合に分解し、グラフ全体をパス型の構造に変換する操作をパス分解という。また一つの節点に含まれる最大の頂点数をパス幅という。こちらも一般のグラフをパスのように扱うことができるため、パス幅が定数で抑えられる場合、NP 困難な問題に対しても頂点数の多項式時間で解くことができる場合がある。

無向グラフに対するパス幅は、Robertson ら [1] によって 1983 年に初めて提案された。また、同氏らによって無向グラフに対する木幅 [2] も初めて提案されている。1987 年には、定数 k が与えられたとき、入力グラフの木幅やパス幅が k 以下かどうかを判定する問題が NP 完全であることが Arnborg ら [3] によって明らかにされている。1989 年には同氏らによって木幅やパス幅を用いた様々な FPT アルゴリズム [4] が研究されている。

木幅が k であるグラフが与えられたとき、幅が高々 k の定数倍である木分解を多項式時間で得るアルゴリズムが存在するかどうかはわかっていない。同様にパス幅についても定数近似が可能であるかはわかっていない。一方で木幅が k で抑えられる場合、木幅の $O(\sqrt{\log k})$ の近似比をもつ幅を与える多項式時間アルゴリズムの存在が Amir [5] によって示されている。また $2^{O(k)}$ 時間の 2-近似アルゴリズムが Tuukka [6] によって構築されている。同様にパス幅についても先程の k を用いて $O(k\sqrt{\log k})$ の近似比の多項式時間アルゴリズムが Carla ら [7] によって示されているほか、パス幅 pw を用いて $O(2^{pw})$ の幅を与える多項式時間アルゴリズムが Cattell ら [8] によって示されている。

有向グラフに対しても様々な幅が考えられてきた。1997 年に Reed [9] が有

向パス幅を提案しており、2001年には Johnson ら [10] が有向木幅を提案している。また 2012 年には、Berwanger ら [11] によって DAG に対する幅が提案されている。

有向パス幅は有向グラフがどれだけ DAG に近い構造をしているかを表すパラメータである。そのため DAG に対しては有向パス幅は常に 0 になり、DAG 上の問題に対してパラメータ化アルゴリズムの構築が難しい場合があった。これに対し、2023 年に Kasahara ら [12] によって、新たに DAG パス幅が提案されている。DAG パス幅は有向有向グラフがどれだけ有向パスに近い構造をしているかを表すパラメータであり、有向パス分解の条件に加え、任意の枝に対してその端点を同時に含むバッグが存在することをルールに加えている。これにより有向グラフ上の強連結成分は同時に 1 つのバッグに含まれていなければならない。この条件によって特に DAG について非自明な幅が得られ、DAG に対して有効な FPT アルゴリズムの構築が可能となっている。[12] では DAG パス幅を用いた k -独立集合問題のパラメータ化アルゴリズムの構築や DAG パス幅を求めることが NP 困難であることの証明などが行われている。一方で k -独立集合問題以外での DAG 上でも NP 困難な問題に対するパラメータ化アルゴリズムの構築や DAG パス分解自体を求めるアルゴリズムは著者が知る限りこれまでわかっていなかった。

そこで今回は次の 3 つの研究を行った。1 つ目は DAG パス分解を用いて DAG 上での様々な NP 困難問題に対するパラメータ化アルゴリズムの構築である。2 つ目は DAG パス分解を求める近似アルゴリズム、及び制限された幅をもつ DAG パス分解の構築を行うパラメータ化アルゴリズムの提案である。3 つ目は DAG パス幅の拡張となる DAG 木幅の提案である。まず第 3 章では、DAG 上でも NP 困難な問題である Directed Dominating Set Problem, Max Leaf Outbranching Problem の 2 つの問題に対して、頂点数が n の DAG、幅が w の DAG パス分解を入力したとき、 $O(2^{wn})$ 時間の FPT アルゴリズムを提案する。Directed Steiner Tree Problem に対しては、ターミナル集合のサイズを k としたときに $O(2^w(k+w)n + n^2)$ 時間の FPT アルゴリズムを提案する。また k -Disjoint Path Problem に対しては $O((k+1)^w(w^2+k)n + n^2)$ 時間のパラメータ化アルゴリズムを提案する。第 3 章の最後では Directed Edge Dominating Set Problem を用いて木分解と比較したときの DAG パス分解の利点を述べる。提案するアルゴリズムは DAG を入力としているが、一般の有向グラフに対しても強連結成分分

解を行うことで本アルゴリズムを提供することができる。次に第4章では DAG パス幅に対し、 $O(\log^2 n)$ -近似アルゴリズムを提案する。またより近似比の小さい $O(\log^{3/2} n)$ -近似アルゴリズムの存在を示す。これは one-shot Black Pebbling Problem が DAG パス分解を求める問題と等価であることから示される。さらに第5章では、整数 t と最大出次数、根数がそれぞれ d, l である DAG が与えられたとき、 $O(ld^t)$ の幅をもつ DAG パス分解を与えるアルゴリズムを提案する。このアルゴリズムは無向パス分解に対するアルゴリズム [8] を参考にして構築しており、完全有向 d 分木の埋め込みを行うことでアルゴリズムを構築している。最後に第6章、第7章では DAG パス幅の一般化となる概念である DAG 木幅の提案を行っている。DAG 木幅は有向グラフが有向木からどれだけ近いかを表すパラメータであり、DAG 木幅の値が小さいほどグラフが有向木に近い構造をしていることを表す。第6章で DAG 木幅を与える最適な DAG 木分解の構成が NP 困難であることを示し、第7章で DAG 木幅をパラメータとして Directed Dominating Set Problem を解く $O(2^w w^2 n)$ 時間の FPT アルゴリズムを提案している。

第2章 準備

2.1 DAG

本研究では入力グラフを DAG としたものを多く扱う。DAG は以下のように定義される。

Definition 1. DAG (Directed Acyclic graph) とは閉路のない有向グラフのことである。

次に DAG の各頂点に対して先行頂点集合と後続頂点集合を定める。

Definition 2. DAG $G = (V, E)$ のある頂点 $v \in V$ に対し、 v の先行頂点集合 $\text{pred}(v)$ と後続頂点集合 $\text{suc}(v)$ を以下のように定める。

$$\begin{aligned}\text{pred}(v) &= \left\{ u \in V \mid (u, v) \in E \right\} \\ \text{suc}(v) &= \left\{ w \in V \mid (v, w) \in E \right\}.\end{aligned}$$

また DAG の根及び葉は以下のように定義される。

Definition 3. DAG $G = (V, E)$ に対し、ある頂点 $v \in V$ が G の根であるとは、 v の入次数が 0 であることである。同様に $u \in V$ が G の葉であるとは、 u の出次数が 0 であることである。

一般に DAG の根及び葉は複数存在する。

さらに特殊な DAG として有向木を定義する。

Definition 4. DAG $G = (V, E)$ が以下をすべて満たすとき、 G は有向木である。

1. G はただ一つの根 r をもつ。
2. G の枝の向きを無視した基礎グラフが木である。
3. 任意の頂点 $v \in V$ に対し、 r から v への有向パスがただ 1 つ存在する。

上記で定義される有向木に対し、全ての枝の向きを逆にしたものを反有向木と呼ぶ。ただし反有向木において出次数が 0 の頂点を根、入次数が 0 の頂点を葉と表現する。

2.2 様々なパス分解とパス幅

本研究では DAG パス幅についての研究であるが、DAG パス幅の特徴を理解しやすくするため、比較として(無向)パス幅、有向パス幅の定義を示す。まず無向グラフ上のパス分解・パス幅の定義を示す。

Definition 5 (パス分解). [1] $G = (V, E)$ を無向グラフとする。 G のパス分解

とは、以下の3つの条件をみたすような V の部分集合 X_i ($i = 1, 2, \dots, s$) の列 $X = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ である。

1. $X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_s = V$
2. 任意の枝 $(u, v) \in E$ に対し、ある i (≥ 1) があり、 $u, v \in X_i$
3. 任意の整数 i, j, k ($1 \leq i \leq j \leq k \leq s$) について、 $X_i \cap X_k \subseteq X_j$. すなわち任意の頂点 $v \in V$ について、 v は X をパスとみなしたグラフ上でただ一つの非空なパスを誘導する。

Definition 6 (パス幅). 無向グラフ G のパス分解 $X = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ に対し、 $\max_i \{|X_i| - 1\}$ を X の幅という。 G のパス幅とは、 G の全てのパス分解を考えたときの幅の最小値である。

パス幅はグラフがどれだけパスに近い構造をしているかを表すパラメータであり、パス幅の値が小さいほどパスに近い構造をしていることを表す。一般の無向グラフに対してパス幅を求める問題は NP 困難である [3]。

次に有向パス分解・有向パス幅についての定義を示す。

Definition 7 (有向パス分解). [9] $G = (V, E)$ を有向グラフとする。 G の有向パス分解とは、以下の3つの条件をみたすような V の部分集合 X_i ($i = 1, 2, \dots, s$) の列 $X = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ である。

1. $X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_s = V$
2. 任意の有向枝 $(u, v) \in E$ に対し、ある i, j ($i \leq j$) があり、 $u \in X_i, v \in X_j$
3. 任意の i, j, k ($1 \leq i \leq j \leq k \leq s$) について、 $X_i \cap X_k \subseteq X_j$. すなわち任意の頂点 $v \in V$ について、 v は X 上でただ一つの非空なパスを誘導する。

Definition 8 (有向パス幅). 有向グラフ G の有向パス分解 $X = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ に対し、 $\max_i \{|X_i| - 1\}$ を X の幅という。 G の有向パス幅とは、 G の全ての有向パス分解を考えたときの幅の最小値である。

有向パス幅はグラフがどれだけ DAG に近い構造をしているかを表すパラメータであり、有向パス幅の値が小さいほど DAG に近い構造をしていることを表す。無向パス幅を求める問題が NP 困難であることより、一般の有向グラフに対して有向パス幅を求める問題もまた NP 困難である。

以下では DAG パス分解・DAG パス幅の定義を示す。

Definition 9 (DAG パス分解). [12] $G = (V, E)$ を有向グラフとする。 G の DAG パス分解とは、以下の3つの条件をみたすような V の部分集合 X_i ($i = 1, 2, \dots, s$) の列 $X = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ である。

1. $X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_s = V$
2. 任意の有向枝 $(u, v) \in E$ に対し、以下のいずれかが成り立つ。
 - $u, v \in X_1$
 - ある i ($i \geq 2$) があり、 $u, v \in X_i, v \notin X_{i-1}$
3. 任意の i, j, k ($1 \leq i \leq j \leq k \leq s$) について、 $X_i \cap X_k \subseteq X_j$. すなわち任意の頂点 $v \in V$ について、 v は X 上でただ一つの非空なパスを誘導する。

なお、[12] では 1 を以下のように定義していることに注意する。本研究ではアルゴリズムの構築のしやすさの観点から上記の定義を用いるものとする。

1. ある i ($i \geq 2$) があり、 $u, v \in X_i, u \notin X_{i-1}$

以下では各頂点集合 X_i をバッグと呼ぶ。

Definition 10 (DAG パス幅). 有向グラフ G の DAG パス分解 $X = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ に対し、 $\max_i \{|X_i| - 1\}$ を X の幅という。 G の DAG パス幅とは、 G の全ての DAG パス分解を考えたときの幅の最小値である。

DAG パス幅は有向グラフがどれだけ有向パスに近い構造をしているかを表すパラメータであり、DAG パス幅の値が小さいほど有向パスに近い構造をしていることを表す。DAG パス分解のルール 3 より、任意の頂点 v に対して v を含むバッグは連結となる。これとルール 2 とより、枝 (u, v) に対して u, v はあるバッグ X_i に初めて同時に現れるか、 u を含み v を含まないバッグが先に現れた後、 u, v を同時に含むバッグが現れることを示している。すなわち DAG パス分解はグラフのトポロジカル順序でバッグに頂点を追加していく操作であるとみなせる。一般の有向グラフに対して DAG パス幅を求める問題は NP 困難である [12] が、DAG パス幅が 1 であるグラフクラスは以下で定義するキャタピラ型の有向グラフであることを以下で示す。

Definition 11 (キャタピラ型). 有向グラフ G がキャタピラ型であるとは、有向木であり、かつ G の頂点のうち入次数 1、出次数 0 の頂点を除くと単一のパスになるようなグラフである。

Lemma 1. 頂点数 n (> 2) の連結な有向グラフ G の DAG パス幅が 1 であることの必要十分条件は、 G がキャタピラ型であることである。

Lemma 1 の証明は付録で示す。

以下では動的計画法を行いやすくするための DAG パス分解として nice DAG パス分解を定義する。

Definition 12 (nice DAG パス分解). [12] 有向グラフ $G = (V, E)$ の DAG パス

分解 $X = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ が nice DAG パス分解であるとは、 X が以下のルールを満たすことをいう。

1. $X_1 = X_s = \emptyset$
2. 任意の i ($2 \leq i \leq s-1$) に対して、以下のいずれかが成り立つ。
 - (introduce) ある強連結成分 $S \subseteq V$ があり、 $S \cap X_i = \emptyset$, $X_{i+1} = X_i \cup S$
 - (forget) ある頂点 $v \in V$ があり、 $X_{i+1} = X_i \setminus \{v\}$

introduce は、あるバッグに強連結な頂点集合を追加したものを次のバッグとする操作であり、forget は、あるバッグから頂点を一つ取り除いたものを次のバッグとする操作である。 G が DAG であるとき、強連結成分 S は 1 つの頂点のみからなるため、introduce の定義は以下ようになる。

1. (introduce) ある頂点 $v \in V$ があり、 $\{v\} \cap X_i = \emptyset$, $X_{i+1} = X_i \cup \{v\}$

G が DAG であるとき、nice DAG パス分解は各バッグが 1 つの頂点の introduce か forget かに限られるため、動的計画法の設計が容易になる利点がある。また [20] では、ある DAG パス分解 X に対し、 X と同じ幅をもつ nice DAG パス分解を多項式時間で構築できることを示しているほか、バッグの個数について以下を示している。

Proposition 1. 有向グラフ G に対する任意の DAG パス分解を $X = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ とする。各 i に対し $X_i \neq X_{i+1}$ ならば、 $s \leq 2|V[G]| + 1$ が成り立つ。

以降ではバッグ X_{i+1} がある強連結成分 S を introduce しているとき、バッグ X_{i+1} は introduce である、という。同様にバッグ X_{i+1} がある頂点 v を forget しているとき、バッグ X_{i+1} は forget である、という。任意の頂点について、その頂点の introduce と forget のバッグは、ルール 1 と 3 とよりちょうど 1 つずつ存在する。

2.3 Black Pebbling game

以下では DAG パス分解との比較を行うため、Black Pebbling game の定義を行う。

Definition 13 (Black Pebbling game). [13] Black Pebbling game とは、DAG $G = (V, E)$ が与えられたときに、以下のルールを満たす頂点集合の列 (戦略と呼ぶ) $P = (P_0, P_1, \dots, P_t)$ ($P_i \subseteq V$) を構成するゲームである。

ルール 1 $P_0 = \emptyset$

ルール 2 pebble: $v \in V$ に小石が置かれておらず、かつ v の全ての先行頂点に

小石が置かれていれば、 v に小石を置いてよい。すなわち $v \notin P_{i-1}$ かつ、任意の $(u, v) \in E$ に対し $u \in P_{i-1}$ ならば、 $P_i = P_{i-1} \cup \{v\}$ とできる。

ルール 3 unpebble: v に置かれた小石はいつでも取り除いてもよい。すなわち $v \in P_{i-1}$ ならば、 $P_i = P_{i-1} \setminus \{v\}$ とできる。

ルール 4 各頂点に少なくとも一度は小石が置かれている。

pebble は頂点に小石を置く操作を表し、unpebble は頂点から小石を取り除く操作を表す。ただしグラフの根は先行頂点をもたないため任意の時点で pebble できる。また、ペブリング数を以下のように定義する。

Definition 14 (ペブリング数). DAG G の戦略 $P = (P_0, P_1, \dots, P_\tau)$ に対し、space と time を以下のように定義する。

1. $\text{space}(P) = \max_i |P_i|$
2. $\text{time}(P) = \tau$

G のペブリング数とは、 G の全ての戦略を考えたときの *space* の最小値である。

一般の DAG に対してペブリング数を求める問題は PSPACE 完全である [14]. 以下では DAG G に対するペブリング数を $\text{Peb}(G)$ と表現する。Black Pebbling game は、Proof of Space [15] とよばれるブロックチェーン技術の中で用いられる。Proof of Space は空きディスク容量をいくら保持しているかを証明する手法であり、入力 DAG が空きディスク容量に対応する。またペブリング数は同時に使用するメモリの量に対応する。ペブリング数が大きいほど、より多くのメモリやデータを使うため、その証明が難しいことを表す。すなわち証明の安全性が高くなることを表す。

また one-shot Black Pebbling (one-shot BP) とは、Black Pebbling game に対して以下のルールを追加したものである。

ルール 5 DAG G の任意の頂点はちょうど 1 度だけ小石が置かれる。

one-shot BP についても同様にペブリング数を定めることができる。一般の DAG に対して one-shot BP のペブリング数を求める問題は NP 困難である [16]. 4.3 節では one-shot BP が DAG 上の DAG パス分解を構成する問題と等価であることを示す。

第3章 DAG パス幅を用いた様々なNP 困難問題に対するアルゴリズム

本節では, DAG 上の 4 つの NP 困難問題である Directed Dominating Set Problem, Max Leaf Outbranching Problem, Disjoint Path Problem, Directed Steiner Tree Problem の DAG パス幅を用いたパラメータ化アルゴリズムを提案する. これらの問題は有向木幅や有向パス幅に対しては $W[1]$ -hard であるが [17, 21], DAG パス幅を用いることで容易にパラメータ化アルゴリズムを構築することができる. なお, 本論文では入力グラフを DAG としているが, 一般の有向グラフに対しても強連結成分分解を行い DAG に変換することで本アルゴリズムを適応することが可能である.

3.1 Directed Dominating Set Problem の $O(2^w wn)$ 時間アルゴリズム

以下では, 頂点数 n の DAG G と幅が w である G の nice DAG パス分解が与えられたときに, G の Directed Dominating Set Problem を $O(2^w wn)$ で計算するアルゴリズムを示す.

まず Directed Dominating Set に関する定義と定理を与える.

Definition 15 (Directed Dominating Set). 有向グラフ $G = (V, E)$ に対し, $S \subseteq V$ が G の Directed Dominating Set (DiDS) であるとは, 任意の $v \in V \setminus S$ に対し, ある $u \in S$ があり, $(u, v) \in E$ を満たすことである. minimum DiDS (以下 mDiDS) とは, 全ての DiDS S のうち $|S|$ が最小のものである.

DiDS problem とは, G の mDiDS のサイズを求める問題である. Ganian ら [17] は以下を示した.

Proposition 2 (計算量クラス). *DiDS problem* は G が DAG の場合でも NP 困難である.

本節の以降では DAG パス幅を用いた FPT アルゴリズムの構築を行う.

Theorem 1. DAG G に対し, 幅が w である G の nice DAG パス分解が与えられたとき, G の *DiDS problem* を $O(2^w wn)$ で解くアルゴリズムが存在する.

上記のアルゴリズムを構成するため, まず関数 DS を定義する. DS は各 i においてバッグ X_i を共通部分をもたない頂点集合 $A_i, B_i \subseteq X_i$ に分ける. その後 $X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_i$ によって誘導される部分グラフ G_i の有向支配集合のうち,

A_i を全て含み, B_i を全て含まず, かつサイズが最小の有向支配集合を求める. これを全ての A_i, B_i の組合せについて計算することで, G_i での最小支配集合を得る. 全ての i について上記の計算を行うことで最終的に入力グラフ G の最小支配集合を得る.

Definition 16 (DS). DAG $G = (V, E)$ の nice DAG パス分解を $P = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ とする. ある i ($i = 1, 2, \dots, s$) に対し, 頂点集合 $A_i, B_i \subseteq V$ が $A_i \cup B_i = X_i, A_i \cap B_i = \emptyset$ を満たすとする. G_i を頂点集合 $X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_i$ によって誘導される G の部分グラフとする. 関数 DS を以下のように定める.

$$DS(i, A_i, B_i) = \min \left\{ |S_i| \left| \begin{array}{l} S_i \subseteq X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_i, \\ S_i \text{ は } G_i \text{ の DiDS} \\ A_i \subseteq S_i, B_i \cap S_i = \emptyset \end{array} \right. \right\}. \quad (1)$$

DS は G_i の mDiDS のサイズを計算する関数である.

以下で DS の計算式を与える. 各 X_i が introduce か forget かで場合分けをして計算する.

- X_i が $v \in V$ を introduce しているとき

$$DS(i, A_i, B_i) = \begin{cases} DS(i-1, A_i \setminus \{v\}, B_i) + 1 & (v \in A_i) \\ DS(i-1, A_i, B_i \setminus \{v\}) & (v \in B_i \text{ かつ } \text{pred}(v) \cap A_i \neq \emptyset) \\ \infty & (otherwise) \end{cases}$$

- X_i が $v \in V$ を forget しているとき

$$DS(i, A_i, B_i) = \min\{DS(i-1, A_i \cup \{v\}, B_i), DS(i-1, A_i, B_i \cup \{v\})\}.$$

DS を用いて, DAG G の nice DAG パス分解 P が与えられたときに, G の mDiDS のサイズを出力するアルゴリズム Compute を示す.

Compute(P)

1. First Step: $DS(0, \emptyset, \emptyset) = 0$ とする.
2. Exection Step: P の各 X_i ($i = 1, 2, \dots, s$) に対し, A_i, B_i 全ての組合せについて順に $DS(i, A_i, B_i)$ を計算する.
3. Final Step: $i = s$ ならば, $DS(s, \emptyset, \emptyset)$ を出力する.

Lemma 2. Compute は G の $mDiDS$ のサイズを返す.

Proof. 各 i に対し, $DS(i, A_i, B_i)$ が DS の定義 1 を満たすことを示せば十分. これを i に関する数学的帰納法で示す. $i = 0$ のとき, 明らかに定義 1 を満たす. $i = k$ のとき, $DS(i, A_i, B_i)$ が定義 1 を満たすと仮定する. 以下で X_{k+1} が $v \in V$ を introduce するか forget するかで場合分けを行う.

- X_{k+1} が $v \in V$ を introduce する場合

$v \in A_{k+1}$ の場合, DAG パス分解のルール 2 より v は G_{k+1} のどの頂点も支配しないことに注意すると, $DS(k+1, A_{k+1}, B_{k+1})$ は $DS(k, A_{k+1} \setminus \{v\}, B_{k+1}) + |v|$ と等しい. 仮定より $DS(k, A_{k+1} \setminus \{v\}, B_{k+1})$ は $A_{k+1} \setminus \{v\}$ を含み, B_{k+1} を含まないような, G_k の $mDiDS$ のサイズと等しいから, $DS(k+1, A_{k+1}, B_{k+1})$ は A_{k+1} を含み, B_{k+1} を含まないような, G_{k+1} の $mDiDS$ のサイズと等しい. したがって定義 1 が成立.

$v \in B_{k+1}$ かつ $\text{pred}(v) \cap A_{k+1} \neq \emptyset$ の場合, ある頂点 u ($(u, v) \in G_{k+1}, u \in A_{k+1}$) が存在するため v は u によって支配されている. したがって $DS(k+1, A_{k+1}, B_{k+1})$ は $DS(k, A_{k+1}, B_{k+1} \setminus \{v\})$ と等しい. 仮定より $DS(k, A_{k+1}, B_{k+1} \setminus \{v\})$ は A_{k+1} を含み, B_{k+1} を含まないような, G_k の $mDiDS$ のサイズと等しいから, $DS(k+1, A_{k+1}, B_{k+1})$ は A_{k+1} を含み, B_{k+1} を含まないような, G_{k+1} の $mDiDS$ のサイズと等しい. したがって定義 1 が成立.

$v \in B_{k+1}$ かつ $\text{pred}(v) \cap A_{k+1} = \emptyset$ の場合, v を支配する頂点が A_{k+1} に存在しない. したがって定義 1 を満たすような $mDiDS$ が存在しないため, $DS(k+1, A_{k+1}, B_{k+1})$ の値を ∞ とすることでこれを表している.

- X_{k+1} が $v \in V$ を forget する場合

$G_{k+1} = G_k$ より, G_{k+1} の $mDiDS$ は G_k の $mDiDS$ と等しい. したがって v を含むような G_k の $mDiDS$ のサイズと, v を含まないような G_k の $mDiDS$ のサイズうち, 値の小さい方を G_{k+1} の $mDiDS$ のサイズとすることができ. 仮定よりそれぞれ $DS(k, A_{k+1} \cup \{v\}, B_{k+1}), DS(k, A_{k+1}, B_{k+1} \cup \{v\})$ と表すことができるため,

$$\min\{DS(k, A_{k+1} \cup \{v\}, B_{k+1}), DS(k, A_{k+1}, B_{k+1} \cup \{v\})\}$$

は G_{k+1} の $mDiDS$ のサイズと等しい. したがって定義 1 が成立.

以上より, $i = k+1$ でも定義 1 が成立. 数学的帰納法により Lemma 2 が証明された. □

最後に Compute の計算量を示す.

Lemma 3. *DAG G の頂点数が n であるとする. このとき, 幅が w である G の DAG パス分解 P が与えられたとき, $\text{Compute}(P)$ は $O(2^w wn)$ の計算時間で結果を出力する.*

Proof. 各 X_i に対し, $|X_i| \leq w+1$ に注意すると, A, B の組合せは高々 2^{w+1} 通り存在する. また Proposition 1 より $0 \leq i \leq 2|V|+1$ である. さらに $\text{pred}(v) \cap A_i \neq \emptyset$ の判定に高々 $O(w)$ 時間を要することに注意すると, $\text{DS}(i, A_i, B_i)$ の計算量は, X_i が introduce ならば $O(w)$ であり, forget ならば $O(1)$ である. 以上より, Compute の計算量は $O(2^w wn)$ である. \square

3.2 Max Leaf Outbranching の $O(2^w wn)$ 時間アルゴリズム

本節では頂点数 n の DAG G , 幅が w である G の nice DAG パス分解, 根 r が与えられたとき, G の Max Leaf Outbranching Problem (MaxLOB) を $O(2^w wn)$ で計算するアルゴリズムを示す. そのためまず MaxLOB に関する定義を示す.

Definition 17 (MaxLOB). 有向グラフ $G = (V, E)$, 根 $r \in V$ が入力されたとき, r を根とする G の有向全域木のうち葉数が最大となる有向全域木 T の葉数を求める問題である.

Ganian ら [17] は以下を示した.

Proposition 3 (計算量クラス). *MaxLOB は G が DAG でも NP 困難である.*

今回は入力グラフを DAG とし, 根が r のみであるとする. このとき G には葉数が最大の有向全域木が必ず存在する. これは次の補題を示せば十分である.

Lemma 4. 連結な DAG G について, G が入次数 θ の根をただ一つもつことと, G に有向全域木が存在することは必要十分である.

本節の以降では DAG パス幅を用いた FPT アルゴリズムの構築を行う.

Theorem 2. *DAG G に対し, 幅が w である G の nice DAG パス分解が与えられたとき, G の MaxLOB を $O(2^w wn)$ で解くアルゴリズムが存在する.*

Lemma 4 及び 5, 6 の証明, Theorem 2 のアルゴリズム Compute 及び関数 LOB は付録で示す.

Lemma 5. Compute は G の MaxLOB の解を出力する.

Lemma 6. *DAG G の頂点数を n とする. 幅が w である G の DAG パス分解 P が与えられたとき, $\text{Compute}(P)$ は $O(2^w wn)$ の計算時間で結果を出力する.*

3.3 Disjoint Path の $O((k+1)^w(w^2+k)n+n^2)$ 時間アルゴリズム

本節では頂点数 n の DAG G , 幅が w である G の nice DAG パス分解, k 個の頂点对が与えられたとき, G の Disjoint Path Problem を $O((k+1)^w(w^2+k)n+n^2)$ で計算するアルゴリズムを示す.

以下で Disjoint Path Problem に関する定義と定理を与える.

Definition 18 (Disjoint Path Problem). DAG $G = (V, E)$, k 個の頂点对 $(s_1, t_1), (s_2, t_2), \dots, (s_k, t_k)$ が入力されたとき, 各 s_i から t_i までの点素なパスの組を $\mathcal{P} = (P_1, P_2, \dots, P_k)$ とする. 各パス P_i の長さを P_i の頂点数 $|P_i|$ としたとき, Disjoint Path Problem はパスの合計長 $\sum_{i=1}^k |P_i|$ の最小値を求める問題である.

Ganian ら [17] は以下を示した.

Proposition 4 (計算量クラス). *Disjoint Path problem* は NP 困難である.

本節の以降では DAG パス幅を用いた XP アルゴリズムの構築を行う. Cal は各 i においてバッグ X_i を共通部分をもたない $k+1$ 個の頂点集合 $A_1, A_2, \dots, A_k, B_i \subseteq X_i$ に分ける. その後 $X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_i$ によって誘導される部分グラフ G_i に対し, 各 A_m ($m = 1, 2, \dots, k$) が s_m を始点とする点素パスとなっているかを考え, このような点素パスの組合せのうちパスの合計長が最小の組み合わせを求める. これを全ての $A_1, A_2, \dots, A_k, B_i$ の組合せについて計算することで, G_i での合計長最小の点素パスの組合せを得る. 全ての i について上記の計算を行うことで最終的に入力グラフ G の合計長最小の点素パスの組合せを得る.

Theorem 3. DAG G に対し, 幅が w である G の nice DAG パス分解が与えられたとき, G の Disjoint Path Problem を $O((k+1)^w(w^2+wk)n+n^2)$ で解くアルゴリズムが存在する.

上記のアルゴリズムを構成するため, まず関数 Cal を定義する.

Definition 19 (Cal). DAG $G = (V, E)$ の nice DAG パス分解を $X = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ とする. ある i ($i = 1, 2, \dots, s$) に対し, 頂点集合 $A_i^1, A_i^2, \dots, A_i^k, B_i \subseteq V$ が $A_i^1 \cup A_i^2 \cup \dots \cup A_i^k \cup B_i = X_i$ を満たし, さらに $A_i^1, A_i^2, \dots, A_i^k, B_i$ のうち任意の 2 つの頂点集合は共通部分集合を持たないとする. G_i を頂点集合 $X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_i$ によって誘導される G の部分グラフとする. $\mathcal{A}_i = (A_i^1, A_i^2, \dots, A_i^k)$ とし, 関数

Cal を以下のように定める.

$$\text{Cal}(i, \mathcal{A}_i, B_i) = \min \sum_{m=1}^k (|P_i^m| - 1). \quad (2)$$

ただし, 頂点集合 $P_i^m (i \leq m \leq k)$ は $P_i^m \subseteq X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_i$ を満たし, それぞれ s_m を始点とする点素なパスを構成し, $m' \neq m$ として $A_i^m \subseteq P_i^m, A_i^{m'} \cap P_i^m = \emptyset, B_i \cap P_i^m = \emptyset$ を満たす. このとき Cal は G_i の各 s_m を始点とする k 個の点素なパスの合計長の最小値を計算する関数である.

以下で Cal の計算式を与える. 各 X_i が introduce か forget かで場合分けをして計算する. ただし頂点对の始点と終点の集合をそれぞれ $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}, T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ とする.

- X_i が $v \in S$ を introduce しているとき ($v = s_m$ とする)

$$\text{Cal}(i, \mathcal{A}_i, B_i) = \begin{cases} 0 & (A_i^m = \{v\}) \\ \infty & (\text{otherwise}) \end{cases}. \quad (3)$$

- X_i が $v \in T$ を introduce しているとき ($v = t_m$ とする)

$$\text{Cal}(i, \mathcal{A}_i, B_i) = \begin{cases} \text{Cal}(i-1, \mathcal{A}_i^m, B_i) + 1 & (v \in A_i^m \text{かつ, ある } w \in \text{pred}(v) \cap A_i^m \\ & \text{が存在し, } \text{suc}(w) \cap A_i^m = \{v\}) \\ \infty & (\text{otherwise}) \end{cases}. \quad (4)$$

- X_i が $v \in V \setminus (S \cup T)$ を introduce しているとき

$$\text{Cal}(i, \mathcal{A}_i, B_i) = \begin{cases} \text{Cal}(i-1, \mathcal{A}_i^m, B_i) + 1 & (v \in A_i^m \text{かつ, ある } w \in \text{pred}(v) \cap A_i^m \\ & \text{が存在し, } \text{suc}(w) \cap A_i^m = \{v\}) \\ \text{Cal}(i-1, \mathcal{A}_i^m, B_i \setminus \{v\}) & (v \in B_i) \\ \infty & (\text{otherwise}) \end{cases}. \quad (5)$$

- X_i が $v \in V$ を forget しているとき

$$\text{Cal}(i, \mathcal{A}_i, B_i) = \min\left\{\min_{1 \leq m \leq k} \{\text{Cal}(i-1, \overline{\mathcal{A}}_i^m, B_i)\}, \text{Cal}(i-1, \mathcal{A}_i^m, B_i \cup \{v\})\right\}. \quad (6)$$

ただし, $v \in V$ に対し $\mathcal{A}_i^m, \overline{\mathcal{A}}_i^m$ を以下のように定める.

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_i^m &= (A_i^1, A_i^2, \dots, A_i^m \setminus \{v\}, \dots, A_i^k). \\ \overline{\mathcal{A}}_i^m &= (A_i^1, A_i^2, \dots, A_i^m \cup \{v\}, \dots, A_i^k). \end{aligned}$$

Cal を用いて, DAG G の nice DAG パス分解 P が与えられたときに, G の Disjoint Path Problem の解を出力するアルゴリズム Compute を示す.

Compute(P)

1. Preprocessing: 入力グラフが単一頂点 $s_1 = t_1$ からなる場合, 0 を出力する.
そうでない場合, 各頂点 $t \in T$ に入る枝をすべて削除する. こうしてできるグラフを便宜上新たに G とする.
2. First Step: $\text{Cal}(0, (\emptyset, \emptyset, \dots, \emptyset), \emptyset) = 0$ とする.
3. Exection Step: P の各 X_i ($i = 1, 2, \dots, s$) に対し, \mathcal{A}_i, B_i 全ての組合せについて順に $\text{Cal}(i, \mathcal{A}_i, B_i)$ を計算する.
4. Final Step: $i = s$ ならば, $\text{Cal}(s, (\emptyset, \emptyset, \dots, \emptyset), \emptyset)$ を出力する.

Lemma 7. Compute は G の Disjoint Path Problem の解を出力する.

Lemma 7 の証明は付録で示す.

最後に Compute の計算量を示す.

Lemma 8. DAG G の頂点数が n であるとする. このとき, 幅が w である G の DAG パス分解 P が与えられたとき, Compute(P) は $O((k+1)^w(w^2+k)n+n^2)$ の計算時間で結果を出力する.

Proof. Preprocessing において, G が単一頂点からなるかどうかは $O(1)$ で判定できる. また各 $t \in T$ に入るすべての枝の削除は $O(n^2)$ にかかる. First Step, Final Step は各々 $O(1)$ で計算できる. 以下で Exection Step での計算量を考える. 各 X_i に対し, $|X_i| \leq w+1$ に注意すると, $A_i^1, A_i^2, \dots, A_i^k, B_i$ の組合せは高々 $(k+1)^{w+1}$ 通り存在する. また Proposition 1 より $0 \leq i \leq 2|V|+1$ である. さらに $\text{pred}(v), \text{suc}(v)$ の計算量がそれぞれ高々 $O(w)$ であることに注意すると, $\text{Cal}(i, \mathcal{A}_i, B_i)$ の計算量は, X_i が introduce ならば $O(w^2)$ であり, forget ならば

$O(k)$ である。以上より、Compute の計算量は $O((k+1)^w(w^2+k)n+n^2)$ である。□

また上記のアルゴリズムに変更を加えることで、辺素パス問題や誘導点素パス問題を解くアルゴリズムを構築することができる。

3.4 有向シュタイナー木問題の $O(2^w(k+w)n+n^2)$ 時間アルゴリズム

本節では、頂点数 n の DAG G と幅が w である G の nice DAG パス分解、頂点集合 $R = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ が与えられたとき、 R を含むような有向シュタイナー木問題 (Directed Steiner Tree Problem) を $O(2^w(k+w)n+n^2)$ で解く FPT アルゴリズムを示す。

以下で Directed Steiner Tree に関する定義と定理を与える。

Definition 20 (Directed Steiner Tree). 枝重み付き有向グラフ $G = (V, E)$, 根 $r \in V$, ターミナル $R = \{t_1, t_2, \dots, t_k\} \subseteq V$ が与えられたとき, r を根とし, 各 t_i を含む有向木を Directed Steiner Tree (DST) という. minimum-DST とは, すべての DST のうち枝の総重み (単に総重みと呼ぶ) が最小のものである。

DST problem とは, G の minimum-DST の総重みを求める問題である. 各枝の重みが 1 である場合の DST problem を unit-cost DST problem と呼ぶ. Ganian ら [17] は unit-cost DST problem が DAG の場合でも NP 困難であることを示した. これより, ただちに DAG 上の DST problem が NP 困難であることが示される。

Fomin ら [18] は枝重み付き無向シュタイナー木問題に対し, ターミナル R のサイズ k をパラメータとした $2^{O(k \log k)}$ の FPT アルゴリズムを与えた. これは DST problem に拡張可能である. 一方で, 入力グラフの基礎グラフに対する木幅をパラメータとした FPT アルゴリズムは, 我々の知る限り示されていない. 本研究では DAG パス幅 w をパラメータとする FPT を構築し, 計算量が $O(2^w(k+w)n+n^2)$ であることを示す。

Theorem 4. DAG G に対し, ターミナルのサイズ $k = |R|$, 幅が w である G の nice DAG パス分解が与えられたとき, G の DST problem を $O(2^w(k+w)n+n^2)$ で解く FPT アルゴリズムが存在する。

上記のアルゴリズムを構成するため, まず関数 ST を定義する. ST は各 i に

においてバッグ X_i を共通部分をもたない頂点集合 $A_i, B_i \subseteq X_i$ に分ける．その後 $X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_i$ によって誘導される部分グラフ G_i に対して $R \cap V[G_i]$ をすべて含む有向シュタイナー木のうち、 A_i を全て含み、 B_i を全て含まず、かつサイズが最小の有向シュタイナー木を求める．これを全ての A_i, B_i の組合せについて計算することで、 G_i での最小有向シュタイナー木を得る．全ての i について上記の計算を行うことで最終的に入力グラフ G の最小有向シュタイナー木を得る．以下では $d(e)$ を枝 e の重みとする．

Definition 21 (ST). DAG $G = (V, E)$ の nice DAG パス分解を $P = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ とする．ある i ($i = 1, 2, \dots, s$) に対し、頂点集合 $A_i, B_i \subseteq V$ が $A_i \cup B_i = X_i, A_i \cap B_i = \emptyset$ を満たすとする． G_i を頂点集合 $X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_i$ によって誘導される G の部分グラフとする．関数 ST を以下のように定める．

$$\text{ST}(i; A_i, B_i) = \min \left\{ \sum_{(u,v) \in E[G_{T_i}]} d(u, v) \left| \begin{array}{l} T_i \subseteq X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_i \\ G_{T_i} \text{ は } r \text{ を根とする } G_i \text{ 上の有向木} \\ V[G_{T_i}] = T_i, E[G_{T_i}] \subseteq E[G_i] \\ A_i \subseteq T_i, B_i \cap T_i = \emptyset \\ \forall t \in R \cap G_i \text{ に対し, } t \in T_i \end{array} \right. \right\}. \quad (7)$$

各 i において、 $\text{ST}(i; A_i, B_i)$ の総重みをもち、上記の条件を満たす有向木 G_{T_i} が存在する場合、その有向木を $G_{T(i, A_i, B_i)}^{\text{opt}}$ と表す．このとき、 $G_{T(s, \emptyset, \emptyset)}^{\text{opt}}$ は r を根とし、ターミナル R をすべて含む G の minimum-DST である．

以下で ST の計算式を与える．各 X_i が introduce か forget かで場合分けをして計算する．ただし入力されるグラフが DAG であるため、nice DAG パス分解において introduce される強連結成分はただ一つの頂点からなることに注意する．

• X_i が $v \in V$ を introduce しているとき

$$\text{ST}(i; A_i, B_i) = \begin{cases} \text{ST}(i-1; A_i \setminus \{v\}, B_i) + \min_{w \in \text{pred}(v) \cap A_i} d(w, v) & (v \in A_i \text{ かつ } \text{pred}(v) \cap A_i \neq \emptyset) \\ \text{ST}(i-1; A_i, B_i \setminus \{v\}) & (v \in B_i \text{ かつ } v \notin R \cup \{r\}) \\ \infty & (\text{otherwise}) \end{cases}. \quad (8)$$

- X_i が $v \in V$ を forget しているとき

$$\text{ST}(i; A_i, B_i) = \min\{\text{ST}(i-1; A_i \cup \{v\}, B_i), \text{ST}(i-1; A_i, B_i \cup \{v\})\}. \quad (9)$$

DAG G の nice DAG パス分解 P , 根 r , ターミナル R が与えられたとき, ST を用いて R を含む G の minimum-DST の総重みを出力するアルゴリズム **Compute** を示す.

Compute(P, r, R)

1. Preprocessing: G において, r から到達可能な頂点集合を V_r とする. P の各バッグ X_i に対し, 任意の $v \in V \setminus V_r$ を X_i から取り除く. こうしてできる頂点集合の列を nice DAG パス分解に変換したものを, 便宜上新たに $P' = (X_1, X_2, \dots, X_{s'})$ とする.
2. First Step: $\text{ST}(1; \{r\}, \emptyset) = 0$ とする.
3. Exection Step: P' の各 X_i ($i = 2, 3, \dots, s'$) に対し, A_i, B_i 全ての組み合わせについて順に $\text{ST}(i; A_i, B_i)$ を計算する.
4. Final Step: $i = s'$ ならば, $\text{ST}(s'; \emptyset, \emptyset)$ を出力する.

Lemma 9. **Compute** は r を根とし, R をすべて含むような G の *minimum-DST* の総重みを出力する

Lemma 9 の証明は付録で示す.

最後に **Compute** の計算量を示す.

Lemma 10. DAG $G = (V, E)$ の頂点数が n であるとする. このとき, 幅が w である G の DAG パス分解 P , 根 $r \in V$, $R \subseteq V$ が与えられたとき, $k = |R|$ とすると, **Compute**(P, r, R) は $O(2^w(k+w)n + n^2)$ の計算時間で最適解を出力する.

Proof. Preprocessing において, r から到達可能な頂点集合の計算に $O(n^2)$ かかる. First Step, Final Step は各々 $O(1)$ で計算できる. 以下で Exection Step の計算量を考える. 各 X_i に対し, $|X_i| \leq w + 1$ に注意すると, A_i, B_i の組み合わせは高々 2^{w+1} 通り存在する. また Proposition 1 より $0 \leq i \leq 2|V| + 1$ である. さらに X_i で $v \in V$ を introduce するとき, $\text{pred}(v) \cap A_i \neq \emptyset, \min$ の計算, $v \in R \cup r$ の判定がそれぞれ高々 $O(w), O(w), O(k)$ にかかることに注意すると, $\text{ST}(i; A_i, B_i)$ の計算量は, X_i が introduce ならば $O(k+w)$ であり, forget ならば $O(1)$ である. よって Exection Step での計算量は $O(2^w(k+w)n)$ である. 以

上より, Compute の計算量は $O(2^w(k+w)n+n^2)$ である. \square

さらに, 上記のアルゴリズムの簡単な拡張により, 頂点重み付き有向シュタイナー木問題を効率的に解くことができる.

Theorem 5. 頂点重み付き DAG G に対し, ターミナルのサイズ $k = |R|$, 幅が w である G の nice DAG パス分解が与えられたとき, G の vertex-weighted DST problem を $O(2^w(k+w)n+n^2)$ で解く FPT アルゴリズムが存在する.

3.5 木分解と比較したときの DAG パス分解の利点

DAG 上の NP 困難な問題に対し, 基礎グラフの木幅を用いてパラメータ化アルゴリズムを構築できる場合がある. しかし木分解は枝の向きの情報をもたないため, アルゴリズムの構築が複雑になることがある. 一方, DAG パス分解は枝の向きの情報をもつため, 一般に木分解を利用するよりもアルゴリズムの構築が容易になる場合が多い. 本節では Directed Edge Dominating Set Problem (DEDS problem) に対する木分解を用いたアルゴリズム [22] と, DAG パス分解を用いたアルゴリズムとの比較を行い, DAG パス分解の特長を示す. まず DEDS に関する定義と定理を与える.

Definition 22 (Directed Edge Dominating Set). 有向グラフ $G = (V, E)$ に対し, $S \subseteq E$ が G の Directed Edge Dominating Set (DEDS) であるとは, 任意の $(v, w) \in E$ に対し, $(v, w) \in S$ であるか, もしくはある $(u, v) \in S$ が存在することの少なくとも一方が成り立つことである. minimum DEDS (mDEDS) とは, 全ての DEDS S のうち $|S|$ が最小のものである.

DEDS problem とは, G の mDEDS のサイズを求める問題である. Hanaka ら [23] は以下を示した.

Proposition 5 (計算量クラス). DEDS problem は出次数が制限された平面的 DAG の場合でも NP 困難である.

さらに [22] では木幅を用いた FPT アルゴリズムが提案された.

Proposition 6. 有向グラフ G の基礎グラフの木幅が高々 tw であるとき, G の DEDS problem を $4^{2tw^2} 4^{2tw} n^{O(1)}$ の時間で解く FPT アルゴリズムが存在する.

上記のアルゴリズムは幅が高々 tw の木分解を利用したアルゴリズムであり, DP を行う上での必要な情報として, 木分解上の各バッグ B_t に対して問題の解を構成する枝集合 $A \subseteq E(B_t)$, 各頂点 $v \in B_t$ に対して解集合からの最短距離を

表す関数 f , 解集合からの距離を調査済みかを表す関数 s_f を保持する必要がある. このアルゴリズムは一般の有向グラフ上で利用でき, より一般化した問題に対しても動作するといった利点がある. これに対し DAG パス分解は入力グラフの枝の向きの情報を含むため, 枝の支配関係を根から順に調査することができ計算量を小さくすることができる. 木幅が抑えられた DAG でも DAG パス幅は任意に大きくなることがあるため, 計算量の単純な比較はできないが, 木分解を用いた場合よりもアルゴリズムの構築が容易になるといった利点もある. 本節では幅が w の nice DAG パス分解が与えられたとき, $O(2^{w^2}w^2n^2)$ 時間で DEDS problem を解くアルゴリズムを構築する.

Theorem 6. DAG G に対し, 幅が w である G の nice DAG パス分解が与えられたとき, G の DEDS problem を $O(2^{w^2}w^2n^2)$ で解くアルゴリズムが存在する.

上記のアルゴリズムの構成の前に, 有向グラフの Line graph に関する定義を与える.

Definition 23 (有向グラフの Line graph). 有向グラフ $G = (V, E)$ に対し, 有向グラフ $L(G) = (V_L, E_L)$ が G の Line graph であるとは, V_L, E_L が以下を満たすときである.

$$V_L = \{e \mid e \in E\}.$$

$$E_L = \{(e_1, e_2) \mid e_1 = (u, v) \in E, e_2 = (v, w) \in E\}.$$

すなわち, 有向グラフの Line graph とは元のグラフに対して枝の向きを保ちながら頂点と枝を入れ替えたようなグラフである. 以下では DAG の Line graph に対する DAG パス分解についての補題を示す. また DAG G の Line graph を $L(G)$ と表す. 以下の2つの補題により Theorem 6が示される.

Lemma 11. DAG G に対し, 幅が w である G の nice DAG パス分解が与えられたとき, 幅が高々 $O(w^2)$ である $L(G)$ の nice DAG パス分解を G の頂点数の多項式時間で構築できる.

Lemma 12. DAG G に対し, G の $mDEDS$ と $L(G)$ の $mDiDS$ は等しい.

上記の2つの補題及び Theorem 6の証明は付録で示す.

第4章 DAG パス分解を求める $O(\log^2 n)$ -近似アルゴリズム

一般の DAG に対する DAG パス幅を求める問題は NP 困難であるが、近似的な幅であれば多項式時間で求めることができる。本章では頂点数 n 、最大出次数 k である DAG G が与えられたとき、 G の DAG パス幅に対して近似率が高々 $O(k \log^2 n)$ である DAG パス分解を与える多項式時間アルゴリズムを設計する。

4.1 定義と補題

まず最小化問題に対する近似率の定義を示す。

Definition 24 (近似率). 問題の入力 I に対し、アルゴリズムが出力する解を $S_{\text{alg}, I}$ 、最適解を $S_{\text{opt}, I}$ 、目的関数の値を $f(S)$ とする。このとき近似率 r は以下のように定義される。

$$r = \sup_I \frac{f(S_{\text{alg}, I})}{f(S_{\text{opt}, I})}.$$

次に separator に関する定義と補題を与える。

Definition 25 (DAG edge-separator). [19] 各枝が正の実数のコストを持つ DAG G に対し、 S が G の DAG edge-separator であるとは、 $E[G] \setminus S$ によって誘導される部分グラフが2つの独立な頂点集合 A, B によって構成されることであり、任意の $e \in S$ は A から出て B に入る。 S のコストとは、全ての $e \in S$ のコストの総和であり、 $C(S)$ と表す。

以下では枝のコストを全て1とする。すなわち枝集合 E のコストは $|E|$ となる。

Definition 26 (b -balanced DAG edge-separator). b -balanced DAG edge-separator とは、各 $A, B \subseteq V$ について $|A| \geq b|V[G]|, |B| \geq b|V[G]|$ を満たす DAG edge-separator である。minimum b -balanced DAG edge-separator とは、全ての b -balanced DAG edge-separator S のうち、 $C(S)$ が最小のものである。

Ravi らは [19] で以下を示している。

Proposition 7. 頂点数 n の DAG G が与えられたとき、 G の minimum $\frac{1}{3}$ -balanced DAG edge-separator $S \subseteq E[G]$ が存在したとする。このときコスト $O(C(S) \log n)$ の $\frac{1}{8}$ -balanced DAG edge-separator を見つける多項式時間アルゴリズムが存在する。

上記のアルゴリズムを利用して、出次数が制限された DAG G に対し、DAG

パス幅の $O(\log^2 n)$ 倍以内の幅を持つ DAG パス分解を与える近似アルゴリズムを構成する.

4.2 $O(\log^2 n)$ -近似アルゴリズム

Theorem 7. 頂点数 n , 最大出次数 k , DAG パス幅が pw の DAG G が与えられたとき, 幅が $O(k pw \log^2 n)$ の DAG パス分解を与える多項式時間アルゴリズムが存在する.

上記のアルゴリズムを構成するため, まず Subroutine Merge を定義する. Merge は, DAG G が G_L と G_R に分割されているとき, G_L, G_R のそれぞれの nice DAG パス分解である P_L, P_R を受け取り, G の nice DAG パス分解 P を返す Subroutine である (図 1 を参照). このとき, G_L, G_R の間の枝の向きは全て G_L から出て G_R に入る向きであることに注意する. Theorem 7 のアルゴリズムでは, Proposition 7 のアルゴリズムで DAG を再帰的に分割し, 複数の小さな頂点集合を得る. 各頂点集合に対して nice DAG パス分解を得たのち, Merge によって DAG パス分解を結合していく. これを繰り返すことで最終的に元のグラフの nice DAG パス分解を得る.

Subroutine 1 (Merge). G_L から出て G_R に入る枝の端点のうち, G_L に含まれる頂点の集合を V' とする. $\text{Merge}(P_L, P_R)$ では, $P_L = (X_1, X_2, \dots, X_{s_l}), P_R = (Y_1, Y_2, \dots, Y_{s_r})$ に対し, 以下の操作を全ての $v \in V'$ に対して行っていくことができる nice DAG パス分解 P'_L, P'_R を構成する.

- v が P_L で forget されたバッグを X_i とし, 各 X_j ($j = i, i+1, \dots, s_l$) に v を追加する.
- v を各 Y_k ($k = 1, 2, \dots, s_r$) に追加する.

こうしてできた $P'_L = (X'_1, X'_2, \dots, X'_{s_l}), P'_R = (Y'_1, Y'_2, \dots, Y'_{s_r})$ に対し, $P = (X'_1, X'_2, \dots, X'_{s_l}, Y'_1, Y'_2, \dots, Y'_{s_r})$ を出力する.

Merge に関して以下の補題が得られる. 証明は付録で示す.

Lemma 13. $P = \text{Merge}(P_L, P_R)$ は G の nice DAG パス分解である.

次に, DAG G が与えられたときに G の nice DAG パス分解を出力するアルゴリズム Make を示す.

$\text{Make}(G[V])$

1. Termination Step: $|V| = 1$ ならば, G の自明な nice DAG パス分解 $P = (\emptyset, V, \emptyset)$ を返す.

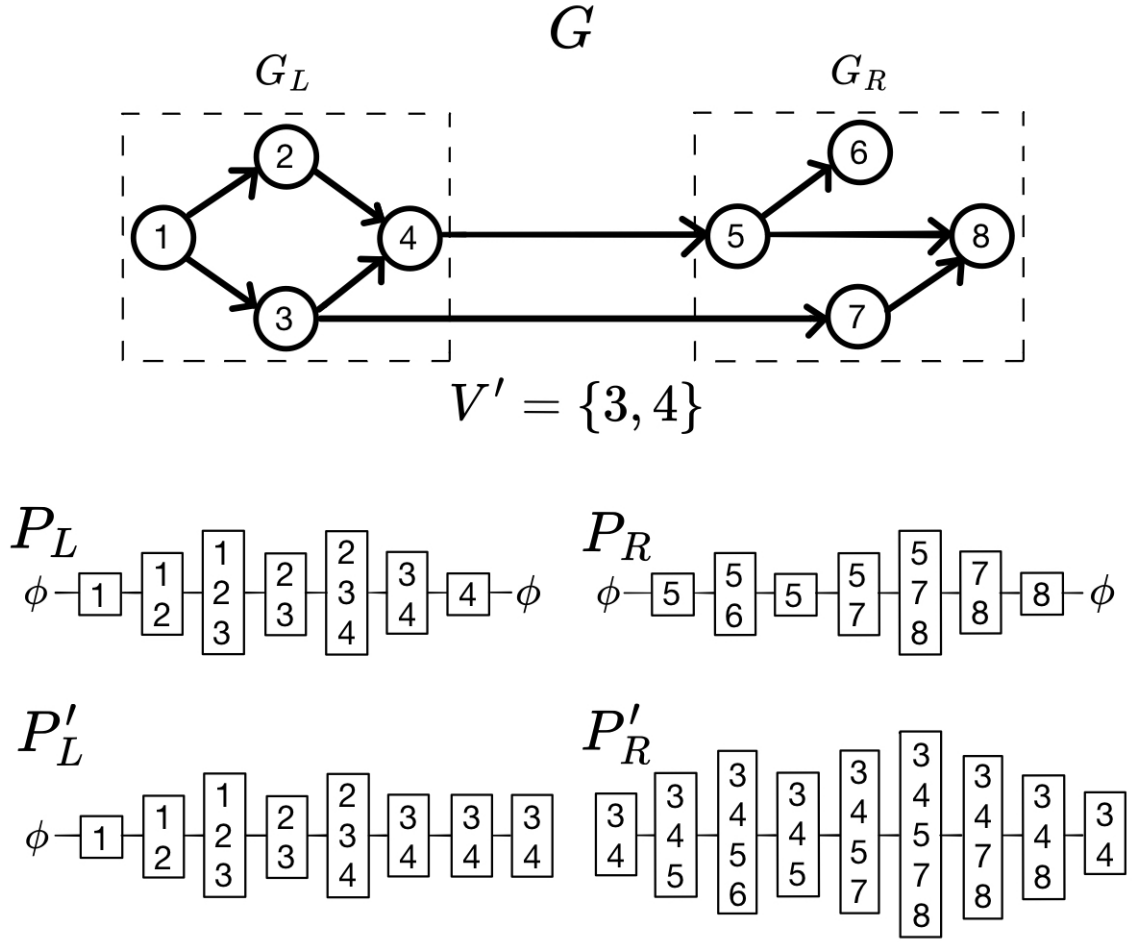


図 1: Merge の動作の様子. G_L の頂点のうち G_R に向かう枝を持つ頂点集合 V' は $\{3, 4\}$ となる. 受け取った P_L, P_R をもとに V' の各頂点をバッグに加えた P'_L, P'_R を構成し, それらを結合してできる nice DAG パス分解を返す.

2. Divide Step: A, B を, Proposition 7 のアルゴリズムによる G の分割とする.
再帰的に $D_A = \text{Make}(G[A]), D_B = \text{Make}(G[B])$ を計算する.
3. Combine Step: $D = \text{Merge}(G[A], G[B])$ とし, D を返す.
ここで定義 7 の証明のため, 次の補題を示す. 証明は付録で示す.

Lemma 14. 頂点数 n , 最大出次数 k , DAG パス幅 pw である DAG G に対し, コストが高々 $k(pw + 1)$ の *minimum $\frac{1}{3}$ -balanced DAG edge-separator* が存在する.

最後に次の補題を示すことで, 定義 7 が成り立つことを示す.

Lemma 15. 頂点数 n , 最大出次数 k , DAG パス幅が pw の DAG $G[V]$ が与え

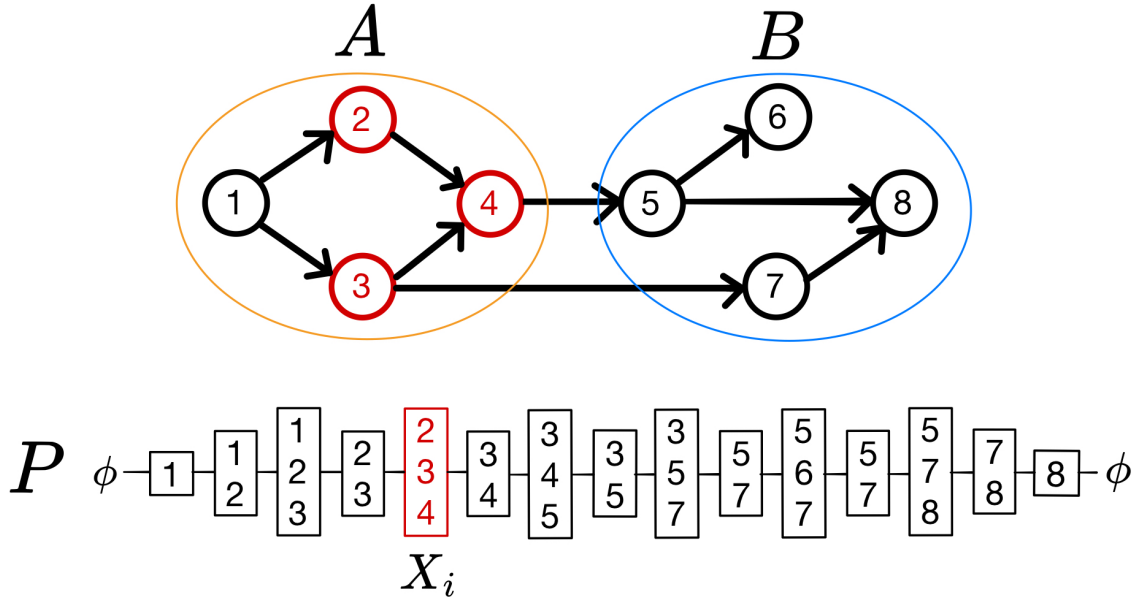


図2: 最適な nice DAG パス分解 P において、初めて半分以上の頂点が introduce されたバッグを X_i とし、それ以前のバッグの和集合を A 、残りの頂点集合を B とする。 A, B のサイズはともに全体の $\frac{1}{3}$ 以上であり、 A, B の間の枝は A から出て B に入る向きである。さらに最大出次数を k とすると、 A, B の間の枝数は高々 $k|X_i|$ 本である。

られたとき、 $P = \text{Make}(G[V])$ とする。このとき、ある定数 α が存在し、 P の幅は高々 $\alpha k(pw + 1) \log^2 n$ である。

Proof. DAG G_L, G_R があり、 G_L, G_R の間の枝は、 G_L から出て G_R に入る向きであるとする。また G_L, G_R に対して、ある nice DAG パス分解 P_L, P_R があり、幅がそれぞれ w_l, w_r であるとする。ここで G_L, G_R の間の枝の端点のうち、 G_L に含まれる頂点集合を V' とする。このとき $\text{Merge}(P_L, P_R)$ の動作中に構成される P'_L, P'_R の幅は、それぞれ高々 $w_l + |V'|, w_r + |V'|$ である。なぜならば、 P'_L は P_L の各バッグに高々 $|V'|$ 個の頂点を追加する操作を行い、 P'_R は P_R の各バッグにちょうど $|V'|$ 個の頂点を追加する操作を行うからである。したがって $\text{Merge}(P_L, P_R)$ によって得られる nice DAG パス分解 P_{LR} の幅 w_{lr} は、

$$\begin{aligned} w_{lr} &\leq \max(w_l + |V'|, w_r + |V'|) \\ &= \max(w_l, w_r) + |V'|. \end{aligned}$$

G_L, G_R の間の枝数を m とすると, $|V'|$ は高々 m であるから,

$$w_{lr} \leq \max(w_l, w_r) + m.$$

一般性を保って $w_l \leq w_r$ とすると,

$$w_{lr} \leq w_r + m.$$

minimum $\frac{1}{3}$ -balanced DAG edge-separator のコストを m_{opt} とすると, Proposition 7 より, ある定数 α があり, $m \leq \alpha m_{opt} \log n$ とできるため,

$$w_{lr} \leq w_r + \alpha m_{opt} \log n.$$

Make は Merge を高々 $\log n$ 回繰り返すため, Make が最初に構成するサイズ 1 の nice DAG パス分解の幅が 0 であることに注意すると, Make が出力する nice DAG パス分解の幅 w は,

$$\begin{aligned} w &\leq 0 + (\alpha m_{opt} \log n) \log n \\ &= \alpha m_{opt} \log^2 n. \end{aligned}$$

Lemma 14 より, $m_{opt} \leq k(pw + 1)$ であるから,

$$w \leq \alpha k(pw + 1) \log^2 n.$$

以上より, P の幅は高々 $\alpha k(pw + 1) \log^2 n$ である. □

4.3 $O(\log^{3/2} n)$ -近似アルゴリズム

上記のアルゴリズムにより $O(\log^2 n)$ の近似率である幅を持つ DAG パス分解を得られるが, 以下では one-shot BP との等価性を示すことでさらに $O(\log^{3/2} n)$ の近似率が達成できることを示す.

Theorem 8. 頂点数 n , DAG パス幅が pw の DAG G が与えられたとき, 幅が $O(pw \cdot \log^{3/2} n)$ の DAG パス分解を与える多項式時間アルゴリズムが存在する.

Per ら [20] は one-shot BP の近似アルゴリズムの存在を示している.

Proposition 8. 頂点数 n の DAG G に対し, one-shot BP のペブリング数が最小値の高々 $O(\log^{3/2} n)$ 倍である戦略を出力するアルゴリズムが存在する.

したがって, 定義 8 を示すためには以下の補題を示せば十分である.

Lemma 16. one-shot BP と nice DAG パス分解は等価な問題である.

Lemma 16 の証明は付録で示す.

第5章 $O(ld^t)$ の幅の DAG パス分解を求めるアルゴリズム

本章では最大出次数 d 、根の個数 l である DAG H と非負整数 t が与えられたとき、 $O(ld^t)$ の幅を持つ DAG パス分解を出力するか、 H の DAG パス幅が t よりも大きいことを示す証拠を与える FPT アルゴリズムを提案する。これは以下の無向グラフのパス分解を求めるアルゴリズム [8] を参考に構成する。

Proposition 9. 頂点数 n の無向グラフ H 、非負整数 t が与えられたとき、 H のパス幅が t より大きい証拠を与えるか、幅が高々 $O(2^t)$ のパス分解を与えるような $O(n)$ の計算時間のアルゴリズムが存在する。

[8] による上記のアルゴリズムを参考にし、最大出次数と根数がそれぞれ d, l の DAG H に対し、 H の DAG パス幅が t より大きい証拠を与えるか、幅が高々 $O(ld^t)$ の DAG パス分解を与えるような FPT アルゴリズムを構成する。アルゴリズムでは以下の同相埋め込みを利用する。

Definition 27 (同相埋め込み). 有向グラフ $G_1 = (V_1, E_1)$ の有向グラフ $G_2 = (V_2, E_2)$ への同相埋め込みとは、以下の性質を満たす V_1 から V_2 への写像 $f : V_1 \rightarrow V_2$ である。

1. f は単射である。
2. 以下を満たす E_1 から G_2 の点素パスの集合 \mathcal{P} への全単射写像 g が存在する。
 - 任意の $e = (u, v) \in E_1$ について、パス $g(e)$ の始点が $f(u)$ であり、終点が $f(v)$ である。

ここで2つの点素パスは始点と終点を共有してよいものとする。

以下では同相埋め込みを単に埋め込みと表現する。本節では一般の DAG に対して以下が成り立つことを示す。

Theorem 9. H を最大出次数と根数がそれぞれ d, l である任意の DAG、 t を非負整数とする。このとき以下のいずれか一方が必ず成り立つ。

- (a) H の DAG パス幅は高々 $ld^{t+3} - 1$ である。
- (b) H は2つの頂点集合 X, Y ($X \cup Y = V[H]$, $X \cap Y = \emptyset$) に分割できる。このとき X, Y によって誘導される H の部分グラフをそれぞれ A, B とすると、 H において A と B の間には A から B への枝しか存在せず、 A の DAG パス幅は t より大きい。

まず、Theorem 9を示す際に必要となる完全有向木を定義する。

Definition 28. ある正整数 d に対し、有向木 $T = (V, E)$ が以下をすべて満たすとき、 T は完全有向 d 分木である。

1. 葉を除く任意の頂点の出次数が d である。
2. 根から全ての葉までのパスの長さが等しい。

T が完全有向 d 分木であるとき、根から葉までのパスの長さを h とし、 $h + 1$ を T の高さとする。 T が根のみからなるグラフの場合、 T の高さは 1 となる。

Lemma 17. $T_{h,d}$ を高さ h の完全有向 d 分木 ($h, d > 1$) とする。このとき $T_{h,d}$ の DAG パス幅は $h - 1$ である。

Proof. h に関する数学的帰納法で示す。 $h = 2$ のとき $T_{2,d}$ の DAG パス幅は明らかに 1 であるため補題を満たす。 次にある $h > 1$ での補題の成立を仮定すると、 $T_{h,d}$ に幅が $h - 1$ の DAG パス分解 X_h が存在する。ここで $T_{h+1,d}$ は d 個の $T_{h,d}$ の根と単一の根 r を各々接続したグラフであることに注意すると、幅が h である $T_{h+1,d}$ の DAG パス分解を以下のように構成できる。はじめに r のみからなるバッグを用意し、次に d 個の DAG パス分解 X_h に対し、 X_h の各バッグに r を追加したものを順に d 個つなげる。こうしてできる頂点集合の列は DAG パス分解の 3 つのルールを満たすため $T_{h+1,d}$ の DAG パス分解であり、幅は h である。また幅が h より小さい DAG パス分解は存在しない。なぜならば、 $T_{h+1,d}$ は $T_{h,d}$ を内部に含むため、 $T_{h+1,d}$ の DAG パス幅は $h - 1$ より小さくならない。ここで幅が $h - 1$ である $T_{h+1,d}$ の DAG パス分解の存在を仮定する。このとき d 個の $T_{h,d}$ は互いに到達不可能であるため、それぞれ独立して DAG パス分解を構成でき、このとき d 個の $T_{h,d}$ の DAG パス分解を並列に行うよりも幅が大きくなるようにすることができる。 d 個の $T_{h,d}$ のうち最初に DAG パス分解を構成するものを $T'_{h,d}$ とすると、 DAG パス分解のルール 2 より $T_{h+1,d}$ の任意の DAG パス分解は必ず最初のバッグに根 r を含むため、 $T'_{h,d}$ の DAG パス分解で幅が $h - 1$ で最大となるバッグ (X' とする) には r を含んでいない。 DAG パス分解のルール 3 より r は X' 以降で再びバッグに現れないため、 $T'_{h,d}$ 以外で r と接続する $d - 1$ 個の $T_{h,d}$ は存在しないことが必要。すなわち $d = 1$ であることが必要だが、これは $d > 1$ であることと矛盾する。 X' より前に r に接続する頂点を全てバッグに含めていた場合でも、 X' で必ず $T'_{h,d}$ 以外の頂点が含まれるため、幅が $h - 1$ より大きくなり矛盾する。以上、背理法により幅が $h - 1$ である

$T_{h+1,d}$ の DAG パス分解は存在せず, $T_{h+1,d}$ の最適な DAG パス分解の幅は h である. よって $h+1$ でも補題が成り立つため, 2 以上の任意の h, d に対して補題が成り立つ. \square

以下では, 実際にアルゴリズムを構築することで Theorem 9 を示す.

入力グラフ $H = (V, E)$ に対し, 根が 1 つとなるように H に頂点と枝を加える. 具体的には高さが $\lceil \log_d l \rceil$ である完全有向 d 分木を用意し, 完全有向 d 分木の葉から H の各根に向かう枝を加えて結合する. こうしてできるグラフを H' とする. H' は出次数が高々 d であり, 根の数が 1 である. また $M_{t,d,l}$ を高さ $\lceil \log_d l \rceil + t + 2$ の完全有向 d 分木とする.

以下のアルゴリズムでは $M_{t,d,l}$ の H' への埋め込みを見つける. もし埋め込みを見つけることができれば H' の DAG パス幅は $M_{t,d,l}$ の DAG パス幅以上であることがわかる. アルゴリズムでは $M_{t,d,l}$ の頂点を H' 上に貪欲に埋め込んでいく. ここで $M_{t,d,l}$ の頂点をトークンと呼ぶ. 可能な限り埋め込みを行ったあと, H' 上に置かれたトークンを他の頂点上に移すことでさらに埋め込みを進める. $M_{t,d,l}$ の全トークンが埋め込みに使われた場合は $M_{t,d,l}$ から H' への埋め込みを発見したことを表す. トークン T が H' のある頂点に置かれたとき T は tokened であると表し, 頂点に置かれていないとき untokened であると表す. アルゴリズムを通して H' の 1 つの頂点に置くことができるトークンは 1 つのみである.

以下で各トークンの再帰的なラベル付けを与える. 図 3 で H に対する $H', M_{t,d,l}$ の構成例を示す.

1. 根のトークンは空文字列 λ とラベル付けする.
2. 高さ h の親トークン $m = \lambda b_1 b_2 \dots b_{h-1}$ の子トークンを左から順に $m \cdot 1, m \cdot 2, \dots, m \cdot d$ とラベル付けする.

アルゴリズムでは H' の頂点に $M_{t,d,l}$ のトークンを配置していく操作を繰り返す. このとき $M_{t,d,l}$ から H' への埋め込みの条件を満たすようにトークンを配置することに注意する. アルゴリズムの初期状態では H' のすべての頂点が blue で塗られていると仮定し, H' のある頂点 v にトークンが置かれた場合, v の色を red に変更し, トークンが v から削除されても red のままであるとする. このとき blue の頂点にのみトークンを置くことができるとする. したがって H' の各頂点は高々一度しかトークンを置くことができない.

GrowTokenTree と FindEmbedding の擬似コードをそれぞれ Algorithm 1, 2 で

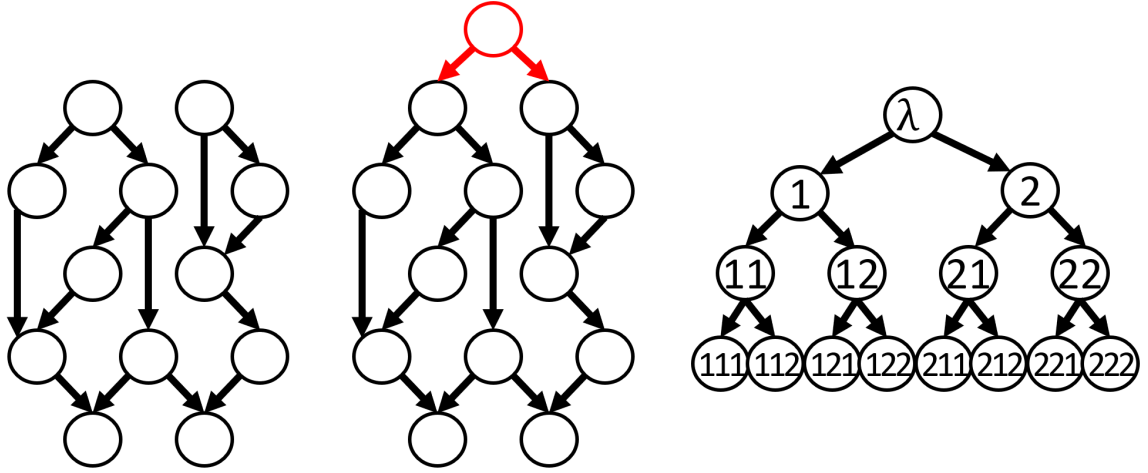


図3: $d = 2, l = 2$ である H (左) と $t = 1$ が与えられたときの H' (中央) と $M_{t,d,l}$ (右) の構成. H の各根につながる完全有向 d 分木 (赤部分) を追加したものが H' である. また $M_{t,d,l}$ のラベル付けでは親のラベルに対して文字を1つ右につなげることで再帰的に構成する.

Algorithm 1 GrowTokenTree

- 1: **while** there is a vertex $u \in H'$ with token T and a blue successor v of u whose all predecessors are placed token, and token T has an untokened child $T \cdot b$ **do**
 - 2: place token $T \cdot b$ on v
 - 3: **end while**
 - 4: **return** {tokened vertices of H' }
-

図4: GrowTokenTree の擬似コード. グラフの木構造を保ちながら H' にトークンを埋め込んでいく.

示す. GrowTokenTree (Algorithm 1) では, $M_{t,d,l}$ の木構造を保ったまま貪欲に H' の頂点にトークンを配置していく. このときトークンを置くことができる H' の頂点は, 先行頂点に全てトークンが置かれている頂点のみである. この条件を満たす頂点がなくなるまで H' にトークンを配置していき, 最後にトークンが置かれた H' の頂点集合を出力する.

Algorithm 2 FindEmbedding

```
1: place root token  $\lambda$  on root of  $H'$ 
2:  $i \leftarrow 1$ 
3:  $X_i \leftarrow$  call GrowTokenTree
4: while  $|X_i| < |V[M_{t,d,l}]|$  and  $H'$  has at least one blue vertex do
5:   if there is a vertex  $v \in H'$  with token  $T$  such that  $v$  has no blue successor
     and  $T$  has at most one tokened child then
6:     remove  $T$  from  $H'$ 
7:     if  $T$  had one tokened child  $T \cdot b$  then
8:       replace all tokens  $T \cdot b \cdot S$  with  $T \cdot S$  on  $H'$ 
9:     end if
10:  else
11:    return  $X_i$ 
12:  end if
13:   $i \leftarrow i + 1$ 
14:   $X_i \leftarrow$  call GrowTokenTree
15: end while
```

図 5: FindEmbedding の擬似コード。GrowTokenTree とトークンの入れ替えを交互に行い、DAG パス分解に相当する頂点集合の列を得る。

FindEmbedding (Algorithm 2) では DAG パス分解となる頂点集合の列 (X_1, X_2, \dots) の出力を試みる。最初に H' のただ一つの根にトークン λ を置く。その後 $i = 1$ とし、GrowTokenTree を実行して出力結果を X_1 とする。次に各 i について以下を繰り返す。 (X_1, X_2, \dots, X_i) までの構築ができているとする。 X_i で $M_{t,d,l}$ の全てのトークンを同時に使用している場合、これは $M_{t,d,l}$ から H' への埋め込みを表しているため、 H' の DAG パス幅は $M_{t,d,l}$ の DAG パス幅より小さくならないことがわかる。また H' の全ての頂点が red になった場合、 H' の各頂点に 1 度だけトークンを配置したことになる。このとき列 (X_1, X_2, \dots, X_i) は H' の DAG パス分解になっており、証明はこの後に示す。上記の 2 つの場合以外、すなわち $M_{t,d,l}$ の全てのトークンを同時に使用しておらず、かつ H' に少なくと

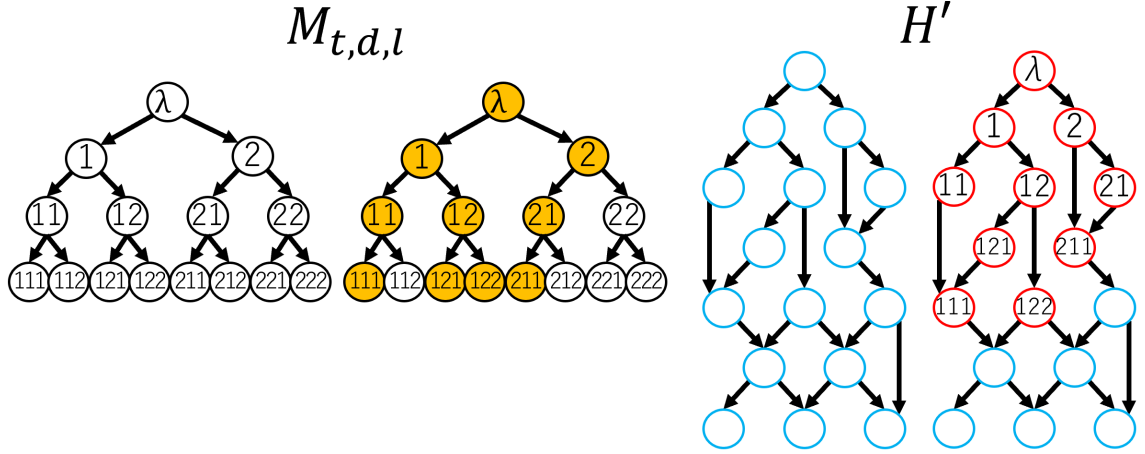


図 6: GrowTokenTree の動作の様子. $M_{t,d,l}$ の橙色のトークンは tokened であることを表す. 初期の状態 ($M_{t,d,l}$ 左, H' 左) に対し, $M_{t,d,l}$ の根 λ から順に木構造を保ったまま H' に埋め込みを行っている ($M_{t,d,l}$ 右, H' 右).

も 1 つの blue の頂点が存在する場合, トークンの配置を変更することでさらに GrowTokenTree の処理を進めることができる可能性がある. したがって以下で述べる条件を満たす頂点 $v \in V[H']$ について, v に置かれたトークン T を v から取り除くことを考える. T を v から取り除くことができる条件は, (a) v の後続頂点が全て red であり, かつ (b) $M_{t,d,l}$ 上で T の tokened な子トークンが高々 1 つしかないことである. 前者は DAG パス分解において forget が可能な条件に対応し, 後者は埋め込みの状態を保つための条件に対応する. トークン T が上記の 2 つの条件を満たしている場合のみ, T を v から取り除くことができる. このとき $M_{t,d,l}$ 上で tokened なトークン集合を取り出すと T で非連結となる場合があるため, tokened な T の子 $T \cdot b$ を根とする有向木上のトークンをすべて, T を根とする有向木上の各トークンに置き換えることで, $M_{t,d,l}$ 上で tokened なトークン集合が常に連結になるようにできる. ただしこのとき, 置き換え先のトークンが untokened であるために, 根に近いトークンから順に置き換えることに注意する. この操作によって untokened となったトークンが生まれ, 別の頂点に配置できる可能性があるため, 再び GrowTokenTree を行い, X_{i+1} をその出力とする. 条件 (a)(b) を共に満たすトークンが存在しない場合, これ以上トークンの配置を進めることはできず, 最後に行った GrowTokenTree の出力をそのまま返してアルゴリズムは終了する. このとき H' の DAG パス幅は $M_{t,d,l}$ の DAG

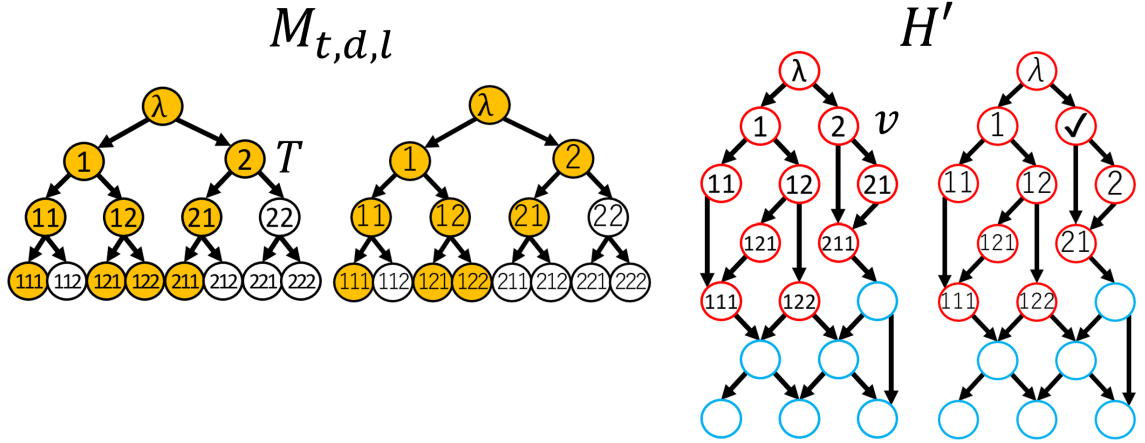


図 7: FindEmbedding でトークンを置き換える様子. 擬似コード (Algorithm 2) の列 5 の条件を満たす頂点 v と v に置かれたトークン T を選択し ($M_{t,d,l}$ 左, H' 左), v から T を取り除く. その後 T の tokened な子孫を構造を保ったまま T に連結させる ($M_{t,d,l}$ 右, H' 右). この操作によりさらに GrowTokenTree を進めることができる.

パス幅より小さくならず, これも以下で証明する.

Theorem 9 の証明のため, まず以下を示す.

Lemma 18. $M_{t,d,l}$ 上で tokened なトークン集合によって誘導される部分グラフ G' は連結であり, さらに G' から H' への埋め込みが存在する.

Proof. まず G' が常に連結であることを示す. トークンの配置や置き換えの操作は GrowTokenTree の列 2 か, FindEmbedding の列 6, 8 に限られ, 前者は明らかに連結になるようにトークンを配置しており, 後者は T の削除後, 直ちに $T \cdot b$ を根とする有向木上のトークンをすべて T を根とする有向木上の各トークンに置き換えている. これにより列 6, 8 の処理後も連結性が保たれる. よって G' は常に連結である.

次に G' から H' への埋め込みが存在することを示す. GrowTokenTree では, トークン T が配置された $u \in V[H']$ の子 v にトークン $T \cdot b$ を配置する操作なので明らかに埋め込みの条件を満たす. したがって FindEmbedding の列 6 から列 9 において埋め込みの条件が満たされることを示せば十分である. 列 5 の処理の時点で $M_{t,d,l}$ の各頂点に対して埋め込みの条件が満たされていると仮定する. 列 5 の条件を満たすトークン T が存在し, tokened な子 $T \cdot b$ を 1 つだけも

つとき列 8 が実行される．列 8 での S は 1 から d までの d 個の文字を用いた 0 文字以上の任意の長さの文字列を表し，この処理は $T \cdot b$ を根とする有向木上の全トークンを， T を根とする有向木上の各トークンに構造を保ったまま置き換える操作を表す．この置き換えでは根 λ から近い順にトークンを置き換えることとするため，置き換え先のトークンは常に `untokened` であることに注意する．上記より G' は常に連結であり，かつ T の `tokened` な子は $T \cdot b$ しか存在しないため， T を削除して $T \cdot b$ を根とする有向木上のすべてのトークンを T を根とする有向木上の各トークンに置き換える操作を行っても埋め込みの条件は満たされる． T が `tokened` な子を持たないときは列 6 のみ実行され，列 8 は実行されない．このとき T を削除しても明らかに埋め込みの条件は満たされる．したがって列 6 から列 9 の処理を行っても埋め込みの条件は保たれる．この一連の操作を繰り返しても埋め込みの条件は保たれたままであるため， G' から H' への埋め込みが存在することが示される． \square

アルゴリズム `FindEmbedding` は，(1) 列 4 で H' が `blue` の頂点を持たなくなったときか，(2) 列 4 で $|X_i| = |V[M_{t,d,l}]|$ が成り立つときか，(3) 列 11 の処理が行われたときのいずれかで終了する．以下では (1)(2)(3) のそれぞれの場合においてアルゴリズムが正しく動作することを以下の Lemma で示す．

Lemma 19. `FindEmbedding` が (1) で終了するとき，幅が高々 $ld^{t+3} - 1$ である H の DAG パス分解が存在する．

Proof. `FindEmbedding` の列 4 において $i = s$ の時点で H' のすべての頂点が `red` になって終了した場合，アルゴリズムが出力する頂点集合の列 $X_{H'} = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ は H' の DAG パス分解になっていることを示す．まず任意の頂点 $v \in H'$ は `red` であるためいずれかの頂点集合 X_i に必ず含まれる．よって DAG パス分解のルール 1 を満たす．また v はちょうど 1 度だけ `blue` から `red` に変わり，`red` のときにのみトークンが削除されてそれ以降トークンが置かれることはないため， v を含む頂点集合 X_i は連結なパスを構成する．したがって DAG パス分解のルール 3 を満たす．さらに任意の枝 $(u, v) \in E[H']$ について， v が $i = i_v$ において `blue` から `red` に変わるとする．このとき `FindEmbedding` の列 5 の条件より i_v より前の時点で u からトークンは削除されず，また `GrowTokenTree` の `while` の条件より， v の先行頂点にはすべてトークンが置かれているため， u もまた X_i に含まれる． v は $X_{i'}$ ($i' < i_v$) に含まれないことに注意すると $u, v \in X_{i_v}, v \notin X_{i_v-1}$ が

成り立つため DAG パス分解のルール 2 を満たす. 以上より頂点集合の列 $X_{H'}$ は H' の DAG パス分解となっている. $\lceil \log_d l \rceil < \log_d l + 1$ に注意すると, このとき $X_{H'}$ の幅は高々 $|V[M_{t,d,l}]| = d^{\lceil \log_d l \rceil + t + 2} - 1 < ld^{t+3} - 1$ である. ここで $X_H = (X_1 \cap V[H], X_2 \cap V[H], \dots, X_s \cap V[H])$ は H に対して DAG パス分解の 3 つのルールを満たすことから H の DAG パス分解になっていることに注意すると, X_H の幅もまた高々 $ld^{t+3} - 1$ である. したがって幅が高々 $ld^{t+3} - 1$ である H の DAG パス分解が得られる. \square

Lemma 20. FindEmbedding が (2) で終了するとき, H は共通部分をもたない 2 つの部分グラフ A, B ($V[A] \cup V[B] = V[H], V[A] \cap V[B] = \emptyset$) に分割でき, このとき H において A と B の間には A から B への枝しか存在せず, A の DAG パス幅は t より大きく, かつ高々 $ld^{t+3} - 1$ である.

Proof. FindEmbedding の列 4 において $i = s$ で $|X_s| = |V[M_{t,d,l}]|$ が成り立つとし, 頂点集合 $X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_s$ によって誘導される H' の部分グラフを A' とする. このときアルゴリズムが出力する頂点集合の列 $X_{A'} = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ は A' の DAG パス分解になっている. まず A' の定義より明らかに DAG パス分解のルール 1 を満たす. また上記と同様の議論により DAG パス分解のルール 2, 3 を満たす. よって $X_{A'}$ は A' の DAG パス分解である. ここで A を頂点集合 $V[A'] \cap V[H]$ によって誘導される部分グラフとし, B を頂点集合 $V[H] \setminus V[A]$ によって誘導される部分グラフとする. A, B は共通部分をもたず, DAG パス分解のルール 2 より A と B の間には A から B への枝しか存在しないことに注意する. $X_A = (X_1 \cap V[H], X_2 \cap V[H], \dots, X_s \cap V[H])$ とすると, X_A は A に対して DAG パス分解の 3 つのルールを満たすことから A の DAG パス分解になっている. このとき上記と同様の議論により X_A は幅が高々 $ld^{t+3} - 1$ である.

さらに $X_{A'}$ の右端のバグ X_s によって誘導される H' の部分グラフを A'_M とする. $i = s$ において $M_{t,d,l}$ 上のすべてのトークンが埋め込みに使われていることに注意すると, Lemma 18 より A'_M は $M_{t,d,l}$ から H' への埋め込みを表している. ここで $M_{t,d,l}$ は高さが $\lceil \log_d l \rceil + t + 2$ であり, A' は A'_M を内部に含む. また頂点集合 $V[A'] \setminus V[A]$ によって誘導される部分グラフは高さが高々 $\lceil \log_d l \rceil$ の完全有向 d 分木であることに注意すると, A には少なくとも $(\lceil \log_d l \rceil + t + 2) - (\lceil \log_d l \rceil) = t + 2$ の高さをもつ完全有向 d 分木 T_A を埋め込むことができる. すなわち T_A から A への埋め込みが存在する. Lemma 17 より T_A の DAG パス幅は $t + 1$ であるため,

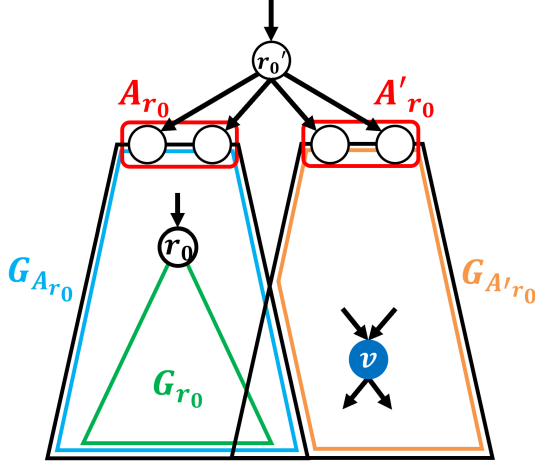


図 8: Lemma 21 の証明の様子. r_0 と v の直近の共通の子孫を r'_0 としている. 証明では blue な頂点 v が r_0 とその子孫からなる G_{r_0} に含まれていなければ矛盾が生じることを示している.

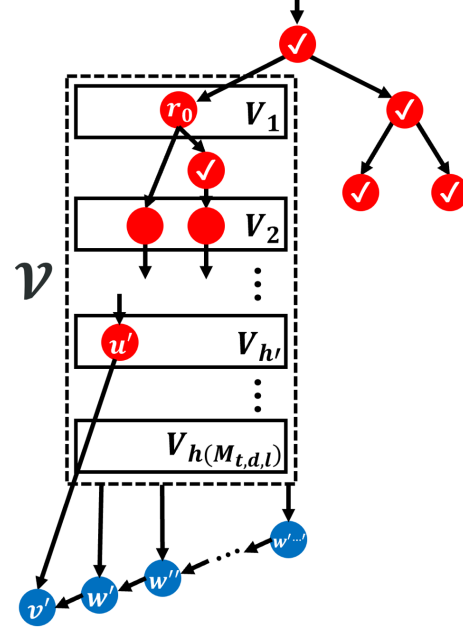


図 9: Lemma 22 の証明の様子. 青い頂点は blue を, チェックの赤い頂点は remove 済みの頂点を, それ以外の赤い頂点はトークンが置かれていることを表す. 証明では $V_{h(M_{t,d,l})}$ に頂点が存在しなければ矛盾が生じることを示している.

A の DAG パス幅もまた $t+1$ 以上である. よって A を内部に含む H の DAG パス幅は t より大きいことが示される. 以上より A の DAG パス幅は t より大きく, かつ高々 $ld^{t+3} - 1$ である.

□

Lemma 22 の証明の前に以下を示す. 証明の様子は図 8 で示す.

Lemma 21. 任意の時点 $i = k$ において, H' の頂点のうち根トークン λ が置かれた頂点を r_0 とする. このとき H' 上の blue な頂点は必ず r_0 を祖先にもつ.

Proof. 背理法で示す. $i = k$ において, ある blue な $v \in V[H']$ が r_0 を祖先にもたないと仮定する. H' は根が 1 つだけであることに注意すると, r_0 と v の共通の祖先が存在する. このうち子孫に r_0 と v の共通の祖先をもたないものを r'_0 とする. r'_0 が複数存在する場合はそのうち 1 つを r'_0 とする. このとき $v \neq r'_0$ に注

意する．なぜならば $i = k$ において r_0 には根トークン λ が置かれており，その祖先 r'_0 はトークンが remove 済みである必要がある．したがって $r'_0 = v$ と仮定すれば v が blue であることと矛盾するからである．ここで r'_0 の子のうち子孫に r_0 を持つ頂点集合を A_{r_0} ，それ以外の子の頂点集合を A'_{r_0} とし， A_{r_0} に含まれる頂点の子孫の集合によって誘導される部分グラフを $G_{A_{r_0}}$ ， A'_{r_0} に含まれる頂点の子孫の集合のうち， $G_{A_{r_0}}$ に含まれない頂点集合によって誘導される部分グラフを $G_{A'_{r_0}}$ とする．また r_0 の子孫によって誘導される部分グラフを G_{r_0} とする．仮定より $v \notin V[G_{r_0}]$ であるため， $v \in V[G_{A_{r_0}}] \setminus V[G_{r_0}]$ もしくは $v \in V[G_{A'_{r_0}}]$ が成り立つ必要がある．ここで $G_{A_{r_0}}$ 上のいずれかの頂点に初めてトークン λ が置かれた瞬間を $i = l$ ($l \leq k$) とする．このとき $i = l$ の時点で $G_{A'_{r_0}}$ 上の頂点はすべてトークンが remove されている必要がある．以下で理由を説明する． H' 上の頂点は (a)blue か，(b)red でトークンが置かれているか，(c)red でトークンが remove されているかのいずれかである． $i = l$ のとき v は blue であるため，FindEmbedding の列 5 の条件から v の親は (a) か (b) のいずれかである．(a) の場合はさらにその親を見ると同様に (a) か (b) のいずれかである．これを (a) である限り繰り返すことにより， v の祖先が全て (a) であれば， $i = l$ において A'_{r_0} に blue な頂点が少なくとも 1 つ存在し，1 つでも (b) の祖先が存在すれば， r'_0 に置かれていたトークンには $G_{A_{r_0}}$ 側と $G_{A'_{r_0}}$ 側で少なくとも 2 つ以上の tokened な子トークンをもっていたことになる． $i = l$ で r'_0 は (c) に当てはまることに注意すると，前者では FindEmbedding の列 5 の条件である r'_0 に blue な子が存在しないことに反し，後者では列 5 の条件である r'_0 に置かれたトークンは高々 1 つの tokened な子しかもたないことに反する．よって $v \notin V[G_{A'_{r_0}}]$ であることが必要．仮定より $v \notin V[G_{A_{r_0}}]$ であるため， $v \in V[G_{A_{r_0}}] \setminus V[G_{r_0}]$ が成り立つ必要がある．ところがこのとき v と r_0 の共通の祖先がかならず A_{r_0} に含まれるため， r'_0 の子孫に v と r_0 の共通の祖先が存在しないことと矛盾する．したがって Lemma 22 の主張が示される． \square

Lemma 21 を利用して Lemma 22 を示す．証明の様子は図 9 で示す．

Lemma 22. FindEmbedding が (3) で終了するとき， H の DAG パス幅は t よりも大きい．

Proof. 列 11 が処理された時点をも $i = k$ とする．まず $i = k$ において $M_{t,d,l}$ 上で tokened なトークン集合上に根から葉までのパス $P = (\lambda \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_{\lfloor \log_d l \rfloor + t + 1})$

が少なくとも1つ存在することを示す．そのためこのようなパスが存在しないと仮定して背理法で示す． $M_{t,d,l}$ 上の tokened なトークン集合上で根を始点とする最長のパスを P' とする．また $M_{t,d,l}$ の高さ $\lceil \log_d l \rceil + t + 2$ を $h(M_{t,d,l})$ と表す．仮定より $|P'| \leq h(M_{t,d,l}) - 1$ が成り立つ． P' の終点を T' ， T' が置かれた頂点を $u' \in V[H']$ とする．GrowTokenTree の列1の条件より，次の少なくとも一方が成立する．

1. ある頂点 $v' \in \text{suc}(u')$ が存在し， v' のある親 w' が blue である．
2. T' が untokened な子をもたない．

なお u' の子が存在しない場合は考えなくてよい．なぜならばこのとき u' に置かれたトークンを remove でき，(3) の状態にならないからである．条件2が成り立つならば， T' が葉であるか T' の子がすべて tokened であるかのいずれかであるが，これらはいずれも成り立たない．なぜならば仮定より P' の終点 T' は葉でなく，また T' が tokened な子をもてば P' が最長のパスであることに矛盾するからである．したがって条件1が成り立つ必要がある．ここで根トークン λ が置かれた頂点を r_0 とする． H' 上で r_0 の子孫によって誘導される部分グラフを G_{r_0} とし， G_{r_0} 上の頂点のうち， $M_{t,d,l}$ 上で高さが h ($1 \leq h \leq h(M_{t,d,l})$) であるトークンが置かれた頂点の集合を V_h とする．また $\mathcal{V} = \bigcup_{1 \leq h \leq h(M_{t,d,l})} V_h$ とする．仮定より $u' \in V_{h'}$ ($1 \leq h' \leq h(M_{t,d,l}) - 1$) である．また Lemma 21 より，blue な v', w' は共に r_0 から到達可能であるため G_{r_0} に含まれている．また GrowTokenTree のトークンの置き方から blue な頂点の子は red にならないことに注意すると， v', w' 及びこれらの子孫はすべて \mathcal{V} に含まれていない．ここで w' について次のいずれか一方が必ず成り立つ．

1. w' の親がすべて \mathcal{V} に含まれる．
2. w' の親で \mathcal{V} に含まれない blue な頂点が少なくとも1つ存在する．

なお， w' の親で \mathcal{V} に含まれない red な頂点は存在しない．なぜならば Lemma 21 と同様の議論により， w' の親はそれぞれ (a) blue か，(b) red でトークンが置かれているかのいずれかしかないからである．したがって1つでも (a) である親が存在すれば条件2となり，それ以外であれば条件1となる．もし条件1が成り立つならば， w' にはトークンを置くことができるはずである．なぜならば，パス P' が最長であることから w' の親はすべて $V_1, V_2, \dots, V_{h'}$ のいずれかに必ず含まれ，かつ w' の各親に置かれたトークンは H' の最大出次数である d 個の子をそれぞれ持っている．よって w' の各親に置かれたトークンは少なくとも1つの

untokened な子を持っているはずであり、このようなトークンを w' に置くことができるからである。したがって条件 1 が成り立つならば w' が blue であることと矛盾する。これより条件 2 が成り立つ必要がある。このとき条件 2 を満たすような w' の blue な親を w'' とすると、 w'' についても同様の議論によって条件 2 を満たす blue な親 w''' が存在する必要がある。この議論を繰り返すと、 H' の頂点数は有限個であるため、いずれ必ず条件 1 を満たす blue な頂点 $w' \dots'$ が存在する。したがって必ず矛盾が生じるため、背理法により $M_{t,d,l}$ で tokened なトークン集合上に根から葉までのパス $P = (\lambda \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_{h(M_{t,d,l})-1})$ が少なくとも 1 つは存在する。

次に上記の P を用いて H の DAG パス幅が t よりも大きいことを示す。(3) では FindEmbedding の列 5 を満たすトークンが存在しないことから、各トークン $m_i \in P$ (ただし λ を m_0 と表現する) について m_i が置かれた頂点 $v_i \in V[H']$ は以下の少なくとも一方が成り立つ。

1. ある $w_i \in \text{suc}(v_i)$ が存在し、 w_i 及びその子孫はすべて \mathcal{V} に含まれず、かつ w_i は blue である。
2. v に置かれたトークン T が 2 つ以上の tokened な子をもつ。

以降では各 v_i に対しある頂点 u_i が存在し、 H' の任意の DAG パス分解には各 u_i ($0 \leq i \leq h(M_{t,d,l}) - 1$) をすべて含むバッグが必ず存在するように u_i を構成できることを示す。まず v_i が条件 1 を満たす場合を考える。このとき v_i は $v_{h(M_{t,d,l})-1}$ にトークン $m_{h(M_{t,d,l})-1}$ が置かれるまでは H の DAG パス分解において forget することはできない。なぜならば、 w_i 及びその子孫はすべて \mathcal{V} に含まれないことから、GrowTokenTree の動作に注意して w_i にトークンが置かれるのは $v_{h(M_{t,d,l})-1}$ にトークン $m_{h(M_{t,d,l})-1}$ が置かれた後であり、 w_i を後続頂点にもつ v_i はそれよりも前にトークンを remove できないためである。これより H' の DAG パス分解上では $v_{h(M_{t,d,l})-1}$ の introduce よりも前に v_i を forget できない。このとき $u_i = v_i$ とする。次に m_i が条件 1 を満たさず 2 を満たす場合を考える。 m_i は m_{i+1} 以外の tokened な子 m'_{i+1} を少なくとも 1 つもつ。 m'_{i+1} が置かれた頂点についても条件 1, 2 の少なくとも一方を満たすため、上記の議論を繰り返すことにより、 $M_{t,d,l}$ の葉で tokened なものは必ず条件 1 を満たすことに注意すると、 m'_{i+1} のある子孫のトークンが置かれ、条件 1 を満たすような頂点が少なくとも 1 つ存在する。このような頂点を u_i とする。上記と同様の理由により、

u_i は $v_{h(M_{t,d,l})-1}$ に $m_{h(M_{t,d,l})-1}$ が置かれるまでは H' の DAG パス分解において forget することができない。以上より各 v_i に対して u_i を構築できる。

H' の任意の DAG パス分解 X' において $v_{h(M_{t,d,l})-1}$ が introduce されるバッグ X_p では、上記の議論により各 u_i が含まれているため、 X' の幅は少なくとも $h(M_{t,d,l}) - 1$ 以上である。ここでトークン列 P のうち H の頂点に置かれたトークンのみを取り出してできるトークン列を P_H とすると、 $|P \setminus P_H| \leq \lceil \log_d l \rceil$ より $|P_H| = |P| - |P \setminus P_H| \geq (\lceil \log_d l \rceil + t + 2) - \lceil \log_d l \rceil = t + 2$ が言え、上記と同様の議論により H の任意の DAG パス分解の幅は t より大きいことが示される。

□

最後に Theorem 9 を示す。

Proof. (Theorem 9)

DAG H を FindEmbedding に入力することで上記の (1)(2)(3) のいずれか 1 つで必ず終了する。(1) で終了するとき、Lemma 19 より Theorem 9 の (a) が成り立つ。(2) で終了するとき、Lemma 20 より Theorem 9 の (b) が成り立つ。(3) で終了するとき、Lemma 19 より $A = H$ とすることで Theorem 9 の (b) が成り立つ。以上より Theorem 9 が示される。

□

Corollary 1. 最大出次数 d , 根の個数 l である DAG H , 整数 t が与えられたとき、 H の DAG パス幅が t より大きい証拠を与えるか、幅が高々 $O(ld^t)$ の DAG パス分解を与えるような $O(n^2)$ 時間のアルゴリズムが存在する。

Proof. Theorem 9 より、FindEmbedding は H の DAG パス幅が t より大きい証拠として完全 d 分木の H への埋め込みを出力するか、幅が高々 $O(ld^t)$ の DAG パス分解を出力する。以下では FindEmbedding が多項式時間で終了することを示す。GrowTokenTree では列 1 の while の条件の判定は高々 $O(dn)$ かかり、これを高々 $|V[M_{t,d,l}]| = O(d^t)$ 回繰り返す。また FindEmbedding の列 6 の T の削除によって、 T が置かれていた頂点は red のままであるため、この操作は高々 $O(n)$ 回行われることに注意すると、列 4 の while もまた高々 $O(n)$ 回行われる。さらに列 10 の while は明らかに高々 d^2 回繰り返す。他のステップは $O(1)$ の計算時間で処理される。以上よりアルゴリズムは d, l がある定数以下であるとする $O(n^2)$ で停止する。

□

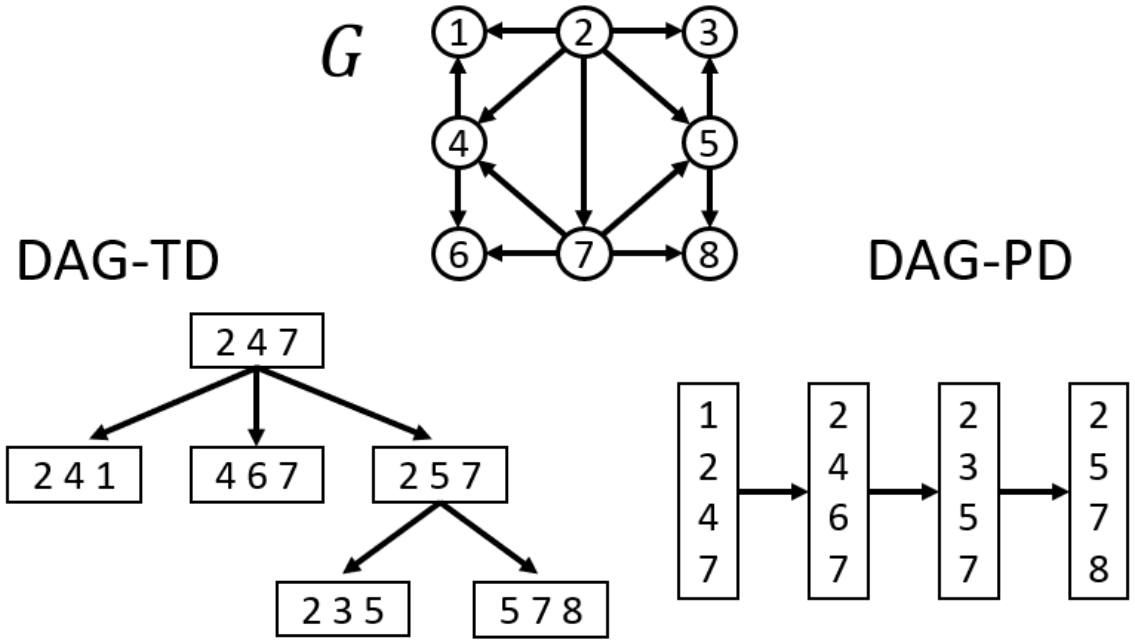


図 10: G に対する DAG 木分解と DAG パス分解の構成例. DAG 木分解上での 1 つのパスは, G のある部分グラフに対する DAG パス分解になっている. また DAG パス分解も DAG 木分解の一つであり, DAG 木幅は DAG パス幅より大きくならない.

第 6 章 DAG 木幅

6.1 DAG 木幅と DAG 木分解の定義

本節では DAG パス幅の拡張として DAG 木幅・DAG 木分解を導入する.

Definition 29 (DAG 木分解). 有向グラフ $G = (V, E)$ の DAG 木分解とは, 有向木 T と, T の各ノード t について $\beta(t) \subseteq V$ であるような β とのペア (T, β) である. (T, β) は以下の 3 つを満たす.

1. $\sum_{t \in T} \beta(t) = V$
2. T の根 r に対し, 任意の枝 $(u, v) \in E$ について $u, v \in \beta(r)$ か, もしくはある i ($i \in T, i \neq r$) とその親 j があり, $u, v \in \beta(i), v \notin \beta(j)$ が成り立つ.
3. 任意の $i, j, k \in T$ に対し, j が i から k までのパス上に存在するならば, $\beta(i) \cap \beta(k) \subseteq \beta(j)$. すなわち各 $v \in V$ について, v を含むバッグは T 上で非空な部分有向木を誘導する.

DAG 木分解の例を図 10 で示す. 以下で DAG 木幅を定義する.

Definition 30 (DAG 木幅). ある DAG 木分解 (T, β) の幅を $\max_{t \in T} |\beta(t)|$ と定義する. このとき, 有向グラフ G の DAG 木幅とは, G に対する全ての DAG 木分解のうち, 幅が最小である DAG 木分解の幅である.

以降では, G の DAG パス幅, DAG 木幅をそれぞれ $\text{pw}(G), \text{tw}(G)$ と表す. DAG 木幅を求める問題の計算量クラスについて, 以下を示す.

Theorem 10 (計算量クラス). 有向グラフ G が与えられたとき, G の DAG 木幅を計算する問題は NP 困難である.

Theorem 10 の証明は付録で示す.

最後に nice DAG パス分解と同様に nice DAG 木分解についても定義する.

Definition 31 (nice DAG 木分解). $G = (V, E)$ を有向グラフとし, (T, β) を G の DAG 木分解とする. (T, β) が以下の 2 つを満たすとき, (T, β) は G の nice DAG 木分解であるという.

1. r を T の根としたとき, $\beta(r) = \emptyset$
2. 各 $i \in T$ に対し, $\beta(i)$ は以下のいずれかである.

introduce i がただ 1 つの子 j をもち, ある強連結成分 $S \subseteq V$ があり,

$$S \cap \beta(i) = \emptyset \text{ かつ } \beta(j) = \beta(i) \cup S$$

forget i がただ 1 つの子 j をもち, ある $v \in V$ があり, $\beta(j) = \beta(i) \setminus \{v\}$

union i がちょうど 2 つの子 j, k をもち, $\beta(i) = \beta(j) = \beta(k)$

nice DAG 木分解の例を図 11 で示す. ある DAG 木分解が与えられたとき, 幅が同じである G の nice DAG 木分解を効率よく構築することができる.

Theorem 11 (nice DAG 木分解の効率的な構築). (T, β) が有向グラフ $G = (V, E)$ の DAG 木分解であるとする. また (T, β) の幅を w とする. このとき, 幅が w であるような G の nice DAG 木分解を多項式時間で構築できる.

Proof. (T, β) に対し, 以下の手順を行い nice DAG パス分解を得る.

1. T の根に親 r ($\beta(r) = \emptyset$) を追加する.
2. ある $i \in T$ がただ 1 つの子 $j \in T$ をもち, かつ $\beta(i) = \beta(j)$ ならば, T から j を除き, i から j のそれぞれの子への枝を加える. このような i, j がなくなるまでこの操作を繰り返す.
3. 以下の 5 つの状態がなくなるまで操作を繰り返す.
 - (a) ある $i \in T$ とその子 $j \in T$ について, $\beta(i) \not\subseteq \beta(j)$ かつ $\beta(j) \not\subseteq \beta(i)$ ならば, i と j の間に i' ($\beta(i') = \beta(i) \cap \beta(j)$) を加え, (i, i', j) の順につなぐ.

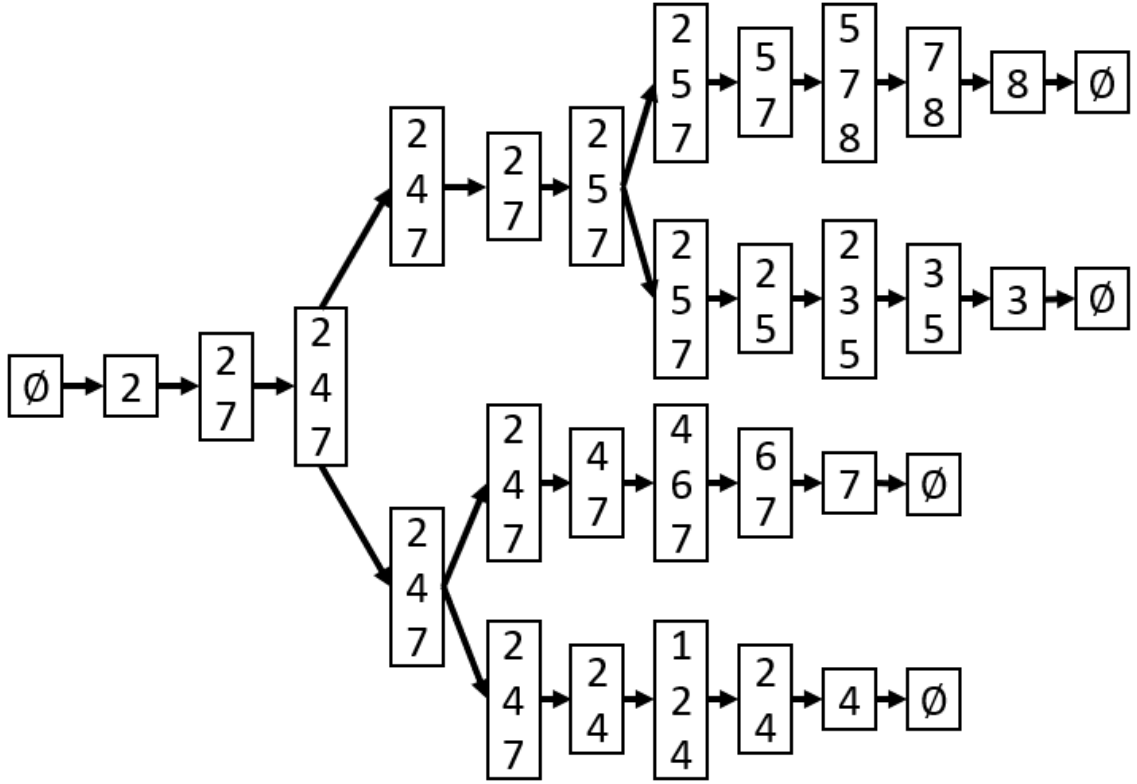


図 11: 図 10 の G に対する nice DAG 木分解の構成例. 1 つの根と複数の sink をもち, それぞれ空集合からなる. それ以外のバッグは, 親のバッグに対して強連結成分が 1 つ加えられた introduce か, 頂点が 1 つ除かれた forget, もしくは自身と同じ兄弟をもつ union のいずれかとなる. 任意の DAG 木分解から, 同じ幅をもった nice DAG 木分解を効率よく構築できる.

- (b) ある $i \in T$ と, その子 $j \in T$ について, $\beta(j) \subseteq \beta(i)$ かつ $|\beta(i)| - |\beta(j)| \geq 2$ ならば, i と j の間に i'' ($\beta(i'') = \beta(i) \setminus \{v\}, v \in \beta(i) \setminus \beta(j)$) を加え, (i, i'', j) の順につなぐ.
- (c) ある $i \in T$ と, その子 $j \in T$ について, $\beta(i) \subseteq \beta(j)$ かつ $\beta(j) \setminus \beta(i)$ が強連結成分でないとき, i と j の間に i''' ($\beta(i''') = \beta(j) \setminus A$, A は $\beta(j) \setminus \beta(i)$ の強連結成分) を加え, (i, i''', j) の順につなぐ.
- (d) ある i が k ($k \geq 3$) 個以上の子を持つとき, i の直後に, 高さが $\lfloor \log_2 k \rfloor$ の完全二分有向木 T' ($\forall t' \in T'$ について $\beta(t') = \beta(i)$) を追加し, T' の各葉に対して 2 つずつ i の子を接続し, 枝の向きは葉から子への向きとする. ただし, $\lfloor x \rfloor$ は x を超えない最大の整数値とする.

- (e) ある i が 2 つの子 j, k をもつとき, i と j , i と k の間にそれぞれ j', k' ($\beta(j') = \beta(k') = \beta(i)$) を追加し, それぞれ (i, j', j) , (i, k', k) とつなぐ.

以上の操作によってできる DAG 木分解は, 幅が高々 w であり, また G の nice DAG 木分解である. この構築は G の頂点数の多項式時間で行える. \square

6.2 co-DAG 木幅

DAG 木分解 T を FPT アルゴリズムに利用する場合, T の葉から動的計画法を開始すると FPT を構築しやすい. 本節では, より FPT アルゴリズムの構築に適した co-DAG 木幅を定義する. そのためにまず co-DAG 木分解の定義を行う.

Definition 32 (co-DAG 木分解). 有向グラフ $G = (V, E)$ の co-DAG 木分解とは, 反有向木 T と, T の各ノード t について $\beta(t) \subseteq V$ であるような β とのペア (T, β) である. (T, β) は以下の 3 つを満たす. なお, T の根の数を n_l とする.

1. $\sum_{t \in T} \beta(t) = V$
2. T の各葉を r_m ($m = 1, 2, \dots, n_r$) と表したとき, 任意の枝 $(u, v) \in E$ について以下の少なくともいずれか一方が成り立つ.
 - ある j ($1 \leq j \leq n_r$) があり, $u, v \in \beta(r_j)$
 - ある i ($i \in T$) とその親 j があり, $u, v \in \beta(i)$, $u \notin \beta(j)$
3. 任意の $i, j, k \in T$ に対し, j が i から k までのパス上に存在するならば, $\beta(i) \cap \beta(k) \subseteq \beta(j)$. すなわち各 $v \in V$ について, v を含むバッグは T 上で非空な部分反有向木を誘導する.

DAG 木分解は枝の向きと同方向に向かってバッグを構成していたが, co-DAG 木分解は枝の向きと逆方向に向かってバッグを構成している. これによって co-DAG 木分解を FPT アルゴリズムに利用する際, 葉側のバッグから動的計画法を実行することができる. 以下では co-DAG 木幅を定義する.

Definition 33 (co-DAG 木幅). ある co-DAG 木分解 (T, β) の幅を $\max_{t \in T} |\beta(t)|$ と定義する. このとき, 有向グラフ G の co-DAG 木幅とは, G に対する全ての co-DAG 木分解のうち, 幅が最小である co-DAG 木分解の幅である.

以降では, G の co-DAG 木幅を $\text{ctw}(G)$ と表す. co-DAG 木幅を求める問題の計算量クラスについて, 以下を示す.

Theorem 12 (計算量クラス). 有向グラフ G が与えられたとき, G の co-DAG 木幅を計算する問題は NP 困難である.

Theorem 12 の証明は付録で示す. 最後に nice co-DAG 木分解についても定義

する.

Definition 34 (nice co-DAG 木分解). $G = (V, E)$ を有向グラフとし, (T, β) を G の co-DAG 木分解とする. (T, β) が以下の 2 つを満たすとき, (T, β) は G の nice co-DAG 木分解であるという.

1. r_m ($m = 1, 2, \dots, n_r$) を T の各葉としたとき, 全ての m に対して $\beta(r_m) = \emptyset$
2. $R = \{r_m | m = 1, 2, \dots, n_r\}$ としたとき, 各 $i \in T \setminus R$ に対し, $\beta(i)$ は以下のいずれかである.

introduce i がただ 1 つの親 j をもち, ある強連結成分 $S \subseteq V$ があり,
 $S \cap \beta(j) = \emptyset$ かつ $\beta(i) = \beta(j) \cup S$

forget i がただ 1 つの親 j をもち, ある $v \in V$ があり, $\beta(i) = \beta(j) \setminus \{v\}$

union i がちょうど 2 つの親 j, k をもち, $\beta(i) = \beta(j) = \beta(k)$

ある co-DAG 木分解が与えられたとき, 幅が同じである G の nice co-DAG 木分解を効率よく構築することができる.

Theorem 13 (nice co-DAG 木分解の効率的な構築). (T, β) が有向グラフ $G = (V, E)$ の co-DAG 木分解であるとする. また (T, β) の幅を w とする. このとき, 幅が w であるような G の nice co-DAG 木分解を多項式時間で構築できる.

Proof. (T, β) に対し, 以下の手順を行い nice co-DAG パス分解を得る.

1. T の各葉 r_m に対し, 親 r'_m ($\beta(r'_m) = \emptyset$) を追加する.
2. ある $i \in T$ がただ 1 つの親 $j \in T$ をもち, かつ $\beta(i) = \beta(j)$ ならば, T から j を除き, j のそれぞれの親から i への枝を加える. このような i, j がなくなるまでこの操作を繰り返す.
3. 以下の 5 つの状態がなくなるまで操作を繰り返す.
 - (a) ある $i \in T$ とその親 $j \in T$ について, $\beta(i) \not\subseteq \beta(j)$ かつ $\beta(j) \not\subseteq \beta(i)$ ならば, i と j の間に i' ($\beta(i') = \beta(i) \cap \beta(j)$) を加え, (j, i', i) の順につなぐ.
 - (b) ある $i \in T$ と, その親 $j \in T$ について, $\beta(j) \subseteq \beta(i)$ かつ $|\beta(i)| - |\beta(j)| \geq 2$ ならば, i と j の間に i'' ($\beta(i'') = \beta(i) \setminus \{v\}, v \in \beta(i) \setminus \beta(j)$) を加え, (j, i'', i) の順につなぐ.
 - (c) ある $i \in T$ と, その親 $j \in T$ について, $\beta(i) \subseteq \beta(j)$ かつ $\beta(j) \setminus \beta(i)$ が強連結成分でないとき, i と j の間に i''' ($\beta(i''') = \beta(j) \setminus A, A$ は $\beta(j) \setminus \beta(i)$ の強連結成分) を加え, (j, i''', i) の順につなぐ.
 - (d) ある i が k ($k \geq 3$) 個以上の親を持つとき, i の直前に, 高さが $\lfloor \log_2 k \rfloor$

の完全二分反有向木 T' ($\forall t' \in T'$ について $\beta(t') = \beta(i)$) を追加し、 T' の各葉に対して2つずつ i の親を接続し、枝の向きは親から根への向きとする。ただし、 $\lfloor x \rfloor$ は x を超えない最大の整数値とする。

- (e) ある i が2つの親 j, k を持つとき、 i と j, k の間にそれぞれ j', k' ($\beta(j') = \beta(k') = \beta(i)$) を追加し、それぞれ (j, j', i) , (k, k', i) の順につなぐ。

以上の操作によってできる co-DAG 木分解は、幅が高々 w であり、また G の nice co-DAG 木分解である。この構築は G の頂点数の多項式時間で行える。 \square

第7章 co-DAG 木幅を用いた FPT アルゴリズム

7.1 Directed Dominating Set Problem の $O(2^w w^2 n)$ 時間アルゴリズム

以下では、頂点数 n の DAG G と幅が w である G の co-DAG 木分解が与えられたときに、 G の Directed Dominating Set Problem を $O(2^w w^2 n)$ で計算するアルゴリズムを示す。

Theorem 14. DAG G に対し、幅が w である G の nice co-DAG 木分解が与えられたとき、 G の DiDS problem を $O(2^w w^2 n)$ で解くアルゴリズムが存在する。

上記のアルゴリズムを構成するため、まず関数 DS を定義する。

Definition 35 (DS). DAG $G = (V, E)$ の nice co-DAG 木分解を (T, β) とし、その幅を w とする。ある $i \in T$ に対し、頂点集合 $A_i, B_i \subseteq V$ が $A_i \cup B_i = \beta(i)$, $A_i \cap B_i = \emptyset$ を満たすとする。 G_i を頂点集合 $\bigcup_k \beta(k)$ (k は i を根とする T の部分反有向木のノード) によって誘導される G の部分グラフとする。関数 DS を以下のように定める。

$$\text{DS}(i, A_i, B_i) = (\min |S_i|, D). \quad (10)$$

ただし $S_i \subseteq V[G_i]$, $D \subseteq B_i$ を満たし、 D が支配されれば S_i は G_i の minimum-DiDS であり、かつ $A_i \subseteq S_i$, $B_i \cap S_i = \emptyset$ を満たすとする。

以下で DS の計算式を与える。各 $\beta(i)$ が introduce, forget, union のいずれかで場合分けをして計算する。

- i がただ一つの親 j をもち、かつ $\beta(i)$ が $v \in V$ を introduce しているとき

$$\text{DS}(i, A_i, B_i) = \begin{cases} (\text{DS}(j, A_i \setminus \{v\}, B_i)[0] + 1, \text{DS}(j, A_i \setminus \{v\}, B_i)[1] \setminus \text{suc}(v)) & (v \in A_i) \\ (\text{DS}(j, A_i, B_i \setminus \{v\})[0], \text{DS}(j, A_i, B_i \setminus \{v\})[1] \cup \text{suc}(v)) & (v \in B_i) \end{cases}.$$

- i がただ一つの親 j をもち、かつ X_i が $v \in V$ を forget しているとき

$$\text{DS}(i, A_i, B_i) = \begin{cases} (\text{DS}(j, A_i \cup \{v\}, B_i)[0], \text{DS}(j, A_i \cup \{v\}, B_i)[1]) & (v \in \text{DS}(j, A_i, B_i \cup \{v\})[1]) \\ (\text{DS}(j, A_i, B_i \cup \{v\})[0], \text{DS}(j, A_i, B_i \cup \{v\})[1]) & (\text{otherwise}) \end{cases}.$$

- i が二つの親 j, k をもつとき

$$DS(i, A_i, B_i) = (DS(j, A_i, B_i)[0] + DS(k, A_i, B_i)[0] - |A_i|, DS(j, A_i, B_i)[1] \cap DS(k, A_i, B_i)[1]).$$

DSを用いて, DAG G の nice co-DAG 木分解 (T, β) が与えられたときに, G の mDiDS のサイズを出力するアルゴリズム **Compute** を示す.

Compute (T, β)

1. First Step: T の各根 r に対し, $DS(r, \emptyset, \emptyset) = (0, \emptyset)$ とする.
2. Exection Step: 各バッグ $\beta(i)$ に対し, A_i, B_i 全ての組合せについて各根から順に $DS(i, A_i, B_i)$ を計算する.
3. Final Step: i が T のただ一つの葉 l となったとき, $DS(l, \emptyset, \emptyset)[0]$ を出力する.

Lemma 23. **Compute** は G の mDiDS のサイズを返す.

23の証明は付録で示す.

最後に **Compute** の計算量を示す.

Lemma 24. DAG G の頂点数が n であるとする. このとき, 幅が w である G の co-DAG 木分解 (T, β) が与えられたとき, **Compute** (T, β) は $O(2^w w^2 n)$ の計算時間で結果を出力する.

Proof. 各バッグ $\beta(i)$ に対し, $|\beta(i)| \leq w + 1$ に注意すると, A, B の組合せは高々 2^{w+1} 通り存在する. また (T, β) のバッグ数は高々 $O(wn)$ である. さらに introduce, forget, union のそれぞれでの計算と条件の判定は高々 $O(w)$ 時間を要する. 以上より, **Compute** の計算量は $O(2^w w^2 n)$ である. \square

第8章 結論

本章では本研究のまとめと今後の課題を示す。本研究では次の3つを行った。

まず1つ目に DAG パス幅をパラメータとして有向支配集合問題，最大葉分岐問題， k -有向点素パス問題，有向シュタイナー木問題を解くアルゴリズムを構築した。前提として入力グラフの DAG パス分解がすでに与えられているとし，バックが *introduce* か *forget* かで場合分けを行っている。これにより幅が w である DAG パス分解を入力したときにそれぞれ $O(2^w wn)$, $O(2^w wn + n^2)$, $O((k+1)^w (w^2 + k)n + n^2)$, $O(2^w (k+w)n + n^2)$ で計算できることを示した。

2つ目に DAG パス分解を求める近似アルゴリズム及びパラメータ化アルゴリズムを構築した。近似アルゴリズムでは，DAG 上のセパレータを利用した分割統治法を用いることで $O(\log^2 n)$ -近似のアルゴリズムを構築した。また DAG 上での DAG パス分解の構築が *one-shot Black Pebbling* 問題と等価であることを示し，近似比がより小さい $O(\log^{2/3} n)$ -近似アルゴリズムの存在も示した。さらに入力 DAG の最大出次数を d ，根数を l としたとき，入力整数 t に対して幅が高々 $O(ld^t)$ の DAG パス分解を出力するか，DAG パス幅が t より大きいことの証拠を示すアルゴリズムを構築した。このアルゴリズムは完全有向 d 分木の埋め込みを利用して設計したもので，出次数が制限された DAG に対して効率的に DAG パス分解を構築できることを初めて示した。

3つ目に DAG パス幅を拡張する概念として DAG 木幅を提案した。DAG 木幅は有向グラフがどれだけ有向木に近い構造を持つかを表すパラメータであり，DAG パス幅より大きくならず，同様の手法でアルゴリズムを構築できる点が利点である。本論文では DAG 木幅を用いて有向支配集合問題を解く $O(2^w wn)$ 時間アルゴリズムを構築した。これにより DAG パス幅を用いたアルゴリズムと比較して計算速度の向上を実現した。

最後に今後の課題として2点挙げる。1つ目は $O(ld^t)$ の幅を持つ DAG パス分解を出力するアルゴリズムにおいて幅の値を小さくすることである。特に最大出次数 d は頂点数 n まで増大する可能性があるため，これを定数にまで抑える方法を検討したい。2つ目は DAG パス分解アルゴリズムを有向グラフ全体に拡張することである。本研究でのアルゴリズムは DAG に限定されているが，DAG パス幅自体は一般の有向グラフに対して定義されているため，幅の小さな DAG パス分解を一般の有向グラフに対しても適用できるようにする余地がある。

謝辞

最後に，本研究にあたって様々な助力をしていただいた指導教員である川原純准教授及び湊真一教授や岩政勇仁助教など湊研究室の方々に深謝いたします．また，私生活の面で20年以上にもわたって支えていただいた両親に感謝します．

参考文献

- [1] Robertson, N. and Seymour, P.: Graph minors. I. Excluding a forest, *Journal of Combinatorial Theory, Series B*, Vol. 35, no.1, pp. 39–61 (1983).
- [2] Robertson, N. and Seymour, P.: Graph minors. III. Planar tree-width, *Journal of Combinatorial Theory, Series B*, Vol. 36, no.1, pp. 49–64 (1984).
- [3] Arnborg, S., Corneil, D. and Proskurowski, A.: Complexity of finding embeddings in a k-tree, *SIAM Journal on Algebraic Discrete Methods*, Vol. 8, no.2, pp. 277–284 (1987).
- [4] Arnborg, S. and Proskurowski, A.: Linear time algorithms for NP-hard problems restricted to partial k-trees, *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 23, no.1, pp. 11–24 (1989).
- [5] Amir, E.: Approximation Algorithms for Treewidth, *Algorithmica*, Vol. 56, pp. 448–479 (2010).
- [6] Korhonen, T.: A single-exponential time 2-approximation algorithm for treewidth, *SIAM Journal on Computing*, pp. FOCS21–174 (2023).
- [7] Groenland, C., Joret, G., Nadara, W. and Walczak, B.: Approximating pathwidth for graphs of small treewidth, *ACM transactions on algorithms*, Vol. 19, pp. 1–19 (2023).
- [8] Cattell, K., Dinneen, M. J. and Fellows, M. R.: A simple linear-time algorithm for finding path-decompositions of small width, *Information processing letters*, Vol. 57, pp. 197–203 (1996).
- [9] Reed, B.: Tree width and tangles: a new connectivity measure and some applications, *Surveys in Combinatorics*, pp. 87–162 (1997).
- [10] Johnson, T., Robertson, N., Seymour, P. and Thomas, R.: Directed tree-width, *Journal of Combinatorial Theory, Series B*, Vol. 82, no.1, pp. 138–154 (2001).
- [11] Berwanger, D., Dawar, A., P. Hunter, S. K. and Obdržálek, J.: The DAG-width of directed graphs, *Journal of Combinatorial Theory, Series B*, Vol. 102, no.4, pp. 900–923 (2012).
- [12] Kasahara, S., Kawahara, J., Minato, S. and Mori, J.: DAG-pathwidth: Graph algorithmic analyses of DAG-type blockchain networks, *IEICE*

- Transactions on Information and Systems*, Vol. E106-D, No.3 (2023).
- [13] Kirousis, L. and Papadimitriou, C.: Searching and pebbling, *Theoretical Computer Science*, Vol. 47, pp. 205–218 (1986).
 - [14] Gilbert, J. R., Lengauer, T. and Tarjan, R. E.: The pebbling problem is complete in polynomial space, *Proceedings of the eleventh annual ACM symposium on Theory of computing*, pp. 237–248 (1979).
 - [15] Dziembowski, S., Faust, S., Kolmogorov, V. and K.Pietrzak: Proofs of Space, *Advances in Cryptology - CRYPTO 2015*, pp. 585–605 (2015).
 - [16] Sethi, R.: Complete Register Allocation Problems, *SIAM Journal on Computing*, Vol. 4, pp. 226–248 (1975).
 - [17] Ganian, R., Hliněný, P., Kneis, J., Langer, A., Obdržálek, J. and Rossmanith, P.: Digraph width measures in parameterized algorithmics, *Discrete applied mathematics*, Vol. 168, pp. 88–107 (2014).
 - [18] Fomin, F. V., Grandoni, F., Kratsch, D., Lokshtanov, D. and Saurabh, S.: Computing optimal Steiner trees in polynomial space, *Algorithmica*, Vol. 65, pp. 584–604 (2013).
 - [19] Ravi, R., Agrawal, A. and Klein, P.: Ordering problems approximated: single-processor scheduling and interval graph completion, *Automata, Languages and Programming: 18th International Colloquium Madrid, Spain, July 8–12, 1991 Proceedings 18*, pp. 751–762 (1991).
 - [20] Austrin, P., Pitassi, T. and Wu, Y.: Inapproximability of treewidth, one-shot pebbling, and related layout problems, *International Workshop on Approximation Algorithms for Combinatorial Optimization*, Vol. 65, pp. 13–24 (2012).
 - [21] Even, S., Itai, A. and Shamir, A.: On the Complexity of Timetable and Multicommodity Flow Problems, *SIAM Journal on Computing*, Vol. 5, pp. 691–703 (1976).
 - [22] Belmonte, R., Hanaka, T., Katsikarelis, I., Kim, E. J. and Lampis, M.: New Results on Directed Edge Dominating Set, *CoRR*, Vol. abs/1902.04919 (2019).
 - [23] Hanaka, T., Nishimura, N. and Ono, H.: On directed covering and domination problems, *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 259, pp. 76–99 (2019).

付録

A.1 Lemma 1の証明

Proof. G に入次数 2 以上の頂点 v が存在する場合, DAG パス分解のルール 2 より, G の任意の DAG パス分解には v とその先行頂点をすべて含むバッグが必ず存在するため, G の DAG パス幅は少なくとも 2 以上となる. したがって以下では G に入次数 2 以上の頂点が存在しない, すなわち有向木である場合のみを考える. まず G がカタピラ型でないとき, G の DAG パス幅が 2 以上となることを示す. そのために G の頂点数で場合分けをして考える. $|V[G]| = 2$ の場合, G は明らかにカタピラ型である. $|V[G]| = 3, 4$ の場合もまた G はカタピラ型である. 以下に理由を示す. G が有向木ならば, G に含まれる最長のパスを 1 つ選択し, その頂点列を P とする. $|P| = 3$ の場合, G の枝分かれの数は高々 1 つであり, その枝分かれの長さも高々 1 である. したがって G はカタピラ型である. $|P| = 4$ の場合, $|V[G]| = 4$ に注意すると G は長さ 4 のパスであるため, 明らかにカタピラ型である. 以上より $|V[G]| = 3, 4$ の場合, G はカタピラ型である. 次に G の頂点数が 5 以上の場合を考える. ここで G がカタピラ型でないとき, 定義より G から出次数 0 の頂点を除いても枝分かれをもつ有向木を内部に含む. すなわちある頂点 $v \in V[G]$ が存在し, v を始点とする長さ 2 以上の点素なパスが少なくとも 2 つ存在する. このパスを $P_1 = v, v_1, v_2, \dots$, $P_2 = v, u_1, u_2, \dots$ とする. DAG パス分解のルールに注意すると, G の任意の DAG パス分解には次の 3 つの頂点集合 $\{v, v_1, v_2\}, \{v, u_1, u_2\}, \{v, v_1, u_1\}$ のうち, 少なくとも 1 つを含むバッグが必ず存在するため, DAG パス幅は 2 以上となる. したがって G の DAG パス幅が 1 であるためには G がカタピラ型であることが必要. 逆に G がカタピラ型であるとき, G の各頂点 v は出次数が 0 の葉である子 v_1, v_2, \dots, v_s をもち, 出次数が 1 以上の葉でない子を高々 1 つもつ. v が葉でない子をもたないとき, 順にバッグ $\{v, v_1\}, \{v, v_2\}, \dots, \{v, v_s\}$ を生成することで v と $\text{succ}(v)$ に対する DAG パス分解を構築できる. v が葉でない子 u をもつとき, 順にバッグ $\{v, v_1\}, \{v, v_2\}, \dots, \{v, v_s\}, \{v, u\}, \{u\}$ を生成することで, v と $\text{succ}(v)$ に対する DAG パス分解を構築できる. これを全ての頂点に対して考えることにより, 幅が 1 である G の DAG パス分解が得られる. したがって G がカタピラ型であれば G の DAG パス幅は 1 である. \square

A.2 Lemma 4の証明

Proof. G に入次数 0 の頂点が 2 つ以上存在する場合、明らかに有向全域木が存在しない。逆に入次数 0 のただ 1 つの頂点 r が存在する場合、 G の各頂点を r を先頭とするトポロジカル順序に並べる。これを $r, v_1, v_2, \dots, v_{n-1}$ とする。 G は連結な DAG であることに注意すると、 r 以外の各頂点 v_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$) は $r, v_1, v_2, \dots, v_{i-1}$ に少なくとも 1 つの親を持つ。これを全ての v_i に対して考えることにより、各 v_i は r からの到達可能なパス P_i が存在する。全ての P_i の和を考えたときに有向木であれば、それは有向全域木である。有向木でなく閉路が存在する場合、ある 2 つのパス P_i, P_j ($i \neq j$) があり、それぞれのパスの内部に P'_i, P'_j (P'_i, P'_j は始点と終点が一致する点素なパス) を含むとすることができる。このときパス P_i の P'_i を P'_j に変えることで P'_i, P'_j による閉路を削除できる。この操作を全ての閉路に対して行うことにより、全てのパス P_i の和を有向木に変換できる。このとき有向木は有向全域木である。 \square

A.3 Theorem 2に対する関数 LOB 及びアルゴリズム Compute の定義

まず関数 LOB を定義する。LOB は各 i においてバッグ X_i を共通部分をもたない頂点集合 $A_i, B_i \subseteq X_i$ に分ける。その後 $X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_i$ によって誘導される部分グラフ G_i の有向全域木のうち、 A_i が葉であり、 B_i が葉でなく、かつ葉数が最大のものを求める。これを全ての A_i, B_i の組合せについて計算することで、 G_i での最大葉数の有向全域木を得る。全ての i について上記の計算を行うことで最終的に入力グラフ G の最大葉数の有向全域木を得る。

Definition 36 (LOB). DAG $G = (V, E)$ の nice DAG パス分解を $P = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ とする。ある i ($i = 1, 2, \dots, s$) に対し、頂点集合 $A_i, B_i \subseteq V$ が $A_i \cup B_i = X_i, A_i \cap B_i = \emptyset$ を満たすとする。 G_i を頂点集合 $X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_i$ によって誘導される G の部分グラフとする。関数 LOB を以下のように定める。ただし有向木 T の葉の集合を $\text{Leaf}(T)$ と表す。

$$\text{LOB}(i, A_i, B_i) = \max \left\{ |\text{Leaf}(T_i)| \left| \begin{array}{l} T_i = (V[T_i], E[T_i]) \text{ は } r \text{ を根とする } G_i \text{ の有向全域木} \\ V[T_i] = V[G_i], E[T_i] \subseteq E[G_i] \\ A_i \subseteq \text{Leaf}(T_i), B_i \subseteq V[T_i] \setminus \text{Leaf}(T_i) \end{array} \right. \right\}. \quad (\text{A.1})$$

LOB は G_i での MaxLOB を計算する関数である．以下で LOB の計算式を与える．各 X_i が introduce か forget かで場合分けをして計算する．

- X_i が $v \in V$ を introduce しているとき

$$\text{LOB}(i, A_i, B_i) = \begin{cases} \text{LOB}(i-1, A_i \setminus \{v\}, B_i) + 1 & (v \in A_i \text{ かつ } \text{pred}(v) \cap B_i \neq \emptyset) \\ \text{LOB}(i-1, A_i, B_i \setminus \{v\}) & (v \in B_i \text{ かつ } \text{pred}(v) \cap B_i \neq \emptyset) \\ -\infty & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

- X_i が $v \in V$ を forget しているとき

$$\text{LOB}(i, A_i, B_i) = \max\{\text{LOB}(i-1, A_i \cup \{v\}, B_i), \text{LOB}(i-1, A_i, B_i \cup \{v\})\}. \quad (\text{A.3})$$

LOB を用いて，DAG G の nice DAG パス分解 P が与えられたときに， G の MaxLOB の解を出力するアルゴリズム **Compute** を示す．

Compute(P)

1. First Step: $V_r = \{r\}$ ならば 1 を解として出力する． $V_r \neq \{r\}$ ならば $\text{LOB}(1, \{r\}, \emptyset) = -\infty, \text{LOB}(1, \emptyset, \{r\}) = 0$ とする．
2. Exection Step: P の各 X_i ($i = 1, 2, \dots, s$) に対し， A_i, B_i 全ての組合せについて順に $\text{LOB}(i, A_i, B_i)$ を計算する．
3. Final Step: $i = s$ ならば， $\text{LOB}(s, \emptyset, \emptyset)$ を出力する．

A.4 Lemma 5の証明

Proof. **Compute** の First Step より， G が根 r のみからなる場合は 1 を出力するため MaxLOB の解となっている．以下では G に根 r 以外の頂点も含まれる場合を考える．Lemma 5の証明は，各 i に対し $\text{LOB}(i, A_i, B_i)$ が LOB の定義 A.1 を満たすことを示せば十分．これを i に関する数学的帰納法で示す．以下では便宜上，木を成す頂点のうち葉以外の頂点を茎と呼ぶ．

$i = 1$ のとき，**Compute** の First Step より $\text{LOB}(1, \{r\}, \emptyset) = -\infty, \text{LOB}(1, \emptyset, \{r\}) = 0$ である．根 r は葉となり得ないことに注意すると明らかに定義 A.1 を満たす．

$i = k$ のとき, $\text{LOB}(i, A_i, B_i)$ が定義 A.1 を満たすと仮定する. 以下で X_{k+1} が $v \in V$ を introduce するか forget するかで場合分けを行う.

- X_{k+1} が $v \in V$ を introduce する場合

$v \in A_{k+1}$ の場合, DAG パス分解のルール 2 より $\text{pred}(v) \subseteq (A_{k+1} \cup B_{k+1})$ である. B_{k+1} は有向全域木の茎を表すことに注意すると, ある茎 $u \in \text{pred}(v) \cap B_{k+1}$ が存在する場合に限り v を葉とすることができる. 仮定より G_k において $\text{LOB}(k, A_{k+1} \setminus \{v\}, B_{k+1})$ は, $A_{k+1} \setminus \{v\}$ を葉集合, B_{k+1} を茎集合とする葉数最大の有向全域木であり, これに v を葉として加えることで葉数を 1 だけ大きくできる. したがって $\text{LOB}(k+1, A_{k+1} \setminus \{v\}, B_{k+1}) + 1$ は A_{k+1} を葉集合, B_{k+1} を茎集合とする有向全域木の葉数の最大値を表す. 逆にこのような茎 u が存在しなければ v は葉とならないため, 値を $-\infty$ とすることで解にならないことを表す. 以上より $v \in A_{k+1}$ の場合は定義 A.1 を満たす.

$b \in B_{k+1}$ の場合も同様の議論により定義 A.1 を満たす. ただし v は茎であるため LOB の値は大きくならないことに注意する.

- X_{k+1} が $v \in V$ を forget する場合

葉数がそれぞれ $\text{LOB}(k, A_{k+1} \cup \{v\}, B_{k+1}), \text{LOB}(k, A_{k+1}, B_{k+1} \cup \{v\})$ である有向全域木を T_k^A, T_k^B と表す. まず $\text{LOB}(k, A_{k+1} \cup \{v\}, B_{k+1}) \geq \text{LOB}(k, A_{k+1}, B_{k+1} \cup \{v\})$ の場合, v が葉であるような T_k^A が実際に存在することを示す. このとき $\text{LOB}(k, A_{k+1} \cup \{v\}, B_{k+1}) \neq -\infty$ であるため, v を introduce したバッグを X_j とすると, $i = j$ における LOB の値も $-\infty$ でない. したがって式 A.2 の第一式の条件より, $i = j$ において v が葉であるような有向全域木の存在が保証される. X_m ($j < m < k+1$) において v は introduce も forget もされないことに注意すると, T_k^A は実際に v を葉として含むことが示される. 次に $\text{LOB}(k, A_{k+1} \cup \{v\}, B_{k+1}) < \text{LOB}(k, A_{k+1}, B_{k+1} \cup \{v\})$ の場合, v が茎であるような T_k^B が実際に存在することを示す. 上記と同様の議論により, T_k^B には v の先行頂点が必ず存在する. また T_k^B において v と共通の子をもつ頂点も存在しない. なぜならば, もしそのような頂点 v' (ある $w \in V[T_k^B]$ があり, $\{(v, w), (v', w)\} \subseteq E[T_k^B]$) が存在したとすると, T_k^B において v に w 以外の子が存在するならば, 新たに $T_k^B = (V[T_k^B], E[T_k^B] \setminus \{(v, w)\})$ とすることで v と v' が共通の子を持たないようにすることができる. この操作を繰り返すことで v と共通の子をもつ頂点が存在しないような有

向全域木を構築できる． T_k^B において v に w 以外の子が存在しないならば， $E[T_k^B]$ から (v, w) を除くことで v を葉とする有向全域木 T_k^A が構築できる．このとき明らかに $|\text{Leaf}(T_k^A)| = |\text{Leaf}(T_k^B)| + 1$ であるが，これは $\text{LOB}(k, A_{k+1} \cup \{v\}, B_{k+1}) < \text{LOB}(k, A_{k+1}, B_{k+1} \cup \{v\})$ と矛盾する．したがって T_k^B において v と共通の子をもつ頂点は存在せず， v が実際に茎であるような T_k^B が存在することが示される．

ここで $G_{k+1} = G_k$ より， G_{k+1} の有向全域木の最大葉数は G_k のそれと等しい．したがって v を葉に含むような G_k の有向全域木の最大葉数と， v を茎に含むような G_k の有向全域木の最大葉数のうち，より大きい方を G_{k+1} の有向全域木の最大葉数とすることができる．仮定より，それぞれ $\text{LOB}(i, A_{i+1} \cup \{v\}, B_{i+1}), \text{LOB}(i, A_{i+1}, B_{i+1} \cup \{v\})$ と表すことができるため， $\max\{\text{LOB}(i, A_{i+1} \cup \{v\}, B_{i+1}), \text{LOB}(i, A_{i+1}, B_{i+1} \cup \{v\})\}$ は G_{k+1} の有向全域木の最大葉数と等しい．したがって定義 A.1 が成立．

以上より， $i = k + 1$ でも定義 A.1 が成立．数学的帰納法により Lemma 5 が証明された． \square

A.5 Lemma 6 の証明

Proof. First Step, Final Step は各々 $O(1)$ で計算できる．以下で Exection Step での計算量を考える．各 X_i に対し， $|X_i| \leq w + 1$ に注意すると， A, B の組合せは高々 2^{w+1} 通り存在する．また Proposition 1 より $0 \leq i \leq 2|V| + 1$ である．さらに $\text{pred}(v)$ の計算量が高々 $O(w)$ であることに注意すると， $\text{LOB}(i, A_i, B_i)$ の計算量は， X_i が introduce ならば $O(w)$ であり，forget ならば $O(1)$ である．以上より，Compute の計算量は $O(w2^wn)$ である． \square

A.6 Lemma 7 の証明

Proof. 入力グラフ G が単一頂点 $s_1 = t_1$ からなる場合，Compute の Preprocessing の処理により 0 を出力する．これは明らかに G の Disjoint Path になっている．以下では G が単一頂点から成らない場合を考える．あるバッグ X_i が $v \in V$ を introduce するとき， v は $A_i^1, A_i^2, \dots, A_i^k, B_i$ のいずれかにのみ含まれるため，これを 1 から i まで考えることにより各パス P_i^m は互いに共通の頂点を持たない点素なパスであることが示される．また，ある始点 $s_m \in S$ が introduce されたバッグを X_{i_s} とすると， $X_{i'}$ ($i' < i_s$) で introduce された頂点はパス $P_{i_s}^m$ に含まれることは

ない。なぜならば、 $X_{i'}$ で頂点 u が introduce され、かつ $A_{i'}^m = \{u\}$ であるとする
と、 $\text{pred}(u) \cap A_{i'}^m = \emptyset$ であり、式5の条件より Cal の値は ∞ となるからである。さ
らに、ある終点 $t_m \in S$ が introduce されたバッグを X_{i_t} とすると、 $X_{i'}$ ($i_t < i'$) で
introduce される頂点はパス $P_{i_t}^m$ に含まれることはない。なぜならば、 X_j ($i_t < j$)
で頂点 w が introduce され、かつ Compute の Preprocessing を行う前の入力グラ
フにおいて $w \in \text{suc}(t_m)$ であるとする。ここで $w \in A_j^m$ であるとする、DAG
パス分解のルール2より $t_m \in A_j^m$ がいえるが、もし $\text{pred}(w) \cap (A_j^m \setminus \{t_m\}) = \emptyset$
ならば、Preprocessing の処理により $\text{pred}(w) \cap A_j^m = \emptyset$ であるため、式5の条件
より Cal の値は ∞ となる。一方、 $\text{pred}(w) \cap (A_j^m \setminus \{t_m\}) \neq \emptyset$ ならば、ある頂点
 $p \in \text{pred}(w) \cap A_j^m$ ($p \neq t_m$) が存在し、式5の条件より、 p のある後続頂点 $q \in A_j^m$
($p \in \text{pred}(q) \cap (A_j^m \setminus \{w\})$ かつ $\text{suc}(p) \cap (A_j^m \setminus \{w\}) = \{q\}$) が存在する。Preprocess-
ing の処理によって枝 (t_m, w) が除かれることに注意すると $\{q, w\} \subseteq \text{suc}(p) \cap A_j^m$
が成り立つため、 w の introduce において式5の条件より Cal の値は ∞ となる。
これ以降のバッグ X_l ($j < l$) で introduce された頂点 w' が A_l^m に含まれた場合、
枝 (w, w') が存在すれば式5の条件より Cal の値は ∞ となり、枝 (w, w') が存在
しなければ上記と同様の議論により Cal の値は ∞ となる。以上より X_{i_t} 以降で
introduce された頂点はパス $P_{i_t}^m$ に追加されることはない。

以上の議論に注意すると、Lemma 7の証明では、各 i ($i_s \leq i \leq i_t$) に対し、あ
る m ($1 \leq m \leq k$) について $\text{Cal}(i, \mathcal{A}_i, B_i)$ が Cal の定義2を満たすことを示せば
十分。これを i に関する数学的帰納法で示す。

$i = i_s$ のとき、式3より $A_{i_s}^m = \{s_m\}$ の場合は0であり、これは s_m のみからなるパ
ス $P_{i_s}^m$ の長さが0であることを表す。これは明らかに定義2を満たす。 $A_{i_s}^m \neq \{s_m\}$
の場合は ∞ であるが、これは s_m を始点とするパスが構成されないことを表す
ため、同様に定義2を満たす。

ある i ($i_s \leq i < i_t$) において、 $\text{Cal}(i, \mathcal{A}_i, B_i)$ が定義2を満たすと仮定する。以下
で X_{i+1} が $v \in V$ を introduce するか forget するかで場合分けを行う。

- X_{i+1} が $v \in V$ を introduce する場合

まず $v \in A_{i+1}^m$ の場合を考える。 A_{i+1}^m に含まれ、かつ v の直前に introduce さ
れた頂点を u とする。DAG パス分解のルール2より、 u, v の間には枝 (u, v) が
存在するか、 (u, v) は存在せず u 以外の頂点 u' ($u' \in A_{i+1}^m$) との間の枝 (u', v)
が存在するか、 A_{i+1}^m に含まれるどの頂点との間にも枝が存在しないかのい
ずれかである。枝 (u, v) が存在する場合、式5より $\text{Cal}(i+1, \mathcal{A}_{i+1}, B_{i+1}) =$

$\text{Cal}(i, \mathcal{A}_{i+1}^m, B_{i+1}) + 1$ となる． DAG パス分解のルール 2 より u はパスの端点であることに注意すると， 仮定より $\text{Cal}(i, \mathcal{A}_{i+1}^m, B_{i+1})$ は m 番目のパスが s_m から u までのパスであるときの全パスの合計長の最小値を表している． したがって m 番目のパスの端点 u に v を加えることで合計長を 1 だけ大きくしており， $\text{Cal}(i+1, \mathcal{A}_{i+1}, B_{i+1})$ は明らかに全パスの合計長の最小値を表す． よって定義 2 を満たす． 枝 (u, v) が存在せず u 以外の頂点 u' ($u' \in A_{i+1}^m$) との間の枝 (u', v) が存在する場合， 上記の t_m と同様の議論により， ある頂点 $v' \in A_{i+1}^m$ ($v' \neq v$) が存在し， $\{v, v'\} \subseteq \text{suc}(u') \cap A_{i+1}^m$ が成り立つ． したがって式 5 の条件より Cal の値は ∞ となる． これは A_{i+1}^m において枝分かれ $\{(u', v), (u', v')\}$ が存在し， これらを含むようなパスが存在しないことを表す． したがって定義 2 を満たす． v と A_{i+1}^m に含まれるどの頂点との間にも枝が存在しない場合， 式 5 の条件より Cal の値は ∞ となる． これは A_{i+1}^m に含まれる頂点を使って s_m と v をつなぐパスを構成することができないことを表す． したがって定義 2 を満たす．

$v \in B_{i+1}$ の場合， $v \notin A_{i+1}^m$ より， P_{i+1}^m は s_m から u までのパスであり， 仮定よりこのときのパスの合計長の最小値は $\text{Cal}(i, \mathcal{A}_{i+1}^m, B_{i+1} \setminus \{v\})$ で表される． したがって式 5 より $\text{Cal}(i+1, \mathcal{A}_{i+1}^m, B_{i+1})$ は v がどのパスにも含まれないときのパスの合計長の最小値を表すため， 定義 2 を満たす．

- X_{i+1} が $v \in V$ を forget する場合

$G_{i+1} = G_i$ より， G_{i+1} と G_i でのパスの合計長の最小値は等しい． したがって v が P_i^1, \dots, P_i^k のいずれかのパスに含まれていた場合と， いずれにも含まれていない， すなわち B_i に含まれている場合とを考え， より値の小さいものを $i+1$ における Cal の値とすることができる． 仮定よりそれぞれ $\text{Cal}(i, \overline{\mathcal{A}}_{i+1}^m, B_{i+1})$, $\text{Cal}(i, \mathcal{A}_{i+1}^m, B_{i+1} \cup \{v\})$ と表すことができるため， 式 6 は定義 2 を表すようなパスの合計長の最小値を出力する．

以上より， $i = i+1$ でも定義 2 が成立． 数学的帰納法により Lemma 7 が証明された． □

A.7 Lemma 9 の証明

Proof. まず， Preprocessing を行っても解が変わらないことを示す． Preprocessing における V_r は根 r から到達可能な頂点の集合であるため， 任意の $v \in V \setminus V_r$ は

目的の minimum-DST に含まれない. したがって考えるグラフを $G' = G[V \setminus V_r]$ としても解は変わらず, また P' は G' の nice DAG パス分解となっていることに注意すると, ST に入力する nice DAG パス分解を P' としても解は変わらない. また P' の幅は P の幅より大きくならないことに注意する.

次に, Preprocessing 後の処理で Compute が R をすべて含むような G の minimum-DST を出力することを示す. これは各 i について, 式 (8)(9) が式 (7) を表していることを示せば十分. これを $i \geq 1$ に関する数学的帰納法で示す.

$i = 1$ のとき, $\text{ST}(1; \{r\}, \emptyset) = 0$ は明らかに式 (7) を表す.

$i = k$ ($1 \leq k < s'$) のとき, 式 (8)(9) が式 (7) を表していると仮定する. 以下で $i = k+1$ についても式 (8)(9) が式 (7) を表すことを示す. これを X_{k+1} が, ある $v \in V$ を introduce するか forget するかで場合分けして考える.

- X_{k+1} が $v \in V$ を introduce する場合

$v \in A_{k+1}, v \in B_{k+1}$ に場合分けして考える. $v \in A_{k+1}$ の場合, $\text{pred}(v) \cap A_{k+1} = \emptyset$ ならば, A_i において v の先行頂点は 1 つも存在しない. このとき, DAG パス分解のルール 2 より v の先行頂点は X_{k+1} 以降で introduce されないため, v を含む有向木は v が根の一つになっている. これは r をただ一つの根とする有向木になり得ないため, $\text{ST}(k+1; A_{k+1}, B_{k+1}) = \infty$ とすることで式 (7) で表される有向木 $G_{T(k, A_{k+1}, B_{k+1})}^{\text{opt}}$ が存在しないことを示している. 一方, $\text{pred}(v) \cap A_{k+1} \neq \emptyset$ ならば, v の先行頂点 $w \in A_{k+1} \setminus \{v\}$ が少なくとも 1 つ存在する. $i = k$ において式 (7) のような有向木 $G_{T(k, A_{k+1} \setminus \{v\}, B_{k+1})}^{\text{opt}}$ が存在する場合, $w \in G_{T(k, A_{k+1} \setminus \{v\}, B_{k+1})}^{\text{opt}}$ であるが, Preprocessing の操作より w は r から到達可能である. したがって v もまた r から w を通過して到達可能であり, $G_{T(k, A_{k+1} \setminus \{v\}, B_{k+1}) \cup \{v\}}^{\text{opt}}$ は r を根とする有向木である. またそのときの最小の総重みは $\sum_{(u,v) \in E[G_{T(k, A_{k+1} \setminus \{v\}, B_{k+1})}^{\text{opt}}]} d(u, v) + \min_{w \in \text{pred}(v) \cap A_i} d(w, v)$ と等しい. 仮定より $\text{ST}(k; A_k, B_k) = \sum_{(u,v) \in E[G_{T(k, A_k, B_k)}^{\text{opt}}]} d(u, v)$ であり, また $A_{k+1} \setminus \{v\} = A_k, B_{k+1} = B_k$ に注意すると, $\text{ST}(k+1; A_{k+1}, B_{k+1})$ は式 (7) を表す.

次に $v \in B_{k+1}$ の場合を考える. $v \in R \cup \{r\}$ のとき $\text{ST}(k+1; A_{k+1}, B_{k+1}) = \infty$ であるが, これは式 (7) を表すような有向木 $G_{T(k, A_{k+1}, B_{k+1})}^{\text{opt}}$ が存在しないことを示している. $v \notin R \cup \{r\}$ ならば, 式 (7) より v は解となる有向木に含まれない. このとき $G_{T(k+1, A_{k+1}, B_{k+1} \setminus \{v\})}^{\text{opt}} = G_{T(k, A_k, B_k)}^{\text{opt}}$ が成り立つ.

仮定より $ST(k; A_k, B_k) = \sum_{(u,v) \in E[G_{T(k,A_k,B_k)}^{opt}]} d(u,v)$ であり, また $A_{k+1} = A_k, B_{k+1} \setminus \{v\} = B_k$ に注意すると, $ST(k+1; A_{k+1}, B_{k+1})$ は式 (7) を表す.

- X_{k+1} が $v \in V$ を forget する場合

$G_{k+1} = G_k$ より, $G_{T(k+1,A_{k+1},B_{k+1})}^{opt}$ は $G_{T_A} = G_{T(k,A_k,B_k)}^{opt}$ ($v \in A_k$), $G_{T_B} = G_{T(k,A_k,B_k)}^{opt}$ ($v \in B$) のうち, 総重みの小さい方と等しい. 仮定より $v \in A_k$ ならば $ST(k; A_k, B_k) = \sum_{(u,v) \in E[G_{T_A}^{opt}]}$ であり, また $v \in B_k$ ならば $ST(k; A_k, B_k) = \sum_{(u,v) \in E[G_{T_B}^{opt}]}$ である. さらに $v \in A_k$ ならば $A_{k+1} \cup \{v\} = A_k, B_{k+1} = B_k$, $v \in B_k$ ならば $A_{k+1} = A_k, B_{k+1} \cup \{v\} = B_k$ であることに注意すると, $ST(k+1; A_{k+1}, B_{k+1})$ は式 (7) を表す.

以上より, $i = k+1$ でも式 (8)(9) が式 (7) を表している. 数学的帰納法により Lemma 9 が証明された. \square

A.8 Lemma 11, 12 及び Theorem 6 の証明

Proof. (Lemma 11) DAG G に対し, 幅が w である G の nice DAG パス分解 $X = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ が与えられたとする. ここで各 $i = 1, 2, \dots, s$ に対し, X_i によって誘導される G の部分グラフを G_i とし, $X_i^L = V[L(G_i)]$ とする. このとき $X_L = (X_1^L, X_2^L, \dots, X_s^L)$ は $L(G)$ の DAG パス分解である. まず X_L は DAG パス分解のルール 1 を満たす. これは DAG パス分解のルール 2 より, G の任意の枝 (u, v) に対して u, v を同時に含むバッグ X_k が X に存在する. これより $(u, v) \in X_k^L$ がいえ, これをすべての枝に対して考えることにより X_L の各バッグの和集合が $V[L(G)]$ と一致することが示される. したがって X_L は DAG パス分解のルール 1 を満たす. また X_L は DAG パス分解のルール 3 も満たす. なぜならば, もしルール 3 を満たさないと仮定すると, ある頂点 $e \in V[L(G)]$ と整数 k, l, m ($1 \leq k < l < m \leq s$) が存在し, $e \in X_k^L, e \notin X_l^L, e \in X_m^L$ がいえる. このとき $e = (u, v)$ ($u, v \in V[G]$) とすると, $u \in X_k, u \notin X_l, u \in X_m$ もしくは $v \in X_k, v \notin X_l, v \in X_m$ の少なくとも一方が成り立つ. これは X が DAG パス分解のルール 3 を満たすことと矛盾する. したがって X_L は DAG パス分解のルール 3 を満たす. さらに X_L は DAG パス分解のルール 2 も満たす. X において X_i が頂点 v を introduce する場合, DAG パス分解のルール 2 より $\text{pred}(v) \subseteq X_{i-1}, \text{succ}(v) \cap X_{i-1} = \emptyset$ が成り立つ. ここで $\text{pred}(v) = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ とすると, X_i^L は X_{i-1}^L に対して $L(G)$ の k 個の頂点 $(u_1, v), (u_2, v), \dots, (u_k, v)$ が新たに追加されている. 各 u_l ($1 \leq l \leq k$) に対し, u_l の先行頂点 $u'_l \in X_i$ が存

在する場合, $(u'_l, u_l), (u_l, v) \in X_i^L$ かつ $(u_l, v) \notin X_{i-1}^L$ が成り立つ. これを全ての u_l, u'_l について考えることにより, 任意の枝 $((u'_l, u_l), (u_l, v)) \in E[L(G)]$ に対して X_L は DAG パス分解のルール2を満たすことがいえる. X_i が頂点 v を forget する場合, X_i^L では v を端点にもつ枝に対応する $L(G)$ 上の頂点が削除されるだけであるため, DAG パス分解のルール2に反しない. 以上より X_L は $L(G)$ の DAG パス分解であることが示される. このとき X_L の幅は高々 $O(w^2)$ である. 最後に X_L の nice DAG パス分解 X'_L を計算することにより目的の DAG パス分解を得る. 計算量については, 各バッグ X_i^L で新たに追加される頂点数は高々 w 個であり, それぞれに対して先行頂点が存在するかの判定に高々 $O(w)$ かかる. バッグ数は Proposition 1 より, $n = |V[G]|$ とすると $O(|V[L(G)]|) = O(n^2)$ である. nice DAG パス分解の計算も n の多項式時間で行えることに注意すると, X から X'_L の構築は n の多項式時間で行えることが示される. \square

Proof. (Lemma 12) $S \in E[G]$ が G の DEDS であるとき, 任意の枝 $(v, w) \in E[G]$ について $(v, w) \in S$ であるか, ある枝 $(u, v) \in S$ が存在するかのいずれかが成り立つ. このとき $L(G)$ 上では任意の頂点 $(v, w) \in V[L(G)]$ について $(v, w) \in S$ であるか, ある頂点 $(u, v) \in S$ が存在するかのいずれかが成り立つ. したがって S は $L(G)$ の DiDS である. 同様の議論により $S \in V[L(G)]$ が $L(G)$ の DiDS ならば S は G の DEDS である. したがって G の DEDS と $L(G)$ の DiDS は一対一で対応する. よって G の mDEDS と $L(G)$ の mDiDS は等しいことが示される. \square

Proof. (Theorem 6) Lemma 12 より, $L(G)$ の mDiDS を求めればよい. また Lemma 11 より, 幅が w である G の nice DAG パス分解 X が与えられたとき, 幅が高々 $O(w^2)$ である $L(G)$ の nice DAG パス分解 X'_L を多項式時間で構築できる. よって 3.1 節のアルゴリズム $\text{Compute}(X'_L)$ を計算することで $L(G)$ の mDiDS を求めることができる. このとき X'_L の幅が $O(w^2)$, バッグ数が $O(n^2)$ となっていることに注意すると, 計算量は $O(2^{w^2} w^2 n^2)$ である. \square

A.9 Lemma 13, 14の証明

Proof. (Lemma 13) P について, $X'_1 \cup X'_2 \cup \dots \cup X'_{s_l} \cup Y'_1 \cup Y'_2 \cup \dots \cup Y'_{s_r} = V[G]$ であるため, DAG パス分解のルール1を満たす. またルール3について, 任意の $v \in V'$ がルール3を満たしていることを示せば十分. v が P_L で introduce された

バッグを X_m とすると, Merge の操作により, v は P において $X'_m, X'_{m+1}, \dots, Y'_{s_r}$ のバッグにのみ含まれ, それ以外のバッグには含まれない. よってルール 3 を満たす. ルール 2 について, 各 $v \in V'$ とそれに接続する各頂点 $u \in G_R$ に対して, (v, u) がルール 2 を満たすことを示せば十分. v, u がそれぞれ P_L, P_R で introduce されたバッグを X_m, Y_n とすると, v は P において $X'_m, X'_{m+1}, \dots, Y'_{s_r}$ のバッグにのみ含まれ, u は $Y'_n, Y'_{n+1}, \dots, Y'_{s_r}$ のバッグにのみ含まれる. したがって $v, u \in Y'_n$ かつ $u \notin Y'_{n-1}$ が成り立ち, ルール 2 を満たす. \square

Proof. (Lemma 14) $G = (V, E)$ の最適な nice DAG パス分解を $P = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ とする. P の DAG パス幅は pw である. G の各頂点を P で introduce された順に v_1, v_2, \dots, v_n とする. $v = v_{\lceil n/2 \rceil}$ とし, v が初めて introduce されたバッグを X_i とする. $A = X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_i, B = X_{i+1} \cup X_{i+2} \cup \dots \cup X_s$ とする. 例として Figure 2 を示す. このとき X_i から出て B に入る枝の集合を S とすると, DAG パス分解のルール 3 より $G' = (V, E \setminus S)$ には A と B の間に枝はなく, v の選び方により $|A| \geq \frac{1}{3}|V|, |B| \geq \frac{1}{3}|V|$ を満たす. また DAG パス分解のルール 2 より A と B の間の枝は A から出て B に入る向きである. よって S は G の $\frac{1}{3}$ -balanced DAG edge-separator である. G の最大出次数が k であることに注意すると, S のコスト $C(S)$ について以下の不等式が成り立つ.

$$C(S) \leq k|X_i| \leq k(pw + 1).$$

一方, G の minimum $\frac{1}{3}$ -balanced DAG edge-separator S_{opt} のコストは高々 $C(S)$ であるから,

$$C(S_{opt}) \leq k(pw + 1).$$

\square

A.10 Lemma 16 の証明

Proof. まず DAG G に対し, X が G の nice DAG パス分解であれば X は G の one-shot BP であることを示す. G に対するある nice DAG パス分解を $X = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ とする. nice DAG パス分解では $X_1 = \emptyset$ であるため one-shot BP のルール 1 を満たす. DAG パス分解のルール 1 とルール 3 より, すべての頂点はちょうど 1 回ずつ introduce されるため, one-shot BP のルール 4, 5 を満たす.

す. introduce の条件と DAG パス分解のルール 2 より, $v \in V$ が X_i で introduce されるとき, 任意の $(u, v) \in E$ に対して $u \in X_{i-1}$. これは one-shot BP のルール 2 を満たす. また各頂点に対し, forget がちょうど 1 度だけ行われることに注意すると, forget と unpebble の操作は明らかに等価であるため one-shot BP のルール 3 を満たす. これより X の introduce と forget が各々 pebble と unpebble に対応することがいえる. 以上より X は G の one-shot BP である.

次に P が G の one-shot BP であれば P は G の nice DAG パス分解であることを示す. G に対するある one-shot BP を $P = (P_1, P_2, \dots, P_t)$ とする. $P_1 = \emptyset$ より nice DAG パス分解の初期条件を満たす. また各頂点 $v \in V$ に対し, v は P でちょうど 1 回ずつ pebble, unpebble されるため, DAG パス分解のルール 1 を満たす. また, ある頂点 v の pebble, unpebble がそれぞれ P_i, P_{k+1} ($1 \leq i \leq k \leq t-1$) で行われるとすると, one-shot BP のルール 5 より任意の頂点に対して 2 回以上 pebble されることはないため, 任意の P_j ($i \leq j \leq k$) において $v \in P_j$ を満たす. これを V の全ての頂点に対して考えることで, nice DAG パス分解のルール 3 を満たす. さらに pebble のルールより, $v \notin P_{i-1}$ かつ任意の $(u, v) \in E$ に対し $u \in P_{i-1}$ ならば $P_i = P_{i-1} \cup \{v\}$ であるが, これは $u, v \in P_i$ かつ $v \notin P_{i-1}$ を満たす. したがって pebble の操作は DAG パス分解のルール 2 を満たした introduce の操作とみなすことができる. また unpebble の操作は明らかに nice DAG パス分解の forget の条件を満たす. 以上より P は G の nice DAG パス分解である. \square

A.11 Theorem 10 の証明

Theorem 10 を証明するため以下の補題を示す.

Lemma 25. 有向グラフ $G = (V, E)$ の強連結成分 A があり, A から $V \setminus A$ への枝が存在しないとき, A を G の *sink* と呼ぶ. このとき, G が *sink* をただ 1 つしか持たないならば, $\text{tw}(G) = \text{pw}(G)$ が成り立つ.

Proof. DAG パス分解, DAG 木分解の定義より, 幅が $\text{pw}(G)$ である G の DAG パス分解は G の DAG 木分解でもある. よって $\text{tw}(G) \leq \text{pw}(G)$ が成り立つ. 一方, 幅が $\text{tw}(G)$ である G の nice DAG 木分解を (T, γ) とし, $\text{sink} A$ を含む T のバッグのうち, 根 $r \in T$ からの距離が最も近いものを $\gamma(t_i)$ ($t_i \in T$) とする. T 上で r から t_i までのパスを $P \subseteq T$ としたとき, (P, γ) が G の DAG パス分解となってい

ることを示す。まず、 P について $\sum_{p \in P} \gamma(p) = V$ が成り立つ。なぜならば、 T 上で P に含まれない P' があり、かつ任意の $p \in P$ に対し、 P' 上で、ある $v \notin \gamma(p)$ が introduce されたとすると、頂点集合 $\sum_{p' \in P'} \gamma(p')$ が誘導する G の部分有向グラフはある sink A' をもつが、 $p_A \in P$ ($A \subseteq \gamma(p_A)$) と $p_{A'} \in P'$ ($A \subseteq \gamma(p_{A'})$) は非連結であるから、DAG 木分解の定義より、 $A \neq A'$ である。これは G が sink をただ1つしかもたないことと矛盾する。したがって $\sum_{p \in P} \gamma(p) = V$ が成り立つことがいえ、 (P, γ) は DAG パス分解のルール1を満たす。また DAG 木分解のルール2と、 P がパスであることから (P, γ) は DAG パス分解のルール2を満たす。さらに P はパスであるからルール3も満たす。よって (P, γ) は G の DAG パス分解である。したがって $\text{pw}(G) \leq \text{tw}(G)$ がいえる。以上より、 $\text{tw}(G) = \text{pw}(G)$ が示される。□

上の補題を用い、[3] の手法を参考にして Theorem 10を示す。

proof of Theorem 10. ある有向グラフ $G = (V, E)$ が与えられたとき、以下の手順で有向グラフ $G' = (V', E')$ ($|V'| = 2|V| + 1, |E'| = \frac{1}{2}(|V|^2 + 3|V|) + 2|E|$) を構成する。

- $V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ としたとき、 $V' = \{v_i, v'_i | i = 1, 2, \dots, n\} \cup \{s\}$ とする。
- (v_i, v_j) ($v_i, v_u \in V', 1 \leq i < j \leq n$) の全ての組合せに対し、 $(v_i, v_j) \in E'$ とする。
- 各 i ($i = 1, 2, \dots, n$) に対し、 $(v_i, v'_i), (v'_i, s) \in E'$ とする。
- $v_p, v_q \in V$ について $(v_p, v_q) \in E$ であるならば、 $(v_p, v'_q), (v_q, v'_p), (v'_p, v'_q) \in E'$ とする。

以上の操作によってできる有向グラフを G' とする。 G' の構成例を図 A.1に示す。 G' は G のサイズの多項式時間で構成できる。また G' の頂点集合 A, B を、 $A = \{v_i | i = 1, 2, \dots, n\}, B = \{v'_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ と定める。このとき $V' = A \cup B \cup \{s\}$ とできる。

次に、幅が $\text{pw}(G)$ である G の DAG パス分解を (P, β) ($P = p_1, p_2, \dots, p_r$) とする。各 m に対し、 G' の頂点集合 $\gamma(p_m)$ を以下のように構成する。

- 各 (p_m) に対し、 $v \in \bigcup_{j=i}^r \beta(p_j)$ ならば、 v を $\gamma(p_m)$ に加える。

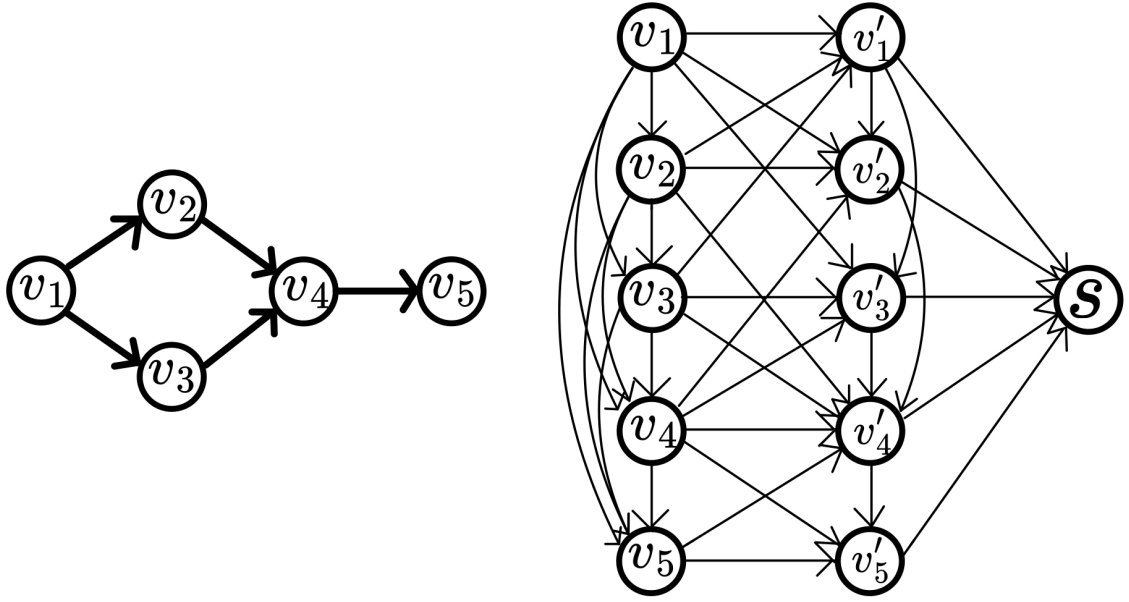


図 A.1: 左の G から右の G' を構成した例. G' の頂点は $A = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$, $B = \{v'_1, v'_2, v'_3, v'_4, v'_5\}, \{s\}$ からなる. A では任意の頂点对に枝があり, B では G と同じ枝の構成となっている. また A, B の間には A から B に向かう枝のみがあり, B の各頂点から s に向かう枝がある.

- 各 (p_m) に対し, $v \in \bigcup_{j=1}^i \beta(p_j)$ ならば, v' を $\gamma(p_m)$ に加える.
さらに $\gamma(p_{r+1})$ を下記のように定める.

- $\gamma(p_{r+1}) = B \cup \{s\}$

以上の操作によってできる (P', γ) ($P' = p_1, p_2, \dots, p_{r+1}$) が, G' の DAG パス分解になっていることを示す. 図 A.1 の G, G' に対する DAG パス分解 (P, β) , (P', γ) の構成例を図 A.2 で示す. γ の構成法に注意すると, $\gamma(p_1)$ は A の頂点をすべて含む. また $\gamma(p_{r+1})$ は $B \cup \{s\}$ を含む. よって $\sum_{m=1}^{r+1} \gamma(p_m) = V'$ が成り立つため, (P', γ) は DAG パス分解のルール 1 を満たす. また γ の構成法に注意すると, 任意の $v \in V'$ に対して, v を含む全てのバッグが (p_1, p_2, \dots, p_r) 上で非連結になることはなく, また $\gamma(p_r)$ は B の頂点をすべて含み, s は $\gamma(p_{r+1})$ にのみ含まれるため, 任意の $v \in V'$ に対して, v を含む全てのバッグが $(p_1, p_2, \dots, p_{r+1})$ 上で非連結になることはない. よって (P', γ) は DAG パス分解のルール 3 を満たす. さらに, (P', γ) が G' の全ての枝に対して DAG パス分解のルール 2 を満

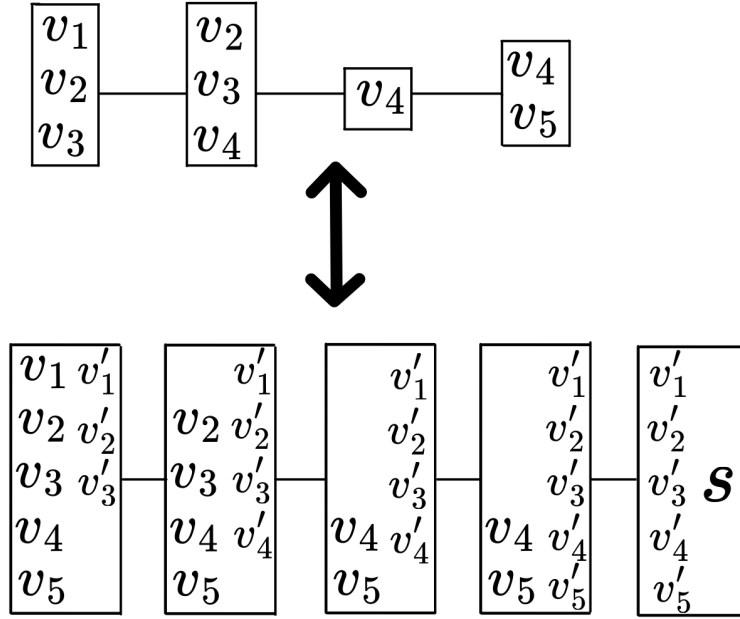


図 A.2: 図 A.1 の G, G' に対する DAG パス分解 (P, β) , (P', γ) (それぞれ上, 下) の構成例. G の頂点数を n とすると, (P, β) の幅が $\text{pw}(G)$ のとき, (P', γ) の幅は $\text{pw}(G) + n$ となる.

たすことを示す. G' 上の各枝 $e \in E'$ を次の 5 つに場合分けして考える. なお, v, v' はそれぞれ A, B に含まれることに注意する.

- $e = (v_i, v_j)$ ($1 \leq i < j \leq n$) の場合 :
 $A \subseteq \gamma(p_1)$ より, $v_i, v_j \in \gamma(p_1)$
- $e = (v'_i, s)$ ($1 \leq i \leq n$) の場合 :
 $B \cup \{s\} = \gamma(p_{r+1}), s \notin \gamma(p_r)$ より, $v'_i, s \in \gamma(p_{r+1}), s \notin \gamma(p_r)$
- $e = (v_i, v'_i)$ ($1 \leq i \leq n$) の場合 :
 γ の構成より, $v_i \in \beta(p_1)$ ならば $v_i, v'_i \in \gamma(p_1)$. $v_i \notin \beta(p_1)$ ならば, (P, β) で v が初めて現れたバッグを $\beta(p_m)$ とすると, $v_i, v'_i \in \gamma(p_m)$ であり, v'_i は $\gamma(p_1)$ で初めて現れている. よって $v_i, v'_i \in \gamma(p_m), v'_i \notin \gamma(p_{m-1})$
- $e = (v_i, v'_j)$ ($(v_i, v_j) \in E \in G$) の場合 :
 γ の構成より, $v_i, v_j \in \beta(p_1)$ ならば $v_i, v'_j \in \gamma(p_1)$. $v_i, v_j \notin \beta(p_1)$ ならば, (P, β) において, ある m があり, $v_i, v_j \in \beta(p_m), v_j \notin \beta(p_{m-1})$ とできる. このとき, γ の構成より $v_i, v'_j \in \gamma(p_m), v'_j \notin \gamma(p_{m-1})$
- $e = (v_j, v'_i)$ ($(v_i, v_j) \in E \in G$) の場合 :
 (P, β) において, v_i が初めて現れたバッグを $\beta(p_m)$ とする. このとき γ の

構成より, v'_i は $\gamma(p_m)$ で初めて現れている. また (P, β) は G の DAG パス分解であるから, ある m' があり, $v_i, v_j \in \beta(p'_m), v_j \neq \beta(p'_{m'-1})$ とできる. γ の構成より, $v_j \in \gamma(p_l)$ ($p_l = 1, 2, \dots, m'$) がいえ, さらに $m \leq m'$ に注意すると $v_j \in \gamma(p_m)$ がいえる. したがって $v_j, v'_i \in \gamma(p_m), v_j \notin \gamma(p_{m-1})$

よって, (P', γ) は DAG パス分解のルール 2 を満たす. 以上より (P', γ) が G' の DAG パス分解であることが示される. また, 各 $m = 1, 2, \dots, r$ に対し, $v_i \in \beta(p_m)$ ならば $v_i, v'_i \in \gamma(p_m)$ であり, かつ $v_i \notin \beta(p_m)$ ならば, v_i, v'_i のどちらか一方が $\gamma(p_m)$ に含まれるため, $|\gamma(p_{r+1})| = n + 1$ に注意すると, (P', γ) の幅は $((P, \beta)$ の *width*) + n , すなわち $\text{pw}(G) + n$ であることがいえる.

次に, (P', γ) が G' の DAG パス分解のうち最小の幅をもつ DAG パス分解であることを示す. (P', γ) よりも幅の小さい DAG パス分解 (Q, δ) ($Q = (q_1, q_2, \dots, q_{r'})$) が存在すると仮定し, 矛盾を導くことでこれを示す. まず, 以下の手順によって (Q, δ) と同じ幅をもつ G' の nice DAG パス分解を構成する.

1. (Q, δ) のバッグのうち, 初めて A のすべての頂点が含まれたバッグを $\delta(q_i)$ ($q_i \in Q$) とする (A の任意の 2 頂点間には枝があるため, このような q_i が存在することに注意する). ある $v' \in B$ に対し, $v' \in \delta(q_j)$ なる q_j ($j < i$) が存在する場合, このような q_j を Q からすべて取り除く. $\delta(q_j) \subseteq \delta(q_i)$ であったことに注意すると, q_j の削除後も幅が同じ G' の DAG パス分解になっており, こうしてできる DAG パス分解を (Q', δ') とする.
2. Q' の左端に q_0 ($\delta'(q_0) = A$) を追加し, (Q'', δ'') とする.
3. (Q'', δ'') のバッグのうち, 初めて $B \cup \{s\}$ のすべての頂点が含まれたバッグを $\delta''(q_k)$ ($q_k \in Q''$) とする (B のすべての頂点から S に向かう枝があるため, このような q_k が存在することに注意する). $v \in \delta''(q_k)$ なる $v \in A$ が存在する場合, Q'' から $\{q_j | j \geq k\}$ をすべて取り除き, q_{k-1} の直後に, 順に q'_k, q'_{k+1}, q'_{k+2} ($\delta''(q'_k) = \delta(q_k) \setminus \{s\}, \delta''(q'_{k+1}) = B, \delta''(q'_{k+2}) = B \cup \{s\}$) を追加する. この操作を行っても DAG パス分解のルールは満たされたままであり, かつ幅は操作前より大きくならないことに注意する. こうしてできる DAG パス分解を (Q''', δ''') とする.
4. (Q''', δ''') を幅が同じ nice DAG パス分解に変換する. 便宜上, この nice DAG パス分解を (Q, δ) ($Q = (q_1, q_2, \dots, q_{r'})$) と表記する.

以上の操作によって構成された nice DAG パス分解 (Q, δ) は, はじめ A の頂

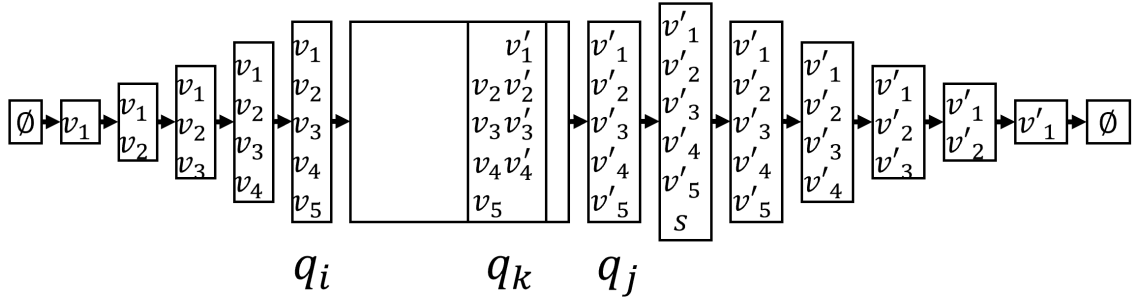


図 A.3: 構成した nice DAG パス分解 (Q, δ) の例. q_i で A の全ての頂点の introduce が完了し, q_j で B の全ての頂点の introduce が完了する. q_i と q_j の間のバッグ q_k では, 各 i に対して v_i, v'_i の少なくともどちらか一方が含まれる.

点を順に introduce し, ある q_i で A の全ての頂点の introduce が終わった後, B の頂点の introduce を行いつつ, A の頂点の forget も行っていく. B のすべての頂点の introduce が終わった後, ある q_j で B のみを含むバッグがあり, 直後に $B \cup \{s\}$ からなるバッグが続く. 図 A.3 で構成後の例を示す. このとき, $\delta(q_k)$ ($q_k \in Q, i < k < j$) では, 各 v_m, v'_m ($m = 1, 2, \dots, n$) について, v_m, v'_m の少なくともどちらか一方は $\delta(q_k)$ に含まれる. なぜならば, G' には枝 (v_m, v'_m) が存在し, v_m, v'_m を同時に含む $\delta(q_{i_m})$ が存在すること, そして $\delta(q_i) = A, \delta(q_j) = B$ に注意すると, $v_m \in \delta(q_{i_L}), v'_m \in \delta(q_{i_R})$ ($q_{i_L}, q_{i_R} \in Q, i \leq i_L \leq i_m \leq i_R \leq j$) がいえるからである.

ここで各 m ($m = 1, 2, \dots, r'$) に対し, G の頂点集合 $\beta'(q_m)$ を $\beta'(q_m) = \{v_i | \{v_i, v'_i\} \subseteq \delta(q_m)\}$ と定める. このとき, (Q, β') が G の DAG パス分解になっていることを示す. G' において任意の頂点对 (v, v') ($v \in A, v' \in B$) が隣接していることに注意すると, (Q, δ) では (v, v') を同時に含むようなバッグが少なくとも 1 つ存在する. よって $\sum_{m=1}^{r'} \beta'(q'_m) = V$ が成り立つため, (Q, β') は DAG パス分解のルール 1 を満たす. また G' のうち B によって誘導される部分グラフを G'_B とすると, $E(G'_B) = E(G)$ であるため, B の頂点で introduce される順序は, G' の強連結成分に対するトポロジカル順序になる. したがって (Q, β') も G' の強連結成分がトポロジカル順序で introduce されていくため, (Q, β') は DAG パス分解のルール 2 を満たす. さらに, (Q, δ) は G' の DAG パス分解であるから, (Q, δ) で A の頂点が一度 forget された後, 再び introduce されることはない. よって (Q, δ) で v, v' を含むバッグが非連結になることはないため, (Q, β') でも v を含

むバッグが非連結になることはない．したがって DAG パス分解のルール 3 を満たす．

以上より, (Q, β') は G の DAG パス分解になっている．このとき, (Q, β') の各バッグは, (Q, δ) の各バッグが (v_i, v'_i) を同時に含む場合のみ v_i を含んでいること, そして各 $\delta(q_m)$ には v_i, v'_i の少なくともどちらか一方が含まれることに注意すると, (Q, δ) の幅 k に対し, (Q, β') の幅 w_b は高々 $k - n$ である．ここで仮定より $k < \text{pw}(G) + n$ であるため $w_b < \text{pw}(G)$ とできるが, これは $\text{pw}(G)$ が G の DAG パス幅であることと矛盾する．したがって仮定が誤りであり, (P', γ) が G' の DAG パス分解のうち最小の幅をもつ DAG パス分解であることが示される．

以上より, $\text{pw}(G') = \text{pw}(G) + n$ が導かれる． G' が sink をただ 1 つもつことと Lemma 25 とより $\text{tw}(G') = \text{pw}(G')$ がいえるため, $\text{pw}(G') = \text{tw}(G') = \text{pw}(G) + n$ が導かれる．

□

A.12 Theorem 12 の証明

Theorem 12 を証明するため, 次で定義される co-DAG パス幅の計算が NP 困難であることを示す．

Definition 37. $G = (V, E)$ とする． G の co-DAG パス分解とは, 以下の 3 つの条件をみたすような V の各部分集合 $X_i (i = 1, 2, \dots, s)$ の列 $X = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ である．

1. $X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_s = V$
2. 任意の有向枝 $(u, v) \in E$ について, 以下のいずれかが成り立つ．
 - $u, v \in X_1$
 - ある $i (i \geq 2)$ があり, $u, v \in X_i, u \notin X_{i-1}$ が成り立つ．
3. 任意の $i, j, k (1 \leq i \leq j \leq k \leq s)$ について, $X_i \cap X_k \subseteq X_j$ が成り立つ．

すなわち, 各頂点 v について, v は X 上で非空な部分道を誘導する．

ある co-DAG パス分解 $P = (X_1, X_2, \dots, X_s)$ の幅を $\max_{1 \leq i \leq s} |X_i|$ と定義する．このとき, 有向グラフ G の co-DAG パス幅とは, G に対する全ての co-DAG パス分解のうち, 幅が最小である co-DAG パス分解の幅である．

以降では, G の co-DAG パス幅を $\text{cpw}(G)$ と表す．

Lemma 26. 有向グラフ G , 整数 k が与えられたとき, $\text{cpw}(G) \leq k$ が成り立つかを判定する問題は NP 完全である．

Proof. G のある co-DAG パス分解が与えられたとき、その幅が k 以下かどうかを判定することは明らかに多項式時間で行えるため、この問題は NP に属する。また、 G の全ての枝の向きを逆にした有向グラフを G' とする。 G に対して幅が $\text{pw}(G)$ である DAG パス分解 P が与えられたとき、 G' に対して最小の幅をもつ co-DAG パス分解 P' は、DAG パス分解と co-DAG パス分解定義より P と等しい。したがって P' の幅は $\text{pw}(G)$ であるため、 $\text{cpw}(G') = \text{pw}(G)$ が成り立つ。以上より Lemma 26 が示される。 \square

また、次の補題を示す。

Lemma 27. $G = (V, E)$ が *sink* をただ 1 つしか持たないならば、 $\text{ctw}(G) = \text{cpw}(G)$ が成り立つ。

Proof. co-DAG パス分解, co-DAG 木分解の定義より、幅が $\text{cpw}(G)$ である G の co-DAG パス分解は G の co-DAG 木分解でもある。よって $\text{ctw}(G) \leq \text{cpw}(G)$ が成り立つ。一方、幅が $\text{ctw}(G)$ である G の nice co-DAG 木分解を (T, γ) とし、 G のただ一つの強連結成分である *sink* を $A \subseteq V$ とする。このとき nice co-DAG 木分解の定義より、ある根 r とその子 r_c があり、 $\gamma(r) = \emptyset, \gamma(r_c) = A$ が成り立つ。このとき T はただ一つの根 r をもつことがいえる。なぜならば、もし T が r 以外の根 r' ($\gamma(r') = \emptyset$) をもつと仮定すると、 r' の子はバッグに A を含まないため、 G に A 以外の *sink* が存在することになり、矛盾するからである。したがって T は union のノードを持たず、任意の $t \in T$ は入次数と出次数が高々 1 である。したがって co-DAG パス分解と co-DAG 木分解の定義より、 (T, γ) は G の DAG パス分解でもある。これより $\text{cpw}(G) \leq \text{ctw}(G)$ がいえる。以上より、 $\text{ctw}(G) = \text{cpw}(G)$ が示される。 \square

最後に Theorem 12 を示す。

Proof. ある有向グラフ $G = (V, E)$ が与えられたとき、Theorem 10 の証明と同様の手順で $|V'| = 2|V| + 1, |E'| = \frac{1}{2}(|V|^2 + 3|V|) + 2|E|$ である有向グラフ $G' = (V', E')$ を構成する。また G' の頂点集合 A, B を同様に $A = \{v_i | i = 1, 2, \dots, n\}, B = \{v'_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ と定める。このとき $V' = A \cup B \cup \{s\}$ とできる。 G' は G のサイズの多項式時間で構成できる。

次に、幅が $\text{cpw}(G)$ である G の co-DAG パス分解を (P, β) ($P = p_1, p_2, \dots, p_r$) とする。各 m に対し、 G' の頂点集合 $\gamma(p_m)$ を以下のように構成する。

- 各 (p_m) に対し, $v \in \bigcup_{j=i}^r \beta(p_j)$ ならば, v' を $\gamma(p_m)$ に加える.
 - 各 (p_m) に対し, $v \in \bigcup_{j=1}^i \beta(p_j)$ ならば, v を $\gamma(p_m)$ に加える.
- さらに $\gamma(p_0) = \gamma(p_1) \cup \{s\}$ ($(p_0, p_1) \in E[T]$) と定める.

以上の操作によってできる (P', γ) ($P' = (p_0, p_1, p_2, \dots, p_r)$) が G' の co-DAG パス分解になっていることを示す. γ の構成法に注意すると, $A \subseteq \gamma(p_r), B \subseteq \gamma(p_1)$ がいえ, さらに $r \in \gamma(p_0)$ であることから, $\sum_{m=0}^r \gamma(p_m) = V'$ が成り立つ. よって (P', γ) は co-DAG パス分解のルール 1 を満たす. また γ の構成法に注意すると, 任意の $v \in V' \setminus \{r\}$ に対して, v を含む全てのバッグが (p_1, p_2, \dots, p_r) 上で非連結になることはなく, また $B \cup \{r\} \subseteq \gamma(p_0)$ より, 任意の $v \in V'$ に対して, v を含む全てのバッグが $(p_0, p_1, p_2, \dots, p_r)$ 上で非連結になることはない. よって (P', γ) は co-DAG パス分解のルール 3 を満たす. さらに Theorem 10 の証明と同様の議論により, (P', γ) が co-DAG パス分解のルール 2 を満たすことがいえる. 以上より (P', γ) は G' の co-DAG パス分解である. このとき (P', γ) の幅は $\text{cpw}(G) + n$ である.

さらに Theorem 10 の証明と全く同様の議論により, (P', γ) が G' に対して幅が最小の co-DAG パス分解であることがいえる. ここで G' は sink を一つしか持たないことに注意すると, Lemma 27 より $\text{ctw}(G') = \text{cpw}(G')$ がいえ, $\text{ctw}(G) = \text{cpw}(G) + n$ が成り立つ. 以上より Theorem 12 が示される. \square

A.13 Lemma 23 の証明

Proof. $i = l$ のとき, 定義 10 より DS は mDiDS のサイズを出力する. したがって各 $i \in T$ に対し, $\text{DS}(i, A_i, B_i)$ が DS の定義 1 を満たすことを示せば十分. これを i に関する数学的帰納法で示す. まず i が T の根のとき $\beta(i) = \emptyset$ であり, First Step より明らかに定義 10 を満たす. 次にある i での定義 10 の成立を仮定する. 以下で i の子 i' が introduce か forget か union かで場合分けを行う.

- i' が $v \in V$ を introduce する場合

i' はただ一つの親 i をもつ. $v \in A_{i'}$ の場合, co-DAG 木分解のルール 2 より v の後続頂点は i' の時点で全て introduce されており, v は $\text{suc}(v)$ を支配する. また co-DAG 木分解のルール 2 より v は i' の時点でどの頂点からも支配されていない. 仮定より $D = \text{DS}(i, A_{i'}, B_{i'})[1]$ が支配されれば G_i の mDiDS のサイズは $\text{DS}(i, A_{i'}, B_{i'})[0]$ であるから, $D \setminus \text{suc}(v)$ が支配されれば $G_{i'}$ の mDiDS のサイズは $\text{DS}(i, A_{i'}, B_{i'})[0] + |v|$ となる. したがって i' でも

定義 10 を満たす.

$v \in B_{i'}$ の場合, v は支配集合に含まれないので i' 以降に introduce される頂点によって支配される必要がある. 仮定より $D = \text{DS}(i, A_{i'}, B_{i'})[1]$ が支配されれば G_i の mDiDS のサイズは $\text{DS}(i, A_{i'}, B_{i'})[0]$ であるから, $D \cup \{v\}$ が支配されれば $G_{i'}$ の mDiDS のサイズは $\text{DS}(i, A_{i'}, B_{i'})[0]$ となる. したがって i' でも定義 10 を満たす.

- i' が $v \in V$ を forget する場合

i' はただ一つの親 i をもつ. $v \in \text{DS}(i, A_{i'}, B_{i'} \cup \{v\})[1]$ の場合, v を支配する頂点は $A_{i'}$ に存在しないため, i の時点で v 自身が支配集合に含まれている必要がある. 逆にこのとき, 仮定より $\text{DS}(i, A_{i'} \cup \{v\}, B_{i'})[1]$ が支配されれば G_i の mDiDS のサイズは $\text{DS}(i, A_{i'} \cup \{v\}, B_{i'})[0]$ であるため, i' でも定義 10 を満たす.

$v \notin \text{DS}(i, A_{i'}, B_{i'} \cup \{v\})[1]$ の場合, v を支配する頂点が $A_{i'}$ に少なくとも 1 つ存在する. したがって v は i の時点で $A_{i'}, B_{i'}$ のいずれに含まれていてもよく, また mDiDS のサイズが小さくなるのは v が $B_{i'}$ に含まれている場合である. 仮定より $\text{DS}(i, A_{i'}, B_{i'} \cup \{v\})[1]$ が支配されれば G_i の mDiDS のサイズは $\text{DS}(i, A_{i'}, B_{i'} \cup \{v\})[0]$ であるため, i' でも定義 10 を満たす.

- i' が二つの親 i, \bar{i} をもつ union であるとき

\bar{i} においても定義 10 が成立していると仮定する. また $D_i = \text{DS}(i, A_i, B_i)[1], D_{\bar{i}} = \text{DS}(\bar{i}, A_{\bar{i}}, B_{\bar{i}})[1]$ とする. 以下では $A_{i'} = A_i = A_{\bar{i}}, B_{i'} = B_i = B_{\bar{i}}$ であることに注意する. $D_i = D_{\bar{i}}$ の場合, 仮定より D_i が支配されれば S_i は G_i の mDiDS であり, かつ D_i が支配されれば $S_{\bar{i}}$ は $G_{\bar{i}}$ の mDiDS である. このとき $S_i \cap S_{\bar{i}} = A_{i'}$ が成り立つ. なぜならば定義 10 より $B_i \cap S_i = \emptyset, B_{\bar{i}} \cap S_{\bar{i}} = \emptyset$ であり, co-DAG 木分解のルール 3 より任意の $s \in S_i \cap S_{\bar{i}}$ を含むバッグは T 上で i', i, \bar{i} を含む連結な反有向木を形成しているからである. したがって $V[G_{i'}] = V[G_i] \cup V[G_{\bar{i}}]$ に注意すると, D_i が支配されれば $S_i \cup S_{\bar{i}}$ は明らかに $G_{i'}$ の mDiDS である. このとき mDiDS のサイズは $\text{DS}(i, A_{i'}, B_{i'})[0] + \text{DS}(\bar{i}, A_{i'}, B_{i'})[0] - |A_{i'}|$ であるため i' でも定義 10 を満たす.

$D_i \neq D_{\bar{i}}$ の場合, $D_{\bar{i}} \setminus D_i \neq \emptyset$ としても一般性を失わない. このときある頂点 $w \in D_{\bar{i}} \setminus D_i$ が存在する. 定義 10 より w は $B_{\bar{i}} = B_i = B_{i'}$ に含まれ, かつ w はある頂点 $w' \in S_i \subseteq V[G_i]$ によって支配されており, $S_{\bar{i}}$ には w を支配する

頂点が存在しない．ここで $V[G_{i'}] = V[G_i] \cup V[G_{\bar{i}}]$ であるから， $S_{i'} = S_i \cup S_{\bar{i}}$ とすることで $S_{i'}$ には w を支配する w' が含まれる．したがって仮定に注意して $D_i \cap D_{\bar{i}}$ が支配されれば $S_i \cup S_{\bar{i}}$ は明らかに $G_{i'}$ の mDiDS である．上記と同様の議論により $|S_i \cup S_{\bar{i}}| = \text{DS}(i, A_{i'}, B_{i'})[0] + \text{DS}(\bar{i}, A_{i'}, B_{i'})[0] - |A_{i'}|$ であるため， i' においても定義 10 を満たす．

以上より， i' でも定義 10 が成立．数学的帰納法により Lemma 23 が証明された．

□