

2020 年度
修士論文

k -極大独立集合検証問題の
分散計算複雑性

Distributed Complexity of k -Maximal
Independent Set Verification

名古屋工業大学 大学院工学研究科 博士前期課程

情報工学専攻

片山・金研究室所属

2019 年度入学

学生番号：31414050 氏名：佐藤 僚祐

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.2	本研究の目的と結果	2
1.3	本研究の成果	2
1.4	関連研究	3
1.5	論文の構成	4
第2章	諸定義	5
2.1	CONGEST モデル	5
2.2	k -極大独立集合	5
2.3	k -極大独立集合検証問題	6
2.4	2 者間通信複雑性	6
第3章	1-MIS 検証問題の $O(1)$ ラウンドアルゴリズム	8
第4章	k-MIS 検証問題の下界	10
4.1	2-MIS 検証問題の下界	10
4.2	3-MIS 検証問題の下界	14
4.3	k -MIS 検証問題の下界	17
第5章	まとめと今後の課題	22
5.1	まとめ	22
5.2	今後の課題	22

第1章

はじめに

1.1 研究背景

分散グラフアルゴリズムとは、計算機を頂点、辺を通信リンクとみなしてネットワークをモデル化したグラフ上において、そのネットワーク自身を入力としてグラフに対して定義される諸問題を解く枠組みである。分散アルゴリズムにおける代表的なモデルのひとつとして CONGEST モデルが存在する。CONGEST モデルでは、各ノードは同期ラウンドに従って実行され、メッセージ交換によって協調動作を行う。各ノードは各ラウンドで (i) $O(\log n)$ ビットのメッセージを隣接ノードに送信 (ii) 隣接ノードからメッセージを受信 (iii) 内部計算の3つの動作をする。CONGEST モデルにおいては、ある1つのノードにグラフ全体のトポロジの情報を集め、そのノード上で逐次アルゴリズムを実行するという愚直なアプローチにより、任意の問題に対して自明に $O(n^2)$ ラウンドの上界を得ることができる。一般に、分散グラフアルゴリズムの計算複雑性においては、システムの規模、すなわち n の値に対して劣線形なラウンド複雑性を持つアルゴリズムを構成できるかどうかに興味がある。逆に、下界の観点からは、 $\tilde{\Omega}(n)$ ラウンドの下界を得ることができるような問題は計算困難な問題として認識され、前述の万能な上界の結果から、 $\tilde{\Omega}(n^2)$ ラウンドの下界を持つような問題は「最も難しい」問題ととらえることができる⁽¹⁾。

本研究ではグラフ上の最適化問題の一つである、最大独立集合問題に注目する。逐次計算の文脈において、最大独立集合問題はグラフ理論における重要な基本問題としてよく知られているが、分散アルゴリズムの分野においても、同問題は一種の近傍頂点との間のリソース競合回避と見なすことができ、数多くの応用が存在する。しかしながら、逐次計算の複雑性理論において、最大独立集合問題はNP完全であるのみならず、任意の定数 $\epsilon > 0$ に対して近似率 $O(n^{1-\epsilon})$ を達成不可能であることが知られている [1] ため、何らかの性能

(1) : $\tilde{\Omega}(\cdot)$ は、通常の $\Omega(\cdot)$ 記法から、 $\text{polylog}(n)$ の項を (相対的に十分小さい項として) 無視した記法である。

保証を持つ多項式時間アルゴリズムの設計は絶望的である．一方で，分散アルゴリズムの分野においては，指数時間のローカル計算を許した CONGEST モデルにおいて，最大独立集合問題の近似解を求めるためのラウンド複雑性が近年議論されており，上界，下界の両面から，いくつかの結果が知られている．具体的には，CONGEST モデルにおいて最大重み付き独立集合の $(1 + \epsilon) \cdot \Delta$ -近似 (Δ は頂点の最大次数) を高確率で $(\text{poly}(\log \log n)/\epsilon)$ ラウンドで発見するアルゴリズム [2] や，最大独立集合を発見するアルゴリズムに対する $\Omega\left(\frac{n^2}{(\log n)^2}\right)$ ラウンドの下界 [3]，最大独立集合の $(\frac{3}{4} + \epsilon)$ -近似を発見するアルゴリズムに対する $\Omega\left(\frac{n^2}{(\log n)^3}\right)$ ラウンドの下界 [4] などが知られている．

1.2 本研究の目的と結果

本研究では，最大独立集合計算の複雑性理解に対して，近似解アルゴリズムとは異なる面からのアプローチを試みる．上述の最大独立集合問題の近似に関する議論は，本質的に指数時間のローカル計算を許容したモデルを必要とするが，この仮定は必ずしも現実的とはいえない．そこで我々は，近似解の分散計算複雑性ではなく，(ある種の近傍の下での) 局所最適解の複雑性に着目する．具体的には， k -極大独立集合 (k -Maximal Independent Set, k -MIS) の発見問題に対する CONGEST モデルでのラウンド複雑性を検討する． k -極大独立集合を定義するために，高々 k 個の頂点を取り除き他の $k + 1$ 頂点を追加することで独立集合のサイズを一つ増加させるという近傍探索を定義する． k -極大独立集合は，この操作が適用不能な独立集合として定義される．通常の極大独立集合は，定義より 0-MIS であり，また通常の最大独立集合は n -MIS である．逐次計算においては， $k = O(1)$ に対して，単純な局所探索により k -MIS は多項式時間で計算可能であるため，CONGEST アルゴリズムの文脈においても，この問題は多項式時間のローカル計算のみを許容するモデルにおいても取り扱うことが可能である．

自然な局所探索に基づいて k -MIS を構成しようとしたとき，与えられた独立集合 I が k -MIS，すなわち局所最適解かどうかを判定することが必要である．本研究ではこの判定問題 (k -MIS 検証問題) に注目して，CONGEST モデル上でのラウンド複雑性を検討する．

1.3 本研究の成果

本研究では，CONGEST モデルにおける k -MIS 検証問題に関して，以下の結果が成立することを示す．

1. 1-MIS 検証問題を $O(1)$ ラウンドで解くアルゴリズムが存在する.
2. 2-MIS 検証問題を解く任意のアルゴリズムはの最悪時実行ラウンド数は $\tilde{\Omega}(\sqrt{n})$ となる.
3. 3-MIS 検証問題を解く任意のアルゴリズムの最悪時実行ラウンド数は $\tilde{\Omega}(n)$ ラウンドとなる.
4. 任意の自然数 $\ell \geq 1$ に対して, $(4\ell + 5)$ -MIS 検証問題を解く任意のアルゴリズムの最悪時実行ラウンド数は $\tilde{\Omega}\left((n^{2-\frac{1}{\ell+1}})/\ell\right)$ ラウンドとなる.

上記の下界はすべて, 定数成功確率の乱択アルゴリズムについても成立する. 4 番目の下界の結果より, $k = \Omega(\log n)$ に対して, k -MIS 検証問題のラウンド複雑性はナイーブなアルゴリズムの上界である $O(n^2)$ ラウンドにほぼ一致する ($\tilde{\Omega}(n^2)$ ラウンド) ことが分かる. なお, いずれの下界の証明も, CONGEST モデルにおける下界証明の代表的な手法の一つである, 2 者間通信複雑性における交差判定問題からの帰着に基づいている.

1.4 関連研究

CONGEST モデルにおける最大独立集合問題の通信複雑性としては, 最大重み付き独立集合の $(1 + \epsilon) \cdot \Delta$ -近似 (Δ は頂点の最大次数) を高確率で見つけるアルゴリズムに対する $(\text{poly}(\log \log n)/\epsilon)$ ラウンドの上界 [2] や, 最大独立集合を見つけるアルゴリズムに対する $\Omega\left(\frac{n^2}{(\log n)^2}\right)$ ラウンドの下界 [3], 最大独立集合の $(\frac{1}{2} + \epsilon)$ -近似を見つけるアルゴリズムに対する $\Omega\left(\frac{n}{(\log n)^3}\right)$ ラウンドの下界, $(\frac{3}{4} + \epsilon)$ -近似を見つけるアルゴリズムに対する $\Omega\left(\frac{n^2}{(\log n)^3}\right)$ ラウンドの下界 [4] が知られている.

極大独立集合 (0-MIS) 問題の複雑性に関して, CONGEST モデルにおいては $O(\log n)$ ラウンドの乱択アルゴリズム [5] や $\text{poly}(\log n)$ ラウンドの決定性アルゴリズム [6] が知られている. LOCAL モデルにおいては $O(\log \Delta) + \text{poly}(\log \log n)$ ラウンドの乱択アルゴリズムや $\text{poly}(\log n)$ ラウンドの決定性アルゴリズム [6], 乱択アルゴリズムに対する $\Omega\left(\frac{\log \log n}{\log \log \log n}\right)$ の下界や決定性アルゴリズムに対する $\Omega\left(\frac{\log n}{\log \log n}\right)$ の下界 [7] が知られている.

また集中型アルゴリズムについて, 任意の $\epsilon > 0$ に対して最大独立集合の $n^{1-\epsilon}$ 近似を発見するアルゴリズムは存在しないことが知られている [1].

前述の通り, 本研究の下界に関する結果は 2 者間通信の枠組みにおける交叉判定問題からの帰着に基づいているが, 交叉判定問題からの帰着によって下界を示すという証明方法

は多くの問題に対して用いられている．一部の例として最小カット発見問題と最小全域木問題に対する $\Omega(D + \sqrt{n})$ の下界 (D はグラフの直径) [8] や部分グラフ H_k 検出問題に対する $\Omega\left(\frac{n^{2-1/k}}{bk}\right)$ の下界 [9], 近似最大クリーク K_l 検出問題に対する $\Omega\left(\frac{n}{(l+\sqrt{n})b}\right)$ の下界 [10] などが挙げられる．

1.5 論文の構成

本論文は全 5 章で構成される．第 2 章ではグラフの構造と用語の定義をしている．第 3 章では 1-MIS 検証問題に対する $O(1)$ ラウンドアルゴリズムについて述べている．第 4 章では k -MIS 検証問題 ($k = 2, 3, 4l + 5 (l \geq 1)$) に対する下界について述べている．第 5 章ではまとめについて述べている．

第2章

諸定義

2.1 CONGEST モデル

CONGEST モデルにおいて、システムは単純無向連結グラフ $G = (V, E)$ により表現される。ここで V はノードの集合で $|V| = n$ とし、 E は通信リンクの集合である。CONGEST モデルでは計算機は同期したラウンドに従って動作するものとする。1 ラウンド内で、隣接頂点へのメッセージ送信、隣接頂点からのメッセージ受信、内部計算を行う。各辺は単位ラウンドあたり $b = O(\log n)$ ビットを双方向に伝送可能であり、各ノードは同一ラウンドに異なる接続辺に異なるメッセージを送信可能である。また、各ノードには $O(\log n)$ ビットの整数値による ID が付与されており、自身の隣接ノードすべての ID を既知であるとする。各ノードはグラフのトポロジに関する事前知識を持たないものとする。

2.2 k -極大独立集合

定義 2.1. 頂点集合 I に対して、以下を満たす頂点集合 $I' \subseteq I$ と $S \subseteq V \setminus I$ のペアが存在しないとき、 I を k -極大独立集合と呼ぶ。

1. $|I'| \leq k$
2. $|S| \geq |I'| + 1$
3. $(I \setminus I') \cup S$ は独立集合

つまり、ある独立集合 I に対して、サイズ k の I の部分集合 I' を取り除いてサイズ $k+1$ 以上の V の部分集合 S を I に追加したものが新たな独立集合になり得ないとき、 I を k -極大独立集合と定義する。

2.3 k -極大独立集合検証問題

定義 2.2. 入力としてグラフ G と独立集合 I が与えられる. 各ノードはアルゴリズム \mathcal{A} に従って $\{0, 1\}$ のいずれかを返し以下の条件を満たす時, アルゴリズム \mathcal{A} は k -MIS 検証問題を解くアルゴリズムであると言う.

1. $\forall v \in V$ に対して, v が 0 を返すとき I は k -MIS である.
2. $\exists v \in V$ に対して, v が 1 を返すとき I は k -MIS ではない.

2.4 2 者間通信複雑性

2 者間通信複雑性の枠組みでは, アリスとボブの二人のプレイヤーがそれぞれ k ビットの $0/1$ のデータ列で構成されるプライベートな入力 x および y を持っているとする. プレイヤーの目標は, 結合関数 $f(x, y)$ を計算することであり, 複雑性の尺度として $f(x, y)$ を計算するためにアリスとボブが通信によって交換する必要があるビット数が用いられる.

この枠組みにおける重要な問題として, 交叉判定問題 (set-disjointness) がある. この問題では, アリスとボブはそれぞれ $x \in \{0, 1\}^k$ と $y \in \{0, 1\}^k$ を入力として持ち, 目的は $DISJ_k(x, y) := \bigvee_{i=1}^k x_i \wedge y_i$ を計算することである. k ビットの交叉判定問題を解くために, アリスとボブは通信によって $\Omega(k)$ ビット交換する必要があることが知られており [11], この事実を用いて最小カット発見問題や最小全域木問題 [8], 部分グラフ検出問題や [9], 近似最大クリーク検出問題 [10] といったさまざまな問題に対する下界の証明がされている.

CONGEST モデルにおいて, 入力グラフ上に特性 P があるかどうかの判定に対する下限の証明を 2 者間交叉判定問題から帰着するアプローチは以下のとおりである. 最初にアリスとボブは特殊なグラフ $G = (V, E)$ の構築と G を G_A と G_B に分割するカット辺 C の決定を行う. 次に, アリスとボブは入力文字列に基づいてそれぞれ G_A に辺 E_A と頂点 V_A , G_B に辺 E_B と頂点 V_B を追加する. このとき, $DISJ_k(x, y) = 1$ のときのみ, 何らかの特性 P (例えば, P : 「グラフに与えられた MIS が 2-MIS でない」) を持つように辺や頂点を追加する. また, カット辺 C は入力文字列に依存しないようにする. グラフ G に辺や頂点を追加したグラフを $G^{x,y} = (V', E')$ とすると $V' = V \cup (V_A \cup V_B)$, $E' = E \cup (E_A \cup E_B)$ 表すことができる. グラフ $G^{x,y}$ の構造の概要を図 2.1 に示す.

アリスとボブは, 入力グラフ上に特性 P があるかを判定する分散アルゴリズムをシミュレートできる. アリスは G_A に含まれる頂点を, ボブは G_B に含まれる頂点をシミュレートする. 2 者間通信複雑性モデルでのシミュレートは, 次のように実行される. G_A 中の辺

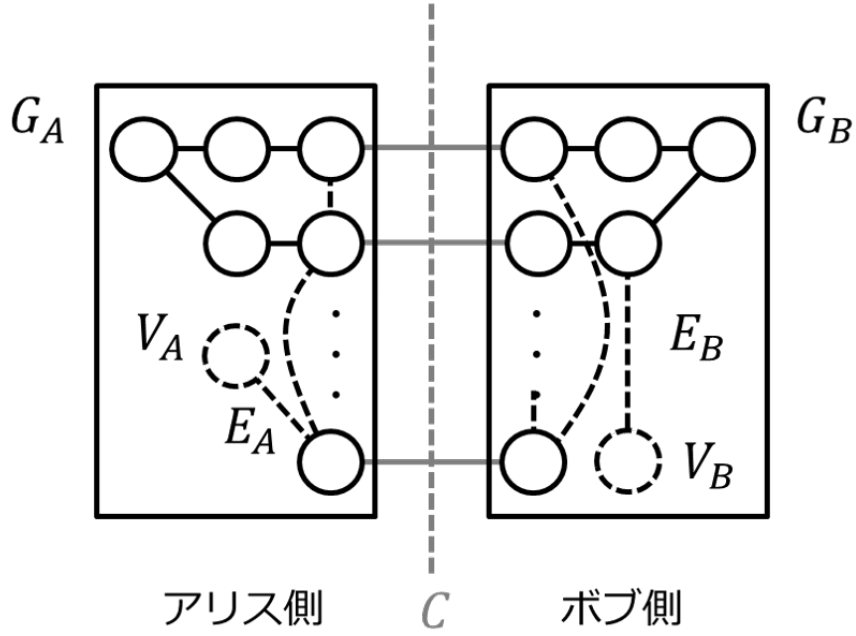


図 2.1: $G^{x,y} = (V', E')$

で送信されるメッセージ, あるいは G_B 中の辺で送信されるメッセージは, アリスとボブがそれぞれお互いと通信せずにシミュレートできる. カット辺 C を通じて送信されるメッセージに対しては, お互い情報を交換する必要がある. CONGEST モデルにおいてグラフ上に特性 P があるかどうかを r ラウンドで判定するアルゴリズム \mathcal{A} が存在したとすると, アリスとボブは特性 P の判定のために $O(r \cdot |C| \cdot \log n)$ ビット通信したことになる. これは, 各ラウンドで, アルゴリズムが各辺で $O(\log n)$ ビットの通信を行っているからである. このグラフにおいてアルゴリズム \mathcal{A} を実行すると同時に 2 者間交叉判定問題も解けていることになる. 例えばアルゴリズムを実行した結果, 入力グラフに特性 P があると判定されれば $DISJ_k(x, y) = 1$ であるとわかるからである. 交叉判定問題の通信複雑性よりアリスとボブは少なくとも $\Omega(k)$ ビットは通信しているはずである. したがって, CONGEST モデルにおいて特性 P があるかどうかを判定する任意のアルゴリズムに対して $r = \Omega(k/|C| \cdot \log n)$ ラウンドの下界を得ることができる. カット辺の大きさが小さくなるほど下界が強くなる.

第3章

1-MIS 検証問題の $O(1)$ ラウンドアルゴリズム

この章では、1-MIS 検証問題を $O(1)$ ラウンドで解くアルゴリズムについて述べる。CONGEST モデルにおいて、入力としてグラフ G と独立集合 I が与えられたとき、1-MIS 検証問題を解くために次のようなアルゴリズム A を実行する。

1. 各頂点 $v \in I$ は、自分の ID である $v.id$ を隣接頂点全員に送信する。
2. 各頂点 $u \notin I$ のうち、2 種類以上の ID をもらった頂点はアルゴリズムから離脱する。
3. 離脱しなかった頂点 $u \notin I$ のうち、1 種類だけの ID ($v.id$ とする) を受信した頂点は離脱していない全隣接頂点へ $v.id$ を送信する。頂点 $u \notin I$ は、自身が持つ $v.id$ と違う $v.id$ が書かれたメッセージは無視し、自身が持つ $v.id$ と同じ $v.id$ が書かれたメッセージの数を記憶し、それを a とする。
4. 各頂点 $v \in I$ は、自身と同じ $v.id$ を返信してきた頂点の集合 ($v.X$ とする) のサイズを数え、そのサイズ $|v.X|$ を $v.X$ 中の頂点に送信し、0 を返す。
5. メッセージを受け取った $v.X$ 中の頂点は、送られたサイズ $|v.X|-1$ と a を比較する。比較した $v.X$ 中の頂点全てで $|v.X|-1 = a$ であればその $v.X$ 中の頂点は 0 を返し、一つでも等しくなければその $v.X$ 中の頂点は 1 を返す。

アルゴリズム A の各ステップは明らかに $O(1)$ ラウンドで CONGEST モデルで実装できる。アルゴリズム A について、以下の補題が成り立つ。

補題 3.1. アルゴリズム A は 1-MIS 検証問題を解くことができる。

証明. アルゴリズム A は与えられた入力に対して誤った答えを返すとする。このとき以下の 2 つのうち、どちらかが成り立つ。

1. 与えられた独立集合が 1-MIS であり, アルゴリズム \mathcal{A} が 1-MIS でないと返す.
2. 与えられた独立集合が 1-MIS でなく, アルゴリズム \mathcal{A} が 1-MIS であると返す.

アルゴリズム \mathcal{A} の 5 番目のステップで $|v.X|-1$ と a を比較して, $v.X$ 中の頂点全てでその値が等しいとき, $v.X$ の頂点はクリークを形成している. $v \in I$ は他の $v.X$ 頂点と隣接しており, かつ $|v.X|-1 \geq a$ であるが, 等号が成立するのは $v.X$ 内の全ての頂点 $u \notin I$ が他の $u' \notin I$ と隣接している場合のみだからである.

1. の場合, アルゴリズム \mathcal{A} が 1-MIS でないと返したということは, ある $v.X$ についてその中の頂点 $u \notin I$ が 1 を返したということである. この場合, この $v.X$ はクリークを形成していない. 従って, $v.X$ の中に少なくともサイズ 2 の独立集合が存在しているはずである. v とそれらを入れ替えることで独立集合を維持しつつサイズを大きくすることができるため与えられた独立集合は 1-MIS ではないが, これは仮定に矛盾する.

2. の場合, アルゴリズム \mathcal{A} が 1-MIS であると返したということは, 全ての $v.X$ についてその中の頂点 $u \notin I$ が 0 を返したということである. この場合, 全ての $v.X$ がクリークを形成している. 従って, $v.X$ の中には独立集合に追加できる可能性のある頂点は存在しない. また, 2 番目のステップで離脱した頂点も独立集合点に含まれている 1 頂点を取り除いただけ追加できる可能性はない. よって, 独立集合を維持しつつサイズを大きくするために追加できる頂点は存在しないため与えられた独立集合は 1-MIS であるが, これは仮定に矛盾する.

以上より, アルゴリズム \mathcal{A} は与えられた入力に対して正しい答えを返すことができるため, 1-MIS 検証問題を解くことができる.

第4章

k -MIS 検証問題の下界

この章では、 k -MIS 検証問題の下界についての議論を行う。4.1 節では、2-MIS 検証問題の下界についての定理とその証明を述べる。4.2 節では、3-MIS 検証問題の下界についての定理とその証明を述べる。4.3 節では、 k -MIS 検証問題 ($k = 4l + 5, l \geq 1$) の下界についての定理とその証明を述べる。

4.1 2-MIS 検証問題の下界

この節では 2-MIS 検証問題の下界についての議論を行う。具体的には、次の定理を証明する。

定理 4.1. CONGEST モデルにおいて、2-MIS 検証問題を解く全てのアルゴリズムは $\tilde{\Omega}(\sqrt{n})$ の通信ラウンド数を必要とする。

証明. まず初めにアリスとボブが構築するグラフ $G = (V, E)$ を図 4.1 に示す。

図中の頂点のうち灰色のものは独立集合に含まれる頂点とする。図中の辺を定式化すると以下ようになる。(まず最初に、帰着に使うグラフの形式的な定義を書く(頂点集合、辺集合をちゃんと形式的に定義する)。手続き的に少しずつ頂点集合や辺集合を導入していった構成する必要はない、「XXX はクリークを成している」とするだけで辺集合を説明するのもよくないので避ける(形式的な定義を示したのち「すなわち、XXX はクリークを構成している」と補足的に説明するのが良い。図 4.1 は中途半端なので、なくてもいいのでは?)

- $\forall i((a_i^1, b_i^1), (a_i^2, b_i^2)) \in E$

このグラフが「 G 中に与えられている独立集合が、 $DISJ_{N \times N}(x, y) = 1$ のときのみ 2-MIS でない」という特性 P_2 を持つように、 G_A に構造 H_A 、 G_B に構造 H_B を追加する。

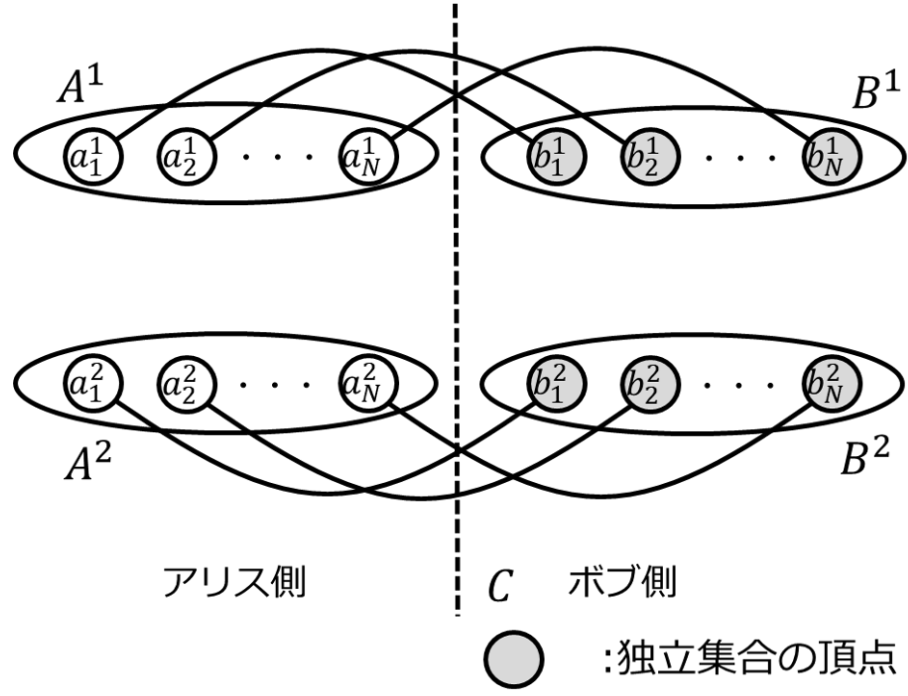


図 4.1: $G = (V, E)$

(なお, $DISJ_{N \times N}(x, y) := \bigvee_{i=1}^N \bigvee_{j=1}^N x_{i,j} \wedge y_{i,j}$ で定義される.) H_A と H_B の中身は以下のとおりである.

- $H_A: (a_i^1, a_j^2) \in E_A \Leftrightarrow x_{i,j} = 0$
 - $H_B: W(y)$ 頂点のクリーク $K_{W(y)}$ ($W(y)$ は 0/1 のデータ列 y 中に含まれる 1 の個数を表す.) $K_{W(y)}$ 中の頂点 $c_{i,j} \in V_B$ は $y_{i,j} = 1$ であるような (i, j) でインデックスづけされるものとする.
- このとき, $(c_{i,j}, b_i^1) \in E_B$ かつ $(c_{i,j}, b_j^2) \in E_B$

$G = (V, E)$ に辺と頂点を追加したグラフ $G^{x,y} = (V', E')$ を図 4.2 に示す.

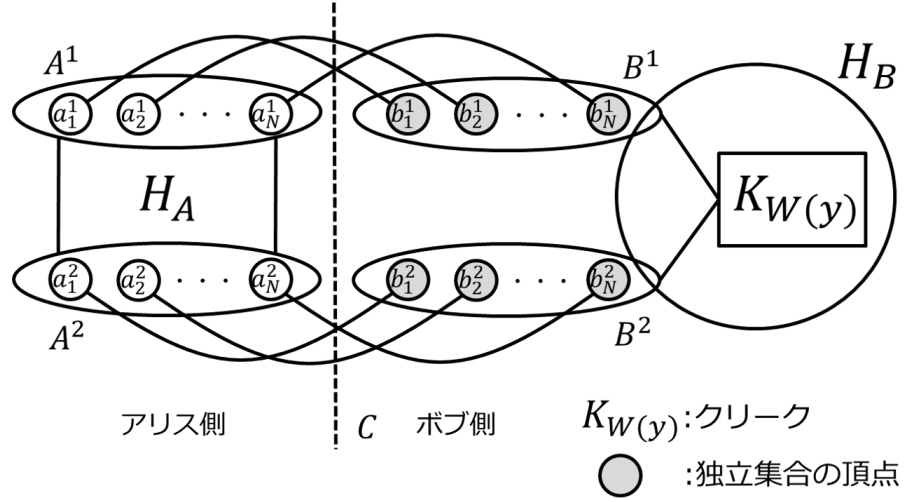


図 4.2: $G^{x,y} = (V', E')$

このグラフ $G^{x,y} = (V', E')$ が上記の特性 P_2 を満たしていることを示すために, 次の 2 点を確認する.

- (i) $DISJ_{N \times N}(x, y) = 1$ のとき, グラフに与えられている独立集合が 2-MIS でない:
 $x_{i,j} = y_{i,j} = 1$ とすると, b_i^1 と b_j^2 の 2 点を取り除いて a_i^1 , a_j^2 , $c_{i,j}$ の 3 点を追加できることから確認できる.
- (ii) $DISJ_{N \times N}(x, y) = 0$ のとき, グラフに与えられている独立集合が 2-MIS である:
 グラフに与えられている独立集合が 2-MIS でないと仮定する. このとき, ある 2 点を取り除くことで独立集合に追加できる 3 点が存在する. 2 点の取り除き方は (1) b_i^1 と b_j^1 ($i \neq j$), (2) b_i^2 と b_j^2 ($i \neq j$), (3) b_i^1 と b_j^2 が考えられる. (1) では a_i^1 と a_j^1 の 2 点しか追加できる可能性がなく, (2) では a_i^2 と a_j^2 の 2 点しか追加できる可能性がない. (3) において, b_i^1 を取り除いて a_i^1 を追加し, b_j^2 を取り除いて a_j^2 を追加し, さらに $c_{i,j}$ を追加することを考える. a_i^1 と a_j^2 が両方とも追加できるのは $x_{i,j} = 1$ のときのみであり, $c_{i,j}$ が追加できる ($c_{i,j}$ が存

在する) のは $y_{i,j} = 1$ のときのみであるが, これは $DISJ_{N \times N}(x, y) = 0$ に矛盾する. したがってグラフに与えられている独立集合から 2 点取り除いて 3 点追加することはできないため, この独立集合は 2-MIS である.

今回, $N \times N$ ビットの交叉判定インスタンスをグラフに埋め込んでおり, カット辺のサイズ $|C| = 2N$ であることがわかる. CONGEST モデルにおいてグラフ上に与えられた独立集合が 2-MIS であるかどうかを r ラウンドで判定するアルゴリズム \mathcal{A} が存在したとすると, アリスとボブは $O(r \cdot |C| \cdot \log n)$ ビット通信したことになる. このグラフにおいてアルゴリズム \mathcal{A} を実行すると同時に 2 者間交叉判定問題も解けていることになるので, 交叉判定問題の通信複雑性よりアリスとボブは少なくとも $\Omega(N \times N)$ ビットは通信しているはずである. よって, $r = \Omega(N/2 \log n) = \tilde{\Omega}(N)$ ラウンドの下界を得ることができる. 図 4.2 からわかる通り, A^1, A^2, B^1, B^2 はそれぞれ N 頂点で構成されており, $K_{W(y)}$ の頂点数は $O(N^2)$ であるため, グラフ全体の頂点数 n は $n = O(N + N^2)$ である. したがって $N = \Omega(\sqrt{n})$ になるため, $\tilde{\Omega}(\sqrt{n})$ ラウンドの下界を得ることができる.

4.2 3-MIS 検証問題の下界

この節では 3-MIS 検証問題の下界についての議論を行う．具体的には，次の定理を証明する．

定理 4.2. CONGEST モデルにおいて，3-MIS 検証問題を解く全てのアルゴリズムは $\tilde{\Omega}(n)$ の通信ラウンド数を必要とする．

証明. まず初めにアリスとボブが構築するグラフ $G = (V, E)$ を図 4.3 に示す．

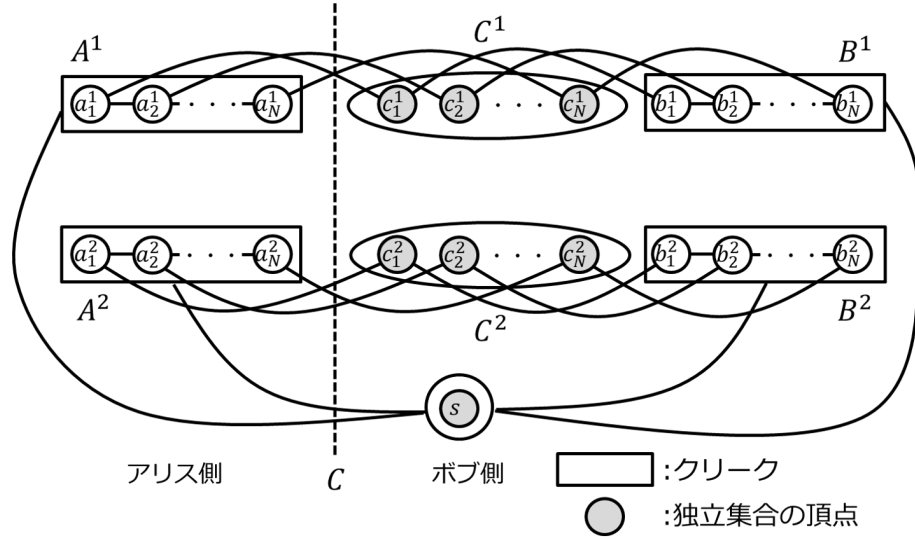


図 4.3: $G = (V, E)$

図中の頂点のうち灰色のものは独立集合に含まれる頂点とする．また，四角で囲まれている部分はクリークを表す．図中の辺を定式化すると以下ようになる．[\(こちらも記述の仕方は 2-MIS の時と同様に\)](#)

- A^1, A^2, B^1, B^2 は N 頂点のクリーク K_N
- $\forall i((a_i^1, c_i^1), (a_i^2, c_i^2), (b_i^1, c_i^1), (b_i^2, c_i^2)) \in E$
- $\forall i((a_i^1, s), (a_i^2, s), (b_i^1, s), (b_i^2, s)) \in E$

このグラフが「 G 中に与えられている独立集合が， $DISJ_{N \times N}(x, y) = 1$ のときのみ 3-MIS でない」という特性 P_3 を持つように， G_A に構造 H_A ， G_B に構造 H_B を追加する． H_A と H_B の中身は以下のとおりである．

- $H_A: (a_i^1, a_j^2) \in E_A \Leftrightarrow x_{i,j} = 0$
- $H_B: (b_i^1, b_j^2) \in E_B \Leftrightarrow y_{i,j} = 0$

$G = (V, E)$ に辺を追加したグラフ $G^{x,y} = (V, E')$ を図 4.4 に示す.

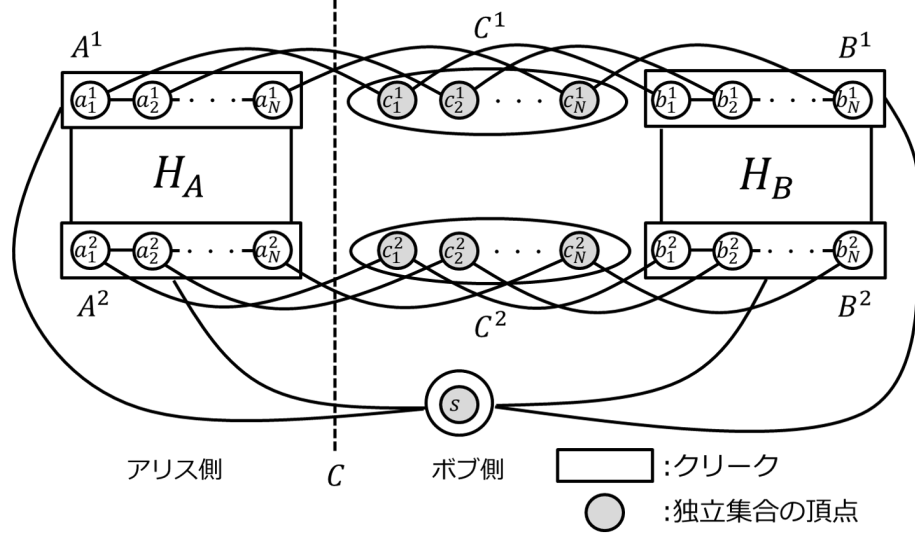


図 4.4: $G^{x,y} = (V, E')$

このグラフ $G^{x,y} = (V, E')$ が上記の特性 P_3 を満たしていることを示すために、次の2点を確認する.

(i) $DISJ_{N \times N}(x, y) = 1$ のとき、グラフに与えられている独立集合が 3-MIS でない:

$x_{i,j} = y_{i,j} = 1$ とすると、 s と c_i^1 と c_j^2 の3点を取り除いて $a_i^1, b_i^1, a_j^2, c_j^2$ の4点を追加できることから確認できる。

(ii) $DISJ_{N \times N}(x, y) = 0$ のとき、グラフに与えられている独立集合が 3-MIS である:

グラフに与えられている独立集合が 3-MIS でないと仮定する. このとき、ある3点を取り除くことで独立集合に追加できる4点が存在するが、 A^1, A^2, B^1, B^2 がそれぞれクリークであるため、4点を追加するためにはそれぞれから1点を選ぶ必要がある. c_i^1 を取り除いて a_i^1 と b_i^1 を追加し、 c_j^2 を取り除いて a_j^2 と b_j^2 を独立集合に追加したとする. a_i^1 と a_j^2 が両方とも追加できるのは $x_{i,j} = 1$ のときのみであり、 b_i^1 と b_j^2 が両方とも追加できるのは $y_{i,j} = 1$ のときのみであるが、これは $DISJ_{N \times N}(x, y) = 0$ に矛盾する. したがってグラフに与えられている独立集合から3点取り除いて4点追加することはできないため、この独立集合は 3-MIS である.

今回, $N \times N$ ビットの交叉判定インスタンスをグラフに埋め込んでおり, カット辺のサイズ $|C| = 4N$ であることがわかる. CONGEST モデルにおいてグラフ上に与えられた独立集合が 3-MIS であるかどうかを r ラウンドで判定するアルゴリズム \mathcal{A} が存在したとすると, アリスとボブは $O(r \cdot |C| \cdot \log n)$ ビット通信したことになる. このグラフにおいてアルゴリズム \mathcal{A} を実行すると同時に 2 者間交叉判定問題も解けていることになるので, 交叉判定問題の通信複雑性よりアリスとボブは少なくとも $\Omega(N \times N)$ ビットは通信しているはずである, よって, $r = \Omega(N/4 \log n) = \tilde{\Omega}(N)$ ラウンドの下界を得ることができる. 図 4.4 からわかる通り, $A^1, A^2, B^1, B^2, C^1, C^2$ はそれぞれ N 頂点で構成されているため, グラフ全体の頂点数 n は $n = O(N)$ である. したがって $N = \Omega(n)$ になるため, $\tilde{\Omega}(n)$ ラウンドの下界を得ることができる..

4.3 k -MIS 検証問題の下界

このセクションでは k -MIS 検証問題の下界についての議論を行う．具体的には、次の定理を証明する．

定理 4.3. CONGEST モデルにおいて、任意の $l \geq 1$ に対して $k = 4l + 5$ としたとき k -MIS 検証問題を解く全てのアルゴリズムは $\Omega\left(n^{2-\frac{1}{l+1}}/l\right)$ の通信ラウンド数を必要とする．

証明. 以下をを定義する．

定義 4.1. 証明の簡略化のために N の $l+1$ 乗根は整数であると仮定する．このとき $M = \sqrt[l+1]{N}$ とする．また、自然数 i, j, h が与えられたとき、 $\alpha_{i,h}(j)$ を j を i 進数で表したときの h 桁目の値と定義する．

まず初めにアリスとボブが構築するグラフ $G = (V, E)$ を図 4.5 に示す．

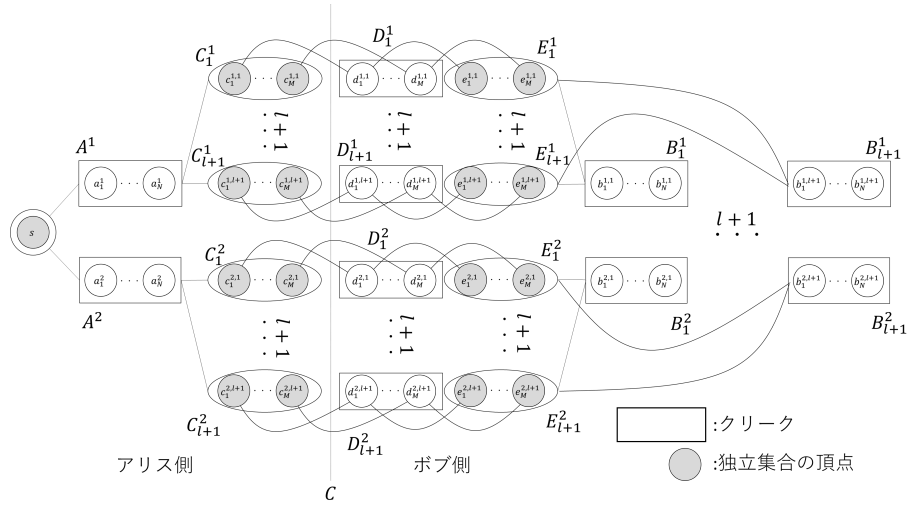


図 4.5: $G = (V, E)$

図中の頂点のうち灰色のものは独立集合に含まれる頂点とする．また、四角で囲まれている部分はクリークを表す．図中の辺を定式化すると以下ようになる．

- $A^1 = \{a_1^1, \dots, a_N^1\}$ と $A^2 = \{a_1^2, \dots, a_N^2\}$ は N 頂点のクリーク
- 任意の $1 \leq i \leq l+1$ に対して $B_i^1 = \{b_1^{1,i}, \dots, b_N^{1,i}\}$ と $B_i^2 = \{b_1^{2,i}, \dots, b_N^{2,i}\}$ は N 頂点のクリーク

- 任意の $1 \leq i \leq l+1$ に対して $D_i^1 = \{d_1^{1,i}, \dots, d_M^{1,i}\}$ と $D_i^2 = \{d_1^{2,i}, \dots, d_M^{2,i}\}$ は M 頂点のクリーク
- $\forall i((a_i^1, s), (a_i^2, s)) \in E$
- 任意の $1 \leq i \leq N$ と $1 \leq j \leq l+1$ に対して $(a_i^1, c_{\alpha_{M,j}(i-1)+1}^{1,j})$ と $(a_i^2, c_{\alpha_{M,j}(i-1)+1}^{2,j})$ が E に含まれる
- 任意の $1 \leq i \leq N$, $1 \leq j \leq l+1$ と $1 \leq h \leq l+1$ に対して $(b_i^{1,h}, e_{\alpha_{M,j}(i-1)+1}^{1,j})$ と $(b_i^{2,h}, e_{\alpha_{M,j}(i-1)+1}^{2,j})$ が E に含まれる
- 任意の $1 \leq i \leq M$ と $1 \leq j \leq l+1$ に対して $(c_i^{1,j}, d_i^{1,j})$ と $(e_i^{1,j}, d_i^{1,j})$ が E に含まれる
- 任意の $1 \leq i \leq M$ と $1 \leq j \leq l+1$ に対して $(c_i^{2,j}, d_i^{2,j})$ と $(e_i^{2,j}, d_i^{2,j})$ が E に含まれる

このグラフが「 G 中に与えられている独立集合が, $DISJ_{N \times N}(x, y) = 1$ のときのみ k -MIS でない」という特性 (P_k) を持つように, G_A に構造 H_A , G_B に構造 H_B を追加する. H_A と H_B の中身は以下のとおりである.

- $H_A : E_A = \{(a_i^1, a_j^2) \mid x_{i,j} = 0, 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N\}$
- $H_B : E_B = \{(a_i^{1,h}, a_j^{2,h}) \mid x_{i,j} = 0, 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N, 1 \leq h \leq l+1\}$

$G = (V, E)$ に辺を追加したグラフ $G^{x,y} = (V, E')$ を図 4.6 に示す.

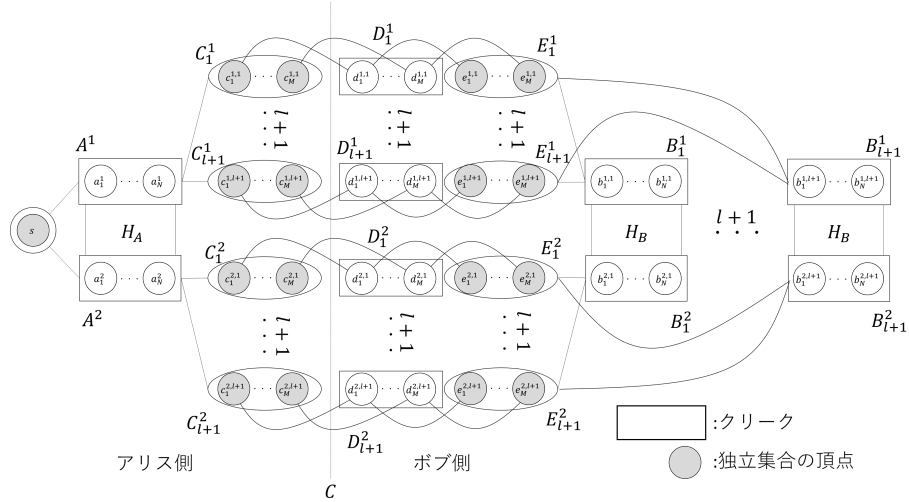


図 4.6: $G^{x,y} = (V, E')$

このグラフ $G^{x,y} = (V, E')$ が上記の特性 (P_k) を満たしていることを示すために、次の2点を確認する.

(i) $DISJ_{N \times N}(x, y) = 1$ のとき、グラフに与えられている独立集合が k -MIS でない:

$x_{i,j} = y_{i,j} = 1$ であると仮定する. このとき,

$$I' = \{s\} \cup \bigcup_{1 \leq h \leq l+1} c_{\alpha_{M,h}(i-1)+1}^{1,h} \cup \bigcup_{1 \leq h \leq l+1} c_{\alpha_{M,h}(j-1)+1}^{2,h} \cup \bigcup_{1 \leq h \leq l+1} e_{\alpha_{M,h}(i-1)+1}^{1,h} \cup \bigcup_{1 \leq h \leq l+1} e_{\alpha_{M,h}(j-1)+1}^{2,h}$$

$$S = \{a_i^1 \cup a_j^2\} \cup \bigcup_{1 \leq h \leq l+1} b_j^{1,h} \cup \bigcup_{1 \leq h \leq l+1} b_j^{2,h} \cup \bigcup_{1 \leq h \leq l+1} d_{\alpha_{M,h}(i-1)+1}^{1,h} \cup \bigcup_{1 \leq h \leq l+1} d_{\alpha_{M,h}(j-1)+1}^{2,h}$$

とすると $I \setminus I' \cup S$ は独立集合になる. ここで $|I'| = 4l + 5$ で $|S| = 4l + 6$ であることから, $k = 4l + 5$ に対して I は k -MIS でないことが確認できる.

(ii) $DISJ_{N \times N}(x, y) = 0$ のとき、グラフに与えられている独立集合が k -MIS である:

グラフに与えられている独立集合が k -MIS でないと仮定する. このとき, $I' \subseteq I$ をサイズ k 以下の独立集合, $S \subseteq V \setminus I$ を $(I \setminus I') \cup S$ が独立集合になるサイズ $|I'| + 1$ 以上の頂点集合とする. また, $(A^1 \cup A^2) \cap S$ を満たすノードの数を $num(A)$, $\bigcup_{1 \leq i \leq l+1} (B_i^1 \cup B_i^2) \cap S$ を満たすノードの数を $num(B)$, $(\bigcup_{1 \leq i \leq l+1} C_i^1 \cup \bigcup_{1 \leq i \leq l+1} C_i^2) \cap S$ を満たすノードの数を $num(C)$, $(\bigcup_{1 \leq i \leq l+1} D_i^1 \cup \bigcup_{1 \leq i \leq l+1} D_i^2) \cap S$ を満たすノードの数を $num(D)$, $(\bigcup_{1 \leq i \leq l+1} E_i^1 \cup \bigcup_{1 \leq i \leq l+1} E_i^2) \cap S$ を満たすノードの数を $num(E)$ とする. 任意の $1 \leq i \leq M$ と $1 \leq j \leq l + 1$ に対して $d_i^{1,j}$ を独立集合に追加するには $c_i^{1,j}$ と $e_i^{1,j}$ を独立集合から取り除く必要がある. また, 任意の $1 \leq i \leq M$ と $1 \leq j \leq l + 1$ に対して $d_i^{2,j}$ を独立集合に追加するには $c_i^{2,j}$ と $e_i^{2,j}$ を独立集合から取り除く必要がある. 従って, $num(D)$ の値は $num(C)$ によって上から抑えられる. また, $num(D)$ の値は $num(E)$ によっても上から抑えられる. 任意の $1 \leq i \leq N$ と $1 \leq j \leq l + 1$ に対して, $b_i^{1,j}$ を独立集合に追加するには, $\bigcup_{1 \leq h \leq l+1} e_{\alpha_{M,h}(i-1)+1}^{1,h}$ を独立集合から取り除く必要がある. 従って, 任意の $1 \leq i \leq l + 1$ に対して B_i^1 に含まれる頂点を独立集合に追加するには $\bigcup_{1 \leq j \leq l+1} E_j^1$ に含まれる頂点を少なくとも $l + 1$ 個独立集合から取り除く必要がある. 同様に任意の $1 \leq i \leq N$ と $1 \leq j \leq l + 1$ に対して, $b_i^{2,j}$ を独立集合に追加するには, $\bigcup_{1 \leq h \leq l+1} e_{\alpha_{M,h}(i-1)+1}^{2,h}$ を独立集合から取り除く必要がある. 従って, 任意の $1 \leq i \leq l + 1$ に対して B_i^2 に含まれる頂点を独立集合に追加するには $\bigcup_{1 \leq j \leq l+1} E_j^2$ に含まれる頂点を少なくとも $l + 1$ 個独立集合から取り除く必要がある. 任意の $1 \leq i \leq 2$ と $1 \leq j \leq l + 1$ に対して, B_j^i はクリークであるので, B_j^i に含まれる頂点は高々1つしか独立集合に加えることができない. 従って $\bigcup_{1 \leq i \leq l+1} B_i^1$ から独立

集合に加えられる頂点の数は高々 $l+1$ 個であり, $\bigcup_{1 \leq i \leq l+1} B_i^2$ から独立集合に加えられる頂点の数は高々 $l+1$ 個であるので, $\text{num}(B)$ の値は $\text{num}(E)$ の値によって上から抑えられる. 従って $|S| \geq |I|+1$ を満たすには $(\text{num}(A) \geq 1)$ である必要があるが, A^1 と A^2 はそれぞれクリークあるため $\text{num}(A) = 1$ もしくは $\text{num}(A) = 2$ である.

はじめに $\text{num}(A) = 1$ の場合を考える. このとき, $A^1 \cup A^2$ に含まれる頂点を独立集合に追加するには頂点 s を独立集合から取り除かなければならない. 従って $|I'| = 1 + \text{num}(C) + \text{num}(E)$ と $|S| = 1 + \text{num}(D) + \text{num}(B)$ が成り立ち, $\text{num}(C) \geq \text{num}(B), \text{num}(D) \geq \text{num}(E)$ より $|I'| \geq |S|$ が成り立つがこれは I' と S の選択に矛盾する.

次に $\text{num}(A) = 2$ の場合について考える. $\text{num}(A) = 1$ の場合と同様に $A^1 \cup A^2$ に含まれる頂点を独立集合に追加するには頂点 s を独立集合から取り除かなければならない. 従って, $|I'| = 1 + \text{num}(C) + \text{num}(E)$ と $|S| = 2 + \text{num}(D) + \text{num}(B)$ が成り立つ. ここで $|S| \geq |I'|+1$ を満たすのは $\text{num}(C) = \text{num}(D)$ かつ $\text{num}(B) = \text{num}(E)$ のときのみである. また, 任意の $1 \leq i \leq N$ に対して a_i^1 を独立集合に追加するには頂点集合 $\bigcup_{1 \leq j \leq l+1} c_{\alpha_{M,j}(i-1)+1}^{1,j}$ を独立集合から取り除く必要がある. 同様に任意の $1 \leq i \leq N$ に対して a_i^2 を独立集合に追加するには頂点集合 $\bigcup_{1 \leq j \leq l+1} c_{\alpha_{M,j}(i-1)+1}^{2,j}$ を独立集合から取り除く必要がある. 従って, $\text{num}(C) \geq 2(l+1)$ が成り立つ. また, $\text{num}(E) \geq \text{num}(D) = \text{num}(C) \geq 2(l+1)$ が成り立つ. ここで, $|I'| \leq k = 4l+5$ であることから, $\text{num}(C) = \text{num}(E) = 2(l+1)$ となる. $S \cap (A^1 \cup A^2)$ に含まれるノードを a_i^1 と a_j^2 とする. a_i^1 と a_j^2 を独立集合に加えるために取り除かれる頂点は $\{s\} \cup \bigcup_{1 \leq h \leq l+1} c_{\alpha_{M,h}(i-1)+1}^{1,h} \cup \bigcup_{1 \leq h \leq l+1} c_{\alpha_{M,h}(j-1)+1}^{2,h}$ である. このとき, 任意の $\bigcup_{1 \leq i \leq l+1} (D_i^1 \cup D_i^2)$ に含まれる頂点で独立集合に含まれる可能性があるのは, $\bigcup_{1 \leq h \leq l+1} d_{\alpha_{M,h}(i-1)+1}^{1,h} \cup \bigcup_{1 \leq h \leq l+1} d_{\alpha_{M,h}(i-1)+1}^{2,h}$ のみである. これらの頂点を独立集合に追加するには $\bigcup_{1 \leq h \leq l+1} e_{\alpha_{M,h}(i-1)+1}^{1,h} \cup \bigcup_{1 \leq h \leq l+1} e_{\alpha_{M,h}(i-1)+1}^{2,h}$ を独立集合から取り除かなければならない. このとき, B_1^1 と B_1^2 で新しく独立集合に加えられる可能性があるのは $b_i^{1,1}$ と $b_j^{2,1}$ だけである. $b_i^{1,1}$ と $b_j^{2,1}$ の両方を独立集合に加えられるのは $b_i^{1,1}$ と $b_j^{2,1}$ の間に辺が存在しないときでありこれは $y_{i,j} = 1$ を意味する. また, a_i^1 と a_j^2 が独立集合に含まれることから, a_i^1 と a_j^2 の間に辺が存在しない. これは $x_{i,j} = 1$ を意味するが $\text{DISJ}_{N \times N}(x, y) = 0$ に矛盾する.

今回, $N \times N$ ビットの交叉判定インスタンスをグラフに埋め込んでおり, カット辺のサイズ $|C| = 2(l+1) \cdot M = 2(l+1) \cdot N^{1/(l+1)}$ であることがわかる. CONGEST モデルにおいてグラフ上に与えられた独立集合が k -MIS であるかどうかを r ラウンドで判定するアルゴリズム \mathcal{A} が存在したとすると, アリスとボブは $O(r \cdot |C| \cdot \log n)$ ビット通信したことになる.

このグラフにおいてアルゴリズム \mathcal{A} を実行すると同時に 2 者間交叉判定問題も解けていることになるので、交叉判定問題の通信複雑性よりアリスとボブは少なくとも $\Omega(N \times N)$ ビットは通信しているはずである。よって、 $r = \Omega\left(N^{2-\frac{1}{l+1}}/2(l+1)\log n\right) = \tilde{\Omega}\left(N^{2-\frac{1}{l+1}}/l\right)$ ラウンドの下界を得ることができる。任意の $1 \leq i \leq 2$ と $1 \leq j \leq l+1$ に対して頂点集合 A^i, B_j^i はそれぞれ N 頂点で、 C_j^i, D_j^i, E_j^i の頂点集合はそれぞれ $M = N^{1/(l+1)}$ 頂点で構成されているため、グラフ全体の頂点数 n は $n = O(N)$ である。したがって $N = \Omega(n)$ になるため、 $\tilde{\Omega}\left(n^{2-\frac{1}{l+1}}/l\right)$ ラウンドの下界を得ることができる。

第5章

まとめと今後の課題

5.1 まとめ

本研究では極大独立集合検証問題に対するいくつかの複雑性を示した．具体的には，1-MIS 検証問題に対する $O(1)$ ラウンドの上界，2-MIS 検証問題に対する $\tilde{\Omega}(\sqrt{n})$ ラウンドの下界，3-MIS 検証問題に対する $\tilde{\Omega}(n)$ ラウンドの下界， k -MIS 検証問題 ($k = 4l + 5, l \geq 1$) に対する $\tilde{\Omega}\left(n^{2-\frac{1}{l+1}}/l\right)$ ラウンドの下界を証明した．

5.2 今後の課題

4.3 節で一般の k に対する k -MIS 検証問題の下界を証明したが， $k = 4, \dots, 8$ については現在 3-MIS 検証問題と同じ下界しか得られていない．この下界をよりタイトにできるかが今後の課題である．

謝辞

本研究の機会を与え、数々の御指導を賜りました泉泰介准教授に深く感謝致します。また、本研究を進めるにあたり多くの助言を頂き、様々な御協力を頂きました泉研究室の学生みなさんに深く感謝致します。

参考文献

- [1] Johan Håstad. Clique is hard to approximate within $1 - \varepsilon$. *Acta Mathematica*, 182(1):105–142, 1999.
- [2] Ken-ichi Kawarabayashi, Seri Khoury, Aaron Schild, and Gregory Schwartzman. Improved distributed approximation to maximum independent set. *arXiv preprint arXiv:1906.11524*, 2019.
- [3] Keren Censor-Hillel, Seri Khoury, and Ami Paz. Quadratic and near-quadratic lower bounds for the congest model. *arXiv preprint arXiv:1705.05646*, 2017.
- [4] Yuval Efron, Ofer Grossman, and Seri Khoury. Beyond alice and bob: Improved inapproximability for maximum independent set in congest. *arXiv preprint arXiv:2003.07427*, 2020.
- [5] Michael Luby. A simple parallel algorithm for the maximal independent set problem. *SIAM journal on computing*, 15(4):1036–1053, 1986.
- [6] Václav Rozhoň and Mohsen Ghaffari. Polylogarithmic-time deterministic network decomposition and distributed derandomization. In *Proceedings of the 52nd Annual ACM SIGACT Symposium on Theory of Computing*, pages 350–363, 2020.
- [7] Alkida Balliu, Sebastian Brandt, Juho Hirvonen, Dennis Olivetti, Mikaël Rabie, and Jukka Suomela. Lower bounds for maximal matchings and maximal independent sets. In *2019 IEEE 60th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS)*, pages 481–497. IEEE, 2019.
- [8] Atish Das Sarma, Stephan Holzer, Liah Kor, Amos Korman, Danupon Nanongkai, Gopal Pandurangan, David Peleg, and Roger Wattenhofer. Distributed verifica-

- tion and hardness of distributed approximation. *SIAM Journal on Computing*, 41(5):1235–1265, 2012.
- [9] Orr Fischer, Tzlil Gonen, Fabian Kuhn, and Rotem Oshman. Possibilities and impossibilities for distributed subgraph detection. In *Proceedings of the 30th on Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures*, pages 153–162, 2018.
- [10] Artur Czumaj and Christian Konrad. Detecting cliques in congest networks. *Distributed Computing*, 33(6):533–543, 2020.
- [11] Bala Kalyanasundaram and Georg Schintger. The probabilistic communication complexity of set intersection. *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, 5(4):545–557, 1992.