

Uniwersytet Warszawski
Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki

Wiktor Zuba

Nr albumu: 320501

Efektywne algorytmy generacji obiektów kombinatorycznych???

Praca magisterska
na kierunku INFORMATYKA

Praca wykonana pod kierunkiem
prof. Wojciech Rytter
Instytut Informatyki

??? 2017

Oświadczenie kierującego pracą

Potwierdzam, że niniejsza praca została przygotowana pod moim kierunkiem i kwalifikuje się do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie tytułu zawodowego.

Data

Podpis kierującego pracą

Oświadczenie autora (autorów) pracy

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem tytułu zawodowego w wyższej uczelni.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja pracy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Data

Podpis autora (autorów) pracy

Streszczenie

???

Słowa kluczowe

???

Dziedzina pracy (kody wg programu Socrates-Erasmus)

???

Klasyfikacja tematyczna

???

Tytuł pracy w języku angielskim

Effective algorithms of combinatorial objects generation???

Spis treści

Wprowadzenie	5
1. Własności hiperkostki	7
1.1. Podstawy kombinatoryczne	8
1.2. Własność ekspansji	9
2. Problemy na wadliwej hiperkostce	11
2.1. Graf z wadami	11
2.2. Spójność wadliwej hiperkostki	11
2.2.1. Podejście ekspansywne	11
Bibliografia	13

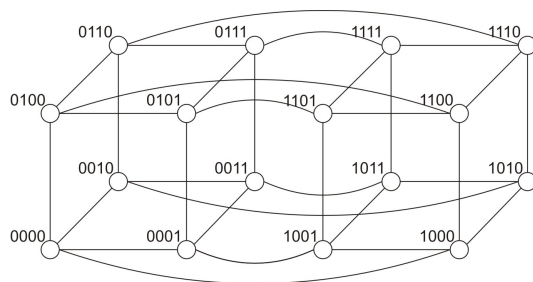
Wprowadzenie

Rozdział 1

Własności hiperkostki

Definicja 1.0.1. Hiperkostką wymiaru n (Q_n) nazwiemy graf, w którym każdy wierzchołek odpowiada ciągowi binarnemu długości n , zaś krawędzią połączone są te wierzchołki, których ciągi binarne różnią się na dokładnie jednej pozycji.

$$V(Q_n) = \{(v_0, \dots, v_{n-1}) : v_i \in \{0, 1\}\}, E(Q_n) = \{(u, v) : \sum_i |u_i - v_i| = 1\}$$

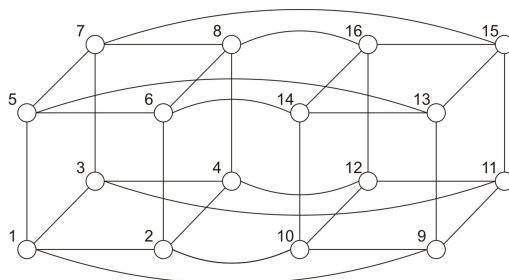


W przypadku pełnej hiperkostki bardzo łatwo jest określić długość najkrótszej ścieżki pomiędzy wierzchołkami – jest ona równa ilości pozycji na których różnią się ciągi tych wierzchołków.

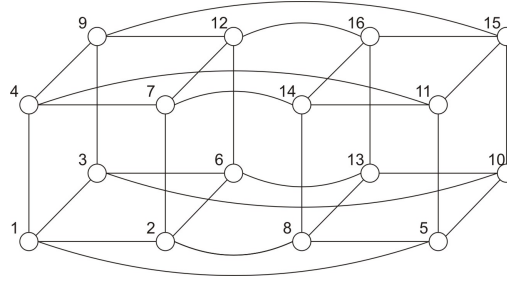
Hiperkostka jest grafem dwudzielnym, w którym jedną składową jest zbiór wierzchołków o ciągach z parzystą liczbą jedynek, zaś drugą tych o ich nieparzystej liczbie.

Cowięcej przy badaniu hiperkostek często dzieli się je na $n+1$ warstw, gdzie dla $i \in \{0, 1, \dots, n\}$ i -tą warstwę stanowią te wierzchołki, których ciągi binarne mają dokładnie i jedynek (warstwa zawiera zatem wierzchołki oddalone o i od wierzchołka zerowego ($\bar{0}$)).

Definicja 1.0.2. Numerowaniem klasycznym (naturalnym) hiperkostki nazwiemy takie numerowanie $\varphi : V(Q_n) \rightarrow \{1, \dots, |V(Q_n)|\}$ jej wierzchołków, że $\varphi(v) = 1 + \sum_i v_i \cdot 2^i$



Definicja 1.0.3. Numerowaniem warstwowym hiperkostki nazwiemy jej numerowanie w kolejności przeszukiwania grafu wszerz zaczynając od wierzchołka $\bar{0}$ z wybieraniem sąsiadów w kolejności leksykograficznej.



Uwaga 1. Jest to takie numerowanie $\varphi : V(Q_n) \rightarrow \{1, \dots, |V(Q_n)|\}$ jej wierzchołków, że wierzchołki z i -tej warstwy otrzymują numery od $\sum_{j=0}^{i-1} \binom{n}{j} + 1$ do $\sum_{j=0}^i \binom{n}{j}$. W obrębie jednej warstwy numery przyznawane są przeciwnie do kolejności leksykograficznej na odwróconych słowach. $\varphi(v) > \varphi(u) \Leftrightarrow (\sum_{i=0}^n v_i > \sum_{i=0}^n u_i) \vee ((\sum_{i=0}^n v_i = \sum_{i=0}^n u_i) \wedge (\sum_{i=0}^n 2^{n-i} v_i < \sum_{i=0}^n 2^{n-i} u_i))$

Dowód. Indukcyjnie po warstwach.

Dla warstwy 0 oczywiste.

Zakładając, że i -ta warstwa jest ponumerowana w tym porządku weźmy dwa wierzchołki u, v z warstwy $i+1$: $u = (\bar{y}_1, 1, \bar{x}), v = (\bar{y}_2, 0, \bar{x})$.

Jeśli \bar{y}_1 zawiera same 0, to \bar{y}_2 zawiera dokładnie jedną 1, sąsiedzi tych wierzchołków z poprzedniej warstwy o najmniejszych numerach to odpowiednio $(\bar{0}, 0, \bar{x}), (\bar{0}, 0, \bar{x})$, tak więc zostaną ponumerowane jako sąsiedzi tego samego wierzchołka, jednak u otrzyma mniejszy numer jako sąsiad mniejszy leksykograficznie.

Jeśli \bar{y}_1 zawiera 1, to \bar{y}_2 też, więc sąsiedzi tych wierzchołków z poprzedniej warstwy o najmniejszych numerach to odpowiednio $(\bar{y}'_1, 1, \bar{x}), (\bar{y}'_2, 0, \bar{x})$, gdzie \bar{y}'_1 i \bar{y}'_2 , to odpowiednio \bar{y}_1 i \bar{y}_2 z pierwszymi 1 zamienionymi na 0. Z założenia indukcyjnego sąsiad u ma mniejszy numer niż sąsiad v , więc u ma mniejszy numer niż v . \square

1.1. Podstawy kombinatoryczne

$$\binom{2n}{n} = \frac{2^{2n} \Gamma(n + \frac{1}{2})}{\sqrt{\pi} \Gamma(n+1)}, \quad \binom{2n+1}{n} = \binom{2n+1}{n+1} = \frac{2^{2n+1} \Gamma(n + \frac{3}{2})}{\sqrt{\pi} \Gamma(n+2)}$$

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty x^{z-1} e^{-x} dx \quad \text{dla } n \in \mathbb{N} \quad \Gamma(n) = (n-1)!,$$

$$\text{ogólniej dla } x \in \mathbb{R}, x > 1 \quad \frac{\Gamma(x+1)}{\Gamma(x)} = x, \quad \frac{\Gamma(x+\frac{1}{2})}{\Gamma(x)} < \frac{\Gamma(x+1)}{\Gamma(x+\frac{1}{2})} \Rightarrow \sqrt{x - \frac{1}{2}} < \frac{\Gamma(x+\frac{1}{2})}{\Gamma(x)} < \sqrt{x}$$

$$\text{Daje to ograniczenia: } \frac{2^{2n}}{\sqrt{\pi(n+\frac{1}{2})}} < \binom{2n}{n} < \frac{2^{2n}}{\sqrt{\pi n}}, \quad \frac{2^{2n+1}}{\sqrt{\pi(n+\frac{3}{2})}} < \binom{2n+1}{n} = \binom{2n+1}{n+1} < \frac{2^{2n+1}}{\sqrt{\pi(n+1)}}$$

$$\text{Lub równoważnie: } \frac{2^n}{\sqrt{\pi(\lceil \frac{n}{2} \rceil + \frac{1}{2})}} < \binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} = \binom{n}{\lceil \frac{n}{2} \rceil} < \frac{2^n}{\sqrt{\pi \lceil \frac{n}{2} \rceil}}$$

Lemat 2. Dla $k \leq \lfloor \frac{n+1}{2} \rfloor$ zachodzi ograniczenie $\sum_{i=0}^{k-1} \binom{n}{i} \leq 2^{n-1} \frac{\binom{n}{k}}{\binom{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}} \frac{1}{2}$

Dowód. (Uogólnienie dowodu z podobnego lematu dla $n = 2m, k < m$ z [1])

Założmy najpierw, że $k < \lfloor \frac{n}{2} \rfloor$

$$\text{Zdefiniujmy } c = \frac{\binom{n}{k}}{\binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}} < 1, t = \lfloor \frac{n}{2} \rfloor - k, A = \sum_{i=0}^{k-1} \binom{n}{i}, B = \sum_{i=k}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor - 1} \binom{n}{i}$$

$$\forall 1 \leq i \leq k \quad \frac{\binom{n}{k-i}}{\binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor - i}} < \frac{\binom{n}{k-i+1}}{\binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor - i+1}} \Leftrightarrow \frac{k-c+1}{n-k+c} < \frac{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor - c+1}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor + c},$$

$$\text{co wynika z szeregu prostych nierówności } \frac{k-c+1}{n-k+c} \leq \frac{k-c+1}{k+c+1} < \frac{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor - c+1}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor + c+1} \leq \frac{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor - c+1}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor + c}$$

Daje nam to ograniczenia $\forall_{1 \leq i \leq k} \frac{\binom{n}{k-i}}{\binom{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor - i}} < c$.

Suma ostatnich t wyrazów szeregu A jest majoryzowana przez $c \cdot B$, wcześniejszych t przez c razy suma ostatnich t (a więc przez $c^2 \cdot B$). Daje nam to oszacowanie $A < (c + c^2 + c^3 + \dots + c^{\lfloor \frac{k}{t} \rfloor}) \cdot B < (c + c^2 + c^3 + \dots) \cdot B = \frac{c}{1-c} \cdot B$. Jednocześnie $A + B = \sum_{i=0}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor - 1} \binom{n}{i} < 2^{n-1}$.
 $A = c \cdot A + (1-c) \cdot A = c(A + \frac{1-c}{c}A) < c \cdot (A + B) < c \cdot 2^{n-1}$.

Pozostaje udowodnić przypadki większych k :

Dla $n = 2m, k = m$ $\sum_{i=0}^{m-1} \binom{2m}{i} = 2^{2m-1} - \frac{1}{2} \binom{2m}{m} < 2^{2m-1} = 2^{n-1} \cdot \frac{\binom{n}{k}}{\binom{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}}$

Dla $n = 2m + 1, k = m$ $\sum_{i=0}^{m-1} \binom{2m+1}{i} = 2^{2m} - \binom{2m+1}{m} < 2^{2m} = 2^{n-1} \cdot \frac{\binom{n}{k}}{\binom{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}}$

Dla $n = 2m + 1, k = m + 1$ $\sum_{i=0}^m \binom{2m+1}{i} = 2^{2m} = 2^{n-1} \cdot \frac{\binom{n}{k}}{\binom{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}}$ (jedyna nieostra nierówność)

□

1.2. Własność ekspansji

Definicja 1.2.1. Dla grafu G oraz wierzchołka $v \in V(G)$ definiujemy sąsiedztwo wierzchołka jako zbiór wierzchołków połączonych z nim krawędzią: $N(v) = \{u \in V(G) : (u, v) \in E(G)\}$.

Definicja 1.2.2. Dla grafu G oraz zbioru wierzchołków $S \subseteq V(G)$ definiujemy sąsiedztwo zbioru wierzchołków jako zbiór tych sąsiadów wierzchołków ze zbioru, które same do tego zbioru nie należą: $N(S) = (\bigcup_{v \in S} N(v)) \setminus S$

Definicja 1.2.3. Dla grafu G oraz zbioru wierzchołków $S \subseteq V(G)$ definiujemy wnętrze zbioru wierzchołków jako zbiór tych wierzchołków z S , których wszyscy sąsiedzi również należą do tego zbioru: $In(S) = \{v \in S : N(v) \subseteq S\}$

Definicja 1.2.4. Graf G posiada własność ε -ekspansji wierzchołkowej, jeżeli dla każdego zbioru wierzchołków $S \subseteq V(G)$ takiego, że $|S| \leq \frac{|V(G)|}{2}$ zachodzi $|N(S)| \geq \varepsilon \cdot |S|$

Lemat 3. Zbiór pierwszych l wierzchołków hiperkostki według numerowania warstwowego posiada maksymalne wnętrze wśród zbiorów wielkości l .

Jest to jeden z lematów dowodzonych w pracy [2].

Lemat 4. Dla hiperkostki do udowodnienia własności ε_n -ekspansji wierzchołkowej wystarczy rozważyć zbiory S postaci $S_k, k \leq 2^{n-1}$.

Dowód. Weźmy dowolne $S \subseteq V(G), l = |S| + |N(S)|$ z Lematu 1.2 wynika, że $\frac{|N(S)|}{|S|} = \frac{|N(S)| + |S|}{|S|} - 1 \geq \frac{|S_l|}{|In(S_l)|} - 1 = \frac{|S_l \setminus In(S_l)|}{|In(S_l)|} \geq \frac{|N(In(S_l))|}{|In(S_l)|}$. Z definicji S_l wynika, że $In(S_l) = S_k$ dla $k = In(S_l)$.

Pozostaje udowodnić, że wystarczy rozważyć te S_k , że $k \leq 2^{n-1}$

Dla $l = |N(S)| + |S| \geq (\varepsilon_n + 1) \cdot 2^{n-1}$ mamy $|S| > 2^{n-1}$ lub $|N(S)| \geq \varepsilon_n |S|$, wystarczy więc rozważyć przypadek $l < (\varepsilon_n + 1) \cdot 2^{n-1}$.

Dla $n = 2m + 1$ weźmy $k = 2^{n-1} = \sum_{i=0}^m \binom{2m+1}{i}$, wtedy S_k = pełne $m + 1$ pierwszych warstw i $N(S_k)$ = warstwa $m + 1$. Przykład ten pokazuje, że $\varepsilon_n \leq \frac{\binom{2m+1}{m+1}}{2^{2m}}$, więc $l < 2^{2m} + \binom{2m+1}{m+1} \Rightarrow S_l$ mieści się w pierwszych $m + 2$ warstwach $\Rightarrow S_k = In(S_l)$ mieści się w pierwszych $m + 1$ warstwach $\Rightarrow k \leq 2^{2m} = 2^{n-1}$.

Dla $n = 2m$ weźmy $k = 2^{n-1} = \sum_{i=0}^{m-1} \binom{2m}{i} + \frac{1}{2} \binom{2m}{m}$, wtedy S_k = pełne m pierwszych

warstw + połowa środkowej. W środkowej warstwie pierwsze $\binom{2m-1}{m-1} = \frac{1}{2}\binom{2m}{m}$ wierzchołków to dokładnie te, których ciągi binarne kończą się na 1. Wtedy też $S_k \cup N(S_k)$ to dokładnie pełne $m+1$ pierwszych warstw plus te wierzchołki z warstwy $m+2$, które kończą się na 1 $\Rightarrow |N(S_k)| = \binom{2m-1}{m} + \binom{2m-1}{m} = \binom{2m-1}{m-1} + \binom{2m-1}{m} = \binom{2m}{m}$. Przykład ten pokazuje, że $\varepsilon_n \leq \frac{\binom{2m}{m}}{2^{2m-1}}$, więc $l < 2^{2m-1} + \binom{2m}{m} \Rightarrow S_l$ mieści się w pierwszych $m+1$ warstwach plus tych wierzchołkach z warstwy $m+2$, które kończą się na 1 $\Rightarrow k \leq 2^{n-1}$. \square

Wniosek 5. *Hiperkostka wymiaru n nie posiada własności $\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi n}}$ -ekspansji wierzchołkowej.*

Dowód. Dla $n = 2m + 1$

$$\frac{|N(S_{2^m})|}{|S_{2^m}|} = \frac{\binom{2m+1}{m+1}}{2^{2m}} = \frac{2^{2m+1}}{2^{2m}\sqrt{\pi(m+1)}} = \frac{2}{\sqrt{\pi(m+1)}} = \frac{2}{\sqrt{\pi(\frac{n}{2} + \frac{1}{2})}} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi(n+1)}} < \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi n}}.$$

$$\text{Dla } n = 2m \quad \frac{|N(S_{2^{2m-1}})|}{|S_{2^{2m-1}}|} = \frac{\binom{2m}{m}}{2^{2m-1}} < \frac{2^{2m}}{2^{2m-1}\sqrt{\pi(m+1)}} = \frac{2}{\sqrt{\pi m}} = \frac{2}{\sqrt{\pi \cdot \frac{n}{2}}} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi n}}. \quad \square$$

Twierdzenie 6. *Hiperkostka Q_n posiada własność $\frac{1}{\sqrt{\pi n}}$ -ekspansji wierzchołkowej.*

Dowód. Jeśli $k = \sum_{i=0}^r \binom{n}{i}$ (pełne $r+1 \leq \lfloor \frac{n}{2} \rfloor + 1$ warstw), to $\frac{|N(S_k)|}{|S_k|} = \frac{\binom{n}{r+1}}{\sum_{i=0}^r \binom{n}{i}} > \frac{\binom{n}{r+1}\binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}}{2^{n-1}\binom{n}{r+1}} = \frac{\binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}}{2^{n-1}} > \frac{2^n}{2^{n-1}\sqrt{\pi(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor + \frac{1}{2})}} = \frac{2}{\sqrt{\pi(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor + \frac{1}{2})}} \geq \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi(n+\frac{3}{2})}} \geq \frac{2}{\sqrt{\pi n}}$ (dla $n \geq 2$).

($n = 2m + 1, r = m$ rozważone w 4)

Jeśli $k = \sum_{i=0}^r \binom{n}{i} + \binom{n-1}{r}$ (pełne $r+1 \leq \lfloor \frac{n}{2} \rfloor + 1$ warstw ? TODO + te wierzchołki z warstwy $r+2$, których ciągi binarne kończą się na 1).

$$|N(S_k) \cup S_k| = \sum_{i=0}^{r+1} \binom{n}{i} + \binom{n-1}{r} \Rightarrow |N(S_k)| = 2 \cdot \binom{n-1}{r+1}$$

$$\begin{aligned} \frac{|N(S_k)|}{|S_k|} &= \frac{2 \cdot \binom{n-1}{r+1}}{\sum_{i=0}^r \binom{n}{i} + \binom{n-1}{r}} > \frac{2 \cdot \binom{n-1}{r+1} \binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}}{2^{n-1} \cdot (\binom{n}{r+1} + \binom{n-1}{r}) \cdot \binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}} = \frac{2 \cdot \binom{n-1}{r+1} \binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}}{2^{n-1} \cdot (\binom{n-1}{r} + \binom{n-1}{r+1}) \cdot \binom{n-1}{r} \cdot \binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}} > \\ &= \frac{2 \cdot \binom{n-1}{r+1} \binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}}{2^n \cdot \binom{n-1}{r+1} \binom{n-1}{r} \cdot \binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}} = \left(\frac{2^{n-1}}{\binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}} + \frac{\binom{n-1}{r}}{2 \cdot \binom{n-1}{r+1}} \right)^{-1} > \left(\frac{\sqrt{\pi(n+\frac{3}{2})}}{2\sqrt{2}} + \frac{1}{2} \right)^{-1} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi(n+\frac{3}{2})} + \sqrt{2}} > \frac{2}{\sqrt{\pi n}} \text{ (dla } \\ &n \geq 7). \end{aligned}$$

W pozostałych przypadkach można otrzymać ograniczenie choć dużo gorsze wiedząc, że dodanie wierzchołka do S zmniejszy $N(S)$ o co najwyżej 1.

Weźmy teraz $\sum_{i=0}^r \binom{n}{i} < k < \sum_{i=0}^r \binom{n}{i} + \binom{n-1}{r}$

$$\frac{|N(S_k)|}{|S_k|} > \frac{\binom{n}{r+1} - \binom{n-1}{r}}{\sum_{i=0}^r \binom{n}{i} + \binom{n-1}{r}} = \frac{\binom{n-1}{r+1}}{\sum_{i=0}^r \binom{n}{i} + \binom{n-1}{r}} \geq \frac{\frac{1}{2} \binom{n}{r+1}}{\sum_{i=0}^r \binom{n}{i} + \frac{1}{2} \binom{n}{r+1}} \left(\frac{\sqrt{\pi(n+\frac{3}{2})}}{\sqrt{2}} + 1 \right)^{-1} > \frac{1}{\sqrt{\pi n}} \text{ (dla } n \geq 7).$$

Analogicznie dla $\sum_{i=0}^r \binom{n}{i} + \binom{n-1}{r} < k < \sum_{i=0}^{r+1} \binom{n}{i}$

$$\frac{|N(S_k)|}{|S_k|} > \frac{2 \cdot \binom{n-1}{r+1} - \binom{n-1}{r}}{\sum_{i=0}^{r+1} \binom{n}{i}} = \frac{\binom{n-1}{r+1}}{\sum_{i=0}^{r+1} \binom{n}{i}} > \frac{\binom{n-1}{r+1}}{2^{n-1} \binom{n}{r+1} + \binom{n}{r+1}} \geq \frac{\binom{n}{r+1} \binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}}{(2^{n-1} + \binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}) \binom{n}{r+1}} = \frac{\binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}}{2^{n-1} + \binom{n}{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}} >$$

$$\left(\frac{\sqrt{\pi(n+\frac{3}{2})}}{\sqrt{2}} + 1 \right)^{-1} > \frac{1}{\sqrt{\pi n}} \text{ (dla } n \geq 7).$$

Dla przypadków $n \leq 6$ można ręcznie sprawdzić wszystkie 2^{n-1} przypadków, aby również otrzymać oszacowanie $\frac{1}{\sqrt{\pi n}}$. \square

Rozdział 2

Problemy na wadliwej hiperkostce

2.1. Graf z wadami

Definicja 2.1.1. W grafie G możemy wyróżnić niektóre wierzchołki (czasem również krawędzie) i oznaczyć jako wadliwe. Graf z niepustym takim wyróżnionym zbiorem wierzchołków wadliwych $F \subseteq V(G)$ nazywamy grafem z wadami (lub grafem wadliwym)

Wadliwe wierzchołki (i/lub krawędzie) najczęściej traktowane są jako usunięte z grafu – mówimy w tym przypadku o grafie $G - F$. Wyróżnianie wadliwych wierzchołków w grafie zamiast definiowania nowego grafu jest umotywowane głównie w przypadkach, gdy pełny graf łatwo zdefiniować i zapisać w pamięci małej względem jego rozmiaru (np. klika, hiperkostka, graf de Bruijna), a zbiór wadliwych wierzchołków jest również mały.

2.2. Spójność wadliwej hiperkostki

Ten podrozdział jest napisany w większości na podstawie [3].

Uwaga 7. Aby zbadać spójność grafu $G - F$ dla spójnego grafu G wystarczy sprawdzić czy wciąż istnieje ścieżka pomiędzy dowolnymi dwoma wierzchołkami, które oryginalnym grafie sąsiadowały z jakimś spośród usuniętych wierzchołków (wszystkie takie wierzchołki należą do jednej spójnej składowej).

Dowód. Aby udowodnić spójność trzeba pokazać, że istnieje ścieżka pomiędzy dowolnymi dwoma wierzchołkami, jednak skoro w oryginalnym grafie taka ścieżka istniała, to w nowym grafie jedyną przeszkodą jest to, że na tej ścieżce mogły występować wierzchołki, które zostały usunięte. Taką ścieżkę można naprawić wstawiając w miejsca od pierwszego do ostatniego wystąpienia wierzchołka usuniętego ścieżkę pomiędzy odpowiednimi ich sąsiadami istniejącą w pomniejszonym grafie. \square

2.2.1. Podejście ekspansywne

Twierdzenie 8. Niech graf G posiada własność ε -ekspansji wierzchołkowej z $\varepsilon > 0$ i maksymalny stopień wierzchołka Δ , oraz dana jest wyrocznia zwracająca dla danego wierzchołka listę jego sąsiadów. Wtedy istnieje algorytm, który otrzymuje na wejściu zbiór $F \subseteq V(G)$ oraz ε i testuje spójność $G - F$ w czasie $O\left(\frac{|F|^2 \cdot \Delta^2 \cdot \log(|V(G)|)}{\varepsilon}\right)$

Lemat 9. Spójna składowa $S \subseteq V(G) \setminus F$ grafu $G - F$ jest jednego z dwóch typów:

- główna – $|S| > \frac{|V(G)|}{2}$
- mała – $|S| \leq \frac{|F|}{\varepsilon}$

Uwaga 10. Co prawda dla dużego $|F|$ i małego ε może być tak, że składowa jest jednocześnie główna i mała, jednak po pierwsze jest to przypadek mało interesujący, gdyż wtedy zwykle przeszukiwanie grafu spełnia tezę twierdzenia, a po drugie przypadek ten nie psuje w żaden sposób otrzymywanego algorytmu. W lemacie istotne jest to, że w grafie nie ma składowych średnich wielkości.

Fakt 11. Może być tylko jedna składowa główna.

Dowód. (Lematu)

Weźmy spójną składową S grafu $G - F$ ($N_{G-F}(S) = 0$), jeżeli $|S| \leq \frac{|V(G)|}{2}$, to z własności ε -ekspansji wierzchołkowej grafu G $|N_G(S)| \geq \varepsilon \cdot |S|$ (gdzie S jest teraz traktowane jako podzbiór wierzchołków grafu G). Gdyby zachodziło $|S| > \frac{|F|}{\varepsilon}$, to mielibyśmy $|N_G(S)| > \frac{\varepsilon \cdot |F|}{\varepsilon} = |F|$, co daje sprzeczność ponieważ aby w grafie $G - F$ to sąsiedztwo było puste z grafu G trzeba usunąć co najmniej $|N_G(S)|$ wierzchołków. \square

Dowód. (Twierdzenia)

Chcemy sprawdzić, czy wszyscy sąsiedzi wierzchołków usuniętych należą do tej samej spójnej składowej. Na podstawie lematu 9, jeśli składowa zawierająca taki wierzchołek jest większa niż $\frac{|F|}{\varepsilon}$, to jest to składowa główna. Jeżeli wszystkie takie wierzchołki spełniają ten warunek, to $G - F$ jest spójny. Jeżeli natomiast, któraś z tych składowych okaże się mała, to $G - F$ nie jest spójny.

Wystarczy więc uruchomić liniowe przeszukiwanie grafowe w każdym wierzchołku sąsiadującym z wierzchołkiem wadliwym i przerywać po przejściu $\frac{|F|}{\varepsilon}$ wierzchołków.

Algorytm liniowego przeszukiwania grafowego uruchamiany jest co najwyżej $|F| \cdot \Delta$ razy. Za każdym razem przeglądamy co najwyżej $\frac{|F|}{\varepsilon}$ wierzchołków. Dla każdego przeglądanego wierzchołka sprawdzamy co najwyżej Δ sąsiadów. Daje to złożoność z tezy twierdzenia. \square

Wniosek 12. Ponieważ zgodnie z twierdzeniem 6 hiperkostka Q_n posiada własność $\frac{1}{\sqrt{\pi n}}$ -ekspansji wierzchołkowej, oraz można znaleźć wszystkich sąsiadów wierzchołka w czasie liniowym od ich ilości powyższy algorytm testuje spójność wadliwej hiperkostki w czasie $O(|F|^2 \cdot n^{3.5})$ (wyrażonego w ilości operacji na wierzchołkach).

Bibliografia

- [1] L. Lovasz, J. Pelikan and K. Vesztergombi. "Discrete Mathematics, Elementary and Beyond." *Undergraduate Texts in Mathematics. New York: Springer, first edition, 2003*
- [2] L. H. HARPER, "Optimal Numberings and Isoperimetric Problems on Graphs" *JOURNAL OF COMBINATORIAL THEORY 1, 385-393 (1966)*
- [3] Tomas Dvorak, Jiri Fink, Petr Gregor, Vaclav Koubek and Tomasz Radzik, "Efficient connectivity testing of hypercubic networks with faults"
- [4] Jiri Fink and Petr Gregor, "Long paths and cycles in hypercubes with faulty vertices"
- [5] Jiri Fink and Petr Gregor, "Long pairs of paths in faulty hypercubes"
- [6] Frank Harary, John P. Hayes and Horng-Jyh Wu, "A survey of theory of hypercube graphs" *Comput. Math. Applic. Vol. 15, No 4, pp. 277-289, 1988*
- [7] Frank Harary, Marilynn Livingston, "Independent domination in hypercubes" *Appl. Math. Lett. Vol. 6, No 3, pp. 27-28, 1993*
- [8] Wojciech Rytter & Bartosz Szreder, "Wprowadzenie do kombinatoryki algorytmicznej"
- [9] DONALD E. KNUTH, "Generating All Tuples and Permutations" *THE ART OF COMPUTER PROGRAMMING VOLUME 4, FASCICLE 2*
- [10] FRANK RUSKEY, "Combinatorial Generation" *Working Version, October 1, 2003*
- [11] Tibor Szabo, Emo Wertz, "Unique Sink Orientations of Cubes"
- [12] Chi Him Wong, "Novel universal cycle constructions for a variety of combinatorial objects" *Guelph, Ontario, Canada, April, 2015*