

機関番号：14301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008 ~ 2010

課題番号：20700010

研究課題名 (和文) インターネット観測に向けた最適化問題のモデル化と効率的算法の研究

研究課題名 (英文) A study on formulation and efficient algorithms for an optimization problem in the Internet monitoring

研究代表者

趙 亮 (ZHAO LIANG)

京都大学・大学院情報学研究科・講師

研究者番号：90344902

研究成果の概要 (和文)：本研究は、L ビーコン (L は非負の整数で、ビーコンの観測範囲を決めるパラメータである) という概念を提案し、インターネットにおけるリンクの観測問題を最小な L ビーコン集合の配置を求める問題に定式化し、それに対する高速なアルゴリズム Sieve 法を開発した。さらにその双対問題に対する DualSieve 法も開発し、二つのアルゴリズムの有効性や応用可能性を大規模な計算機実験で示した。また実験結果より、インターネットにおいては、L=4, 5 が妥当な設定であることを示した。

研究成果の概要 (英文)：This study proposed “L-beacon” (where L is a nonnegative integer to decide the monitorable area of a beacon) for monitoring links in the Internet and formulated the link monitoring problem by an optimization problem for finding a minimum set of L-beacons. A very efficient algorithm, the Sieve Method, is given for solving this problem, as well as the DualSieve Method for the dual problem. The efficiency and applications of both algorithms are shown by experiments with large-scale instances. From the experiment results, it is shown that L=4, 5 are reasonable for the Internet.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：組み合わせ最適化、頂点被覆、支配集合問題、ビーコン配置問題

1. 研究開始当初の背景

(1) インターネットは、大規模であるうえ、パケット交換という従来の通信網で使われている回線交換と根本的に異なる通信方式を採用しているため、これまでの組合せ最適化の理論ではカバーできないような新しい問題を生み出している。本研究は、新たな数理モデルの構築及びアルゴリズムの開発を行うことによって、新しい問題に応えられる

ような基礎技術を与え、インターネットアルゴリズムの系統化を目指す。

(2) 具体的にはインターネットの観測を考える。ノードを点に、リンクを枝に対応させれば、インターネットはグラフで表現できる。さらに各枝に通信時間を付加すると、ネットワークの状態もグラフだけで調べられる。実際は巨大で自律的に変化するインターネットの状態を瞬時に一箇所に集めてくる

ことができないため、いくつかの頂点を選び、そこに観測装置を置き、それぞれの観測範囲内にあるリンクを調べさせる方法が用いられている。このような頂点をビーコン (beacon) と呼ぶ。一般に、全リンクを観測するのにビーコンを複数個用意する必要があり、サイズ最小のビーコン集合を求める問題、ビーコン設置問題が、近年国内外から注目を集めている。

2. 研究の目的

これまで国内外の研究成果を踏まえ、汎用かつ効率的な観測方法の提案を目的とする。

(1) まずビーコン設置問題を考える際、ビーコンの能力と観測可能範囲を定めなければならない。最も簡単なビーコンは、隣接しているリンクのみを観測することができる。この場合の設置問題は、これまでよく研究されてきたグラフの最小点被覆 (vertex cover) 問題となる。しかしこれでは、インターネットを観測するのに数千万個以上のビーコンが必要との試算があり、とても現実的ではない。さらに観測範囲の広いビーコンを検討する必要がある。

(2) 先行研究では、

- シンプルビーコン (simple beacon)
- 局所フレキシブルビーコン (locally-flexible beacon)

が提案されている。両者の違いは、隣接していない頂点宛に観測パケットを送出する際に、シンプルビーコンでは隣接のリンクを選べないのに対し、局所フレキシブルビーコンでは選べる点にある。インターネットにおいて両者とも意味をなすが、後者のほうは、コストが高い代わりに観測範囲が広く、数十万個の規模でインターネットを観測できるとの試算がある。

(3) 申請者はこの問題の一般化を考える。まず、目的のノードまでの経路において、最初のL本までリンクを指定できるビーコンをLビーコン (申請時の旧称はk-SR ビーコン) として提案する。従って、シンプルビーコンは0ビーコン、局所フレキシブルビーコンは1ビーコンとなる。Lビーコンを使ったビーコン設置問題をLビーコン設置問題と呼び、申請者らは以下の定理を示した。

定理 任意のLについて、Lビーコン設置問題はNP困難である。

また、Lは、ビーコン数削減の目的では大きいほうがいいが、コスト的には小さいほうが実現されやすい。本研究では、Lの値とビーコン数の関係を明らかにし、シミュレーション実験で検証を行うことにより、妥当で実用的な解決方法を提案したい。

(4) 本研究はさらにビーコンを設置した後の問題も考える。各ビーコンは、観測パケットを用いてリンクの通信状態を調べるが、

他の通信に与える影響を最小限に抑えたいため、協調制御よりパケットの転送数が最小となるような観測方法が望ましい。この問題をビーコン協調制御問題と呼ぶ。また、特に地震等自然災害の多い日本において、一部のリンク (またはノード) が機能しなくなったときの耐故障性も重要である。つまり、グラフから枝 (ノード) を取り除かれても、残ったグラフはやはり (残ったビーコンで) 観測可能であるようなビーコン集合の中で、サイズが最小のものを求める問題である。これをビーコン多重設置問題と呼ぶ。

(5) 以上をまとめると、本研究は、インターネットの観測に向けて、従来L=0, 1の研究を踏まえ、一般のLビーコン設置問題、ビーコンの協調制御問題や多重設置問題を考える。Lの値とビーコン数や観測パケット転送数との関係を明らかにするとともに、シミュレーション実験を用いて、インターネットにおける妥当で実用的なモデルと観測方法及びその応用の検討を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、これまでに得られた初歩的な成果をベースに、平成20年度にLビーコン設置問題を検討し、その成果を踏まえ、平成21年度以降に協調制御問題と多重設置問題を考える。

(1) 平成20年度

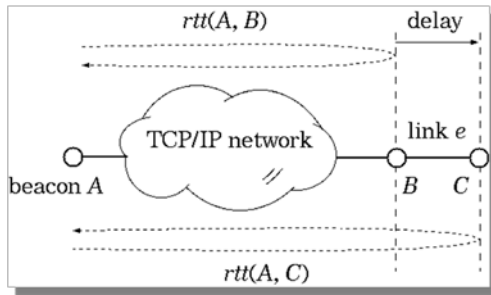
インターネットを無向連結グラフで表現する。また、ネットワークの通信経路は、時間によって変化する可能性があるため、以下の仮定を用いてモデリングを行う。

仮定1 任意の点uから任意の点vへの通信経路は、任意の時刻において単純パス一本のみで、vからuへの通信経路と同じリンクからなり、ある定数時間間隔T以内に変わらない。但しTは測定時間に比べて非常に大きい。

仮定2 リンク (u, v) が存在している場合、uからvへの経路は常に (u, v) となる。また、ある時刻において、uからvへの通信経路を $u = v_1, v_2, \dots, v_k = v$ とすると、任意の $i < k$ について、uから v_i への通信経路が $u = v_1, v_2, \dots, v_i$ となる。

これらの仮定は、インターネットの通信プロトコルからすれば妥当な設定になっている。以下この二つの仮定の下でビーコンの観測できるリンク、すなわち観測範囲を考える。まず、インターネットにおけるリンクの観測方法から分析する。

あるビーコンAがリンク $e = (B, C)$ を観測したいとする (下図参照)。



A から B と C 宛てにそれぞれ測定パケットを送出し、応答パケットから往復時間 $rtt(A, B)$ と $rtt(A, C)$ を得ることができる。もしこれらのパケットが常に e を除いて同じ経路を経由しているのであれば、

$$|rtt(A, C) - rtt(A, B)| / 2$$

を e の通信時間としてよい。つまり A が e を観測できる。仮定より、これは、グラフ上で B が常に A-C パス上にあるか、C が常に A-B パス上にあることと等価である。例として、 e がブリッジ（取り除くとグラフが非連結になるような枝）の場合、どの L についても、任意のビーコンから観測できるかどうかの判定については、複雑になるが、申請者らが再帰のアイデアで高速なアルゴリズムを発見した。平成 20 年度には、この発見を利用し、ビーコン数の最小化問題に対して近似解法を検討する。さらに、ネットワークシミュレータ等を用いてシミュレーション実験を行い、理論と実験の両面から結果を解析する。

(2) 平成 21 年度以降

平成 20 年度の成果を踏まえ、ビーコンの協調制御問題と多重設置問題を検討する。

ビーコン協調制御問題について、ネットワークへの負荷をパケットの転送数、すなわち目的点までのパス長と定義する。この定義により、ビーコンの協調制御問題は、与えられたビーコン集合にリンクを割り当て、観測パケットが辿るパスの長さの合計を最小化する問題として定式化できる。この問題に対し、それまで得られた成果を踏まえ、問題の複雑度と（近似）アルゴリズムを検討する。

ビーコン多重設置問題については、グラフから枝 r 本を取り除かれても、残ったグラフはやはり観測可能であるようなビーコン集合の中で、サイズが最小のものを求める問題を考える。この問題について、申請者は以下のことに着目している。つまり、任意のビーコン u と、 u の観測できるリンク e について、残ったグラフにおいて u と e が同じ連結成分に入っているなら、やはり u が e を観測できるのである。平成 21 年度までの成果を踏まえ、平成 22 年度にこの問題の複雑度と（近

似）アルゴリズムを検討する。

最後に、ビーコン配置問題に対する研究で得られた成果の応用も考える。

4. 研究成果

(1) 頂点集合 V と枝集合 E からなるグラフ $G=(V, E)$ が与えられたとする。 L ビーコン配置問題は以下の最小化問題で定式化できる。

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i \in V} x_i \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i \in B_L(e)} x_i \geq 1, \quad \forall e \in E, \\ & x_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, \end{aligned}$$

ただし枝 $e=(u, v)$ に対して、 e を観測できる頂点の集合が以下のように定義される。

$$B_L(e) = \{b \in V \mid \min\{d(b, u), d(b, v)\} \leq L\}.$$

ここで d は二点間の最短距離を表す。 L が 0 の時にこの問題が最小点被覆問題（vertex cover）になる。一般に任意の L 以上について、この問題は集合被覆（set cover）問題と等価になる。いずれの場合も NP 困難であり、厳密に解くのは難しい。また、多重度設置を行う場合も当然 NP 困難である。そのため、本研究は小規模の問題例に対しては CPLEX に基づく厳密解法、中規模の問題例に対しては集合被覆問題に対する欲張り法（Greedy method for the set cover problem）、大規模の問題例に対しては提案の Sieve 法を用いることにする。

(2) Sieve 法の基本的な考え方は、適当な順番に頂点を並べておき、順番に最大幅 L の幅優先探索を適用する。そしてこれまで選んだビーコンでカバーできないような辺が見つければ、現在探索をスタートした頂点を新しいビーコンとする。また、重複の探索をなくすために、一旦調べた枝に調べた範囲を示すラベルを更新してうまく無駄の探索を省略するよう工夫している。最後に、得られた実行可能解に対して、同様なアプローチで極小化を行う。以上の工夫により線形時間で品質のよい極小解が期待できる。

また、この方法は、多重設置の問題に拡張でき、さらに似たようなアプローチで双対問題に対するアルゴリズム DualSieve 法も構築できる。ビーコンの協調制御については、得られたビーコン集合に対して、グラフにある各リンクの観測を最寄りのビーコンに割り当てると、効率的にパケットの転送数を抑えることができる。

詳細は発表論文に参照されたい。

(3) 実験結果を報告する。用いた問題例は、実ネットワークと人工的に作ったネットワークの二タイプあり、サイズが千から一億ま

である。作ったネットワークは、インターネットの特徴であるスケールフリー性とスモールワールド性を持つ複雑ネットワークである。各図においては、横軸はL、縦軸はビーコン数を表す。凡例を示す。

OPT: 最適値

Greedy: 前述の欲張り法の解の値

Lowerbound: 下界値

Sieve: Sieve 法の解の値

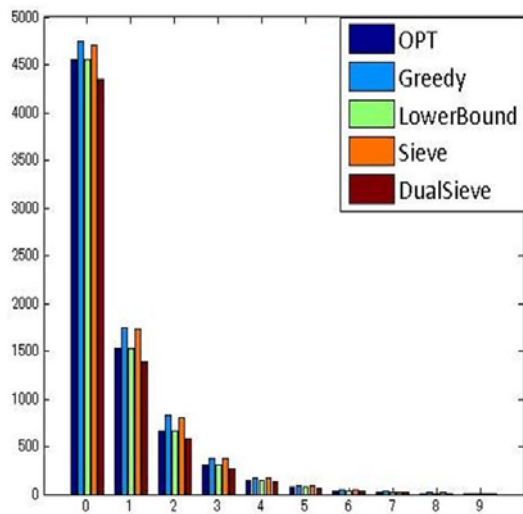
DualSieve: DualSieve 法の解の値

これら値間の関係は以下の通りである。

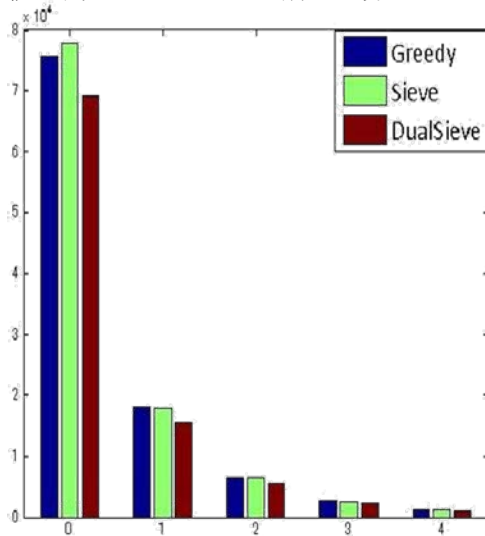
Lowerbound, DualSieve ≤ OPT ≤ Greedy, Sieve。

当然 OPT の値に使いほうがよい数値となる。

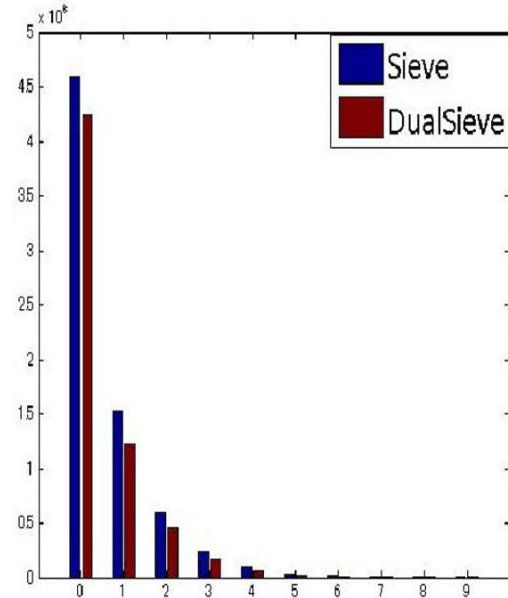
まず頂点数が 10,000 で、枝数が 15,087 の規模の小さい問題に対する結果を示す。



どの方法も最適値に近いことが分かる。次に頂点数 192,224、枝数 607,610 で中規模の問題例（実ネットワーク）の結果を示す。規模が大きくなったので、最適値と Lowerbound の計算ができなかったため、示されていない。ただし、最適値は Sieve の値と DualSieve の値の間にあることが理論的に分かっている。



Sieve 法の結果と DualSieve 法の結果が近いので、それぞれ高精度であることが分かる。最後に頂点数 10,000,000、枝数 17,421,301 の大規模な問題例の結果を示す。時間かかりすぎるため、欲張り法の結果もない。それでも Sieve 法と DualSieve 法は指定した時間（1800 秒）以内に答えを返した。さらにギャップが小さいことから、どれも最適値に近いことが分かる。



以上の結果が発表論文⑤、⑥、⑦に載せた。

(4) 多重観測や最短路問題への適用

結果を省略するが、多重観測でも同様な傾向が分かった（発表論文③、④）。さらに得られたビーコンが効率的にグラフをカバーしているという特徴から最短路の計算においてランドマークとして使えることが分かった（発表論文①、②）。

(5) 成果のまとめ

インターネットにおけるリンクの観測問題に対して、観測範囲の半径をパラメータ L として、L ビーコンの概念を提案し、与えられたグラフの最小のビーコン集合を求める問題に対して、高速で精度のよい Sieve 法とその双対アルゴリズム DualSieve 法を提案した。実験結果によって、インターネットにおいては、L = 4, 5 が妥当な設定ではないかと提案できた。また最短路の計算等、Sieve 法の応用を示した。これらの成果はネットワークの観測や最短路の計算に応用できると考えられる。また今後の展望として、提案した Sieve 法が汎用で効率的なアルゴリズムになっているため、様々な場面に応用したい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計 7 件)

- ① Liang Zhao, Pipaporn Enumthurapojn, Hiroshi Nagamochi, A practical speed-up technique for A* algorithms (Abstract), 4th Annual Meeting of Asian Association for Algorithms and Computation (AAAC 2011), 2011 Apr. 16-17, HsinChu, Taiwan.
- ② Tatsuya Ohshima, Pipaporn Eumthurapojn, Liang Zhao, Hiroshi Nagamochi, An A* algorithm framework for the point-to-point time-dependent shortest path problem, China-Japan Joint Conference on Computational Geometry, Graphs and Applications, 2010 Nov. 3-6, Dalian, China.
- ③ Liang Zhao, Jaeseong Gim, Hiroshi Nagamochi, On An Edge-Dominating Problem in Networks, 情報処理学会 第 6 回ネットワーク生態学シンポジウム, 2009 年 12 月 18 日, つくば産業技術研究所
- ④ Jiexun Wang, Jaeseong Gim, Masahiro Sasaki, Liang Zhao, Hiroshi Nagamochi, Efficient Approximate Algorithms for the Beacon Placement and its Dual Problem (Abstract), Korea-Japan Joint Workshop WAAC 2009, 2009 July 4, Seoul, Korea.
- ⑤ Jiexun Wang, Jaeseong Gim, Masahiro Sasaki, Liang Zhao, Hiroshi Nagamochi, Efficient Approximate Algorithms for the Beacon Placement and its Dual Problem (Abstract), Intl. Conf. Computational Intelligence and Software Engineering (CiSE) 2009, 2009 Dec. 13, Wuhan, China.
- ⑥ Jaeseong Gim, Masahiro Sasaki, Liang Zhao, Hiroshi Nagamochi, An efficient algorithm for large-scale beacon placement problem, 電子情報通信学会 2009 年総合大会 COMP 学生シンポジウム, 2009 年 3 月 19 日, 愛媛大学.
- ⑦ Masahiro Sasaki, Liang Zhao, Hiroshi Nagamochi, Security-aware beacon based network monitoring, 11th IEEE Intl. Conference on Communication Systems 2008, 2008 Nov. 19, Guangzhou, China.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

趙 亮 (ZHAO LIANG)

京都大学・大学院情報学研究科・講師

研究者番号：90344902