

P2P ネットワークにおける 速度分布とダウンロード時間の関係の評価

舟 阪 淳 ^{†1} 西 本 真 ^{†1}

BitTorrent を代表とする分割・並列ダウンロードを利用した P2P ファイル共有ソフトウェアが普及し、研究されてきている。従来の研究はフリーライダー(ただ乗り)を排除し全てのピアをファイルの配布に貢献させるインセンティブに注目してきた。一方で、ピアのアップロード速度の影響は無視できないにもかかわらず、いままであまり注目されて来なかった。本稿ではピアのアップロード速度分布の影響を簡単な評価式により導出する。その結果、少数の低速ピアの影響により、ファイルのダウンロード時間に大きく違いが表れることがわかった。

Effect of Peer Speed Distribution on Download Time over P2P networks

JUNICHI FUNASAKA ^{†1} and SHIN NISHIMOTO ^{†1}

Since a lot of P2P software has been developed and researched, the swarming technology, which is adopted by some P2P file sharing, such as BitTorrent, has been also analyzed intensively. Existing researches have focused on the incentive strategy to avoid free riders and to enhance the performance. However, the effect of upload speed distribution cannot be neglected and few researches have made much of it. In this paper, we introduce a simple theoretical calculation to evaluate the effect of upload speed distribution. As a result, it is confirmed that the small number of slow peers give relatively large impacts on the total download time.

^{†1} 広島市立大学
Hiroshima City University

1. はじめに

インターネットユーザの大容量ファイルを高速に取得したいという要望が強くなり、P2P ファイル共有ソフトウェアが広く使われるようになってきた。特にファイルを分割してピア同士で交換することにより負荷を分散し高速化する手法(分割ダウンロード: swarming download)に注目が集まっている。分割ダウンロードは取得対象のファイルを細分することにより、ピアが未取得の断片(ピース)を取得しながら既に取得したピースを他ピアに提供することを可能にした。ピアは全てのピースを取得したのち、元のファイルを再構成することができる。この方式によりクライアント-サーバモデルでは不可避であったサーバへの負荷集中を回避し、高速なファイル取得が実現できる。

BitTorrent¹⁾はこの分割ダウンロードを採用した代表的な P2P ファイル共有ソフトウェアである。BitTorrent は Tit-for-Tat 戦略を導入することで、いわゆる free-rider(ただ乗り)問題を解決してきた。すなわち自分に貢献してくれるピアとはピースを高速にアップロードしてくれるピアであり、これに対してアップロードという報酬で答える仕組みである。この Tit-for-Tat 戦略が BitTorrent の普及を進めるだけの効果をもっていることはすでにいくつかの文献で示されている^{1),2)}。しかしながらピアの速度分布がファイルのダウンロード時間にどのような影響を与えるかについては十分に研究されているとはいえない。

本稿では P2P 分割ダウンロードの簡易モデルを構築し、ダウンロード時間を計算で求める。いくつかの速度分布をピアに適用し、Tit-for-Tat などのソフトウェア固有の機能の影響を除いた速度分布のみのダウンロード時間への影響を定量的に見積もる。

以下、2 節では関連研究を紹介し、本研究の位置づけを明らかにする。3 節では本研究で導入する簡易モデルと、計算方法について説明する。4 ではさまざまな速度分布に対し、ファイルのダウンロード時間を計算し評価する。最後に 5 で本研究をまとめ、今後の課題を紹介する。

2. 関連研究

BitTorrent は P2P ファイル共有ソフトウェアの中で最も高速にファイルを配布できるものの一つであるため、多くの研究がその性能について解析を行ってきている³⁾⁻⁷⁾。これらの研究は BitTorrent の Tit-for-Tat 戦略に注目しているが、ネットワークリンクやピアのアップロード性能の影響については十分に議論されていない。

また多くの研究が BitTorrent に類した分割ダウンロードを採用した P2P ネットワーク

の性能向上をめざし、隣接ピアの選択法を提案している。Kooらは遺伝的アルゴリズムを用いた隣接ピアの選択を提案している⁸⁾。Bindalらはインターネットプロバイダ間の冗長なトラフィックを削減するため、できるだけ同一ネットワークに存在するピアを優先的に隣接とする方法を提案した⁹⁾。Funasakaらは類似の性能を持つピアをグループ化することにより、高速なピアの性能を維持する方法を考案している¹⁰⁾。また彼らはBitTorrentの採用するEnd-gameモードの冗長トラフィック生成問題に注目し、過去の隣接ピアのアップロード速度履歴から、ファイルの完成時間を遅らせる可能性のあるピアにアップロード要求を送らない方法を考案している¹¹⁾。しかしながら低速ピアがどれほど混在したときに、どれほどダウンロード時間が延長するかについては十分に議論されていない。

3. 評価方式

本稿ではピアの速度分布とファイルの取得時間の関係に注目する。議論の対象とするP2Pファイル共有ソフトウェアはBitTorrentなどで採用されている分割ダウンロード機能の最小限を想定する。また全てのピアがもつピース取得アルゴリズムは同一とする。

ここで m 個のピアのアップロード帯域 U を $U = \{u(i) | 0 < i \leq m\}$ とする。簡単のため、全てのピアはフルメッシュで接続し、ピア i はいずれの接続ピアに対しても、一定のアップロード帯域 $u(i)$ を持つと仮定する。またピア i からいずれのピアへのリンクも遅延は $d(i)$ で一定とする。もし全てのピアがサーバであり、全てのピース n 個を保持していると考えたとき、これらのサーバからあるクライアントがファイルを分割ダウンロードする時間は式(1)で見積もられる¹²⁾。

$$t_{k+1}(i) = \begin{cases} \min_j(t_k(j)) + \frac{F}{nu(i)} + d(i) & (i = s) \\ t_k(i) & (i \neq s) \end{cases} \quad (1)$$

ここで $t_k(i) (0 < i \leq m, 0 < k \leq n)$ は k 個のピースを要求した時点で i 番目のサーバからピースの取得を完了する時間を示す。 s は次の要求が割り当てられるサーバの番号である。 \min_j は $j (0 < j \leq m)$ についての最小を示しており、 $\min_j(t_k(j))$ は s 番目のサーバからの取得完了が予測される時刻を示す。なおピースサイズは F/n であり、これは等分割を仮定している。 $t_0(j) (0 < j \leq m)$ は取得開始時に 0 であり、最終的なファイルのダウンロード時間は $\max_j(t_n(j))$ で与えられる。これは、 n 個のピースを要求したあとで、最も遅いピースの取得を待って完成とする必要があるからである。

P2P ネットワークにおいては多くのピアが同時にピースを取得するので、式(1)を拡張

する必要がある。まず、ファイルを取得するピアが複数になるので、 $t_k(i)$ を $t_{k,l}(i)$ と拡張し、システム全体で $k (0 < k \leq pn)$ 個目のピースの割り当てを決定した時点で、ピア l が接続している隣接ピア i からのピース取得完了時間を表すものとする。ある k に対し、全ての l と i の組み合わせの中から $t_{k,l}(i)$ が最小となるものを見つけ、次のピース取得時間 $\frac{F}{nu(i)} + d(i)$ を加算し、 k を 1 増やす。なお k は同時刻に複数該当する場合があるが、便宜上ピアの ID が小さいものから順に処理するものとする。式(1)と同様に全てのピースが同じサイズであることを仮定しているので、ピース取得時間の増分は一定である。以上の条件を式(2)、(3)に示す。

$$t_{k+1,l}(i) = \begin{cases} \min_j(t_k(j)) + \frac{F}{nu(i)} + d(i) & (i = s) \\ t_k(i) & (i \neq s) \end{cases} \quad (2)$$

$$t_{k+1,l}(i) = t_k(i) \quad (3)$$

ここで式(2)は $t_{k,l}(i)$ の最小値をもつピア l についてであり、 s は最小値をもつ隣接ピアを示す。式(3)はそれ以外のピアについてである。

また本稿では各ピアが b 個 ($0 < b \leq m$) の隣接ピアに接続することを想定した。隣接ピアと区別するため、ここでは接続ピア(connecting peer)と呼ぶことにする。ピア i は m 個の全ピアの集合 PEER のうち、自身を除いてランダムに c 個を選び、これらのピアとピースをやりとりする。この集合を CPEER(i) とする。ピア i が時刻 t の時点でもつピースの集合を $PIECE(i, t)$ とすると、ピア i は $\bigcup_{j \in CPEER(i)} PIECE(j, t)$ からランダムにピースを 1 つ選択する。さらにピア i は、選択したピースをもつ接続ピアの集合の中からランダムにピースを取得する相手となるピアを選択する。

さらに P2P 分割ダウンロードモデルでは、ピアが全てのピースを保持しているとは限らないことに注意する必要がある。未取得のピースが隣接ピアに見当たらない場合、次のピース取得完了時まで要求を保留し、改めて取得可能なピースを探索する。ここでは $t_{k,l}(i)$ を条件 $> t_{k,l}(i)$ を満たす t のうち最も小さい時刻である $t_{k',l'}(i')$ に更新することにより実現する。このとき、リクエストは発行されていないので k を更新しない。

本稿では上記の考え方により P2P 分割ダウンロードモデルによるファイル取得時間を見積もる。この際、Tit-for-Tat 戦略などの効果は除外できていることに注意する必要がある。

以降、全てのピアのアップロード速度が同一の場合、一定速度の低速ピアが混在する場合、正規分布の場合、一様分布の場合、対数一様分布の場合と、単純な速度分布から複雑な分布へと評価を進める。

表 1 シミュレーションパラメータ
Table 1 Simulation parameters

Number of peers	50
Target file size (MByte)	25.6
Size of piece (KByte)	256
Number of connecting peers	20
Topology	full mesh
Link delay (ms)	50

4. 評価実験

本章ではまず全てのピアが同一のアップロード速度をもつ場合を検討し、以降の結果を検討する際のレファレンスとする。その後、同一速度をもつ低速ピアが複数台混在した場合の効果について検討する。さらにより一般的な速度分布の影響を検討し、単純なモデルで得られた結果と比較しながら議論する。本研究で用いる共通のパラメータを表 1 にまとめる。

4.1 単純な速度分布：同一速度の組み合わせ

最初に全てのピアが同一のアップロード速度を持つ場合を想定し、このうちいくつかのピアが低速である場合を検討していく。ここで n 台のサーバが低速 (10kb/s) のアップロード速度をもち、残りの $(50 - n)$ 台のピアが高速 (250kb/s) のアップロード速度を持つとする。これらの値は既存の研究¹¹⁾の平均値と最低値をもとに設定した。まず並列ダウンロードで想定するクライアント 1 台、サーバ 50 台の環境でファイルを取得し完成させるまでに必要な時間を計算した。これは文献 12) の式 (1) と同等の計算となる。

図 1 は 5 回の試行で得られたダウンロード時間の平均値をとった結果である。横軸には低速ピアの数をとっている。図 1 より、低速ピアが増えるにつれてダウンロード時間が長くなっていくことがわかる。図中の 1 次近似曲線 (1st approximation) は、全てのピースを隣接ピアの帯域合計で割った近似ダウンロード時間、すなわち $\frac{F}{\text{ave}_i(u_j)c}$ を示す。ここで、 F はファイルサイズ、 u_j はピア i 自身をのぞいた全てのピア、 c は接続ピアの数を示す。ここで得られた結果は文献 12) で得られた式 (1) の計算と矛盾しない。

次に、ファイルを提供するピア (サーバピア) を 1 台のみとし、残りを全てファイルを取得するクライアントピアとした場合を検討する。ここでは高速ピアの数が 1 以上のときにサーバピアの速度を高速 (250kb/s) とし、0 のときは低速 (10kb/s) と仮定した。計算結果を図 2 に示す。

図 2 より、図 1 に似た傾向がみられることがわかる。しかし計算結果は 1 次近似と比較

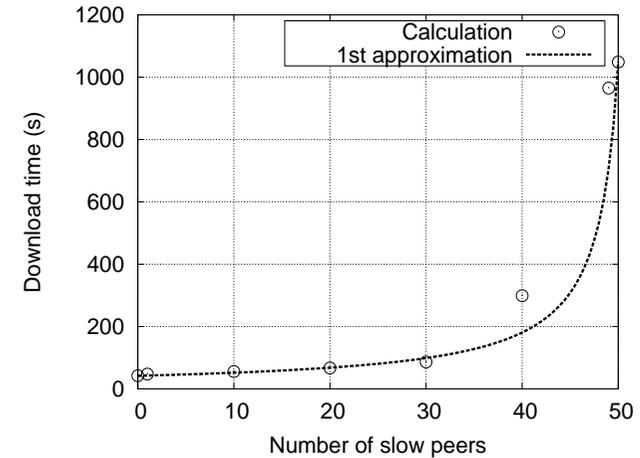


図 1 低速ピアの数がダウンロード時間に与える影響 (クライアントピア 1 台)
Fig. 1 Effect of slow peers (with one client peer)

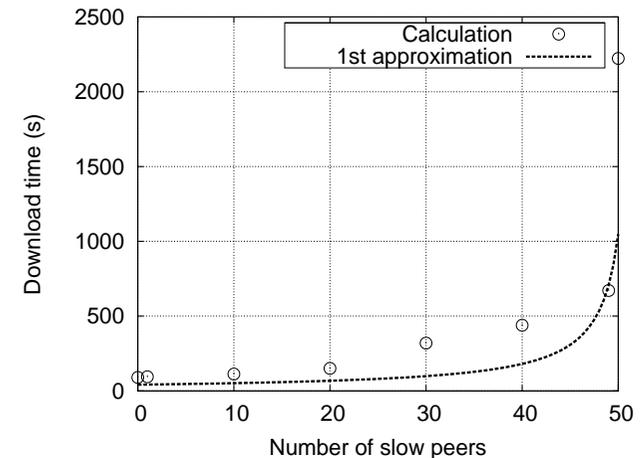


図 2 低速ピアの数がダウンロード時間に与える影響 (サーバピア 1 台)
Fig. 2 Effect of slow peers (with one server peer)

してより大きくなる。これは隣接ピアが未取得ピアをもたない場合にはダウンロード先として選択することができないため、実際のダウンロード並列数が隣接ピア数（本研究では 20）を下回ってしまうことによると考えられる。高速ピアの数が 0（低速ピアの数が 50）のときにダウンロード時間が大きくなるのは、サーバピアが低速ピアとなり、全体のダウンロード速度に支配的な影響をもたらすからである。

4.2 一般的な速度分布

本節ではより一般的な速度分布について、ファイルのダウンロード時間への影響を評価する。

まず比較的単純である正規分布について議論する。平均値をいまままで高速ピアとしてきた 250Kbps とし、ばらつきを制御する標準偏差は 10Kbps および 100Kbps を考慮した。ピア数 50 の分布を 10 種類作成し、それらの平均をとることで、特定の分布に偏らず、正規分布の特徴が捉えられるように配慮した。なお、標準偏差を 100Kbps とした場合は 10Kbps 以下の値がランダムに選ばれてしまうことがある。今回は前述の低速ピアの速度を考慮し、最低値は 10Kbps とし、これに満たない値のときは切り上げることにする。

図 3 は、標準偏差 10Kbps の場合のダウンロード時間 (average time) を、10 種類の分布のそれぞれについて 10 回ずつ計算して平均を求めた結果を示す。さらに 1 次近似値で割った値を正規化ダウンロード時間 (normalize) として表示する。ピアの速度分布にはあまり変化がみられず、ダウンロード時間も分布ごとに変動しないことがみとれる。

図 4 は、図 3 と同様に、標準偏差 100Kbps の場合のダウンロード時間を示す。標準偏差 10Kbps の場合と比べると、より低速なピアが出現し、ダウンロード時間が 2 倍程度まで増大する例がみとれる。

次により一般的な分布として、一様分布を考えた。文献¹¹⁾を参考に、10～1000Kbps の範囲で一様な乱数を発生させ、各ピアのアップロード速度とした。これまでの議論と同様に、平均ダウンロード時間と正規化ダウンロード時間を図 5 に示す。平均アップロード速度の変化は抑えられているが、正規化ダウンロード時間には標準偏差 100Kbps の正規分布に匹敵する変動がみられる。また平均アップロード速度が 500Kbps 程度と高いにもかかわらず、低速ピアの影響を受けて正規化ダウンロード時間が大きくなっていると考えられる。

さらに低速ピアが含まれる可能性の高い分布として、対数一様分布を考えた。同様に文献¹¹⁾を参考に、1～3 の範囲に相当する一様な乱数を発生させ、10 についてこの数の冪乗を各ピアのアップロード速度とした。とした。これまでの議論と同様に、平均ダウンロード時間と正規化ダウンロード時間を図 6 に示す。分布ごとの変動はあまり大きくないが、全

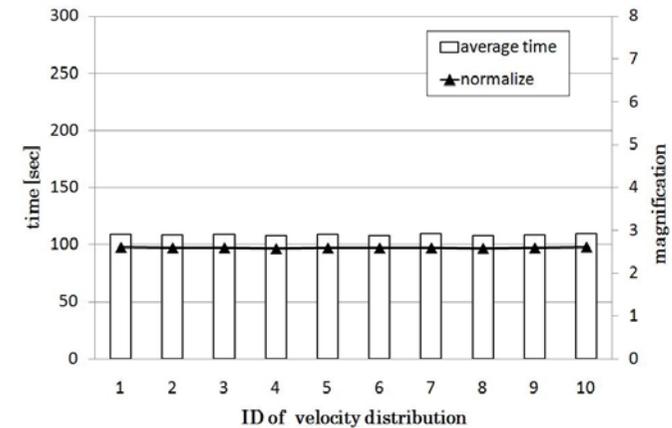


図 3 速度分布が正規分布 (平均 250Kbps, 標準偏差 10Kbps) の場合
Fig. 3 Download time for normal distributions (average: 250Kbps, standard deviation: 10Kbps)

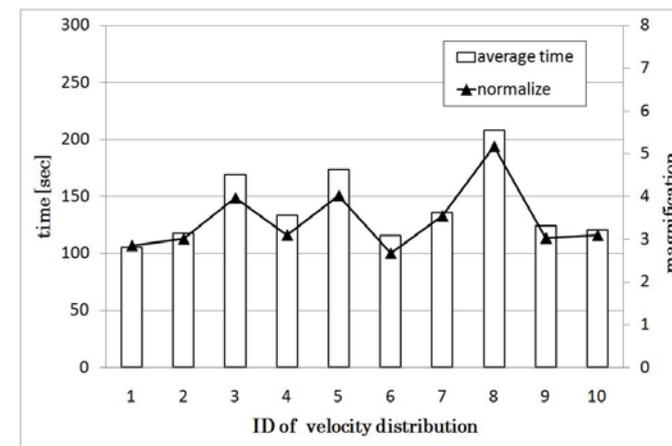


図 4 速度分布が正規分布 (平均 250Kbps, 標準偏差 100Kbps) の場合
Fig. 4 Download time for normal distributions (average: 250Kbps, standard deviation: 100Kbps)

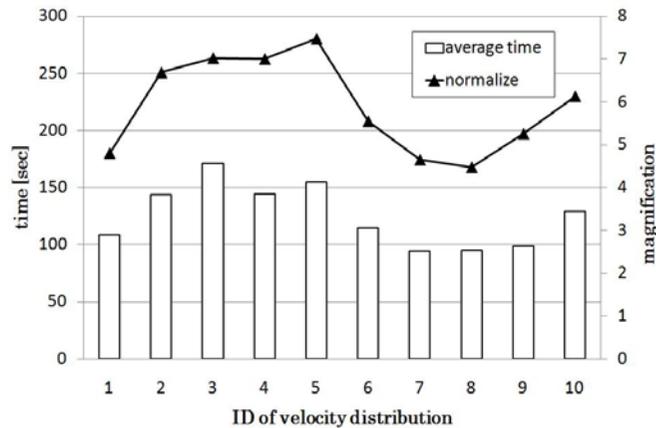


図 5 速度分布が一様分布 (10 ~ 1000Kbps) の場合
Fig. 5 Download time for uniform distributions (range: 10-1000Kbps)

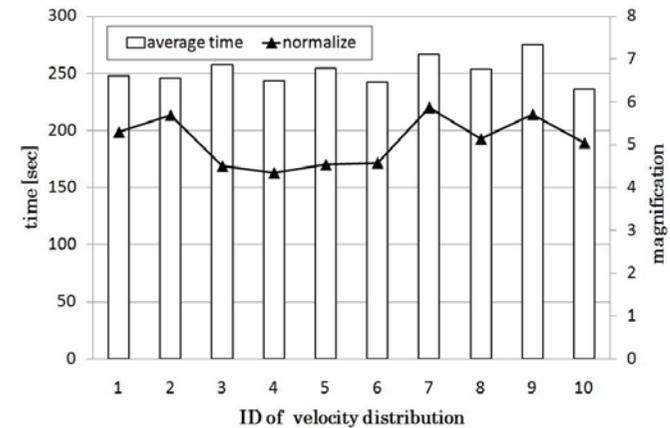


図 6 速度分布が対数一様分布 (10 ~ 1000Kbps) の場合
Fig. 6 Download time for log uniform distributions (range: 10-1000Kbps)

体的にファイル配布速度が低速となっている。これは低速ピアの数が比較的増えたことで、低速ピアからのピース取得に時間を要するためであると考えられる。

5. おわりに

本稿では P2P 分割ダウンロードモデルを考案し、ピアの速度分布がファイルの配布速度に与える影響について考察した。その結果、少数の低速ピアの影響により、ファイルのダウンロード時間に大きく違いが表れることがわかった。本研究は P2P ネットワークにおいて提案されている各種アルゴリズムの効果のうち、ピアの速度分布が寄与する部分を分離して議論するための基礎的データを提供できると考えている。

今後の課題として、実際の P2P ネットワークでみられる速度分布を模して実験することが挙げられる。

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金 (基盤 (C) 課題番号 19560392) の助成を得て実施した。特に記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) B. Cohen, "Incentives Build Robustness in BitTorrent," Proc. the First Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems, 2003.
- 2) A. Legout, G. Urvoy-Keller, and P. Michiardi, "Understanding BitTorrent: An Experimental Perspective," INRIA Research Report 00000156 Version 3-9, available at <http://hai.inria.fr/inria-00000156/em>, 2005.
- 3) J. A. Pouwelse, P. Garbacki, D.H.J. Epema, and H.J. Sips, "A Measurement Study of the Bittorrent Peer-to-peer File-sharing System," Technical Report PDS-2004-003, Delft University of Technology, 2004.
- 4) M. Izal, G. Urvoy-Keller, E. W. Biersack, P. A. Felber, A. Al Hamra, and L. Garces-Erice, "Dissecting BitTorrent: Five Months in a Torrent's Lifetime", Proc. 5th Passive and Active Measurement Workshop, 2004.
- 5) J. A. Pouwelse, P. Garbacki, D. H. J. Epema, and H. J. Sips, "A Measurement Study of the BitTorrent Peer-to-Peer File-Sharing System," Technical Report PDS-2004-003, Delft University of Technology, 2004.
- 6) A. R. Bharambe, C. Herley, V. N. Padmanabhan, "Analyzing and Improving BitTorrent Performance" Microsoft Research Technical Report, MSR-TR-2005-03, 2005.

- 7) N. Andrade, M. Mowbray, A. Lima, G. Wagner, and M. Ripeanu, "Influences on cooperation in BitTorrent communities", Proceeding of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Economics of peer-to-peer systems, 2005.
- 8) S. G. M. Koo, C. S. G. Lee, and K. Kannan. "A Genetic-Algorithm-Based Neighbor-Selection Strategy for Hybrid Peer-to-Peer Networks," *Proc. 13th IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN'04)*, pp.469-474, 2004.
- 9) R. Bindal, P. Cao, W. Chan, J. Medved, G. Suwala, T. Bates, and A. Zhang, "Improving Traffic Locality in BitTorrent via Biased Neighbor Selection," *Proc. 26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS2006)*, p.66 in CD-ROM, 2006.
- 10) J. Funasaka, H. Yasuoka, and K. Ishida, "Dynamic Peer Grouping Method Conforming with Tit-for-Tat Strategy for P2P File Distribution Systems," *IEICE Trans.*, Vol.E90-B, No.4, pp.809-816, 2007.
- 11) J. Funasaka, A. Ishizu, and K. Ishida, "A File Fetching Method to Avoid Performance Deterioration on BitTorrent-Like P2P Networks," *IEICE Trans.*, Vol.E92-B, No. 8, 2591-2599, 2009.
- 12) J. Funasaka, N. Nakawaki, K. Ishida, and K. Amano, "A Parallel Downloading Method to Utilize Variable Bandwidth," *IEICE Trans.*, E86-B, 10, pp.2874-2881, 2003.