

中間経由節点をもつ K サーバー問題

京都大学工学部 軽野義行 (Yoshiyuki KARUNO)

京都大学工学部 茨木俊秀 (Toshihide IBARAKI)

1 緒 論

Kサーバー問題は、 n 節点完全グラフにおいて生じる一連の要求の処理に対する K 台のサーバーの移動計画であり、そのオンラインアルゴリズムが Manasseら [5] などによって研究されている。処理すべき各要求はグラフの 1 つの節点上に発生し、サーバーの 1 つがその節点へ移動して処理を実行する。グラフの各枝には距離が定義され、サーバーがある 2 節点間を移動するとき、その距離に等しいコストが掛かる。なお、要求はその発生順に処理されなければならない。

Kサーバー問題に対するオンラインアルゴリズムでは、各要求に対してどのサーバーを移動させるかという決定を未来の要求の情報なしに行い、 K 台のサーバーの全移動距離を小さく抑えることが目的になる。

本研究では、上記のような Kサーバー問題のある一般化、すなわち、各要求が、カバーすべき目標節点のほかに、通過すべき中間経由節点を一つ指示できるとした問題を考察する。アルゴリズムがこのような要求を処理するためには、あるサーバーをまず中間経由節点に移動させ、さらにそのサーバーを目標節点へ移動させる必要がある。このタイプの問題は、多数の生産セルを数台の無人搬送車で結合する分散型自動生産システムのマテリアル・ハンドリング等において生じる。また、この問題は Fiatらの文献[3]に見られる K タクシー問題に似ている。しかし、K タクシー問題においては、目標節点の情報は中間経由節点にサーバー(タクシー)が到着した後にのみ得られる。我々の問題では両節点の情報があらかじめ得られるとしているので、

“無線連絡装置をもつKタクシー問題”ともいえる。

本研究では、中間経由節点を考慮したKサーバー問題に対してオンラインアルゴリズムを構築し、“Competitive 解析”の見地からその評価を行う。“Competitive 解析”はSleatorら[7]によって提案されたオンラインアルゴリズムに対する一種の最悪性能比の解析である。すなわち、あるオンラインアルゴリズムA、および全要求の情報をあらかじめ保持できる最適オフラインアルゴリズムOPTに対して、要求列 σ を処理するために必要なK台のサーバーの全移動距離を、 $\text{cost}_A(\sigma)$ 、 $\text{cost}_{\text{OPT}}(\sigma)$ としたとき、任意の σ に対して

$$\text{cost}_A(\sigma) \leq c \cdot \text{cost}_{\text{OPT}}(\sigma) + I \quad (1.1)$$

を満たすような定数 I が存在するならば、オンラインアルゴリズムAは c -competitive であるという。ただし、定数 I はK台のサーバーの初期配置にのみ依存するものであって、要求列 σ に依存してはならない。アルゴリズムAに対する c の最小値をAの competitive ratio という。また、他の全てのオンラインアルゴリズムの competitive ratio がAのそれ以上であるとき、Aは最適オンラインアルゴリズムであるという。Manasseら[6]は、中間経由節点のないKサーバー問題について、 $K=n-1$ および $K=2$ に対する competitive なオンラインアルゴリズムを示しているが、ここでは中間経由節点をもつKサーバー問題について competitive なオンラインアルゴリズムを構築する。さらに、一般のKに対しても幾つかの知見を述べる。

2 問題の記述

n 節点の完全グラフ G を考え、各枝 (u, v) には距離 $d(u, v)$ を定義する。これらの距離 d は三角不等式を満足し、任意の節点 v に対して $d(v, v)=0$ 、さらに任意の2節点 u, v に対して $d(u, v)=d(v, u)$ であるとする。また、 K をグラフ G 内に存在するサーバーの台数、 $C=\{C_1, C_2, \dots, C_M\}$ をそれらの取り得る配置の集合とする。

次に、処理すべき要求の列を $\sigma = \sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(N)$ とする。要求はその発生順に処理

される。各要求 $\sigma(i)$ は 2 節点のペア $\{p(i), q(i)\}$ によって記述される。ここで、 $p(i)$ は中間経由節点、 $q(i)$ は目標節点を表す。このような要求を処理するためには、あるサーバーが枝 $(p(i), q(i))$ 上を移動しなければならない。勿論、ある要求 $\sigma(i)$ が 中間経由節点を持たない、すなわち、 $p(i)=q(i)$ であっても構わない。もし各全ての要求 $\sigma(i)$ に対して $p(i)=q(i)$ ならば、この問題は Manasseらの Kサーバー問題[6] と同じになる。アルゴリズムの性能は K 台のサーバーの全移動距離 (必要な $p(i)$ から $q(i)$ への移動距離も含める) で評価される。

この問題に対するオンラインアルゴリズム A は、既に発生している要求 $\sigma(1), \dots, \sigma(i)$ の情報と現在のサーバーの配置状態のみに基づいて、要求 $\sigma(i)$ の処理にどのサーバーを割当てるかを決定する。一方、オフラインアルゴリズムでは全要求 $\sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(N)$ の情報をあらかじめ知ることができ、それに基づいたサーバーの移動が可能となる。サーバーの全移動距離を最小にする最適オフラインアルゴリズムを OPT と記す。以下では K 台のサーバーの全移動距離をそのアルゴリズムのコストと呼び、 $\text{cost}_A(\sigma)$ 、 $\text{cost}_{\text{OPT}}(\sigma)$ 等と記す。

3 $(n-1)$ サーバーの場合

本節では、中間経由節点をもつ $(n-1)$ サーバー問題に対して 2 つのオンラインアルゴリズム BART1 および BART2 を与え、これらの competitive ratio について検討する。これらのアルゴリズムは以下に示す特殊な要求列に対応する 2 つのアルゴリズム BAL および RT を基礎としている。

Manasseら[6]において提案されたように、バランスアルゴリズム BAL は中間経由節点のない問題に対して、次のようにサーバーを移動させる： $(n-1)$ 台のサーバーは、互いに重ならないよう常に異なる $(n-1)$ 個の節点上に配置される。BAL は、ある時点において節点 j に位置するサーバーに対して、要求列の処理を開始してからそれまでの累積コスト D_j を保持する。いま、ある要求 $\sigma(i)=(k, k)$ が発生したとする。このとき、もし節点 k 上にサーバー

が位置していれば、そのサーバーに処理をさせる。したがって、どのサーバーのコストも増加しない。一方、節点 k が空であれば、 $D_j + d(j, k)$ を最小にする節点 j 上のサーバーを節点 k へ移動させる。つまり、BAL は $(n-1)$ 台のサーバーを均等に利用しようとする。アルゴリズム BAL に対しては次が証明されている：

定理 1 [6] n 節点完全グラフにおける中間経由節点のない $(n-1)$ サーバー問題に対して、オンラインアルゴリズム BAL は $(n-1)$ -competitive である。

ここで、各全ての要求 $\sigma(i) = \{p(i), q(i)\}$ が $p(i) \neq q(i)$ である場合に対して、BAL を変形した次のような往復アルゴリズム RT を考える： $(n-1)$ 台のサーバーを互いに重ならないよう常に $(n-1)$ 個の節点上に配置する。要求 $\sigma(i) = \{p(i), q(i)\}$ が与えられたとき、もし $q(i)$ にあるサーバーが位置しているならば、RT はそのサーバーに中間経由節点 $p(i)$ との間を往復させる。もし $q(i)$ が空であるならば、 $p(i)$ 上のサーバーを $q(i)$ へ移動させる。 $p(i) \neq q(i)$ である要求 $\sigma(i) = \{p(i), q(i)\}$ から成る任意の要求列 σ に対して、規定区間の移動距離の総和を

$$S_0 = \sum_{i=1}^N d(p(i), q(i)) \quad (3.1)$$

としたとき、 $\text{cost}_{RT}(\sigma) \leq 2 \cdot S_0$ 、および $\text{cost}_{OPT}(\sigma) \geq S_0$ は明らかである。よって、次が成り立つ：

補題 2 各全ての要求が中間経由節点をもつ $(n-1)$ サーバー問題に対して、オンラインアルゴリズム RT は 2-competitive である。

ただし、アルゴリズム RT の 2-competitive 性は、規定区間の距離 $d(p(i), q(i))$ がコストに含まれているために達成できることに注意する。

次に、 $p(i) = q(i)$ および $p(i) \neq q(i)$ の 2 つの要求のタイプが混在する一般の場合に対して、アルゴリズム BART 1 と BART 2 を以下に与える。BART 2 は、上の BAL と RT まとめたものであり、BART 1 は解析の容易さのため、RT の一部を少し変形したアルゴリ

ズムとなっている。

ALGORITHM BART1

- 1 (初期設定) . $(n-1)$ 台のサーバーを互いに重ならないように配置する。
- 2 ($\sigma(i)$ の処理) . 発生した要求 $\sigma(i)$ ($i=1, 2, \dots$) を次のように処理する。
 - ルール1 $p(i)=q(i)$ ならば、BAL を適用する。
 - ルール2 $p(i) \neq q(i)$ ならば、節点 $q(i)$ 上のサーバーに規定区間を往復させる。もし節点 $q(i)$ が空ならば、節点 $p(i)$ 上のサーバーに規定区間を往復させる。□

ただし、BAL において必要な各サーバーの累積コスト D_j はルール1 適用時にのみ更新する。

定理3 中間経由節点をもつ $(n-1)$ サーバー問題に対して、オンラインアルゴリズム

BART1 は $(n+1)$ -competitive である。

(証明) 要求列 σ を各要求に適用されるルールが1 であるか2 であるかにしたがって、2つの部分列 σ_1, σ_2 に分割する。 $\sigma_1(\sigma_2)$ に属する要求の相対的な順序は σ における順序と同じである。

ルール2 を適用してもサーバーの配置は変化しないので、BART1 のコストは部分列 σ_1 に対するコストと σ_2 に対するコストの和となる。さらに、定理1 および補題2 を適用すると、

$$\begin{aligned}
 \text{cost}_{\text{BART1}}(\sigma) &= \text{cost}_{\text{BART1}}(\sigma_1) + \text{cost}_{\text{BART1}}(\sigma_2) \\
 &= \text{cost}_{\text{BAL}}(\sigma_1) + 2 \cdot S_0 \\
 &\leq (n-1) \cdot \text{cost}_{\text{OPT}}(\sigma) + I + 2 \cdot \text{cost}_{\text{OPT}}(\sigma) \\
 &= (n+1) \cdot \text{cost}_{\text{OPT}}(\sigma) + I
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

となる。ただし、 S_0 は規定区間の総移動距離である(式(3.1)参照)。■

アルゴリズム BART1 のルール2 では、 $q(i)$ が空の場合もサーバーに規定区間を往復させるため、アルゴリズムの効率が悪くなる。その点を改良したものが次の BART2 である。

ALGORITHM BART2

- 1 (初期設定) . $(n-1)$ 台のサーバーを互いに重ならないように配置する。また、空のスタックを1つ用意する。
- 2 ($\sigma(i)$ の処理) . 発生した要求 $\sigma(i)$ ($i=1, 2, \dots$) を次のように処理する。
 - ルール1 $p(i)=q(i)$ のとき、スタックが空ならば BAL を適用する。スタックが空でなければ、1つ前の配置に戻すことによってその要求を処理する。
 - ルール2 $p(i) \neq q(i)$ ならば、RT を適用する。そのとき、もしサーバーの配置が変化すれば、元の配置をスタックに記憶する。□

ただし、各サーバーの累積コスト D_j は、ここでも BAL を適用した際にのみ更新される。

BART 2 のルール 2 では $q(i)$ が空の場合、 $p(i)$ のサーバーを $q(i)$ へ移動させる。そのため、ルール 1 において BAL を適用した直後のサーバーの配置が、次にそれを適用する際に変化してしまっているかもしれないので、アルゴリズムのコストの評価が困難になる。そこで、スタックを用いて、次に BAL が適用されるまでに前回の BAL 適用直後のサーバーの配置を復元できるようにしている。このことより、BART 2 のルール 1 において BAL が適用されるのは、 σ_i の部分列 σ'_i である (σ_i の定義は、定理 3 の証明参照)。 $\text{cost}_{\text{BAL}}(\sigma'_i) \leq \text{cost}_{\text{BAL}}(\sigma_i)$ 、したがって $\text{cost}_{\text{BART2}}(\sigma) \leq \text{cost}_{\text{BART1}}(\sigma)$ であるから、次の定理が成立する：

定理 4 中間経由節点をもつ $(n-1)$ サーバー問題に対して、オンラインアルゴリズム

BART 2 も $(n+1)$ -competitive である。

もしアルゴリズム BART 2 において、 $(n-1) \cdot \text{cost}_{\text{OPT}}(\sigma) + I \geq \text{cost}_{\text{BAL}}(\sigma'_i) + (n-1) \cdot S_0$ 、または、 $\text{cost}_{\text{OPT}}(\sigma) + I \geq \text{cost}_{\text{OPT}}(\sigma'_i) + S_0$ が成立するならば、BART 2 は $(n-1)$ -competitive であるといえる。しかし、これらは未解決である。ただし、 σ'_i に属する要求が n 節点全てから発生していないときは $\text{cost}_{\text{OPT}}(\sigma'_i) = 0$ 、 $\text{cost}_{\text{OPT}}(\sigma) \geq S_0$ であるから、上式が成立する。

4 2 サーバーの場合

4.1 残余関数 オンラインアルゴリズムの c -competitive 性を決定するために、Manasse ら [6] によって、以下のような“残余関数 R_c ” が導入された：

$$R_c(i, C_j) = c \cdot \text{cost}_{\text{OPT}}(i, C_j) - \text{cost}_A(i). \quad (4.1)$$

ここで、 $\text{cost}_{\text{OPT}}(i, C_j)$ は要求列 σ の最初の i 個を処理し、配置 C_j で終了するある最適オフラインアルゴリズムのコスト、 $\text{cost}_A(i)$ はオンラインアルゴリズム A が σ の最初の i 個の要求を処理したときに生じたコストを表している。ある初期配置が与えられると、動的計画法

よって $\text{cost}_{\text{OPT}}(i, C_j)$ 、したがって $R_c(i, C_j)$ が容易に計算できる。最適オフラインアルゴリズムのコストは $\min_j \{\text{cost}_{\text{OPT}}(N, C_j)\}$ である。よって、式(1.1)より、任意の N と C_j に対して、

$$R_c(N, C_j) \geq -I \quad (4.2)$$

となるような定数 I が存在すれば、オンラインアルゴリズム A は c -competitive である。考慮すべき配置の集合の大きさ M が小さいとき、この方法は有効である。

4. 2 アルゴリズムの記述 中間経由節点をもつ 2 サーバー問題に対して、前述の残余関数を用いて 2-competitive なオンラインアルゴリズム IRES を構築することが出来る。これは、Manasseら[6]のアルゴリズム RES に若干の修正を加えたものとなっている。

アルゴリズム IRES は、2 台のサーバーを常に異なる 2 つの節点に配置する。いま、要求 $\sigma(i-1) = \{p(i-1), q(i-1)\}$ を処理した直後とする。 $q(i-1) = a$ とすると IRES の 1 台のサーバーは節点 a 上に位置しており、もう 1 台は節点 b ($\neq a$) にある。このとき、最適オフラインアルゴリズムにおいても 1 台のサーバーが節点 a に位置しているが、もう 1 台のサーバーはどこに位置するか分からない。したがって、IRES が考慮しなければならない残余関数の数は、もう 1 台のサーバーの可能な位置 u に対応する n 個である。簡単のため、サーバーが節点 a 及び u に位置する最適オフラインアルゴリズムと IRES を比較した残余関数を $R(a, u)$ ($= R_2(i, \{a, u\})$) と記す。

アルゴリズム IRES においてサーバーの初期位置が a と b であるとする、残余関数の初期値は各 u に対して $R(a, u) = d(a, b) + 2 \cdot d(b, u)$ とする。一般に、要求 $\sigma(i) = \{s', a'\}$ を処理するために、IRES はまず (s' が空節点であれば) s' へあるサーバーを移動させる必要がある。ここで、次のようなルールを採用する：もし

$$\min_k \{R(a, k) + 2 \cdot d(k, s')\} \geq 2 \cdot d(a, s') + d(a, b) \quad (4.3)$$

ならば、IRES は節点 a 上のサーバーを s' へ移動させ、そうでないならば 節点 b 上のサ

サーバーを移動させる。その後、そのサーバーを a' へ移動させる。ただし、 s' が空であっても、既に節点 a' 上にもう1台のサーバーが位置しているときは、それに規定区間を往復させる。

定理5 中間経由節点をもつ2サーバー問題に対して、 $IRES$ は 2-competitive である。

(略証) アルゴリズム $IRES$ の保持する残余関数の値が、任意の u と v に対して常に以下の下界値をもつことを、場合分けと帰納法によって示すことが出来る：

$$R(a, u) + R(a, v) \geq Q(a, b, u, v), \quad (4.4)$$

ここで、

$$Q(v, w, x, y) = 2 \cdot \max\{d(v, w) + d(x, y), d(v, x) + d(w, y), d(v, y) + d(w, x)\}. \quad (4.5)$$

式(4.4)においては、 $u=v$ も可である。もし式(4.4)が成立すれば、各残余関数の値は常に非負である。よって、式(4.2)より、この下界値はアルゴリズムの 2-competitive 性を保証する。

詳細は割愛するが、いま、要求 $\sigma(i-1)$ を処理した直後の残余関数が式(4.4)を満足していると仮定し、例えば、次の要求 $\sigma(i) = \{s', a'\}$ において $s' \neq a'$ かつ $s', a' \neq a, b$ 、さらに、移動決定ルール式(4.3)が成立しているならば、 $IRES$ は節点 a のサーバーを移動させる。もう1台のサーバーは、節点 $b(\Rightarrow b')$ に留まる。ここで $\min_k \{R(a, k) + 2 \cdot d(k, s')\}$ を最小にするインデックスを k とすると、残余関数は次のように更新される：

$$R'(a', a) = R(a, k) + 2 \cdot \{d(k, s') + d(s', a')\} - \{d(a, s') + d(s', a')\},$$

$$R'(a', u) = R(a, u) + 2 \cdot \{d(a, s') + d(s', a')\} - \{d(a, s') + d(s', a')\}, \quad (u \neq a).$$

これらの更新された残余関数の値も式(4.4)を満たすことが帰納的に示される。■

上記の定理は Manasseら[6]の結果を含んでおり、次を系としておく：

系 6 [6] 中間経由節点のない2サーバー問題に対して、オンラインアルゴリズム

$IRES$ は 2-competitive である。

系 7 全ての要求が中間経由節点を有する(つまり、各 $\sigma(i) = \{p(i), q(i)\}$ において

$p(i) \neq q(i)$) 2サーバー問題に対して、アルゴリズム $IRES$ は 2-competitive である。

5 一般のKに対する結果

任意の $K \geq 1$ に対して、Manasseら[6]は「中間経由節点のないKサーバー問題に対して、ある K -competitive なオンラインアルゴリズムが存在する」と予想している。この予想は、3節および4節でみたように、 $K=n-1$ 、 $K=2$ に対しては証明されている。しかし、一般の K に対しては未解決である。また、彼らは任意のオンラインアルゴリズムに対して、その competitive ratio の下界を示している：

定理 8 [6] *中間経由節点のないKサーバー問題に対する任意のオンラインアルゴリズムの competitive ratio は少なくともKである。*

この下界は我々の問題に対しても成立する。さらに、次の定理を得る：

定理 9 *もし中間経由節点のないKサーバー問題に対して K -competitive なアルゴリズムが存在するならば、中間経由節点をもつKサーバー問題に対する最適オンラインアルゴリズムの competitive ratio は、 K と $K+2$ の間である。*

(証明) 下界は定理8によって与えられているので、ここでは上界を示す。要求列 σ に対し、 σ_q を中間経由節点を省略した要求の列とする。すなわち、 $\sigma(i) = \{p(i), q(i)\}$ のとき、 $\sigma_q(i) = \{q(i), q(i)\}$ である。中間経由節点のない K サーバー問題に対する K -competitive なアルゴリズムを B とする。中間経由節点をもつ K サーバー問題に対するオンラインアルゴリズム A は、要求列 σ_q に対してその K -competitive なアルゴリズム B を模倣し、目標節点 $q(i)$ に移動させるサーバーを決定する。アルゴリズム A は、そのサーバーをいったん中間経由節点 $p(i)$ に移動させて、さらにそれを目標節点 $q(i)$ に移動させる。節点間の距離は三角不等式を満足しているので、

$$\begin{aligned}
 \text{cost}_A(\sigma) &\leq \text{cost}_B(\sigma_q) + 2 \cdot S_0 \\
 &\leq K \cdot \text{cost}_{\text{OPT}}(\sigma_q) + 2 \cdot S_0 + I \\
 &\leq K \cdot \text{cost}_{\text{OPT}}(\sigma) + 2 \cdot \text{cost}_{\text{OPT}}(\sigma) + I \\
 &\leq (K+2) \cdot \text{cost}_{\text{OPT}}(\sigma) + I
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

となる。ただし、 S_0 は規定区間の総移動距離(式(3.1)参照)である。■

これらの結果の延長として、ここで「もし各全ての要求 $\sigma(i)$ が中間経由節点を有する(つまり、 $p(i) \neq q(i)$)ならば、中間経由節点をもつ K サーバー問題に対しては、ある 2-competitive なアルゴリズムが存在する」という予想を与える。この予想は、中間経由節点へサーバーを移動させるための必要コストの和は、規定区間の移動に必要なコストの和に比べて極端に大きくはならないであろうということから来ている。事実、補題 2 および系 7 は各々 $K = n - 1$ 、 $K = 2$ に対する 2-competitive なアルゴリズムの存在を示しており、さらに次も証明される：

定理 10 各全ての要求が中間経由節点を有する $(n - 2)$ サーバー問題に対して、ある 2-competitive なアルゴリズムが存在する。

(証明) 次のようなオンラインアルゴリズム ART を考える。 $(n - 2)$ 台のサーバーを、常に互いに重ならないように配置する。要求 $\sigma(i) = \{p(i), q(i)\}$ に対して、もし節点 $p(i)$ もしくは節点 $q(i)$ 上にサーバーが位置しているならば、そのサーバーに規定区間を往復させる(両方の節点にサーバーが位置しているときは、どちらを起用しても良い)。もし節点 $p(i)$ 、 $q(i)$ のどちらにもサーバーが存在しないときは、任意のサーバーを選んで $p(i)$ に向かわせ、その後、そのサーバーを $q(i)$ へ移動させる。ART のコストは次を満たす：

$$\begin{aligned} \text{cost}_{\text{ART}}(\sigma) &\leq 2 \cdot S_0 + D - d_0 \\ &\leq 2 \cdot \text{cost}_{\text{OPT}}(\sigma) + (D - d_0), \end{aligned} \quad (5.2)$$

ここで、 $D = \max\{d(u, v)\}$ 、 d_0 は初期配置において空であった 2 節点間の距離、また S_0 は規定区間の総移動距離(式(3.1)参照)である。この結果、ART は 2-competitive である。■

6 結 論

本研究では、中間経由節点をもつ K サーバー問題を考察した。第 1 に、 $K = n - 1$ 、 $K = 2$ に対するオンラインアルゴリズムの構築および“Competitive 解析”によるそれらの最悪性能比の検討を行い、中間経由節点をもたない Manasse ら [6] の結果を一般化した。第 2 に、一般の

Kにおいて、元の問題に対する K -competitive なオンラインアルゴリズムが存在するならば、我々の問題に対して $(K+2)$ -competitive なオンラインアルゴリズムを構築できることを示した。しかし、幾つかの事項が未解決のままである。今後はそれらの解決を目指すとともに、分散型アルゴリズムや確率アルゴリズム（例えば、[1][4]）の適用も検討していきたい。

参考文献

- [1] Y. Batral and A. Rosen. The Distributed k -Server Problem. *Proceedings 33rd Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, 344-353, 1992.
- [2] A. Borodin, N. Linial and M. Saks. An Optimal Online Algorithm for Metrical Task System. *Proc. 19th Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, 373-382, 1987.
- [3] A. Fiat, Y. Rabani and Y. Ravid. Competitive k -Server Algorithms. *Proceedings 31st Annual Symposium on Foundations of Computer Science Vol II*, 454-463, 1990.
- [4] E. Grove. The Harmonic Online K -Server Algorithm Is Competitive. *Proc. 23rd Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, 260-266, 1991.
- [5] M. S. Manasse, L. A. McGeoch and D. D. Sleator. Competitive Algorithms for On-Line Problems. *Proc. 20th Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, 322-333, 1988.
- [6] M. S. Manasse, L. A. McGeoch and D. D. Sleator. Competitive Algorithms for Server Problems. *Journal of Algorithms*, 11:208-230, 1990.
- [7] D. D. Sleator and R. E. Tarjan. Amortized Efficiency of List Update and Paging Rules. *Communications of the ACM*, 28(2):202-208, 1985.