

移動体環境における誤り回復方式の提案

八木 幹雄[†] 金子 敬一^{††} 伊藤 秀男^{††}

Error Recovery Schemes in Mobile Environments

Mikio YAGI[†], Keiichi KANEKO^{††}, and Hideo ITO^{††}

あらまし 近年, 計算機端末の小型化及び無線通信技術の発展により, PDA (Personal Digital Assistant) などの移動端末が利用可能となった. 移動体環境における分散システムでは, アプリケーションを高信頼に実行することが望まれている. しかしながら, 移動体環境では, 移動端末の移動性や無線ネットワークであるための帯域幅の制限といった特性により, 固定ネットワークにおける一般的な誤り回復方法を適用することは困難である. そこで, 移動体環境におけるいくつかの誤り回復方法が提案されている. これらは, 従来の誤り回復方法である後方回復, 特にチェックポイント方式やメッセージログ方式を改善したものである. しかしながら, 従来提案されているものは誤り回復時間またはコストのいずれか一方のみを考慮したものであった. 本論文では, 回復時間とコストの両方を考慮した新たな二つの方法を提案し, これらを評価することにより, 有効性を検証する.

キーワード チェックポイント, 移動体環境, 誤り回復, コスト評価, フォールトトレランス

1. ま え が き

近年, 計算機端末の小型化及び無線通信技術の進歩により, PDA (Personal Digital Assistant) などの移動端末が広く利用可能となり, 利用者が場所を固定せず様々なサービスを利用できる移動体環境が発展しつつある. この移動体環境において, 従来の固定ネットワークで行われていたサービスを実現するために, 分散システムに関するものなど, 様々な研究が行われている [1].

移動体環境の特徴としては, (1) 移動端末の移動性, (2) 無線通信であるための帯域幅の制限, (3) 移動端末のバッテリー・記憶容量の少なさ, (4) ハンドオフによる瞬断といった点が挙げられる. このような環境のもと, 耐故障性を実現するために, 移動端末の位置情報管理方法 [2], [3], ネットワーク上のファイル管理 [4]~[6], そして分散プロトコル [7]~[12] などが研究されている. これらは, 特に分散処理において, システムの可用性を向上させる方法として有効である.

分散プロトコルの研究において, 耐故障性の実現のための一般的な誤り回復として, 後方回復, 特にチェックポイント (CP) 方式やメッセージログ方式がある. これらの方式を用いて移動体環境の特徴を考慮した誤り回復方式が提案されている. 特に, 特徴の (2) 及び (3) を考慮した, CP の取得方法について多くの研究がある [7]~[11]. しかし, これらの手法は, 移動体環境の大きな特徴である端末の移動については十分考慮していない. これに対し, 文献 [12] は, 端末の移動について考慮したいくつかの方法を提案し, 回線の占有に関する総合コスト及び回復時間より検討を行っている. ここで, 総合コストとは, CP・ログの取得及び管理コストと障害時に回復を行うコストである. しかし, これらの方法は総合コストまたは回復時間のいずれか一方しか考慮していないという欠点がある. 本論文では, これらの方法を改善して, コストと誤り発生時における回復時間のバランスをとることができる二つの方法, Logging-Lazy-Trickle (LLT) 方式と LTn 方式を提案する.

以下, 2. で従来の回復方式, 3. で今回提案する回復方式, 4. で評価方法, 5. で結果について述べる. 6. で考察を行い, 最後に 7. で本論文のまとめと今後の課題について述べる.

[†] 千葉大学大学院自然科学研究科, 千葉市
Graduate School of Science and Technology, Chiba University,
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8522 Japan

^{††} 千葉大学工学部, 千葉市
Faculty of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho,
Inage-ku, Chiba-shi, 263-8522 Japan

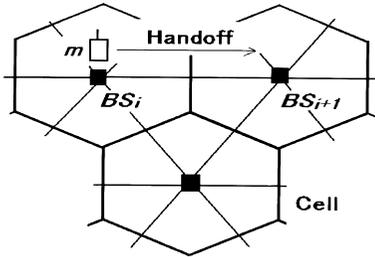


図1 移動体環境

Fig. 1 A mobile network environment.

2. 従来の誤り回復方式

2.1 移動体環境

移動体環境を、図1のようにモデル化する[12]。この環境は、固定した基地局 BS と移動する移動局 m より構成される。基地局は互いに有線ネットワークで結ばれている。移動局 m は、常に一つの基地局 BS_i により管理され、通信を行うことが可能である。各基地局が移動局を管理する領域をセルと呼ぶ。移動局 m はその BS_i を通して無線通信を行うことができる。移動局 m はセルからセルに移動し、このとき移動局 m を管理する基地局は、 BS_i から BS_{i+1} に代わる。この際の処理をハンドオフと呼ぶ。また、隣接基地局間の距離を1ホップと呼ぶ。距離1ホップは、ハンドオフの回数1回にも相当する。

2.2 一般的な誤り回復

固定ネットワークでの一般的な誤り回復では、後方回復、特に CP 方式とメッセージログ方式を併用する。ここで、CP とはシステムの稼働状態を記憶したもので、メッセージログ（ログ）とはユーザ入力及び他の端末からのメッセージの複製を記憶したものである。ユーザ入力及び他の端末からのメッセージを記憶することをライトイベントと呼ぶ。CP 方式とメッセージログ方式を併用する方式では、CP を定期的に記憶し、更に発生したすべてのメッセージを記憶する。そして、誤りが発生した際はこれらの CP・ログを用いてシステムの回復を行う。このような方式では、CP・ログを記憶するために安定した記憶場所を必要とする。しかし、一般的に移動局のディスク記憶は少なく、誤りが発生しやすい。そこで、移動局の CP・ログは基地局内に記憶する。基地局の記憶場所は安定していると仮定する。

一方で、移動局がセルからセルに移動するため、

特定の基地局に CP・ログを記憶したままにすると、この CP・ログの管理が困難になる。そこで文献[12]は、移動体環境のための三つの誤り回復方式 Logging-Pessimistic (LP) 方式, Logging-Lazy (LL) 方式, Logging-Trickle (LT) 方式を提案している。

これらの方式では、ある一定の時間間隔 (CP 間隔時間) ごとに CP を取得する。更に、ユーザ入力及びメッセージが発生した際は常にログを取得する。これらの方式では、CP・ログを用いることにより、誤りの発生した移動局を回復することができる。本論文では、誤りは一時的なものとし、CP・ログによりシステムの回復を行うことができるものとする。更に、誤りは移動局のみに発生し、誤り発生時は、誤りが発生した移動局のみが、回復を行うものとする。

以下、本論文では最新の CP 取得時に移動局を管理している基地局を BS_0 、CP を記憶している基地局を BS_{cp} と呼ぶ。更に、移動局は $BS_0, BS_1, \dots, BS_{curr}$ の順に管理されると仮定する。

2.3 LP 方式

この方式は、移動局 m の管理が基地局 BS_i から BS_{i+1} に移るハンドオフ時に、 m の移動とともに CP・ログを BS_i から BS_{i+1} に転送する方式である。

ハンドオフが発生し m の管理が基地局 BS_i から BS_{i+1} に移動するとき、 BS_i は BS_{i+1} に CP・ログを転送する。すなわち、 $BS_{cp} = BS_{curr}$ となる。

誤り発生時には、 m はシステムを再起動し、基地局 BS_{curr} から CP・ログを転送し、 m のシステムを回復する。

この方式では回復時間が他の方式に比べて短い。しかし、ハンドオフごとに CP・ログを転送するので、総合コストが高くなる。

2.4 LL 方式

この方式は、ハンドオフ時に、CP・ログを転送せず、通過した基地局のリンクリストを作成する。

ハンドオフが発生し、移動局 m の管理が基地局 BS_i から BS_{i+1} に移動するとき、 BS_i が BS_{i+1} に BS_i の位置を記憶するようコントロールメッセージを送り、リンクリストを作成する。すなわち、 $BS_{cp} = BS_0$ であり、CP を保持している基地局は不変である。

誤り発生時には、リンクをたどり基地局 BS_{cp} から CP・ログ、通過してきた基地局からログを転送し、 m のシステムを回復する。

この方式では、ハンドオフ時に CP・ログを転送しないため、総合コストは他の方式に比べて最も少ない。

ただし、回復時間は最も要する方式である。

2.5 LT 方式

LT 方式では、基地局 BS_{cp} と基地局 BS_{curr} の距離を小さくでき、更にハンドオフに要する時間も LL 方式程度に抑えることができる。

ハンドオフが発生し移動局 m の管理が基地局 BS_i から BS_{i+1} に移動するとき、 i が 1 以上ならば、 BS_i は $BS_{i-1}(= BS_{cp})$ にコントロールメッセージを送り、 BS_{i-1} に記憶されている CP・ログを BS_i へ転送させる。また、 m を新たに管理する BS_{i+1} に対してもコントロールメッセージを送り、 BS_i の位置を記憶させ、リンクを作成する。このように LT 方式では、 BS_{cp} は BS_{curr} または BS_{curr-1} となる。そのため、 BS_{cp} と BS_{curr} の距離をただか 1 ホップに保つことができる。

誤り発生時には、LL 方式同様、 m はリンクをたどり、 BS_{cp} から CP・ログ、通過してきた基地局からログを転送し、 m のシステムを回復する。

この方式では、総合コスト及び回復時間に関しては LP 方式とほぼ等しく、ハンドオフ時間に関しては LP 方式より短い。

3. 提案方式

LP 方式及び LT 方式は回復時間を、LL 方式は総合コストを重視したものである。そこで、本論文では新たに二つの方式、Logging-Lazy-Trickle (LLT) 方式及び LTn 方式を提案する。これらの方式は、回復時間と総合コストのバランスを考慮できる方式である。LLT 方式は LL 方式と LT 方式を組み合わせた方式、LTn 方式は LT 方式を拡張した方式である。

3.1 LLT 方式

この方式では、前述の従来方式と同様に CP を定期的に取得する。CP は、無線ネットワークを通して基地局 BS_i に記憶される。また、ハンドオフ後最初の CP 取得時に、以前に取得した CP 及び CP 取得時までに取得したログ、更にリンクリストを削除する。これらの削除のため、 BS_i は基地局 BS_{cp} へコントロールメッセージを送信する。

また、CP 間隔においては、ログを取得する。ログは、ユーザ入力のログと、他の端末からのメッセージのログの 2 種類がある。ユーザ入力について、移動局 m は発生したユーザ入力の複製を作成し、それを BS_i に転送して記憶させる。 m は、記憶を完了した BS_i から ack メッセージ (コントロールメッセージ) を受

け取ることで、ユーザ入力に対して処理を行うことが可能となる。他の端末からのメッセージについては、 BS_i で複製が記憶された後に、 m にそのメッセージが転送される。

ハンドオフ時には、LL 方式同様、基地局 BS_i が BS_{i+1} に req メッセージ (コントロールメッセージ) を送り、この req メッセージを受け取った BS_{i+1} は BS_i の位置情報を記憶しリンクリストを作成する。

ここで、CP 取得時を時刻 0 とするとき、時刻 θT_c 、すなわち CP 間隔時間 T_c の θ 倍 ($0 \leq \theta \leq 1$) 時に、移動局を管理している基地局を BS_{th} と呼ぶ。

LLT 方式では、時刻 θT_c に、それまでに通過したすべての基地局 BS_j ($0 \leq j < th$) に対して、CP・ログを基地局 BS_{th} へ転送するよう req メッセージを送る。この req メッセージを受け取った BS_j ($0 \leq j < th$) は、CP・ログの複製を BS_{th} へ転送する。更に BS_{th} は、送られた CP・ログを受け取ると、複製されたもとの CP・ログ及びリンクリストを削除するよう BS_j ($0 \leq j < th$) へ req メッセージを送る。

この操作により、時刻 $0 \leq t < \theta T_c$ においては $BS_{cp} = BS_0$ 、時刻 $\theta T_c \leq t \leq T_c$ においては $BS_{cp} = BS_{th}$ となる。

誤り発生時には、 m は基地局 BS_{cp} には CP・ログ、通過してきた基地局にはログを転送するよう req メッセージを送る。req メッセージを受け取ると、各基地局は BS_{curr} に CP・ログを転送し、更に BS_{curr} はこの CP・ログを m へ転送する。 m はこの CP・ログを受信し、システムの回復を行う。

3.2 LTn 方式

LLT 方式は、 θ を設定するという点で、CP の時間間隔に基づく方式である。一方、移動体環境における特徴として、移動局の移動性がある。この特徴を考慮して、移動局の移動距離に基づいた誤り回復方式である LTn 方式を提案する。

LT 方式では、基地局 BS_{cp} と基地局 BS_{curr} の距離が 1 ホップとなるように制御している。LTn 方式は、LT 方式を拡張し、この距離を n ホップとすることを可能にした方式である。ユーザは、距離を示すこの n の値を自由に定義でき、回復時間と総合コストの両方を考慮することができる。

CP・ログの取得については、LLT 方式と同様である。一方、ハンドオフ時には、LL 方式同様、req メッセージを送り、基地局 BS_i と BS_{i+1} のリンクを作成する。ここで、もし、このリンクリストの長さが

n ホップのとき、つまり $BS_{cp} = BS_{i-n}$ のときは、CP・ログの複製を BS_{i-n} から BS_{i-n+1} へ転送する。 BS_{i-n+1} はその CP・ログを受信後、コントロールメッセージを送信して BS_{i-n} がもつもの CP・ログ及びリンクリストを削除させる。その後、更に移動局 m が移動するとき、CP・ログを上記同様 BS_{i-n+2} へ転送する。このようにして、 BS_{curr} と BS_{cp} の距離はたかだか n ホップに保たれる。

誤り発生時には、 m はそれまで通過した基地局へ req メッセージを送信する。req メッセージを受信した BS_{cp} は CP・ログ、その他の基地局はログを転送し、CP・ログを受け取った m は、システムの回復を行う。LTn 方式では、 BS_{curr} と BS_{cp} の最大距離を示す n を決定すると、誤り発生時の回復時間は、たかだか有線ネットワーク上で CP・ログを距離 n の分だけ転送する時間と、無線ネットワーク上で CP・ログを転送する時間の和となる。これにより回復時間を容易に見積もることが可能となる。

ただし、 $n = 1$ のとき、LTn 方式は LT 方式に等しい。

4. 評価

本章では、従来方式及び提案方式の評価を行う。このため、各方式の評価式を作成し、それより平均総合コストと平均回復時間を求め、分析を行う。

その際移動体環境のため、端末の誤り率のみならず、端末の移動性や、無線と有線の転送コストの比も考慮して評価を行う。

また、本論文においては、CP の一貫性については考慮せず、端末の移動性に対する各方式の性能評価を行う。そのため、一つの移動局のみについて注目して考える。

4.1 記号

文献 [12] に従い評価式に使用する記号を以下に示す。

- λ : 移動局の誤り率。連続する二つの誤り発生時の時間間隔は指数分布に従い、その期待値は $1/\lambda$ 。
- α : 一つのデータ (CP, ログ及びコントロールメッセージ) を無線ネットワーク上で 1 ホップ転送するコストと、有線ネットワーク上で 1 ホップ転送するコストとの比率。
- μ : 移動局のハンドオフ率。連続する二つのハンドオフ動作の時間間隔は指数分布に従い、その期待値は $1/\mu$ 。
- β : ライトイベント率。連続する二つのライ

トイベントの時間間隔の期待値は $1/\beta$ 。本論文では、 $\beta = 1$ と仮定する。

- r : 通信移動率。ハンドオフとハンドオフの間 (ハンドオフ間隔) のライトイベントの発生回数の期待値。ただし、 $r = \beta/\mu = 1/\mu$ となる。 r の値が小さいほど、速く移動していることを示す。

- T_c : CP の時間間隔。
- k : CP 間隔のライトイベントの発生回数の期待値。ただし、 $k = \beta T_c = T_c$ となる。
- ρ : ライトイベント中、ユーザ入力 of 占める割合。
- C_c : 有線ネットワーク上、一つの CP を 1 ホップ転送する平均コスト。
- C_l : 有線ネットワーク上、一つのログを 1 ホップ転送する平均コスト。
- C_m : 有線ネットワーク上、一つのコントロールメッセージを 1 ホップ転送する平均コスト。
- C_h : ハンドオフ操作の平均コスト。
- C_r : 回復操作の平均コスト。
- C_t : ハンドオフ間隔における平均総合コスト。
- T_{cexp} : 誤りの発生を仮定したとき、CP 間隔において誤り発生時までの平均時間。

- $T_{wireless}$: 無線ネットワーク上、CP・ログを 1 ホップ転送する平均時間。

- T_{wired} : 有線ネットワーク上、CP・ログを 1 ホップ転送する平均時間。

- $T_{recovery}$: 平均回復時間。

更に、LLT 方式の評価式では以下の記号を使用する。

- C_{rpre} : 時刻 $0 \leq t \leq \theta T_c$ に誤りが発生するときの回復操作の平均コスト。
- $T_{(0-\theta)exp}$: 時刻 $0 \leq t \leq \theta T_c$ に誤りが発生するときの平均時刻。
- C_{rpost} : 時刻 $\theta T_c < t \leq T_c$ に誤りが発生するときの回復操作の平均コスト。
- $T_{(\theta-c)exp}$: 時刻 $\theta T_c < t \leq T_c$ に誤りが発生するときの平均時刻。

LTn 方式の評価式では以下の記号を使用する。

- $hop_{(n+1)}(t)$: 時刻 t までに $(n+1)$ 回以上ハンドオフが起こるとい条件のもとで、移動局の移動したホップ数。
- N_h^{LTn} : LTn 方式の CP 間隔における基地局 BS_{curr} と BS_{cp} の平均距離 (距離の期待値)。
- Nr_h^{LTn} : LTn 方式の誤りが発生する時刻 T_{cexp} における基地局 BS_{curr} と BS_{cp} の平均距離。

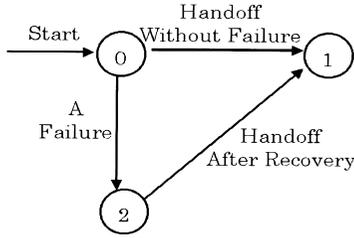


図2 マルコフモデル
Fig. 2 Markov model.

- $P_n(t)$: 時刻 t までに n 回ハンドオフが起こる確率.
- $P_n^+(t)$: 時刻 t までに n 回以上ハンドオフが起こる確率.

4.2 モデル

評価モデルは、3 状態マルコフモデルにより表現することができる [12]. ハンドオフ間隔における状態遷移図は図 2 のようになる. ただし、誤りはハンドオフ間隔においてたかだか 1 回しか発生しないものとする.

状態 0 はハンドオフ間隔の初期状態である. ハンドオフ間隔において、ライトイベントが発生する. 状態 0 から状態 1 への遷移は誤りが発生せずハンドオフが発生し終了した場合の遷移である. 誤りが発生した場合は、状態 0 から状態 2 に遷移し、回復を行う. その後、ハンドオフにより状態 1 に遷移し、終了する.

P_{02} は遷移確率で、ハンドオフ間隔に誤りが発生する確率である. t_f を誤りの発生する時刻, t_h をハンドオフの動作が始まる時刻とすると、式 (1) を得る.

$$P_{02} = P(t_f < t_h) = \int_0^\infty \int_{\tau_f}^\infty \lambda \mu e^{-\lambda \tau_f} e^{-\mu \tau_h} d\tau_h d\tau_f$$

$$= \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \tag{1}$$

また、CP 間隔において誤りの発生を仮定するとき、CP 間隔において誤り発生時までの平均時間は式 (2) となる.

$$T_{cexp} = \int_0^{T_c} \frac{t \lambda e^{-\lambda t}}{1 - e^{-\lambda T_c}} dt = \frac{1}{\lambda} - \frac{T_c e^{-\lambda T_c}}{1 - e^{-\lambda T_c}} \tag{2}$$

平均総合コストは、ハンドオフ動作の時間間隔内に、誤りが発生する場合と発生しない場合の両方のコストの和である. ここで、 C_{01} を状態 0 から状態 1 に遷移するコストとすると、平均総合コストは式 (3) のようになる. ただし、 C_r は回復操作のコストである.

$$C_t = (1 - P_{02})C_{01} + P_{02}(C_r + C_{01})$$

$$= C_{01} + P_{02}C_r \tag{3}$$

更に、 C_{01} は式 (4) のようになる.

$$C_{01} = C_h + (\text{CP 取得コスト}) + (\text{ログ取得コスト}) + (\text{CP 間隔に発生したイベントのコスト}) \tag{4}$$

以上より、各方式ごとに C_h, C_r を求め、式 (4), (3) の順に代入することにより、平均総合コスト C_t が求められる.

4.3 評価式の作成

具体的に評価式について示す. 誤りが発生せずにハンドオフが終了したときのコスト C_{01} , 回復操作のコスト C_r , 及び平均回復時間 $T_{recovery}$ を求める.

4.3.1 LLT 方式

[誤りがなくハンドオフが終了したときのコスト C_{01}]

C_{01} について、式 (4) に基づいて考える.

• CP 取得コスト

CP を取得する操作に関するコストは、移動局 m のシステム状態を無線ネットワークを通して基地局 BS_i に転送するコスト αC_c である. ハンドオフ間隔にライトイベントが発生する回数は r , CP 間隔にライトイベントが発生する回数は k である. これよりハンドオフ間隔に取得する CP 数は、 r/k である. よって、ハンドオフ間隔に CP を取得するコストは $\alpha C_c r/k$ である.

更に、ハンドオフ間隔において初めて CP を取得したときは、古い CP・ログ及びリンクリストを削除する. このとき、CP を記憶している基地局 BS_{cp} と現在 m を管理している基地局 BS_{curr} の平均距離は、時刻 θT_c に CP・ログを転送することに注意すると、 $\mu T_c - \mu \theta T_c$ となる. これよりコストは $(\mu T_c - \mu \theta T_c) C_m$ である. このコストは CP 間隔当りのコストなので、ハンドオフ間隔当りのコストに直すと、 $(\mu T_c - \mu \theta T_c) C_m r/k$ となる.

• ログ取得コスト

ログを取得する操作に関するコストは、無線ネットワークを通して基地局 BS_i に記憶されるライトイベントのコストである. ライトイベントのうち、他の端末からのメッセージに関する処理については、 BS_i に記憶された後、移動局 m に転送される. このため、他の端末から送られてくるメッセージのコストは考慮しなくてよい. ここで、 ρ はライトイベントに対するユーザ入力割合を示す. そのため、 ρr がハンドオ

フ間隔におけるユーザ入力の数, すなわち考慮すべきログの数である. よって, ログを取得するコストは $\rho\alpha C_l$ となる. 更に, 毎回のログ操作では, BS_i が m にコントロールメッセージを返送する. このコストは $\rho\alpha C_m$ である.

- ハンドオフ時のコスト

ハンドオフ時に, 基地局 BS_i は, BS_{i+1} に BS_i の位置情報を記憶するようにコントロールメッセージを送信する. このコストは C_m である.

- 時刻 θT_c 時のコスト

LLT 方式では, 時刻 θT_c , すなわち CP 間隔時間の θ 倍 ($0 \leq \theta \leq 1$) のときに, 通過してきた基地局に記憶してある CP・ログを, 基地局 BS_{th} へ転送する. この CP・ログを転送するコストについて, まず CP 間隔当りのコストで考えてみる. CP 間隔 T_c に取得するログの個数の期待値は $k-1$ である. これより, 時刻 θT_c において転送されるログの個数の期待値 ν_θ は, $\nu_\theta = \theta(k-1)$ となる. また時刻 θT_c に移動局を管理している基地局 BS_{th} と BS_{cp} の平均距離は, $\mu\theta T_c$ である. 時刻 θT_c に, 移動局 m は BS_{cp} に BS_{th} へ CP・ログを転送するようコントロールメッセージを送信する. このコントロールメッセージを受け取った BS_{cp} は, CP・ログの複製を転送する. これらのコストは, $\mu\theta T_c(\nu_\theta C_l + C_c + C_m)$ となる. 更に BS_{th} は, これらの CP・ログを受け取ると, もとの CP・ログ及びリンクリストを削除するようコントロールメッセージを送る. これらより CP 間隔当りのコストは $\mu\theta T_c(\nu_\theta C_l + C_c + 2C_m)$ となる. このコストをハンドオフ間隔当りのコストに直すと式 (5) となる.

$$\mu\theta T_c(\nu_\theta C_l + C_c + 2C_m)/(\mu T_c) \quad (5)$$

以上より, 状態 0 から状態 1 に遷移するコストは式 (7) のようになる.

$$\begin{aligned} C_{01} &= \alpha C_{cr}/k + (\mu T_c - \mu\theta T_c)C_{mr}/k + \rho\alpha C_l \\ &\quad + \rho\alpha C_m + C_m + \mu\theta T_c(\nu_\theta C_l + C_c \\ &\quad + 2C_m)/(\mu T_c) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &= \alpha C_{cr}/k + (1 - \theta)C_m + \rho\alpha C_l \\ &\quad + \rho\alpha C_m + C_m + \theta(\nu_\theta C_l + C_c + 2C_m) \end{aligned} \quad (7)$$

[回復操作のコスト C_r]

回復する操作のコストは, 時刻 θT_c 以前に誤りが発生した場合と, それ以後に誤りが発生した場合の 2 通りについて検討する必要がある.

- 時刻 θT_c 以前に誤りが発生した場合

移動局 m で誤りが発生すると, m はシステムを再起動し, 無線ネットワークを通して CP・ログを要求する req メッセージを基地局 BS_{curr} に送る. そして, BS_{curr} は有線ネットワークを通してコントロールメッセージを基地局 BS_{cp} へ転送する. ここで, $\mu T_{(0-\theta)exp}$ は時刻 θT_c までに誤りが発生したときの BS_{cp} と BS_{curr} の平均距離を表す. これらの転送コストは $(\mu T_{(0-\theta)exp} + \alpha)C_m$ となる.

コントロールメッセージを受け取ると, BS_{cp} は m に CP・ログの複製を転送する. 誤り発生時までに記憶されたログの個数の期待値 ν' は $\nu' = (k-1)/2$ である [12]. これより, 時刻 θT_c 以前に誤りが発生したときまでに取得したログの個数の期待値 ν'_{pre} を $\nu'_{pre} = \theta(k-1)/2$ とする. よって, この転送コストは $(\mu T_{(0-\theta)exp} + \alpha)(C_c + \nu'_{pre} C_l)$ となる.

以上より, 時刻 θT_c 以前に誤りが発生した場合のコスト $C_{r_{pre}}$ は式 (8) のように表される.

$$C_{r_{pre}} = (\mu T_{(0-\theta)exp} + \alpha)(C_m + C_c + \nu'_{pre} C_l) \quad (8)$$

また, 時刻 θT_c までに誤りが発生する平均時間 $T_{(0-\theta)exp}$ は, 式 (9) となる.

$$\begin{aligned} T_{(0-\theta)exp} &= \int_0^{\theta T_c} \frac{t\lambda e^{-\lambda t}}{(1 - e^{-\lambda\theta T_c})} dt \\ &= \frac{1 - e^{-\lambda\theta T_c}}{\lambda(1 - e^{-\lambda\theta T_c})} - \frac{\theta T_c e^{-\lambda\theta T_c}}{(1 - e^{-\lambda\theta T_c})} \end{aligned} \quad (9)$$

- 時刻 θT_c 以後に誤りが発生した場合

LLT 方式では, 時刻 θT_c に CP・ログの転送が行われることに注意して, コストを考える.

誤り発生後, 移動局 m は無線ネットワークを通して, 基地局 BS_{cp} へコントロールメッセージを転送する. 誤り発生時に m を管理している基地局 BS_{curr} と BS_{cp} の平均距離は, $(\mu T_{(\theta-c)exp} - \mu T_c\theta)$ となる. このため, コントロールメッセージを転送するコストは, $(\mu T_{(\theta-c)exp} - \mu T_c\theta + \alpha)C_m$ となる.

コントロールメッセージを受け取った BS_{cp} は, CP・ログの複製を m に転送する. ここで, 時刻 θT_c 以後に誤りが発生したときまでに取得したログの個数の期待値 ν'_{post} を $\nu'_{post} = \theta(k-1) + (1-\theta)(k-1)/2$ とする. これより, このときのコストは $(\mu T_{(\theta-c)exp} - \mu T_c\theta + \alpha)(C_c + \nu'_{post} C_l)$ となる.

以上より, 時刻 θT_c 以後に誤りが発生した場合の回

復操作のコスト C_{rpost} は式 (10) となる .

$$C_{rpost} = (\mu T_{(\theta-c)exp} - \mu T_c \theta + \alpha) \times (C_m + C_c + \nu'_{post} C_l) \quad (10)$$

ここで, 時刻 θT_c 以後に誤りが発生するまでの平均時間 $T_{(\theta-c)exp}$ は, 式 (11) となる .

$$\begin{aligned} T_{(\theta-c)exp} &= \int_{\theta T_c}^{T_c} \frac{t \lambda e^{-\lambda t}}{(e^{-\lambda \theta T_c} - e^{-\lambda T_c})} dt \\ &= \frac{e^{-\lambda \theta T_c} - e^{-\lambda T_c}}{\lambda(e^{-\lambda \theta T_c} - e^{-\lambda T_c})} + \frac{\theta T_c e^{-\lambda \theta T_c} - T_c e^{-\lambda T_c}}{(e^{-\lambda \theta T_c} - e^{-\lambda T_c})} \end{aligned} \quad (11)$$

C_{rpre} と C_{rpost} を求めることで, 全体の回復コスト C_r を求めることができる . 時刻 $0 \leq t \leq \theta T_c$ に誤りが発生する確率は $(1 - e^{-\lambda \theta T_c}) / (1 - e^{-\lambda T_c})$ となる . これより, 平均回復コスト C_r は式 (12) となる .

$$C_r = \frac{1 - e^{-\lambda \theta T_c}}{1 - e^{-\lambda T_c}} C_{rpre} + \left(1 - \frac{1 - e^{-\lambda \theta T_c}}{1 - e^{-\lambda T_c}}\right) C_{rpost} \quad (12)$$

[平均回復時間 $T_{recovery}$]

平均回復時間についても, 回復コストと同様, 時刻 θT_c 以前に誤りが発生した場合と, それ以後に誤りが発生した場合を考慮すると, 式 (13) となる .

$$\begin{aligned} T_{recovery} &= T_{wireless} + \left(\frac{1 - e^{-\lambda \theta T_c}}{1 - e^{-\lambda T_c}} \mu T_{(0-\theta)exp}\right) \\ &\quad + \left(1 - \frac{1 - e^{-\lambda \theta T_c}}{1 - e^{-\lambda T_c}}\right) (\mu T_{(\theta-c)exp} - \mu T_c \theta) T_{wired} \end{aligned} \quad (13)$$

4.3.2 LTn 方式

LLT 方式の評価式と同様に求める .

[誤りがなくハンドオフが終了したときのコスト C_{01}]

● CP 取得コスト

CP を取得する操作に関するコストは, LLT 方式と同様, $\alpha C_{cr} / k$ である .

一方, ハンドオフ間隔において初めて CP を取得したとき, 古い CP・ログ及びリンクリストを削除するコストについて考えてみる . このとき, CP を記憶している基地局 BS_{cp} と, 現在 m を管理している基地局 BS_{curr} の平均距離を N_h^{LTn} とする . これより, こ

れらを削除するためにコントロールメッセージを転送するコストは, $N_h^{LTn} C_m$ となる . このコストは CP 間隔当りのコストなので, ハンドオフ間隔当りのコストに直すと, $N_h^{LTn} C_m r / k$ である .

ここで, N_h^{LTn} は移動局が最新の CP を取得するときの BS_{cp} と BS_{curr} の平均距離である . LTn 方式では BS_{cp} と BS_{curr} の距離をたかだか n ホップとなるように制御している . そのため, N_h^{LTn} は式 (14) となる .

$$N_h^{LTn} = n P_n^+(T_c) + \sum_{i=0}^{n-1} i P_i(T_c) \quad (14)$$

また, $P_i(t)$ は, 移動局において時刻 t までに i 回ハンドオフが発生する確率を表し, この確率は定義よりポアソン分布に従う . 更に $P_n^+(t)$ は, $P_i(t)$ より式 (15) にて得ることができる .

$$P_n^+(t) = 1 - \sum_{i=0}^{n-1} P_i(t) \quad (15)$$

● ログ取得コスト

ログを取得する操作に関するコストは, LTn 方式と同様, $\rho r \alpha C_l + \rho r \alpha C_m$ である .

● ハンドオフ時のコスト

LTn 方式におけるハンドオフ時のコストは, CP 間隔における移動局の移動距離により, 二つの場合に分けて考える .

一つは, 移動局 m が CP 間隔において, $l (\leq n)$ ホップ移動する場合である . LTn 方式では, CP 間隔に n ホップ以上 m が移動する場合は, CP・ログはハンドオフ時に基地局 BS_{curr} の方向に転送される . しかしながら, もし m が n ホップ以上移動しない場合は, 基地局 BS_i は BS_{i+1} に, BS_i の位置情報を記憶するようにコントロールメッセージを送信する .

もう一つは, m が CP 間隔に $l (> n)$ ホップ移動する場合である . この場合は, CP・ログはハンドオフ時に BS_{curr} の方向へ 1 ホップ転送され, 基地局 BS_{cp} と BS_i の距離は常に n ホップを保つ . 1 回のハンドオフにおいて転送されるログの個数の期待値 ν を $\nu = (k - 1) / 2$ とする [12] .

上記の二つの場合を考えると, ハンドオフ時のコストは式 (16) となる .

$$\begin{aligned} C_h = P_n^+(T_c) &\left\{ \frac{n C_m}{hop_{(n+1)}(T_c)} \right. \\ &\left. + \frac{(hop_{(n+1)}(T_c) - n) (\nu C_l + C_c + 2 C_m)}{hop_{(n+1)}(T_c)} \right\} \end{aligned}$$

$$+ (1 - P_n^+(T_c)) C_m \quad (16)$$

ここで、 $hop_{(n+1)}(t)$ は、時刻 t までに $n+1$ 回以上ハンドオフが発生したときの、移動局の移動距離の期待値を示す。これは式 (17) により得られる。

$$hop_{(n+1)}(t) = \frac{\mu t - \sum_{i=0}^n iP_i(t)}{P_{(n+1)}^+(t)} \quad (17)$$

以上より、状態 0 から状態 1 に遷移するコストは式 (18) ~ (22) のようになる。

$$C_{01} = \frac{r\alpha C_c}{k} + \frac{rN_h^{LTn} C_m}{k} + \rho\alpha C_l + \rho\alpha C_m + \rho\alpha C_m + C_h \quad (18)$$

$$C_h = P_n^+(T_c) \left\{ \frac{nC_m}{hop_{(n+1)}(T_c)} + \frac{(hop_{(n+1)}(T_c) - n)(\nu C_l + C_c + 2C_m)}{hop_{(n+1)}(T_c)} \right\} + (1 - P_n^+(T_c)) C_m \quad (19)$$

$$hop_{(n+1)}(t) = \frac{\mu t - \sum_{i=0}^n iP_i(t)}{P_{(n+1)}^+(t)} \quad (20)$$

$$N_h^{LTn} = nP_n^+(T_c) + \sum_{i=0}^{n-1} iP_i(T_c) \quad (21)$$

$$P_n^+(t) = 1 - \sum_{i=0}^{n-1} P_i(t) \quad (22)$$

[回復操作のコスト C_r]

もし、CP 間隔において誤りが発生する場合、誤りが発生する時刻の期待値は、 T_{cexp} である。 T_{cexp} までに移動局が移動する平均距離を、 Nr_h^{LTn} とする。

誤り発生時に、移動局 m は基地局 BS_{cp} にコントロールメッセージを転送し、 BS_{cp} は m に CP・ログを転送する。これより、回復コストは式 (23) となる。

$$C_r = (Nr_h^{LTn} + \alpha)(\nu' C_l + C_c + C_m) \quad (23)$$

ここで、 Nr_h^{LTn} は、式 (24) より得る。

$$Nr_h^{LTn} = nP_n^+(T_{cexp}) + \sum_{i=0}^{n-1} iP_i(T_{cexp}) \quad (24)$$

[平均回復時間 $T_{recovery}$]

平均回復時間についても、回復コストと同様、 T_{cexp} までに移動局 m が移動した平均距離 Nr_h^{LTn} を考慮すると、平均回復時間は式 (25) となる。

$$T_{recovery} = T_{wireless} + Nr_h^{LTn} T_{wired} \quad (25)$$

4.3.3 LP 方式, LL 方式

LLT 方式, LTn 方式と同様に、LP 方式, LL 方式の評価式を式 (26) ~ (32) のように求めることができる。

• LP 方式

$$C_{01} = \frac{r\alpha C_c}{k} + \rho\alpha C_l + \rho\alpha C_m + \nu C_l + C_c + C_m \quad (26)$$

$$C_r = \alpha(\nu' C_l + C_c + C_m) \quad (27)$$

$$T_{recovery} = T_{wireless} \quad (28)$$

• LL 方式

$$C_{01} = \frac{r\alpha C_c}{k} + \rho\alpha C_l + \rho\alpha C_m + \mu T_c C_m r / k + C_m \quad (29)$$

$$C_r = (N_h + \alpha)(\nu' C_l + C_c + C_m) \quad (30)$$

$$T_{recovery} = T_{wireless} + N_h T_{wired} \quad (31)$$

$$N_h = \mu T_{cexp} \quad (32)$$

5. 結果

以上の評価式において、次のように変数を設定する。 $C_c = 1$ とし、これより $\gamma = C_l/C_c = C_l$ 、 $\epsilon = C_m/C_c = C_m$ となる。このとき、 $\epsilon = 10^{-4}$ とする。更に、 $\rho = 0.5$ 、 $T_{wired} = 1$ 、 $T_{wireless} = 10$ とする。

5.1 最適な CP 間隔

記号の定義より、CP 当りのライトイベント数 k は、 T_c に等しい。これより CP 間隔 T_c を決定する際、平均総合コスト C_t を最小とする k を選択する。この k を最適な CP 間隔と呼び、 K_{optY} ($Y \in \{LP, LL, LLT, LTn\}$) と示す。この k は、誤り率 λ 、相対ログコスト $\gamma = C_l/C_c$ 、無線と有線の転送コストの比 α 、通信移動率 r の関数である。

各方式の K_{optY} は、式 (33) を満たす C_{tY} を与える k より得られる。ただし、 C_{tY} は Y 方式の平均総合コストを示す。この式によって、 C_{tY} を最小とする k の値を得ることが可能である。

$$\frac{\partial C_{tY}}{\partial k} = 0 \quad \frac{\partial^2 C_{tY}}{\partial k^2} < 0 \quad (33)$$

例として、図 3 に K_{optLL} と r 、 α の関係を示す。 r の増加とともに、 K_{optLL} が増加するのがわかる。ハンドオフ当りのライトイベントの数 r が増加すると、移動局の移動速度が遅くなり、ハンドオフ間隔当りの CP 数が増加する。その結果、平均総合コストが増加する。このため、CP 間隔を増加させ平均総合コストを少なく抑える。また α が増加したときは、CP 取得

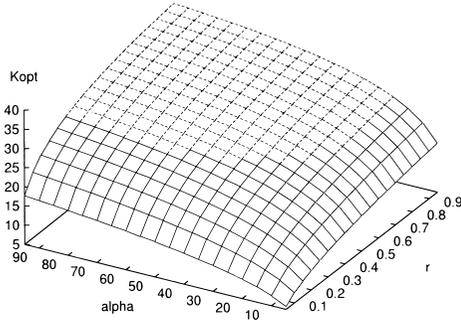


図3 最適な CP 間隔 $r - \alpha$ ($\lambda = 10^{-2}, \gamma = 0.1$)
Fig.3 Optimum CP interval.

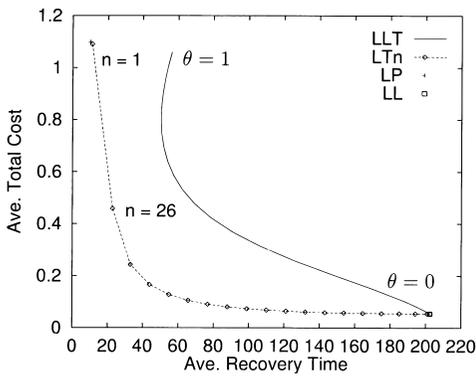


図4 平均総合コストと平均回復時間 ($\lambda = 10^{-2}, \alpha = 10, r = 10^{-2}$)
Fig.4 Ave. total cost : Ave. recovery time.

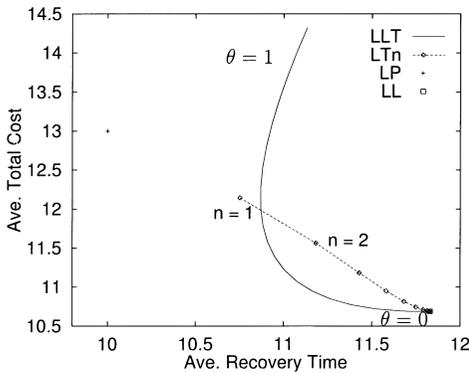


図5 平均総合コストと平均回復時間 ($\lambda = 10^{-2}, \alpha = 10, r = 10^1$)
Fig.5 Ave. total cost : Ave. recovery time.

のコストが増加する．そこで平均総合コストを少なく抑えるため，CP 間隔を増加させる．同様にして， γ, λ の関係を求めることができる．LP, LLT, LTn 方式においても，CP 間隔に対する $r - \alpha, \gamma - \lambda$ の関係について同様な結果を得る．本論文では， $\gamma = C_l/C_c = 0.1$ と仮定する．

以下では，この最適な CP 間隔 K_{optY} を使用し，通信移動率 r ，誤り率 λ ，無線と有線の転送コストの比 α を変化させて，平均総合コスト C_t ，平均回復時間 $T_{recovery}$ の関係を調べる．

5.2 平均総合コストと平均回復時間

平均総合コストと平均回復時間の関係を，図4～図7に示す．図4は，ある λ, r, α の条件下での関係を示している．図4の条件に対して，通信移動率 r を大きくしたもの（図5），誤り率 λ を小さくしたも

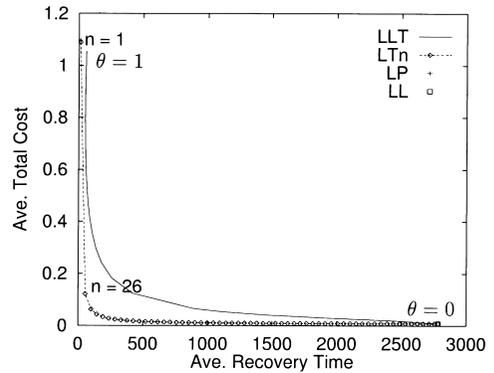


図6 平均総合コストと平均回復時間 ($\lambda = 10^{-5}, \alpha = 10, r = 10^{-2}$)
Fig.6 Ave. total cost : Ave. recovery time.

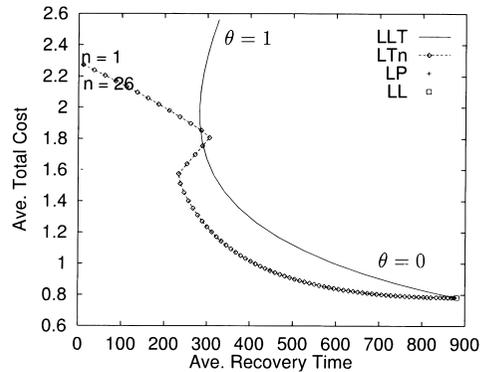


図7 平均総合コストと平均回復時間 ($\lambda = 10^{-2}, \alpha = 500, r = 10^{-2}$)
Fig.7 Ave. total cost : Ave. recovery time.

の(図6),有線ネットワークと無線ネットワークの転送コストの比 α を大きくしたもの(図7)を示す.ここで,LLT方式においては, θ の値を0から1まで変化させたときの様子を示している.LTn方式においては, n の値を1より変化させ,25間隔ごとにプロットした場合(図4,図6,図7),及び1間隔ごとプロットした場合(図5)について示す.

グラフより,LP方式は平均総合コストが大きく,平均回復時間が小さい.またLL方式は平均総合コストが小さく,平均回復時間は大きい.一方で,LLT,LTn方式ではそれぞれ θ, n を変えることにより,LP方式とLL方式における平均総合コスト,平均回復時間の両方において中間の値をとることができる.また,LLT方式は $\theta = 0$ で,LTn方式はある n 以上で,LL方式にほぼ等しくなる.

通信移動率 r を大きくしたとき(図5)は,図4と比較して平均総合コストが全体的に大きくなる.平均回復時間はLP方式では変化しないが,LL方式では小さくなる.

また,誤り率 λ を小さくしたとき(図6)は,図4と比較して平均総合コストについてはあまり変化しない.平均回復時間についてはLP方式ではあまり変化せず,LL方式では大きくなる.

更に,無線ネットワークと有線ネットワークでメッセージを転送するコストの比 α を大きくしたとき(図7)は,平均総合コストは全体的に増え,平均回復時間はLP方式ではあまり変化せず,LL方式では大きくなる.

一方で,図5~図7のいずれの場合でも,LLT方式は θ の値を,LTn方式では n を変化させることにより,LP方式とLL方式の中間の値をとることができる.

5.3 LTn方式の解析

図7において,LTn方式のグラフが奇妙な振舞いを示しているのがわかる.これは,図4,図6においても, n のプロット間隔を小さくした場合に,同様に観察できる.以下,これについて解析する.

LTn方式において, n の増加とは逆に,回復時間が減少することがある.これは最適なCP間隔を用いるためである.詳しく説明するために,最適なCP間隔と平均総合コスト,平均回復時間の関係について示す.図7と同じ条件で,CP間隔(k)及びLTn方式の n に対する平均総合コスト(図8),平均回復時間を決定している項 Nr_h (図9)をグラフに示す.また,最適

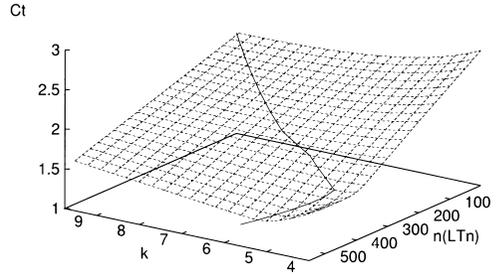


図8 CP間隔と $n(LTn)$ と平均総合コスト (C_t) ($\lambda = 10^{-2}, \alpha = 500, r = 10^{-2}$)

Fig.8 CP interval : $n(LTn)$: Ave. total cost.

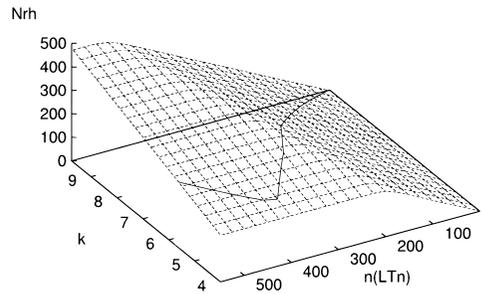


図9 CP間隔と $n(LTn)$ と平均回復時間 (Nr_h) ($\lambda = 10^{-2}, \alpha = 500, r = 10^{-2}$)

Fig.9 CP interval : $n(LTn)$: Ave. recovery time.

なCP間隔に関するグラフの変化を実線で示す.

最適なCP間隔は,平均総合コストを最小とする k の値を選択する.よって,図8のように, k に対して最適なCP間隔をたどることができる.最適なCP間隔は, n の増加とともに減少し始め,その後増加に転じる.これは,ハンドオフ時のコストとCP取得時のコストとの関係から,このような振舞いとなる.

これゆえ,最適なCP間隔のグラフを図9上に示すと,ある n まで平均回復時間(Nr_h)は増加し,それ以降減少,そして再びある n より増加しているのがわかる.

以上より,最適なCP間隔をコストの面から決定するために,平均回復時間に関する振舞いが図7のようになることがわかる.

6. 考 察

LP方式では,条件を変えても平均回復時間は小さくほぼ一定であり,平均総合コストが大きい.一方LL方式は,平均総合コストは小さく,平均回復時間が大きい.

文献 [12] では、誤り率 λ が小さいとき、すなわち誤りが少ない場合は、平均総合コストから考えて、LL 方式が良い方法であると結論している。しかし、平均回復時間については考慮されていないので、LLT, LTn 方式を適用すれば、平均回復時間について考慮することが可能である。一方、 λ が大きいとき、すなわち誤りが多く発生する場合は、平均回復時間を考慮して、LP 方式が良い方法であるとしている。しかし、平均総合コストが増加してしまうので、LLT, LTn 方式を適用することで総合コストを減少させることができる。

このように LLT, LTn 方式は、他の方式の中間の値をとることができる。LLT 方式では、CP 間隔時間に基づいて θ の値を変えることにより、より細かく平均総合コストと平均回復時間の関係を変化させることができるという利点をもつ。一方、LTn 方式では、移動局の移動した距離に基づいて、二つの関係を変化させることができるという利点をもつ。また、評価結果より LLT 方式は通信移動率が大きいとき (図 5)、LTn 方式では通信移動率が小さいとき (図 4, 図 6, 図 7) に、特に有効であることがわかる。

また、本論文では、CP 間隔について平均総合コストを最小とするものを CP 間隔として使用した。この CP 間隔を変化させた場合については、平均回復時間、平均総合コストは変化するが、各方式の相対関係は変化しない。よって今回提案した方式が有効であると考えられる。

7. む す び

本論文では、移動体環境における新たな誤り回復方式である LLT 方式及び LTn 方式を提案した。これらの方式は、システムの要求に応じて、回復時間と総合コストのバランスをとることができる。この点について、条件を変化させて評価することにより有効性を確かめた。

今後、モデルをより実際のシステムに近づけて評価を行う。特に、移動局の移動パターンや、複数の移動局及び基地局で構成されたネットワークにおける CP の一貫性、及び帯域の制限のため CP 数の最小化について、考慮し検討していく必要がある。

謝辞 本論文に対して、有益なる御指摘を賜った査読者各位に心より感謝の意を表する。

文 献

- [1] 水野忠則, 太田 賢, “モバイルコンピューティング特集” 信学誌, vol.80, no.4, pp.318-369, 1997.

- [2] S. Rangarajan, K. Ratnam, and A.T. Dabhura, “A fault-tolerant protocol for location directory maintenance in mobile networks,” Proc. FTCS-25, pp.164-173, 1995.
- [3] S. Biaz and N.H. Vaidya, “Tolerating visitor location register failure in mobile environments,” 17th IEEE Symp. Reliable Distributed Systems-SRDS'98, pp.109-117, 1998.
- [4] Budiarto, K. Harumoto, M. Tsukamoto, S. Nishio, and T. Takine, “On strategies for allocating replicas of mobile databases,” IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E81-D, no.1, pp.37-46, Jan. 1998.
- [5] O. Wolfson and Y. Huang, “Competitive analysis of caching in distributed databases,” IEEE Trans. Parallel & Distributed Syst., vol.9, no.4, pp.391-401, 1988.
- [6] 中村健二, 宮西洋太郎, 佐藤文明, 水野忠則, “ドメインリダに基づく複製管理方式の評価と改良,” 情処学論, vol.39, no.3, pp.716-724, 1998.
- [7] T. Yoshida, H. Higaki, and M. Takizawa, “Hybrid checkpointing in mobile computing system,” 情処研報, vol.97, no.13, pp.1-6, 1997.
- [8] H. Higaki, K. Shinchi, and M. Takizawa, “Recovery protocol for hybrid checkpointing,” 情処研報, vol.98, no.55, pp.25-30, 1998.
- [9] R. Prakash and M. Singhal, “Low-cost checkpointing and failure recovery in mobile computing systems,” IEEE Trans. Parallel & Distributed Syst., vol.7, no.10, pp.1035-1048, 1996.
- [10] A. Acharya and B.R. Badrinath, “Checkpointing distributed applications on mobile computers,” IEEE Proc. 3rd International Conference on PDIS, pp.73-80, 1994.
- [11] 寺田雅人, 井上美智子, 増澤利光, 藤原秀雄, “分散移動システムにおける全域チェックポイントについて,” 信学技報, COMP98-74, 1999.
- [12] D.K. Pradhan and P. Krishna, “Recoverable mobile environment: Design and trade-off analysis,” Proc. FTCS-26, pp.16-25, 1996.

(平成 11 年 5 月 26 日受付, 9 月 29 日再受付)



八木 幹雄 (学生員)

平 10 千葉大・工・情報卒。現在、同大学院修士課程在学中。分散・並列処理におけるフォールトトレラントシステム、特に移動体環境における誤り回復の研究に従事。



金子 敬一 (正員)

昭 60 東大・工・計数卒・昭 62 同大大学院修士課程了・同年同大・工・計数助手・平 8 千葉大・工・情報講師・工博・関数プログラミング言語，部分計算，並列計算等の研究に従事・ACM，情報処理学会，日本ソフトウェア科学会各会員．



伊藤 秀男 (正員)

昭 44 千葉大・工・電気卒・同年日本電気入社・昭 46 木更津高専助手・昭 48 千葉大・工・助手・昭 61 同助教授・平 2 同情報教授・工博・VLSI の故障検査と検査容易化設計，セルフチェックシステム設計，フォールトトレラント並列処理システム設計，VLSI の欠陥回避等の研究に従事・情報処理学会，IEEE Computer Society 各会員．