

## 誤り回復機能をもつ移動体通信システムの信頼性

木村 充位<sup>†</sup> 安井 一民<sup>††</sup>  
中川 覃夫<sup>††</sup> 石井 直宏<sup>†</sup>

近年、コンピュータ通信技術の著しい進展にともない、移動体通信システムが幅広く普及し、使用されてきている。移動体環境における安定かつ高速なネットワーク通信を実現するために、移動体通信システムの高信頼化の問題は非常に重要であり、その誤り回復方法として、LP (Logging Pessimistic)、LL (Logging-Lazy)、LT (Logging Trickle) の3方式が提案され、いろいろな視点から考察と検討が行われている。しかし、これらのモデルでは、システムが動作を開始してから、ハンドオフが発生するまでの動作にのみ着目しており、端末の移動性がシステムの評価に十分反映されていない。ここでは、誤り回復機能としてLP方式を適用した移動体通信システムの高信頼化の問題を考察する。すなわち、ハンドオフ発生後のシステムの通信処理も考慮し、システムが動作を開始してから、次のチェックポイントを設定するまでの動作に着目した確率モデルを構築する。そのとき、チェックポイント設定までの平均時間、移動局のハンドオフ回数、通信エラー発生回数などを解析的に導出する。さらに、期待費用を求め、それを最小にする2つの最適方策について議論する。

### Reliability Considerations of a Mobile Network System with Error Recovery Schemes

MITSUTAKA KIMURA,<sup>†</sup> KAZUMI YASUI,<sup>††</sup> TOSHIO NAKAGAWA<sup>††</sup>  
and NAOHIRO ISHII<sup>†</sup>

As a computer communication technology has remarkably developed, mobile computing systems have widely spread and have been used in many practical fields. Problems for improving the reliability of mobile computing systems are very important to realize stable and high-speed network communications in mobile environment. Mobile stations often may become unavailable due to communication errors, which have been generated by disconnections, wireless link failures and so on. Recently, error recovery schemes considering the feature of mobile environment have been proposed by several authors. This paper forms a stochastic model of a mobile network system which reflects actual behaviors of mobile stations. The reliability measures such as the mean time to checkpointing, the expected numbers of roll-back recoveries for communication errors and the expected numbers of handoff are obtained. Further, the expected costs are derived and optimal checkpoint intervals which minimize them are analytically discussed.

#### 1. はじめに

コンピュータ通信技術の著しい進展にともない、移動体通信システムが幅広く普及し、使用されてきている。移動体環境では、安定かつ高速なネットワーク通信を実現するために、さまざまな高信頼化の問題が重要となり、移動端末の位置情報管理方法<sup>2)~4)</sup>や情報の

停滞を防ぐ方式<sup>5)</sup>、さらに分散システムにおける誤り回復方式<sup>6)~9)</sup>など、障害に対応した研究が数多く行われている。最近では、無線通信における伝送帯域幅の制限などによって、ネットワーク接続時間が長時間になり通信エラーが発生する問題や、移動端末のハンドオフにともなって、ネットワーク接続中に瞬断が発生するという問題などが提起されている<sup>1)</sup>。

分散システムにおける一般的な高信頼化の方法として、チェックポイント方式やメッセージログ方式がある。いわば、ある移動端末におけるデータ処理過程において、データの誤りや消失などが発生した場合、その処理過程を直前のチェックポイント時点へロールバックし、その時点から処理を再実行する。さらに、一時

<sup>†</sup> 名古屋工業大学知能情報システム学科  
Department of Intelligence and Computer Science,  
Nagoya Institute of Technology

<sup>††</sup> 愛知工業大学経営工学科  
Department of Industrial Engineering, Aichi Institute  
of Technology

的に保存しておいたメッセージログによって処理過程を障害発生直前に戻して処理を継続実行していく方式である<sup>6)~9)</sup>。

他方、移動体環境における誤り回復の方法として、LP( Logging Pessimistic ), LL( Logging-Lazy ), LT( Logging Trickle )の3つの誤り回復方式が提案され、いろいろな視点から考察と検討が行われている<sup>8)</sup>。文献9)では、LL方式とLT方式を組み合わせたLLT( Logging-Lazy-Trickle )方式、さらにLT方式を拡張したLTn方式を提案し、平均総合コストや平均回復時間などについて評価を行っている。しかし、これらのモデルでは、システムが動作を開始してから、ハンドオフが発生するまでの動作にのみ着目しており、端末の移動性がシステムの評価に十分反映されていない。

ここでは、誤り回復機能としてLP方式を適用した移動体通信システムの高信頼化の問題を考察する。すなわち、ハンドオフ発生後のシステムの通信処理も考慮し、システムが動作を開始してから、次のチェックポイントを設定するまでの動作に着目した確率モデルを構築する。そのとき、チェックポイント設定までの平均時間、移動局のハンドオフ回数、通信エラー発生回数などを、マルコフ再生過程<sup>10)</sup>の理論を応用して解析的に導出する。さらに、移動局のハンドオフ回数や通信エラー発生にともなうロールバック回数を考慮した期待費用を求め、それを最小にする2つの最適方策を提案し、議論する。

## 2. モデルの設定

移動体通信システム概念図を、図1に示す。

複数の移動局と複数の中継基地局、1つの固定局で構成される移動体通信システムを考える。中継基地局は固定局を介して有線ネットワークを形成する。移動局Mはつねに1つの中継基地局により管理され、他の固定端末や移動局とデータ通信を行う場合には、中継基地局  $BS_i$  ( $i = 0, 1, \dots$ ) を通じて通信を行う。なお、移動局と中継基地局  $BS_i$  間は無線通信を行う。各中継基地局が移動局を管理できる領域をセルと呼ぶ。移動局はセルからセルへ移動し、このとき移動局を管理する中継基地局は  $BS_i$  から  $BS_{i+1}$  へ移動する。この移動にかかわる処理をハンドオフと呼ぶ。

ここでは、1つの固定局と複数の中継基地局  $BS_i$  ( $i = 0, 1, \dots$ ) で構成される移動体通信システムにおいて、あるセル内の1つの移動局に着目し、その注目する移動局Mがチェックポイントを設定した直後から動作を開始し、次のチェックポイントを設定するまでの動作についてモデル化を行う。移動局の誤り回復の方法は

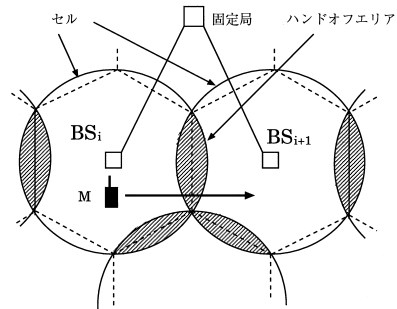


図1 移動体通信システム概念図

Fig. 1 Outline of a mobile network system.

文献8)のLP方式を適用し、この方式にともなう諸機能についてはすべて可能であることを前提とする。

LP方式は、移動局のハンドオフ時点で管理基地局  $BS_i$  から  $BS_{i+1}$  へ移動局のチェックポイントやログを転送する方式であり、つねに移動局を管理する基地局がチェックポイントやログを保持している。移動局に誤りが発生した場合には、移動局は管理基地局へチェックポイントとログを要求し、それらを受信した後、移動局の処理過程を直前のチェックポイント時点へロールバックし、メッセージログによって処理過程を障害発生直前に戻して処理を継続実行していく方式である<sup>8)</sup>。

- (1) システムは、最初のチェックポイント設定直後、時刻0で動作を開始し、 $m$  ( $m = 1, 2, \dots$ ) 回の通信処理完了時点において、移動局Mを管理している中継基地局  $BS_i$  に次のチェックポイントを設定する。すなわち、移動局Mのプロセスの状態を中継基地局へ転送する。
- (2) 移動局Mは、中継基地局  $BS_0$  から移動を開始する。移動局と中継基地局間の通信要求は、確率時間分布  $A(t)$  (平均  $\alpha$ ) に従って発生し、その通信処理に要する時間は指数分布  $1 - e^{-at}$  ( $a > 0$ ) に従うものとする。
- (3) 移動局には、指数分布  $1 - e^{-\lambda t}$  ( $0 < \lambda < \infty$ ) に従って通信エラーが発生し、このとき、プロセスは直前のチェックポイント時点へロールバックする。いわば、通信エラーが発生した場合、移動局は接続している中継基地局から転送された直前のチェックポイント時点で復帰し、再生される。ここで、移動局のこれらの処理に要する時間は、一般の確率時間分布  $V(t)$  (平均  $v$ ) に従うものとし、簡便化のため、同一セル内における他の移動局への影響は考慮しないものと仮定する。
- (4) 移動局Mは基地局  $BS_i$  から次の基地局  $BS_{i+1}$

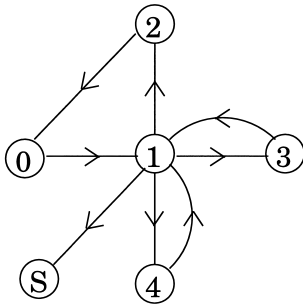


図2 システムの状態推移図

Fig. 2 Transition diagram between system states.

へ移動するとき、すなわち、移動局がハンドオフエリアに入った時点で、システムの通信処理は一時中断する。ここで、ハンドオフの発生間隔の時間分布を  $U(t)$  (平均  $1/u$ ) とし、中継基地局間のチェックポイントの転送などハンドオフ処理に要する経過時間分布は  $G(t)$  (平均  $1/\mu$ ) に従うものとする。

以上の仮定のもとで、チェックポイントをどのように設定するのかを議論する。そのため、システムが時刻 0 で動作を開始してから、次のチェックポイントを設定するまでの動作に注目し、システムの状態のよう定義する。

- 状態 0: システムの開始または再開始。
- 状態 1: 移動局の通信要求の発生。
- 状態 2: 移動局の通信エラー発生。
- 状態 3: ハンドオフの発生。
- 状態 4: 1 つの通信処理終了。
- 状態 S:  $m$  回の通信処理終了。

各状態は、状態 S を吸収状態とするマルコフ再生過程<sup>10)</sup>を形成し、各状態間の推移は図 2 のように表される。

マルコフ再生過程における各状態間の推移確率分布を  $Q_{i,j}(t)$  ( $i = 1; j = 2, 3, 4$ ) とし、そのラプラス・ステルチェス (LS) 変換を  $Q_{ij}^*(s) \equiv \int_0^\infty e^{-st} dQ_{ij}(t)$  ( $s > 0$ ) とすると、次の式 (1) ~ (3) を得る。

$$Q_{1,2}^*(s) = \int_0^\infty \lambda e^{-(s+\lambda+a)t} \bar{U}(t) dt = \frac{\lambda}{s + \lambda + a} [1 - U^*(s + \lambda + a)], \quad (1)$$

$$Q_{1,3}^*(s) = \int_0^\infty e^{-(s+\lambda+a)t} dU(t) = U^*(s + \lambda + a), \quad (2)$$

$$Q_{1,4}^*(s) = \int_0^\infty a e^{-(s+\lambda+a)t} \bar{U}(t) dt = \frac{a}{s + \lambda + a} [1 - U^*(s + \lambda + a)]. \quad (3)$$

ここで、一般に  $\bar{\Phi}(t) \equiv 1 - \Phi(t)$  とし、 $\Phi(t)$  の LS 変換を  $\Phi^*(s)$  とおく。

さて、システムが時刻 0 で動作を開始してから、次のチェックポイントを設定するまでの平均時間を求める。設定までの経過時間分布を  $H_{0,S}(t)$  とすると、

$$H_{0,S}(t) = \sum_{i=1}^\infty [Z(t) * V(t)]^{(i-1)} * [A(t) * M(t)]^{(m)}.$$

ここで、 $*$  は分布関数のたたみ込みを表し、 $\Phi^{(i)}(t)$  は  $\Phi(t)$  の  $i$  重たたみ込みを表す。すなわち、 $\Phi^{(i)}(t) \equiv \Phi^{(i-1)}(t) * \Phi(t)$ ,  $\Phi_1(t) * \Phi_2(t) \equiv \int_0^t \Phi_1(t-u) d\Phi_2(u)$ ,  $\Phi^{(0)}(t) \equiv 1$  である。また、

$$M(t) \equiv \sum_{i=1}^\infty [Q_{13}(t) * G(t)]^{(i-1)} * Q_{14}(t),$$

$$X(t) \equiv \sum_{i=1}^\infty [Q_{13}(t) * G(t)]^{(i-1)} * Q_{12}(t),$$

$$Z(t) \equiv \sum_{j=1}^m [A(t) * M(t)]^{(j-1)} * [A(t) * X(t)],$$

であり、 $M(t)$  は単位通信が成功する確率分布を表す。また、 $X(t)$  は単位通信がエラーとなる確率分布を表し、 $\lim_{t \rightarrow \infty} [M(t) + X(t)] = 1$  である。以上より、

$$H_{0,S}^*(s) \equiv \int_0^\infty e^{-st} dH_{0,S}(t) = \frac{[A^*(s)M^*(s)]^m}{1 - Z^*(s)V^*(s)}, \quad (4)$$

を得る。したがって、システムが時刻 0 で動作を開始してから、次のチェックポイントを設定するまでの平均時間  $\ell_{0,S}(m)$  を、次のように求めることができる。

$$\ell_{0,S}(m) \equiv \lim_{s \rightarrow 0} \frac{-dH_{0,S}^*(s)}{ds} = \frac{1 - M^m}{(1 - M)M^m} \left[ \alpha + \frac{1}{\mu} D + \frac{1}{\lambda + a} + v(1 - M) \right]. \quad (5)$$

ここで、

$$D \equiv U^*(\lambda + a) / [1 - U^*(\lambda + a)],$$

$$M \equiv a / (\lambda + a),$$

とおく。明らかに、 $0 < M < 1$  である。

また、次のチェックポイントを設定するまでの平均コールバック回数  $M_R(m)$ 、平均ハンドオフ回数  $M_H(m)$  は、付録 1 よりそれぞれ次のように求められる。

$$M_R(m) = \frac{1 - M^m}{M^m} \quad (m = 1, 2, \dots), \quad (6)$$

$$M_H(m) = MD \left\{ m \left[ 1 - \frac{1 - M^m}{M^m} \right] + \left( \frac{1 - M^m}{M^m} \right)^2 \left( \frac{M}{1 - M} + \frac{1 - M}{M} \right) \right\} \quad (m = 1, 2, \dots). \quad (7)$$

### 3. 最適方策

移動局の誤り回復方法として LP 方式を適用したとき、チェックポイント間隔をどのように設定すべきかという問題を考える。ここでは、移動局の通信処理に着目しているので、ある何回目かの通信処理が完了した直後に、次のチェックポイントを設定する方策を考察する。

また、システム運用において、ロールバック処理やハンドオフに必要なシステムリソースを費用としてとらえ、期待費用を設定する。すなわち、システムの通常の運用にともなう固定費用を  $c_1$ 、1 回のハンドオフにともなう費用を  $c_2 (\geq c_1)$ 、1 回のロールバックにともなう損失費用を  $c_3 (\geq c_2)$  とする。いわば、ハンドオフ発生時のチェックポイントやログの転送にともなう動作は、通常運用時の動作に比し、より多くのシステムリソースを必要とし、また、通信エラー発生時のリカバリ動作は、ハンドオフ発生時の動作に比し、より多くのシステムリソースを必要とすると考えて、このように仮定する。

#### 3.1 最適方策 1

単位時間あたりの期待費用を、

$$C(m) \equiv \frac{c_1 + c_2 M_H(m) + c_3 M_R(m)}{\ell_{0,S}(m)} \quad (m = 1, 2, \dots), \quad (8)$$

と定義し、 $C(m)$  を最小にする最適な通信回数  $m^*$  を求める。

そのため、 $C(m+1) - C(m) \geq 0$  とおくことにより、

$$MD \left\{ \frac{1 - M^m}{M^m} \left[ \left( \frac{\lambda^2 + a^2}{\lambda a} \right) \frac{1 - M^{m+1}}{M^{m+1}} - \frac{1 - 2M^{m+1}}{1 - M} \right] - m \right\} \geq \frac{c_1}{c_2}, \quad (9)$$

を得る。ここで、式 (9) の左辺を  $L(m)$  とおくと、付録 2 より、次のような結論を得ることができる。

- (i)  $L(1) < c_1/c_2$  かつ  $M \leq \hat{M}$  ならば、式 (9) を満たす有限で唯一の  $m^* (> 1)$  が存在する。
- (ii)  $L(1) < c_1/c_2$  かつ  $M > \hat{M}$  ならば、式 (9) を満たす有限で唯一の  $m^* (\geq \hat{m})$  が存在する。

(iii)  $L(1) \geq c_1/c_2$  ならば、 $m^* = 1$  である。

ここで、付録 2 より、 $L_S(m) \equiv 1 - M + 2M^3 - M^m(1 - M) - M^{m+2} - 2M^{m+3}(1 - M^{2m-1}) - M^{2m+2} (m = 1, 2, \dots)$ 、 $Q(M) \equiv L_S(1) = 1 - 2M + M^2 + M^3 - 3M^4 + 2M^5$  とおいたとき、 $\hat{M}$  は  $Q(M) = 0$  を満たす  $M$  であり、 $\hat{m}$  は  $L_S(m) > 0$  となる最小の  $m$  を表す。

#### 3.2 最適方策 2

最適方策 1 と同様な仮定の下で、単位通信回数あたりの期待費用を

$$C_I(m) \equiv \frac{c_1 + c_2 M_H(m) + c_3 M_R(m)}{m} \quad (m = 1, 2, \dots), \quad (10)$$

と定義し、 $C_I(m)$  を最小にする最適通信回数  $m_I^*$  を求める。そのため、 $C_I(m+1) - C_I(m) \geq 0$  とおくことにより、

$$\frac{c_3}{c_2} \left\{ m M_R(m+1) - (m+1) M_R(m) \right\} + m M_H(m+1) - (m+1) M_H(m) \geq \frac{c_1}{c_2}, \quad (11)$$

を得る。ここで、式 (11) の左辺を  $L_I(m)$  とおくと、

$$L_I(m) - L_I(m-1) = \frac{c_3}{c_2} m \left\{ [M_R(m+1) - M_R(m)] - [M_R(m) - M_R(m-1)] \right\} + m \left\{ [M_H(m+1) - M_H(m)] - [M_H(m) - M_H(m-1)] \right\}, \quad (12)$$

となる。よって、ハンドオフ回数  $M_H(m)$  が  $m$  の増加関数かつ凸関数ならば、 $L_I(m)$  は  $m$  の増加関数となり、そのとき、次のような結論を得ることができる。

- (i)  $L_I(1) < c_1/c_2$  ならば、式 (11) を満たす有限で唯一の  $m_I^* (> 1)$  が存在する。
- (ii)  $L_I(1) \geq c_1/c_2$  ならば、 $m_I^* = 1$  である。

#### 4. 数値例による考察と評価

3 章で求めた期待費用  $C(m)$  と  $C_I(m)$  をそれぞれ最小にする最適方策について、具体的なチェックポイント設定間隔を求める。ここで、ハンドオフはランダムに生起すると考えて、指数分布を仮定する。すなわち、 $U(t) \equiv 1 - e^{-ut}$ 、とおき、それぞれ最適な  $m^*$  と  $m_I^*$  を計算する。

ここでは、ハンドオフにおける処理時間  $1/\mu$  をシス

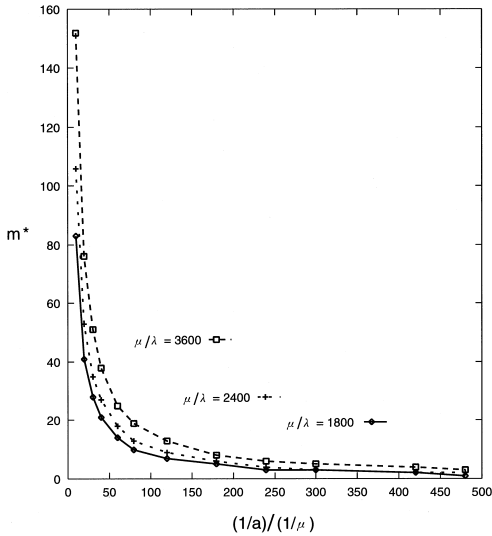


図3  $c_2/c_1 = 2, \mu/u = 120$  のとき,  $C(m)$  を最小にする最適回数  $m^*$  の数値例

Fig. 3 Numerical values of optimal number  $m^*$  to minimize  $C(m)$  when  $c_2/c_1 = 2$  and  $\mu/u = 120$ .

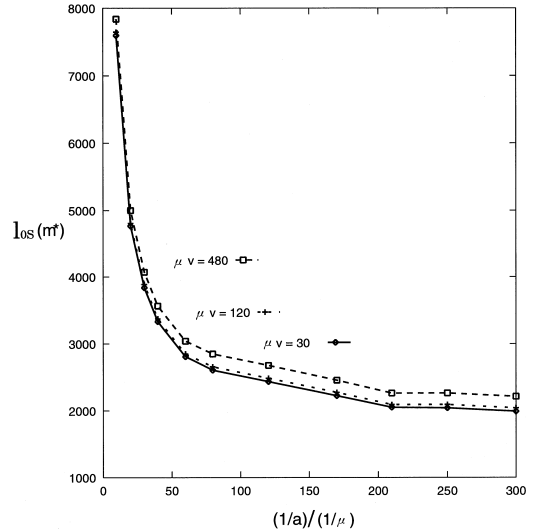


図4  $c_2/c_1 = 2, \mu/\lambda = 3600, \mu/u = 120, \mu\alpha = 30$  のとき, 図3における  $m^*$  に対応する平均時間  $\ell_{0S}(m^*)$

Fig. 4 Mean times  $\ell_{0S}(m^*)$  in proportion to the value of  $m^*$  in Fig.3 when  $c_2/c_1 = 2, \mu/\lambda = 3600, \mu/u = 120$  and  $\mu\alpha = 30$ .

テムの単位時間とおき,  $(1/\lambda)/(1/\mu) = 1800 \sim 3600$  ( $1/\mu = 1$  (秒) のとき 30 ~ 60 (分) に相当) とし, 通信処理時間を  $(1/a)/(1/\mu) = 10 \sim 480$  ( $1/\mu = 1$  (秒) のとき 10 ~ 480 (秒) に相当) とする. また, ハンドオフの発生間隔を  $(1/u)/(1/\mu) = 30 \sim 2400$  ( $1/\mu = 1$  (秒) のとき 30 ~ 2400 (秒) に相当) とし, ロールバック処理に要する時間を  $v/(1/\mu) = 30 \sim 480$  ( $1/\mu = 1$  (秒) のとき 30 ~ 480 (秒) に相当) とする.

期待費用を求めるためのパラメータ  $c_1, c_2, c_3$  については, その実際的かつ数値的妥当性を示すことは困難であるので, システム運用上の固定費  $c_1$  を単位費用として設定し, 他を相対的な費用比  $c_2/c_1, c_3/c_1$  として数値計算を行う. すなわち, 1回のハンドオフにともなう費用を  $c_2/c_1 = 1, 2, 5$ , 通信エラーによる1回のロールバックにともなう損失費用を  $c_3/c_1 = 5, 20, 50$  と仮定する.

以上のような仮定の下で, 期待費用  $C(m)$  と  $C_I(m)$  をそれぞれ最小にする  $m^*, m_I^*$  と  $\ell_{0S}(m^*)$  を図3 ~ 図6に示す.

図3は  $c_2/c_1 = 2, \mu/u = 120$  のとき, 通信処理時間  $\mu/a$  と通信エラー発生間隔  $\mu/\lambda$  の変化に対応した  $m^*$  の値を示し, この  $m^*$  に対応する  $\ell_{0S}(m^*)$  の変化を図4 ( $\mu/\lambda = 3600, \mu\alpha = 30$  のとき) に示す. 図5は  $\mu/\lambda = 3600, \mu/a = 60$  のとき, ハンドオフ発生間隔  $\mu/u$  とハンドオフの費用比  $c_2/c_1$  の変化に対応した  $m^*$  の値を示している.

図6は, 通信処理時間  $\mu/a$  や通信エラー発生

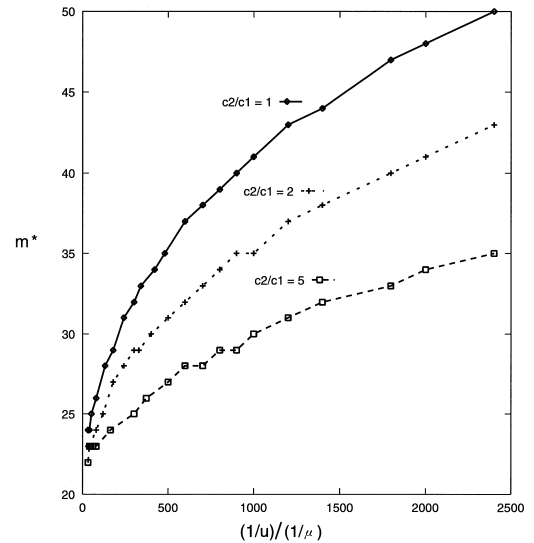


図5  $\mu/\lambda = 3600, \mu/a = 60$  のとき,  $(1/u)/(1/\mu)$  と  $c_2/c_1$  に対する最適回数  $m^*$  の数値例

Fig. 5 Numerical values of optimal number  $m^*$  for  $(1/u)/(1/\mu)$  and  $c_2/c_1$  when  $\mu/\lambda = 3600$  and  $\mu/a = 60$ .

率  $\lambda$  を大きくしたとき ( $c_2/c_1 = 2, \mu/a = 120, \mu/\lambda = 1800$ ), ハンドオフ発生間隔  $\mu/u$ , 通信エラーの損失費用比  $c_3/c_1$  に対応する  $m_I^*$  の変化を表す. なお, 図3 ~ 図5の条件下での  $m_I^*, \ell_{0S}(m_I^*)$  の変化は  $m^*, \ell_{0S}(m^*)$  の変化と大略同じ傾向を示すため, 省略する.

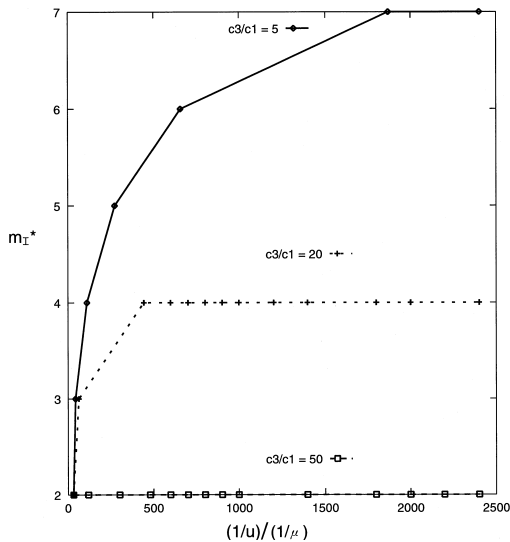


図6  $c_2/c_1 = 2$ ,  $\mu/\lambda = 1800$ ,  $\mu/a = 120$  のとき,  $C_I(m)$  を最小にする最適回数  $m_I^*$  の数値例

Fig. 6 Numerical values of optimal number  $m_I^*$  to minimize  $C_I(m)$  when  $c_2/c_1 = 2$ ,  $\mu/\lambda = 1800$  and  $\mu/a = 120$ .

図3より,  $m^*$  は通信処理時間  $\mu/a$  の増大とともに小さくなり, 通信エラー発生間隔  $\mu/\lambda$  の増大とともに大きくなる. これは, 1回のデータ通信処理時間が大きいときは, チェックポイントを設定するための  $m^*$  は逆に小さくすべきであることを示している.

同一の理由により, 図4から  $l_{0S}(m^*)$  は, 通信処理時間  $\mu/a$  の増大とともに小さくなり, ロールバック処理に要する時間  $\mu v$  の増大とともに大きくなる. これは,  $\mu v$  の増大により, 次のチェックポイントを設定するまでの平均時間も大きくなることを示している. さらに図5より,  $m^*$  はハンドオフの発生間隔  $\mu/u$  の増大とともに大きくなり, ハンドオフの費用比  $c_2/c_1$  の増大とともに小さくなる傾向を示す.

一方, 図6より,  $m_I^*$  はハンドオフの発生間隔  $\mu/u$  の増大とともに大きくなり,  $c_3/c_1$  の増大とともに小さくなる傾向を示す. また, 通信処理時間  $\mu/a$  や通信エラー発生率  $\lambda$  が大きいときは,  $m_I^*$  は通信エラーの損失費用比  $c_3/c_1$  が大きくなると, ハンドオフ発生率  $\mu/u$  にほとんど依存せず, ある一定の値に近づく.

以上の考察から,  $m^*$ ,  $m_I^*$  は通信処理時間  $\mu/a$  の増大とともに小さくなり, 通信エラーの発生間隔  $\mu/\lambda$  やハンドオフ発生間隔  $\mu/u$  の増大とともに大きくなる. さらに,  $m^*$  は, ハンドオフの損失費用比  $c_2/c_1$

に依存して決定され,  $m_I^*$  は, 通信エラーの損失費用比  $c_3/c_1$  や  $c_2/c_1$  に大きく依存して決定されることなどが分かる.

## 5. おわりに

移動体環境における誤り回復機能として, LP方式を適用した通信システムの高信頼化の問題を考察した. すなわち, 移動端末のハンドオフ以降の移動性も考慮した新しい確率モデルを設定し, チェックポイントを設定するまでの平均時間, 平均ロールバック回数, 平均ハンドオフ回数などを求めた. さらに, 期待費用を設定し, それを最小にする最適なチェックポイント設定間隔について議論した.

数値例による考察から, 期待費用を最小にする最適なチェックポイント設定間隔は, 通信処理時間やハンドオフに関する費用の増大とともに小さくなり, 通信エラーの発生間隔やロールバック処理に要する時間, ハンドオフ発生間隔の増大とともに大きくなる傾向を示した. さらに, 1回の通信処理時間が大きく, 通信エラー発生率が大きい場合, 通信エラーによる損失費用がある程度大きくなると, ハンドオフ発生率にほとんど依存せず, 大略一定の値に近づくことなどが分かった.

ここでは, 誤り回復の方法としてLP方式を取り扱ったが, このような考察や議論は, 他のLL方式, LT方式にも適用できると考えられる. すなわち, LL方式はロールバックにともなう時間分布を拡張することによって, また, LT方式はハンドオフにともなう時間分布とロールバックにともなう時間分布を工夫することによってモデル化が可能である. このような移動体環境におけるシステムの信頼性評価の問題は, 今後さまざまな視点から重要な課題となることが考えられ, この方面に対する多くの研究が期待される.

## 参考文献

- 1) 水野忠則: 特集「モバイルコンピューティング」, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.9, pp.2364-2466 (2000).
- 2) Rangarajan, S., Ratnam, K. and Dahbura, A.T.: A fault-tolerant protocol for location directory maintenance in mobile networks, *Proc. FTCS-25*, pp164-173 (1995).
- 3) Biaz, S. and Vaidya, N.H.: Tolerating visitor location register failure in mobile environments, *Reliable Distributed Systems-SRDS'98*, pp.109-117 (1998).
- 4) Fang, Y., Chlamtac, I. and Fei, H.: Analytical Results for Optimal Choice of Location Update

Interval for Mobility Database Failure Restoration in PCS Networks, *IEEE Trans. Parallel and Distributed Syst.*, Vol.11, No.6, pp.615–624 (2000).

- 5) 高橋成文, 若木 勇, 中村仁之輔: モバイル環境下で情報停滞しないメッセージングシステム, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.9, pp.2374–2381 (2000).
- 6) Prakash, R. and Singhal, M.: Low-Cost Checkpointing and Failure Recovery in Mobile Computing Systems, *IEEE Trans. Parallel and Distributed Syst.*, Vol.7, No.10, pp.1035–1048 (1996).
- 7) Acharya, A. and Badrinath, B.R.: Checkpointing distributed applications on mobile computers, *IEEE Proc. 3rd International Conference on PDIS*, pp.73–80 (1994).
- 8) Pradhan, D.K. and Krishna, P.: Recoverable mobile environment: Design and trade-off analysis, *Proc. FTCS-26*, pp.16–25 (1996).
- 9) 八木幹雄, 金子敬一, 伊藤秀男: 移動体環境における誤り回復方式の提案, 電子情報通信学会論文誌, D-I, Vol.J83-D-I, No.3, pp.348–359 (2000).
- 10) Osaki, S.: *Applied Stochastic System Modeling*, Springer-Verlag, Berlin (1992).

## 付 録

### A.1 平均ロールバック回数 $M_R(m)$ と平均ハンドオフ回数 $M_H(m)$ の導出

システムが時刻 0 で状態 0 を出発し, 時刻  $t$  までに状態 0 を訪問する回数の分布を  $M_R(t)$  とし, その LS 変換を  $M_R^*(s)$  とすると,

$$M_R^*(s) = \frac{Z^*(s)V^*(s)}{1 - Z^*(s)V^*(s)},$$

を得る. よって, 平均ロールバック回数  $M_R(m)$  は, 次式で与えられる.

$$M_R(m) \equiv \lim_{s \rightarrow 0} M_R^*(s) = \frac{1 - M^m}{M^m}. \quad (13)$$

次に, システムが時刻 0 で動作を開始してから, 次のチェックポイントを設定するまでの平均ハンドオフ回数を求める. チェックポイントを設定するまでのハンドオフ回数の分布を  $M_H(t)$  とし, その LS 変換を  $M_H^*(s)$  とすると,

$$M_o^*(s) \equiv \sum_{i=1}^{\infty} (i-1) [Q_{13}^*(s)G^*(s)]^{i-1} Q_{14}^*(s),$$

$$X_o^*(s) \equiv \sum_{i=1}^{\infty} (i-1) [Q_{13}^*(s)G^*(s)]^{i-1} Q_{12}^*(s),$$

と定義することによって

$$M_H^*(s) = \sum_{k=1}^{\infty} [Z^*(s)V^*(s)]^{k-1} \times \left\{ (k-1) \sum_{j=1}^m [A^*(s)M^*(s)]^{j-1} \times [A^*(s)X^*(s)][(j-1)M_o^*(s) + X_o^*(s)] + [A^*(s)M^*(s)]^m m M_o^*(s) \right\}, \quad (14)$$

を得る. ここで,  $M_o^*(s)$  は単位通信が成功するまでのハンドオフ回数の LS 変換を表し,  $X_o^*(s)$  は単位通信がエラーとなるまでのハンドオフ回数の LS 変換を表す. したがって, チェックポイントを設定するまでの平均ハンドオフ回数  $M_H(m)$  を, 次のように求めることができる.

$$M_H(m) \equiv \lim_{s \rightarrow 0} M_H^*(s) = MD \left\{ m \left[ 1 - \frac{1 - M^m}{M^m} \right] + \left( \frac{1 - M^m}{M^m} \right)^2 \times \left( \frac{M}{1 - M} + \frac{1 - M}{M} \right) \right\}. \quad (15)$$

### A.2 $C(m)$ を最小にする $m^*$ の導出

式 (9) の左辺を  $L(m)$  とおくと,  $L(0) = 0, L(\infty) = \infty$  となり, 式 (9) を満たす有限な  $m^* (1 \leq m^* < \infty)$  は必ず存在する. さらに,

$$L(m) - L(m-1) = \left[ \frac{D}{M^{2m+1}} \right] \left( 1 - M + 2M^3 - M^m(1 - M) - M^{m+2} - 2M^{m+3}(1 - M^{2m-1}) - M^{2m+2} \right), \quad (16)$$

となる.

ここで, すべての  $M (0 < M < 1)$  に対して,  $L(m) - L(m-1) > 0$  となる  $m$  について調べる.  $L_S(m) \equiv 1 - M + 2M^3 - M^m(1 - M) - M^{m+2} - 2M^{m+3}(1 - M^{2m-1}) - M^{2m+2} (m = 1, 2, \dots)$  とおくと,  $L_S(m)$  は  $m$  の増加関数であり,

$$L_S(1) = 1 - 2M + M^2 + M^3 - 3M^4 + 2M^5, \\ L_S(\infty) = 1 - M + 2M^3 > 0,$$

となる. さらに,  $Q(M) \equiv 1 - 2M + M^2 + M^3 - 3M^4 + 2M^5$  とおくと,  $Q(0) = 1, Q(1) = 0$ ,

$$\frac{dQ(M)}{dM} = -2 + 2M + 3M^2 - 12M^3 + 10M^4 \\ \frac{d^2Q(M)}{dM^2} = 2 + 6M - 36M^2 + 40M^3 > 0$$

を得る. したがって  $Q(M)$  は凸関数であり,  $Q(M) =$

0 を満たす  $\hat{M}$  ( $0 < \hat{M} < 1$ ) が唯一存在し, 次の関係を得る.

- (a)  $M \leq \hat{M}$  ならば,  $L_S(1) > 0$  であるから,  $L_S(m) > 0$  である. すなわち,  $L(m)$  は 0 から  $\infty$  までの  $m$  の単調増加関数となる.
- (b)  $\hat{M} < M < 1$  ならば,  $L_S(1) < 0$  であるから,  $L_S(m) > 0$  となる最小の  $\hat{m}$  ( $\hat{m} > 1$ ) が存在する. したがって,  $m < \hat{m}$  のとき  $L_S(m) \leq 0$  であり,  $m \geq \hat{m}$  のとき  $L_S(m) > 0$  である.

ゆえに, 次のような最適方策が得られる.

- (i)  $L(1) < c_1/c_2$  かつ  $M \leq \hat{M}$  ならば, 式 (9) を満たす有限で唯一の  $m^* (> 1)$  が存在する.
- (ii)  $L(1) < c_1/c_2$  かつ  $M > \hat{M}$  ならば, 式 (9) を満たす有限で唯一の  $m^* (\geq \hat{m})$  が存在する.
- (iii)  $L(1) \geq c_1/c_2$  ならば,  $m^* = 1$  である.

(平成 12 年 11 月 28 日受付)

(平成 13 年 5 月 10 日採録)



木村 充位

1997 年愛知工業大学経営工学科卒業. 1999 年同大学大学院工学研究科修士課程生産システム工学専攻修了. 現在, 名古屋工業大学大学院博士後期課程在学中. データ通信シ

ステム関連の信頼性の研究に興味を持つ. 電子情報通信学会会員.



安井 一民 (正会員)

1974 年名城大学理工学部数学科卒業. 工学博士. 1955 年中部電力(株)入社. 愛知工業大学経営工学科助教授を経て, 現在, 同教授. 信頼性理論および計算機システムの信頼性の研究に従事. 電子情報通信学会, 日本 OR 学会, 日本信頼性学会各会員.



中川 暉夫 (正会員)

1965 年名古屋工業大学工学部計測工学科卒業. 1967 年同大学大学院工学研究科修士課程計測工学専攻修了. 工学博士. 名城大学理工学部助手を経て, 現在, 愛知工業大学経営工学科教授. 信頼性理論および計算機システムの信頼性の研究に従事. 電子情報通信学会, 日本 OR 学会, 日本信頼性学会, 日本品質管理学会各会員.



石井 直宏 (正会員)

1968 年東北大学工学部電気工学科卒業. 1973 年同大学大学院博士課程修了. 工学博士. 東北大学医学部助手, 名古屋工業大学情報工学科助教授を経て, 現在, 名古屋工業大学知能情報システム学科教授. しきい値論理, 生体情報処理, 非線形システム解析, ニューラルネット, 知能処理アーキテクチャの研究に従事. 電子情報通信学会, ACM, IEEE 各会員.