

不完全情報表現を用いた三方向マージ可能な複製データ型の提案

M2022SC012 鈴木雄久

指導教員：石原靖哲

1 はじめに

昨今、分散してデータを共有するアプリケーションの需要が高まっている。こういったアプリケーションにおいてユーザは、サーバに存在するデータの複製に対して操作を行い、それを伝播させることでデータ共有を行っている。このようなアプリケーションにおける課題として、通信遅延の大きい環境下で複製に対して操作を行った際、どのようにしてユーザに制限をかけずに共有データのマージを行うかという点が挙げられる。この課題を解決するための技術として、操作を別の複製に伝播させる際に関数を用いて操作を適切に変換することでマージを行う OT (Operational Transformation) [1] や、可換な操作のみに限定することでマージを可能にした CRDT (Conflict-Free Replicated Data Type) [2] といった技術が研究されている。

本研究では、こういった技術の中から MRDT (Mergeable Replicated Data Types) [3] という技術に着目する。MRDT では、通常のデータ型から、三方向マージが可能なデータ型を自動導出する方式を提案している。しかし、キューのようなマージ結果の候補が複数生じうるデータ型においては、マージの際にその結果を候補の中から一意に決定する必要がある。[3] では、要素の辞書順序に基づいてマージ結果を一意に決定する方法が示されているが、この方法の欠点として、本来アプリケーション側に決定権がゆだねられるべきマージ結果の決定が、データ型によって行われてしまっていることが挙げられる。

具体例で示す。図 1 では、全体の時系列を見るとキュー $\langle 1 \rangle$ に対してレプリカ 2 において 3 が追加され $\langle 1, 3 \rangle$ 、その後レプリカ 1 において 2 が追加されて $\langle 1, 2 \rangle$ となっている。LCA のキュー $\langle 1 \rangle$ とレプリカ 1 のキュー $\langle 1, 2 \rangle$ とレプリカ 2 のキュー $\langle 1, 3 \rangle$ の三方向マージを行うと、 $V = \langle 1, 2, 3 \rangle, \langle 1, 3, 2 \rangle$ という 2 つの候補を得られるが、要素の辞書順により候補の $\langle 1, 3, 2 \rangle$ が切り捨てられ、マージ結果が $V = \langle 1, 2, 3 \rangle$ となる。このように、本来アプリケーションによって行われるべきマージ結果の決定がデータ型によって行われてしまっているのである。

そこで本研究では、不完全情報表現 [4] による MRDT の拡張を検討する。不完全情報表現とは、操作の対象となるデータを一意に確定させるのではなく、「そのデータがとりうる値のあらゆる可能性」(可能世界)を保持し、データを確定させる必要が生じた場合に初めてデータを一意に確定させる表現手法である。この表現を用いることで、データ型がマージ結果を確定させるのではなく、アプリケーション側にマージ結果の決定権を委ねることが可能となる。

本研究ではカウンタ、集合、キューについて拡張を行った。カウンタ、集合についてはデータ型に対して行う操作の順序が可換であるため拡張は容易であった。キューにおける拡張では、完全情報のキューを 2 つ保持した状態から到達可能な、存在すべき可能性をすべて保持したマージ式を導出した。

2 関連研究

2.1 複製データ型

複製データ型とは、マージを行う際に用いるデータ型であり、そのデータ型が持つ情報によりマージ結果を表現することが可能なデータ型である。関連研究として、三方向マージを可能とするデータ型についての研究 [3] が存在する。この研究では Mergeable Replicated Data Types (MRDT) と題し、カウンタ、集合、キューなどの様々なデータ型に対して三方向マージを行うための複製データ型の拡張を提案している。また、マージ関数を関係集合論的な枠組みで表現している。本研究との差異として、マージ結果を所定のアルゴリズムで確定させている点が挙げられる。

2.2 三方向マージ

三方向マージとは、二人のユーザが同時に並行して編集する複製 (レプリカ 1、レプリカ 2) と、その 2 つのレプリカの共通の複製元となった lowest common ancestor (LCA) の 3 つのデータを用いて行うマージであり、レプリカ 1、2 の同期操作である。三方向マージという言葉がどのようにして生まれたかは定かではないが、ファイルの同期に関する論文において、三方向マージと同様の概念の存在を確認できる。

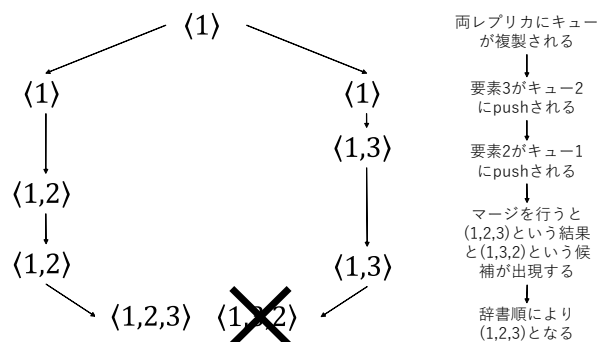


図 1 キューにおける三方向マージの例

2.3 不完全情報表現

不完全情報表現とは、本来数字や文字が入るデータ型に対して一意に値を確定させるのではなく、そのデータがとりうる可能性の集合の中から、いずれかのデータが割り当てられるという不完全性を持った表現手法である。データを一意に確定させるのではなく、そのデータがとりうる値のあらゆる可能性を保持し、データを確定させる必要が生じた場合に初めてデータを一意に確定させるという方式を取る。関係データの不完全情報表現 [4] などが知られている。

3 複製カウンタ型の提案

通常的不完全さを含まないカウンタにおける三方向マージは先行研究 [3] より式 (1) で表される。

$$v = l + (v_1 - l) + (v_2 - l) \quad (1)$$

ここで、 l は LCA のカウンタ値、 v_1, v_2 はそれぞれレプリカ 1 とレプリカ 2 のカウンタ値、 v はマージ後のカウンタ値である。式は LCA の値に、レプリカ 1 と LCA の差の値とレプリカ 2 と LCA の差の値を加算することで三方向マージのカウンタ値が求められることを示している。

カウンタの 1 つのレプリカに対する不完全情報表現 E を次のように定義する。

$$E ::= n \\ \quad | x \\ \quad | E + E \\ \quad | E - E$$

ここで n は整数の定数、 x は変数、 $+$ は加算を表す演算子、 $-$ は減算を表す演算子である。 $E_1, \dots, E_n$ をレプリカ $1, \dots, n$ の不完全情報表現とする。大域制約 G を、 $E = E$ の形の等式の、論理および論理積からなる式とする。 $E_1, \dots, E_n, G$ が表す可能世界の集合 $rep(E_1, \dots, E_n, G)$ を以下のように定義する。

$$rep(E_1, \dots, E_n, G) \\ = \{(\nu(E_1), \dots, \nu(E_n)) \mid \nu \text{ satisfies } G\}$$

ここで ν は変数への整数の代入であり、 $\nu(E)$ は以下のよう

$$\nu(E_1 + E_2) = \nu(E_1) + \nu(E_2)$$

$$\nu(E_1 - E_2) = \nu(E_1) - \nu(E_2)$$

提案 1. 不完全情報表現を用いたカウンタの三方向マージを式 (2) のように定義する。ここで、 V, L, V_1, V_2 はそれぞれ、マージ後のカウンタ値、LCA のカウンタ値、レプリカ 1 のカウンタ値、レプリカ 2 のカウンタ値である。

$$V = L + (V_1 - L) + (V_2 - L) \quad (2)$$

これはマージ結果が、LCA のカウンタ値、LCA とレプリカ 1 のカウンタ値の差分、LCA とレプリカ 2 のカウンタ値の差分の 3 つの和で表されることを示している。 □

例 1. カウンタにおける不完全情報表現を用いた三方向マージの例を示す。 L, V_1, V_2, G について、

$$L = x, V_1 = x + 1, V_2 = y,$$

$$G = (x = 1 \vee x = 2) \wedge (y = 4 \vee y = 5)$$

とする。この例において、LCA は 1 である可能性と 2 である可能性がある。また、レプリカ 2 は 4 である可能性と 5 である可能性がある。この時、式 (2) は、

$$V = L + (V_1 - L) + (V_2 - L) \\ = x + (x + 1 - x) + (y - x)$$

となる。また、三方向マージにより得られる可能世界をすべて列挙すると図 2 のようになる。 □

4 複製集合型の提案

不完全さを含まない集合の三方向マージは式 (3) で表される。

$$v = (l \cap v_1 \cap v_2) \cup (v_1 - l) \cup (v_2 - l) \quad (3)$$

ここで l は LCA の集合、 v_1 はレプリカ 1 の集合、 v_2 はレプリカ 2 の集合、 v はマージ後の集合である。式は、マージ後の集合は LCA、レプリカ 1、レプリカ 2 の共通要素と、レプリカ 1、レプリカ 2 それぞれで追加された要素の和集合であることを示している。

有限の全体集合 U を固定する。 U の部分集合の 1 つのレプリカに対する不完全情報表現 E を、 U から命題論理式の集合への写像と定義する。 $E_1, \dots, E_n$ をレプリカ $1, \dots, n$ の不完全情報表現とする。大域制約 G を命題論理式とする。 $E_1, \dots, E_n, G$ が表す可能世界の集合 $rep(E_1, \dots, E_n, G)$ を以下のように定義する。

$$rep(E_1, \dots, E_n, G) \\ = \{(\nu(E_1), \dots, \nu(E_n)) \mid \nu \text{ satisfies } G\}$$

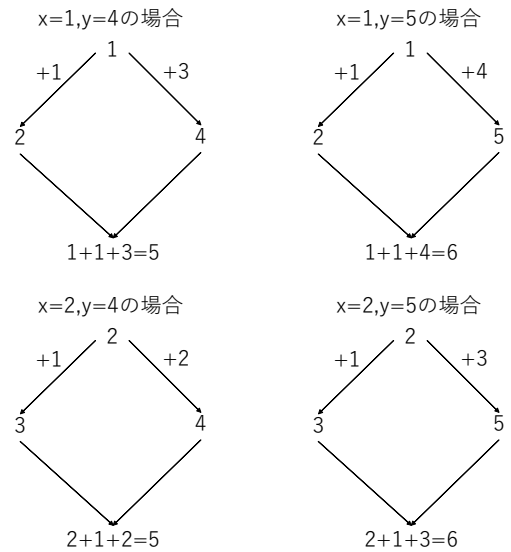


図 2 カウンタにおける不完全情報表現を用いた三方向マージの例

ここで ν は命題論理式中の変数への真理値の代入である． X, Y を U の部分集合の不完全情報表現としたとき，各 $a \in U$ について

$$\begin{aligned}(X \cup Y)(a) &= X(a) \vee Y(a) \\ (X \cap Y)(a) &= X(a) \wedge Y(a) \\ (X - Y)(a) &= X(a) \wedge \neg Y(a)\end{aligned}\quad (4)$$

と定義する．

提案 2. 集合における不完全情報表現を用いた三方向マージを以下の形で定義する．これは式 (4) を式 (3) に適用することで導出される．

$$V = (L \cap V_1 \cap V_2) \cup (V_1 - L) \cup (V_2 - L) \quad (5)$$

□

例 2. 以下に集合における不完全情報表現を用いた三方向マージの例を示す．

$$\begin{aligned}L &= \{a \mapsto T, b \mapsto T\} \\ V_1 &= \{a \mapsto x \wedge y, b \mapsto x \vee y, c \mapsto \neg x, d \mapsto \neg y\} \\ V_2 &= \{a \mapsto \neg x, b \mapsto \neg y, e \mapsto x \wedge y, f \mapsto x \vee y\} \\ G &= \neg x \vee y\end{aligned}$$

このとき，式 (5) よりマージ結果 V は以下のようになる．

$$\begin{aligned}V &= \{a \mapsto F, b \mapsto x \wedge (\neg y), \\ &\quad c \mapsto \neg x, d \mapsto \neg y, e \mapsto x \wedge y, f \mapsto x \vee y\}\end{aligned}$$

以下， (x, y) の真理値ごとに可能世界がどのようなかを確認する．

(i): $\nu(x, y) = (T, T)$ のとき， $\nu(G) = T$ である．

$$\begin{aligned}L &= \{a \mapsto T, b \mapsto T\} \\ V_1 &= \{a \mapsto T, b \mapsto T, c \mapsto F, d \mapsto F\} \\ V_2 &= \{a \mapsto F, b \mapsto F, e \mapsto T, f \mapsto T\} \\ V &= \{a \mapsto F, b \mapsto F, c \mapsto F, \\ &\quad d \mapsto F, e \mapsto T, f \mapsto T\}\end{aligned}$$

となるので， $\nu(V)$ が表す可能世界は $\{e, f\}$ である．

(ii): $\nu(x, y) = (T, F)$ のとき， $\nu(G) = F$ となるので考えない．

(iii): $\nu(x, y) = (F, T)$ のとき， $\nu(G) = T$ である．(i) と同様に解くと， $\nu(V)$ が表す可能世界は $\{c, f\}$ である．

(iv): $\nu(x, y) = (F, F)$ のとき， $\nu(G) = T$ である．(i) と同様に解くと， $\nu(V)$ が表す可能世界は $\{c, d\}$ である．

以上より，マージ結果 V が表す可能世界は

$$\{e, f\}, \{c, f\}, \{c, d\}$$

である．

5 複製キュー型の提案

1 節や図 1 で示した通り，キューは，カウンタや集合とは異なり，不完全さを含まないデータをマージした結果が不完全さを含むデータになりうる．本研究ではマージ可能な複製キューを Mergeable Replicated Queue (MRQ) と呼ぶ．MRQ における前提条件として，各要素が MRQ に追加 (*enq*) される際，*enq* を行ったレプリカの ID，そのレプリカ上でのローカル時刻の 2 つの情報がその要素に付与されるものとする．

本研究では，「結果が複数生じうるマージ結果を辞書順などのアルゴリズムによって確定させる複製キュー」を Existential MRQ (EMRQ) と呼ぶ．また，「マージ結果として矛盾しないすべての可能性を保持するマージ可能な複製キュー」を Universal MRQ (UMRQ) と呼ぶ．ここでの本研究の目的は UMRQ を提案することである．また，MRQ が n 個のレプリカを持つとき， MRQ_n ， $EMRQ_n$ ， $UMRQ_n$ のように表す．先行研究 [3] におけるキューの三方向マージは，EMRQ2 のマージに分類される．

MRQ に対する操作は，追加 (*enq*)，取り出し (*deq*)，先頭要素の閲覧 (*front*) などがあるが，本要旨では紙面の都合上，マージ (*merge*) に焦点を絞って説明する．

5.1 EMRQ2

先行研究 [3] に基づくと，EMRQ2 のマージ定義は以下のようなになる．ここで， l は LCA のキュー， r_1 はレプリカ 1 のキュー， r_2 はレプリカ 2 のキューである．

$$merge(l, r_1, r_2) \in (r_1 - l) \& (r_2 - l)$$

$(r_1 - l)$ は r_1 から l に存在する要素を取り除いたリストであり， $\&$ は 2 つのリストのあらゆる interleave からなる集合を返す演算子である．この時，どの interleave を選択するかは特定のアルゴリズムにより決定される．

例 3. $l = \epsilon$ ， $r_1 = \langle 11, 12, \dots, 17 \rangle$ ， $r_2 = \langle 21, 22, 23 \rangle$ をマージした $merge(l, r_1, r_2) = \langle 11, 12, 21, 13, 14, 15, 22, 16, 17, 23 \rangle$ のイメージ図を図 3 に示す．図では，11 とラベル付けされた辺，およびそれを y 軸方向に平行移動させた辺が要素 11 を表している．同様に 21 がラベル付けされた辺，およびそれを x 軸方向に平行移動させた辺が要素 21 を表している．また，マージ式の右辺は，図において，スタートからゴールまでの経路（青い線で示したもの）で表される． □

5.2 UMRQ2

UMRQ2 は EMRQ2 と違い，マージ結果として矛盾しないすべての可能性を保持するため，マージを行った際，2 つのリストの interleave からなる集合すべてを返す．

例 4. $l = \epsilon$ ， $r_1 = \langle 11, 12, \dots, 17 \rangle$ ， $r_2 = \langle 21, 22, 23 \rangle$ をマージした結果のイメージ図を図 4 に示す．要素の表し方は図 3 と同様である．図では，スタートからゴールへの最短経路すべてがマージ結果となる． □

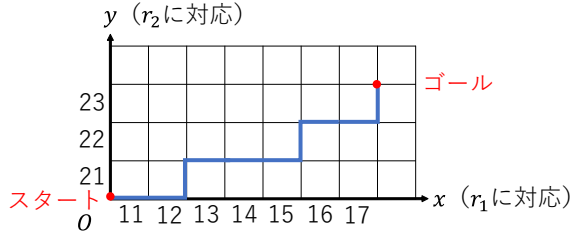


図3 EMRQ2におけるマージ結果

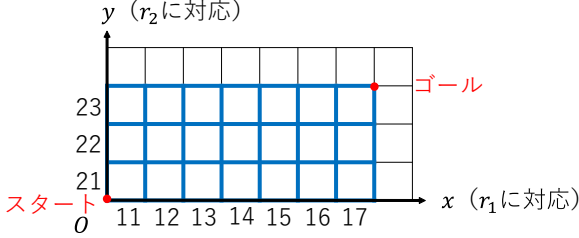


図4 UMRQ2におけるマージ結果

UMRQ2 Q の内部仕様は $Q = E_1 \cdots E_n$ の形の有限列とする。この時、各 E_i は、 $E_i = (r_1, r_2, \underline{x}, \underline{y}, \underline{x+y}, \overline{x+y})$ とする。 E_i の各要素は以下の通りである。

- r_1 : レプリカ 1 に *enq* された順に要素を並べたリスト
- r_2 : レプリカ 2 に *enq* された順に要素を並べたリスト
- $\underline{x}$: r_1 に対して *deq* された回数 x の下限を表す非負整数
- $\underline{y}$: r_2 に対して *deq* された回数 y の下限を表す非負整数
- $\underline{x+y}$: $x+y$ の下限を表す非負整数
- $\overline{x+y}$: $x+y$ の上限を表す非負整数

また、各 E_i が示す可能世界の集合を以下のように定義する。

$$Rep((r_1, r_2, \underline{x}, \underline{y}, \underline{x+y}, \overline{x+y})) = \bigcup_{con(x,y)} r_1^{\underline{x}} \& r_2^{\underline{y}}$$

ここで r^i はリスト r から先頭の i 個の要素を取り除いたリストであり、 $con(x, y)$ は以下の 3 条件の連言を表す。

$$\begin{aligned} \underline{x} &\leq x \leq \underline{x+y} \\ \underline{y} &\leq y \leq \underline{x+y} \\ \underline{x+y} &\leq x+y \leq \overline{x+y} \end{aligned}$$

例 5. 以下の UMRQ2 L は例 4 の l のみを可能世界に持ち、 Q_1, Q_2 はそれぞれ r_1 のみ、 r_2 のみを可能世界に持つ。

$$\begin{aligned} L &= (\epsilon, \epsilon, 0, 0, 0, 0) \\ Q_1 &= (\langle 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 \rangle, \epsilon, 0, 0, 0, 0) \\ Q_2 &= (\epsilon, \langle 21, 22, 23 \rangle, 0, 0, 0, 0) \end{aligned}$$

これらのマージ結果は以下のように表される。

$$\begin{aligned} Merge(L, Q_1, Q_2) &= (\langle 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 \rangle, \\ &\quad \langle 21, 22, 23 \rangle, 0, 0, 0, 0) \end{aligned}$$

□

提案 3. UMRQ2 に対するマージ (*Merge*) の定義は場合分けが多岐にわたって煩雑なため、本要旨では、最も本質的である、 L, Q_1, Q_2 が以下の形の場合の定義のみを示す。 $*$ は *don't care* である。

$$\begin{aligned} L &= (r_1, r_2, *, *, *, *) \\ Q_1 &= (r_1, r_2, \underline{x}_1, \underline{y}_1, \underline{x_1+y_1}, \overline{x_1+y_1}) \\ Q_2 &= (r_1, r_2, \underline{x}_2, \underline{y}_2, \underline{x_2+y_2}, \overline{x_2+y_2}) \end{aligned}$$

この時、*Merge* は以下の式で定義される。

$$Merge(L, Q_1, Q_2) = (r_1, r_2, \underline{x}, \underline{y}, \underline{x+y}, \overline{x+y})$$

ここで、 $\underline{x}, \underline{y}, \underline{x+y}, \overline{x+y}$ は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \underline{x} &= \max(\underline{x}_1, \underline{x}_2), \underline{y} = \max(\underline{y}_1, \underline{y}_2), \\ \underline{x+y} &= \max(\underline{x_1+y_1}, \underline{x_2+y_2}, \underline{x+y}), \\ \overline{x+y} &= \max(\overline{x_1+y_1}, \overline{x_2+y_2}, \overline{x_1+y_1} + \overline{x_2+y_2}) \end{aligned}$$

□

6 まとめと今後の課題

本研究では、不完全情報表現を用いたカウンタの三方向マージと集合の三方向マージについて提案し、キューにおける三方向マージについて考察を行ってきた。キューにおける三方向マージでは、UMRQ2 のマージ式を導出した。なお、本要旨では触れられなかったが、 $n \geq 3$ の UMRQ $_n$ についても考察を行い、マージ式の候補を導出した。

今後の課題は、 $n \geq 3$ の UMRQ $_n$ のマージ式の候補についてその正しさを検証することが挙げられる。

参考文献

- [1] Chengzheng Sun, David Sun, Agustina Ng, Weiwei Cai, and Bryden Cho. Real Differences between OT and CRDT under a General Transformation Framework for Consistency Maintenance in Co-Editors. In *PACM on Human-Computer Interaction*, Vol. 4, pp. 1–26, 2020.
- [2] Marc Shapiro, Nuno Preguiça, Carlos Baquero, and Marek Zawirski. Conflict-Free Replicated Data Types. In *Proc. SSS 2011*, pp. 386–400, 2011.
- [3] Gowtham Kaki, Swarn Priya, KC Sivaramakrishnan, and Suresh Jagannathan. Mergeable Replicated Data Types. In *Proc. ACM Program. Lang.*, Vol. 3, pp. 1–29, 2019.
- [4] Tomasz Imieliński and Witold Lipski. Incomplete Information in Relational Databases. *JACM*, Vol. 31, No. 4, pp. 761–791, 1984.