

ノードの物理的位置情報を考慮した P2P 安否情報共有システムの検討

門脇 伸明¹ 生出 拓馬² 武田 敦志³ 菅沼 拓夫² 高橋 晶子¹

概要: 大規模災害時の安否確認サービスには, ネットワーク構成が不安定なネットワーク環境下でも, 限られたネットワーク資源を用いて継続して動作することが求められる. そこで我々はネットワークの再構築による通信コストの増加を伴わずに動的負荷分散を行う構造化 P2P ネットワークアルゴリズム Waon(Well-distribution Algorithm for an Overlay Network) に基づいた P2P 安否情報共有システムを提案してきた. しかし, 現在の P2P 安否情報共有システムは, 下位層のネットワーク構造を考慮しないオーバーレイネットワークの構築により, メッセージが迂回して転送され, 冗長なトラフィックが増加する. そこで本稿では, P2P 安否情報共有システムへの, ノードの物理的な位置情報に基づくノード ID 生成による, 物理的な近傍性を考慮したネットワーク構築法の導入を行う. また, 本手法を適用した P2P 安否情報共有システムを用いて実験を行うことで, 本提案の有効性を確認する.

Design of Topology-aware Network Construction Method for P2P Personal Safety Information Sharing System

NOBUAKI KADOWAKI¹ TAKUMA OIDE² ATSUSHI TAKEDA³ TAKUO SUGANUMA² AKIKO TAKAHASHI¹

1. はじめに

東日本大震災時, 被災地住民の安否確認のために様々な Web 安否確認サービスが利用された. しかし, その多くはネットワーク機器の損害や停電などのネットワーク基盤への甚大な被害や, 輻輳の発生により, 安否情報の迅速な共有は困難であった. したがって, 安否確認システムは, 停電や断線などによりネットワーク構成が急激に変化する不安定な環境下において, 限られたネットワーク資源を用いて, 継続して動作することが必要とされる.

Peer-to-Peer(P2P) ネットワークは, サーバやネットワーク全体を集中管理するノードを必要とせず, 対等な関係の端末(ピア, ノード)間で相互に通信を行うネットワークである. 任意のノードのみでネットワークを構築するため, ネットワークの一部が欠けた場合においても, 継続し

てサービス提供を行うことが可能であり, 耐障害性に優れる. さらに, クライアント・サーバ(C/S)方式のように負荷集中が無く, スケーラビリティに優れ, 大規模な設備を必要としないためイニシャルコストが低く比較的導入が容易である.

しかし, Chord [1] などの既存の構造化 P2P ネットワークアルゴリズムでは, 環境の変化やノードの性能差に応じた動的な負荷分散を行うことが困難であったり, Mercury [2] のように動的負荷分散が可能なアルゴリズムであっても P2P ネットワークの再構築に伴ってトラフィックが増大するなど, 被災地の劣悪なネットワーク環境において動作させるには課題があった.

この問題に対し我々は, より少ない通信コストでノードにかかる負荷やコンテンツの動的分散を行う構造化 P2P ネットワークアルゴリズム Well-distribution Algorithm for an Overlay Network (Waon)[3] に基づいた P2P 安否情報共有システムを提案してきた.

本稿では, P2P 安否情報共有システムへの, ノードの物理的な位置情報に基づくノード ID 生成による, 物理的

¹ 仙台高等専門学校
Sendai National College of Technology
² 東北大学
Tohoku University
³ 東北学院大学
Tohoku Gakuin University

な近傍性を考慮したネットワーク構築法の導入を行う。また、位置情報に基づくノード ID 生成法を P2P 安否情報共有システム上に実装し、実験を通して本提案の有効性を確認する。

2. 関連研究

2.1 Waon

Waon は我々が提案してきた、少ない通信コストでノードにかかる負荷やコンテンツの動的分散を行う構造化 P2P ネットワークアルゴリズムである。Waon ネットワークでは、すべてのノードとコンテンツに一意的に変更可能な ID を割り当て、その ID に基づき、Chord と同様にリング状オーバーレイネットワークを構築する。

また、各ノードが、自身のノードより順方向および逆方向に位置する近隣ノードへのリンクからなる近距離用リンクと、自身のノードより順方向に 2^n ($n = 0, 1, 2, \dots, \log N - 1$) 台 (N はネットワーク全体のノード数) だけ離れたノードへのリンクからなる遠距離用リンクの 2 種類のリンクを構築する。近距離用リンクにより通信の確実な到達性が保証され、遠距離用リンクによってルーティングにかかる処理数が $O(\log N)$ までに削減される。なお、Waon ネットワーク上の各ノードは、自身のノードと successor までの ID 空間上のコンテンツを管理するため、ノードの ID 空間上の位置を動的に変更することで、動的な負荷分散を行う。このとき、ノードの Waon ネットワーク上での移動可能範囲を、自身のノードと隣接ノードの ID 空間上に制限することで、動的負荷分散後もリングネットワーク全体のノードの並び順を保つ。そのため、動的負荷分散に伴うリンクの再構築を不要とする。

Waon は下位層の構造から独立した構造を持つ Waon ネットワークを構築するため、Waon に基づくネットワークを利用するサービスの開発者は下位層の構造や制限を意識する必要がないという利点がある。しかし、不安定なネットワーク環境へ Waon を適用する際は、下位層のネットワークにかかる負荷の低減という観点から、下位層のトポロジを考慮した Waon ネットワークを構築することが望ましい。

2.2 トポロジマッチング

トポロジウェアなオーバーレイネットワークの構築を目的とした研究が多数行われている。

通信遅延の計測から論理トポロジの推測を行い、オーバーレイネットワークのトポロジを最適化する研究には LTM[4] がある。LTM は、通信遅延計測用データのフラグディングを 2 ホップ先までを行い、2 ホップ以内のトポロジを推定し、特定のピアまでに複数の経路が存在する場合に非効率な論理リンクを削除することで、オーバーレイネットワークの適合化を行っている。

また、ノードの物理的な近傍性に基づきトポロジを形成し、下位層のトポロジの形状に適合化する研究には、階層的なプレフィックス構造を持つノード ID の生成 [5] がある。この手法では、1 次元 ID 空間を持つ構造化 P2P ネットワークにおいて、Region(大陸)、Sub-region(ティア 1・2 プロバイダ)、Leaf(地域的なインターネットサービスプロバイダ) の 3 つから構成される階層的なプレフィックスを、ランダム生成のビット列に加えて 1 次元のノード ID に組み込むことで、ノードの物理的な近傍性をオーバーレイネットワークに適用する。物理的な近傍性に関連して、オーバーレイネットワークにおけるコンテンツの分散管理に位置情報を用いる手法には、SONAR[6] や ZNet[7]、文献 [8] がある。SONAR は位置情報に基づいたサービスを提供するために、コンテンツに付加された 2 次元の位置情報を基に 2 次元の ID 空間から構成される構造化 P2P ネットワークにおけるコンテンツ ID へのマッピングを行い、コンテンツの位置情報に基づくコンテンツの配置をオーバーレイネットワークに適用する手法である。ZNet や文献 [8] は、位置情報のコンテンツを P2P ネットワーク上で効率的に分散管理するため、空間充填曲線の Z 曲線による 2 次元の位置情報の Z 値へマッピングし、Skip Graph[9] と組み合わせる手法である。

2.3 安否確認システム

不安定なネットワーク環境下で利用されるネットワークサービスには、大規模災害発生時に用いられる安否確認サービスがある。災害発生時の、基地局や伝送設備の破損、電話回線およびインターネット回線の輻輳、長時間の停電による基地局の停波などにより、個人間の連絡手段が途絶えるため、様々な災害情報や安否情報の共有システムの研究開発が行われている。東日本大震災時、実際に運用された安否確認サービスには、災害用伝言ダイヤルや、それを Web でのテキストベースの伝言として応用した Web171[10]、通信キャリアによる携帯向け災害用伝言板、公開可能な情報を Web 上に登録し安否情報の共有を行う Google Person Finder[11] などがある。これまでの Web 上の安否確認サービスは、C/S 方式のネットワークに基づき運用され、サーバ上でコンテンツやサービスを一元的に管理するため、制御の容易性に加えて、クライアント側の端末負荷が低いという利点がある。しかし、サーバまで通信回線を確保することが前提であるため、被災地の分断されたネットワークからの利用が困難である。さらに、サーバが単一障害点となるため、災害時の停電や設備破損によりサーバが停止するとサービス全体が停止するなどの問題がある。

2.4 技術的課題

C/S 方式の安否確認システムには 2.3 節で述べたよう

に、分断されたネットワークでの利用が困難であること、単一障害点の存在や低い拡張性という問題点がある。そこで我々は、生存ノードのみでネットワークを構築し、ネットワークの一部分やノードに障害が発生した場合においても、残りのノードでサービス提供を継続して行うことが可能な P2P ネットワークの高い耐障害性を用いて、自治体間での安否情報共有を想定した構造化 P2P ネットワーク Waon に基づく P2P 安否情報共有システム [12] を提案してきた。

P2P 安否情報共有システムは物理的な構造や IP 層の構造とは独立した構造を持つ Waon ネットワークをアプリケーション層で構築し、その Waon ネットワークのトポロジに従ってルーティングやノード間の通信を行う。しかし、現在の P2P 安否情報共有システムには、以下の課題がある。

(P1) トポロジの不一致による下位層のネットワーク上の冗長なトラフィックの増加

下位層のネットワークとトポロジが一致しない Waon ネットワークのリンクに基づいたルーティングにより、下位層でトラフィックが迂回して転送される。また、トラフィックの迂回先が被災地に存在するノードの場合、被災地外のネットワーク内で完結することが可能な通信によって、被災地のネットワークやノードへの負荷が増加することや、経路先の劣悪なネットワーク環境における転送によりパケットが損失することが考えられる。

トポロジの不一致を抑制するために 2.2 節にて述べた手法を P2P 安否情報共有システムに適用することは困難である。LTM などの論理トポロジの推測結果を基にオーバーレイネットワークのトポロジを最適化する手法は、遅延計測による通信コストの増加に加え、低速なネットワークなど通信遅延が比例しないネットワークにおいては有効ではない。また、階層的なプレフィックス構造を持つノード ID の生成は、被災地において使用される衛星回線を用いた通信やアドホックネットワーク内での運用に ISP による分類を適用することは困難である。SONAR や ZNet はオーバーレイネットワークへの物理的な位置情報のマッピングを行っているが、1次元のリング状 Waon ネットワークへの適用は困難である。

そこで本研究では以下の手法を P2P 安否情報共有システムへ導入する。

(S1) Z 曲線によるノード ID へのノードの物理的な位置情報のマッピング

ノードの物理的な位置情報をマッピングしたノード ID を生成することで、ノードの物理的な近傍性を考慮した Waon ネットワークを構築し、下位層のネッ

トワークのトポロジとの不一致を軽減する。

なお、Waon における負荷分散では Waon ネットワーク上のノードの並び順は保存される。そのため、負荷分散の実行によりトポロジの不一致が再び増大することはない。

3. トポロジアウェアな P2P 安否情報共有システム

3.1 現状の安否情報共有システム

P2P 安否情報共有システムは大規模災害発生時の自治体間での安否情報共有を想定した、Waon を基盤技術とする情報共有システムである。そのため、被災地内外の自治体の通信可能な生存ノードが、自律的に自身のノードに変更可能な一意のノード ID を割り当て、そのノード ID の大小関係に基づいて Waon ネットワークを構築する。被災地の不安定なネットワーク環境下でノードがネットワークから突然離脱した場合においても、残りのノードがリング状の Waon ネットワークを維持し、継続して安否情報共有サービスを提供する。なお、P2P 安否情報共有システムは安否情報として、避難者の氏名、年齢、避難場所、備考を取り扱い、これらの情報からノード ID とは別に一意のコンテンツ ID を生成する。生成したコンテンツ ID を安否情報に割り当て、コンテンツ ID に基づいて Waon ネットワーク上に配置することで安否情報の登録を行う。また、被災地の不安定なネットワークにおけるノードの離脱による情報の喪失を考慮し、各ノードが定期的に Waon ネットワーク上の離れた場所に安否情報の複製を配置する。

現在の P2P 安否情報共有システムは、ノードの IP アドレスとポート番号をキーとした SHA-1 ハッシュ値を用いてノード ID を生成するが、本稿では、Z 曲線を用いたノードの物理的な位置情報のマッピングによるノード ID 生成手法を提案する。

3.2 Z 曲線を用いたマッピング

Z 曲線 (モートン曲線)[13] は、多次元空間を 1 本の連続した線で埋め尽くす空間充填曲線の一種である。空間充填曲線を用いることで、近傍性を保ちつつ多次元空間における座標から 1 次元直線における座標にマッピングを行うことができる。Z 曲線は単純なビット演算のみで計算可能な空間充填曲線である。そのため、本稿では実装が容易で計算量の少ない Z 曲線をマッピングに用いる空間充填曲線とする。

Z 曲線は 2 次元平面の場合、以下の手順で 2 次元座標値から 1 次元座標値へのマッピングを行う。

- (1) 対象の 2 次元平面を格子状の小さい矩形領域に分割する
- (2) 各矩形領域に横軸と縦軸方向の整数の座標値を割り当てる

- (3) 2つの座標値のビット値を交互に組み合わせて Z 値を計算し、1次元座標値とする

マッピング元となる平面全体を $d \times d$ (d は偶数) に分割した全矩形領域に対し、2次元の離散座標値を割り当てる。1次元座標へとマッピングを行う対象矩形領域の離散座標 (x, y) の2進数表記を $(x_1x_2\dots x_{k-1}x_k, y_1y_2\dots y_{k-1}y_k)$ とすると、以下の式に従い、ビット列を交互に組み合わせて 2dbit の Z 値 ($zValue$) を求める。

$$zValue = x_1y_1x_2y_2\dots x_{k-1}y_{k-1}x_ky_k$$

例として $d = 4$ とした場合の各矩形領域の座標値と、座標値を小さい順に接続した Z 曲線を図 1 に示す。

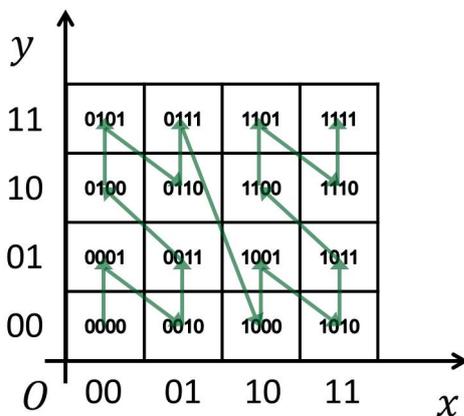


図 1 Z 曲線

図 1 では、 4×4 の 16 個に分割した矩形領域に 2bit の x 軸方向と y 軸方向の離散座標値を割り当て、そのビット列を交互に組み合わせて、“0000”(0) から “1111”(F) の Z 値を算出する。

このように、Z 曲線により $d \times d$ に分割した矩形領域を 1 本の “Z” 形の曲線で接続して対象の平面を埋め尽くし、平面座標を $0 \leq zValue \leq d^2 - 1$ の 1次元座標値 (Z 値) にマッピングすることができる。

3.3 物理的な位置情報に基づくノード ID の生成

2.1 節にて述べたように、Waon ネットワークは 1次元のノード ID に基づくオーバーレイネットワークであるため、ノード ID にノードの物理的な位置情報を適用することによって、トポロジウェアな Waon ネットワークを構築することができる。そこで、Waon の 1次元ノード ID に 2次元の位置情報を適用するため、以下の手順に従って 3.2 節の Z 曲線によるマッピングを行う。

- (1) マッピング対象とする地理的なエリアを決定する
- (2) マッピング対象エリアをメッシュ状に矩形領域へ分割する

- (3) 各矩形領域の代表点の地理座標値を自然数に正規化する

- (4) (3) の座標値を基に、各矩形領域に離散座標値を割り当てる

- (5) 2つの離散座標値のビット値を交互に組み合わせて Z 値を算出する

- (6) (5) の Z 値を正規化した値をノード ID とする

利用想定地域が限定できる場合は、その地域のみをマッピング対象エリアとして決定する。マッピング対象エリアを限定することにより、ノードの物理的な配置のエリアに対しマッピング対象エリアが極端に大きかった場合に生成される Z 値およびノード ID に偏りが生じ、生成される Z 値およびノード ID の衝突が生じる可能性を低減する。

次に、マッピングのために矩形領域への分割を行い、正の離散座標の割り当てを行う。2次元の位置情報として緯度・経度からなる地理座標を用いる場合、10進数表記の地理座標ならば自然数へ正規化する必要がある。地理座標の中でも世界測地系の場合は、小数点を含む、西経と東経、北緯と南緯の座標を、全て自然数の範囲に正規化した座標値を、矩形領域の離散座標値とし、離散座標値のビット列を交互に組み合わせたビット列を、Z 値 ($zValue$) として生成する。

最後に、生成した Z 値 ($zValue$) の正規化を行い、Waon ネットワークにおけるノード ID ($nodeID$) とする。なお、正規化は、マッピング対象エリアにおける最大の Z 値 ($maxZValue$)、Waon ネットワークにおける最大のノード ID ($maxNodeID$) を用いて、以下の式に基づいて行う。

$$nodeID = \frac{zValue \times maxNodeID}{maxZValue}$$

例として、地球全体を 4×4 のエリアに分割し、西経 180 度南緯 90 度を原点とし、北が Y 軸方向、東が X 軸方向となるよう定めた座標系における、離散座標値から 4bit ノード ID へのマッピングを図 2 に示す。ノード C のエリアは緯度として “10”(2)、経度として “10”(2) の離散座標値を持つため、この座標値のビット列を交互に組み合わせた Z 値 “1100”(C) がノード ID として利用される。

3.4 P2P 安否情報共有システムへの適用

本手法に基づく P2P 安否情報共有システムは、新規参加ノードが以下の手順に従って参加処理を行うことで、Waon ネットワークを構築する。

- (1) 参加ノードが自身のノード ID を生成する
- (2) 紹介ノードと近隣ノード情報を交換する
- (3) 自身のノード ID に従い、自身の近隣ノード情報を取得するまで再帰的に問い合わせる

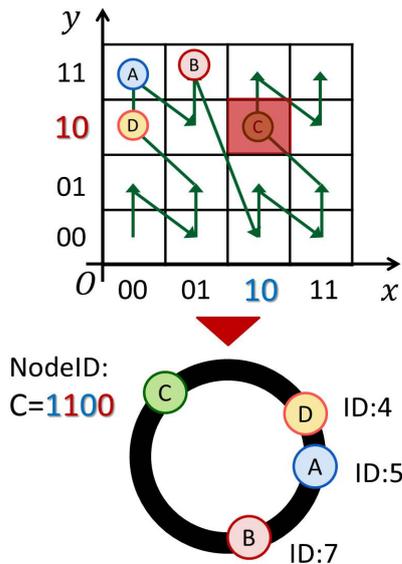


図 2 Z 曲線を用いた 1 次元ノード ID の生成

- (4) 近隣ノード情報に基づき、隣接ノードと近距離用リンクを構築する
- (5) ホップ数に基づく遠距離用リンクを構築する
- (6) 自身のノードと successor 間の ID 空間上のコンテンツを successor から譲り受ける

なお、新規参加ノードは、Waon ネットワークへの参加処理後、他ノードの参加や離脱を検知するために、隣接ノードと定期的に生存確認メッセージの送受信を行う。

本手法では手順の (1) において、3.3 節にて述べたノード ID 生成法を用いる。すなわち、ID 空間上における近隣ノードには、物理的に近隣に位置するノードを配置し、ノードの物理的な近傍性および下位層のトポロジを考慮した Waon ネットワークを構築する。

図 3 に、 $x = 6, y = 2$ の座標値を持つエリアに位置するノード C4 が、ノード C3 を紹介ノードとして既存の 6bitID 空間からなる Waon ネットワークへ参加する例を示す。ノード A1 から A6 は被災地外のノード、ノード B1 から B9 は被災地近隣のノード、ノード C1 から C7 を被災地内のノードとする。まず、ノード C4 は $x = "110"(6), y = "010"(2)$ の座標値から Z 値 $"101100"(2C)$ を算出する。ここで、算出した Z 値の bit 数 6bit とノード ID の bit 数が等しく、正規化は不要であるため、ノード C4 のノード ID を $"101100"(2C)$ として自身のノードに割り当てる。次に、ノード C4 は紹介ノード C3 の近隣ノード情報 $\{C2(\text{nodeID} = "101001"), B3(\text{nodeID} = "100101")\}$ から、自身のノード ID に近い、ノード C2 に対して近隣ノード情報の問い合わせを行う。この問い合わせを再帰的に繰り返し、ノード C4 は、ノード C5($\text{nodeID} = "101101"$) とノード C2 が自身の近隣ノードと判断し、これらのノードと近距離用リンクを構築する。その後、ホップ数に基づい

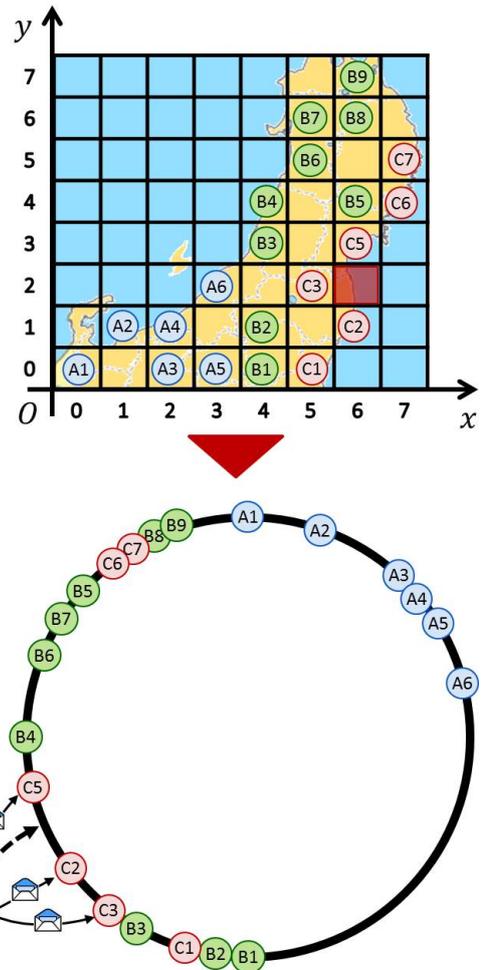


図 3 Waon ネットワークの構築

てノード C5, B4, B7, B8, B1 と遠距離用リンクを構築する。最後に、ノード C4 が新たに管理する安否情報をノード C2 から譲り受ける。

このように、近距離のリンクの構築に必要な通信や、各ノードが定期的に隣接ノードと送受信する生存確認の通信を物理的に近隣のノード間で行い、メッセージの物理的な伝送距離を短縮する。

また、ノード参加処理の終了後、以下の手順に従い安否情報の登録を行い、安否情報の共有を開始する。

- (1) 登録する安否情報のコンテンツ ID を生成する
- (2) コンテンツ ID に基づき、安否情報を管理するノード (管理ノード) の情報を取得するまで再帰的に問い合わせる
- (3) 取得した管理ノード情報に従い、管理ノードに安否情報を直接送信する

ここで、図 3 のノード C4 が、コンテンツ ID を $\text{ObjectID} = "100111"(27)$ とする安否情報を Waon ネットワークに登録する例を示す。まず、安否情報を登録するノード C4 が、安否情報の内容からコンテンツ ID

(ObjectID = “100111”) を生成する．次に，ノード C4 がリンクを構築しているノード {C2, C5, B4, B7, B8, B1} の中から登録する安否情報のコンテンツ ID に最も近いノード ID を持つノード B7(*nodeID* = “110110”) に問い合わせを行う．この問い合わせを参加処理と同様に再帰的に繰り返し，ノード B5(*nodeID* = “111000”) を登録する安否情報の管理ノードと判断し，ノード B5 へ直接安否情報を送信する．その後，安否情報の複製を Waon ネットワーク上の離れた位置に配置する．

このように，Waon ネットワーク上で近いノードに配置される安否情報の登録に必要な通信を，物理的に近隣のノード間で行い，メッセージ転送の局所性を向上する．また，安否情報の登録後，安否情報の複製が Waon ネットワーク上の離れた位置に分散して配置されるため，被災地内ノードの持つ安否情報が被災地外ノードへ配置される可能性を高め，被災地外への情報の拡散と情報の生存率の向上を図る．

4. 実装と評価

4.1 実装

P2P 安否情報共有システム上に，本手法の物理的な位置情報に基づくノード ID の生成法を実装した．ID 長は 20 バイト ($0 \leq nodeID \leq 2^{160} - 1$)，すなわち $maxNodeID = 2^{160} - 1$ とした．また，位置情報の入力には東経，北緯を正の方向とした 10 進数表記の緯度 ($-90.00000 \leq lat \leq +90.00000$)，経度 ($-180.00000 \leq lon \leq +180.00000$) とし，小数点以下 5 位までの入力を有効とした．なお，Z 値の算出には，入力を自然数の範囲に正規化した ($0 \leq (lat + 90) \times 10^5 \leq 18000000$)，($0 \leq (lon + 180) \times 10^5 \leq 36000000$) を用いた．従って，最大の Z 値は東経 180.00000 度，北緯 90.00000 とした時の Z 値であるから， $maxZValue = 165087618048$ となる．よって，*nodeID* は下記の式によって求められる．

$$nodeID = \frac{zValue \times maxNodeID}{maxZValue} = \frac{zValue \times 2^{160} - 1}{165087618048}$$

4.2 実験の目的と実験環境

本手法の有効性を確認するため，4.1 節のシステムを用いて，ノードの物理的な位置情報を反映したノード ID の生成確認実験と，ネットワークトラフィック計測の実験を行った．また，各実験において，従来のハッシュ関数 SHA-1 を用いたノード ID 生成法との比較を行った．実験環境を図 4 に示す．下記の性能を持つデスクトップ PC2 台を Ethernet LAN によってルータを介して接続し，それぞれのマシンに IP アドレス 192.168.0.2, 192.168.0.3 を割り当てた．

各々のマシン上で複数のノードを起動し，実験によりネットワーク上で通信させた際のデータを取得した．

CPU Intel® Core™ i5-4670 3.40GHz
メモリ容量 16.0GB
OS Windows 8.1 Pro

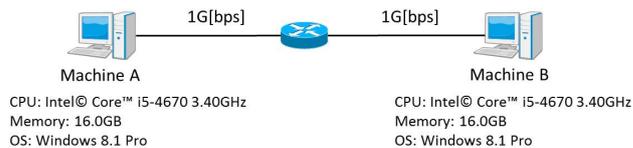


図 4 実験環境

4.3 ノード ID の生成に関する実験

本実験では，従来の SHA-1 ハッシュ値を用いたノード ID 生成法と，本手法に基づいたノード ID 生成法について，生成されたノード ID と Waon ネットワークにおけるノード配置の確認を，以下の実験手順に従って行った．

- step1. 各ノードに仮想の位置情報を与え，ノード ID を生成する
- step2. 生成したノード ID に基づいて Waon ネットワークを構築する

IP アドレス 192.168.0.2 を割り当てたマシン A 上で，3997 番から 4012 番のそれぞれのポートに評価実験用アプリケーションを起動し，16 台の仮想的なノードを起動した．

本手法を用いてノード ID を生成するノードにはそれぞれ，表 1 に示した位置情報を与えた．

表 1 実験用位置情報

	国名	緯度	経度
A	日本	38.16752	140.86508
B		38.16644	140.86346
C		38.27563	140.75147
D		38.27733	140.75168
E	タイ	13.72626	100.77642
F		13.72978	100.77985
G	フィンランド	60.44720	22.29977
H		60.44912	22.29565
I		60.44434	22.26871
J		60.45327	22.27832
K	フランス	50.43842	2.80736
L		50.61057	3.13800
M		-90.00000	-180.00000
N		90.00000	180.00000
O		90.00000	-180.00000
P		0.00000	0.00000

生成されたノード ID を 16 進数で表したものを表 2 に示す．

表 2 より，従来の手法では同一マシン上の同一の IP アドレスのノードに対し，異なる一様のノード ID が生成されたことを確認した．一方，本手法ではフィンランドの位

表 2 生成されたノード ID

	従来手法によるノード ID	本手法によるノード ID
A	18545e2851d0832009c9ff07211c5b266878217b	542b4a6d88db25c0841d206cd733cd931be6e891
B	379e5292db6776d3446f433d13f0d9a76120dccc	542b4a6d777a263b7d052126d7358a75a48da06c
C	3ee3bda266377a9099ce18eb5fb1e06564960151	542b40f40f1cfe2cea1071e86bf3979127fc430
D	549598958a75f672d6762905f4fe209a562624e3	542b40f541eb8467d6ad12cdf78c91f3b7581714
E	53ee759fda8eab4d51fde1ab540b6eba99a51fff	4f03b17cb85903bdf468cae42dabab124b03ef672
F	6d6a6b9910fb863f5d42b9864ad1c9faf5cc726	4f03b17d1b0243c419bd26a5450c942086c48852
G	221476948f4e26e13e05fcb797b1e119a913a7	4316a89e948cda5ab431c2ffadbb523e2c21f05ee
H	405db75350cfc74ad998951b0f25f29e21fb8db	4316a89dd7faad8828bb85bf79dea7529ca1ed3
I	5634d5cd6b6e608ef6e17de2dc5f7d6618a99df6	4316a879ef957efb7d12ee9267ef2d3bf153e06a
J	1d1d179c761a140274b009564cea7935f1eb2361	4316a890b86ae5e6f0007ba8fd2e0d42893497f7
K	269f95804d59b6150481d5f27eebb617265fc002	41e037db70709b6314f1daf67a40f052eeae1e64
L	582699ce16705b7b16fc71140d052de41a7f5677	41e067ad3e385342804364ee74515535629f934e
M	0dd191521f7df4a4b4c694f28b99946db4761e6d	00000000000000000000000000000000000000
N	7f1e734a4c4a6fb2b56764510031d0c709134ce7	ff
O	2669d6cca216c59f3f686f58e85fc9ddcb930bc	1c71c71c71c71c71c71c71c71c71c71c71c71c71
P	3b2d7d0176d83784d0551ea2aaf5e5e25cd42dad	3fffffffffffffffffffffffffffffffffffffff

置情報を持つノード G からノード J は“4316a8”，日本の位置情報を持つノード A からノード D は“542b4”という共通したプレフィックスを含むノード ID が生成された。さらに日本の位置情報を持つノードの中でも，ノード A, B は“542b4a6d”，ノード C, D は“542b40f”という地域によって異なるプレフィックスを含むノード ID が生成された。同様に，フランスのノード 2 台は“41e037”，タイのノード 2 台は“4f03b17”というプレフィックスを含んだ。生成されたノード ID に共通したプレフィックスを含むことから，フィンランドの位置情報を持つノードと日本の位置情報を持つノードが，それぞれ Waon ネットワーク上の一定の範囲にクラスタリングされた。このように，物理的な位置に近いノード同士は共通したプレフィックスを含むノード ID を生成し，Waon ネットワーク上で近い位置に配置され，物理的な位置が遠いノードは全く異なるノード ID を生成し，Waon ネットワーク上で遠く配置されることを確認した。

4.4 ネットワークトラフィックに関する実験

本実験では，以下の実験手順に従って，安否情報を配置する際の Waon ネットワーク上および物理ネットワーク上のネットワークトラフィックを計測した。

- step1. 各ノードに仮想の位置情報を与えノード ID を生成する
- step2. 生成したノード ID に基づいて Waon ネットワークを構築する
- step3. ネットワークが安定するまで待機する
- step4. コンテンツ ID を偏らせた 500 個の安否情報を Waon ネットワーク上に配置し，登録する

2 台のマシン上に本手法を実装した P2P 安否情報共有システムを仮想ノードとして合計 $N = 8, 16, 24, 32$ 台起動し，Waon ネットワークを構築した。マシン A 上で起動したノードにはフィンランド国内の位置情報，マシン B 上のノードには日本国内の位置情報を与えてノード ID を生

成した。Waon ネットワークへの安否情報の登録によるトラフィックを計測するため，全ノードの参加後ネットワークが安定するまで，つまり Waon による通信がルーティングテーブルの定期的なアップデートのみとなるまで待機した。ノードの参加とネットワークの構築処理がすべて終了した後，安否情報の登録を行うノードと同じマシン上の，別の仮想ノードに配置されるようなコンテンツ ID を持つ 500 個の安否情報を登録した。その際，同マシン上と LAN を経由した通信を含めた，ノード間の通信すべてを全トラフィック，そのうち LAN 経由のマシン間の通信を，物理ネットワーク上のトラフィックとして計測を行った。また，従来のノード ID 生成手法に基づいて構築した Waon ネットワークでも，同条件下にてトラフィックの計測を行った。実験結果を図 5 および表 3 に示す。

表 3 安否情報の登録によるトラフィック [Bytes]

	$N = 8$	$N = 16$	$N = 24$	$N = 32$
従来手法の全トラフィック	118655	204760	266348	432663
本手法の全トラフィック	55797	160076	245084	326990
従来手法の LAN 上のトラフィック	118653	204760	205405	223378
本手法の LAN 上のトラフィック	0	0	0	0

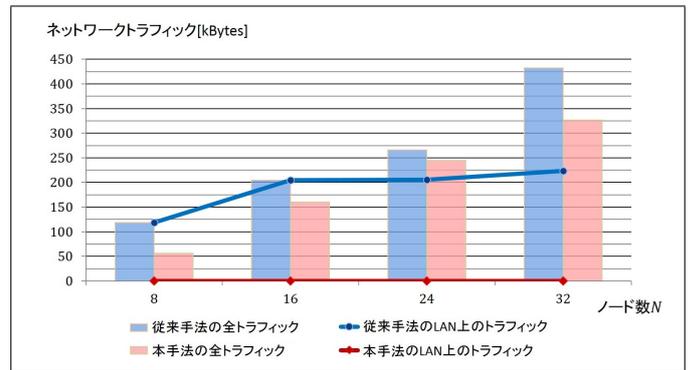


図 5 安否情報の登録時のトラフィック

図 5 より，従来手法に比べ本手法における安否情報登録時の全トラフィックが最大 52.9[%]，最小 7.9[%]，平均 26.9[%] 減少した。そして，LAN を経由した物理ネットワーク上のトラフィックに関して，従来手法では平均 188.0[kB] のトラフィックが生じたが，本手法では LAN を経由したトラフィックは生じなかった。

4.5 評価

4.3 節の実験では，物理的に近隣のノードが同一のプレフィックスを含むノード ID を生成したことから，Waon の ID 空間上で物理的に近いノードをクラスタリングしたことが確認できた。従って，物理的な位置情報に基づくノード ID の生成により，Waon の ID 空間上に物理的な近傍性を適用することができた。

4.4 節の実験では、Waon ネットワーク上でノードの物理的な位置情報に従ってノードのクラスタリングが行われた結果、同じマシン上のノード同士の通信のために、別マシンのノードを経由した通信が発生しないことを確認した。よって、下位層における冗長なルーティングによって生じるトラフィックを削減し、(P1) を解決した。この実験から、一方のマシン上のノードを被災地外のノード、もう一方のマシン上のノードを被災地内のノードとして捉えると、被災地外ノード同士の通信による被災地内のノードを経由した通信の発生を削減し、被災地外ノード間通信による被災地内の負荷増加およびパケット損失の増加の解決に有効である。

しかし、本稿では、循環性の無い空間充填曲線を用いたリング状 Waon ネットワークへのマッピングを行ったため、最も物理的に距離のある Z 曲線の始点と終点が Waon ネットワーク上で近い位置に配置される問題が生じた。具体的には 4.1 節の実装において、南極点と北極点に位置するノードがリング状の Waon ネットワーク上で近隣のノードとしてみなされる。また、本手法では動的負荷分散前の Waon ネットワーク構築時に参加している初期ノードに物理的な位置情報に基づくノード ID を割り当て、ノードの物理的な近傍性を考慮した Waon ネットワークを構築した。動的負荷分散後、Waon のノード ID の変動範囲の制限により、隣接するノードを越えて変動することはなく、ノードの並びが変化せず、ノード間の物理的近傍性によるノード配置は保持される。しかし、Waon ネットワーク上のノードの分布が変化するため、新規に参加するノードに位置情報を考慮したノード ID を生成しても、ID 空間上において物理的な近傍性が適用されない。新規ノードが増加するたびに ID 空間上における位置関係と物理的なノードの近傍性の関連性が崩れていくため、対策手法の検討が課題としてあげられる。

5. おわりに

本稿では P2P 安否情報共有システムにおける、下位層のネットワークのトポロジとの不一致によって生じる問題を解決するため、ノードの物理的な位置情報のノード ID へのマッピングによる、ノードの物理的な近傍性を考慮した Waon ネットワーク構築手法を提案した。また、本手法を適用した P2P 安否情報共有システムを用いた実験を通して、下位層における冗長なトラフィックの削減およびメッセージやコンテンツ流通の局所性の向上による物理的な伝送距離の削減に有効であることを確認した。

今後の課題として、4.5 節にて述べた、循環性のない空間充填曲線によるマッピングの問題と、動的負荷分散後の新規参加ノードに対する物理的な近傍性を考慮したノード ID 生成の問題点の解決があげられる。また、本稿では小規模なネットワークにおいて下位層のトラフィックの計測

を行い本手法の評価実験としたため、さらに複雑で大規模なネットワークにて評価実験を行う予定である。

参考文献

- [1] Stoica, I., Morris, R., Liben-Nowell, D., Karger, D. R., Kaashoek, M. F., Dabek, F. and Balakrishnan, H.: Chord: a scalable peer-to-peer lookup protocol for internet applications, *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, Vol. 11, No. 1, pp. 17–32 (2003).
- [2] Bharambe, A. R., Agrawal, M. and Seshan, S.: Mercury: supporting scalable multi-attribute range queries, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 34, No. 4, pp. 353–366 (2004).
- [3] Takeda, A., Oide, T. and Takahashi, A.: New Structured P2P Network with Dynamic Load Balancing Scheme, *Advanced Information Networking and Applications (WAINA), 2011 IEEE Workshops of International Conference on*, pp. 108–113 (2011).
- [4] Liu, Y., Liu, X., Xiao, L., Ni, L. M. and Zhang, X.: Location-aware topology matching in P2P systems, *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Vol. 4, IEEE, pp. 2220–2230 (2004).
- [5] Zhou, S., Ganger, G. R. and Steenkiste, P. A.: Location-based node ids: Enabling explicit locality in dhds (2003).
- [6] Schütt, T., Schintke, F. and Reinefeld, A.: A structured overlay for multi-dimensional range queries, *Euro-Par 2007 Parallel Processing*, Springer, pp. 503–513 (2007).
- [7] Shu, Y., Ooi, B. C., Tan, K.-L. and Zhou, A.: Supporting multi-dimensional range queries in peer-to-peer systems, *Peer-to-Peer Computing, 2005. P2P 2005. Fifth IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 173–180.
- [8] 秋山大輔, 細川和宏, 安倍広多, 石橋勇人, 松浦敏雄: Z 曲線を用いた効率的な 2 次元位置情報の分散管理手法の提案とその評価, 情報処理学会研究報告. IOT,[インターネットと運用技術], No. 9, pp. 1–6 (2010).
- [9] Aspnes, J. and Shah, G.: Skip graphs, *ACM Transactions on Algorithms (TALG)*, Vol. 3, No. 4, p. 37 (2007).
- [10] 災害用伝言板 (web171) : <https://www.web171.jp/>.
- [11] Google Person Finder : <http://google.org/personfinder/global/home.html>.
- [12] 生出拓馬, 武田敦志, 高橋晶子, 菅沼拓夫: ネットワークアウェアな P2P 型安否情報共有システムの提案, 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 2, pp. 607–618 (2014).
- [13] Morton, G.: *A Computer Oriented Geodetic Data Base and a New Technique in File Sequencing*, International Business Machines Company (1966).