

特別研究報告

題目

ポテンシャル場を用いた実世界表現に基づいた
ネットワーク資源の動的制御方式の提案

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

神田 幸大

2017年2月14日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

ポテンシャル場を用いた実世界表現に基づいたネットワーク資源の動的制御方式の提案

神田 幸大

内容梗概

センサーデバイスの小型化や低価格化とモバイルデバイスの普及にともない、現実世界の状況をセンシングして分析処理し、新たなサービスを提供する実世界センシングが注目されている。実世界センシングなどの技術では、センサー情報を処理することで現実世界の分析を行い、その情報を基いてサービスの提供を行う。しかし、この情報の処理には一定のコンピューティングリソースが必要となり、現在ではデータセンターに情報を集約して処理することが考えられているが、モバイルデバイスに対して遠隔地で処理されるため、即時性の低下が懸念される。そのため、リソースの仮想化技術によって、コンピューティングリソースをモバイルデバイスの近くに配置することが考えられる。しかし、従来の仮想化技術である NFC (Network Function Virtualization) や SDN (Software-Defined Networking) で用いられているリソース制御方式では、実世界センシングなどの技術を用いるアプリケーションには適さない。従来の制御方式である最適化手法は、ネットワーク全体のトラフィック情報を既知とする必要があり、制御周期が長くなり、現実世界の事象に対して即座にリソースを配置できないためである。そこで本報告では、実世界センシングのようなアプリケーションを想定し、モバイルエッジコンピューティング技術によってもたらされる局所的なコンピューティングリソース量と、サービス提供にともなって必要となるネットワークリソース量を、短周期で制御可能な動的リソース制御方式を提案する。動的リソース制御方式は、現実世界のセンサー情報量と、現実世界の情報に対するユーザーアクセス量をポテンシャル場として表現し、ポテンシャルの値に応じたリソース量を配置する。計算機を用いた数値結果により、ユーザーの移動に対応してポテンシャル場が形成されること、および、リソース制約を反映したポテンシャル場が形成されることを確認した。

主な用語

実世界センシング、Mobile Edge Computing(MEC)、仮想化技術、リソース制御、ポテンシャル場

目次

1	はじめに	5
2	ポテンシャル場を用いた実世界表現に基づくネットワークリソース制御方式	9
2.1	想定環境	9
2.2	ポテンシャル場を用いた実世界表現	10
2.2.1	ENV レイヤー	10
2.2.2	IR レイヤー	10
2.2.3	VoI レイヤー	11
2.3	ポテンシャルの更新	12
2.4	リソース制約を考慮したポテンシャル更新式にもとづくリソース制御	13
2.4.1	レイヤー間の相互作用	15
3	ポテンシャル場の動作例	16
3.1	ネットワーク構成	16
3.2	パラメーター設定	16
3.3	ENV レイヤーのポテンシャル変動モデル	17
3.4	計算結果	17
3.4.1	リソース制約がない状況下におけるポテンシャル形成	17
3.4.2	リソース制約がある状況下におけるポテンシャル形成	18
3.4.3	IR レイヤーからのフィードバックを取り入れたポテンシャル形成	28
4	おわりに	31
	謝辞	32
	参考文献	33

目 次

1	モバイルエッジコンピューティングを利用した情報処理の流れ	6
2	コンピューティングリソースとネットワークリソースの配置と利用の様子	9
3	ENV レイヤーのポテンシャル場の例	11
4	VoI レイヤーで拡散したポテンシャル場のイメージ図	12
5	リソース制約に対応するポテンシャルの上限値に達した際のポテンシャル拡散の様子	14
6	各レイヤー間のフィードバック	15
7	エッジルーターの配置	16
8	式 (5) に基いた、あるステップにおける ENV レイヤーのポテンシャル場	18
9	$(x, y) = (30, 50)$ における VoI レイヤーのポテンシャルの時間推移 (更新周期:10 ステップ毎)	19
10	ポテンシャル $I(t, x, y)$ の推移: $D_1 = 0.01, D_2 = 0.025$ の場合	20
11	ポテンシャル $I(t, x, y)$ の推移: $D_1 = 0.01, D_2 = 0.1$ の場合	21
12	式 (6) に基いた、あるステップにおける ENV レイヤーのポテンシャル場	22
13	リソース制約が無いときの、座標 $(x, y) = (30, 50), (30, 60)$ におけるユーザー数とポテンシャルの推移	23
14	ポテンシャル $I(t, x, y)$ の推移: $D_1 = 0.01, D_2 = 0.05$ の場合	24
15	ポテンシャル $I(t, x, y)$ の推移: $D_1 = 0.01, D_2 = 0.1$ の場合	25
16	ポテンシャル $I(t, x, y)$ の推移: $D_1 = 0.05, D_2 = 0.1$ の場合	26
17	IR レイヤーのポテンシャル場	28
18	各ステップにおける ENV レイヤーと VoI レイヤーのポテンシャル場	30

表 目 次

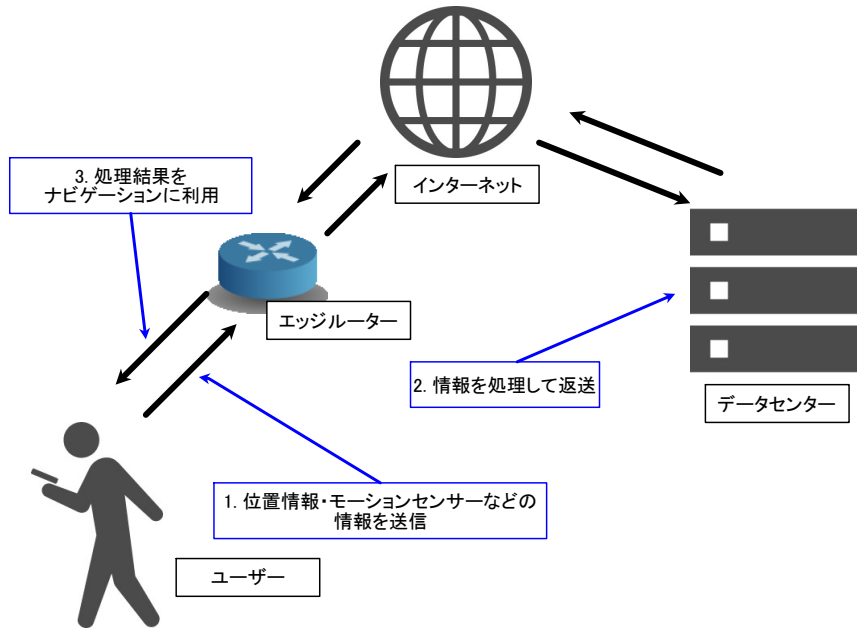
1	各定数・パラメータの説明	13
2	パラメーター設定	17

1 はじめに

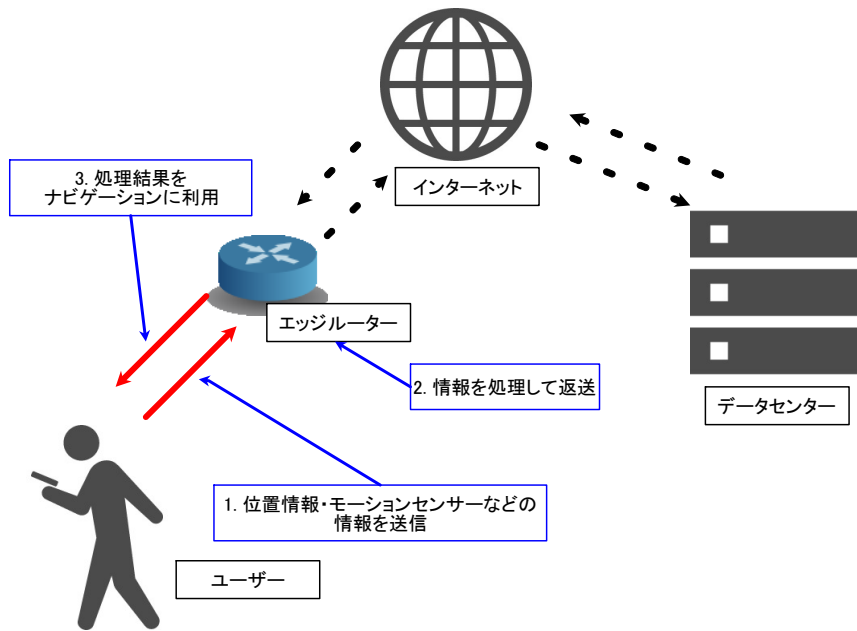
端末技術の発展により様々なユーザーがモバイルデバイスを所持し、ユーザーは常時接続されたネットワークを介した情報発信、情報受信にもとづくサービスを楽しんでいる。モバイルデバイスによって、従来のPC等の非モバイルデバイスによるWebアクセス等のサービスに「いつでも、どこでも」接続可能となった。最近では、非モバイルデバイスの置き換えに留まらず、モバイルデバイスが有するセンサーを活用したアプリケーションやサービスが登場しつつある。例えば現在のスマートフォンには加速度センサー、ジャイロセンサー、GPSセンサーが搭載されており、各ユーザーのこれらのセンサー値を取得・解析し、個々のユーザーに対して行動ナビゲーション等のサービスを提供することが考えられている [1]。このように、センサーを介してモバイルデバイス周辺の現実世界の情報を分析し、新たなサービスを創発する実世界センシングが注目されている [2]。

実世界センシングにおいて最も重要となるのは現実世界の理解であり、多量のセンサー情報から現実世界の情報を抽出するデータマイニング技術の検討が進められている [3]。しかし、当然のことながら、データマイニングには一定のコンピューティングリソースが必要となり、現状ではデータセンター等に情報を集約して分析・加工することが考えられている。

一方、ネットワークの研究分野では、モバイルネットワークの末端となる基地局等にコンピューティングリソースを配置し、新たなアプリケーションやサービスの提供を可能とするモバイルエッジコンピューティング (MEC: Mobile Edge Computing) の標準化が進められている [4]。MECは、よりユーザーに近いモバイルエッジでデータの情報処理を行うことにより低遅延化や即時性向上を図るものであり、映像解析やオブジェクトトラッキングなどのアプリケーションの導入も進められている [5]。例として、図1にMECを用いない場合と用いる場合の、ナビゲーションシステムを利用するときの情報の伝達の違いを示している。前者では、データセンターまで情報を伝達しなければならないのに対し、後者ではよりユーザーに近い場所まで済むため、即時性が高まる。



(a) MEC を用いない場合



(b) MEC を用いる場合

図 1: モバイルエッジコンピューティングを利用した情報処理の流れ

MEC では、モバイルエッジに仮想マシン (Virtual Machine) を配置可能とし、アプリケーション固有のコンピューティングリソースを仮想マシンとして配置することが要件とされており、原則として NFV (Network Function Virtualization) アーキテクチャに準じるものとされている [6]。すなわち、NFV はルータ機能やスイッチ機能などのネットワーク機能を仮想化するものであり、MEC はユーザーが求めるアプリケーション機能を仮想化するものであるが、MEC におけるリソース制御は、NFV と同様の制御フレームワークとなる。特にモバイルエッジ間やモバイルエッジとデータセンターで連携が必要となる場合のネットワークリソース制御は、Software-Defined Networking (SDN) と同様の制御フレームワークになるものと考えられる。

実世界センシングなど、モバイルデバイス周辺の環境に依存した情報処理を行うアプリケーションにとって、MEC により得られるコンピューティングリソース配置の柔軟性は魅力的である。MEC を用いない場合、ユーザー側のモバイルデバイスからのセンサー情報は、エッジルーター、インターネットを通じてデータセンター (DC) に送信され、DC でセンサー情報を処理されたのち、その処理結果が同様にインターネット、エッジルーターを介してユーザー端末に送られることとなる (図 1(a))。すなわち、モバイルデバイスの周辺環境の分析を遠隔地の DC で行うこととなり、即時性の低下が懸念される。最近ではクラウドサービスの普及やセンサーデバイスの増加によって、ユーザーから DC に送られるアップストリーム情報が増加しており、データセンターに情報を集約する形態では、許容できない遅延が発生することが指摘されている [7, 8]。また、センサー情報の量は一定ではなく、ユーザーの移動やモバイルデバイス周辺で生じる事象に依存して常に変動する。そのため、センサー情報量の過多に応じたコンピューティングリソースと、データマイニングにより得られる現実世界の情報に対するアクセス量に応じたネットワークリソースを柔軟に配置することが望まれる。

ところが、従来の NFV や SDN で想定されているリソース制御方式を適用すると、現実世界で生じる事象の変化に追従したリソース制御が実現できない可能性がある。ここで言う従来のリソース制御方式とは、現実世界で生じる事象を無視してセンサー情報の発生量やトラフィック量のみを観測し、平均値や予測値をもとに最適化手法等を用いて必要リソース量を計算して配置するものである。最適化手法の計算のためには、ネットワーク全体のセンサー情報の発生量やトラフィック量の観測値を得る必要があり、結果としてリソース制御周期は長延化する。また、現実世界で生じる事象は平滑化されることになり、例えば交通事故発生等の非定常的な事象にともなう一時的なセンサー情報やトラフィックの増大に対応できない。Web 等の従来型のアプリケーションにおけるトラフィック量の変化については、トラフィックはユーザーのブラウザ操作にもとづいて発生するため、平滑化を前提とするリソース制御でも対応できる可能性はある。しかし、実世界センシングのようなユーザー操作に依存せずに情報が

発生するアプリケーションに対応していくためには、現実世界で生じる事象の変化に応じたコンピューティングリソースとネットワークリソースの増減を即座に行う制御方式が必要である。

そこで本報告では、現実世界で生じる事象の変化に連動してコンピューティングリソース量やネットワークリソース量を調整するリソース動的制御方式を提案する。具体的には、現実世界のセンサー情報量と、それらの情報に対するユーザーアクセス量をポテンシャル場として表現し、ポテンシャルの値に応じたリソース量を配置する。提案方式は、現実世界で生じる事象の変化を即座にポテンシャルに反映しつつも、事象のゆらぎや潜在的な情報アクセスに備えた時空間上のリソース制御を、ポテンシャルの自己組織的な更新によって実現する。

本報告の構成は以下の通りである。2章でポテンシャル場を用いた実世界表現に基づくネットワークリソース制御方式を述べる。3章では、ユーザーの移動に対するポテンシャル場の挙動とリソース量制約下におけるポテンシャル場の挙動を確認する。本報告のまとめと今後の課題を4章で述べる。

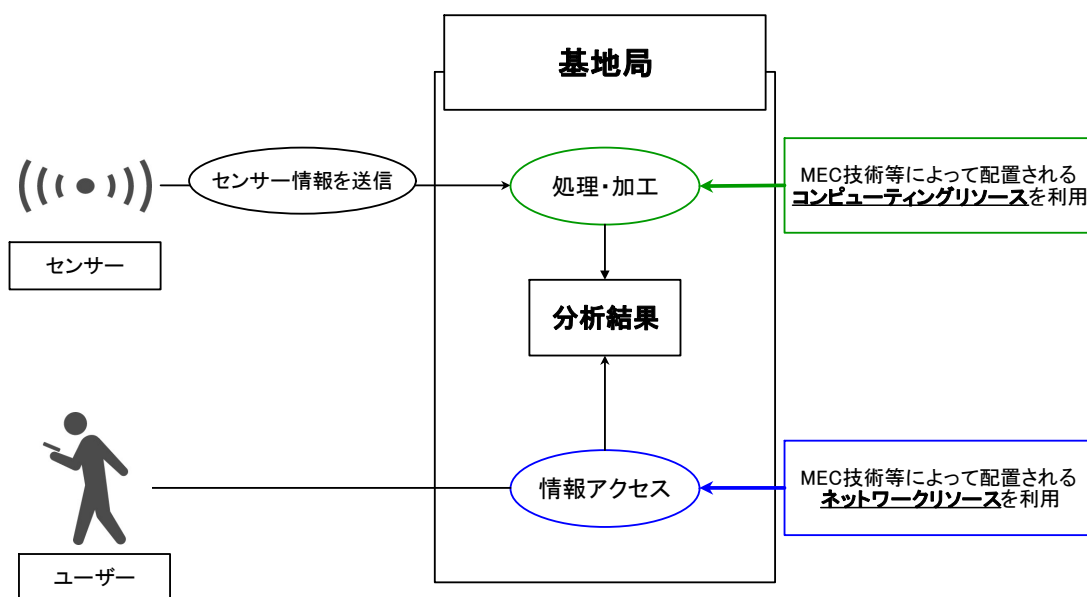


図 2: コンピューティングリソースとネットワークリソースの配置と利用の様子

2 ポテンシャル場を用いた実世界表現に基づくネットワークリソース制御方式

2.1 想定環境

本報告で想定するネットワーク環境・コンピューティング環境は以下の通りである。ユーザーはモバイルデバイスを有しており、モバイルデバイスから基地局方向に対してセンサー情報が発出される。センサー情報は、MEC等の技術により基地局に配置されるコンピューティングリソースを用いて分析される。分析結果は基地局に置かれ、その基地局に接続する他のユーザーが取得する、もしくは、その基地局とは空間的に離れたユーザーが基地局間ネットワークを介して取得するものとする。これは、例えば交通事故発生にともない局所的に増大するセンサー情報の発生と、センサー情報の分析により得られる交通事故発生情報に対するユーザーの情報アクセスを想定している。図2に、コンピューティングリソースを用いてセンサー情報を処理・加工する様子と、ネットワークリソースを用いてユーザーからの情報アクセスを処理する様子を示している。また、センサー情報の分析に要するコンピューティングリソース量や、情報アクセスに備えたネットワークリソース量は可変であるものとする。なお、以降の各節で述べるリソース制御方式のポテンシャル計算に要するコンピューティングリソースは、各基地局に置かれるものとする。

2.2 ポテンシャル場を用いた実世界表現

ポテンシャル場は制御情報や制御状態を表現する一手段であり、モバイルアドホックネットワークを対象としたポテンシャルルーティング [9] では、情報を集めたいノードまでの距離をポテンシャルとして表現し、各ノードでは自己組織的にポテンシャルを更新しつつポテンシャル場を形成し、所望のノードまでの経路制御を実現している。

本報告では、現実世界で生じる事象と連動して必要となるコンピューティングリソース量とネットワークリソース量をポテンシャルとして表現する。これらをポテンシャルとして表現できれば、各モバイルエッジは現実世界で生じる事象や情報アクセスの詳細を把握することなく、ポテンシャル値の更新と拡散のみによって時空間上のリソース制御が可能となり、より短い周期での制御が期待できる。そこで、提案方式では、センサー情報の発生量をポテンシャルとして表現する ENV レイヤー (Environmental レイヤー) と、ユーザーの情報取得量をポテンシャルとして表現する IR レイヤー (Information Retrieval レイヤー) を導入し、これらのレイヤーのポテンシャル場と空間的かつ時間的に相互に作用することによって情報への潜在的なアクセス量をポテンシャルとして表現する VoI レイヤー (Value of Information レイヤー) の 3 つのレイヤーを導入する。なお、コンピューティングリソース制御は ENV レイヤーのポテンシャルにもとづいて制御するものとし、ネットワークリソース制御は VoI レイヤーのポテンシャルにもとづいて制御するものとしている。以降では、各レイヤーの役割と、そのレイヤーのポテンシャルが表現するものを説明する。

2.2.1 ENV レイヤー

実世界から得られるユーザー数やセンサー情報量を取得し、ポテンシャルとして表現する。図 3 は、ENV レイヤーのポテンシャル場の例である。図では二次元の空間上の座標 $(x, y) = (50, 50)$ において交通事故等の何らかの事象が生じ、センサー情報量が座標 $(50, 50)$ を中心とした空間上に広がっている様子を表現している。センサー情報を分析するためのコンピューティングリソースの量は、センサー情報の発生量にもとづいて定まるものと考えられるため、ENV レイヤーのポテンシャルを何らかの関数により変換して決定すれば良い。

2.2.2 IR レイヤー

実世界のユーザーによる情報の利用に基いてポテンシャル場を形成する。このポテンシャル場は、MEC によってある地点の情報が利用されればされるほど、その地点のポテンシャルが高まるように設計する。すなわち、このポテンシャルが高ければそのノードの持つ情報の価値が高いことが表現され、ポテンシャルが低ければ情報の価値が低いことを表現される。

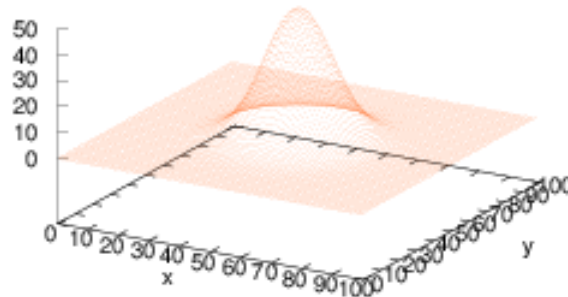


図 3: ENV レイヤーのポテンシャル場の例

2.2.3 VoI レイヤー

VoI レイヤーでは、ENV レイヤーと IR レイヤーのポテンシャル場と相互に作用し、情報への潜在的なアクセス量をポテンシャルとして表現する。基本的には、ある座標において、ENV レイヤーのポテンシャル値が高ければ高いほど VoI レイヤーのポテンシャル値を高くし、また、IR レイヤーのポテンシャル値が高ければ高いほど VoI レイヤーのポテンシャル値を高くする。

ただし、実世界センシングなどのアプリケーションが対象である場合、時間的かつ空間的な相互作用を想定しておく必要がある。例えばある座標においてセンサー情報量が高くなり ENV レイヤーのポテンシャル値が高くなると、そのセンサー情報（もしくは、センサー情報を加工した情報）へのアクセスは、その座標のユーザーからだけではなく近隣のユーザーからも行われるものと考えられる。また、時間的な相互作用としては、潜在的なアクセス量は瞬時に失われるものではなく、時間経過とともに減衰していくものと考えられる。このような時間的かつ空間的な相互作用を、隣接モバイルエッジとのポテンシャル値の交換と拡散によって表現する。具体的なポテンシャルの更新式は、2.3 節で説明する。なお、図 4 は、図 3 で与えられる ENV レイヤーのポテンシャル場に対して、2.3 節のポテンシャルの更新式を適用した場合の VoI レイヤーのポテンシャル場である。ENV レイヤーのポテンシャル場と比較すると、ポテンシャル場の拡散によって浅く広がるポテンシャル場となっていることがわかる。

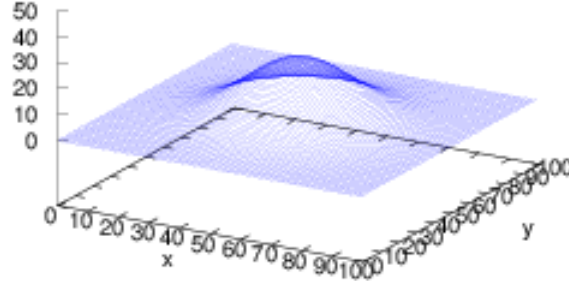


図 4: VoI レイヤーで拡散したポテンシャル場のイメージ図

2.3 ポテンシャルの更新

本節では、VoI レイヤーで扱うポテンシャル $I(t, x, y)$ の計算式を説明する。説明にあたり、計算式で用いる定数および変数を表 1 にまとめる。これらの定数や変数を用いたポテンシャル $I(t, x, y)$ の更新式を以下に示す。

$$C(t+1, x, y) = (1-D_u)p(t, x, y) + \frac{1}{4}D_u(C(t, x \pm 1, y) + C(t, x, y \pm 1)) \quad (1)$$

$$\frac{\partial I(t, x, y)}{\partial t} = Pf + D_c + D_v \left(\frac{\partial I(t, x, y)}{\partial^2 x} + \frac{\partial I(t, x, y)}{\partial^2 y} \right) - n \quad (2)$$

$$D_c = \begin{cases} D_t \frac{\partial C(t, x, y)}{\partial t} & \left(\frac{\partial C(t, x, y)}{\partial t} \geq 0 \right) \\ D_t \frac{\partial C(t, x, y)}{\partial t} \tanh G \cdot I(t, x, y) & \left(\frac{\partial C(t, x, y)}{\partial t} < 0 \right) \end{cases} \quad (3)$$

$C(t, x, y)$ は VoI レイヤーにおける内部変数であり、センサー情報量 p に基いて計算される。このとき、座標 (x, y) だけでなく、周囲の座標 $(x \pm 1, y), (x, y \pm 1)$ のセンサー情報量の変化を反映する。拡散係数 D_u が大きければ周囲のセンサー情報量をより反映する。 C の変化量を D_c 倍したものと、周囲との拡散項、固定減少値、IR レイヤーからのフィードバックの合計値が、 I の変化量となる。式 (3) では、 $C(t, x, y)$ の変化量が負である場合に、 $\tanh G \cdot I(t, x, y)$ を乗じている。 $I(t, x, y)$ の値が 0 に近い値で更に減少するときに、負の値となることを防ぐためである。

表 1: 各定数・パラメータの説明

x, y	座標
t	ステップ数
$p(t, x, y)$	ステップ t 、座標 (x, y) におけるセンサー情報量
$C(t, x, y)$	VoI レイヤーにおける内部変数
$I(t, x, y)$	ポテンシャル
D_u	C の拡散係数
D_t	ポテンシャルの、 $C(t, x, y)$ に対する時定数
D_v	ポテンシャルの拡散係数
n	固定減少値
G	$C(t, x, y)$ に対する減少係数
Pf	他のレイヤーから受けるフィードバック

式 (2) の右辺第三項は隣接ノードからの拡散されるポテンシャルであるが、それぞれの方向のポテンシャルの二階微分を行っている。これは、拡散方程式を利用したものであり、ポテンシャルを密度と捉えたとき、密度差が大きいときに拡散を早め、密度差が小さいときに拡散が遅くなるようなふるまいを与えている。

2.4 リソース制約を考慮したポテンシャル更新式にもとづくリソース制御

前節では、ENV レイヤーのポテンシャル場と IR レイヤーのポテンシャル場にもとづく VoI レイヤーのポテンシャル更新式を述べた。VoI レイヤーのポテンシャル場はユーザーの潜在的なアクセス量を表現しているため、ネットワークのリソース量は VoI レイヤーのポテンシャル場にもとづいて定めれば良い。しかし、ネットワークリソース量は有限であるため、リソース制約を考慮したポテンシャル更新式を考える必要がある。

一般に、ある地点へのアクセス量に対してリソース量が不足している場合、他の地点のリソースを利用することが考えられる。その際、本報告で対象としているアプリケーションが実世界センシングなどのアプリケーションであることを考慮すると、不足したリソースの設置箇所と空間的に近接するリソース割当量を増加させて不足リソース量を補填することが望ましい。そこで本報告では、リソース量制約に対応するポテンシャル値の上限が与えられるものとし、上限値を閾値としてポテンシャルの拡散係数を変更する。

例えば、図 5 に示すように、中央のノードのポテンシャル値が閾値に達するか超えた場合、そのノードと隣接ノード間の拡散係数を大きくすることで、拡散を早める。その結果、

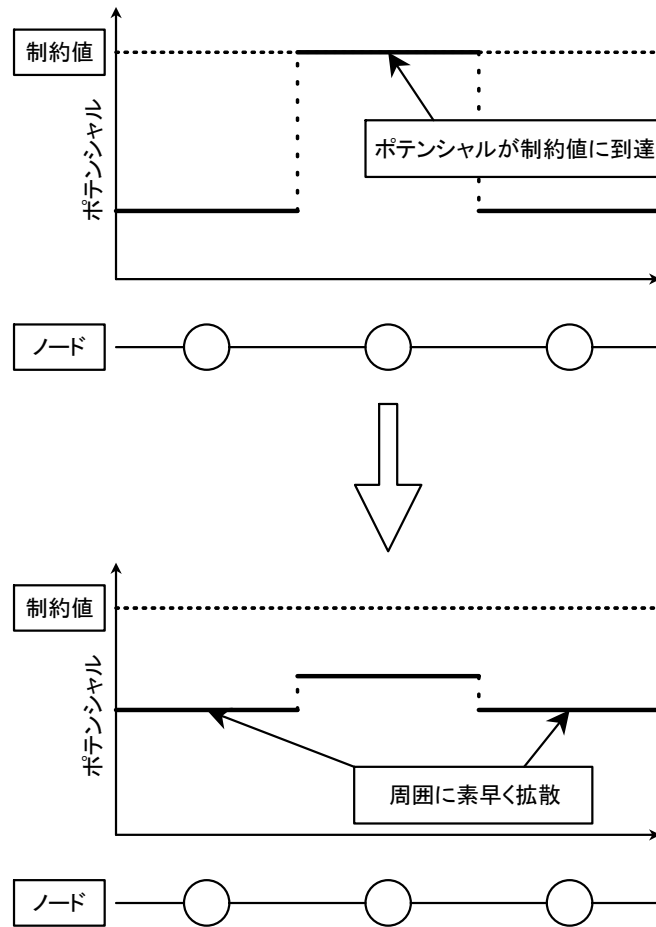


図 5: リソース制約に対応するポテンシャルの上限値に達した際のポテンシャル拡散の様子

中央のノードのポテンシャルは減少し、また、周囲のノードのポテンシャルが増加する。すなわち、前節で述べたポテンシャル更新式における拡散係数 D_v を、以下の条件にもとづいて定める。

$$D_v = \begin{cases} D_1 & (\text{ポテンシャルが閾値未満である場合}) \\ D_2 & (\text{ポテンシャルが閾値以上である場合}) \end{cases} \quad (4)$$

ただし、 D_1 はポテンシャルが閾値未満でありリソース制約への対応を考えなくても良い状況下での拡散係数であり、 D_2 はポテンシャルが閾値を超えて積極的にポテンシャルを拡散させたい状況下での拡散係数である。なお、 $D_1 < D_2$ である。

提案方式では、上述のポテンシャル更新式にもとづいてリソース制約を考慮したポテンシャルを更新したのち、各ノードのポテンシャルにもとづいてリソース制約を行うものとする。

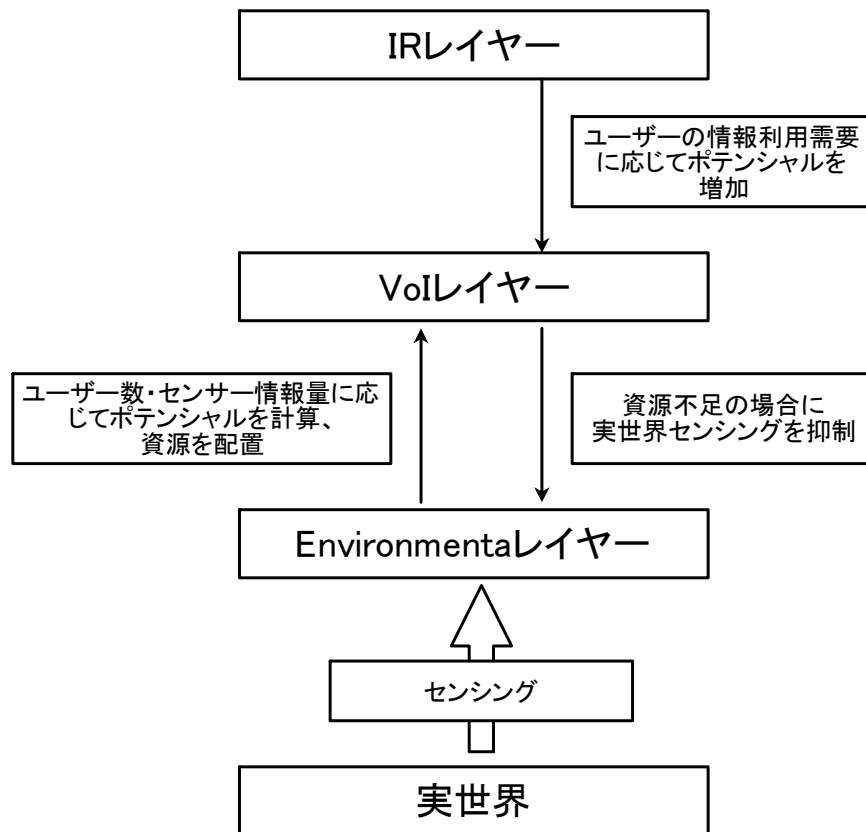


図 6: 各レイヤー間のフィードバック

2.4.1 レイヤー間の相互作用

前節では、リソース量に制約がある環境下でのポテンシャル更新方法を説明した。ポテンシャルの更新の基本的な考え方は、リソース制約を超える状況下では、ポテンシャルの拡散量を増やす。

VoI レイヤーのポテンシャル値と、実際に配置可能なリソース量に大きな齟齬がある場合には、センサー量そのものの抑制や、ユーザーの情報アクセスを空間的もしくは時間的に分散させる必要がある。これをポテンシャル更新で実現するには、VoI レイヤーのポテンシャル値を再び ENV レイヤーや IR レイヤーにフィードバックし、レイヤー間で相互に作用を考えなければならない。

図 6 は、これらのレイヤー間の関係を示しているが、VoI レイヤーのポテンシャル値にもとづく ENV レイヤーや IR レイヤーにおける具体的なポテンシャル更新式を検討することは今後の課題である。

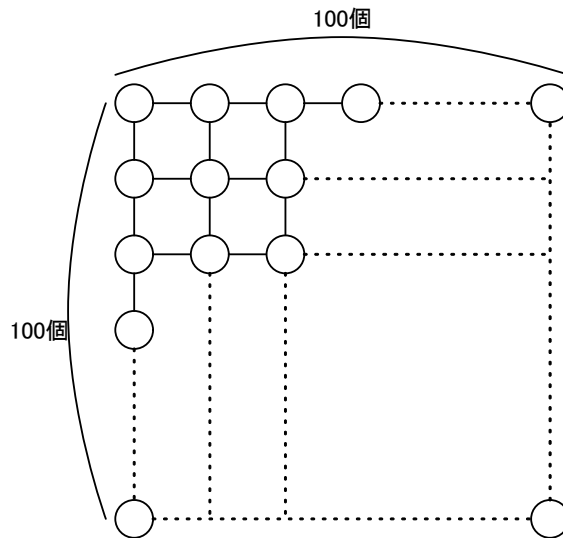


図 7: エッジルーターの配置

3 ポテンシャル場の動作例

本章では、2章で述べたポテンシャル更新式による VoI レイヤーのポテンシャル場の挙動を確認する。なお本報告では、VoI レイヤーのポテンシャル場が ENV レイヤーのポテンシャル場の変動に追従できていること、ならびに、リソース制約下において、ポテンシャルがその上限値を超えないことを確認することを目的としている。

3.1 ネットワーク構成

エッジルーターが 100×100 の格子状に接続されたネットワークを用いる。図 7 はそのエッジルーターの配置を示している。

エッジルーターはすべて等間隔に配置されているものとし、各エッジルーターは隣接エッジルーターと一定ステップごとに自身のポテンシャル値と拡散係数 $D_v(D_1, D_2)$ の情報を交換するものとする。

3.2 パラメーター設定

ポテンシャル更新式で用いるパラメーターの値は表 2 に示すとおりである。また、リソース制約にもとづくポテンシャルの上限値については、一旦リソース制約がない状況下でのポテンシャルの値を求め、そのポテンシャル値よりも低い値を上限値として与えている。

表 2: パラメーター設定

D_u	0.6
D_t	0.6
n	0.0001
G	0.6

3.3 ENV レイヤーのポテンシャル変動モデル

ENV レイヤーのポテンシャル場の変動として、ユーザーの移動に伴いモバイルデバイスが移動し、その結果、センサー情報量が変動することを想定する。具体的には、都市部等において直交する交通網に沿って、山なりの密度分布を持つユーザーの集団が、一定周期で空間上を移動するモデルを考え、あるステップ t 、座標 (x, y) における ENV レイヤーのポテンシャル (= ユーザー数) $p(t, x, y)$ を、

$$\begin{aligned}
 p(t, x, y) = & \alpha_1 \exp\left(-\frac{(y-50)^2}{\gamma_1}\right) \sin\left(\frac{t}{100}\beta_1 + \frac{x}{10}\right) \\
 & + \alpha_2 \exp\left(-\frac{(x-30)^2}{\gamma_2}\right) \sin\left(\frac{t}{100}\beta_2 + \frac{y}{10}\right) \\
 & + \alpha_1 + \alpha_2
 \end{aligned} \tag{5}$$

で与える。この式は、 x 軸方向に移動するユーザーの集団と、 y 軸方向に移動するユーザーの集団がそれぞれ周期的に移動し、座標 $((x, y) = (30, 50))$ で重なる形となる。なお、 α 、 β 、 γ は、それぞれ各軸方向におけるポテンシャルの最大値、変動周期、集団の広がりを調整するパラメーターであり、本報告では $\alpha_1 = \alpha_2 = 20$ 、 $\beta_1 = 1$ 、 $\beta_2 = 0.4$ 、 $\gamma_1 = \gamma_2 = 200$ としている。

図 8 は、あるステップにおける ENV レイヤーのポテンシャル場を示している。 $x=30$ を中心とした y 軸方向に沿ってポテンシャルが極大値の位置が変動し、同様に $y=50$ を中心とした x 軸方向に沿ってポテンシャルが極大値の位置が変動し、それらが座標 $((x, y)=(30, 50))$ で重なりあった際に、ポテンシャルが最大となる。

3.4 計算結果

3.4.1 リソース制約がない状況下におけるポテンシャル形成

まず、リソース制約がない状況下における VoI レイヤーのポテンシャル形成が正しく行われていることを確認する。IR レイヤーのポテンシャル場からのフィードバックは考えないものとし、 $P_f=0$ としている。図 9 は、座標 $(x, y)=(30, 50)$ における VoI レイヤーのポテン

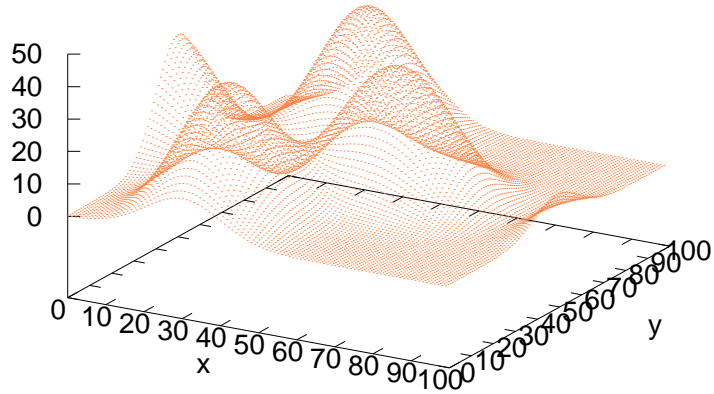


図 8: 式 (5) に基いた、あるステップにおける ENV レイヤーのポテンシャル場

シャルの時間変化を示している。ここでは提案手法におけるポテンシャルの更新周期を 10 ステップ毎としている。この図より、ENV レイヤーのポテンシャル $p(t, 30, 50)$ の変動に応じて VoI レイヤーのポテンシャル $I(t, 30, 50)$ が更新されている様子が観察される。なお、図には参考のため 100 ステップ毎に直近 100 ステップのセンサー情報発生量の平均値を計算した結果を示している。これは従来手法の適用による結果を示すものではなく、何らかの最適化手法等によって行う長周期のリソース制御で用いられる入力情報に相当している。図に示すように、入力情報を得る段階で現実世界の状況が反映されておらず、追従性が損なわれることを示唆している。

3.4.2 リソース制約がある状況下におけるポテンシャル形成

次に、リソース制約下における拡散係数の調整式 (4) を適用した時のポテンシャル $I(t, x, y)$ の挙動を確認する。あるサービスが利用できるリソース量が、ある 1 つのノードについて周囲よりも少ない状況を想定している。IR レイヤーのポテンシャル場からのフィードバックは考えないものとし、 $P_f=0$ としている。 D_1 を 0.01、 D_2 を 0.025 とした時のポテンシャル $I(t, 30, 50)$ と、座標 $(x, y) = (30, 50)$ に隣接するエッジルーターのポテンシャル $I(t, 30, 51)$ を図 10 に示す。座標 $(x, y) = (30, 50)$ のみ、ポテンシャルの上限値は 50 とした。他の座標のポテンシャルの上限値は 150 とした。図 10 のそれぞれの図には、ENV レイヤーのポテンシャル $p(t, 30, 50)$ 、 $p(t, 30, 51)$ と、リソース制約がないものとした場合のポテンシャル

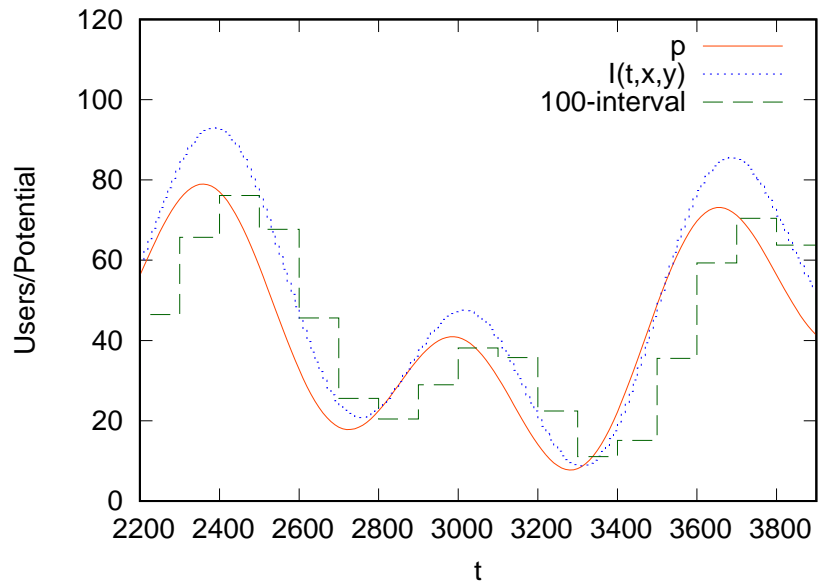
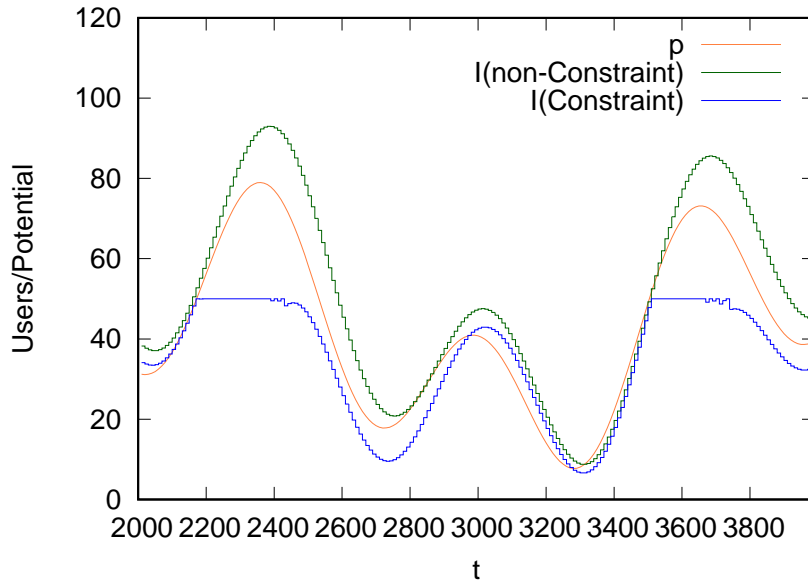
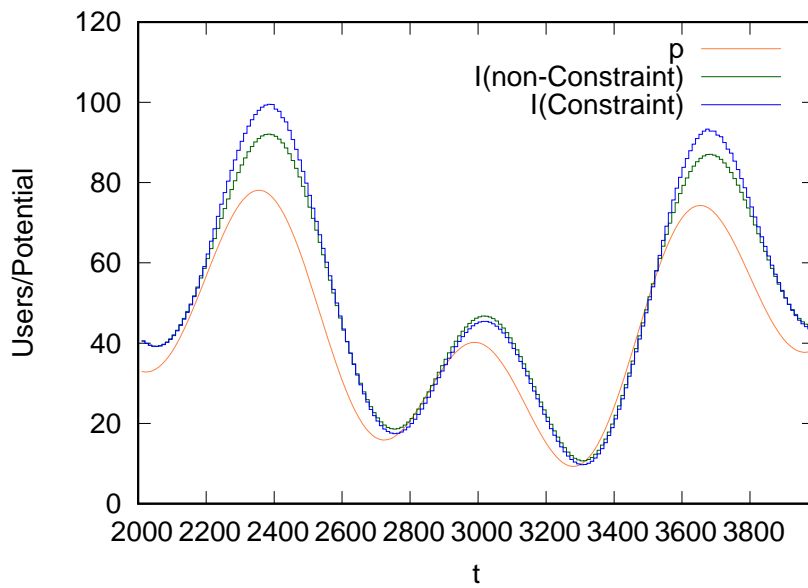


図 9: $(x, y) = (30, 50)$ における VoI レイヤーのポテンシャルの時間推移 (更新周期:10 ステップ毎)

ル ($I(\text{non-Constraint})$ と表記) を示している。図 10 のステップ 2200 付近を見ると、座標 $(x, y) = (30, 50)$ においてポテンシャルが上限値に達すると、 $I(t, 30, 50)$ は 50 付近で推移することが確認できる。これはポテンシャルが周囲に拡散しているためであり、座標 $(x, y) = (30, 51)$ のポテンシャル $I(t, 30, 51)$ は、リソース制約がない場合のポテンシャルよりも大きくなっている。図 11 は、拡散係数 D_2 を 0.025 から 0.1 に変更し、上限値に達する際のポテンシャルの拡散量を増加させた場合のポテンシャル I の時間推移である。 D_2 が 0.1 である場合、ステップ 2200 から 2400 にかけて $I(t, 30, 50)$ が振動している様子が見られる。この現象については、後に考察する。

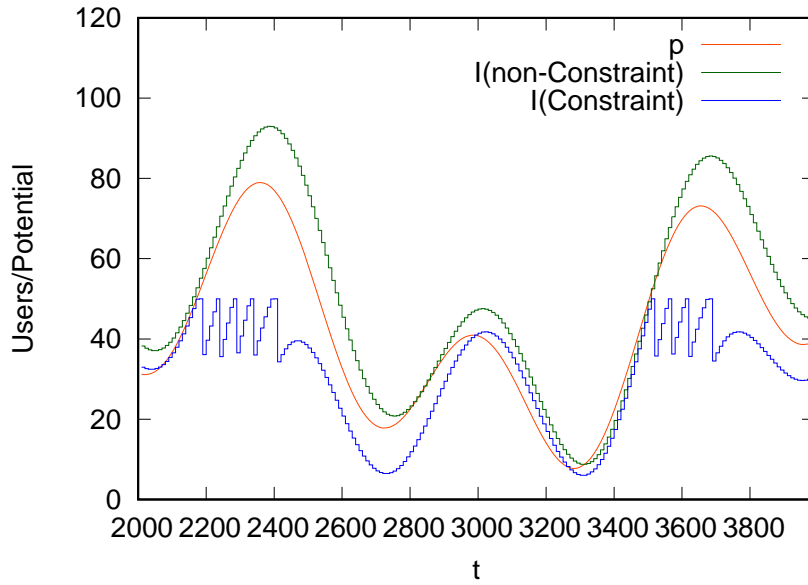


(a) $(x, y) = (30, 50)$

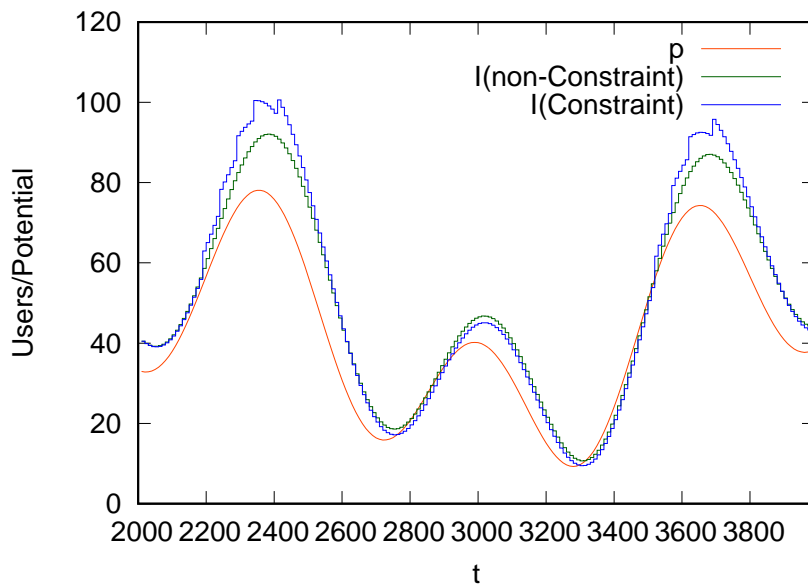


(b) $(x, y) = (30, 51)$

図 10: ポテンシャル $I(t, x, y)$ の推移: $D_1 = 0.01, D_2 = 0.025$ の場合



(a) $(x, y) = (30, 50)$



(b) $(x, y) = (30, 51)$

図 11: ポテンシャル $I(t, x, y)$ の推移: $D_1 = 0.01, D_2 = 0.1$ の場合

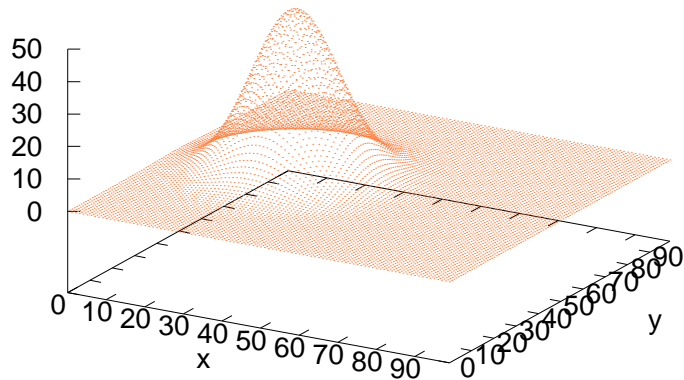


図 12: 式 (6) に基いた、あるステップにおける ENV レイヤーのポテンシャル場

これまでは、リソース制約による、ポテンシャルの抑制による隣接ノードのポテンシャルの挙動を見ていたが、今度は VoI レイヤーのポテンシャル場全体に与える空間的影響を詳しく調べる。一様にリソース制約がある状況で、ユーザーの集団の中心およびその周辺がリソース上限値に達したとき、VoI レイヤーのポテンシャルの拡散値は増加する。しかし、拡散が活性化された結果他のノードも同様に上限値に達した場合、さらに広い範囲のノードに対してポテンシャルが増強される。つまり、あるノードのポテンシャルが上限値に達した後、その影響が、最初はリソース上限値未満であった少し離れた座標のポテンシャルにも波及し、広範囲に渡ってポテンシャル値が増強される。このふるまいを、拡散係数 D_1, D_2 の値を様々に変更し、その結果リソース制約がない状況下と比較して、より広範囲においてポテンシャルが大きいことを確認する。

ENV レイヤーのポテンシャルを決定する式 (5) を以下のように変更する。

$$p(t, x, y) = 50 \exp\left(-\frac{(x - 30)^2 + (y - 50)^2}{200}\right) \quad (6)$$

これは、ユーザーの集団が座標 $(30, 50)$ に $t = 0$ に出現し、多量のセンサー情報を送信することを想定している。この式では、センサー情報量の最大値は座標 $(x, y) = (30, 50)$ で 50 となる。図 12 は、この式に基いた、あるステップにおける ENV レイヤーのポテンシャル場を示している。このポテンシャル場は一度発生した後、変化せずに状態を維持する。すべてのノードのリソース上限値を 45 とする。図 12 に見られるように、ENV レイヤーのポテンシャル場は、座標 $(x, y) = (30, 50)$ から周囲に広がっている。観察する座標は、最も大きく

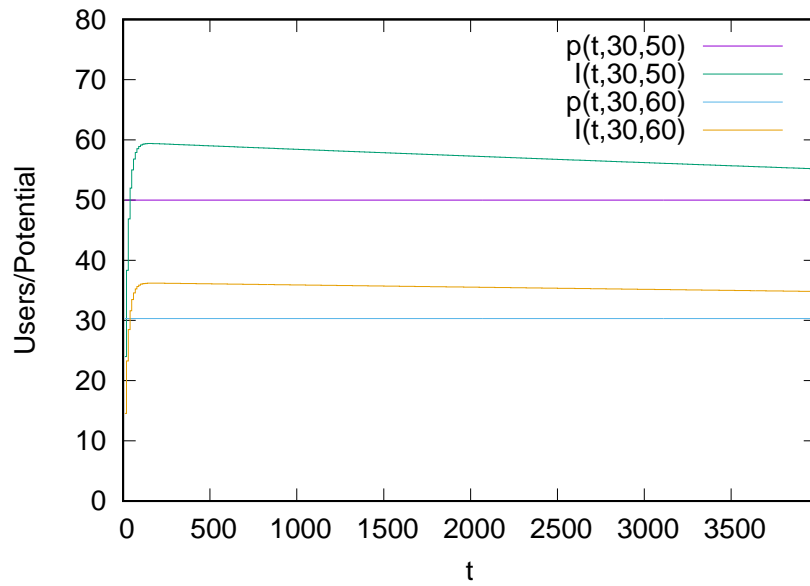
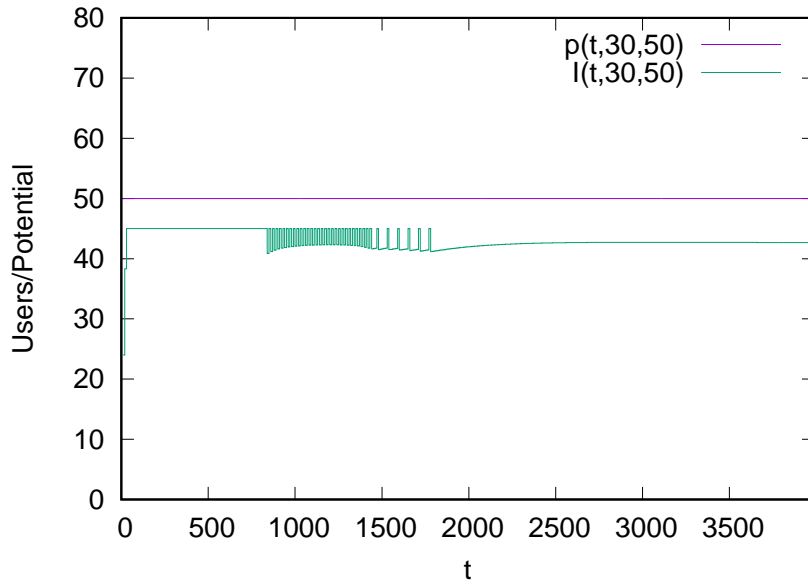
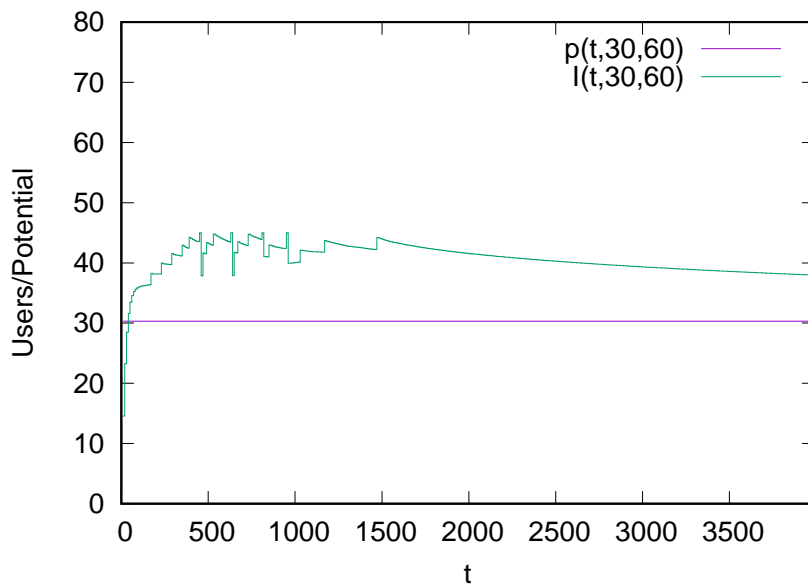


図 13: リソース制約が無いときの、座標 $(x, y) = (30, 50), (30, 60)$ におけるユーザー数とポテンシャルの推移

リソース上限値を超えるポテンシャルが計算される座標 $(x, y) = (30, 50)$ と、拡散がある程度離れたノードまで波及していることが確認できる座標 $(x, y) = (30, 60)$ とした。図 13 に、それぞれの座標における、リソース制約が無いときの、ユーザー数とポテンシャルの推移を示す。

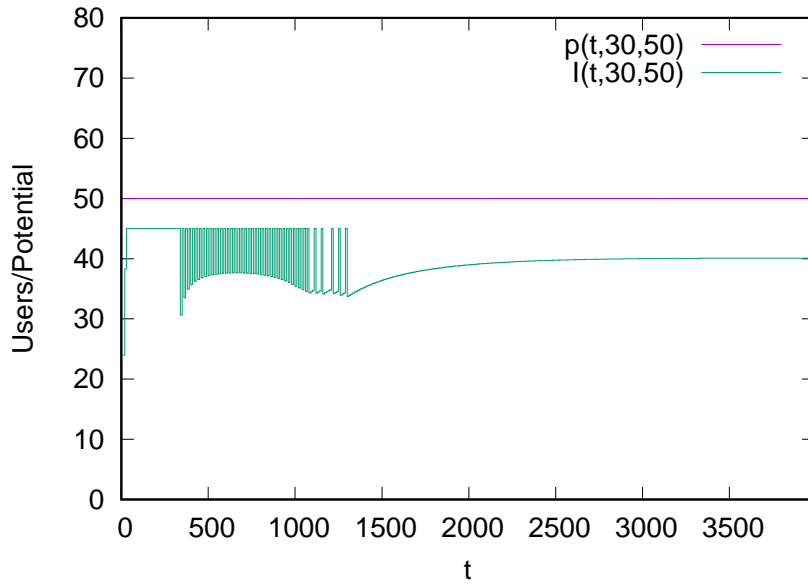


(a) $(x, y) = (30, 50)$

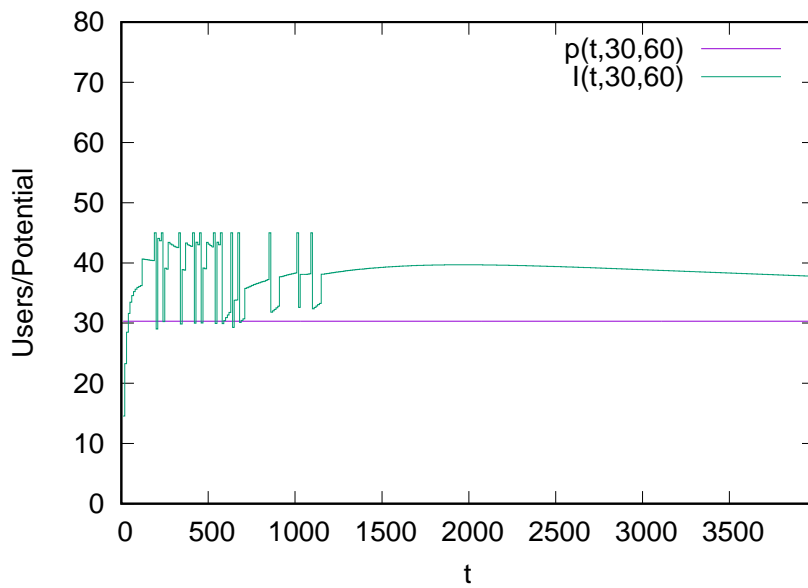


(b) $(x, y) = (30, 60)$

図 14: ポテンシャル $I(t, x, y)$ の推移: $D_1 = 0.01, D_2 = 0.05$ の場合

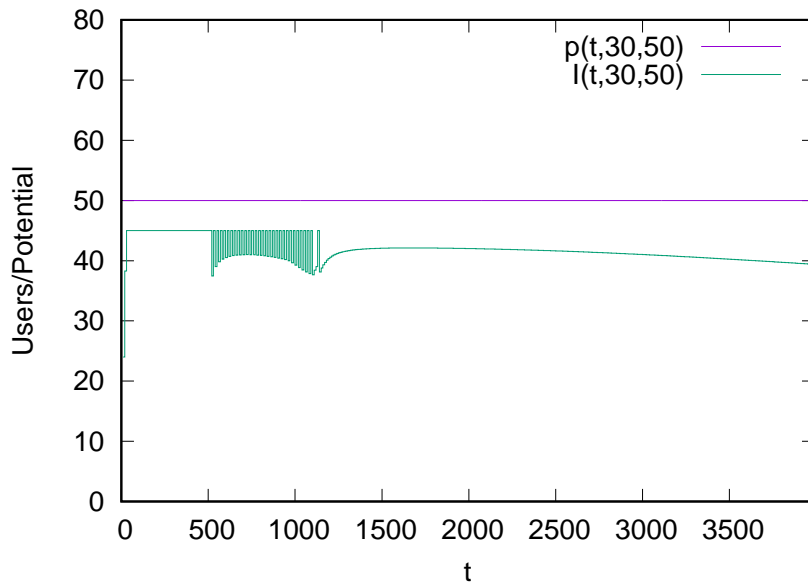


(a) $(x, y) = (30, 50)$

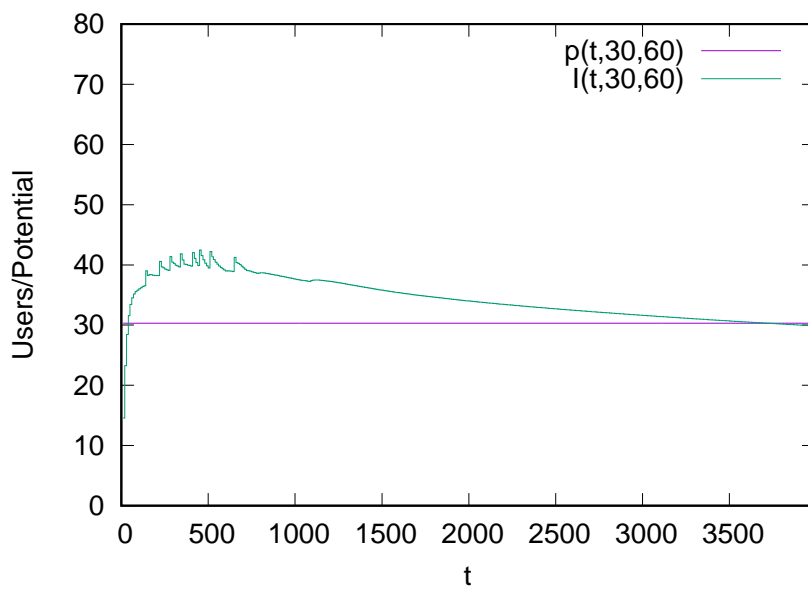


(b) $(x, y) = (30, 60)$

図 15: ポテンシャル $I(t, x, y)$ の推移: $D_1 = 0.01, D_2 = 0.1$ の場合



(a) $(x, y) = (30, 50)$



(b) $(x, y) = (30, 60)$

図 16: ポテンシャル $I(t, x, y)$ の推移: $D_1 = 0.05, D_2 = 0.1$ の場合

まず、 $D_1 = 0.01, D_2 = 0.05$ としたときの $I(t, 30, 50), I(t, 30, 60)$ を図 14 に示す。座標 $(x, y) = (30, 50)$ においては、周囲のノードもポテンシャルが、ポテンシャルの更新直後に上限値に達しており、ポテンシャルはしばらくは変動しない。一方座標 $(x, y) = (30, 60)$ においては、早い段階から振動が見られる。ある程度ユーザー集団の中心から離れた座標では、中心からの方向にポテンシャルが拡散され、一旦は上限値に達するものの、さらに中心から離れていく方向にポテンシャルが拡散するために、再び上限値を下回る。ステップ 500 からステップ 1500 の間はこの現象を繰り返すが、中心周辺のノードのポテンシャルは有限であることと、固定減少値の存在により、ポテンシャルの振動はユーザー集団の周縁部から徐々に収まっていく。

次に $D_1 = 0.01, D_2 = 0.1$ としたときの $I(t, 30, 50), I(t, 30, 60)$ を図 15 に示す。振動が座標 $(x, y) = (30, 60)$ の方で先に発生するのは $D_1 = 0.01, D_2 = 0.05$ としたときと同じであるが、振幅および振動の開始ステップが異なる。まず、振幅が大きくなっている理由については、上限値に達したあと、より大きな拡散係数 $D_2 = 0.1$ で周囲に拡散することにより、その際の減少量が大きくなるためである。振動の開始ステップについては、これも D_2 を図 14 の例よりも大きくした結果、座標 $(x, y) = (30, 50)$ で上限値に達したポテンシャルの拡散量が大きく、それにより周囲のポテンシャルが迅速に増加して同様に上限値に達し、その現象の連鎖により、早く座標 $(x, y) = (30, 60)$ に到達するためである。

最後に $D_1 = 0.05, D_2 = 0.1$ としたときの $I(t, 30, 50), I(t, 30, 60)$ を図 16 に示す。先の 2 例と比較して、ポテンシャルが上限値未満でも、ノード間の拡散量が大きいことにより素早く拡散するため、全体的にポテンシャルの減少が速い。そのため、拡散係数 D_2 で素早く拡散しても、それよりも遅いとは言え（先の例よりは速い）拡散係数 D_1 で周囲から拡散されるため、振幅自体は小さくなる。また、 D_1 が大きいことに起因して、振動の収束も早くなる。

これら 3 つの例を座標 $(x, y) = (30, 60)$ に着目して比較する。図 14(b) および図 15(b) は図 16(b) に比べて、振動が収束した後のポテンシャルの減少がゆるやかである。これは、 D_1 の大きさに関係していると思われる。すなわち、 D_1 が小さいほど、ポテンシャルの減少はゆるやかである。

図 15(b) および図 16(b) は図 14(b) に比べて早いステップでポテンシャルが増加している。これは、 D_2 の大きさに関係していると思われる。すなわち、 D_2 が大きいほど、ポテンシャルが上限値に達したときに迅速に周囲のリソースを増強できる。

図 14(b) および図 16(b) は図 15(b) に比べて振幅が抑制されている。これは、 D_1 と D_2 の比率に依存しており、拡散係数 D_1, D_2 の大きさに差がないほど、振幅は小さくなり、周期が長くなる。

拡散係数 D_1, D_2 の変更に伴う影響を以下にまとめる。

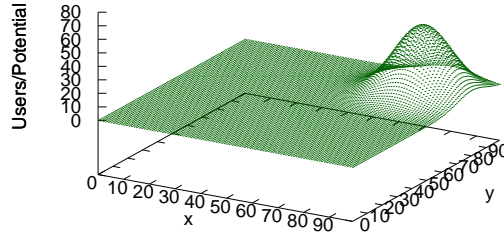


図 17: IR レイヤーのポテンシャル場

D_1 : 大きくすると、全体的にポテンシャルの現象が速くなる

D_2 : 大きくすると、ポテンシャルが上限値に達する際、周囲へのリソースの増強が早くなる

$\frac{D_1}{D_2}$: 大きくすると、振幅が小さくなり、振動の周期が長くなる。

ユーザー数の増加の後、リソースをその座標 (およびその周辺) に多く、そして長く配置しておきたいのであれば、 D_1 は小さく設定すべきである。ユーザー数の増加により、リソースが制約値に達したとき、迅速に周辺にリソース増強したいのであれば、 D_2 は大きく設定すべきである。しかし、 $\frac{D_1}{D_2}$ が小さくなると振幅が大きくなってしまう。これはある種のトレードオフとなっている。どのような D_1, D_2 を設定すべきかは、ユーザーに対して提供するサービスモデルによって異なると思われる。サービスモデルの特徴とそれに適する D_1, D_2 の設定手法の確立は今後の課題である。

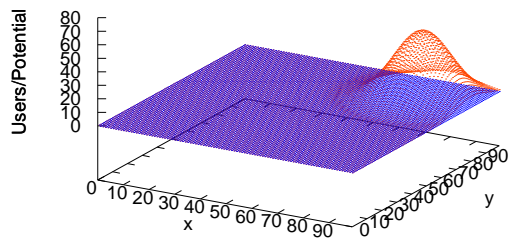
3.4.3 IR レイヤーからのフィードバックを取り入れたポテンシャル形成

最後に、IR レイヤーからのフィードバックが与えられる状況下におけるポテンシャル形成を確認する。IR レイヤーのポテンシャルを図 17 に示す。IR レイヤーのポテンシャル場は、一定で変化しないものとした。IR レイヤーのポテンシャルの値は、ユーザーによる情報アクセスの需要を表している。ポテンシャル I へのフィードバック Pf は、IR レイヤーのポテンシャルの定数倍を加えたものとしている。

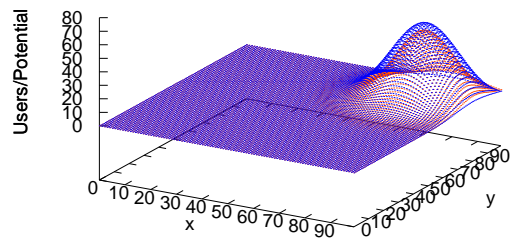
ユーザーの移動は、最初座標 $(x, y) = (80, 80)$ に留まっていたユーザーの集団が、一定時間経過後に、座標 $(x, y) = (20, 20)$ に移動するものとした。図 18 は、各ステップにおける ENV レイヤーのポテンシャル場と VoI レイヤーのポテンシャル場を示している。オレンジが ENV レイヤー、青が VoI レイヤーのポテンシャル場である。

全ステップを通して、VoI レイヤーのポテンシャル場は ENV レイヤーのポテンシャル場の変動に追従していると言える。また、ユーザー集団が移動しない間は、ENV レイヤーのポテンシャル場に対して、拡散して広く浅いポテンシャル場を形成できていることが確認できる。さらに、ユーザー集団が座標 $(x, y) = (80, 80)$ を去った後でも、その座標のポテンシャルが増加している。これは、IR レイヤーのポテンシャル場の影響を受けているためである。このことより、ユーザーの情報アクセス量をフィードバックとして VoI レイヤーに与えることで、その情報アクセス量に応じてポテンシャルを増加させられることが確認できた。

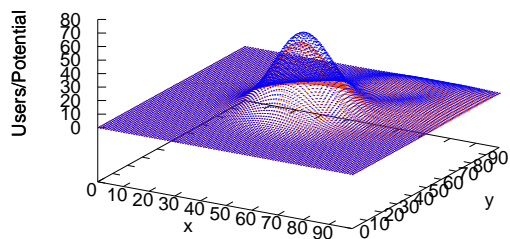
以上より、提案手法におけるポテンシャル更新式を用いることで、センサー情報量の変化に対する即時性が得られることを示した。また、リソース制約下においては、周囲のノードのポテンシャルをより増加させることが確認された。さらに、フィードバックを取り入れた場合、ユーザーの情報アクセス需要に対応してポテンシャルが変化することが確認された。



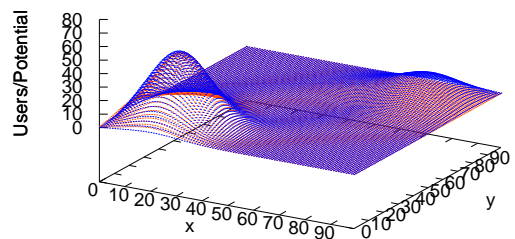
(a) ステップ $t = 0$



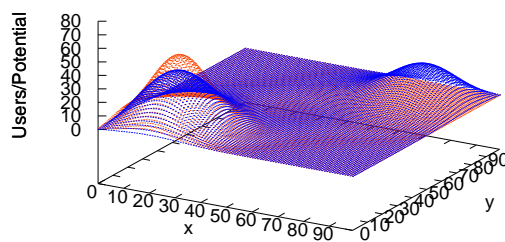
(b) ステップ $t = 100$



(c) ステップ $t = 200$



(d) ステップ $t = 300$



(e) ステップ $t = 400$

図 18: 各ステップにおける ENV レイヤーと VoI レイヤーのポテンシャル場

4 おわりに

実世界センシングのような現実世界の状況と連動した情報処理が必要となるアプリケーションにおいて、現実世界の状況の変化に追従してコンピューティングリソースやネットワークリソースを調整することは、体感品質の向上の観点から重要である。本報告では、このようなアプリケーションを想定し、現実世界のセンサー情報量と、現実世界の情報に対するユーザーアクセス量をポテンシャル場として表現し、ポテンシャルの値に応じたリソース量を配置する動的リソース制御方式を提案した。提案方式は、現実世界で生じる事象の変化を即座にポテンシャルに反映しつつも、ポテンシャルの自己組織的な時空間上拡散を組み入れることによって、事象のゆらぎや潜在的な情報アクセスに備えたリソースを割り当てる。

本報告では、計算機環境を用いてポテンシャル場形成の確認とリソース制約が考慮されることの確認を行ったが、今後はレイヤー間のフィードバックの検討と、拡散係数を含む各種パラメーターの値がポテンシャル場の即時性や環境変化への対応能力に与える影響を評価する予定である。

謝辞

本報告を終えるにあたり、日頃より広く的確なご指導、ご教授頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に心より感謝申し上げます。ならびに、本報告に関しまして、的確なご指摘や、方向性を明確にする議論を通してご指導頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一准教授に深謝いたします。また、本報告に関しまして、ご協力頂いた富士通研究所の今井悟氏、片桐徹氏、関屋元義氏に感謝申し上げます。また、平素からご助言やご指導頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の大下裕一助教、大阪大学大学院経済学研究科の小南大智助教に深く感謝申し上げます。最後に、日頃から研究および報告の作成に関しまして親身にご指摘やご指導頂きました、大場斗土彦氏、井上昂輝氏、宮川裕考氏、坂本昂輝氏をはじめとする研究室の皆様にも深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] T. Gadeke, J. Schmid, M. Zahnlecker, W. Stork, and K. D. Muller-Glaser, “Smartphone pedestrian navigation by foot-imu sensor fusion,” *Proc. of Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation, and Location Based Service (UPINLBS)*, Oct. 2012, pp. 1–8.
- [2] D. Taniuchi and T. Maekawa, “Automatic update of indoor location fingerprints with pedestrian dead reckoning,” *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, vol. 14, no. 2, p. 27, 2015.
- [3] V. Jakkula and D. J. Cook, “Mining sensor data in smart environment for temporal activity prediction,” in *Proc. of ACM SIGKDD*, Feb. 2007.
- [4] 田中 裕之, 高橋 紀之, 川村 龍太郎, “IoT 時代を拓くエッジコンピューティングの研究開発,” *NTT 技術ジャーナル*, vol. 27, no. 8, pp. 59–63, Feb. 2016.
- [5] “Nokia launches Mobile Edge Computing-based enterprise applications,” *Press release*, Sep. 2016.
- [6] ETSI, “Mobile Edge Computing (MEC); Technical Requirements,” ETSI GS MEC 002 (v1.1.1), Mar. 2016.
- [7] F. Bonomi, R. Milito, P. Natarajan, and J. Zhu, “Fog computing: A platform for internet of things and analytics,” *Big Data and Internet of Things: A Roadmap for Smart Environments*, pp. 169–186, Mar. 2014.
- [8] Y. C. Hu, M. Patel, D. Sabella, N. Sprecher, and V. Young, “Mobile edge computing – A key technology towards 5G,” *ETSI White Paper*, vol. 11, Sep. 2015.
- [9] J. Na, D. Soroker, and C.-k. Kim, “Greedy geographic routing using dynamic potential field for wireless ad hoc networks,” *IEEE Communications Letters*, vol. 11, no. 3, pp. 243–245, 2007.