

オンデマンド位置情報サービスに向けた分散測位システムの通信量評価

石田 繁巳[†] 田頭 茂明^{††} 福田 晃[†]

[†]九州大学大学院システム情報科学研究院 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地

^{††}関西大学総合情報学部 〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1

あらまし 筆者らは、屋内環境における一時的な位置情報サービスの提供に向けて「オンデマンド位置情報サービス」の実現を目指している。これまでに無線 LAN アドホック測位ネットワークを用いた分散測位システムを提案し、無線 LAN アクセスポイントの設置のみで位置情報サービスを提供できることを実証評価した。実証評価では使用機器の制約により通信量に関して限定的な評価となっているため、本稿では分散測位システムによって通信量を削減できることを数学的アプローチ及びシミュレーション評価によって検証する。

キーワード オンデマンド, 屋内測位システム, 位置情報 Web サービス, アドホック測位ネットワーク, 無線 LAN メッシュネットワーク。

Evaluation of Network Traffic in Distributed Localization System for On-Demand Location-based Services

Shigemi ISHIDA[†], Shigeaki TAGASHIRA^{††}, and Akira FUKUDA[†]

[†] Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

^{††} Faculty of Informatics, Kansai University

Abstract We are developing a distributed localization system using WiFi ad-hoc wireless positioning network to realize *on-demand location-based services*. In our previous paper, we designed and implemented our distributed localization system using real WiFi APs and showed that our system effectively realizes on-demand location-based services. In this paper, we evaluate network traffic in our distributed localization system by theoretical analysis as well as simulations.

Key words on-demand, indoor localization, location-based Web service, ad-hoc wireless positioning network, WiFi mesh network.

1. はじめに

GPS (Global Positioning System) などを用いた位置情報サービスの普及とともに、位置情報サービスの屋内への拡大に向けて屋内測位技術の重要性が増している。屋内測位技術としては無線 LAN や超音波、赤外線などが挙げられる。中でも、無線 LAN を用いる手法は既設の無線 LAN 機器をそのまま用いることで低コストに導入できることから注目されている。

本研究の最終ゴールは、無線 LAN 測位技術を用いて「オンデマンド」な屋内位置情報サービスを実現することである。ここで言う「オンデマンド」には以下の2つの視点がある。

- (1) サービスプロバイダ視点: サービスプロバイダは、いつでもどこでも必要なときに測位システムを即座に構築して位置情報サービスを提供できる。
- (2) ユーザ視点: ユーザは、ユーザアプリケーションをインストールすることなく即座に位置情報サービスを利用でき

きる。

このようなオンデマンド性は「ワнтаイム」シナリオで特に重要となる。例えば展示会場におけるナビゲーションシステムは、展示会がたかだか3日間程度の開催期間であること、ユーザが来場時のみナビゲーションシステムを使用することからオンデマンド性が重要となる。無線 LAN 測位技術を用いたこれまでの屋内位置情報サービスは、ユーザアプリケーションを用いて既設の無線 LAN アクセスポイントの信号を検出することで測位を行うためにオンデマンド性を実現するのが困難である。

筆者らは、サービスプロバイダ視点、ユーザ視点のオンデマンド性を同時に満たす位置情報サービスの実現に向けてアドホック測位ネットワークを用いた分散測位システムを提案している [1], [2]。アドホック測位ネットワークは無線 LAN アクセスポイントによって構築されたメッシュネットワークであり、無線 LAN 端末の測位を行う機能を有している。無線 LAN 端末が発した信号を無線 LAN アクセスポイントで観測し、その

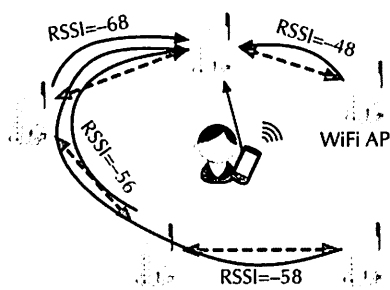


図 1 分散測位システムの概要

RSSI (受信信号強度) 情報をメッシュネットワークを通じて収集して多辺測量法により端末位置を推定する。分散測位システムでは測位計算を無線 LAN アクセスポイント上で行い、RSSI 情報転送の通信負荷をメッシュネットワーク上で分散させることで位置情報サービスの応答性を向上させている。

文献[1]及び[2]では、実際に無線 LAN アクセスポイントを設置することでオンデマンドな位置情報サービスを提供できることを実証した。しかしながら、通信量に関しては限定的な評価となっており、端末台数増加に対する影響が明らかでない。そこで本稿では、分散測位システムにおける通信量を数学的アプローチ及びシミュレーションによって評価し、集中測位システムよりも通信量を削減できることを検証する。

本稿の構成は以下の通りである。2. では、筆者らが提案している分散測位システムを用いたオンデマンド位置情報サービスの概要について述べる。3. では関連研究について述べ、4. で分散測位システムの通信量を解析する。5. ではより現実に近い環境でのシミュレーションを行い、分散測位システムによって通信量を削減できることを検証する。最後に6. でまとめとする。

2. オンデマンド位置情報サービス

2.1 分散測位システムの概要

アドホック測位ネットワークを用いた分散測位システムは、無線 LAN 端末の発した信号の RSSI (受信信号強度) 情報を無線 LAN アクセスポイントによって構築されたメッシュネットワークを介して収集し、測位計算を行う。図 1 に、アドホック測位ネットワークを用いた分散測位システムの概要を示す。複数の無線 LAN アクセスポイントは互いに接続してメッシュネットワークを形成している。無線 LAN 端末が信号を発すると各無線 LAN アクセスポイントはその信号を観測し、RSSI を測定する。そして、メッシュネットワークを用いて RSSI 情報を特定のアクセスポイントに転送する。このとき、RSSI 情報の転送先アクセスポイントを無線 LAN 端末毎に異なるものとする。RSSI 情報転送の通信フローをメッシュネットワーク全体に分散させる。

2.2 分散測位システムを用いたオンデマンド位置情報サービス

分散測位システムを用いれば無線 LAN アクセスポイントを設置するだけで測位システムを構築できるため、サービスプロバイダ視点のオンデマンド性を実現できる。ユーザ視点のオンデマンド性を実現するため、分散測位システムを用いて位置情報サービスを Web サービスとして提供する。

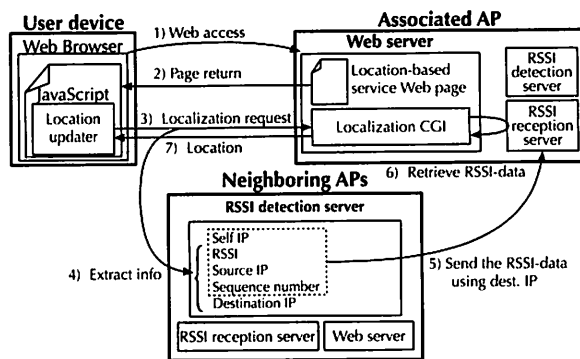


図 2 分散測位システムを用いたオンデマンド位置情報サービスの概要

図 2 に、分散測位システムを用いたオンデマンド位置情報サービスの概要を示す。各アクセスポイント内では Web サーバ、RSSI 検出サーバ、RSSI 受信サーバの 3 つのサーバが動作している。ユーザは無線 LAN 端末 (ユーザ端末) を 1 台の無線 LAN アクセスポイントに接続し、1) 接続先アクセスポイント内の Web サーバ上にある位置情報サービスページに Web ブラウザでアクセスする。2) Web サーバは位置情報サービスのページを返却する。3) Web ブラウザは位置情報サービスページ内の JavaScript プログラムにより Web サーバ上の測位 CGI に一定時間毎に測位要求を送信する。4) 周辺にある無線 LAN アクセスポイントの RSSI 検出サーバは測位要求信号を検出し、そのフレームから IP アドレスなどの情報を抽出するとともに、測位要求信号の RSSI を測定する。5) 抽出した IP アドレスなどの情報を用い、RSSI 検出サーバは無線 LAN 端末の接続先アクセスポイントの RSSI 受信サーバに RSSI 情報を送信する。6) Web サーバ上の測位 CGI は RSSI 受信サーバから送信されてきた RSSI 情報を取得し、7) 無線 LAN 端末の位置を計算してユーザ端末上の Web ブラウザに返却する。Web ブラウザは返却された位置に応じて Web コンテンツを更新する。

3. 関連研究

筆者らの調査の範囲では、測位システムの構築コスト及びユーザ端末への導入コストの両方を同時に考慮に入れた無線 LAN 測位に関する研究はこれまでに報告されていない。無線 LAN 測位に関する研究は膨大に存在するため、本節では特別なハードウェアを必要としない無線 LAN 測位技術の研究について俯瞰する。

フィンガープリント方式 [3]~[11] は、その測位精度の高さから広く利用されている無線 LAN 測位技術である。フィンガープリント方式は、無線 LAN 端末で検出した無線 LAN アクセスポイントの RSSI を元にフィンガープリントと呼ばれるハッシュの 1 種を算出し、既知の位置におけるフィンガープリントのデータベースと比較することで位置を得る。フィンガープリント方式では既知の位置におけるフィンガープリントを集めたデータベースを必要とするため、RSSI データを事前に収集しておくことが必須となる。フィンガープリント方式における事前データ収集のコストを削減するため、群衆の力を借りて RSSI データ収集を行うクラウドソーシング [12]~[15] も報告されているが、事前のデータ収集は依然として必須である。

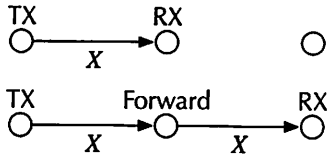


図3 ライトポロジネットワークにおける通信量

LiFS [16], Zee [17], UnLoc [18], WILL [19] はクラウドソーシングを拡張し, 群衆の暗黙的な協力によってフィンガープリントデータベースを構築する手法を示している. これらの手法ではスマートフォンなどで取得した RSSI データと加速度センサやジャイロスコプ等で取得したデータに基づくユーザ位置とを融合させることによってフィンガープリントデータベースを構築する. EZ [20] ではフィンガープリントデータベースの代わりに無線伝搬モデルを構築する. このような手法ではユーザアプリケーションの導入が必須となり, ユーザ視点でのオンデマンド性が損なわれる.

フィンガープリント方式に対し, モデルベース方式は電波伝搬モデルに基づく測位方式であり, 事前のデータ収集が不要となる. LEASE [21] はノンパラメトリックな電波伝搬モデルを構築し, 端末の測位を行うシステムである. Zero-configuration 測位 [22] は電波伝搬モデル及び無線 LAN アクセスポイント位置を自動的に推定する測位システムである. これらの技術は, 提案する分散測位システムにおいてもサービスプロバイダ視点のオンデマンド性を強化する上で有効である.

モデルベース方式では測位精度の向上が大きな課題となっている [23]. 無線 LAN 測位だけでなく RFID [24] や UWB [25], ZigBee [26] でも測位精度の向上に向けた研究が行われている. このような技術は提案する分散測位システムにおいて有効である.

4. 通信量の解析

4.1 定義

本稿では, 全ての無線 LAN アクセスポイントが単位時間当たりに送信するデータ量の総和を通信量 T と定義する. すなわち, $T_{i(t,x)}$ をアクセスポイント i の単位時間当たりの送信データ量として

$$T = \sum_i T_{i(t,x)} \quad (1)$$

である.

単純な例として, 図 3 に示すライトポロジネットワークにおける RSSI 情報の転送を考える. 1 台の無線 LAN アクセスポイントが単位時間に生成する RSSI 情報のサイズを X とすると, 図 3 上の場合には 1 台のアクセスポイントが RSSI 情報 X を送信していることから通信量は $T = X$ と計算できる. 同様にして, 図 3 下の場合には $T = 2X$ となる. 一般に, h ホップのネットワークにおいて 1 つの RSSI 情報トラフィックを転送する場合, 通信量は $T = hX$ となる.

4.2 前提条件

2.2 で示した分散測位システムでは, 複数の無線 LAN アクセスポイントが無線 LAN 端末の信号を検出するため RSSI 情報を転送する複数の通信フローが生成される. 通信量の解析を

容易にするため, ここで以下の 4 つの前提条件を課す.

- (1) 全てのアクセスポイントはメッシュネットワークの構成要素である.
- (2) 各アクセスポイントに接続されている無線 LAN 端末数 N_d は等しい. これは, 測位対象領域内で端末が一樣に分散して存在していることを仮定するものである.
- (3) 無線 LAN 端末が発した信号は, その無線 LAN 端末が接続しているアクセスポイントからメッシュネットワーク上で 1 ホップ以内のアクセスポイントでのみ検出される. これは, 無線 LAN 端末の信号が端末に近接するアクセスポイントでのみ検出されることを仮定するものである.
- (4) 1 台のアクセスポイントは 1 台の無線 LAN 端末について単位時間当たりにサイズ X の RSSI 情報を生成する.

以降の節では, 上記の前提条件の下で分散測位システムの通信量が集中測位システム以下となることを証明する. 上記の前提条件は常時成り立つものではない. 例えば, 各アクセスポイントの接続端末数は刻一刻と変化するものであるし, 無線 LAN 端末の信号は接続先アクセスポイントから 1 ホップ内のアクセスポイント以外でも検出される場合がある. このような場合を想定し, 5. ではより実環境に近い形を想定してシミュレーション評価を行う.

4.3 通信量モデリング

通信量を算出するため, 本稿では無線 LAN アクセスポイントが構成するメッシュネットワークをグラフ $G = (V, E)$ で表す. 頂点集合 V は無線 LAN アクセスポイントを表し, エッジ集合 E はアクセスポイント間のメッシュネットワークのリンクを表す. 前節で示した前提条件下では, グラフ G は単純連結グラフとなる.

まず, 分散測位システムの通信量を算出する.

補題 1. 分散測位システムにおける通信量 T_d は $2N_dX|E|$ である.

証明. 1 台の無線 LAN 端末が無線 LAN アクセスポイント $v \in V$ に接続されている場合を考える. RSSI 情報は v 及び v に隣接する頂点のアクセスポイントで生成される. 通信量 T_d は 1 台のアクセスポイントに接続されている N_d 台の端末に関する RSSI 情報の転送量を全アクセスポイントに渡って加算することで計算できる. $N(v)$ を v に隣接する頂点の集合とすると,

$$T_d = N_dX \sum_{v \in V} \left\{ d(v, v) + \sum_{n \in N(v)} d(n, v) \right\}. \quad (2)$$

ここで, $d(x, y)$ は頂点 x と y の距離である. 同じ頂点の間の距離は 0 であるから, $d(v, v) = 0$ である. また, 頂点 $n \in N(v)$ は v に隣接しているため, $d(n, v) = 1$ である. これより, 通信量は以下となる.

$$T_d = N_dX \sum_{v \in V} |N(v)| = N_dX \sum_{v \in V} d(v) = 2N_dX|E|. \quad (3)$$

ここで, $d(v)$ は頂点 v の次数, すなわち頂点 v に端点を持つエッジの数である. \square

次に, 集中測位システムの通信量を算出する. 集中測位シス

テムは、コアと呼ばれるアクセスポイントに接続された測位サーバに全ての RSSI 情報を転送して測位を行うシステムである。

補題 2. 頂点 $z \in V$ を集中測位システムのコアアクセスポイントとする。集中測位システムの通信量 T_c は $N_d X \{|V| - 1 + 2|E| - d(z)\}$ 以上である。

証明. 1 台の無線 LAN 端末が無線 LAN アクセスポイント $v \in V$ に接続されている場合を考える。分散測位システムの場合と同様に RSSI 情報は v 及び $N(v)$ のアクセスポイントで生成される。全ての RSSI 情報はコアアクセスポイント z に転送される。したがって、通信量は

$$T_c = N_d X \sum_{v \in V} \left\{ d(v, z) + \sum_{n \in N(v)} d(n, z) \right\}. \quad (4)$$

$v = z$ のとき、 $d(v, z) = 0$ 、 $d(n, z) = 1$ となるのは明らかである。そこで、式 (4) の最初の和を $v = z$ の場合だけ分離すると、

$$T_c = N_d X d(z) + N_d X \sum_{v \in V - z} \left\{ d(v, z) + \sum_{n \in N(v)} d(n, z) \right\} \quad (5)$$

となる^(注1)。

式 (5) の下限を計算するため、式 (5) 中の 2 つの距離 $d(v, z)$ 及び $d(n, z)$ について以下の 2 つの場合を考える。

(1) $n = z$ のとき

$d(v, z) = 1$ 、 $d(n, z) = 0$ である。

(2) $n \neq z$ のとき

$d(v, z) \geq 1$ 、 $d(n, z) \geq 1$ である。

(1) の場合、すなわち $n = z$ となるのは $v \in N(z)$ の場合に 1 回ずつである。したがって、 $n = z$ となるのは式 (5) の全ての和の中で $|N(z)| = d(z)$ 回である。通信量の下限値は、 $d(v, z) = 1$ 、 $d(n, z) = 1$ を式 (5) に代入し、 $n = z$ の場合に $d(n, z) = 0$ となる分を減ずることで算出できる。

$$\begin{aligned} T_c &\geq N_d X \left\{ d(z) + |V| - 1 + \sum_{v \in V - z} d(v) - d(z) \right\} \\ &\geq N_d X \{|V| - 1 + 2|E| - d(z)\}. \end{aligned} \quad (6)$$

□

最後に、分散測位システムと集中測位システムの通信量を比較する。

定理 1. 分散測位システムの通信量 T_d は集中測位システムの通信量 T_c 以下である。

証明. 補題 1 及び補題 2 を用いれば T_c の下限値と T_d とを比較できる。式 (6) から式 (3) を減ずると、

$$T_c - T_d \geq N_d X \{|V| - 1 - d(z)\} \quad (7)$$

となる。グラフ G は単純連結グラフであり、頂点 z における

(注1)：記述を簡略化するため、 $V \setminus \{z\}$ を $V - z$ と表記した。

表 1 シミュレーション諸元

メッシュネットワーク標準	IEEE 802.11s (5 GHz 帯)
アクセスネットワーク標準	IEEE 802.11b (2.4 GHz 帯)
アクセスポイント 数	6 ~ 14
初期配置	廊下状グリッド (図 4)
無線 LAN 端末 数	20 ~ 120
初期配置	一様ランダム
動作モデル	ランダムウェイポイント
測位要求間隔	1 秒
RSSI 情報サイズ	11 バイト
シミュレーション時間	30 秒
試行回数	1000

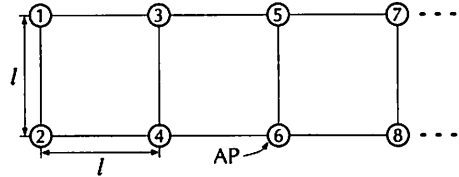


図 4 アクセスポイントの配置 ($l = 50$ [m])

エッジ数 $d(z)$ の最大値は z を除く頂点の数、すなわち $|V| - 1$ である。これより $|V| - 1 - d(z) \geq 0$ となり、定義より $N_d \geq 0$ 、 $X \geq 0$ は自明であるから、題意が成り立つ。 □

5. シミュレーション評価

分散測位システムによってオンデマンド位置情報サービスにおける通信量を削減できることを示すため、ネットワークシミュレータ ns-3 を用いて評価を行った。

5.1 シミュレーション環境

分散測位システムでは、アクセスポイント間のメッシュネットワークと、アクセスポイント・端末間のアクセスネットワークの 2 種類のネットワークが用いられる。評価では、メッシュネットワークとして 5 GHz 帯の 1 つのチャネルを用いる IEEE 802.11s を、アクセスネットワークとして IEEE 802.11b を用いた。他のアクセスポイントに接続されている無線 LAN 端末も含めて全ての無線 LAN 端末の信号を全てのアクセスポイントで検出するため、全てのアクセスネットワークで同一のチャネルを用いた。

廊下のように細長い屋内環境を想定し、アクセスポイントは図 4 に示す配置とした。アクセスポイント数を増加させる場合には図で右方向に 2 台ずつ追加し、廊下状になるようにした。無線 LAN 端末はアクセスポイントで囲まれた領域の中に一様ランダムに配置し、ランダムウェイポイントモデルで動作するものとした。

各無線 LAN 端末は、測位要求信号を 1 秒毎にアクセスネットワークを通じて接続先のアクセスポイントに送信する。この測位要求信号を検出した全てのアクセスポイントはダミーの RSSI 情報をメッシュネットワークを通じて端末接続先アクセスポイントに送信する。再送やハンドシェイクの影響を除去するため、RSSI 情報は UDP/IP 通信を用いて転送することとした。RSSI 情報のサイズは文献 [1], [2] での実験と同じ 11 バイト、シミュレートした通信時間は 30 秒間である。

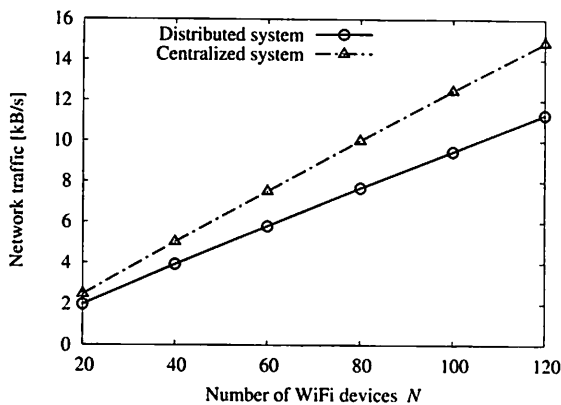


図5 無線 LAN 端末数 N に対する通信量 ($N_a = 10$ の場合)

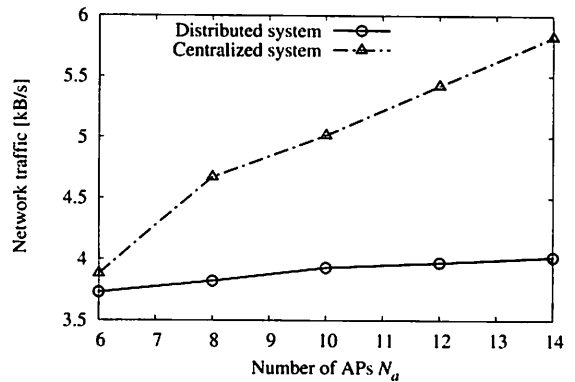


図6 アクセスポイント数 N_a に対する通信量 ($N = 40$ の場合)

表1にシミュレーションの諸元をまとめた。このような条件下で、以下の2つのシステムの通信量を比較した。

(1) 分散測位システム (提案方式)

分散測位システムは、2. で示した測位システムである。

(2) 集中測位システム

集中測位システムは、コアと呼ばれるアクセスポイントに接続された測位サーバで測位計算を行うシステムである。集中測位システムは、測位サーバ上で稼働する Web サーバを用いて位置情報サービスを提供する。各アクセスポイントは無線 LAN 端末の信号を観測して RSSI を測定し、測位サーバに RSSI 情報を送信する。コアアクセスポイントは、アクセスポイントで構成されるメッシュネットワーク上で他のアクセスポイントからの距離の総和が最も小さくなるアクセスポイントとした。

5.2 無線 LAN 端末数に対する通信量

まず、ネットワークの規模を固定させて無線 LAN 端末数を変化させた場合の通信量を評価した。

図5に、無線 LAN 端末数 N に対する通信量を示す。図は、一例としてアクセスポイント数 $N_a = 10$ の場合を示している。図5より、以下の2つのことが分かる。

(1) 分散測位システム、集中測位システムともに通信量は無線 LAN 端末数にほぼ比例する。これは、各アクセスポイントで単位時間当たり生成される RSSI 情報が無線 LAN 端末数にほぼ比例するためである。

(2) 分散測位システムの通信量は集中測位システムよりも小さい。無線 LAN 端末数 $N = 20$ のときは通信量を 20.0%、 $N = 120$ のときは 23.9% 削減できる。これは、分散測位システムにおいては転送の通信量を削減できるためである。

無線 LAN アクセスポイントの数を 6 ~ 14 台まで変化させた場合にも同様の結果が得られた。以上より、分散測位システムの通信量は集中測位システムに比べて小さいことが示された。

5.3 ネットワーク規模に対する通信量

ネットワーク規模が小さい場合には分散測位システムと集中測位システムで RSSI 情報を転送するホップ数に大きな差は生じないため、通信量の差も小さくなると予想される。小規模なネットワークにおいても分散測位システムの通信量が集中測位システムよりも小さいこと検証するため、アクセスポイント数を変化させた場合の通信量を評価した。

図6に、メッシュネットワークを構成するアクセスポイント数 N_a を 6 ~ 14 台と変化させた場合の通信量を示す。図は無線 LAN 端末数 $N = 40$ の場合を示している。図6より、以下の3つのことが分かる。

(1) 分散測位システムの通信量は集中測位システムよりも小さい。アクセスポイント数 $N_a = 6$ のときは通信量を 3.9% 削減できる。分散測位システムによる通信量の削減はアクセスポイント数の増加とともに大きくなり、 $N_a = 14$ において 35.0% である。

(2) 分散測位システム、集中測位システムともに無線 LAN アクセスポイント数の増加とともに通信量は単調増加するが、分散測位システムにおいては無線 LAN アクセスポイント数の増加とともに増加量が小さくなる。これは、分散測位システムでは無線 LAN 端末周辺のアクセスポイントのみが RSSI 情報の転送に関わるため、ネットワーク規模が増加しても転送量が増加しないためである。

無線 LAN 端末数を 20 ~ 120 台まで変化させても同様の結果が得られた。以上より、無線 LAN アクセスポイント数を変化させた場合にも分散測位システムの通信量は集中測位システムよりも小さいことが示された。

次に、分散測位システムによって1台のアクセスポイントへの通信の集中を回避できることを検証するために、最大アクセスポイント通信量を評価した。アクセスポイント通信量は各アクセスポイントが単位時間に送信するデータ量であり、最大アクセスポイント通信量は全アクセスポイント中のアクセスポイント通信量の最大値である。

図7に、アクセスポイント数に対する最大アクセスポイント通信量を示す。図7より、以下の2つのことが分かる。

(1) 分散測位システム、集中測位システムともにアクセスポイント数 N_a の増加とともに最大アクセスポイント通信量は減少する。これは、無線 LAN 端末が一樣に分布している場合、各アクセスポイントに接続されている無線 LAN 端末の数がアクセスポイント数 N_a の増加とともに減少するためである。

(2) 分散測位システムの最大アクセスポイント通信量は集中測位システムよりも小さく、約半分である。最大アクセスポイント通信量の削減率がネットワーク全体の通信量の削減率に比べて大きいことから、分散測位システムによって

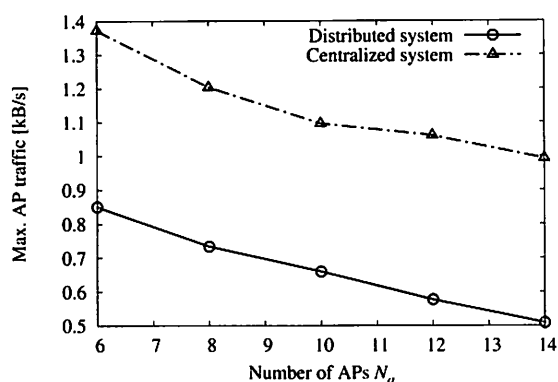


図7 アクセスポイント数 N_a に対する最大アクセスポイント通信量 ($N = 40$ の場合)

通信フローが分散され、1台へのアクセスポイントへの通信集中が避けられることが分かる。

以上の結果から、分散測位システムによって通信フローをネットワーク全体に分散できることが示された。

6. おわりに

本稿では、筆者らが目指す「オンデマンド位置情報サービス」について述べ、この実現に向けた分散測位システムの概要を示した。そして、分散測位システムの通信量を数学的にモデル化し、理想的な環境下では従来の集中測位システムよりも通信量を削減できることを証明した。また、より現実に近い環境を想定したシミュレーションを行い、集中測位システムに比べて通信量を約24%削減できることを示した。

謝辞 本研究の一部は、科研費(25870928)及び九州大学教育研究プログラム・研究拠点形成プロジェクトの助成で行われた。

文 献

- [1] 和泉 晃, 石田繁巳, 田頭茂明, 荒川 豊, 福田 晃, “アドホック測位ネットワークにおけるアプリケーションレス測位手法,” 信学技報, pp.1-6, モバイルネットワークとアプリケーション研究会 (MoNA2013-69), Jan. 2014.
- [2] S. Ishida, K. Tomishige, A. Izumi, S. Tagashira, Y. Arakawa, and A. Fukuda, “Implementation of on-demand indoor location-based service using ad-hoc wireless positioning network,” Proc. IEEE Int. Conf. Ubiquitous Intelligence and Computing (UIC), pp.34-41, Dec. 2014.
- [3] P. Bahl and V.N. Padmanabhan, “RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system,” Proc. IEEE INFOCOM, pp.775-784, March 2000.
- [4] A. LaMarca, Y. Chawathe, S. Consolvo, et al., “Place Lab: Device positioning using radio beacons in the wild,” LNCS, vol.3468, pp.116-133, May 2005. Proc. ACM (PERVASIVE).
- [5] A.W. Tsui, Y.-H. Chuang, and H.-H. Chu, “Unsupervised learning for solving RSS hardware variance problem in WiFi localization,” Mobile Networks and Applications, vol.12, no.5, pp.677-691, Oct. 2009.
- [6] A. Kushki, K.N. Plataniotis, and A.N. Venetsanopoulos, “Intelligent dynamic radio tracking in indoor wireless local area networks,” IEEE Trans. Mobile Comput., vol.9, no.1, pp.405-419, March 2010.
- [7] K. Kaemarungsi and P. Krishnamurthy, “Analysis of WLAN’s received signal strength indication for indoor location fingerprinting,” Pervasive and Mobile Computing,

vol.8, no.2, pp.292-316, April 2012.

- [8] S. Sen, B. Radunović, R.R. Choudhury, and T. Minka, “You are facing the Mona Lisa: Spot localization using PHY layer information,” Proc. ACM MobiSys, pp.183-196, June 2012.
- [9] M. Azizyan, I. Constandache, and R.R. Choudhury, “SurroundSense: Mobile phone localization via ambience fingerprinting,” Proc. ACM MobiCom, pp.261-272, Sept. 2009.
- [10] R. Nandakumar, K.K. Chintalapudi, and V.N. Padmanabhan, “Centaur: Locating devices in an office environment,” Proc. ACM MobiCom, pp.281-292, Aug. 2012.
- [11] H. Liu, Y. Gan, J. Yang, S. Sidhom, Y. Wang, Y. Chen, and F. Ye, “Push the limit of WiFi based localization for smartphones,” Proc. ACM MobiCom, pp.305-316, Aug. 2012.
- [12] P. Bolliger, “Redpin - adaptive, zero-configuration indoor localization through user collaboration,” Proc. ACM Int. Workshop Mobile Entity Localization Tracking GPS-less Environments (MELT), pp.55-60, Sept. 2008.
- [13] A. Barry, B. Fisher, and M.L. Chang, “A long-duration study of user-trained 802.11 localization,” LNCS, vol.5801, pp.197-212, Sept. Oct. 2009. Proc. ACM Int. Workshop Mobile Entity Localization Tracking GPS-less Environments (MELT).
- [14] J.-G. Park, B. Charrow, D. Curtis, J. Battat, E. Minkov, J. Hicks, S. Teller, and J. Ledlie, “Growing an organic indoor location system,” Proc. ACM MobiSys, pp.271-284, June 2010.
- [15] Z. Jiang, J. Zhao, J. Han, et al., “Wi-Fi fingerprint based indoor localization without indoor space measurement,” Proc. IEEE MASS, pp.384-392, Oct. 2013.
- [16] R.-Q. Zhang, Y. Lifshitz, and S.-T. Lee, “Oxide-assisted growth of semiconducting nanowires,” Advanced Materials, vol.15, no.7-8, pp.635-640, April 2003.
- [17] A. Rai, K.K. Chintalapudi, V.N. Padmanabhan, and R. Sen, “Zee: Zero-effort crowdsourcing for indoor localization,” Proc. ACM MobiCom, pp.293-304, Aug. 2012.
- [18] H. Wang, S. Sen, A. Elgohary, et al., “No need to wardrive: Unsupervised indoor localization,” Proc. ACM MobiSys, pp.197-210, June 2012.
- [19] C. Wu, Z. Yang, Y. Liu, and W. Xi, “WILL: Wireless indoor localization without site survey,” Proc. IEEE INFOCOM, pp.64-72, March 2012.
- [20] K. Chintalapudi, A.P. Iyer, and V.N. Padmanabhan, “Indoor localization without the pain,” Proc. ACM MobiCom, pp.173-184, Sept. 2010.
- [21] P. Krishnan, A.S. Krishnakumar, W.-H. Ju, et al., “A system for LEASE: Location estimation assisted by stationary emitters for indoor RF wireless networks,” Proc. IEEE INFOCOM, pp.1001-1011, March 2004.
- [22] H. Lim, L.-C. Kung, J.C. Hou, and H. Luo, “Zero-configuration indoor localization over IEEE 802.11 wireless infrastructure,” Wireless Networks, vol.16, no.2, pp.405-420, Feb. 2010.
- [23] S. Ganu, A.S. Krishnakumar, and P. Krishnan, “Infrastructure-based location estimation in WLAN networks,” Proc. IEEE Int. Wireless Communications and Networking Conf., vol.1, pp.465-470, March 2004.
- [24] L.M. Ni, Y. Liu, Y.C. Lau, and A.P. Patil, “LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID,” Proc. IEEE PerCom, pp.407-415, March 2003.
- [25] H. Wymeersch, J. Lien, and M.Z. Win, “Cooperative localization in wireless networks,” Proc. IEEE, vol.97, no.2, pp.427-450, Feb. 2009.
- [26] G. Blumrosen, B. Hod, T. Anker, and D. Dolev, “Enhancing RSSI-based tracking accuracy in wireless sensor networks,” ACM Trans. on Sensor Networks (TOSN), vol.9, no.3, pp.29:1-29:28, May 2013. Article no.29.