

無線センサネットワークの技術動向

戸辺 義人^{†,††}

Trend of Technologies in Wireless Sensor Networks

Yoshito TOBE^{†,††}

あらまし 無線センサネットワークは、センシングと無線ネットワークを融合させることにより、様々な技術課題を生み出している。こうした課題はハードウェアとしての実装から信号処理、ソフトウェアアーキテクチャにまで広がっており、ネットワーク単独での特殊性をとらえることが難しくなっている。しかし、無線センサネットワークには、センシングデータを配送することを目的とすることに伴う特徴があり、ネットワークアーキテクチャ設計の考え方に影響を与える。本論文では、これらの特徴から導かれる MAC (Media Access Control) プロトコル、位置情報を利用するルーチング、データセントリックネットワークの研究成果を中心に、ネットワークにかかわる技術的な課題を解説する。

キーワード センサネットワーク、通信プロトコル、MAC

1. ま え が き

実世界から情報をあまねく収集して、我々の社会生活へ還元するための手段として無線センサネットワークが注目されている。ホームセキュリティ、ヘルスケア支援といった小規模で生活に身近なものから、橋、道路、建築物の構造モニタリング、森林、農地、都市の環境モニタリング等の大規模に敷設するものに至るまで多岐にわたる応用が考えられる。このような応用を実現するにあたって、単に多くのセンサを無線により紡ぎ上げるといっただけであれば、特にネットワークアーキテクチャ及び個別の通信プロトコルを新規に設計する必要はない。ところが、無線センサネットワークは、通信ノードを実世界空間に設置してセンシングを行うネットワークであるため、データに付随する時空間情報の扱い、実世界設置にかかわる耐久性、実空間データ取得という目的から、通信プロトコル設計上の新たな要求条件が出てくる。そのため、これまでの情報通信ネットワークには見られない、無線センサ

ネットワーク向けの MAC (Media Access Control) プロトコル、ルーチング等、多くの研究へ展開される。例えば、広範囲にセンサノードを散布し、個々のノードが取得する位置情報だけを利用してデータパケットをルーチングするといったことが考えられる。

本論文では、MAC プロトコル及びルーチングプロトコルを中心として、無線センサネットワークの研究成果を解説する。本論文では、2. にて無線センサネットワークの特徴と研究課題について述べる。3. では MAC プロトコル、4. で位置情報を利用したルーチング、5. にてデータ検索から見た無線センサネットワークについて述べる。

2. 通信プロトコル設計上の特徴及び研究課題

無線センサネットワークは、工学全般にわたって研究されているが、本章では特にネットワーク及び通信プロトコルという観点で研究課題となっていることを述べる。

2.1 特 徴

通信プロトコルを設計する上で、無線センサネットワークを特徴づけるのは、次の3点である。

- 時空間情報の制御及び活用
- データ獲得への特化
- 消費電力の低減化

[†] 東京電機大学未来科学部情報メディア学科，東京都
Department of Information Systems and Multimedia Design,
Tokyo Denki University, 2-2 Kanda-Nishikicho, Chiyoda-ku,
Tokyo, 101-8457 Japan

^{††} 独立行政法人科学技術振興機構，東京都
CREST, Japan Science and Technology Agency, 5 Sanban-
cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-0075 Japan

(a) 特徴 1: 時空間情報の制御及び活用
センシングされる情報は、時刻及び空間の中での位置に関する正確な情報を伴うことにより有意義となるので、時刻同期や空間内での位置取得 (localization) が研究課題となり、多くの試みがなされている。更に、通信ノードの位置情報を付与されていることを積極的に活用するネットワークの設計が可能となる。

(b) 特徴 2: データ獲得への特化
データ獲得が主目的であり、その目的を達成するためにチューニングすると、従来の情報ネットワークの設計の基本となっていた「階層完全分離」主義を捨て去り、下位プロトコルの動作に上位データを反映させるという発想に至る。その一例として、近隣のノードがセンシングする情報には空間上の相関性が期待できるため、ネットワーク内部にある中間ノードにおいて、他ノードから受信したデータパケットをそのまま別ノードに転送するのではなく、複数の近隣ノードから受信したデータの相関性を利用して、データを圧縮し、一つのデータパケットにまとめて別ノードへ送り出すといったことが考えられる。

(c) 特徴 3: 消費電力の低減化
電源が供給されない場所にセンサノードを設置した後は、電池駆動により動作寿命を極力延ばすための工夫が必要とされる。単にセンサネットワークと称するだけであれば、商用電源が供給されて一般データと通信路を共有するセンサネットワークを指すこともあり、この特徴は当てはまらない。また、太陽電池を用いて無線センサネットワークを構築することも可能である [1]。しかし、本論文では、より一般的な応用が可能な電池駆動の場合について考える。

2.2 研究課題

前節で挙げた特徴に対処するために、図 1 に示す領域にわたって、研究課題が広がっている。特徴 1 の時空間との対応付けを活用するために、データ取得にかかわる正しい時刻・位置情報を供給することが必要となる。そのため、ノード間での時刻同期、位置推定技術が要求される。時刻同期手法の例として、RBS (Reference Broadcast Synchronization) [3] が提案されている。RBS では、送信ノードから定期的にブロードキャストで送られる時刻同期用パケットを複数の受信ノードで受け取り、受信ノード間でこのパケットの受信時刻を交換し合うことにより、相互の時刻補正を行う。

一方の位置推定は、位置が既知である複数の基準

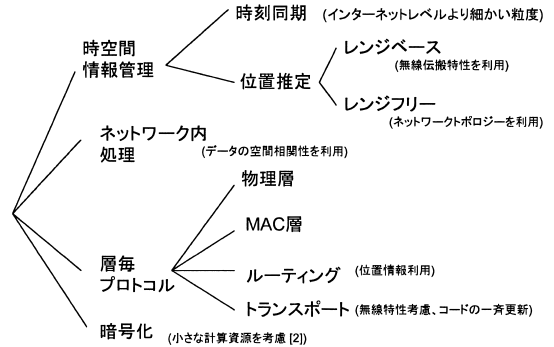


図 1 無線センサネットワークにおける「ネットワーク」にかかわる研究課題

Fig. 1 Research topics related to networks in wireless sensor networks.

ノードとの通信を行うことによりなされる。基準ノードから発せられた無線が有する指向性や信号強度の減衰特性を利用したり、伝搬遅延を測定することにより、正確な位置を推定する手法をレンジベース (Range-based) 推定と呼ぶ。これは、位置を特定すべきノードと基準ノードとが 1 ホップで直接通信できるときに適用できる手法で、屋内利用が想定されている。一方、大規模なネットワークにおいてまばらにしか存在しない基準ノードとの間で、無線特性ではなく、到達ホップ数 [4] 等のネットワークポロジを活用して位置を推定する手法をレンジフリー (Range-free) 推定と呼ぶ。レンジフリー推定により得られる位置情報の精度は高くないが、少ない基準ノードを用いて広範囲にわたり位置推定を行うのにレンジフリー推定は有効である。

ネットワーク内処理 (In-network Processing) は、近隣ノード間での空間相関性が高いことを利用して、データを圧縮することをねらうものである。ある領域の平均値、最大値、中央値等をとると、もとのデータを復元することはできなくなるため、ウェーブレット変換によりセンサデータを集約したトリーにおいて、途中ノードでウェーブレット係数を蓄積する手法も提案されている [5]。図 2 に、Haar ウェーブレット分解を利用して、ネットワーク内の中間ノード (I~O) にてネットワーク内処理を行う様子を示す。ノード I において、ノード A、ノード B から送出されたデータの和と差を計算し、差をノード I 内部に蓄積し、和を次ノード M へ転送する。ノード M では、ノード I とノード J から受信した値に対して同様に和と差を計算する。最終的に、シンクノード P には 45 という結果

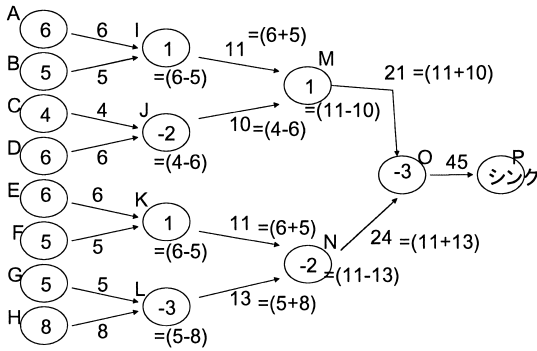


図 2 Haar ウェーブレット分解を利用したネットワーク内処理
Fig. 2 In-network processing using Haar wavelet.

がわたる．ノード A ~ H の値の平均を知るには、45/8 で計算できる．ノード A ~ D を一領域，ノード E ~ H を一領域として，二つの領域各々の平均値を知るには，ノード O に蓄積された値を問い合わせて -3 という値を取得し，その差から，各領域の合計値をそれぞれ，21, 24 と計算し，平均値を $21/4$, $24/4$ と計算される．このようにして，必要に応じて，データ復元の精度を高めることができる．

3. MAC プロトコル

MAC では，物理的に直接接続された複数のノード間でのデータ通信を実現する．MAC プロトコルの設計においては特徴 3 の省電力を目指して「必要最小限のときのみ」通信動作を実行し，それ以外においては極力スリープ動作とすることを追求する．送信，受信動作もさることながら，アイドルリスニング問題 [6] にも注意を払わなければならない．アイドルリスニング問題とは，データを送受信していないアイドル時間において，受信可能な状態を続けることにより電力を消費することを指す．こうした無線センサネットワーク用の MAC プロトコルは，同期型と非同期型の二つに大別でき，更にネットワーク全体での同期機構をもたず，独自の手法で局所的に同期をとるプロトコルがある．これまで提案があった，あるいは標準となった主たる MAC プロトコルを表 1 に示す．

3.1 同期型 MAC

同期型 MAC では，データの送受信のタイミングを完全に把握することができ，通信を停止させておく期間を理想的に決定することが可能である．そのためアイドルリスニング問題への対応が容易となる．し

表 1 これまでに提案のあった主たる無線センサネットワーク用 MAC プロトコル
Table 1 Major proposed MAC protocols.

発表年	MAC プロトコル名	分類
1997	Piconet MAC [7]	1-persistent センシングの拡張
2000	LEACH [22]	ノード間協調
2002	S-MAC [19]	局所同期型
2003	T-MAC [20]	局所同期型
	WiseMAC [8]	非同期型
	TRAMA [9]	同期型
	IEEE 802.15.4-2003 [17]	同期型/非同期型
2004	B-MAC [15]	非同期型
	LMAC [10]	同期型
2005	Z-MAC [18]	同期型/非同期型ハイブリッド
2006	X-MAC [16]	非同期型
	RT-Link [11]	同期型

かしスケジューリングするスロットを十分確保するためには，ネットワーク内のノード数を把握しておく必要がある．センサネットワークでは，数百～数千個のノードが動的にネットワークに参入したり消滅する可能性があるためノード数の把握は困難である．また，TDMA (Time Division Multiple Access) ではスロットを細かい粒度に区切る必要があるため，精度の高い時刻同期が要求されるなど多くの課題が存在する．TDMA 型プロトコルの例として，TRAMA [9] と LMAC [10] がある．TRAMA ではスケジューリングの行われるスロット以外に CSMA (Carrier Sense Multiple Access) 用スロットも用いる．いずれの方法においても大域的に時刻の同期がとれていることが前提となっているが，時刻同期は MAC プロトコル以外の別機構で実現されることを仮定している．最近，発表された RT-Link [11] では，CSMA に代えて Slotted ALOHA [12] を用い，時刻同期機構を含ませる設計としている．RT-Link では，データ通信用の無線チャネル以外に時刻同期専用の無線チャネルを用いる．この時刻同期専用無線チャネルにて，同期サイクル開始を示す同期パルスを発生させて，ネットワーク全体で時刻同期をとる．

3.2 非同期型 MAC

非同期型 MAC では，ノード間の同期をとらない．そのため，ネットワーク全体での時刻同期から解放されて，スケラビリティの点では同期方式よりも優れている．しかし，送受信のタイミングが把握できないため，ノードをスリープさせることのできる時間の比率は同期型に比較して低くなり，どのように自ノードの通信に直接関係ない時間をスリープさせることができるかが消費電力低減の鍵となる．

LPL (Low Power Listening: またはチャネルポーリ

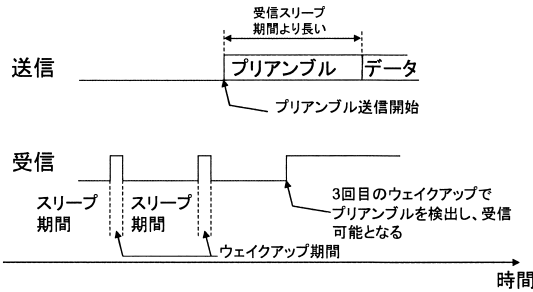


図 3 LPL (Low Power Listening)
Fig. 3 Low Power Listening. (LPL)

ング)は、データ送信に先立って送られるプリアンブルの長さを受信スリープ期間よりも長くすることにより、受信側のアイドルリスニングを減らすものである [13]。図 3 に、LPL の動作を示す。LPL は、TinyOS においてデューティサイクルを 10%として採用された [14]。B-MAC (Berkeley MAC) [15] は、LPL と CSMA を組み合わせて用いる。各ノードはスリープの合間に周期的に起き上がり、2.5 ms の短い期間、チャネルの信号有無を調べる。チャネルに信号があれば起き続けて、プリアンブルに続くデータを受信する。B-MAC においても、解決できない問題がある。それは、送信ノードが長いプリアンブルを送らなければならないことに伴って電力消費を多く消費してしまうことと受信側で自ノード受信と無関係の packets を受けるのに電力を消費してしまうことである。この問題を解決するために設計されたのが X-MAC [16] である。X-MAC では、プリアンブルを短冊状に短いストローブの列とし、各ストローブの中にあて先アドレスを記載する。受信ノードは起き上がった直後、ストローブのあて先アドレスを検査する。あて先が自ノードでなければすぐにスリープ状態へ戻るが、自ノードであったならば直ちに送信ノードへ ACK (確認応答) を返す。送信ノードは ACK を受け取るとプリアンブル送信を中止し、データを送信する (図 4)。

以上のように非同期型 MAC ではアイドルリスニング問題への対処に LPL 及びその改良手法が考えられているが、現実には LPL そのものにも問題がある。まず、受信側の消費電力は減るが、送信側の消費電力は増え、コストが受信から送信へ移っただけと考えることができる。また、ネットワークトポロジーやトラヒック量のいかんによっては、送信・受信の協調をとることが難しくなってくる。更に、IEEE 802.15.4 [17]

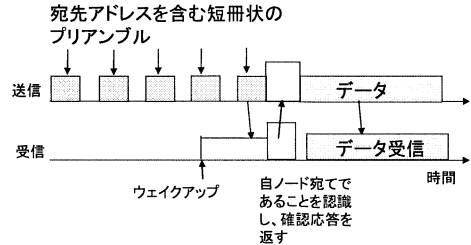


図 4 X-MAC の動作
Fig. 4 Behavior of X-MAC.

においてはプリアンブルの長さ制限があるために直接の適用が難しい。しかしネットワークのスケラビリティの高さへの期待から非同期型 MAC の改良は精力的に続けられている。その中の一つとして、ノード数が増加すると、同期型 MAC から非同期型 MAC へ動作を変更する Z-MAC [18] が提案されている。

3.3 局所的に同期をとる MAC

S-MAC [19] や T-MAC [20] では、ネットワーク全体で完全に同期をとることをねらわない。それは、マルチホップ通信を行う中で、近隣ノード相互にスリープ、ウェイクアップにかかわるスケジュール情報を交換しても全体でスケジュールを合わせることが難しいからである。そこで、virtual cluster と呼ばれる局所的なノード集合の中で、相互にスリープ、ウェイクアップ情報を交換し、virtual cluster の中でアイドルリスニングを減らす工夫を行う。ノード間での送信衝突回避には、CSMA を用いる。

3.4 ノード間協調

MAC レベルで電力消費を抑制するのではなく、ノード間で協調動作を行うことでシステム全体の寿命を延ばすことも重要である [21], [22]。ノードが協調し合い、どのノードが通信デバイスを活動させてデータの中継を行うか、どのノードが通信デバイスを停止させるかなどを自律分散的に実現する。このため、特定のノードが早く電源を消耗しきらないことを目指して、電力消費の平準化を図る。このアプローチはアプリケーションから見ると単純ではない。ノードの通信デバイスの活動・停止のスケジューリングだけでなく、アプリケーションの要求にあったトポロジーを自律分散的に構成しネットワークのライフタイムを伸ばさなければならないからである。スリープ状態にあるノードが多い場合、ノード間の距離が遠くなり、エラーレートが高くなる。そのため、送信電力が多くなってしまふ。また、センシング領域にも影響を与えるため、

これらの領域を管理する仕組みも必要となる．一方、アイドルノードが多い場合、不必要なノードがアイドルになっているので、電力が無駄になる．また、短いデータ通信が頻繁に起こるため、干渉が起こり、ネットワークのふくそうが起こりやすい．

4. 位置情報を利用するルーチング

特徴 1 で挙げた「時空間情報」の活用例として、位置情報を利用したルーチング [23] がある．これは各ノードが GPS (Global Positioning System) 等の手段により、自己位置情報を保有することを前提とする．こうした位置情報を用いるルーチングには、ノード間で相互に Beacon を送り合せて位置情報を交換することによりルーチング制御情報を生成する地理情報ルーチング (Geographic Routing) と、Beacon を使用しない BLR (Beacon-Less Routing) がある．

4.1 地理情報ルーチングの基本

現在、地理情報ルーチングとして多くのプロトコルが提案されている．その源流となるのが、GFG [24]、GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) [25]、GOAFR+ [26] 等である．これらのプロトコルでは、各ノードは定期的に Beacon を送信し、近隣ノードに対して自分の位置を知らせる．また、送信されるデータの packets ヘッドには、あて先ノードの位置が記録されており、中継ノードは自分の位置とあて先ノードの位置の関係を判断できることを前提としている．細部において差異はあるものの、地理情報ルーチングと総称されるこれらのプロトコルには、Greedy Routing と Face Routing の異なる二つの共通した動作がある．

Greedy Routing では、中継ノードはあて先ノードに最も近いノードに対して packets を転送する．図 5 において、ノード x は、通信可能な近隣ノードの中からあて先ノード d に最も近いノード a を選び出し、ノード a に対して packets を転送する．この中継動作を繰り返し、最終的に目的とするノードに packets を届けることを試みる．一方、Face Routing では、中継ノードは face 内部で隣接するノードに packets を転送する．face とは、通信可能な 2 ノードを辺で表現したときに、辺で囲まれた多角形からなる領域を指す．Face Routing が誤りなく実行できるためには、ネットワークの経路グラフが、交差する辺を含まない平面的グラフ (planar graph) になっていなければならない．Face Routing において、データは right-hand rule に従い、ノードにおいて、右折する要領で転送さ

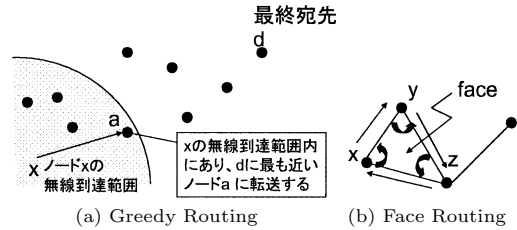
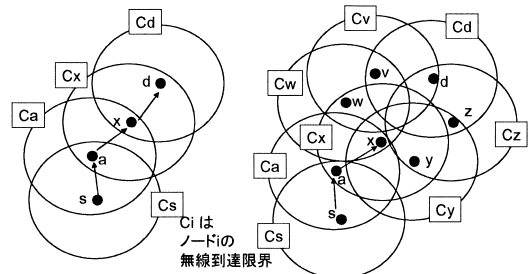


図 5 Greedy Routing と Face Routing
Fig. 5 Greedy and Face Routing.



(a) Greedy Routing が成功する場合 (ノード s, a, x, d の順で、 s から d へ到達する)
(b) Greedy Routing が失敗する場合 (ノード x で停止してしまう．Face Routing でノード d へ到達可能となる)

図 6 Greedy Routing が成功する場合と失敗する場合
Fig. 6 Success and failure of Greedy Routing.

れる．図 5 は Face Routing の処理を示す．ノード x は自ノードから見て、右手の y から packets が転送されてきたので、 x は z に転送する．

さて、Greedy Routing により転送を繰り返せば、転送される packets は最終あて先ノードに近づく可能性があるが、次に転送すべきノードを検出できずに packets 転送が停止することもある．図 6 に、Greedy Routing が成功する場合と失敗する場合を示す．図 6 (a) において、ノード s から送出された packets がノード x まで届いたものとする．ノード x は、自ノードの通信可能範囲に最終あて先ノード d を検出し、ノード d へ転送し、ノード s からノード d への通信は完了する．一方の図 6 (b) において、ノード x は自ノードよりもノード d に近いノードを検出することができずに、Greedy Routing ではノード d へ packets を配送することができない．そのため、地理情報ルーチングでは、Greedy Routing を実行することが不可能になった場合、Face Routing へ移行することとする．

Face Routing が継続する過程においては、face change が発生する．Face change とは、ルーチング対象とする face (多角形) が別の face に移動するこ

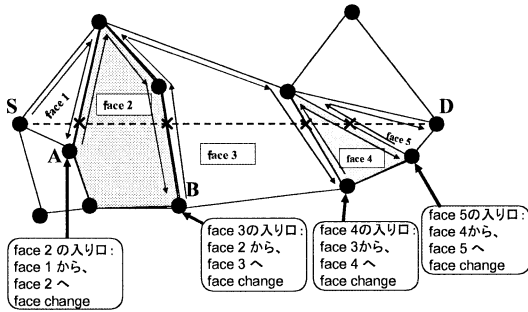


図 7 Face change
Fig. 7 Face change.

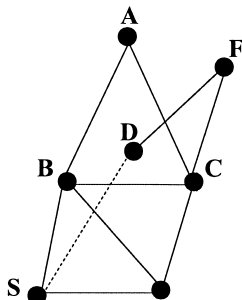


図 8 交差線がある場合
Fig. 8 Case in which a crossing link exists.

とである．図 7 において，線分 SD を，ルーチングとは関連のない，起点 S と終点 D を結ぶ直線であるとする．S から発せられたパケットは，face1 を周回するときに，線分 SD と交差する辺を通る可能性がある．この辺を通過してノード A に到達すると，face 1 と隣接し，より終点 D に近い face 2 へ移行し，ノード A を face 2 の入り口として Face Routing を行う．face 2 においても，同様にパケット周回中に線分 SD と交差する辺を通る可能性がある．face となる領域と線分 SD とは，2 点で交差するが，終点 D に近い交差点を通過した直後に，次の face へ移行する．Face Routing だけをを用いると，図 7 に示される順序でパケットが起点 S から終点 D へ配送される．

4.2 Face Routing の改良

現実の無線通信環境においては，ノード間の無線到達性だけでノード間の辺を生成するグラフを作成すると，平面的グラフにならない場合もある．図 8 は，平面的グラフにならない例を示す．ノード F は，ノード D 及びノード C とのみ通信ができるものとする．このとき，ノード A, B, C で囲まれた face の中であて先 D があり，face routing でデータをあて先 D へ配送す

ることは不可能となる．こうした交差線を含むグラフから，交差線を取り除き，平面的グラフを生成するための提案がなされている [27], [28]．このように，Face routing を含む地理情報ルーチングは，ルーチングトポロジーが単純な場合には動作するが，単純な平面的グラフでないときには複雑な処理が必要とし，改良が続けられている．

4.3 Beacon-Less Geographic Routing

GPSR のように Beacon を使用するルーチングプロトコルは，大規模センサネットワークを構築する上で，通信回数を増大させ，ネットワーク全体のエネルギー増加を招いてしまう．そこで，位置情報ルーチングにおいて Beacon を使用しない BLR (Beacon-Less Routing) [29] が提案されている．BLR は，あて先の方角に対して Forward area を定義し，Forward area 内にパケットを転送する．パケットを受信した area 内のノードは，タイマを起動させる．エリア内で，最も早くタイマが満了したノードが更にあて先に向けて転送を繰り返す．タイマが同時に終了すると，複数の転送パケットが発生する可能性がある．BGR (Blind Geographic Routing) [30] では，この問題を解決するためにホップ数をパケットヘッダに格納しておく．あるノードが timer を動作させているにもかかわらず，パケットを受信したら，受信したパケットに含まれるホップカウントと自ノードが発生させるパケットのホップカウントを比較し，ホップカウントの小さなパケットのみを転送することにより，重複してパケットが発生することを防止する．

5. データ獲得に特化するアプローチ

2. に述べたように，データ獲得へ特化していることはセンサネットワークの大きな特徴である．データ獲得に特化したアプローチの具体的な例として，データセントリックネットワークとセンサネットワーク向けデータベースを紹介する．

5.1 データセントリック

従来の情報ネットワークでは，データアクセス先の ID すなわちアドレスを指定して，目的のノードにアクセスし，そのノード上にあるデータを取得したり，データを書き込んだりしていた．しかし，データを獲得することだけに着目すると，データが保存されている場所は問わず，データ有無，若しくはデータから逆に場所を特定するという考え方が重要となってくる．これは，アドレスを入力としてそのアドレスに対応

づけられたデータを読み取るのではなく、データを入力としてデータ有無及びそのデータに付随する情報を出力する点で、コンピュータアーキテクチャにおけるMMU (Memory Management Unit) に見られる連想メモリと同様である。このように、データ自身を直接取り扱うことを中心とする考え方をデータセントリック [31], [32] と呼ぶ。大量のデータを扱う大規模センサネットワークにおいては、拡張性、自己組織性、エネルギー効率を考慮した分散アルゴリズムであるデータセントリック手法が有効となってくる。

データセントリックストレージの基本として、ハッシュキーと値を組としたハッシュ記憶システムがある。ハッシュキーは一意に名前付けされたものであれば、いかなるものでもよく、

- Put(k, v) k: ハッシュキー, v: 値 (k に対応する v を記憶させる)
- Get(k) k: ハッシュキー (k に対応する v を取り出す)

の二つの操作が定義される。データセントリックストレージを実現する方法として提案されたGHT (Geographic Hash Table) [32] では、ハッシュキーを地理座標に関連づける。GHTでは、ノードの故障や移動に対応するため、Perimeter Refresh Protocolを用いる。地理情報に対応付けされたポイントの周りのノードがデータを保持することとし、データは一つのノードが保持するのではなく近隣のいくつかのノードが複製を保持する。同じデータを保持しているノードのうち1台のノードがhome nodeとなり、そのノードがクエリに対して応答する。また同一のキーのデータが大量に発生した際に同一のノードへ負荷が集中することを避けるためにデータの複製を分散して管理する。

GHTが決定する地理座標は実際のノードを考慮して計算されるわけではないため、その座標にノードが存在しない場合がある。GHTでは、GPSRを利用してパケットをルーティングさせていく。あて先となる座標に実際のノードがない場合、パケットは、face routingに変更して周回する。この周回を終えたパケットが再び同じノードに戻ってきたとき、そのノードが、そのキーのhome nodeとなる。home nodeは一定の間隔でrefresh packetsをGHTにより決定された地理座標に向けて送信する。これは、ネットワークの変動により、そのキーのGHTに最も近いノードが変更する可能性があるためである。refresh packetsがPerimeter Modeになり周回を終えたノードが次の

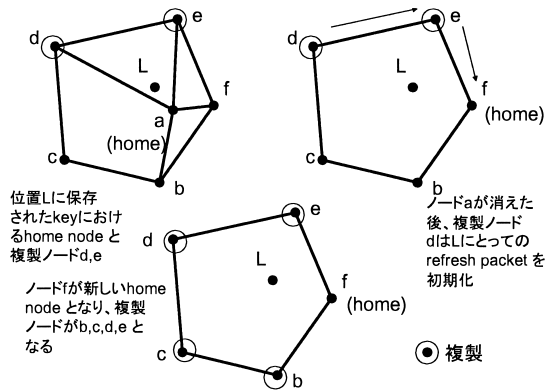


図9 GHT
Fig. 9 GHT.

home nodeとなる。もしポロジが変更していない場合は、同じノードがhome nodeとなる。perimeter nodeはhome nodeからのrefresh packetが期待時間内に送られない場合は、home nodeの故障を想定して、自らrefresh packetを送信する。一連の流れを図9に示す。図9左は、地理座標Lに対するキーまでGPSRで経路設計している。Lのキーに最も近いaまでGreedy Modeで経路設計されるが、キーに対するノードが存在しないため、aからPerimeter Modeに移行する。Perimeter Modeでaまでパケットが戻ってきてしまったのでaをキーに対するhome nodeとし、Perimeter Modeの軌道上にあるdとeにパケットの複製が生成される。図9中央で、aに障害が発生し、dとeはrefresh packetが途絶えたことを確認する。dは再びPerimeter Modeでパケットを転送する。fにてGreedy Modeに移行する。図9右において、fはキーに対する新しいhome nodeとなり、そのPerimeter軌道上に存在するb, c, d, eは複製を生成する。このようにGHTは前章に述べたGPSRを利用するが、センサネットワークの持続性、一貫性、拡張性を考慮して設計された優れたデータセントリックストレージ手法である。

5.2 無線センサネットワーク向けデータベース

無線センサネットワークでは各ノードがそれぞれセンシングしたデータを保持している。すべてのデータを中央サーバ等に収集すると、データベース更新の際に生じる遅延とネットワーク全体で消費される電力の効率の観点で好ましくない。そこで、センサネットワークを一つの仮想的なデータベースとみなして、ネットワークに対し問合せ処理を行うことが提案され

ている [33], [34] . センシングや計算処理よりも無線通信の際の電力消費が大きいため, 途中ノードでデータを集約することで発生するメッセージ数を抑えながら必要な問合せ処理を実現する. 米カリフォルニア大学バークレイ校が開発された TinyDB では, データを中継するノードがデータの集約を行うことで通信量を減らすことができる.

TinyDB はユーザから問合せ発行されると, センサネットワークに関するメタデータをパラメータとして問合せの最適化を行う. 最適化によって作成されたルーティングツリーに基づき親ノードから子ノードに向け, 問合せを分配していく. 各ノードは指定時間間隔で与えられた問合せを実行し, 親ノードにデータを送信する. また子ノードから受信したデータは問合せで指定された条件を満たすデータのみを親ノードに転送することでネットワーク内を流れるメッセージ数を減らすことができる. 各ノードではデータの収集と同時に集約を行いメッセージ数を更に減らすことができる. 集約を行う場合, 各ノードは子ノードから受信したデータと自ノードのデータを用いて計算処理した結果を親ノードに転送する.

TinyDB の拡張として, ACQP (ACquisitional Query Processing) [35] が提案されている. ACQP ではデータの取得・処理にかかわる時間や頻度を調整することで, 電力消費を考慮した問合せ処理を可能としている. 例えば指定した期間センシングをするような場合, ACQP では指定した期間センサノードを稼働させ続けるため, サンプリングや通信にかかる消費電力を計算し, その結果を考慮して問合せ処理のスケジューリングを行う.

6. む す び

本論文では, ネットワーク技術に焦点を当てて, 無線センサネットワークにかかわる研究の動向を解説した. 時空間情報の制御及び活用, データ獲得への特化, 省電力への配慮の 3 点からなる特徴を基本として, ネットワークの設計がなされている. 無線センサネットワークは, ネットワーク技術のみならず, センサそのものの進化と, センシング, 信号処理, データベースの周辺技術の発展とともに, 更に新たな展開が期待される.

文 献

- [1] M. Minami, T. Morito, H. Morikawa, and T. Aoyama, "Solar biscuit: A battery-less wireless sensor network system for environmental monitoring applications," Proc. Second International Workshop on Networked Sensing Systems (INSS 2005), pp.42-47, 2005.
- [2] Adrian Perrig's homepage: <http://www.ece.cmu.edu/>
- [3] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts," Proc. Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 2002), pp.147-163, 2002.
- [4] D. Niculescu and B. Nath, "DV based positioning in ad hoc networks," J. Telecommunication Systems, vol.22, no.1-4, pp.267-280, 2003.
- [5] J.M. Hellerstein and W. Wang, "Optimization in in-network data reduction," Proc. 1st Int. Workshop on Data Management for Sensor Networks, pp.40-47, 2004.
- [6] L. Feeney and M. Nilsson, "Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment," IEEE INFOCOM, vol.3, pp.1548-1557, 2001.
- [7] F. Bennett, D. Clarke, J.B. Evans, A. Hopper, A. Jones, and D. Leask, "Piconet: Embedded mobile networking," IEEE Pers. Commun. Mag., vol.4, no.5, pp.8-15, 1997.
- [8] A. El-Hoiydi, J.-D. Decotignie, C.C. Enz, and E. Le Roux, "WiseMAC, an ultra low power MAC protocol for the wiseNET wireless sensor network," ACM SenSys, pp.302-303, 2003.
- [9] V. Rajendran, K. Obraczka, and J.J. Garcia-Luna-Aceves, "Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks," ACM SenSys 2003, pp.181-192, 2003.
- [10] L.F.W. van Hoesel and P.J.M. Havinga, "A lightweight medium access protocol for wireless sensor networks," INSS 2004, pp.205-208, 2004.
- [11] A. Rowe, R. Mangharam, and R. Rajkumar, "RT-Link: A time-synchronized link protocol for energy-constrained multi-hop wireless networks," IEEE SECON 2006, pp.402-411, 2006.
- [12] L.G. Roberts, "ALOHA packet system with and without slots and capture," ACM SIGCOMM, vol.5, no.2, pp.28-42, 1975.
- [13] G. Halkes, T.V. Dam, and K. Langendoen, "Comparing energy-saving MAC protocols for wireless sensor networks," ACM Mobile Networks and Applications, vol.10, no.5, pp.783-791, 2005.
- [14] J.L. Hill and D.E. Culler, "Mica: A wireless platform for deeply embedded networks," IEEE Micro, vol.22, no.6, pp.12-24, 2002.
- [15] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile low power media access for wireless sensor networks," ACM SenSys 2004, pp.95-107, 2004.
- [16] M. Buettner, G.V. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks," ACM SenSys 2006,

[1] M. Minami, T. Morito, H. Morikawa, and T. Aoyama, "Solar biscuit: A battery-less wireless sensor network

- pp.307-320, 2006.
- [17] IEEE, "Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low rate wireless personal area networks (LR-WPANS)," IEEE 802.15.4-2003, 2003.
- [18] I. Rhee, A. Warrier, M. Aia, and J. Min, "Z-MAC: A hybrid MAC for wireless sensor networks," ACM SenSys, pp.90-101, 2005.
- [19] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," INFOCOM, pp.1567-1576, 2002.
- [20] T. Dam and K. Langendoen, "An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," ACM SenSys, pp.171-180, 2003.
- [21] B. Chen, K. Jamieson, R. Morris, and H. Balakrishnan, "SPAN: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks," ACM/IEEE Mobicom, pp.85-96, 2001.
- [22] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocols for wireless microsensor networks," Proc. Int. Conf. on System Sciences, 10pp. 2000.
- [23] I. Stojmenovic, "Position-based routing in ad hoc networks," IEEE Commun. Mag., vol.40, no.7, pp.128-134, 2002.
- [24] P. Bose, P. Morin, I. Stojmenovic, and J. Urrutia, "Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks," ACM DIALM Workshop, pp.48-55, 1999.
- [25] B. Karp and H.T. Kung, "GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks," Proc. ACM/IEEE MOBICOM'00, pp.243-254, 2000.
- [26] F. Kuhn, R. Wattenhofer, Y. Zhang, and A. Zollinger, "Geometric ad-hoc routing: of theory and practice," ACM PODC, 2003.
- [27] Y.-J. Kim, R. Govindan, B. Karp, and S. Shenker, "Geographic routing made practical," USENIX Symp. on Networked Systems Design and Implementation, pp.217-230, 2005.
- [28] Y.-J. Kim, R. Govindan, B. Karp, and S. Shenker, "Lazy cross-link removal for geographic routing," ACM SenSys, pp.112-124, 2006.
- [29] M. Heissenbüttel, T. Braun, T. Bernoulli, and M. Wälchli, "BLR: Beacon-less routing algorithm for mobile ad-hoc networks." Elsevier's Computer Comm. Journal, vol.27, no.11, pp.1076-1086, 2004.
- [30] M. Witt and V. Turau, "BGR: Blind geographic routing for sensor networks," Proc. Third Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems, pp.51-61, 2005.
- [31] W. Adjie-Winoto, E. Schwartz, H. Balakrishnan, and J. Lille, "The design and implementation of an intentional naming system," Proc. 17th ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP'99), pp.186-201, 1999.
- [32] S. Ratnasamy, D. Estrin, R. Govindan, B. Karp Li Yin, and S. Shenker, "GHT: A geographic hash table for data-centric storage," WSNA, pp.78-87, 2002.
- [33] S. Madden, M. Franklin, J. Hellerstein, and W. Hong, "TAG: A tiny AGgregation service for ad-hoc sensor networks," Proc. Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI), pp.131-146, 2002.
- [34] Y. Yao and J.E. Gehrke, "The Cougar approach to in-network query processing in sensor networks," ACM SIGMOD Record, vol.31, no.3, pp.9-18, 2002.
- [35] S. Madden, M. Franklin, J. Hellerstein, and W. Hong, "TinyDB: An acquisitional query processing system for sensor networks," ACM TODS, pp.122-173, 2005.
(平成 18 年 12 月 13 日受付, 19 年 4 月 6 日再受付)



戸辺 義人 (正員)

昭 59 東大・工・電気卒。昭 61 同大大学院修士課程了。平 4 カーネギーメロン大学 Electrical and Computer Engineering 修士課程了。平 12 博士(政策・メディア)。東芝、慶大を経て、平 14 東京電機大学助教授。平 15 同教授。ユビキタスコンピューティング、センサネットワークの研究に従事。