

アドホックネットワークによる歩数計測システムの構築

中山 英 久

Construction of a Pedometer Measurement System on Mobile Ad-hoc Network

Hidehisa NAKAYAMA

Abstract

We can see a small devices on which complicated algorithm was implemented. The health care applications become increasingly sophisticated. In the case of nursing care or medical examination, when gathering health care information efficiently, such application is very useful if we can use a mobile network. Therefore, by this article, I propose and construct a pedometer measurement system on mobile ad-hoc network. The aim of this project is an easy health care by using acceleration sensors as an example of the health care application. The system which we constructed can measure much health care information of many people simultaneously in realtime, because the Sun SPOT enables multi-hop communication. Some experimental results show almost all the same performance of a traditional pedometer.

1. ま え が き

近年、老若男女を問わず、健康に対する意識が年々高まっている。日常的に健康管理を行うためには、体重計、体組成計、歩数計、活動量計などといった健康管理機器が必要となる。小型組込デバイスに高度なアルゴリズムが実装された機器が身近になり、健康管理機器についても高機能化が進んでいる。通信機能や記録機能を持つ機器を用いれば、個人でも行動や運動の記録を蓄積することが可能となっている [1, 2]。

また、21 世紀に入って本格的な高齢化社会を迎え、要援助者・要介護者は増加する一方であるにもかかわらず、それを支える人員が大幅に不足している [3]。そのため、人手をかけずに行動管理や運動記録を行いたいというニーズは非常に多く、高機能な健康管理機器からの情報を容易に収集する仕組みにより、多数の健康情報の利活用が期待されている。

例えば、goo の「からだログ」[4] や、タニタの「からだカルテ」[5] では、インターネット上で健康管理

機器からの情報を集約し、健康管理サービスを受けることができる。機器からは常に新しい情報が得られるため、単なるデータの蓄積・管理に留まらず、健康情報が有効に利活用されている。しかしながら、健康情報は、身体的特徴を含む高度な個人情報であるため、情報セキュリティの観点から、インターネットでのデータ取扱いに抵抗のある人は多い [6]。

ネットワークとして、局所限定的なアドホックネットワーク [7] を用いれば、インターネットへの健康情報の送信を限定的にすることが出来る。さらに、多数の端末を用いた通信により多人数の同時管理機能が可能となる [8, 9]。そこで本稿では、健康管理機器の代表例として、Sun SPOT の加速度センサを利用したネットワーク対応歩数計を試作し、アドホックネットワークを用いてリアルタイムに歩数計測できるシステムを構築する。このシステムは、ネットワークを利用して手軽に健康管理を行うことを目的としている。特に本稿では、アドホックネットワークのリアルタイム性により、加速度センサ波形の観察が容易となったため、歩行検出アルゴリズムを検討することで、簡単なフィルタを用いた場合でも、市販の歩数計と同程度に精度を高めることが出来たという結果を示す。

2014 年 10 月 22 日受理

* 知能エレクトロニクス学科 准教授

2. システム概要

図1にシステム概要を示す。計測者 (User) が身に着けた端末上の加速度センサの情報を取得し、アドホックネットワーク (Ad-hoc Network) 上のマルチホップ通信により、ゲートウェイ (Gateway) へデータが送られる。本稿でのアドホックネットワークの構成には、物理デバイスとして Sun SPOT, ネットワーク経路制御アルゴリズムに AODV または LQRP を用いる。

2.1 アドホックネットワーク

アドホックネットワークは、端末同士が直接あるいは他の端末を中継したマルチホップ通信を行う。よって、基地局等の通信インフラに依存せず、無線端末同士で自律的にネットワークを形成する。そのため、固定的なインフラの敷設を要さないという柔軟性があり、災害時の仮設ネットワークやイベント会場での一時的な利用などの用途が考えられている [12]。さらに、アドホックネットワークでの端末同士の通信に限らず、ゲートウェイを介してプロトコル変換することにより、インターネットや携帯電話網など、外部のネットワークへの接続も可能である [13, 14]。

ところで、センサネットワークは、数多くのセンサが無線を介してネットワークに接続され、センサからの情報に基づき、様々なサービスやアプリケーションを提供するネットワークと定義されている [15]。本稿で用いるアドホックネットワークは、センサ計測情報に適した通信を行い、センサネットワークを形成し

ていると位置づけることも出来る。

2.2 Sun SPOT

Sun SPOT (Sun Small Programmable Object Technology) は、2003年に Sun Labs (現 Oracle Labs) で開発された、Java 技術ベースのバッテリー駆動の実験用無線センサネットワークデバイスである [16]。

Sun SPOT のハードウェアは、柔軟に拡張・カスタマイズできるように設計されており、図2のような構造をしている。一番下は「バッテリー」で、Sun SPOT に電源を供給する 3.7 V 720 mAh リチウムイオン電池が取付けられている。その上は「プロセッサボード」で、180 MHz の 32 bit ARM CPU および 512 KB の RAM と 4 MB フラッシュメモリ、近距離無線規格 IEEE 802.15.4 準拠の 2.4 GHz 無線チップや、PC 接続用の mini USB ポート、処理ステータス表示用の LED、電源・リブートボタンが搭載されている。そして、その上の「センサボード」上には、2 G/6G 加速度 (重力)、温度、照度などのセンサ類と外付け用 I/O コネクタ、8つの RGB 3色 LED、2つの汎用プッシュボタンスイッチが配備されており、「サンルーフ」によりボードが保護されている。

Sun SPOT のソフトウェアとしては OS を持たず、小型デバイス向け JAVA 仮想マシン (VM: Virtual Machine) である Squawk VM (Java ME CLDC 1.1 準拠) が ARM CPU 上で直接動作している。Squawk VM は割込みハンドラやデバイスドライバを含むコードの大部分が Java 言語により記述されていることが特徴で

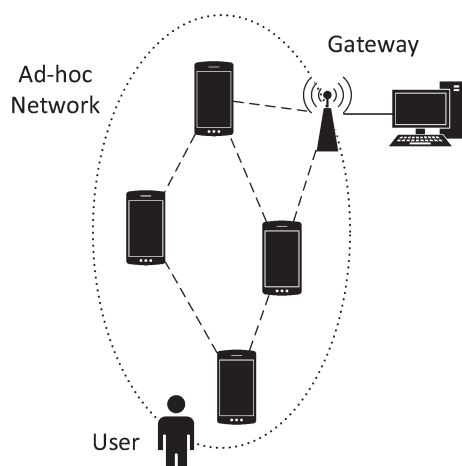


図1 システム概要

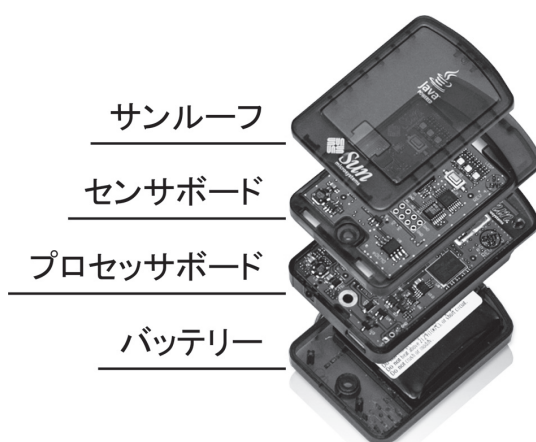


図2 Sun SPOT の構造 [16]

ある。Sun SPOT World [16] からは、センサや出力インタフェースにアクセスできる抽象レベルの高い Java ライブラリ群が提供されている。そのため開発では、組込システム専用の特別なスキルは必要なく、ソースコードの大部分を Java 言語で記述可能であり、プロジェクトの工数を大幅削減できる。

2.3 AODV と LQRP

AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector) [17] は、通信開始時に経路探索を行うリアクティブ型の経路制御プロトコルである。Route Request (RREQ), Route Reply (RREP), Route Error (RERR) の 3 種類のパケット、及び動的に更新する経路表を用いて経路制御を行う。また各ノードは、通信毎にシーケンス番号を増加させ、シーケンス番号から経路情報が新しいかどうかを判断する。

例えば、図 3 のように始点ノード A が終点ノード D へ経路探索を行うとき、隣接するすべてのノードに対して RREQ_ID を付けた RREQ パケットをブロードキャストで送信する。RREQ を受信したノード B は、始点ノード A への経路を生成・更新する。

ノードが終点ノード D あるいは終点ノードへの有効な経路を持つ C の場合は、始点ノード A に向けて RREP パケットをユニキャストで送信する。最終的に始点ノード A が RREP を受信すると、終点ノード D への経路が確立される。

RREP を受信する際、複数受信した場合は、終点シーケンスナンバー (DST_seq) の一番大きなものを選択し、DST_seq が同じ場合は、ホップ数の少ないもの

を選択する。

ここで、図 3 の最下部 C-D 間のように、リンク切断を検出したノード C は、RERR パケットをブロードキャストで送信する。RERR を受信したノードは、自身の経路表の中に含まれる終点ノード D への経路エントリがあり、その経路エントリの次ホップが RERR を送信してきた隣接ノード C になっている場合には、その経路を無効化する。そして、RERR を始点ノード A へ向けて転送するというのを繰り返す。RERR を受信した始点ノード A は、終点ノード D までの経路が壊れたと判断し、再び、終点ノード D への経路探索を開始する。

また、LQRP (Link Quality Routing Protocol) は AODV の改良版であり、ノードの生存時間およびノード間リンク品質を考慮した経路構築を行う。そのため、ノードが複数存在するマルチホップ通信の場合には、中継ノード数が多いほど、AODV よりもリンク品質を考慮した LQRP のほうが到着するパケットが多くなると考えられる。しかしながら、本稿で考慮している規模のノード数では、通信プロトコル方式の差により測定結果に影響するほどの差は見られないと考えられる。

3. 歩行検出アルゴリズム

特殊な歩き方をしない限り、人は若干の上下動を伴って歩行する。この上下動を検出すれば、歩数をカウントできる。昔の歩数計では、おもり（金属製ボール）が前後にスライドして振り子が動くことにより、メカニカル・スイッチが入ることで歩行動作を検出していた。しかし、今の歩数計では、加速度センサの値と閾値との比較により、歩行状態を検出し、歩数をカウントしている [18, 19, 20]。本稿でも、後者のアプローチをとる。

まず、3 軸加速度センサベクトルを (x, y, z) とする。このとき、合成加速度 a は

$$a = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

となる。歩行の際の 3 軸加速度合成値の変化例は、図 4 の “Accel” である。これが人間の上下動に当たるので、加速度の値によって上部と下部を区別する閾値を決める必要がある。理論的には、静止状態は重力加速度のみの値となるはずなので、1.0 に設定されるはずだが、実際には加速度センサの経年変化によるバイアスがかかるため、1.0 よりも若干大きい。本稿では、

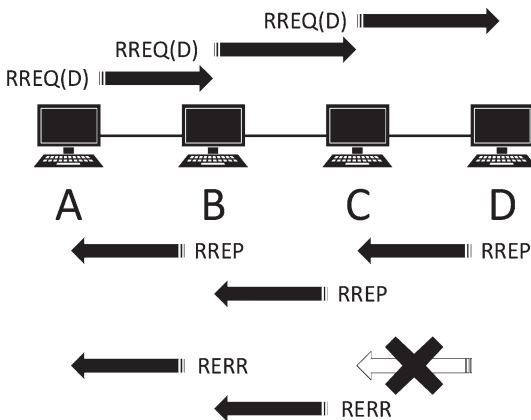


図 3 AODV プロトコル

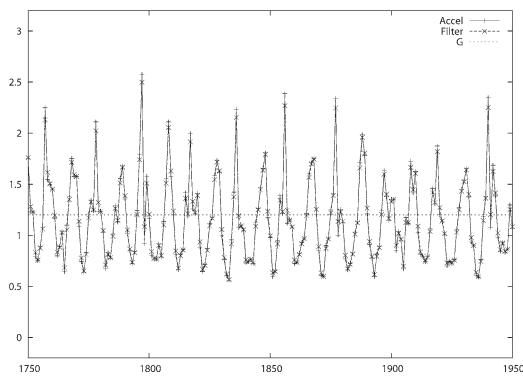


図4 3軸加速度合成値の変化例

具体的な数値として1.2とした。これは、図4の“G”の部分である。つぎに、取得した加速度値にはノイズを含むため、フィルタにより除去する必要がある。本稿では、現在の加速度値 a_{now} と、直前に取得した加速度値 a_{old} を用いて、下記の式のように、加重平均フィルタをかけて加速度値 a を求める。

$$a = a_{now} \times 0.9 + a_{old} \times 0.1$$

これは、図4の“Filter”の部分であり、ローパスフィルタに等しい。さらに、各軸加速度に加重平均フィルタをかけることが出来るが、その場合は、

$$x = x_{now} \times 0.9 + x_{old} \times 0.1$$

$$y = y_{now} \times 0.9 + y_{old} \times 0.1$$

$$z = z_{now} \times 0.9 + z_{old} \times 0.1$$

より、合成加速度を求める。

■歩行検出アルゴリズム

以上で求めた加速度を用いて、歩行検出を行う。加速度値を a 、直前の加速度値を a_{pre} とすると、1.~4.の手続きとなる。

1. $a < G$ を検出
(具体的には $a \leq G - 0.1$)
2. $a > G$ かつ $a > a_{pre}$ を検出
(具体的には $a \geq G + 0.1$ かつ $a - a_{pre} > 0.2$)
3. 前回の検出から一定時間後 (300 msec 以上経過後) に2.が成立する場合、歩行検出とする。1.へ戻る。
4. 1.から一定時間内 (1 sec) に2.が成立しない場合、1.へ戻る。

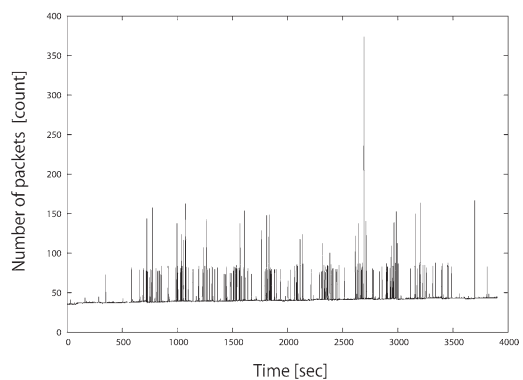


図5 パケット到着時間の例

文献[21]によると、歩行時の歩調は約100~140歩/minであり、1歩には約400~600 msec程度かかる。走行時、歩行の半分の時間を想定すると約200~300 msecである。よって、走行時と区別するための閾値を300 msecとする。さらに、静止状態と区別するための一定時間は、平均的な歩行の倍の時間ということで、閾値を1 secとする。

また、図5の予備実験のように、パケット送信にかかる時間は、平均的に40~80 msec程度、場合によって120 msec以上の時間がかかることもある。よって、100 msec程度のネットワーク遅延が見込まれるため、同じオーダである歩行検出の閾値への影響が考えられる。すなわち、パケット送信にかかる時間を考慮すると、加速度データを送信し、受信側で処理する方法では、歩行検出アルゴリズムが有効に機能しないことが考えられる。そこで本稿では、歩行検出および歩数のカウントをセンサ端末で行った後に、パケット送信を行う方法をとる。

4. 計測実験

4.1 実験環境

実験は、本学8号館組込システム開発研修センターで行った。計測時のSun SPOTの通信にはAODVプロトコルを用いた。RSSI(受信信号強度)の予備計測からデータパケットが確実に届く範囲を考慮し、今回は、部屋の約半分ほどの広さを使って実験を行った。図6の星印で示したところに受信側端末を置き、送信側端末を装着した被験者は、点線に示す1周およそ20 mのコースを、5周歩行するという1セット約100 m歩行を110セット行った。

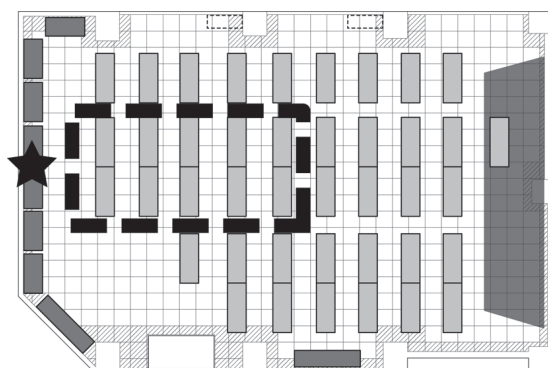


図6 組込システム開発研修センター



図7 実験に用いた機器

実験では、計数器による歩数カウントを基準データとして、市販の歩数計（シチズン TR10），そして本稿で提案する Sun SPOT 歩数計を同時に装着し、歩数計測の正確性を検討した。使用した機器を図7に示す。

4.2 実験結果

実験は、Sun SPOT に搭載する歩数検出アルゴリズム (a), (b), (c) の3パターンを行った。

- (a) フィルタなし
- (b) 合成加速度にフィルタをかけたもの
- (c) 各軸加速度にフィルタの後で合成したもの

実験結果の統計値を表1, 2, 3に示す。期待値(平均)については、市販品が若干大きく、Sun SPOT は若干小さい。また、ばらつき(標準偏差)については、市販品が若干大きく、Sun SPOT は若干小さい。さらに、図8の度数分布について比較するため、各々の平均に

表1: フィルタなしの実験結果

(単位: 歩)	平均	標準偏差
計数器	163.46	2.87
市販品	163.78	3.05
Sun SPOT	162.50	3.04

表2: 合成加速度にフィルタの実験結果

(単位: 歩)	平均	標準偏差
計数器	160.93	3.48
市販品	161.33	4.10
Sun SPOT	159.72	3.25

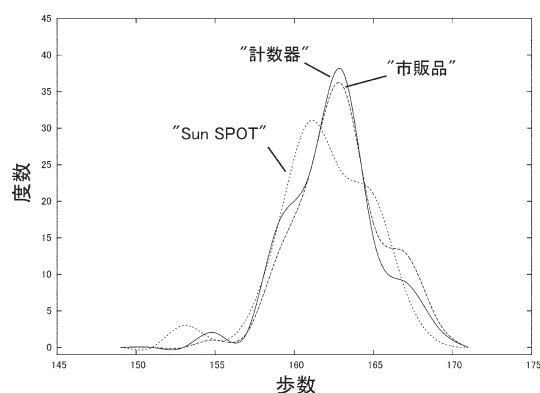
表3: 各軸加速度にフィルタの後で合成の実験結果

(単位: 歩)	平均	標準偏差
計数器	161.31	3.00
市販品	161.46	3.09
Sun SPOT	160.85	3.07

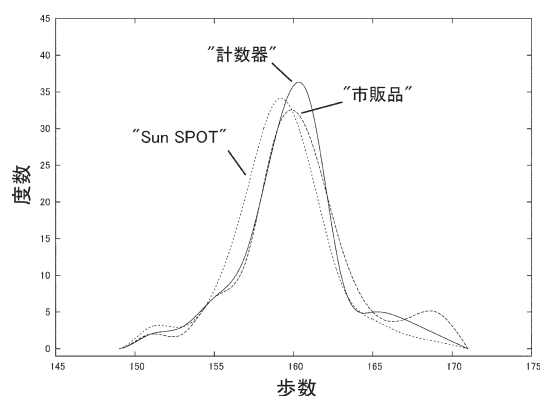
表4: 3パターンの検定結果

	市販品	Sun SPOT
(a)	accept $T=2.77$	reject $T=5.14$
(b)	accept $T=2.34$	reject $T=8.61$
(c)	accept $T=2.08$	accept $T=3.27$

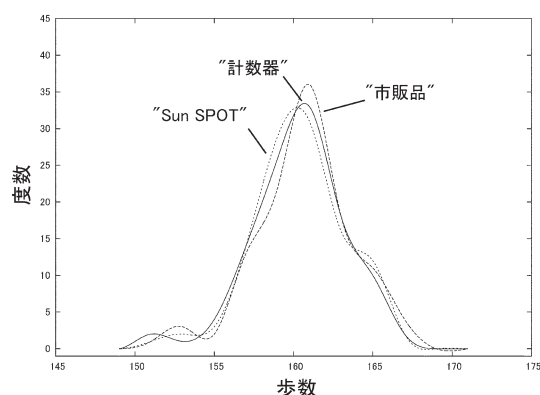
差がないという仮説、および差があるという対立仮説を立て、有意水準 α を 0.1% とした両側検定を実施した。自由度 109 の t 分布は $|t_{109}(0.001)|$ であり、検定統計量の絶対値が下回れば、仮説は棄却されない。表4に検定結果と検定統計量の絶対値 T を示す。表4より、市販品については、(a)～(c) のすべてで差があるとはいえない。また、Sun SPOT については、(a) と (b) が差があるが、(c) は差があるとはいえない。すなわち、(c) 各軸加速度にフィルタの後で合成した歩行検出のアルゴリズムを搭載することで、歩数計と



(a) フィルタなし



(b) 合成加速度にフィルタ

(c) 各軸加速度にフィルタの後で合成
図8: 歩数の度数分布

しての精度を確保することが出来たといえる。

今回、3軸をまとめてから加重平均フィルタをかけるよりも、各軸に加重平均フィルタをかけてから合成すると良いという結果が得られた。そもそもフィルタでは、時間的にランダムなノイズ値を排除して、歩行(加速度)の周期的変化を明確化するために平滑化を行う。よって、周期的変化が現れるかどうかは平滑化の程度に依存する。3軸を合成すること自体が各軸のランダムな影響を低減する効果があるため、合成値にフィルタをかけると平滑化の効果が過剰に出てしまう。そのため、フィルタなし、3軸の合成値にフィルタ、そして各軸にフィルタの後で合成という順で、歩行(加速度)の周期的変化が明確化されたということが考えられる。

5. まとめ

本稿では、Sun SPOTを用いたアドホックネットワークによる歩数計測システムを構築した。また、歩行検出の実験では、3軸合成加速度にフィルタをかけるよりも、各軸にフィルタをかけてから3軸合成を行う方法について、歩行アルゴリズムの精度を検証した。アドホックネットワークは、通常の無線LANよりも占有帯域幅が狭いため、輻輳が起りにくく、多人数同時計測に向いている。そこで、この計測システムは、個人で健康管理に役立てるばかりでなく、検診などの際にも役立てることが出来ると考えられる。

なお、手軽に接続できるというアドホックネットワークの特性上、途中経路上においては悪意ある端末の参加によりデータ改ざん・盗聴の可能性がある[22]。そこで、実際に運用するシステムでは、計測されたデータへ自由にアクセスできないように、適切な暗号化によりデータ保護を行う必要がある。本システムは、予め個人情報に基づいた算出を行っていないため、他のアプリケーションに比べ、保護するデータ量が少なく済む。具体的な方策に関して今後の検討の余地がある。アドホックネットワークを活用することで、市販の歩数計とはほぼ同じ精度を達成しつつ、真にリアルタイムな歩数計測が可能となった。今後の課題は、計測のセット数を増やして信頼度を一層上げることである。そのためには、動的閾値の導入や、アナログフィルタではメディアンフィルタ、デジタルフィルタではFIR,IIRを検討することが必要となるであろう。

謝 辞

最後に、実験データの計測を手伝ってくれた、知能エレクトロニクス学科中山研究室の研修生の現役・OB 諸君に感謝したい。

参 考 文 献

- [1] 健康づくりのための運動基準 2006, 厚生労働省, 2006.
- [2] 健康づくりのための身体活動基準 2013, 厚生労働省, 2013.
- [3] 今後の介護人材養成の在り方について (報告書), 厚生労働省, 2011.
- [4] 「goo からだログ」ダイエット & 健康管理サービス, <http://karada.goo.ne.jp/>, 2008.
- [5] タニタの健康応援ネット「からだカルテ」, <http://www.karadakarute.jp/tanita/index.jsp>, 2009.
- [6] 情報セキュリティ管理基準 (平成 20 年改正版), 経済産業省, 2009.
- [7] 阪田史郎, 嶋本薫, 無線通信技術大全, リックテレコム, 2007 年 2 月.
- [8] 中山英久, 角田裕, 太田耕平, 鈴木明宏, 西山大樹, 永富良一, 橋本和夫, 和泉勇治, キニグレンマンスフィールド, 根元義章, 加藤寧: 屋外無線 LAN を用いた多人数リアルタイム運動計測システムに関する実証実験報告, 電子情報通信学会技術研究報告, CS-109, pp. 1-6, 2009/4.
- [9] H. Tsunoda, H. Nakayama, K. Ohta, A. Suzuki, H. Nishiyama, R. Nagatomi, K. Hashimoto, Y. Waizumi, G. Manseld Keenian and Y. Nemoto: Development of a WLAN Based Monitoring System for Group Activity Measurement in Real-Time, Journal of communications and networks, vol. 13, no. 2, 2011/4.
- [10] 山田健翔, 山口寛人, 森谷遼太, 中山英久: アドホックネットワークを利用した歩数計の検討, H25 若手研究者発表会, 2013 年 3 月.
- [11] 石橋凌, 小松原浩樹, 伊藤博人, 北村貴也, 中山英久: アドホックネットワークを利用した歩数計の改良, H26 若手研究者発表会, 2014 年 3 月.
- [12] Broch, Josh and Maltz, David A. and Johnson, David B. and Hu, Yih-Chun and Jetcheva, Jorjeta: A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols, Proc. of the ACM/IEEE Mobile Computing and Networking (MobiCom '98), pp. 85-97, 1998.
- [13] Yuan Sun, Elizabeth M. Belding-Royer and Charles E. Perkins: Internet Connectivity for AdHoc Mobile Networks, International Journal of Wireless Information Networks, vol. 9, no. 2, pp. 75-88, 2002.
- [14] Ruiz P. M., Ros F.J. and Gomez-Skarmeta A.: Internet connectivity for mobile ad hoc networks: solutions and challenges, IEEE Wireless Communications Magazine, vol. 43, no. 10, pp. 118-125, 2005.
- [15] 大橋正良, 大槻知明: ユビキタスセンサネットワーク, 電子情報通信学会学会誌, vol. 95, no. 9, pp. 772-778, 2012.
- [16] Sun SPOT World, Oracle Labs, <http://www.sunspotworld.com/>, 2014.
- [17] C.E. Perkins and E.M. Royer: Ad-hoc ondemand distance vector routing, Proc. of WM-CSA '99 (Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications), pp. 90-100, 1999.
- [18] Neil Zhao: 3 軸デジタル加速度センサーを使用したフル機能の歩数計の設計, アナログ・デバイスズ, Analog Dialogue 44-6, 2010.
- [19] 3 軸加速度センサーアプリケーションノート歩数計編, 北陸電気工業株式会社, 2007.
- [20] 堀田庸介, 関根正樹, 田村俊世, 桑江豊, 東祐二, 藤元登四郎, 大島秀武, 志賀利一: 高齢者に対応した歩数カウントアルゴリズムの開発, 生体医学, vol. 46, no. 2, pp. 283-288, 2008.
- [21] 佐藤方彦監修: 人間工学基準数値数式便覧, 技報堂出版, 1992.
- [22] B. Kannhavong, H. Nakayama, Y. Nemoto, N. Kato and A. Jamalipour, A Survey of Routing Attacks in Mobile Ad Hoc Networks, IEEE Wireless Communications, vol. 14, no. 5, pp. 85-91, 2007.