

移動型センサネットワークにおける プッシュ型放送とノード間通信を用いたノードの移動制御手法

新城 達也[†] 北島 信哉[†] 小川 剛史[‡] 原 隆浩[†] 西尾 章治郎[†]

[†]大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘1-5

E-mail: {shinjo.tatsuya, kitajima.shinya, hara, nishio}@ist.osaka-u.ac.jp,

[‡]東京大学情報基盤センターキャンパスネットワークング研究部門

〒113-8658 東京都文京区弥生2-11-16

E-mail: ogawa@nc.u-tokyo.ac.jp

移動型センサノードを用いて構成されるセンサネットワークにおいて、ノードの密度が低い場合、センシングデータを基地局に収集するためにノードが基地局の無線通信範囲内まで移動する必要があり、多くの電力を消費してしまう。筆者らはこれまでに、プッシュ型放送を用いて、基地局までマルチホップ通信可能な地点を放送することで、ノードの移動に要する電力を抑えるノードの移動制御手法を提案した。しかし、この手法では、ネットワークを形成する際、同じノードと通信可能なノードが複数存在したとしても、互いに情報交換を行わないため、それらのノードが必要以上に接近し、不要な移動によって、電力を浪費してしまうという問題があった。そこで本稿では、移動中にノード同士が通信できる場合、互いの目的地の位置に関する情報を交換することで、ネットワーク形成時の移動コストを低減するノードの移動制御手法を提案する。また、シミュレーション実験により、提案手法の性能を評価した。

A Node Movement Control Method using Push-based Broadcast and Communication among Nodes in Mobile Sensor Networks

Tatsuya SHINJO[†]

Shinya KITAJIMA[†]

Takefumi OGAWA[‡]

Takahiro HARA[†]

Shojiro NISHIO[†]

[†]Dept. of Multimedia Eng., Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1-5 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: {shinjo.tatsuya, kitajima.shinya, hara, nishio}@ist.osaka-u.ac.jp,

[‡]Campus Networking Division, Information Technology Center, The University of Tokyo
2-11-16 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8658 Japan

E-mail: ogawa@nc.u-tokyo.ac.jp

In mobile sensor networks with a small number of nodes, since nodes' radio communication range does not cover the whole sensing area, every node has to move closer toward the sink for transmitting their sensed data. Thus, the power consumption to deliver the sensed data to the sink becomes large. We have previously proposed a method which controls nodes' movement in order to reduce the power consumption to move to the sink by broadcasting the information on positions to nodes where the nodes can connect to the sink by multi-hop communication. However, in this method, nodes waste much power for movement because the nodes don't communicate with each other to determine their destinations to move, thus, nodes move very close to each other in constructing the network. In this paper, we propose a new method which controls nodes' movement with low power consumption in constructing the network. In this method, nodes which move to the sink negotiate with each other and change their destinations to save power consumption. We also conducted simulation experiments to evaluate the performance of our method.

1 はじめに

近年、無線通信技術および半導体技術の進歩に伴い、無線通信デバイスの小型化、軽量化、高性能化

が進んでいる。これにより、無線通信機能を備えた小型のセンサノードで形成されるセンサネットワークに関する研究が盛んに行われている [1, 4].

センサネットワークでは、センサノード（以下、ノードと呼ぶ）が取得したセンシングデータを、マルチホップ通信により、基地局に転送し収集する。センサネットワークの応用としては、環境モニタリング、動植物の生体調査、建物内のセキュリティ管理などが挙げられる。従来は、ノードの位置が固定された環境を想定したものが一般的であったが、近年のロボティクス技術の発展により、ノード自身が移動して、センシングを行ったりネットワークを形成したりする移動型センサネットワークが注目を集めている [3, 6]。

ノードが固定されている場合、広範囲のセンシングには多数のノードが必要となる。一方、移動型ノードを用いると少数のノードでセンシングできるが、無線通信範囲に他のノードが存在しない状況が考えられる。この場合、センシングデータを基地局に収集するために、多くのノードが基地局の無線通信範囲内まで移動する必要があり、多大な電力を消費してしまう。

筆者らの研究グループではこれまでに、移動型センサノードによって構成される疎なセンサネットワークにおいて、移動に要する電力を抑え、データ収集を効率的に行うノードの移動制御手法を提案した [5]。この手法では、プッシュ型放送配信を用いて、基地局とマルチホップ通信を行っているノードの位置を放送する。ノードは放送を基に最も近いマルチホップ通信可能な地点に移動し、一時的にネットワークを形成してデータ収集を行う。これにより、ノードが基地局の無線通信範囲まで移動する場合と比較して、移動距離が減少し、移動に要する電力を低減することができた。

しかし、文献 [5] の手法では、放送される位置情報のみに基づいてノードの移動制御を行っており、ノードは移動中に他のノードと通信が可能となった場合にも、移動目的地等の情報交換は行わない。そのため、ネットワークを形成する際、ノード同士が必要以上に接近し、電力を浪費するという問題があった。

そこで本稿では、文献 [5] における手法を拡張し、ノードの移動に要する電力をさらに低減するノードの移動制御手法を提案する。提案手法では、ノードが移動中に他のノードと通信可能となった場合に、ノードの目的地の情報を交換し、相手ノードの目的地と通信可能な位置に移動する方が、現在の目的地まで移動するよりも移動距離が短くなる場合、目的地を変更する。これにより、ネットワーク形成時にノード同士が適度な距離を保った状態でマルチホッ

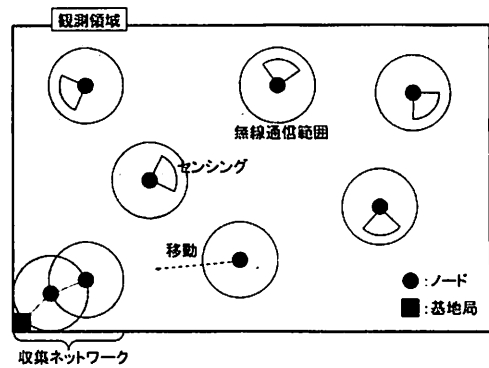


図 1: 想定環境

プ通信できるようになり、ノードの移動に要する電力をさらに低減できる。

以降、2章で想定環境について説明し、3章において提案手法の詳細を述べる。4章でシミュレーションによる提案手法の評価結果を示す。最後に5章で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2 想定環境

本研究では、図 1 に示すように、観測領域に 1 つの基地局と複数のセンサノードが存在する環境を想定する。領域中のセンサノード密度は小さく、各ノードは基本的に隣り合うノードとは通信できない。基地局にはプッシュ型放送のための放送通信機能が備わっており、放送範囲は観測領域全体をカバーしているものとする。また、ノードはすべて移動型ノードとし、各ノードにおいて、基地局の位置と担当するセンシング位置、全ノード数は既知で、自身の現在位置をリアルタイムに取得できるものとする。

ノードは担当するセンシング地点に配置され、センシングを行う。センシングを終えたノードは、基地局と通信可能となる位置まで観測領域内を移動し、基地局までデータを転送する。基地局は全ノードに対し、基地局とマルチホップ通信をしているノードの位置を放送している。各ノードはデータ転送の際、放送内容に基づいて、マルチホップ通信が可能となる最も近い位置に移動し、データ転送のためのネットワークを形成する。以降、このネットワークを収集ネットワークと呼ぶ。すべてのノードが収集ネットワークに参加した後、データ転送およびデータ中継を終えたノードから、センシング地点へと移動して戻る。

簡単のため、ノードの追加や削除はなく、観測領域内に存在するノード数は一定とする。

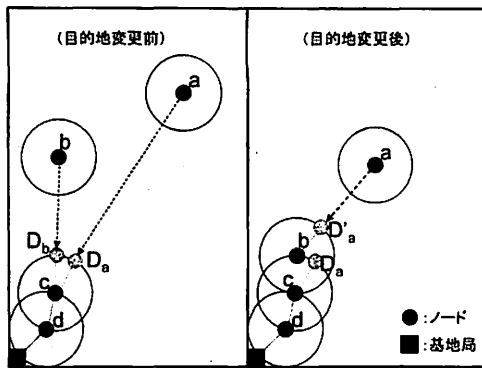


図 2: SR 方式

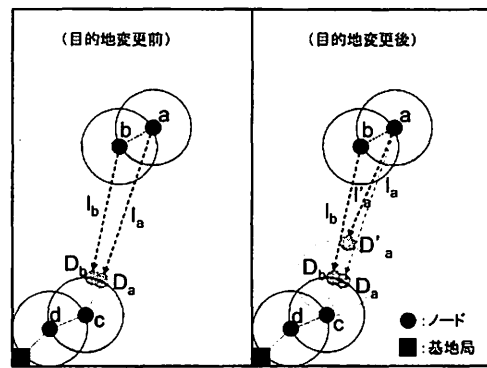


図 3: 単独ノード同士が出会った例

3 提案手法

本章では、本稿で提案するノードの移動制御手法について述べる。提案手法は、文献 [5] で提案した手法に、3.2 節で述べる拡張を加えたものである。

3.1 SR(Shortest Route) 方式

本節では、文献 [5] で提案した SR 方式の概要について説明する。

SR 方式では、収集ネットワークを効率よく形成するために、収集ネットワークに参加しているノードの位置を放送し、ノードはその情報に基づいて移動する。図 2(左)のように、センシングを終えたノード a, b は、放送される収集ネットワークに参加しているノードのうち、最も近いノード c と通信可能な位置 D_a, D_b を目的地として移動する。図中では、点線矢印は移動経路を表している。また、 D_x はノード x の目的地を表す。

移動中、新たに収集ネットワークにノードが追加されると、放送されるデータが更新される。図 2(右)のように、ノード b が新たに収集ネットワークに参加すると、ノード a はノード b が最も近いノードとなり、目的地を D_a から D'_a に変更する。このように、ノードはより移動距離が短くなるように目的地を変更しながら移動することで、消費電力を低減する。すべてのノードが収集ネットワークに参加した後、データの転送および中継が終了したノードからセンシング地点へと移動する。

3.2 SR-N(Shortest Route with Negotiation) 方式

本節では、本稿で提案するノードの移動制御手法 SR-N 方式について説明する。

SR-N 方式は SR 方式を拡張したもので、ノードが目的地に向かって移動している間に他のノードと通信可能となったとき、目的地情報を交換し、連

携して収集ネットワークに参加する。これにより収集ネットワークへ参加する際の移動距離を低減し、ノードの移動に要する電力の低減と、そのノードの後方から近づいてくる他のノードの移動コスト削減が期待できる。

以下、SR-N 方式におけるノード動作を、単独ノード同士が出会った場合と、既に他のノードと連携しているノード群と単独ノードが出会った場合、ノード群同士が出会った場合について説明する。

3.2.1 単独ノード同士が出会った場合

図 3 に、単独ノード同士が出会った場合のノードの動作例を示す。 l_x はノード x の目的地までの距離を表している。ノード a, b が収集ネットワーク内のノード c に接続するために移動している途中で、互いの通信範囲内まで接近した状況を示している。各ノードは、以下に示す手順で目的地を決定する。

1. 通信可能となったノード a, b は、現在の目的地である D_a, D_b の座標を互いに交換する。
2. 各ノードの現在位置と目的地までの移動距離 l_a, l_b を計算し、移動距離の短いノードを長いノードの接続先候補とする。図 3 では、 $l_a > l_b$ のため、ノード b がノード a の接続先候補となる。
3. ノード a は、ノード b に接続できる位置 D'_a まで移動した場合の移動距離 l'_a を求め、 $l'_a < l_a$ ならば接続先をノード c からノード b に変更する。
4. 手順 3 でノード a が接続先をノード b に変更した場合には、ノード a はノード b に自身の接続先をノード b としたことと、その接続位置 D'_a を伝える。
5. 以後、ノード b は目的地を変更するとノード a に新たな目的地を伝える。ノード a は受け取った情報を基に自身の目的地を修正し、放送による目的地の変更は行わない。

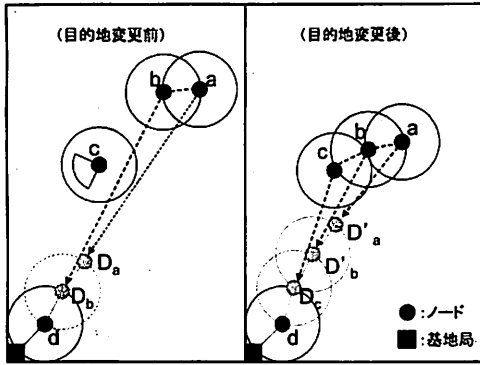


図 4: ノード群と単独ノードが出会った例

なお、同時に 3 台以上の単独ノードが通信可能となった場合には、目的地までの移動距離が短い順に目的地の変更が有効であるかを判断する。

以後、接続されるノードを親ノード、接続するノードを子ノードと呼ぶ。図 3 では、ノード a, b がそれぞれ子ノード、親ノードとなる。

3.2.2 ノード群と単独ノードが出会った場合

図 4 にノード群 (a, b) とノード c が出会った場合の動作例を示す。ノード群内では、参加しているノードとその目的地に関する情報は共有しているものとする。図 4 は、ノード b とノード c が通信可能となった状況である。提案手法では新たに通信範囲に入ったノード同士が目的地を変更するかどうかを決定する。手順は以下の通りである。

1. ノード b, c 間で、目的地の位置情報を交換する。このとき、ノード b は自身のノード群に所属するすべてのノード (a, b) の目的地をノード c に伝える。
2. ノード b とノード c の現在の目的地までの移動距離を比較し、移動距離の長い方が目的地を変更すべきか決定する。図 4 ではノード b が接続先をノード c に変更した場合の移動距離を計算し、現在の目的地までの距離と比較した結果、ノード c に接続する位置を新たな目的地 (D'_b) に変更している。
3. ノード b はノード c に子ノードとなったことと、目的地 D'_b を伝える。
4. ノード b は子ノードであるノード a に新しい目的地 D'_b を伝え、ノード a は目的地を D'_a に修正する。

子ノードであるノード a とノード c が通信可能となった場合にも同様に目的地の変更を検討する。このとき、ノード a が親ノードをノード b からノード c に変更した場合には、ノード a はその旨をノード

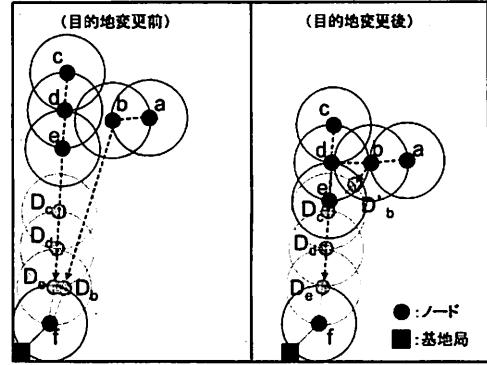


図 5: ノード群同士が出会った例

ード b に伝える。親ノードは、子ノードの新しい目的地と通信できる位置に移動した方が移動距離が短くなるのであれば、目的地を変更し親子関係が逆転する。そうでない場合は、目的地を変更せず、親子関係を解消する。

3.2.3 ノード群同士が出会った場合

図 5 にノード群 (a, b) とノード群 (c, d, e) が出会った場合の動作例を示す。図 5 は、ノード b とノード d が通信可能となった状況である。この場合も、3.2.2 節と同様に、新たに通信範囲に入ったノード b とノード d が目的地を変更するかどうかを決定する。

1. ノード b, d 間で目的地情報を交換し、移動距離の長い方が目的地を変更すべきか検討する。図 5 では、ノード b がノード d から、ノード d が属するノード群内のすべてのノード c, d, e の目的地の情報を受信し、最も移動距離が短くなるノード c の目的地 D_c と通信できる位置 D'_b を新たな目的地としている。移動距離が短くなる位置がない場合、目的地の変更は行わない。なお、通信可能となったノードの先頭ノードと自身の先頭ノードが同じノードである場合は、目的地の変更を行わない。先頭ノードとは、ノード群の中で親ノードをもたないノードのことで、図 5 ではノード b, e が先頭ノードである。
2. 目的地を変更したノード b は、ノード c を親ノードとしているが、たとえば図 5 のような場合にはノード c とはまだ直接通信できない。そのため、ノード c が目的地を変更した場合、その変更に関する情報をノード c が属する群の他のノードから受信し、目的地を修正する。
3. ノード b が目的地に到着してもノード c もしくはノード c の属するノード群と通信できない場合があるが、そのときは、放送内容に基づき目

的地を修正する。

4 性能評価

シミュレーション実験により、提案手法の性能評価を行った。実験では、SR方式と性能を比較した。以下では、その結果および考察について述べる。

4.1 シミュレーション環境

シミュレーションで用いたパラメータを表1に示す。観測領域は2次元平面とし、基地局を領域の一角に配置した。各ノードのセンシング地点はランダムに割り当て、変更しないこととした。センシング地点をノードの初期位置とし、ノードはシミュレーション開始と同時にセンシングを開始する。各ノードは1回のセンシングに1,000秒を要し、この間に5Mbitのデータを収集した後、データ転送を開始する。ノードの移動コストを1J/mとし、データの送信、および受信コストを、それぞれ以下に示す式(1)および式(2)によりモデル化した。

$$(k \cdot 50) + (0.1 \cdot k \cdot d^2) \text{ [nJ]} \quad (1)$$

$$k \cdot 50 \text{ [nJ]} \quad (2)$$

k [bit]は送受信データ量、 d [m]は送信距離を表す。1回のセンシングデータを50m離れたノードに送信する場合、送信コストは1.5Jとなる。なお、移動コストは文献[2]、送信コストおよび受信コストは文献[7]に示されるモデルを適用し、移動、およびセンシングデータの送受信以外の動作に要するコストは非常に小さいものとして無視した。また、ノードは、データの送信と受信を同時に行えるものとし、電波衝突による遅延や、通信エラーはないものとする。

なお、 S [Mbps]の速度でデータ送信を行っているノードに対して、 m 個のノード $n_i (1 \leq i \leq m)$ が同時にデータ転送を行う場合、ノード n_i の通信速度は S/m [Mbps]に制限されるものとした。

実験では、ノードのセンシング地点を変更し、同様のシミュレーションを10回行った。

以上の環境において、次の5つの評価項目を用いて性能を評価した。

・平均コスト

ノード1台あたりの、移動コスト、送信コスト、および受信コストの平均の総和。

・スループット

基地局が取得した単位時間あたりのデータ量。

表 1: パラメータ

| パラメータ | 値 |
|------------|---------------------|
| 領域の大きさ | 2,000[m] × 2,000[m] |
| ノード数 | 400 |
| ノードの移動速度 | 1 [m/s] |
| 無線通信範囲 | 50 [m] |
| 通信速度 | 2 [Mbps] |
| 移動コスト | 1 [J/m] |
| シミュレーション時間 | 30,000[秒] |

・平均所要時間

シミュレーション中におけるノード1台あたりのセンシング時間、移動時間、通信時間、および待機時間の平均。通信時間はデータを転送した時間である。待機時間は収集ネットワークに接続しているがデータ転送を行っていない時間を表し、提案手法では、ある一定の場所に停止し、接続しているノードが収集ネットワークに参加するのを待っている時間も含む。

・平均通信距離

収集ネットワーク形成時の、各ノードにおけるデータ転送先までの通信距離(m)の平均。

・平均ホップ数

収集ネットワーク形成時の、各ノードにおける基地局までのホップ数の平均。

4.2 評価結果

平均コスト、平均所要時間、および、スループット、平均通信距離、平均ホップ数をそれぞれ、表2, 3, 4に示す。

これらの表から、SR-N方式では、SR方式と比較して、移動時間、待機時間、移動コスト、平均ホップ数が減少し、センシング時間、スループットが増加しているが、通信時間、送信コストが増加していることがわかる。

SR-N方式では、ノード同士が目的地情報を交換し、移動距離が短くなるように目的地を変更することで、収集ネットワークに参加するための移動距離が減少すると同時に、ノード同士が近づき過ぎないように移動する。そのため、移動時間、移動コストが減少するとともに、平均通信距離が増加している。移動時間が減少することにより、センシング時間が増加し、結果としてスループットが向上している。また、平均通信距離の増加により、ノードがより基地局と離れた地点で収集ネットワークに参加できているといえる。これにより、ノードが収集

表 2: 平均コスト

| | SR 方式 | SR-N 方式 |
|-----------|--------|---------|
| 移動コスト [J] | 9,773 | 8,445 |
| 送信コスト [J] | 649 | 715 |
| 受信コスト [J] | 132 | 134 |
| 総コスト [J] | 10,554 | 9,294 |

表 3: 平均所要時間

| | SR 方式 | SR-N 方式 |
|-------------|--------|---------|
| センシング時間 [秒] | 13,662 | 14,567 |
| 移動時間 [秒] | 9,773 | 8,445 |
| 通信時間 [秒] | 3,506 | 4,126 |
| 待機時間 [秒] | 3,059 | 2,862 |
| 合計時間 [秒] | 30,000 | 30,000 |

表 4: 評価結果

| | SR 方式 | SR-N 方式 |
|---------------|-------|---------|
| スループット [Mbps] | 8.73 | 9.35 |
| 平均通信距離 [m] | 40.4 | 44.1 |
| 平均ホップ数 | 41.7 | 39.4 |

ネットワークに参加するのに要する時間が短縮し、収集ネットワーク上のノードの待機時間が減少している。

一方、SR-N 方式は、SR 方式よりも、通信時間、送信コストが増加している。通信距離の増加による送信コストの増加は約 2%だが、スループットも約 7%増加している。このことから、送信コストの増加はスループットの向上による影響が大きく、通信距離の増加による影響は小さいといえる。しかし、送信コストは増加しているが、受信コストはほぼ変化していない。これは、平均ホップ数が減少していることから、1 度の収集ネットワーク形成時のノード 1 台あたりのデータ受信量が減少することが原因と考えられる。しかし、SR-N 方式により平均ホップ数が減少する詳しい原因は、これらの結果のみでは判断できないため、今後詳細な調査が必要である。

5 まとめ

本稿では、移動型センサノードによって構成される疎なセンサネットワークにおいて、ノード同士が通信できる場合、互いの目的地情報を交換することで、ネットワーク形成時の移動コストを低減す

るノードの移動制御手法を提案した。また、シミュレーション評価により、提案手法を用いることで、従来手法である SR 方式と比べ、ノードの移動コストが減少し、スループットが向上することを確認した。

今後は、提案手法を改良し、ノードの移動コストをさらに削減するとともに、各ノードが複数の地点でセンシングを行うモデルにおいて効果的な手法を検討する予定である。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究 (A)(17200006)、特定領域研究 (18049050) および若手研究 (B)(19700092) の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] D. Estrin, L. Girod, G. Pottie, and M. Srivastava, "Instrumenting the world with wireless sensor networks," in *Proc. International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2001)*, pp. 2033–2036 (2001).
- [2] D. K. Goldenberg, J. Lin, A. S. Morse, B. E. Rosen, and Y. R. Yang, "Towards mobility as a network control primitive," in *Proc. ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2004)*, pp. 163–174 (2004).
- [3] G. T. Sibley, M. H. Rahimi, and G. S. Sukhatme, "Robomote: A tiny mobile robot platform for large-scale ad-hoc sensor networks," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2002)*, pp. 1143–1148 (2002).
- [4] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks (Elsevier) Journal*, Vol. 38, No. 4, pp. 393–422 (2002).
- [5] 新城達也, 永石博憲, 小川剛史, 原 隆浩, 西尾章治郎, "移動型センサネットワークにおけるプッシュ型放送を用いたノードの移動制御手法," *マルチメディア通信と分散処理 2007-DPS-130*, Vol. 2007, No. 16, pp. 159–164 (2007).
- [6] T. A. Dahlberg, A. Nasipuri, and C. Taylor, "Exploredots: A mobile network experimentation testbed," in *Proc. ACM SIGCOMM Workshop on Experimental Approaches to Wireless Network Design and Analysis (E-WIND 2005)*, pp. 76–81 (2005).
- [7] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proc. Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2000)*, pp. 1–10 (2000).