

平成21年 6月 8日現在

研究種目： 基盤研究（C）  
 研究期間： 2007～2008  
 課題番号： 19500170  
 研究課題名（和文） 被災地情報収集センサネットワークノードの開発  
 研究課題名（英文） Development of Sensor Network Node  
 for Gathering Disaster Area Information  
 研究代表者  
 鈴木 剛（SUZUKI TSUYOSHI）  
 東京電機大学・工学部・准教授  
 研究者番号： 00349789

## 研究成果の概要：

震災などの災害後に、被災地の情報を収集する無線センサネットワーク（多数の小型無線センサ端末で構成されるネットワーク）において、進入が困難な現場へのセンサ端末の投射配置を目的として、エアクッションを用いた緩衝機構を持つセンサ端末を開発した。端末の重量、衝撃加速度、内部空気圧等に基づく設計手法を提案し、試作および耐衝撃性能を評価した。また、センサ端末をロボットにより配置する投射配置機構の検討を行った。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野： 情報学

科研費の分科・細目： 実世界情報処理

キーワード： センサネットワーク，センサノード，被災地情報収集支援

## 1. 研究開始当初の背景

我が国は地震大国であり、防災に対する国民の関心が極めて高く、近年では、発生予測困難な災害への対策として、防災に加え、被災後の被害を軽減する減災が注目されている。減災のためには被災後の被害状況を可能な限り迅速かつ正確に把握する必要がある。これに対し、地震などによる被災者の救助支援を目的とした被災地周辺情報を取得する小型無線センサ端末（センサノード）の開発や、レスキューロボットと WSN（Wireless Sensor Network：多数のセンサノードで構成されるネットワーク）などを連携させた被災

地情報収集技術を使用して救助活動の一環を担う技術に関する研究が行われている。特にセンサノードについては、事前に天井や街灯などに設置、もしくは被災後に人間が設置することを想定した研究が多いが、事前設置型のセンサノードは被災後の正確な位置姿勢が不明となる。また、センサノードを人手で設置する場合は、二次災害などによる人的被害が危惧される。

そこで、本研究では、広域に渡る被災地での探索活動の一環として、複数の移動体（レスキューロボットなど）がセンサノードを移動経路上に直接あるいは進入困難な場所へ

投射して配置し、被災地に自律かつ適応的に WSN を展開してセンシングとネットワークの機能を維持しながら情報を収集するシステムの構築を目標としている(図 1)。

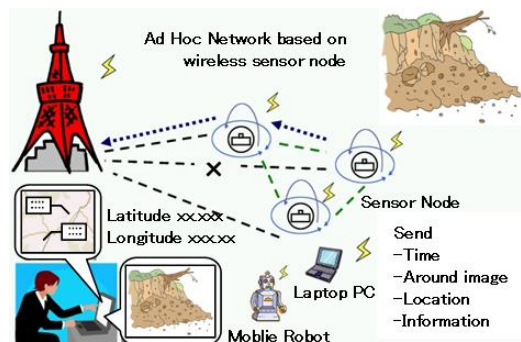


図 1 レスキューロボットと WSN による被災地情報収集

しかし、被災地で WSN を展開する場合、被災地環境の変動や投射配置に耐えうる耐衝撃性などを備え、被災状況の把握に必要なデータをセンシング可能なセンサノードが存在しないことが分かった。そのため、まず、被災地でセンサネットワークを構築可能なセンサノードの開発試作を行う必要があると考えた。また、それに付随して、ロボットにより被災地にセンサネットワークを展開する手法についての検討も必要と考えた。

## 2. 研究の目的

被災地における情報収集は、被災状況を把握すると共に、レスキュー活動従事者の二次災害リスクの軽減化や、復旧・復興計画の立案等減災のための有用な知見の獲得に非常に重要である。しかしながら、過密都市部で発生する災害では、都市構造の複雑さから情報収集活動そのものが難しい場合が多い。特に、人工衛星や UAV などの飛行体等を用いた巨視的な方法は気象条件の影響を受けやすく、また、都市部のような遮蔽物体の多い環境での情報収集には限度があり、被災の状況・範囲の特定、ひいてはレスキュー活動の初期体制の確定が難しい。このため、外部から直接的に状況を把握することが難しい瓦礫内部や地下空間等の隔絶された空間内の状況を、被災現場において把握することは減災活動に重要である。本課題では、このような隔絶空間内へセンサノードを投射配置することで被災状況の把握を可能とする手法を提案する。これにより、中長距離の離れた隔絶空間の情報取得可能となり、被災地において実利性が高くなる。

そのためには、投射配置時の衝撃に耐えうる耐衝撃性能が必要不可欠となる。従来の投射配置を想定したセンサノードは周囲を硬性材で覆い保護しているが、被災地でセンサ

ノードを投射配置することを考えれば、配置時にセンサノード自身に加わる衝撃の他、配置地点に倒壊や崩落、被災者への衝突等の可能性があり、配置環境への衝撃緩和性についても配慮する必要がある。そこで、本課題では次の目的を達成する。

(1) 被災地情報を収集するセンサノードの開発、および、センサノードと配置環境の耐衝撃性能について考慮した耐衝撃機構を提案・試作し耐衝撃性能、及び衝撃緩和性能の評価を行う。また、耐衝撃機構を用いた際の無線通信品質についての評価を行う。

(2) ロボットにより被災地に網羅的に WSN を展開し情報収集を行うために、障害物等によりロボットが進出できない場所へセンサノードを投射配置する機構の検討を行う。

## 3. 研究の方法

(1) 被災地での利用を考えた場合、センサノードの極端な小型化は必ずしも必要ではなく、むしろ、被災者やレスキュー隊員等に情報端末としての存在が分かる程度の大きさが必要である。また、自律移動体に複数個携帯可能で、通信容量、処理能力、電源容量等に優れたものが必要となる。そこで、本課題ではセンサノードの小型化については考慮せず、ロボット等で搭載可能な大きさとする。処理機能を優先し、センサノードのコントローラとして処理能力の大きい PC を用い、周囲にセンサを配置する形で試作を行う。情報収集の主となるセンサはカメラであるが、全周の映像情報を取得することを考え、全方位カメラを 2 台搭載する。多くの全方位カメラはミラーを利用している構造上、レンズ中心部とミラー背面が死角となるが、本センサノードは死角をなくすため、視野角 180 度以上の魚眼レンズを搭載したカメラを用いる。

さらに、耐衝撃性能に関しては、センサノードと配置環境の双方への衝撃緩和を可能とする耐衝撃機構の設計手法について提案する。その設計手法を用いて耐衝撃機構のプロトタイプを作成し耐衝撃性能、及び衝撃緩和性能の評価を行う。また、AODV 等のルーティングプロトコルを実装してアドホックネットワーク機能を搭載し、1 台のセンサノードとノート PC によるネットワーク構築および耐衝撃機構を用いた際の無線通信品質についての評価を行う。

(2) ロボットが進出できない隔絶空間にセンサノードを投射して配置するために、センサノードを投射可能な機構を開発する。従来の研究では、投射型のカメラや障害物を跳躍して乗り越えるロボットなどが開発されているが、いずれも有線接続の上、センサネッ

トワーク機能を有していない。本課題では、(1)で開発したセンサノードの投射に必要な推力を求め、その推力を発生可能な機構と動力について試作・検討する。

#### 4. 研究成果

(1) 全周囲の画像が取得可能なセンサノードの試作を行った(図 2)。センサノードの投射配置では傾きによるカメラの死角を考慮する必要があるため、視野角 190[deg]の魚眼レンズを装着したカメラ 2 台をセンサノード両端部にそれぞれ搭載し全周囲画像の収集を行うこととした。試作したセンサノードのデバイス構成を表 1 に示す。コントローラには、各種ネットワーク構築やセンサデバイス制御のために、Linux 環境を搭載可能なアットマークテクノ社の Armadillo-300 を用いた。通信には無線 LAN を用い、通信規格として障害物に比較的強い特性を有する IEEE802.11b を採用した。駆動時間は 3[hour]、総重量は 1.5 [kg] であり、半径は 17[cm] である。図 3 にセンサノードの外観を示す。

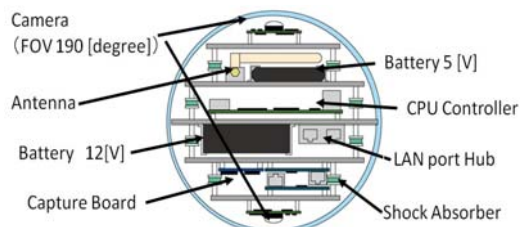


図 2 センサノードの構成

表 1 センサノードのデバイス構成

Linux	Armadillo-300 (ARM:266
Controller	[MHz], Memory: 64 [MB])
Wireless LAN	IEEE802.11b (2.4 [GHz])
A/D Converter	10 [bit] * 4 ch
GP I/O	8ch
Camera Module	Fish Eye Lenz 190 [degree] FOV
Battery	DC 5 [V], DC 12 [V]

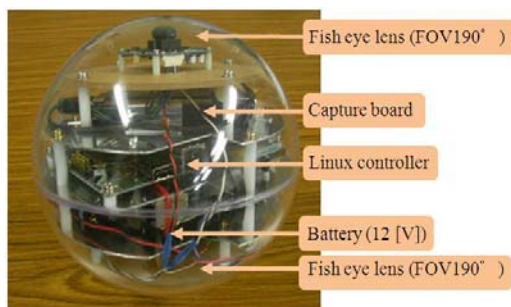


図 3 センサノードの外観

また、センサノードの耐衝撃機構については、センサノードと配置環境双方の緩衝を考慮し、塩化ビニルなどの柔軟素材を用いたエアクッション構造とした。しかし、柔軟素材を用いた耐衝撃構造の設計論は確立されていないため、本課題において新たに設計論の提案を行った。

エアクッションは、衝撃を内部空気圧の作用により面で押し返すことで緩和する。本研究の想定環境では、配置環境側が静止していることを前提としているため、エアクッションが受ける衝撃は、センサノードが配置環境へ加える衝撃と等しい。ここでは、センサノードの落下衝撃時に鉛直下方向に発生する力を衝撃荷重([N])と呼び、約 98[kPa]の圧力を発生させる空気圧特性に着目し、その衝撃荷重に耐えうるエアクッションの厚さを決定する手法を提案した。

本手法では、落下時の衝撃荷重が最大になる際のエアクッションの受圧面積  $S$  [cm<sup>2</sup>]を、保護する SN の半径  $D$  [cm]、及びエアクッションの内部空気圧  $P$  [kPa]、落下時に予測される最大衝撃荷重  $W$  [N]を用いて決定する。そして、受圧面積の値を基にエアクッションの厚さを求めた。図 4 に示した各パラメータを用い、エアクッション厚さを  $T$  [cm]として次式のようにモデル化した。

$$T = \sqrt{\frac{W}{(P/98) \times \pi} + (D+d)^2} - D$$

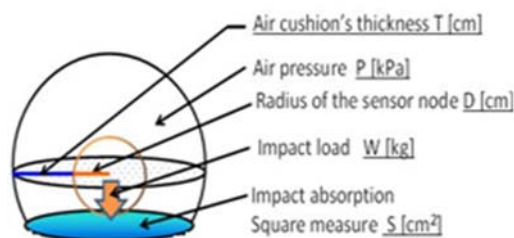


図 4 耐衝撃構造モデルのパラメータ

この設計モデルを用い、試作したセンサノードを最大 10[m]投射することを想定して耐衝撃センサノードの設計・試作を行った。センサノード投射時に発生する衝撃荷重は、センサノードの内部構造密度が均一でないため落下試験により求めた。その結果、衝撃荷重が約 684 [N]と求められ、これよりエアクッションの厚さをモデル式より 6.0 [cm]と決定し、試作を行った(図 5)。試作では、エアクッション内に空気を入れた際に楕円形状になることを防ぐために、地球儀等の設計に用いられる舟形多円錐図法により設計した。エアクッションを構成する塩化ビニルの溶着では、裁断した端部を重ね合わせるラップ溶着を行い溶着部分の強化を行った。また、



センサノードを機構の中心に格納するため、中心に保持スペースを設けた半球を合わせて球形を構成した。図5に試作した耐衝撃センサノードの構成と外観を示す。

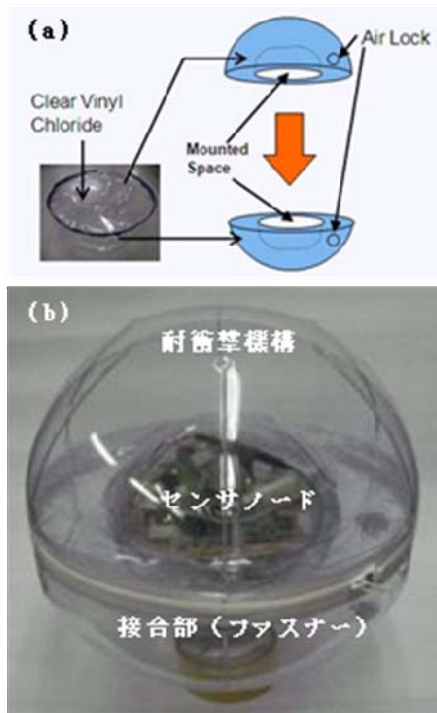


図5 試作した耐衝撃センサノードの (a)構造と (b)外観

耐衝撃センサノードの機能を検証するために、落下時のエアクッションの収縮を高速カメラを用いて計測した(図6)。また、配置環境への衝撃緩和性能を評価するため、エアクッションの衝撃吸収面積を、落下時に収縮した厚さより算出した(図7)。図6より、収縮厚さは最大5[m]の落下距離(10[m]投射時の衝撃に相当)で設計値である6.0[cm]を超えることはなく、落下地点とセンサノードとの間に直接接触が無いことを確認した。落下によるセンサノードの破壊や故障、変形等も見られず、耐衝撃性能を確認できた。また、配置環境側への衝撃緩和性では、図7の計測結果より衝撃を面で吸収しており、硬性材を用いた耐衝撃機構を持つセンサノードと比較し、本センサノードでは、約99.4[%]の衝撃荷重低減が可能であることを確認した。これより、提案した設計モデルが柔軟素材を利用したエアクッション構造を持つ耐衝撃機構の設計に有効であることを確認した。

次に、本耐衝撃機構は、SNに搭載する際に通信アンテナを覆う形状になるため、SN間の通信品質への影響について評価実験を行った。実験は、SN間通信時の電界強度、スループット、パケットジッタを耐衝撃機構の有無により比較した。その結果、電界強度、スループット、パケットジッタのいずれも影響が

見られず、本耐衝撃機構が通信品質に影響しないことを確認した(図8, 9)。

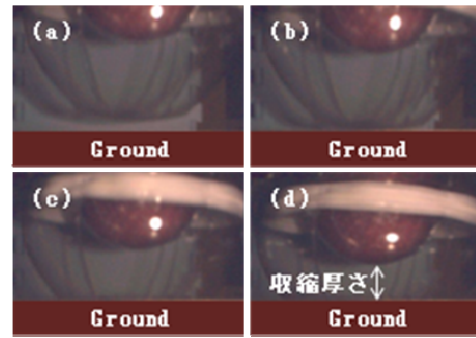


図6 高速カメラを用いた耐衝撃機構の落下状態の観測例

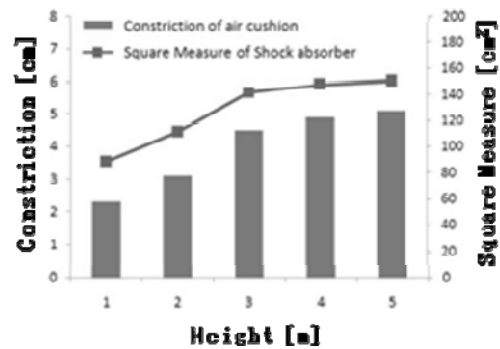


図7 落下試験による収縮と緩衝面積

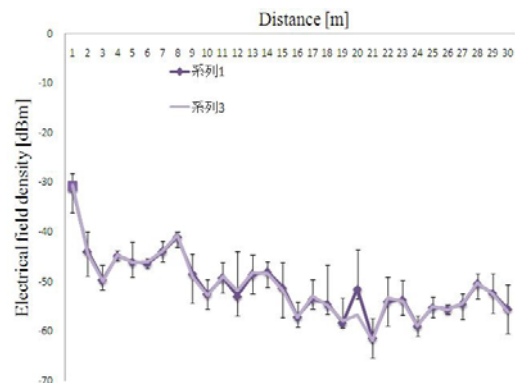


図8 電界強度の測定

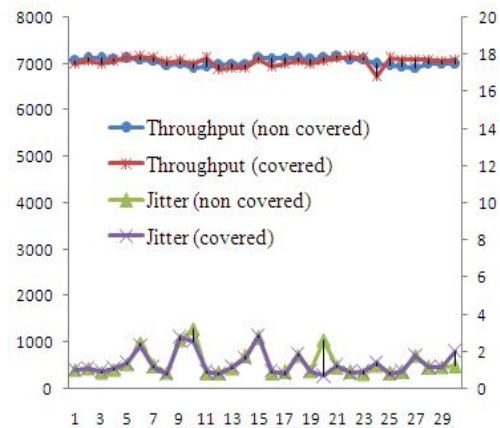


図9 スループット、パケットジッタの測定

(2) 移動ロボットから(1)で試作した耐衝撃センサノードを投射配置するため、センサノードを約 10[m] 投射可能な機構について検討した。耐衝撃センサノードを投射するために必要な初速度および投射角は 2 次元平面の放物線運動に空気抵抗を考慮した運動方程式から求められ、投射に必要な初速度は 9.89m/s, 投射角は約 45° とモデル化した。また、センサノードを 10m 投射するために必要な推進力は、次式で求められる。

$$F = mg(\sin \theta + \mu \cos \theta)$$

ただし、推進力  $F$  [N], 投射物質量  $m$  [kg], 重力加速度  $g$  [m/s<sup>2</sup>], 投射角  $\theta$  [rad], 摩擦抵抗係数  $\mu$  である。

これに基づき、センサノードに推進力を付与可能な投射能力を持つ機構として、投石器型、スリングショット型、カタパルト型などを試作し検討した (図 10)。



図 10 センサノード投射機構の検討

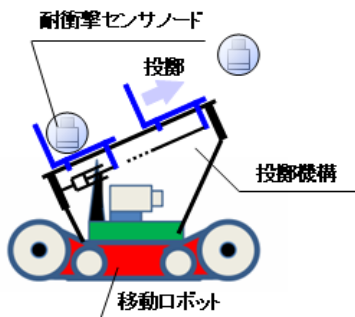


図 11 カタパルト型投射機構の概要

試作検討の結果、ロボットへの実装を考慮し、省スペース、高出力が望ましいことから、カタパルト方式を採用した。投射機構の移動ロボットへの実装イメージを図 11 に示す。また、センサノードに推進力を与えるための駆動力源は高出力、小型化、安全性などを考慮し空気圧を用い、メカニカル機構としてはエアシリンダを採用した。投射機構を駆動する空気圧は、次式により求めた。

$$P = F / \left( \frac{\pi}{4} \times D^2 \right)$$

ただし、必要圧力  $P$  [MPa], 理論出力(推進力)  $F$  [N], シリンダチューブ内径  $D$  [mm] である。

モデルから計算した推進力  $F = 149.59\text{N}$ , および、投射機構のシリンダチューブ内径  $D$  を 30mm とした場合、必要圧力は 0.212MPa となる。また、エアシリンダを所要の速度で動作させるために、次式により空気流量を求めた。

$$Q = 60 \frac{\pi}{4} D^2 \frac{L}{t} \times \frac{P + 0.1013}{0.1013} \times 10^{-6}$$

ただし、流量  $Q$  [l/m], シリンダチューブ内径  $D$  [mm], ストローク  $L$  [mm], 動作時間  $t$  [s], 必要圧力  $P$  [MPa] とする。

ストローク  $L$  は移動ロボットの全長を考慮し 500mm, 動作時間  $t$  は 10m/s まで加速させるための 0.1 秒とし、その他のパラメータは既に求めたものを用いた。これより流量  $Q$  は 655.85l/min となった。

以上の投射機構の設計に基づき、カタパルト型踏査機構の動力部を試作した。試作機では、設計に基づくストロークを保持するため、全長 1255mm となった。また、小型化を考慮するため外部に空気圧容器を設けず、シリンダと空気圧容器を一体型で設計した (図 12)。機能検証試験において、センサノード重量に相当する 1.5[Kg] の樹脂を 0.5[MPa] の圧力で投射したところ、3[m] の飛距離を確認した。試作機では、シリンダと一体で構成される空気圧容器の密閉に問題があり、圧力を推進力に十分変換できていないためであった。そのため、これらの改良は今後の課題とした。

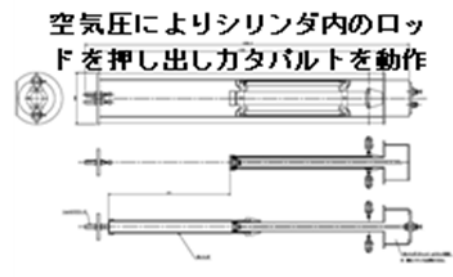


図 12 投射機構の動力部の試作

以上、被災地情報収集のためのセンサノードと柔軟素材を用いた耐衝撃機構の設計試作を行った。本課題では、柔軟な耐衝撃機構の設計モデルを新たに提案し、試作により耐衝撃性能を確認した。また、通信評価により、耐衝撃機構がセンサノードの通信に影響し

ないことを確認した。従来のような硬性材を用いて内部を保護するセンサノードと比較し、エアクッション構造による耐衝撃機構は、センサノード保護と落下地点への衝撃緩和を達成でき、また、安価な素材の利用により実用面でも受け入れられる可能性が高い。センサノードの投射配置については、試作したセンサノードを投射するための機構を設計し、動力部の動作確認を行った。今後、投射機構の改良を行いロボットに搭載し、耐衝撃センサノードを複数用いてWSNを展開して情報収集を行う予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 7 件)

- ① 澤井 圭, 河野 仁, 鈴木 剛, 羽田靖史, 川端邦明, 「投射配置による落下衝撃を考慮した耐衝撃機構を備えた無線センサノードの開発」, 第 14 回 ROBOTICS Symposia, pp. 459-464, ISSN 1881-7300, 北海道, 3 月 16-17 日, 2009. (査読有)
- ② 澤井 圭, 河野 仁, 鈴木 剛, 羽田靖史, 川端邦明, 「投射配置による落下衝撃を考慮した耐衝撃機構を備えた無線センサノードの開発」, 第 9 回計測自動制御学会 (SICE) システムインテグレーション部門講演会, 1A2-2, 岐阜, 12 月 5-7 日, 2008.
- ③ 山下絢也, 澤井 圭, 君塚祐司, 鈴木 剛, 戸辺義人, 「被災地におけるレスキューロボットを用いた無線センサノードの直接配置手法の検討」, 第 9 回計測自動制御学会 (SICE) システムインテグレーション部門講演会, 2B3-4, 岐阜, 12 月 5-7 日, 2008.
- ④ Kei SAWAI, Tsuyoshi SUZUKI, Hitoshi KONO, Yasushi HADA, Kuniaki KAWABATA, “Development of a sensor node with impact-resistance capability for gathering disaster area information,” 2008 International Symposium on Non linear Theory and its Applications (NOLTA2008), pp.17-20, ISBN: 978-4-88552-234-5, Budapest, Republic of Hungary, September 7-10, 2008. (査読有)
- ⑤ Kei SAWAI, Hitoshi KONO, Tsuyoshi SUZUKI, Kuniaki KAWABATA, Yasushi HADA, “Development of a sensor node with impact-resistance capability for gathering disaster area information,” 5th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS 2008), p.259,

Kanazawa, Japan, June 17-19, 2008. (査読有り)

- ⑥ 澤井 圭, 河野 仁, 羽田靖史, 川端邦明, 鈴木 剛, 「レーザポインタの直線性を考慮したセンサノードの位置推定」, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008 (ROBOMEC08) 日本機械学会, 1A1-F15, 長野, 6 月 5-7 日, 2008.
- ⑦ 河野 仁, 澤井 圭, 鈴木 剛, 羽田靖史, 川端邦明, 「耐衝撃性を考慮した被災地情報収集センサノードの開発」, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008 (ROBOMEC08) 日本機械学会, 2P1-A10, 2008.

[その他]

- ① 東京国際消防防災展 2008 にて, 情報通信研究機構 情報通信セキュリティ研究センター 防災・減災基盤技術グループ (滝澤 修, 羽田靖史), 理化学研究所 知能システム研究ユニット (川端邦明), 東京電機大学ネットワークロボティクス研究室 (鈴木 剛) 研究事例共同展示およびデモンストレーション, 東京ビックサイト, 2008 年 6 月 5 日~6 月 8 日.
- ② 2007 国際ロボット展にて, 東京電機大学 ユビキタスネットワークキング研究室 (戸辺義人), 東京電機大学ネットワークロボティクス研究室 (鈴木 剛), 理化学研究所 川端知能システム研究ユニット (川端邦明), 情報通信研究機構 情報通信セキュリティ研究センター 防災・減災基盤技術グループ (滝澤 修, 羽田靖史) 研究事例共同展示およびデモンストレーション, 東京ビックサイト, 2007 年 11 月 28 日~12 月 1 日.

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 剛 (SUZUKI TSUYOSHI)  
東京電機大学・工学部・准教授  
研究者番号: 00349789

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし