

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月11日現在

機関番号： 32657  
 研究種目： 基盤研究（C）  
 研究期間： 2009～2011  
 課題番号： 21500191  
 研究課題名（和文） 地下被災情報収集のための投下および投擲配置による  
 センサネットワーク展開手法の開発  
 研究課題名（英文） Development of Sensor Network Deployment Method by Dropping and  
 Throwing Sensor Node for Gathering Disaster Area Information in Underground Space  
 研究代表者  
 鈴木 剛（SUZUKI TSUYOSHI）  
 東京電機大学・工学部情報通信工学科・教授  
 研究者番号： 00349789

## 研究成果の概要（和文）：

震災などの災害発生後に、被災状況の把握に必要な情報を収集する無線センサネットワークを移動ロボットにより展開するための、センサノードの運搬・配置機構の開発を行った。特に本課題では、障害物等により進入不可能な隔離空間に、遠隔操作型レスキュー移動ロボットにより無線センサノードを投擲配置するための投擲機構、および、有線のセンサノードを用いた投擲距離調整機構を開発し、実験により評価した。

## 研究成果の概要（英文）：

In recent years, mitigation measures have been discussed to reduce the damage caused when a disaster strikes. For the information-gathering support system for such mitigation activities, we have proposed a robot sensor network system, in which a teleoperated high-mobility rescue robot deploys a wireless sensor network to gather disaster information in post-disaster underground spaces. In this report, a prototype wireless sensor node throwing deployment device was developed and evaluated for information gathering in a closed space divided by obstacles that are difficult for the robot to overcome. A mechanism controlling a cable length that unreels by throwing of wired sensor node is also developed and evaluated. Then, an experiment confirmed the performance of proposed systems.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野： 総合領域

科研費の分科・細目： 情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード： 実世界情報処理、センサネットワーク、被災地情報収集

## 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し早期の復旧・復興を図る“減災”が注目されている。減災においては、

被害に対応するために被災状況を可能な限り迅速かつ継続的に把握する必要がある。これに対し、レスキュー移動ロボットや無線センサネットワークを用いた情報収集システムが提案されている。既存の研究では、無線センサネットワーク端末（センサノード）を

事前に街灯や屋内の天井などに設置、もしくは災害後に人間が設置することを想定した検討が行われている。このような事前設置型のセンサノードは、災害発生前から情報を常時収集可能であるが、災害発生後にセンサノードの機能を保持できない可能性がある。さらに、人手では、定点での継続的な情報収集や監視作業は困難であり、また、人的資源が乏しく、情報収集活動での二次災害による被害なども危惧される。

申請者は、被災後に複数のレスキュー移動ロボットを用いて被災地の状況に適応的に情報収集ネットワークを展開する方が、センシングおよびネットワークの機能を維持でき、被災情報を同時並列的に継続して収集できると考えた。特に、このようなシステムの利用が期待される場所として地下空間があげられる。地下鉄駅構内や地下街などの地下空間は構造が堅牢なため、非常物資の備蓄のほか、水害や火災などを除き、災害発生時の避難場所としての利用も検討されており、災害時の被災状況の確認の必要性が高まっている。地上では通信衛星や UAV、バルーンなどを利用した広域にわたる被災情報収集システムが提案されているが、地下空間での利用は困難であり、また有用な手法も提案されていない。さらに、災害時に既設置の防災システムが動作しない事例も多く、それによる被害拡大も報告されている。現状では消防・レスキュー隊員らが地下構内へ進入し被災状況を確認しているが、地上に比べ活動が制限され、人的被害の危険性もある。したがって、被災後に地下空間に展開可能な被災情報収集システムの開発が望まれている。

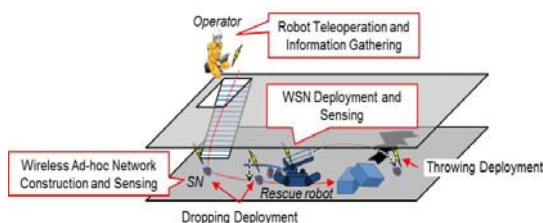


図 1 地下被災情報収集システム

## 2. 研究の目的

申請者は、現在までに「マルチロボットセンサネットワークシステム」として、複数のロボット間の協調動作、ロボットによるセンサノードの電波強度を考慮したセンサネットワーク展開アルゴリズム、さらに、被災地情報収集を目的としロボットによる設置を考慮したセンサノードの開発などを行った。しかし、地下空間での利用を考えた場合、従来のセンサネットワーク展開手法では網羅的な情報収集が困難であることが分かった。そのため、レスキュー移動ロボットがセンサノードを運搬・配置し、地下空間にセンサ

ネットワークを展開する手法の開発が必要と考えた。そこで、本課題では、レスキュー移動ロボットに搭載可能なセンサノード運搬・配置機構を試作する。ロボットの移動経路上にセンサノードを配置する投下配置機構と、ロボットが進入困難な領域にセンサノードを配置する投擲配置機構を開発する。また、ロボットによるセンサノード配置アルゴリズムについて検討する。

## 3. 研究の方法

(1) 既開発の被災地情報収集センサノード(2007~2008年度、基盤研究(C))を対象に運搬・配置機構を開発する。センサノードは、組み込み Linux 計算機、無線 LAN、姿勢センサ、バッテリー、および、2 台の超広角魚眼カメラ(画角  $190^\circ$ )を搭載しており、センサノードの設置姿勢によらず周囲約  $4\pi$  [sr] の映像を取得でき、映像情報をセンサネットワークにより転送できる。また、被災地での利用を考慮した耐衝撃カバーで周囲を覆う設計となっている。

投下配置では、各センサノードにソレノイドなどを利用した連結機構を搭載し、レスキューロボットの後部に数珠繋ぎで連結し、配置位置で順次切り離すことを考える。

投擲配置では、センサノードを射出する機構を開発し、レスキューロボットに搭載する。センサノードは直径 27[cm]、重量 1.5[kg]であり、将来的な小型化は検討するが、本課題では現状のものを 10[m]以内の任意の距離に投擲可能な機構を試作する。投擲には、サイズや稼働範囲を考慮し、カタパルト方式の機構を採用する。投擲に必要な推力、加速度および稼働範囲と、ロボットからの制御の要求から、空気圧アクチュエータを用いて機構を試作する。

(2) 投擲配置では、センサノードの落下地点の制御が困難となることが容易に予想され、そのためにセンサノード間の通信が断絶する可能性もある。そこで、配置時には通信線を兼ねたケーブルを接続して投擲し、ケーブル送り機構にブレーキを用いて投擲速度とケーブル長を調整することにより落下地点を制御すると共に、センサノードの無線通信やセンサ稼働状態を有線通信で確実に取得しながら配置位置を決定し、所望の位置でケーブルを切り離す手法を検討する。

## 4. 研究成果

(1) センサノード投擲機構の開発にあたり、地下空間の内装や天井の高さなどを考慮し、障害物の高さを最大 1.8[m]と仮定した。したがって、投擲機構は、1.5[kg]のセンサノードを 1.8[m]の障害物を越えて投げる必要がある。センサノードの重量を安全係数も含め 2[kg]とし、投射角  $45[\text{deg}]$  でセンサノード

を投擲したときの放物運動モデルを用い、表1に示す仕様を求めた。また、これらの仕様に基づき、空気圧シリンダを用いたカタパルト方式の投擲機構を開発した。図2に、センサノード投擲機構の外観を示す。

表1 センサノード投擲機構仕様

センサノード重量	2[kg]
推力	149.59[N]
空気圧シリンダ径	50[mm]
シリンダ可動範囲	500[mm]
最大圧力	0.212[MPa]
最大空気流量	787[l/min]
投擲回数	1回
投擲角度	手動可変

開発したセンサノード投擲機構を用いて、投射角を45[deg]とし、空気圧0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.68[MPa]の各条件で投擲実験を3回行い、センサノードの初速および投擲軌跡の実測値と設計値を比較した(図3および4)。その結果、低空気圧では推力が不足し適切な投擲が行えなかったが、高空気圧条件下では、初速平均値の標準偏差が±10%以内、投擲軌跡もほぼ等しく、理論初速との誤差を補正して空気圧を調整することにより投擲が可能であることを確認した。

次に、本システムを用いて情報収集実験を行い、機能を確認した。ここでは、建造物の下階フロアから上階フロアの状況を確認することを目的に、次のシナリオで情報収集を行った。

- 1) 下階フロアに操作卓を設置し、操作員が操作を行う。
- 2) 階段を移動ロボットの進入口と想定し、階段上部から移動ロボットを走行させる。操作卓から移動ロボットを遠隔操作するための通信路は、無線センサネットワークにより確保されているものとする。
- 3) 操作員は、移動ロボットからのカメラ情報を用いてロボットを遠隔操作し上階フロアの探索を行う。
- 4) 移動経路上に迂回や乗り越えが不可能な障害物を確認した場合、障害物データを測定し、無線センサノードを投擲する。
- 5) センサノードからの画像情報により、障害物により隔離された空間の状況を確認する。

なお、移動ロボットの移動、障害物の測定、および、センサノードの投擲は、操作者の遠隔操作により行った。移動ロボットの遠隔操作は、ロボット前部に搭載のパンチルトカメラおよび牽引ジョイント上部に搭載した俯

瞰カメラの映像を基に行った。図5に実験環境を示す。図5に示すように、下階フロアに操作卓を設置し、上階の移動ロボットを遠隔操作してフロアを探索した。また、上階フロアの一室に探索対象として被災者を模し、棚等の転倒物に阻まれたことを想定し、迂回や乗り越え不可能な障害物として1.7[m]の衝立を進入路に配した。

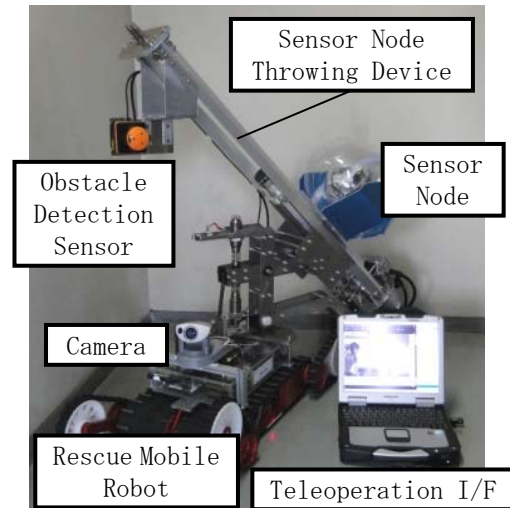


図2 センサノード投擲機構

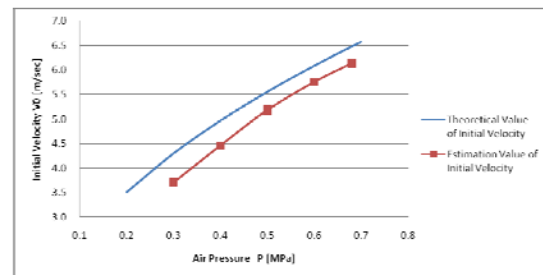


図3 投擲初速度の比較

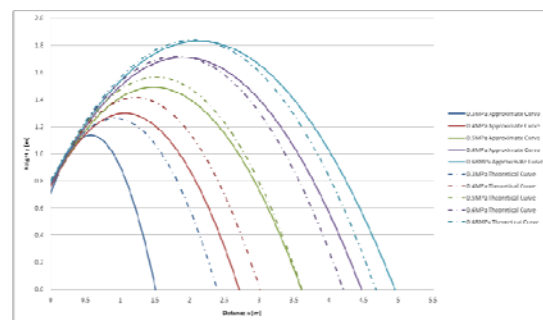


図4 投擲軌跡の比較

図6, 7に構築したシステムによる探索および情報収集の様子を示す。操作者は、操作卓上に表示される移動ロボットのカメラ画像を見ながら上階フロアの探索を開始し、通路左側の部屋への進入を試みた。操作者は、ロボットのカメラ画像より、進入路上に乗り越え困難な障害物を発見し、障害物により隔離された空間の情報を収集するためセンサ

ノードの投擲を行った。このとき、障害物測定センサにより、障害物の高さを測定し、投擲距離の調整を図った。

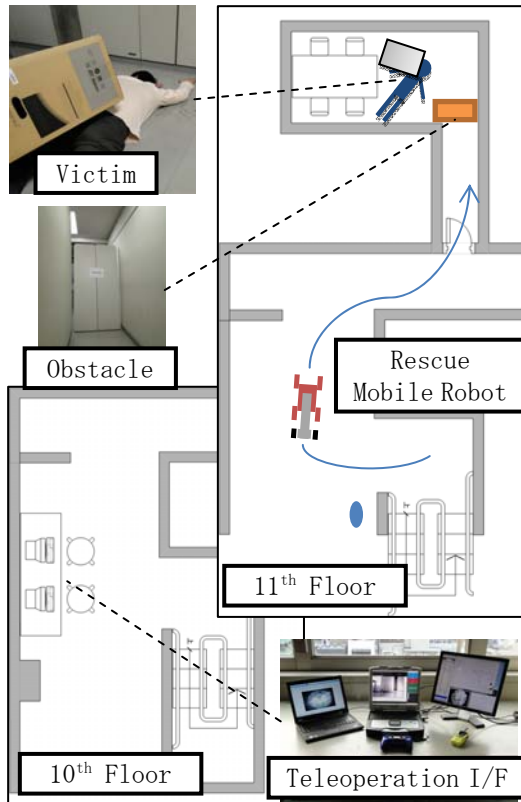


図5 実験環境

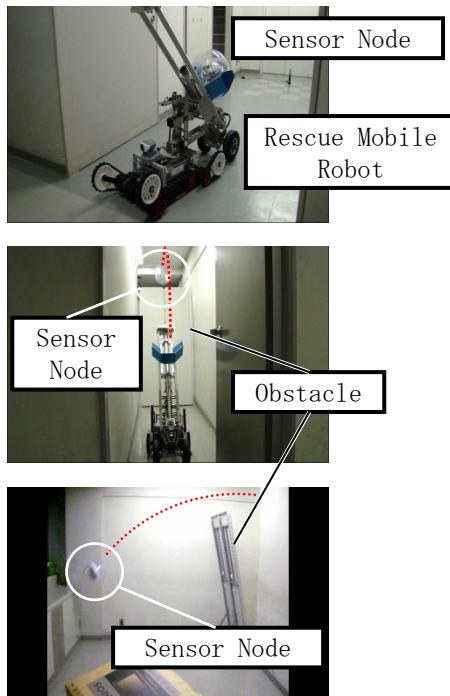


図6 遠隔操作移動ロボットによる探索およびセンサノードの投擲の様子

投擲されたセンサノードは、放物運動によ

り障害物を越えて隔離空間に落下し、その後、定期的に画像情報を操作者に転送した。これにより操作者が要救助者を確認できた(図7)。投擲後のセンサノードの位置姿勢は不明であるが、全周囲の画像を取得することで、障害物で隔離された空間内の情報を取得できる。なお、センサノードは、運搬時から稼働しており、稼働状態で投擲される。実験では、投擲後も正常に稼働しており、落下や衝突による故障などは生じなかった。

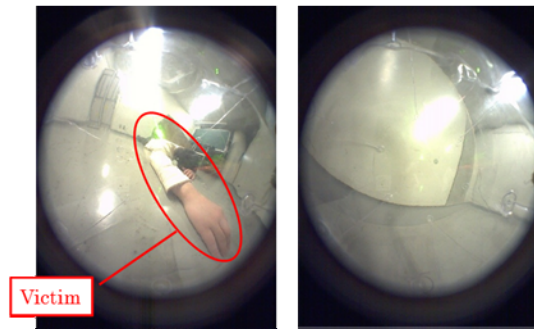
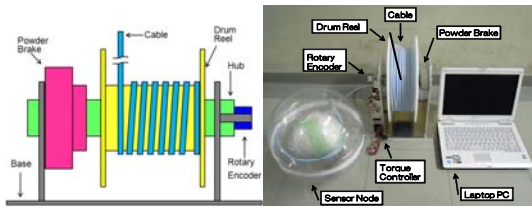


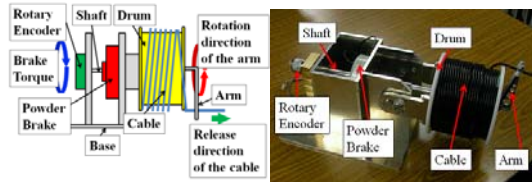
図7 センサノードにより取得した映像

(2) 有線センサノードを用いた投擲距離調整機構の開発では、ドラムリール回転型およびアーム回転型の2種類の機構を試作した。センサノードに接続するケーブルには、センサノードとロボット間の有線通信を確保し、さらに投擲時の張力に耐えられるよう、金属製ワイヤをLANケーブルに這わせ、強度を補った。また、ケーブルの収容には、ドラムにケーブルを巻きつけるドラムリール方式を採用した。このドラムの回転軸を制御するために、電流に比例した連続的なトルク出力が可能なパウダーブレーキを採用した。また、投擲されるセンサノードの投擲距離を測定するために、回転軸にロータリーエンコーダを取り付け、軸の回転角からケーブル長を推定し、その値を基に制動を行うことを考えた。

ドラムリール回転型は、投擲によりケーブルが繰り出されると、ケーブルの張力によりドラムが回転する。ドラム回転軸にパウダーブレーキおよびエンコーダを取り付けることで、ドラムを制動しケーブル長を調整する。一方、アーム型は、ケーブル放出時の抵抗を軽減するためにドラム部分を固定し、ドラム中心軸にドラムと独立した回転軸を通した。また、ケーブル長を測定するために、ケーブルを保持するアームを回転軸に固定した。これにより、ケーブルの張力によりアームと回転軸が回転する。回転軸にはパウダーブレーキとロータリーエンコーダが取り付けられており、軸の回転角を測定することで、ケーブル長を推定し、回転軸に制動をかけることでケーブル長を調整する。図8に機構の概念図と外観を示す。



(a) ドラムリール回転型



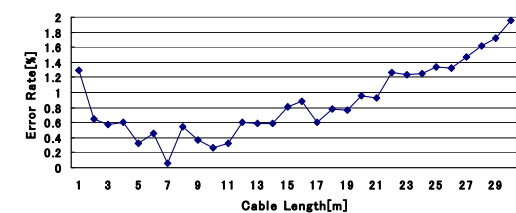
(b) アーム回転型

図8 投擲距離調整機構

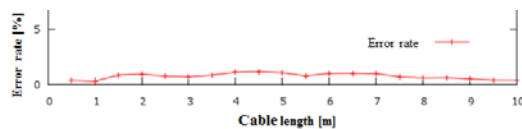
投擲時のケーブル長の調整を行うために、回転軸の回転角からケーブル長を推定するモデルを作成した。半径  $r$ 、幅  $b$  のドラムに、直径  $\phi$  のケーブルを螺旋状に巻きつけ、ドラムの径方向にケーブルを重ねて巻いた時の  $n$  重目に収容されるケーブルの長さは、軸の回転角  $\theta$  を用いて次式により近似する。

$$L_n = \frac{2\pi \theta \{r + \phi(n-1)\}}{360}$$

投擲距離調整機構の性能検証を目的に、1m 間隔の基準点にケーブルを繰り出し、推定モデルより求めたケーブル長を測定した。結果を図9に示す。ドラムリール回転型の誤差率は2%以内、アーム回転型では1.2%以内であり、いずれの機構でもケーブル長さを取得できることを確認した。



(a) ドラムリール回転型

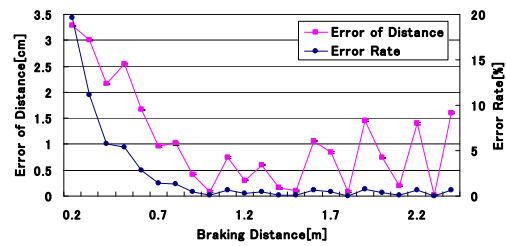


(b) アーム回転型

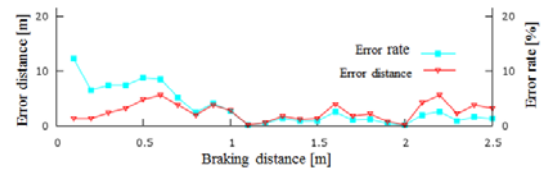
図9 ケーブル長の測定誤差

自由落下による落下位置制御を行い、機構の制動評価を行った。有線センサノードを鉛直下向きに自由落下させ、ケーブル長を測定しながら設定

した距離で停止するように制動をかける。落下距離は0.1[m]から2.5[m]まで0.1[m]間隔で基準点を設け、実際の落下距離と基準点との差を確認した。実験結果を図10に示す。ドラムリール回転型では、0.9[m]以上で誤差率1%未満、また、アーム回転型では、0.8[m]以上で5%未満となった。最大誤差は5.6[cm]であり、センサノードの大きさを考慮すると、いずれも誤差は半径内に収まっており、ケーブル長による投擲位置の調整が可能であることを確認した。



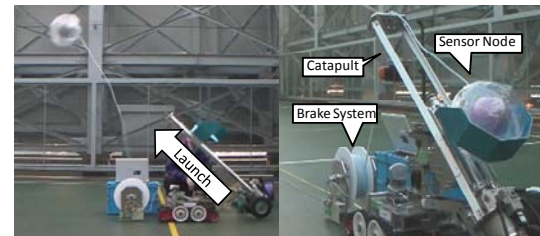
(a) ドラムリール回転型



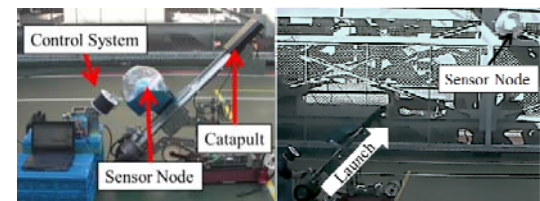
(b) アーム回転型

図10 自由落下による制動機能評価

投擲機構を用いて制動評価を行った。実験の様子を図11に、実験結果を図12に示す。



(a) ドラムリール回転型



(b) アーム回転型

図11 有線センサノードの投擲制御

この結果より、いずれもケーブル長と測定値の差は平均20[cm]となった。両者に同じ傾向が見られることから、斜方投擲時にケーブル長による制動が有用であることが確認できた。しかし、ドラムリール回転型ではドラムの慣性モー

メントが大きな負荷となることが分かった。また、アーム回転型では、ケーブル巻き数および投擲時のケーブルの逸脱、センサノード着地後のケーブルのたるみなどにより誤差が発生しており、これらの対処について今後検討していく。

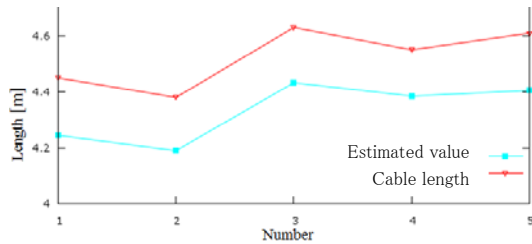


図12 斜方投擲によるケーブル長測定誤差

以上、震災などの災害発生後に、被災情報を収集する無線センサネットワークを移動ロボットにより展開するための、センサノードの運搬・配置機構の開発を行った。特に、本課題では、障害物等により進入不可な隔離空間に、遠隔操作型レスキュー移動ロボットにより無線センサノードを投擲配置するための投擲機構、および、有線センサノードを用いた投擲距離調整機構を試作し、実験により機能を評価した。

現在、図13に示す投下型配置機構の試作を行うとともに、センサノード間の電界強度およびスループットなどの通信条件を考慮したセンサノードの配置手法について検討している。今後、これらの技術を統合し、評価を行う予定である。

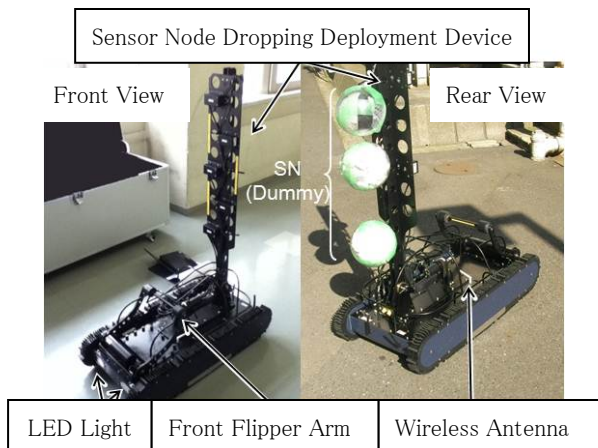


図13 投下型センサノード配置機構

## 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1件)

Tsuyoshi Suzuki, Kei Sawai, Hitoshi Kono and Shigeaki Tanabe, Sensor Network Deployment by Dropping and Throwing Sensor Node to Gather Information Underground

Spaces in a Post-Disaster Environment, Discrete Event Robot, iConcept PRESS, ISBN 978-14611084-4-3, 査読有, 2012, in Press. <http://www.iconceptpress.com/01/site/publication.viewPapers.php?publicationID=BK011A>

[学会発表] (計3件)

- ① 小池裕太, 澤井 圭, 鈴木 剛, 「有線センサノード投射位置制御機構の開発」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 日本機械学会, 2A1-008, (2012.05.29)
- ② 澤井 圭, 藤崎 剛, 鈴木 剛, 「ケーブル長制御機構を用いた有線センサノード投射システムの開発」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 日本機械学会, 1A2-J12, (2011.05.27)
- ③ 河野 仁, 澤井 圭, 鈴木 剛, 「移動ロボットによる無線情報収集端末投射配置を実現する投射機構の開発と実装」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 日本機械学会, 1A2-C10, (2010.06.15)

[その他]

- ① 2009 国際ロボット展にて, 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, 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 共同研究事例紹介展示およびデモンストレーション, 東京ビックサイト, 2009年11月25日~11月28日
- ② テクノトランスファー in かわさき 2009にて, ネットワークロボティクス研究室(鈴木 剛) 研究事例紹介展示およびデモンストレーション, かながわサイエンスパーク, 2009年7月8日~10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・教授  
研究者番号: 00349789

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者 なし