

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：12605

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360113

研究課題名（和文） 流体操作を利用した能動嗅覚センサの開発と
匂い・ガス源探知ロボットへの応用研究課題名（英文） Development of Olfactory Sensing System with Active Flow Generator
and Its Application to Gas/Odor Source Localization Robots

研究代表者

石田 寛（ISHIDA HIROSHI）

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80293041

研究成果の概要（和文）：本研究では、嗅覚を搭載した自律移動ロボットを開発し、ガス漏れ箇所の自動探索を実現することを目標とする。能動的に生成した気流を利用し、左右のガスセンサにそれぞれ特定の方向からガスを集めて検出する装置を開発した結果、ガス源の方向を高い確度で判定することが可能となった。オフィスビルの廊下において、ロボットアームを用いてこの装置をドアに近づける。室内から廊下に漏れ出るガスを検出することにより、ガス漏れが発生した部屋を突き止める実験に成功した。

研究成果の概要（英文）：This research is aimed at developing a mobile robot with an olfactory sensing capability to enable autonomous search for gas leaks. A gas-sensing system developed in this research is equipped with two gas sensors, one on its right side and the other on its left. The system actively generates air currents to collect gas samples from a specific direction to each gas sensor, which enables determination of a gas-source direction with a high success rate. Results of experiments conducted in a corridor of an office building have shown that the proposed gas-sensing system is effective in determining from which room gas is leaking. The gas leakage from the room have been successfully detected by bringing the gas-sensing system close to the door using a robotic arm.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2010年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2011年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：ロボット工学

科研費の分科・細目：機械工学、知能機械学・機械システム

キーワード：知能ロボティクス、能動センシング、嗅覚、ガスセンサ、ガス源探知

1. 研究開始当初の背景

犬は鋭敏な嗅覚を持ち、地中の地雷から漏れ出る微弱な火薬の匂いを嗅ぎつけ、その場所を探し当てる。また、オスの蛾は性フェロモンの匂いを辿り、数百メートルもの遠方からメスを探し当てることができると言われている。これらの生物が持つ匂い源探索能力

を模倣した自律移動ロボットを開発すれば、ガス漏れ箇所や悪臭発生源の探索、爆発物や麻薬の探知など様々な応用が可能となる。しかし、その実現は容易ではない。

空気中に放出されたガス分子の拡散速度は1時間に20cm足らずである。一方、閉め切った室内でも、壁面のわずかな温度差によ

り数 cm/s の自然対流が形成される。したがって、我々が生活する環境ではほとんどの場合、ガスの分子拡散を上回る速度の気流が存在する。ガス源から放出されたガスは主に気流に運ばれて空間を広がり、風下の方向にブルームと呼ばれる帯状の分布を形成する。このブルーム内では気流と平行な方向のガス濃度勾配が小さいため、例えばロボットの左右にガスセンサを搭載しても、得られる応答差は非常に小さい。しかも、現実の環境における気流は乱れを含めため、ブルームは不規則に蛇行し、観測されるセンサ応答も大きく変動する。

このような悪条件下でも確実にガス源の方向を判定するために、ガスセンサに加えて風向風速計を搭載したガス源探知ロボットが開発されてきた。ガスを運ぶ気流の方向を測定し、ガス流を遡る方向に移動することによってガス源を探索する。しかし、研究が進むにつれて、この技術の限界も明らかになってきた。一様かつ定常的な気流が存在する環境では、ガス流を逆に辿る方法が有効である。しかし、屋外で地雷を探索する場合には、風向がめまぐるしく変化する。オフィスビルでガス漏れ箇所を探索する場合には、様々な障害物が存在するため、気流の一様性を仮定することができない。ガス源探知ロボットの性能を実用レベルまで高めるために、新たな技術の導入が待たれていた。

2. 研究の目的

我々の眼球において光を感じるセンサに相当するのは、網膜上に並んだ視細胞である。下等な生物の中には視細胞が体表に露出しているものもあるが、人間の眼球は進化の過程で水晶体を持つに至った。外界から来た光は水晶体で屈折して網膜上に集められ、結像する。人間の耳において音波を検出するセンサに相当する蝸牛管も体表には露出しておらず、奥まった内耳に位置する。顔から突き出た耳介が音を集め、外耳道や鼓膜を介して内耳に音波を送り込む役割を担っている。

同様の構成は、人工的な視覚センサや聴覚センサにも見られる。カメラは、CCD などの撮像素子にレンズを組み合わせて構成される。パラボラ型の反射板を用いてマイクに音を集めれば、遠方で生じた微弱な音波も高感度に検出できる。一方、空気中を漂うガスを検出する際に、センサ上にガスを集めて検出するような工夫が施されることは希である。

しかし、生物の中には気流を巧みに操り、嗅覚センシングに役立っているものがある。カイコ蛾は家畜化され、飛ぶことができない。しかしオスのカイコ蛾は、メスが出す性フェロモンの匂い刺激を受容すると、羽を激しく動かす。羽ばたきによって生じた気流は、前方から匂いを触角に引き寄せ、メスの所在を

探し出すのに役立っている。犬は、クンクンと匂いを嗅ぐ際に勢いよく空気を吸引し、周囲に漂う匂い分子を鼻孔に集める。また、息を吐き出す際には鼻孔を変形させ、呼気を後方に噴出する。後方に向けた噴流に空気が引っ張られるため、息を吐き出している間も前方から鼻に向かう気流が生まれ、匂い分子の捕集を助けている。

この原理を模倣し、我々は能動ステレオ嗅覚センシングシステムを開発した。以下では、その英語名である active stereo nose を略し、ASNose と呼ぶ。この装置は、左右にガスセンサを備えている。ポンプを用いて能動的に気流を生成し、右のガスセンサには右前方の空気を集め、左のセンサには左前方の空気を集めて、その中に含まれるガスを検出する。その結果、左右のセンサの応答差が拡大され、容易にガス源の方向を判定することが可能となる。本研究では ASNose の性能を向上してガス源探知ロボットに搭載し、現実環境においてガス源の自動探索を実現することを目的とした。従来のガス源探知ロボットが備える各種センサに加えて ASNose を用いることにより、幅広い環境に対応できるガス源探知ロボットの実現を目指した。

3. 研究の方法

科学研究費補助金の交付を受けた3年間においては、主に以下の開発課題に焦点を絞り、研究を行った。

(1) ASNose の改良

本研究では、ASNose におけるガス源の方向判定成功率を向上するため、ガスを吸引する左右の吸気口の間エアカーテンを形成する改良を施した。しかし、エアカーテンは空気中を漂うガスを吹き散らす方向に作用するため、空気の吸引によるガス捕集と相反する面がある。そこで、ASNose が形成する気流場を数値流体力学シミュレーションと実験の両面から検討し、ASNose の設計・製作を行った。

(2) ASNose の実装

開発した ASNose を移動ロボットに実装し、ガス源の自動探索を実現する。ASNose は空気を吸引してガスセンサに捕集する能力を持つが、強力なポンプを用いても、ガスを引き寄せることができる距離は 50 mm 程度である。例えば、ASNose をロボットの上部に取り付けた場合、空気より比重の大きなガスが床面付近を漂っていても、ガスセンサは応答しない。希薄なガスを検出するためには、センサをガス源に近づける必要がある。

そこで本研究では、陸上走行型ロボットにロボットアームを取り付け、その先端に ASNose を取り付ける構成とした。象の鼻の

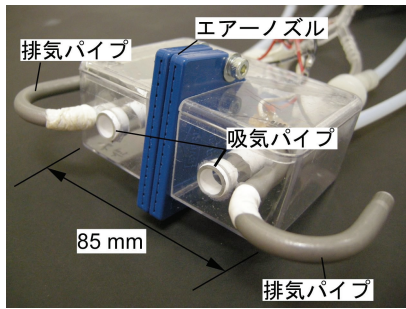


図 1. 能動ステレオ嗅覚センシングシステム (ASNose)

ようにロボットアームを自在に動かし、ガス源だと思われる場所に ASNose を近づけることにより、希薄なガスの検出を可能にする。その効果を実証するため、オフィスの廊下を警備ロボットが巡回するシナリオを想定し、ガス漏れが発生した部屋を特定する実験を行った。

(3) 新たなガスセンサ・匂いセンサの開発

既存のガスセンサやガス検出器は、高感度だが選択性が低い。したがって、複数種類のガスが存在する中で、特定のガスを嗅ぎ分けて検出することが困難である。また、感度が高いとは言え犬の鼻には遠く及ばず、地中に埋まった地雷を探索するような用途には使えないのが現状である。そこで、生物嗅覚のように高い感度と選択性を兼ね備えたセンシングシステムを実現するため、新たなセンサの研究開発を行った。

(4) 様々な環境への応用

オフィスの廊下でガス漏れが発生した部屋を特定する以外にも、ガス源探知ロボットには様々な応用が期待されている。そこで、幅広い環境に適応可能なガス源探知ロボットを実現する必要がある。しかし、現実の環境でどのような気流場が実際に形成されており、その中でガス源から漏れ出したガスがどのように広がっているか、必ずしも明らかではない。そのため、現実環境においてどのような方法でガス源を探索すればよいか、その検討すら十分にできない現状にある。本研究では、様々な環境で気流場とガス濃度分布の測定を行い、データベースを構築した。また、収集したデータに基づいて、ガスセンサの信号処理方法やガス源位置の推定アルゴリズムの開発を行った。

4. 研究成果

(1) ASNose の改良

本研究で開発した ASNose を図 1 に示す。ガス漏れ警報器に使われる半導体ガスセンサを二つ備えており、左右のセンサの応答を比較し、ガスが漂ってきた方向を判定する。

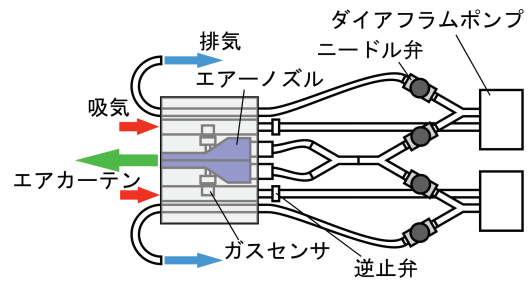


図 2. ASNose の構造

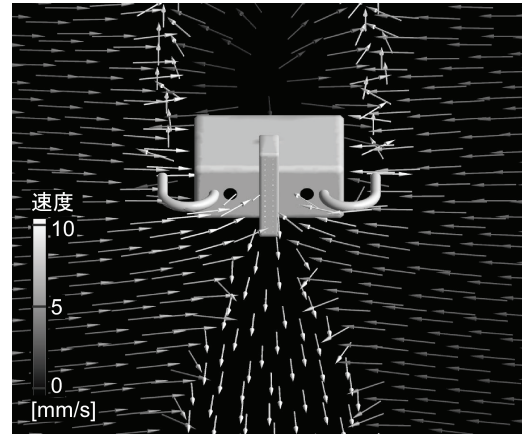


図 3. ASNose により形成される気流場のシミュレーション結果

この ASNose の構造を図 2 に示す。吸気パイプと排気パイプが左右に一組ずつあり、それぞれがダイアフラム式エアポンプに接続されている。半導体ガスセンサは左右の吸気口の内部に取り付けられており、ポンプによって吸引したガスを検出する。ポンプの排気の一部は、左右の吸気口の間に取り付けたエアノズルに送り、エアカーテンを生成する。また、残りの排気は後方に向けて噴出し、ASNose によるガスの吸引を補助する役割を持たせた。

ASNose が作る流れ場を数値流体力学シミュレーションによって求めた結果を図 3 に示す。ANSYS Fluent 12.0 を使って計算を行い、乱流モデルとして LES Dynamic Smagorinsky モデルを用いた。左右の吸気口に向けて周囲から空気が吸引され、その間からエアカーテンが伸びていることが分かる。したがって、ガスが左から漂ってきた場合には左の吸気口に吸引され、右から漂ってきた場合には右の吸気口に吸引される。左右の吸気口に吸引される領域が分断されているため、単にガスセンサを左右に並べた場合と比べ、センサの応答差が拡大される。

また、空気には粘性があるため、後方に噴出した排気に引きずられ、その周囲の空気が排気に引き寄せられるように動いていることが図 3 から分かる。吸気口の間にはエアカー

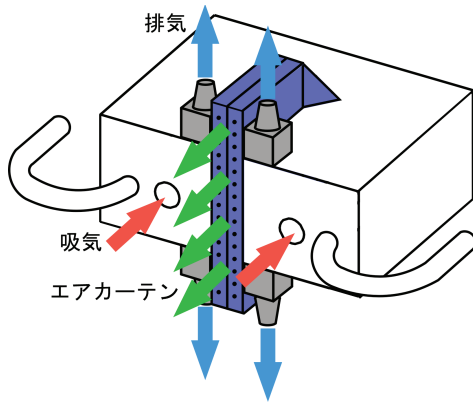


図4. 上下に排気ノズルを追加した ASNose

テンを形成すると、吸気口付近の空気を前方に吹き飛ばしてしまい、ASNose の前方に漂うガスが検出されにくくなる。自然対流により運ばれてきたガスを検出する実験を行った結果、後方に排気を噴出し、その排気に向かう気流を形成すると、前方のガスを過度に吹き飛ばすことなく検出できることが確認された。

しかし、床面に沿って流れるガスを検出する場合に、図1に示すASNoseを床面から少し浮かせた高さで用いると、ガス源の方向判定を誤ることがあった。床面付近に漂うガスがエアカーテンの下を通り、ガス源から遠い側の吸気口に吸引されたためである。そこで、図4に示すASNoseを製作した。エアカーテンの上や下からガスが反対側へ回り込むことを防ぐため、排気ノズルを追加し、上下方向にもエアカーテンを生成するように改良を施した。オフィスビルの廊下でガス漏れが発生した部屋を特定する実験を行った結果、図4に示すASNoseにより、ガス源の方向を90%程度の成功率で判定することができた。能動的に生成した気流を利用してガス源の方向を判定するアイデアは本研究独自のものであり、既存のロボットでは対応できなかった環境におけるガス源探知を実現するツールとして、今後の応用が期待される。

(2) ASNose の実装

ASNose を搭載したガス源探知ロボットを図5に示す。ASNose の位置や姿勢を様々に変えることができるように、6自由度のロボットアームの先端にASNoseを取り付けた。このロボットを用い、図6に示す実験を行った。複数の部屋が並んだ廊下で、ガス漏れが発生した部屋を特定する。そのためにロボットは、ドアの前に停止してアームを伸ばし、ドアと床の隙間にASNoseを近づける。しかし、ドアと床の隙間の付近でガスが検出されたとしても、それだけでその部屋にガス源があると断定することはできない。隣の部屋でガス漏れが発生し、ドアから廊下に漏れ出し

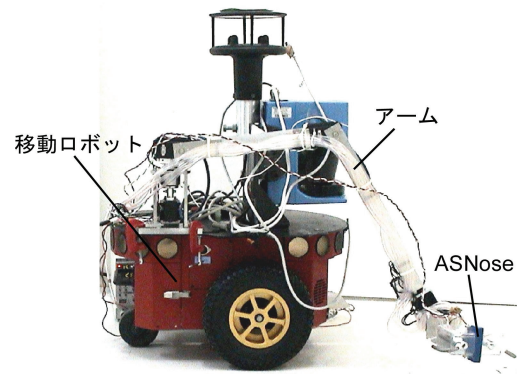


図5. ASNose とロボットアームを搭載したガス源探知ロボット

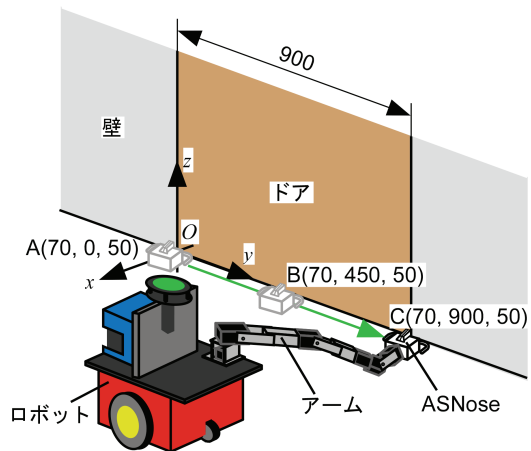


図6. 実験環境 (長さの単位は mm)

たガスが壁に沿って漂ってきた可能性もある。

そこで、ドアの下端に沿ってASNoseを動かしながらガスセンサの応答を測定する。廊下に並んだ部屋のうち一つを選び、その部屋の中で実際にエタノールガスを放出し、ドアの下から廊下に漏れ出すガスを検出する実験を行った。その結果、ドアの左端にあたる測定点AではASNoseの右側のセンサが強く応答し、ドアの右端にあたる測定点Cでは左側のセンサが強く応答した。また、中央の測定点Bでは、左右両方のセンサが大きな応答を示した。したがって、検出されたガスが壁に沿って隣の部屋から漂ってきたものではなく、まさに目前のドアの下から漏れ出していると断定することができる。このような実験を行い、ガス漏れが発生した部屋の特定に成功したのは本研究が初めてである。

(3) 新たなガスセンサ・匂いセンサの開発

生物嗅覚に匹敵する感度や選択性を備えた人工センサを実現するため、本研究では遺伝子組換え酵母細胞を用いたガスセンシングシステムの開発に取り組んだ。耐環境性に

優れた酵母をセンサとして用い、マウスやラット由来の嗅覚受容体遺伝子と、ルシフェラーゼ遺伝子を酵母に導入する。酵母に発現した嗅覚受容体に化学物質が吸着すると、酵母が持つフェロモン受容系でシグナル伝達が生じる。これによりルシフェラーゼ遺伝子が活性化され、発光酵素であるルシフェラーゼが分泌される。そこにルシフェリンを添加すると化学発光が生じるので、化学物質の存在を検知することができる。

本研究では、酵母細胞からの微弱な発光を検出するセンシングシステムの製作を行った。このシステムは、酵母細胞を含むセンサセルにルシフェリンを添加する機構も備えている。TNT爆薬に不純物として含まれるジニトロトルエン（DNT）を検出対象物質として実験を行った結果、DNT吸着による酵母の発光を検出することができた。一つの嗅覚受容体は、様々な化学物質に対して応答を示す。しかし生物嗅覚と同様に、異なる嗅覚受容体を発現させた酵母細胞を数多く用意すれば、個々の化学物質に特有の応答パターンが得られ、様々な物質を識別することが可能になると期待される。ただし、現状では化学物質の検出感度が不足しており、嗅覚受容体の発現効率の向上が課題として残されている。

また、本研究で開発したASNoseは、センサの種類を変えることにより、様々なガスの検出に応用することができる。現状のASNoseはガス漏れ警報器に用いられるセンサを搭載しており、可燃性ガスを検出する。このセンサを例えば赤外線吸収式の二酸化炭素センサに置き換えれば、災害現場でがれきに埋もれた生存者の呼気を検出するなどの応用が可能になると期待される。

(4) 様々な環境への応用

ASNoseやガス源探知ロボット、酵母細胞センサの研究開発と並行して、本研究では以下に列挙した様々な環境で気流場を測定した。また、実際に個々の環境でガスを放出する実験を行い、ガス源から広がるガスの濃度分布を測定した。

① 閉め切った小規模の室内

自然対流が発生し、微弱ながら定常的な循環流が形成される。

② 中型の会議室

部屋の大きさが増すにつれて、気流場の一様性が失われる。

③ 建物の廊下

細長い形状の環境では、主にその方向に沿って気流が流れる。

④ 屋外のテニスコート

風向の変動は大きいですが、開けた屋外では気流場の一様性は高い。

⑤ 二つの建物に挟まれた屋外環境

廊下の場合と同様に、主に一方向に気流が流れる。

これらの環境で測定された風向・風速やガスセンサの応答を用い、ガス源探知のシミュレーションを行って、様々なアルゴリズムを比較・検討した。また、収集したデータはデータベース化しており、スウェーデンのオレブロ大学の協力の下で一般に公開する予定である。画像処理の分野では標準画像のデータベースが確立されており、様々な研究者が開発した画像処理アルゴリズムを、同じデータを使って比較することができる。このようなデータベースをガス源探知ロボット研究のために用意したのは本研究が初めてであり、当分野の研究の進展に大きく貢献するものと期待される。

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1件)

- ① Hiroshi Ishida, Yuta Wada, and Haruka Matsukura, “Chemical sensing in robotic applications: A review,” *IEEE Sensors Journal*, 2012, 掲載決定, 査読有.

[学会発表] (計18件)

- ① 楠木貴文, 宮谷郁哉, 和田佑太, 石田寛, “現実環境におけるガス源探知-能動ステレオ嗅覚センシングシステムの利用-”, 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, 2012年6月11日, 京都大学・百周年時計台記念館, 京都府京都市.
- ② 美土路拓歩, 石田寛, “ペルチェ素子により生じる熱対流を用いたガス源方向判定デバイス”, 平成24年電気学会全国大会, 2012年3月21日, 広島工業大学・五日市キャンパス, 広島県広島市.
- ③ 牧下智美, 宮谷郁哉, 竹村龍一, 楠木貴文, 西澤宇一, 石田寛, “能動的に生成した流れを利用する化学物質源探知システム”, 日本バーチャルリアリティ学会第9回香りと生体情報研究会, 2012年3月2日, 東京大学・先端科学技術研究センター, 東京都目黒区.
- ④ 楠木貴文, 和田佑太, 宮谷郁哉, 石田寛, “ロボットアームを搭載したガス源探知ロボットの基礎的研究”, 日本機械学会2011年度年次大会, 2011年9月14日, 東京工業大学・大岡山キャンパス, 東京都目黒区.

- ⑤ 西澤宇一, 古林盾門, 石田寛, “飛行船ロボットを用いた室内ガス濃度分布の三次元計測—空調機稼働の影響による計測箇所への偏りの改善—”, 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, 2011年6月30日, 東京工業大学・すずかけ台キャンパス, 神奈川県横浜市.
- ⑥ Haruka Matsukura, Yuta Wada, and Hiroshi Ishida, “Effects of self-generated heat on gas sensing in mobile robots and olfactory sensing in humans,” *International Symposium on Olfaction and Electronic Nose*, May 4, 2011, Rockefeller University, New York, NY, USA.
- ⑦ Hiroshi Ishida, “Active flow generation to manipulate chemical signal reception,” *Workshop on Bioinspired Computation for Chemical Sensing*, March 10, 2011, Hotel Spa Senator Barcelona, Barcelona, Spain, 招待講演.
- ⑧ Ikuya Miyatani and Hiroshi Ishida, “Active stereo nose: using air curtain to enhance the directivity,” *The Ninth IEEE Conference on Sensors*, November 3, 2010, Hilton Waikoloa Village, Waikoloa, HI, USA.
- ⑨ 石田寛, “ガスセンサと風速計を搭載したロボットによるガス源探知とガス濃度分布マッピング”, 第27回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2010年10月15日, くにびきメッセ, 島根県松江市.
- ⑩ Yuta Wada, Marco Trincavelli, Yuichiro Fukazawa, and Hiroshi Ishida, “Collecting a database for studying gas distribution mapping and gas source localization with mobile robots,” *International Conference on Advanced Mechatronics*, October 5, 2010, Suita Campus, Osaka University, Suita, Osaka.
- ⑪ 瓜本新, 川村政貴, 福谷洋介, 内海現太, 石田寛, 養王田正文, “生物発光を利用した嗅覚センシングシステムの基礎的研究”, 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, 2010年6月17日, 東京大学・生産技術研究所, 東京都目黒区.
- ⑫ 宮谷郁哉, 西澤宇一, 石田寛, “エアカーテン効果を利用した能動ステレオ嗅覚センシングシステム”, 平成22年電気学会全国大会, 2010年3月18日, 明治大学・駿河台キャンパス, 東京都千代田区.
- ⑬ 和田佑太, 深澤雄一郎, Marco Trincavelli, 石田寛, “嗅覚ロボット研究のためのデータベース構築”, 平成22年電気学会全国大会, 2010年3月18日, 明治大学・駿河台キャンパス, 東京都千代田区.
- ⑭ 山崎弘樹, 石田寛, “飛行船ロボットによる三次元ガス濃度分布計測”, 平成22年電気学会全国大会, 2010年3月18日, 明治大学・駿河台キャンパス, 東京都千代田区.
- ⑮ Yuichiro Fukazawa and Hiroshi Ishida, “Estimating gas-source location in outdoor environment using mobile robot equipped with gas sensors and anemometer,” *The Eighth IEEE Conference on Sensors*, October 28, 2009, Christchurch Convention Center, Christchurch, New Zealand.
- ⑯ 深澤雄一郎, 和田佑太, Marco Trincavelli, Matteo Reggente, Silvia Coradeschi, Amy Loutfi, Achim J. Lilienthal, 石田寛, “大規模空間における自律移動ロボットを用いたガス濃度のマッピング”, 第26回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2009年10月15日, タワーホール船堀, 東京都江戸川区.
- ⑰ 深澤雄一郎, 石田寛, “領域絞り込み法を用いた屋外環境におけるガス源位置の推定”, 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, 2009年7月24日, 東京工科大学・八王子キャンパス, 東京都八王子市.
- ⑱ 山崎弘樹, 森伸也, 石垣彰一, 皆川勇一, 石田寛, “金属ナノ構造体を用いたロボット嗅覚用小型 SPR ガスセンサの研究”, 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, 2009年7月24日, 東京工科大学・八王子キャンパス, 東京都八王子市.
- [その他]
- ① 東京農工大学石田研究室研究内容ホームページ
<http://www.tuat.ac.jp/~h-ishida/projects/projectstop.html>
- ② 石田寛, “匂い・ガスの発生源を自動的に探索する移動ロボット”, 東京農工大学研究シーズ集, pp. 75–76, 2011.
<http://www.tuat.ac.jp/~seeds/jseeds/07seedstext/038-0075/psrts/0075-0076.pdf>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石田 寛 (ISHIDA HIROSHI)
 東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
 研究者番号：80293041

(2) 研究分担者

遠山 茂樹 (TOYAMA SHIGEKI)
 東京農工大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号：20143381

(3) 連携研究者

岩本 薫 (IWAMOTO KAORU)
 東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
 研究者番号：50408712