

平成 21 年 6 月 12 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18360120
 研究課題名（和文） バイオ嗅覚センサを搭載した犬型ロボットによる匂い・ガス源の探索
 研究課題名（英文） Gas/Odor Source Localization by using Robot Dog Equipped with Biochemical Olfactory Sensors
 研究代表者
 石田 寛（ISHIDA HIROSHI）
 東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・准教授
 研究者番号：80293041

研究成果の概要：嗅覚センサを搭載し、匂い・ガスを辿って危険物の所在を突き止める犬型ロボットの開発を目指した。ナノスケールの周期構造を持つ金属薄膜に光を照射すると、化学物質の吸着に敏感に応答し、反射光強度が変化する。これを利用して小型嗅覚センサを実現した。また、くんくんと匂いを嗅ぐ犬の鼻の構造を模倣した測定装置を開発した。能動的に気流を操作し、左右の嗅覚センサの応答差を拡大することにより、匂い・ガスの発生源を容易に見つけ出すことができる。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2007年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2008年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：センサ工学

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：ロボット, バイオセンサ, ガスセンサ, 表面プラズモン共鳴, 乱流拡散

1. 研究開始当初の背景

生物の中には、既存の測定器の能力を超越した鋭敏な感覚を持つものがある。犬の嗅覚は人間の100万倍の感度を持つと言われ、地中の地雷から漏れ出る微弱な火薬の匂いを嗅ぎつける。また、オスの蛾が持つ嗅細胞は、性フェロモンの分子わずか一つにも応答を示すほどの高感度であることが実験的に確かめられており、数百メートルもの遠方からメスを探し当てると言われる。

このような鋭敏な嗅覚をロボットに搭載することができれば、爆発物や禁止薬物、危

険物などの匂いを嗅ぎつけ、その所在を突き止めることが可能な革新的セキュリティロボットを実現できる。研究代表者の石田は、ガス漏れ警報器用のガスセンサを移動ロボットに搭載し、匂い・ガスの発生源を自動探索するシステムを世界に先駆けて開発した。蛾の行動をヒントとして、匂い刺激を受けると風上に向かうアルゴリズムを提案し、定常的な気流を人工的に発生させた実験室内にガス源を置き、ガス源の探知に成功した。以来、オーストラリアやアメリカ、ドイツ、スウェーデンなどで類似研究が行われている。

しかし、研究の進展と同時に、既存技術の限界も明らかになってきた。生物嗅覚の特長は、高い感度のみならず、高い特異性（特定の匂いを識別する能力）と高速な応答性も同時に実現している点にある。ガス警報器用のセンサは ppm レベルの濃度の可燃性ガスを検出する感度を持つが、応答の回復に1分近く要する。また、可燃性・還元性を持つ様々なガスに反応してしまい、選択性は低い。一方、生物の嗅細胞の応答時定数は 0.1 秒程度と言われ、妨害臭の存在下でも目的の匂いを瞬時に嗅ぎ分けることができる。あちらこちらの匂いを犬のように嗅ぎ回り、匂いの発生源を素早く突き止めるためには、新しい嗅覚センサが必要となる。

匂いを高感度に検出できたとしても、犬や蛾のように匂いを辿り、隠れた場所や遠隔地にある物体を探し出すことは容易ではない。空気中に放たれた匂い分子は、分子拡散により等方的に広がると誤解されることが多い。実際には分子拡散の速度は非常に遅く、1 時間に 20 cm 程度である。屋外・室内を問わず、分子拡散速度を遙かに上回る気流が一般に存在するため、匂い分子は気流に運ばれ、発生源から風下に広がる。例えば、無風に思われる締め切った室内でも、室内各所の温度差により数 cm/s の自然対流が発生している。

発生源から風下にたなびく帯状の匂いの分布をプルームと呼ぶ。多くの生物は、匂いを検出すると風上に向かうことによってプルームを辿り、発生源を探し出す。この行動を模倣したアルゴリズムをロボットに組み込み、ガス源の探索に成功した例が数例報告されている。しかし研究代表者のグループによるものを含め、いずれも簡略化した環境の中で実験を行っている。多くの場合、数 m 四方の小さな室内空間にファンを設置し、人工的に一様な気流場を作った中でガス源を探索する実験を行っている。しかし、空港のような大規模室内空間で危険物を探索する場合や、屋外で地雷の匂いの検知を試みる際に、匂いが実際にどのように空間を広がるか明らかでない。現実の環境の気流は必ず乱れを含むため、プルームは不規則に蛇行し、センサで測定される匂い濃度も絶えず変動する。実用的な匂い・ガス源探知ロボットを実現するためには、気流の乱れが大きい環境でも、匂い・ガスの発生源を確実に探し出すことのできるアルゴリズム開発も必要となる。

2. 研究の目的

生物は持てる感覚を総動員し、周囲に潜む危険を探る。前節で述べたように、なかでも嗅覚は危険察知に広く活用されており、その鋭敏な能力は爆発物探知犬や麻薬犬の活躍により証明されている。本研究では、バイオ

嗅覚センサを搭載したセキュリティロボットの開発を目的とした。匂い結合タンパク質など生物嗅覚に関連する各種生体物質を利用し、生物嗅覚に匹敵する感度や応答特異性、応答速度を備えたバイオ嗅覚センサの実現を目指す。また、ロボットに嗅覚センサを搭載して気流感覚などその他の感覚情報と融合し、匂い・ガス源の迅速な探索を可能にすることを旨とする。犬のように危険な匂いを嗅ぎつけ、生活空間の安全・安心を確保するセキュリティロボットの実現に向け、各種要素技術の開発を行い、実現可能性を実験的に証明することを目的とする。

3. 研究の方法

第1節で述べた研究の背景を鑑み、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) 嗅覚センサの開発

本研究では、金属薄膜表面で起こる表面プラズモン共鳴 (surface plasmon resonance, 以下 SPR と略す) を利用し、ロボット嗅覚用小型化学センサの開発を目指した。SPR はセンサ表面に接している物質の屈折率変化に対して敏感に反応し、化学物質の吸着を高感度に検出することができるため、各種バイオセンサの検出原理として利用されている。特定の物質と親和性が高い感応膜を金属薄膜表面に付加すれば、その物質を選択的に検出することも可能である。

しかし、従来の SPR 測定装置の多くは、クレーチマン配置を用いて平坦な金薄膜に SPR を励起しており、複雑な光学系を必要とする。本研究では、金属ナノ周期構造体と LED 光源を用いた小型 SPR センサを開発した。ナノスケールの金属周期構造体に光を入射すると様々な方向に回折光が生じるが、図1に示すように、その一部は金属周期構造体に沿った方向に伝搬する。この回折光の波数と、金属表面における自由電子の集団的な振動である表面プラズモンの波数が一致すると、SPR が励起される。SPR の励起条件が緩やかであるため、LED の光を単に入射するだけでも SPR を容易に励起することができ、小型で消

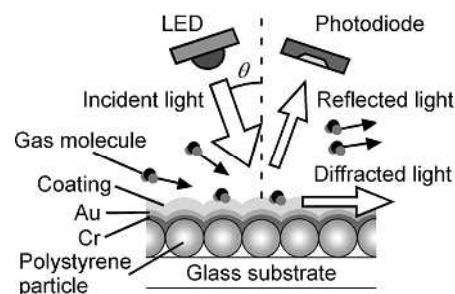


図1. SPR ガスセンサ

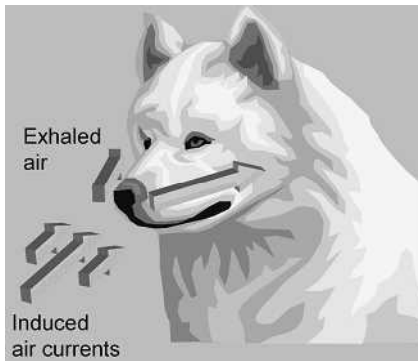


図 2. 犬の鼻が作る空気の流れ

費電力の小さい SPR センサを実現することができた。

(2) 能動ステレオ嗅覚センシングシステムの開発

哺乳類の動物は、くんと間欠的に空気を吸引することで、周囲を漂う匂いを鼻孔に集めて検知する。中でも優れた嗅覚を持つ犬は、鼻孔の形状を変えることができ、吸気と呼気の変換方向を変えている。空気を吸引する時には、匂い物質を前方から鼻に引き寄せ、一方、図 2 に示すように、息を鼻から吐き出す時には鼻孔を変形して気流を後ろに向ける。この後方に向かう気流に周囲の空気が引かれて動くことにより、前方から鼻に向かう気流が増強される。

匂いは気流に運ばれて漂ってくる。犬がくんと匂いを嗅いでいる状況を工学的に見れば、嗅覚センサの周囲の気流場を操作することにより匂い物質をセンサに集め、高感度検出を可能にしていると解釈することができる。気流を巧みに操れば、ガスが漂ってきた方向の判定も容易になると期待される。そこで、能動的に気流を操作して嗅覚センシングを行うシステムの開発を行った。

(3) 大規模空間におけるガス分布計測

大規模な室内空間や屋外で実際に匂い・ガスがどのように広がるかを調べるため、スウェーデンのオレブロ大学と共同で図 3 に示すロボットを開発した。市販のロボットをプラットフォームとして用い、センサを使って測定した情報に基づいてロボットを制御するためオンボード PC を搭載する。オープンソースソフトウェアである Player を用いて自己位置同定や経路計画などの各種機能を実装した。図 3 の(a)と(b)に示すロボットは、搭載するセンサに多少の違いはあるが、システム構成は同じである。

本研究では、可燃性ガスを高感度に検出可能な半導体ガスセンサ (TGS2620, フィガロ技研) をこれらのロボットに搭載し、様々な環境でガス濃度分布を測定した。図 3(a)のロボットは二次元超音波風向風速計 (Gill,

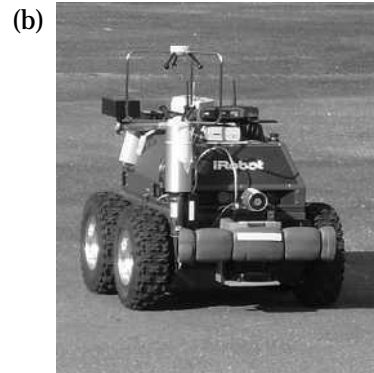


図 3. 匂い・ガス源探知ロボット
(a) 東京農工大学のロボット
(b) オレブロ大学のロボット

WindSonic) を、図 3(b)のロボットは三次元超音波風向風速計 (Young, Model 81000) を搭載しており、その環境における気流の分布も同時に測定することができる。レーザスキャナ (Sick, LMS200) から得られた距離情報と予め取得した環境地図を比較して自己位置同定を行う。与えられた環境の中を移動して各所のガス濃度や風向・風速を測定し、空間分布図を作成する。このようにして得られたデータを使い、現実環境に適用可能な匂い・ガス源探知ロボットを実現するためのガス源探索アルゴリズムを検討する。

4. 研究成果

(1) SPR 嗅覚センサ

図 1 に示す SPR センサを実現するため、本研究では長期安定性やガス感応膜の付加の容易さから、金のナノ周期構造体を用いたセンサを作製した。金とチオール基の間に生じる結合を利用することで、様々な物質を感応膜として容易に固定化することができる。まず、ポリスチレン微粒子 (直径 202 nm) のコロイド溶液をガラス基板上に滴下する。溶媒が乾燥すると、ポリスチレン粒子の自己組織化膜が形成され、ナノスケールの周期構造ができる。この上にクロム薄膜と金薄膜をそれぞれ蒸着とスパッタリングにより形成し、図 1 に示す構造を得た。

この金ナノ構造体の表面に付加するガス

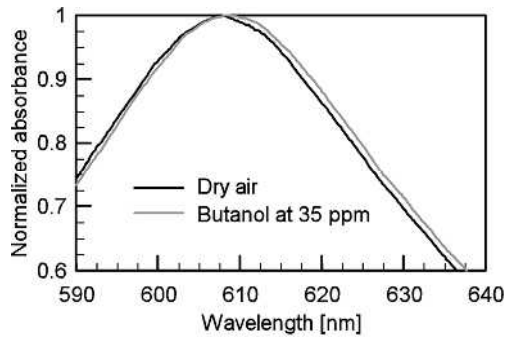


図 4. シクロデキストリンを付加した金ナノ構造体の規格化した吸光度スペクトル

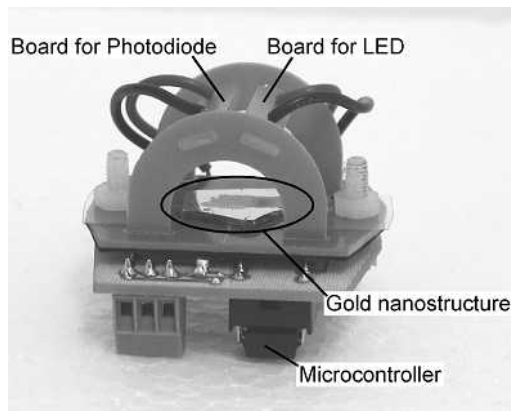


図 5. 作製した SPR ガスセンサモジュール

感応膜として、カリックスアレーンやリポポリマーなど各種の材料を検討した。一例として、heptakis-(2,6-di-O-methyl)- β -cyclodextrin (シクロデキストリン) を付加した金ナノ構造体の吸光度スペクトルを図 4 に示す。白色光源と分光器を用いて吸光度を測定し、ピークの高さが 1 となるように吸光度を規格化してグラフに示した。SPR が励起されると、その波長における反射光の強度が減少する。したがって、吸光度スペクトルのピーク波長は、SPR の励起波長を表している。ブタノールガスにセンサを曝すと、センサ表面に対するガス分子の吸着により、SPR 励起波長が長波長側にシフトした。

作製した SPR ガスセンサを図 5 に示す。匂いガスに対するセンサ応答の測定には、図 1 に示すように LED 光源とフォトダイオードを用いる。ガス分子の吸着により SPR 励起波長がシフトすると、LED の発光波長 (640 nm) における吸光度が変わり、フォトダイオードの短絡光電流が変化する。これをオペアンプで増幅してセンサ出力とする。しかし、金ナノ構造体を大気中にむき出しで用いると、LED 光以外の外乱光もフォトダイオードに入射し、測定に悪影響を及ぼす。そこで図 5 に示すセンサモジュールでは、マイコンを内蔵してロックイン計測を行う。測定した光電流から LED 光の変調に同期した成分のみを

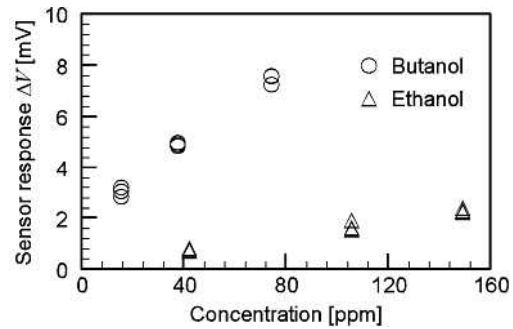


図 6. ブタノールガスとエタノールガスに対する SPR ガスセンサモジュールの応答

取り出し、外乱光の影響を除去した。アルコールガスに対するセンサの出力電圧の測定例を図 6 に示す。SPR センサモジュールの大きさは 36 mm \times 37 mm \times 30 mm であり、電源を供給すれば即座に電圧出力が得られる SPR センサとして世界最小レベルのセンサを実現することができた。

開発した SPR センサは、気中のガス計測のみならず、水中の化学物質検出にも応用できる。そこで、水中化学探査ロボット用の SPR センサモジュールも試作し、水に溶解したアスコルビン酸の検出に成功した。また、抗体やアプタマーなど、生体物質の中には特定の分子と特異的に結合する性質を持つものがある。これを SPR センサ表面に固定化し、対象物質の選択的検出を試みたが、感度が不足しており十分な応答が得られなかった。しかし、光源を LED からレーザーダイオードに換えることにより飛躍的に感度が向上することを既に確かめており、高い選択性を持つバイオ嗅覚センサの実現可能性は十分にある。

(2) 能動ステレオ嗅覚センシングシステム

犬の鼻のように、能動的に空気を吸引しながら匂い・ガスの測定を行うシステムを作製した。外観を図 7 に、構造を図 8 に示す。能動的に気流を起こしながら左右のガスセンサ応答の比較を行うことから、この装置を ASNose (active stereo nose) と名付けた。

ASNose は、吸気と排気を行うためのダイアフラム式エアポンプを二つ備える。犬の左右の鼻孔に見立てた吸気パイプを通して空気を吸引し、その側面に取り付けた半導体ガスセンサ (TGS2620, フィガロ技研) で、吸引した空気に含まれる匂いやガスの濃度を測定する。ポンプの排気口から出た空気は、緩やかに曲げたパイプを通して後方に排出し、犬の呼気の効果を再現する。

この ASNose の周りに生じる流れ場を超音波風向風速計を用いて詳細に測定したところ、空気を取り入れるはずの吸気口から逆流が生じていることが判明した。ダイアフラム式ポンプは、ダイアフラムを振動しながら空気室の容積を変え、空気室の入り口と出口に

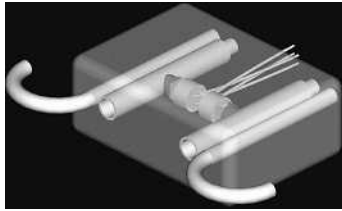


図 7. ASNose の模式図

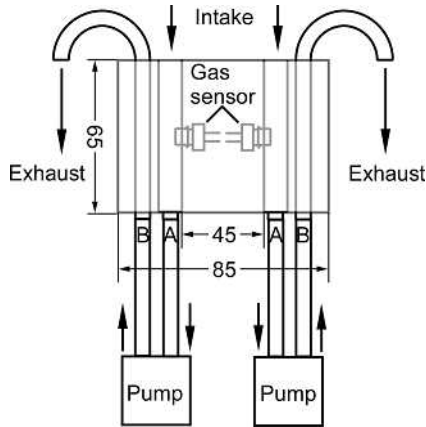


図 8. ASNose の構造

付けた弁により一方向の流れを作り出している。しかし、吸気と排気の切り替え時に弁の開閉が若干遅れるため、多少の逆流がどうしても生じる。

しかし、実際の室内にエタノールガス源を設置して実験を行った結果、吸気口から逆流した流れがエアカーテンのように作用していることが分かった。例えば、ASNose の右側からガスが流れてきた場合、エアカーテンに遮られるため、左側の吸気口へ到達するガスの量は少なくなる。この結果、左右のガスセンサ応答の差が拡大し、ガス源の方向を容易に判定することが可能となる。

このように気流を操作してガス計測の助けとするアイデアは本研究独自のものであり、学会発表を行った博士前期課程の学生が日本機械学会機素潤滑設計部門の一般表彰〔奨励〕を受賞した。ASNose を実際に犬型の 4 足歩行ロボットに取り付け、ガス源を探索する実験も行った。匂いやガスのプルームを風上に辿る従来の探索アルゴリズムの場合、障害物の周囲の気流が乱れた場所で動作しないことが分かっている。そこで、ダンボール箱の側面に空いた穴から匂いが漏れ出している状況を作り、その穴の場所をピンポイントに特定することを試みた。左右のガスセンサ応答を比較しながら ASNose を動かした結果、ガス漏れ箇所を特定することに成功しており、今後の応用が期待される。

(3) 大規模空間におけるガス分布計測

従来の研究では、人工的に整えた環境でガス源探知実験が行われていた。これに対し本

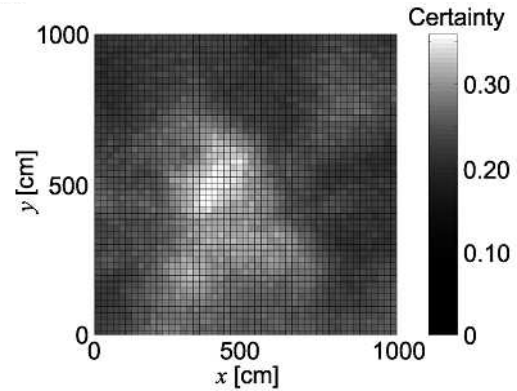


図 9. 領域絞り込み法によるガス源位置の推定結果

研究では、人が手を加えていない環境でガス濃度と気流の分布を計測し、そのデータに基づいてロボットによるガス源探知手法の検討を行った。初めに、微弱な自然対流場が形成された密閉室内でガス源探知を試み、このような環境でも風上にプルームを辿ることによりガス源の探索が可能であることを世界で初めて示した。

次に、長さ 20 m 以上の廊下や、屋外の開けた場所など、様々な環境にロボットを持ち出し、ガス濃度と気流の分布測定を行った。廊下では、ほぼ一様な気流が安定して存在し、密閉室内の状況と大差はなかった。大規模な空間であっても室内であれば、プルームを風上に辿る手法が有効であると分かった。

しかし、屋外では風向の変化が大きく、風上にプルームを辿ることは困難であった。そこで、研究代表者である石田が開発した領域絞り込み法を用い、ガス源位置を推定することを試みた。結果の一例を図 9 に示す。領域絞り込み法では、ガスを検知した地点の風上にガス源がある可能性が高いと仮定する。図 9 では、乱流拡散方程式から得られるプルーム形状の数式モデルを用いてガス源の存在可能性を計算した。ガス源の存在可能性が高いことを示す明るい領域が実際のガス源位置(図の中央)の周りに集中しており、ガス源位置を正しく推定することができている。このように屋外の広い領域でガス源探知を行ったのは世界初の試みであり、本研究で得られた知見が今後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 2 件)

T. Nakamoto and H. Ishida, “Chemical sensing in spatial/temporal domains,” *Chemical Reviews*, **108** (2), 680–704, 2008,

査読有.

H. Ishida, "Do androids dream of the sweet smell of roses?," *IEEE Intelligent Systems*, **21** (4), 83–85, 2006, 査読無.

[学会発表](計14件)

A. Kohnotoh and H. Ishida, "Active stereo olfactory sensing system for localization of gas/odor source," *Proceedings, The Seventh International Conference on Machine Learning and Applications*, San Diego, CA, USA, Dec. 13, 2008, pp. 476–481.

M. Ohashi, Y. Minagawa, Y. Myoren, and H. Ishida, "Crayfish robot employing flow induced by waving to locate a chemical source," *Proceedings, The Seventh International Conference on Machine Learning and Applications*, San Diego, CA, USA, Dec. 13, 2008, pp. 482–488.

M. Trincavelli, M. Reggente, S. Coradeschi, A. Loutfi, H. Ishida, and A. J. Lilienthal, "Towards environmental monitoring with mobile robots," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France, Sep. 24, 2008, pp. 2210–2215.

甲野藤淳, 石田寛, "犬の鼻を模倣した能動ステレオ嗅覚センシングシステム", 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集, vol. 4, 神奈川県横浜市, 2008 年 8 月 6 日, pp. 189–190.

Y. Minagawa, Y. Kagawa, N. Umeda, and H. Ishida, "Compact SPR sensor for underwater chemical sensing robot," *Abstracts of the 12th International Meeting on Chemical Sensors*, Columbus, OH, USA, Jul. 14, 2008, pp. 181–182.

甲野藤淳, 石田寛, "犬型匂い・ガス源探知ロボットのための能動嗅覚センシングシステム", 平成 20 年電気学会全国大会講演論文集, vol. 3, 福岡県福岡市, 2008 年 3 月 21 日, p. 215.

皆川勇一, 香川譲徳, 山崎弘樹, 石田寛, 梅田倫弘, "ロボット嗅覚用小型 SPR センサの研究", 平成 20 年電気学会全国大会講演論文集, vol. 3, 福岡県福岡市, 2008 年 3 月 21 日, p. 245.

Y. Kagawa, M. Satoh, T. Numata, H. Ishida, and N. Umeda, *Proceedings, The 6th IEEE Conference on Sensors*, Atlanta, GA, USA, Oct. 30, 2007, pp. 628–631.

D. Kobayashi and H. Ishida, "Gas/odor source localization in indoor environments with naturally created convective low-velocity airflow fields," *Proceedings of the 24th Sensor Symposium on Sensors, Micromachines, and Applied Systems*, Tokyo,

Japan, Oct. 17, 2007, pp. 470–473.

H. Ishida, "Robotic systems for gas/odor source localization: gap between experiments and real-life situations," *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Workshop Proceedings, Robotic Olfaction: Towards Real World Applications*, Rome, Italy, Apr. 14, 2007, pp. 3–8.

佐藤正敬, 香川譲徳, 沼田孝之, 石田寛, 梅田倫弘, "銀ナノ構造体と LED 光源を用いた小型 SPR ガスセンサ", 平成 19 年電気学会全国大会講演論文集, vol. 3, 富山県富山市, 2007 年 3 月 17 日, p. 227.

小林大輔, 牛久崇, 石田寛, "自律移動ロボットによる室内微風速環境下の匂い・ガス源探知", 平成 19 年電気学会全国大会講演論文集, vol. 3, 富山県富山市, 2007 年 3 月 17 日, p. 229.

T. Ushiku, N. Satoh, H. Ishida, and S. Toyama, "Estimation of gas-source location using gas sensors and ultrasonic anemometer," *Proceedings, The 5th IEEE Conference on Sensors*, Daegu, Korea, Oct. 23, 2006, pp. 420–423.

牛久崇, 佐藤望, 石田寛, 遠山茂樹, "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索アルゴリズムの研究", 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集, vol. 4, 熊本県熊本市, 2006 年 9 月 19 日, pp. 125–126.

[図書](計1件)

石田寛, フレグランスジャーナル社, 嗅覚ディスプレイ におい・香りのマルチメディアツール, 中本高道編著, 2008, pp. 191–198.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石田 寛 (ISHIDA HIROSHI)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・准教授

研究者番号: 80293041

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

遠山 茂樹 (TOYAMA SHIGEKI)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・教授

研究者番号: 20143381

佐藤 令一 (SATO RYOICHI)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・准教授

研究者番号: 30235428