Ein autonomer mobiler Roboter mit elektronischer Nase

Achim Lilienthal, Andreas Zell
Universität Tübingen, WSI-RA,
Köstlinstraße 6, D-72074 Tübingen
{lilien, zell}@informatik.uni-tuebingen.de

Michael Wandel, Udo Weimar
Universität Tübingen, IPC
Auf der Morgenstelle 8, D-72076 Tübingen
{mw, upw}@ipc.uni-tuebingen.de

Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellt erste Ergebnisse des Projekts "Sinnesorgane für mobile Roboter"[1] vor. Ein Teilziel dieser Gemeinschaftsarbeit ist es, einen mobilen Roboter mit einer elektronischen Nase zur Detektion, Lokalisierung und Kartographierung von Gasen zu entwickeln. Die mit dem Roboter ARTHUR durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß mit einem solchen Aufbau eine entfernte Gasquelle in einer natürlichen Umgebung detektiert werden kann. Außerdem ergaben sich Hinweise auf mögliche Optimierungen des Verfahrens bezüglich der Durchführung der Messungen sowie der Anbringung der Sensoren am Roboter.

1 Einleitung

Ein autonomer, mobiler Roboter, der in einer dynamischen Umgebung eingesetzt werden soll, ist darauf angewiesen, die relevanten Eigenschaften seiner Umgebung über eine geeignete Sensorik ermitteln zu können. Zu diesem Zweck stehen eine ganze Reihe verschiedenartiger Sensoren zur Verfügung, deren Funktionsweise zum Teil an biologischen Wahrnehmungssystemen angelehnt ist. Drei der fünf externen Sinne, die uns Menschen zur Verfügung stehen, werden in dieser Hinsicht durch Kamerasysteme (visueller Sinn), Mikrophone (auditiver Sinn) sowie Drucksensoren (taktiler Sinn) repräsentiert. Sensoren, die im Rahmen dieser groben Klassifizierung den chemischen Sinnesorganen (olfaktorischer und gustatorischer Sinn) zugeordnet werden können, wurden bislang wenig auf Robotern eingesetzt [1], [2]. Die Bemühungen, den Geschmackssinn zu automatisieren, befinden sich derzeit im Anfangsstadium [3]. Zudem ist anzunehmen,

[1] Diese Arbeiten wurden im Rahmen des Forschungsschwerpunktprogramms des Landes Baden-Württemberg gefördert.

daß sich die Anwendung entsprechender Sensoren im wesentlichen auf das Gebiet der Nahrungsmittelprüfung beschränken dürfte [4].

Auf dem unter dem Schlagwort "elektronische Nasen" bekannten Forschungsgebiet ist die Entwicklung weiter fortgeschritten. Seit einiger Zeit werden unter dieser Bezeichnung Systeme zur Detektion und Identifizierung von flüchtigen Substanzen untersucht und unter Laborbedingungen angewandt [5]-[12]. Der Begriff der elektronischen Nase [13] umfaßt in seiner üblichen Definition [14] neben einem Array von chemischen Sensoren auch ein nachgeschaltetes Mustererkennungssystem, welches die Identifizierung einzelner Gerüche ermöglicht.

Der Einsatz eines solchen inzwischen auch kommerziell erhältlichen Systems auf einem autonomen mobilen Roboter ist besonders im Hinblick auf die Entwicklung eines elektronischen Wachmanns wünschenswert, da auf diese Weise ein Roboter befähigt werden könnte, beispielsweise einen Feuerherd, ausströmendes Gas oder auslaufendes Lösungsmittel zu detektieren und zu orten.

Um grundlegende Erkenntnise über die Möglichkeit eines solchen Einsatzes zu gewinnen, wurde der autonome mobile Roboter ARTHUR mit einer elektronischen Nase ausgestattet und unter "natürlichen" Bedingungen getestet. Dies bedeutet, daß wichtige Versuchsparameter wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit im Vergleich zu Durchführung im Labor relativ großen, nicht kontrollierbaren Schwankungen unterworfen sind.

Die durchgeführten Experimente sollten Aufschluß über folgende grundsätzlichen Fragen geben:

- Ist es prinzipiell möglich, mit einer auf einem mobilen Roboter angebrachten elektronischen Nase eine erhöhte Konzentration einer flüchtigen Substanz auch in einer "natürlichen" Umgebung nachzuweisen ?
- Ist unter den angeführten Bedingungen die Detektion eines Konzentrations-Gradienten und somit die Ortung der Gasquelle möglich ?
- In welcher Weise kann durch die einstellbaren Versuchsparameter die Detektion und Ortung der Gasquelle optimiert werden ?

2 Systemaufbau

Zur Durchführung der Experimente wurde der auf der Basis des mobilen Outdoor-Roboters ATRV-Junior der Firma RWI weiterentwickelte Roboter ARTHUR (siehe Abb. 1) mit einer elektronischen Nase ausgestattet. Die im folgenden beschriebenen Versuche zielten nicht auf eine Identifizierung von Gasen ab. Daher wurde versucht, den Aufbau flexibel zu halten und hinsichtlich der Detektion eines festgelegten Stoffes (Ethanol, Aceton) zu optimieren.

2.1 Die elektronische Nase

Als Messsystem wurde das kommerziell erhältliche VOCmeter Vario [15] gewählt (siehe Abb. 1). Es besteht aus einem Basisgerät der Größe $19 \times 12 \times 6\,\mathrm{cm}$, welches mit bis zu 8 externen Sensoreinheiten bestückt werden kann. Das VOCmeter eignet sich auf Grund seiner geringen Größe, des geringen Stromverbrauchs (Versorgung aus Roboterbatterien) und der Möglichkeit, Sensoren extern anzubringen, sehr gut für diesen Einsatzzweck. Die Messwerte der Sensoren werden über eine RS232-Schnittstelle direkt an den Steuerrechner des Roboters übermittelt.

Bei den Sensoreinheiten handelt es sich um 5cm lange und 8mm dicke Edelstahlröhrchen, die die gesamte für den jeweiligen Sensortyp benötigte Elektronik enthalten. Sie können durch einfaches Umstecken in kurzer Zeit eingesetzt bzw. ausgetauscht werden. Bei den Messungen wurden Metalloxidsensoren (MOX: Metall Oxide) des Typs TGS 2620 [16], die sich besonders gut zur Detektion von Ethanol und Aceton eignen, verwendet.

Die eigentliche Messgröße dieser Sensoren ist der Widerstand einer geheizten Schicht aus gesintertem Metalloxid (hier SnO_2). Bei hohen Temperaturen (über 300 °C) adsorbiert Sauerstoff aus der Umgebung an der Oberfläche dieser Schicht und bindet dabei freie Elektronen. Die auf diese Weise angelagerten negativ geladenen Sauerstoffionen führen insbesondere dazu, daß an den Korngrenzen Potentialbarrieren entstehen, die den Widerstand über der Metalloxidschicht R_S erhöhen. In Gegenwart eines (bei diesen Temperaturen) brennbaren Gases läuft eine zweite Reaktion ab, die den Widerstand verringert. Die Oxidationsreaktion führt zu einer Abnahme der Konzentration von Sauerstoffionen in der Oberfläche und somit zu einer Erniedrigung der Potentialbarrieren an den Korngrenzen. Eine ansteigende Konzentration eines brennbaren Gases macht sich also durch einen absinkenden Widerstand R_S bemerkbar.

Die zunächst ebenfalls eingesetzten Schwingquarzsensoren (QMB: Quarz Microbalance) zeigten im Rahmen der Versuchsbedingungen eine zu geringe Sensitivität und wurden daher zur Auswertung nicht herangezogen.

Um eine Positionierung der Sensormodule auch bei stehendem Roboter zu ermöglichen, wurden die Sensormodule am Ende zweier 60 cm langen Führungsschienen aus Aluminium angebracht, die über handelsübliche Servomotoren in einer horizontalen Ebene gedreht werden können. Die Führungsschienen sind an der Frontseite des Roboters gelagert, wobei eine um die Servomotoren angebrachte U-förmige Kunststoffschiene die Auflagekräfte mindert (siehe Abb. 1). Da im Verlauf der durchgeführten Versuche klar wurde, daß sich die Qualität des Sensorsignals bei stehendem Roboter wesentlich verschlechtert, konnte diese Möglichkeit, die Sensormodule zu positionieren, bislang nicht gewinnbringend eingesetzt werden.

3 Versuchsdurchführung

Um die Ausbildung eines Konzentrationsgradienten beobachten zu können und dabei den Einfluss von Luftströmungen möglichst gering zu halten, sollte das Experiment in einem großen, nicht belüfteten Raum stattfinden. Zu diesem Zweck konnte ein ca. 20 m langer und 2.5 m breiter Flur in einer leerstehenden Wohnung benutzt werden. Die Fenster und Türen blieben während der Versuchsdurchführung geschlossen.

Im Lauf einer ersten Messreihe wurde in der Mitte des Flures mehrmals mit einer definierten Geschwindigkeit "eindimensional" auf- und abgefahren und sowohl die aktuelle Position, als auch die Messwerte der Gassensoren und die mit einem ortsfesten Thermometer gemessene Temperatur ständig protokolliert. Die Gassensoren liefern Werte mit einer Frequenz von 1 Hz. Sie müssen zu Beginn

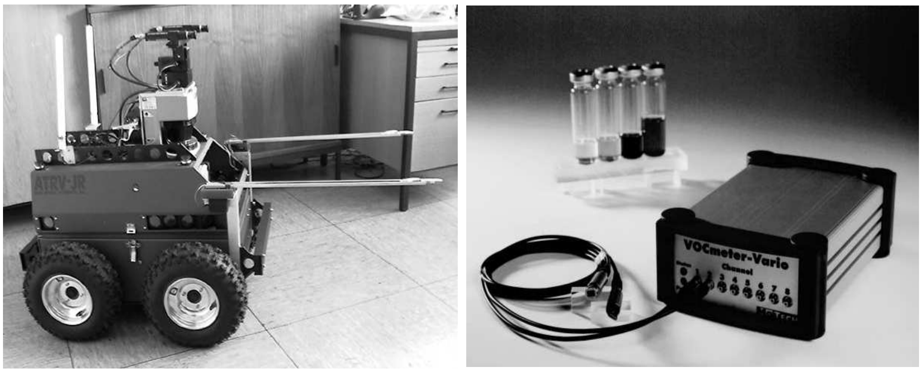

Abbildung 1: Der autonome, mobile Roboter Arthur (links) und das Basisgerät der elektronischen Nase [15] (rechts). Die zylinderförmigen Sensoreinheiten sind in der linken Abbildung zu erkennen. Sie ragen leicht über die an der Frontseite des Roboters angebrachten Führungsschienen hinaus.

eines Versuchstags zunächst für ca. eine Stunde betrieben werden, bevor sie ihren Gleichgewichtszustand erreichen und konstante Werte liefern.

Am Anfang einer Messreihe standen in jedem Fall einige Referenzmessungen, bei der keine Gasquelle vorhanden war. Im Unterschied dazu wurde vor den folgenden Fahrten (zum Zeitpunkt $t = 0\,s$) ein mit $0.5\,\mathrm{l}$ unvergälltem Ethanol gefülltes Becherglas mit einer Grundfläche von etwa $130\,cm^2$ am Ende des Ganges ($s = 0\,m$) platziert. Dieser Aufbau entspricht der Anforderung, in einer nicht eigens dafür präparierten Umgebung ein Leck anhand des Geruchs der sich ausbildenden Pfütze zu detektieren.

Aufgrund der aktivierten Hindernissvermeidung lag der Umkehrpunkt der durchgeführten Fahrten etwa $50\,cm$ vor der Ethanolprobe.

Um Hinweise auf eventuelle störende Einflüsse aufgrund spezieller Eigenschaften der benutzten Altbauwohnung zu bekommen, wurden das beschriebene Experiment auf einem ca. $30\,m$ langen und $2.2\,\mathrm{m}$ breiten Gang eines Universitätsgebäudes wiederholt. Da der leicht belüftetete Flur (Deckenabsaugung) zu einer Seite hin offen ist, und sich bei der Durchführung der Versuche (auch in späten Abendstunden) ein gewisser Personenverkehr nicht vermeiden ließ, mußten die Bedingungen in dieser zweiten Versuchsreihe als schwieriger angesehen werden.

Die Versuche wurden zudem mit kleineren Effusionsgefäßen (mit einer Grundfläche von $60\,cm^2$ bzw. $20\,cm^2$) durchgeführt, wobei die Verwendung der kleinsten Schale es ermöglichte, die Geruchsquelle nicht am Ende des Ganges, sondern in seiner Mitte aufzustellen und den Roboter über das ca. $2.5\,cm$ tiefe Gefäß hinweg fahren zu lassen.

Als Analyt wurden Ethanol und Aceton verwendet, da für diese Substanzen sensitive Sensoren zur Verfügung stehen und die Handhabung als unproblematisch anzusehen ist.

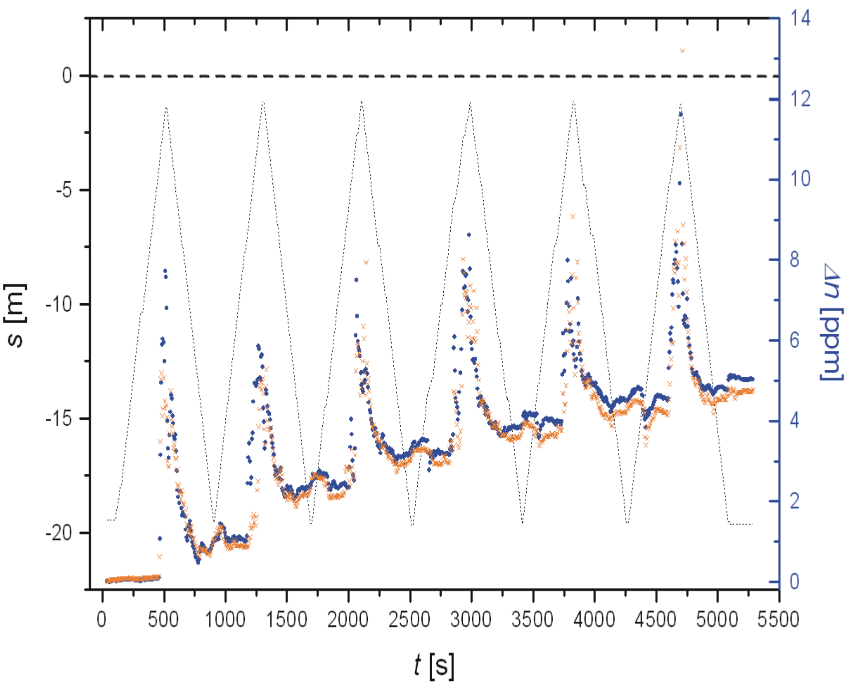

Abbildung 2: Messwerte der MOX-Sensoren (Altbauwohnung, mit Ethanol gefülltes $130\,cm^2$-Effusionsgefäß am Ende des Ganges, Fahrtgeschwindigkeit: $5\,cm/s$). Die gepunktete Linie gibt die Entfernung der Sensoren von der Ethanolquelle an. Die gemessenen Konzentrationsdifferenzen sind mit einem Kreuz (linker MOX-Sensor) bzw. einem ausgefüllten Kreis (rechter MOX-Sensor) dargestellt.

4 Ergebnisse

In den Abbildungen 2-4 sind die auf die Basislinie korrigierten Werte der MOX-Sensoren gegen die seit dem Öffnen der Gasquelle vergangene Zeit aufgetragen. Die angegebenen Werte beruhen auf Referenzmessungen an einer Gasmischanlage. Da hierbei die Umgebungsbedingungen nicht exakt reproduziert werden konnten, müssen die eingetragenen Konzentrationsdifferenzen als Richtwert der Peakhöhe angesehen werden.

Außerdem ist in das Diagramm bezüglich einer zweiten y-Achse auch die Bewegung des Roboters in Form der gegen die Zeit aufgetragenen gefahrenen Strecke eingezeichnet.

Die Abb. 2 zeigt Messwerte der MOX-Sensoren während einer in der Altbauwohnung durchgeführten Versuchsreihe, in der sich der Roboter mit einer Geschwindigkeit von $5\,cm/s$ bewegte. Es ist klar zu erkennen, daß die Meßkurve in der Nähe der Gasquelle stark ansteigt. Weiterhin ist die langsame Erhöhung der Basislinie während der Dauer der Messung ($1.5\,h$) zu sehen. Hierin zeigt sich die allmähliche Ausbreitung des flüchtigen Ethanols im Flur. Aufgrund der niedrigen Diffusionskonstanten von Ethanol (siehe [1]) müssen hierfür die herrschenden Strömungsverhältnisse verantwortlich sein. Es kann durchaus nicht ausgeschlossen werden, daß die Fahrt des Roboters selbst die Ausbreitung des

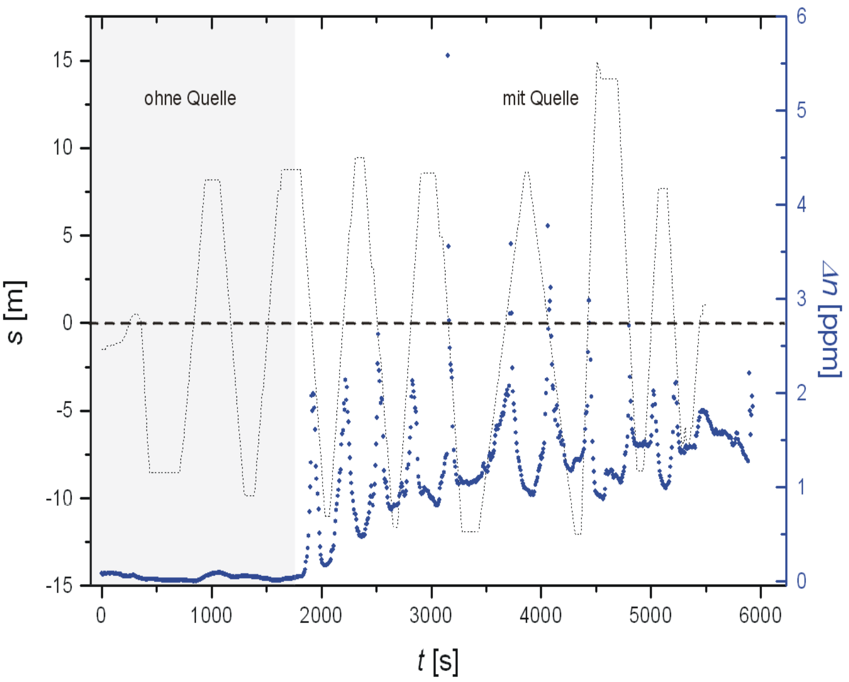

Abbildung 3: Messwerte eines MOX-Sensors (Flur des Universitätsgebäudes, mit Aceton gefülltes $20\,cm^2$-Effusionsgefäß in der Mitte des Ganges, verschiedene Fahrtgeschwindigkeiten). Die gepunktete Linie gibt die Entfernung der Sensoren von der Acetonquelle an. Die gemessenen Konzentrationsdifferenzen sind mit ausgefüllten Kreis dargestellt.

Analyten fördert.

Dagegen zeigte sich auf den Referenzfahrten ohne Gasquelle ein völlig anderes Bild. Die Messwerte der MOX-Sensoren blieben während der Fahrt im wesentlichen konstant. Ein Anstieg der Basislinie konnte, nachdem die Gassensoren ihren Gleichgewichtszustand erreicht haben, nicht beobachtet werden (siehe Abb. 3).

Auch bei Verwendung eines kleineren Effusionsgefäßes ließ sich die Gasquelle zweifelsfrei detektieren. Dies ist Abb. 3 zu sehen, in der Messwerte gezeigt sind, die im Flur des Universitätsgebäudes aufgenommen wurden. Im Unterschied zu den in Abb. 2 dargestellten Ergebnissen fährt der Roboter in diesem Fall in der Mitte des Ganges über die Gasquelle hinweg. Die Präsenz des Analyten zeigt sich auch in diesem Fall in eindeutigen Peaks, obwohl in diesem Versuch das kleinste Effusionsgefäß ($20\,cm^2$) verwendet wurde und im Lauf des Experimentes immer wieder kurzzeitig Personen den Flur durchquerten.

Bei der Betrachtung der Messwerte zeigte sich weiterhin, daß der bei Annäherung an die Quelle auftretendene Peak bei zu geringer Fahrtgeschwindigkeit wenig ausgeprägt erscheint. Dieser Effekt läßt sich sehr deutlich anhand der ersten drei Anfahrten in Abb. 4 sehen. Bei der ersten Anfahrt bewegt sich der Roboter mit einer Geschwindigkeit von $5\,cm/s$. Der Anstieg der Messwerte während dieser Fahrt ist weniger stark ausgeprägt und insgesamt niedriger

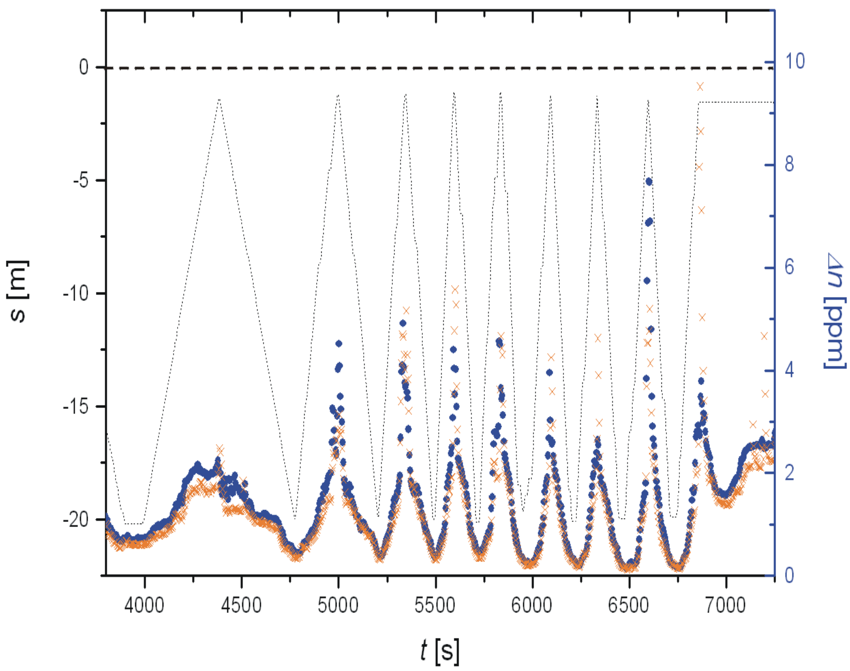

Abbildung 4: Messwerte der MOX-Sensoren (MOX) (Altbauwohnung, mit Ethanol gefülltes 130 cm^2-Effusionsgefäß am Ende des Ganges, verschiedene Fahrtgeschwindigkeiten). Die gepunktete Linie gibt die Entfernung der Sensoren von der Ethanolquelle an. Die gemessenen Konzentrationsdifferenzen sind mit einem Kreuz (linker MOX-Sensor) bzw. einem ausgefüllten Kreis (rechter MOX-Sensor) dargestellt.

als bei den folgenden Anfahrten, die mit einer Geschwindigkeit von 10 cm/s und 15 cm/s durchgeführt wurden. Es ist offensichtlich bei Verwendung von Metalloxid-Gassensoren notwendig, durch die Fahrtbewegung für einen Nachstrom des Analyten zu sorgen. Vermutlich kann über einen rein diffusionskontrollierten Austauschprozeß die katalytische Umsetzung des Analyten nicht ausgeglichen werden. Besonders deutlich wird dieser Effekt auch durch die letzte in Abb. 4 gezeigte Anfahrt. Solange der Roboter mit einer Geschwindigkeit von 15 cm/s auf die Quelle zufährt, zeigt sich der erwartete Anstieg der Messwerte. Sobald die Bewegung aber gestoppt wird, fallen die Messwerte drastisch ab, obwohl der Roboter zu diesem Zeitpunkt direkt vor dem mit Ethanol gefüllten Becherglas steht.

Aus diesem Grund ist es nicht verwunderlich, daß die Messkurven zusätzliche Peaks aufweisen. Es ist anzunehmen, daß sie durch schwache Luftbewegungen hervorgerufen werden, die auch bei geschlossenen Türen und Fenstern nicht zu vermeiden sind. Die Türen schließen den Raum natürlich nicht hermetisch gegen die Außenwelt ab, so daß sich Strömungen durch Zugluft ergeben. Zudem wird diese unregelmäßige Zugluft von ortsfesten Konvektionsströmungen überlagert, die durch Schwankungen der lokalen Temperatur (etwa eine Erwärmung unter einem Dachfenster, durch das die Sonne in den Raum scheint) bewirkt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, daß es mit dem vorgestellten mobilen Robotersystem möglich ist, eine flüchtige Substanz über eine größere Entfernung hinweg zu detektieren. Dies konnte vor dem Hintergrund einer natürlichen Umgebung auch für relativ schwache Gasqellen bestätigt werden.

Mit dem verwendeten Robotersystem erscheint die Ortung einer Gasquelle ebenfalls möglich. Um diesen Punkt demonstrieren zu können, ist vorgesehen, mit dem Roboter automatisch eine Geruchskarte einer 2-dimensionalen Grundfläche erstellen zu lassen und auf diese Weise beispielsweise eine Ethanolquelle in einer Turnhalle zu lokalisieren.

Desweiteren soll versucht werden, die störenden Peaks, die das Sensorsignal besonders bei stehendem Roboter überlagern, durch eine geeignete Ansaugvorrichtung zu eliminieren, welche für einen zusätzlichen Luftstrom am Ort der MOX-Sensoren sorgt.

Wichtig für die weitere Arbeit sind zudem Verbesserungen des auf dem Roboter angebrachten Sensorsystems bezüglich der Anbringung und Aerodynamik.

Literatur

[1] Nakamoto T., Ishida H., Moriizumi T.: A Sensing System for Odor Plumes. Analytical Chem. News & Features, August 1, 1999

[2] Sharpe, T.;Webb, B.: Simulated and situated models of chemical trail following in ants. From Animals to Animats 5: Proceedings of the 5th Conference on Simulation of Adaptive Behaviour 195-204

[3] Legin A., Rudinitskaya A., Vlasov Y., Di Natale C., Davide F., D'Amico A.: Tasting of beverages using an electronic tongue based on potentiometric sensor array. Technical Digest of Eurosensors X, Leuven, Belgium (1996) 427-430

[4] Winquist F., Wide P., Lundström I.: A developing concept - The combination of electronic noses, electronic tongues and additional electronic senses. ISOEN'99, (1999) 251-254

[5] Persaud K., Dodd G. H.: Analysis of discrimination mechanisms of the mammalian olfactory system using a model nose. Nature 299 (1982) 352-355

[6] Ikegami A., Kaneyasu M.: Olfactory detection using integrated sensors. Proceedings of the 3rd International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 85), IEEE Press, New York (1985) 136-139

[7] Carey W. P., Beebe K. R., Kowalski B. R.: Selection of adsorbates for chemical sensor arrays by pattern recognition. Anal. Chem. 58 (1986) 149-153

[8] Ballantine D. S., Rose S. L., Grate J. W., Wohltjen H.: Correlation of surface acoustic wave device coating responses with solubility properties and chemical structure using pattern recognition. Anal. Chem. 58 (1986) 3058-3066

[9] Carey W. P., Kowalski B. R.: Chemical piezoelectric sensor and sensor array characterization. Anal. Chem. 58 (1986) 3077-3084

[10] Kaneyasu M., Ikegami A., Arima H., Iwanga S.: Smell identification using a thick-film hybrid gas sensor. IEEE Trans. Components, Hybrids Manufact. Technol., CHMT-10 (1987) 267-273

[11] Ulmer H., Mitrovics J., Noetzel G., Weimar U., Göpel W.: Odours and flavours identified with hybrid modular sensor systems. ACS Symposium Series: "Chemical Sensors and Interfacial Design" 31 (1998) 307-315

[12] Mitrovics J., Ulmer H., Weimar U., Göpel W. Modular Sensor Systems for Gas Sensing and Odour Monitoring: The MOSES Concept. ACS Symposium Series: "Chemical Sensors and Interfacial Design" 31 (1998) 307-315

[13] Gardner J. W.: Pattern recognition in the Warwick electronic nose. 8th International Congress of the European Chemoreception Research Organisation, Coventry, UK (1988) 9

[14] Gardner J. W., Bartlett P. N.: A Brief Hystory of Electronic Noses. Sensors and Actuators B 18-19 (1994), 211-220

[15] MoTech Reutlingen: Produktbeschreibung VOCmeter-Vario. *www.motech.de/pdf/Vario.pdf*

[16] Figaro (Nara, Japan): *www.figarosensor.com*