

氏名	お が わ し げ き 小 川 茂 樹		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成24年3月27日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) ナノメカニクス専攻		
学位論文題目	高機能通信設備センシングシステムの研究		
指導教員	東北大学教授 桑野 博喜		
論文審査委員	主査 東北大学教授 桑野 博喜	東北大学教授 羽根 一博	
	東北大学教授 高 偉	東北大学講師 長澤 純人	

論文内容要旨

電話網、IP網などの一般公衆通信網設備は大規模な設備であり、それらの設備を経済的、効率的、かつ高信頼度で保守、運用することが期待されている。特に我が国においては、東日本大震災や阪神淡路大震災に見られるように、地震やその後に生じた火災等によって、通信設備が大きなダメージを受ける可能性がある。このため、電話管路の安全性確保が必要であり、また通信装置、とう道などの異常検知、および地下環境汚染防止のため、地下燃料タンクの油漏洩の検知が必要である。これらに対応するには、各種センサを利用した設備センシングシステムの構築が有効である。

具体的には、電話ケーブルを収容している地下電話管路においては、老朽化のため、多条敷設における再利用や耐震等に問題があり、補修すべきものが少なくない。補修すべきかどうかの判断のためには、管路内部の変形や腐食状況を定量的に把握することが必要である。このためには、管路内部を正確に計測できるセンシングシステムの開発が望まれる。

また、電話交換機などの通信装置を設置している機械室における火災は、社会に重大な影響を与えるため、火災の発生を迅速に検知することが不可欠である。このためには、従来の煙や熱による検知ではなく、火災発生前のニオイの発生段階での検知が有効であり、これらに適用可能な高感度なニオイセンシングシステムの開発が望まれる。

一方、大規模公衆通信網事業者(例えばNTT)においては、停電時の電力を確保するために、発電機を設置しており、その燃料となる軽油を貯蔵する燃料タンクを各局舎の地下に設置している。地下燃料タンクは、防災の観点から、油量の遠隔監視が必要であり、このためには、既設のタンクに取り付け可能な防爆型液面レベル計による油量センシングシステムの開発が望まれる。

本研究の目的は、上述した3つの通信設備、地下電話管路、通信装置設置室、および地下燃料タンクの保守、運用を目的とした設備センシングシステムを構築するため、光センサ、水晶振動式ニオイセンサ、および超音波センサを用いた高機能な検出方法、制御方法を提案し、装置化して、実験により、その有効性を実証することである。

以下に本論文の概要を述べる。

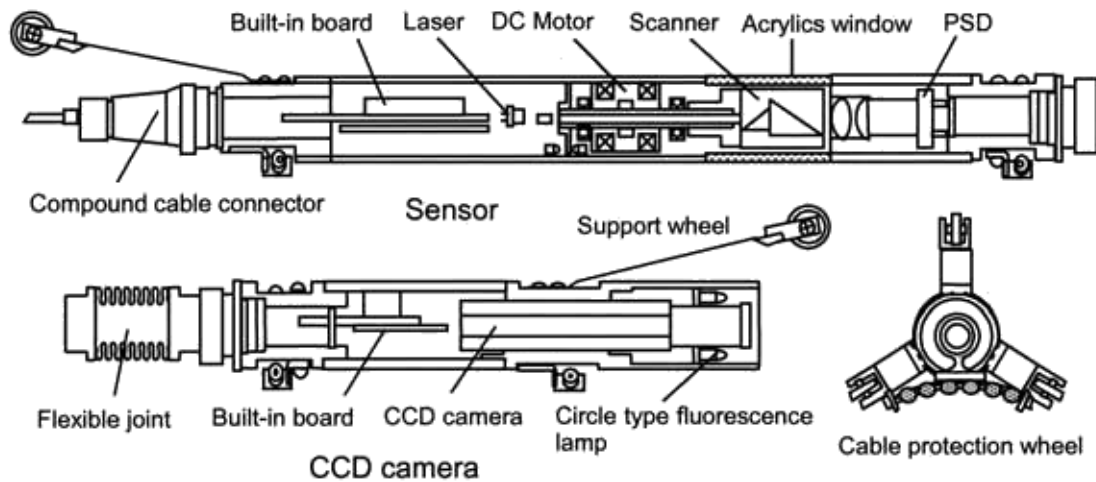
第1章では、本研究の背景、目的、論文の構成について述べている。

第2章では、地下電話管路保守用内面形状センシングシステムについて述べている。管路内面形状を

定量的に測定する方法として、レーザービームの高速回転走査による測定方法を考案し、管路内面形状を三次元で表示できるシステムを開発した。本章では、開発したシステムの測定原理、システム構成、信号処理方法を述べる。本システムを用いたフィールド実験を実施した結果、管路の扁平、穴あき、土砂詰まり、屈曲、継手離脱などの不良箇所の検出が可能なことを確認し、本システムが内面形状測定に有効であることを示した。

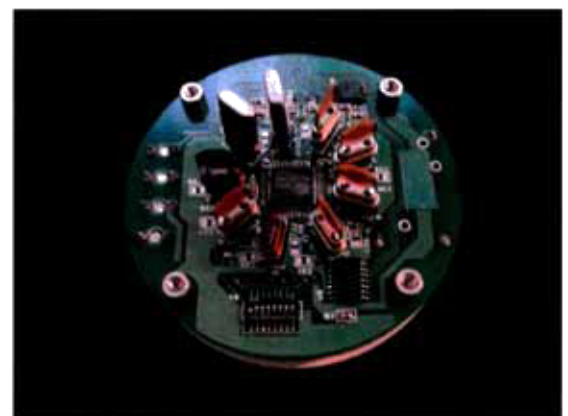
また、本システムにおいては、管壁の反射率の急激な変動に対応して、レーザービームのパワーを制御することが不可欠である。このため、高速な応答が可能なアナログ回路を用い、受光量を一定に保つための制御系と、レーザーの破損防止のためレーザーの最大発光量を最大定格以下に常に保つ制御系を連動させた二重ループからなる帰還回路を構成した。これらの制御系をモデル化して応答特性を計算し、各定数を適切に設定した。この結果、反射率の比率が 15 倍以上ある急激な変動に対しても、良好な制御が実現でき、本システムが管壁の多様な反射率に有効であることを示した。

さらに、管路の内面形状だけでなく、受光量や反射率の情報から、管路の材質や腐食状況など、管路の内面性状を推定する方法を提案した。



開発した管路検査装置の構造

第 3 章では、通信装置設置室保守用ニオイセンシングシステムについて述べている。火災の発生を煙が出る前のニオイの発生段階で、早期に検知することを目的のひとつとして、ニオイセンサを用いたセンシングシステムを開発した。ニオイセンサとしては、水晶振動子を用いた。これは、水晶振動子の表面に形成した高分子の吸着膜にニオイ分子が吸着することによって生ずる質量の変化を、水晶振動子の共振周波数の変化として検出するものであるが、高感度の測定のためには、周波数の変化を高分解能で検出することが必要である。そこで、センサプローブの周波数と基準周波数の差の周波数を発生させ、その周期を分周した後、その周期の逆数から周波数を求める新しい方式の周波数カウンタを考案し、これらの機能を持つ回路を LSI 化した。この結果、小型のセンサユニットに収容可能



開発した LSI 搭載小型センサユニット

で、かつ 0.1~0.2Hz の高分解能で周波数の検出が可能となり、濃度が ppb オーダの揮発性物質の検出にも適用可能となった。

また、小型センサユニットを複数台、直列につないで火災検知システムを構成し、これを用いたフィールド実験においては、発火前の加熱による燃焼ガスの検出が可能であることを確認した。

また、この水晶振動子式ニオイセンサは、温湿度の変動に極めて敏感であり、これらが外乱となって、測定値に影響を与える。したがって、高湿度の環境下や低濃度のガス測定に対応しうる実用的なセンシングシステム構築のためには、温湿度を一定に保つことが必要となる。そこで、一般的なニオイを対象としたサンプルガスの温湿度制御法、および水の異常臭等を対象とした比較的低い湿度設定が可能なサンプルガスの温湿度制御方法を考案した。

さらに、ニオイセンシングシステムの応用として、油等が河川に流出する水質事故を早期に発見することを目的とした水の異状臭検出システムを開発した。種々の油に対するセンサ応答を測定すると共に、還流水路を用いたフィールド実験により、本システムの有効性を示した。

第4章では、地下燃料タンク保守用油量センシングシステムについて述べている。油量を測定する液面レベル計のセンサとして、超音波センサを用いた。超音波センサの問題点は、温度によって超音波の伝播速度が変動し、測定誤差が生じることであるが、温度変化に影響されない測定方法を考案し、高精度で実用的な防爆構造の液面レベル計を開発した。

また、本レベル計の検出回路においては、アナログ除算器が不可欠であるが、単電源で動作可能な安価な時分割型除算器を考案し、本検出回路に適用した。

また、液面レベルを油量に変換して表示する装置として、装置単体で液面レベルから油量への校正曲線を設定できる安価な表示装置を考案し、装置化した。

さらに、超音波素子の出力を増やすことなく、現状の素子のままで、測定範囲を拡大させるための信号処理方法を考案し、本検出回路に適用した。

本液面レベル計を用いた $-10^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$ における環境試験では、誤差が $\pm 5\text{mm}$ 以内、および1年半に及ぶ室温での長期試験（測定距離：2200mm）では、誤差の変動が $\pm 2\text{mm}$ 以内であることを示した。

第5章では、結論、および今後の課題・展開について述べている。

欧米においては、電話管路の検査はほとんど行われておらず、本研究において実用化した電話管路の内面形状を定量的に表示できるシステムは、世界で初めてである。また、水晶振動子式ニオイセンサを用いたシステムは、国内外でも研究開発されているが、高分解能の周波数カウンタをLSI化し、センサプローブを多数搭載可能な小型のセンサユニットの実用化は、外国にも例を見ない。さらに、液面レベル計は多種類の方式のものが開発され、商品化されているが、取り付け空間に制約のある既設タンクに適用でき、高精度かつ防爆構造のものは、市販品には見当たらず、本研究において初めて開発したものである。開発した液面レベル計はNTTをはじめとした全国550箇所の地下燃料タンクに設置され、運用されている。

以上のように、本研究で開発した3つのセンシングシステムは、世界的に見ても、精度、価格、有用性の面で、最も優位なものである。



開発した超音波式液面レベル計

論文審査結果の要旨

電話網、IP網等の一般公衆電気通信設備においては、それらの設備を経済的、効率的かつ高信頼度で保守・運用することが期待されている。そのためには、各種センサを利用した高機能な設備センシングシステムの構築が必要である。本論文は、地下電話管路、通信装置設置室、および地下燃料タンクの3つの通信設備の保守・運用を目的とした設備センシングシステムを構築するために、それぞれに対して、光センサ、水晶振動式ニオイセンサ、および超音波センサを用いた高機能な検出方法・制御方法を考案するとともに、システム化を行いフィールド実験により、その有効性を明らかにするものであり、全編5章からなる。

第1章では、序論として、本研究の背景、目的および課題と各章における具体的な研究の内容を述べている。

第2章では、地下電話管路用内面形状センシングシステムの研究開発について述べている。管路の内面形状を定量的に測定する方法として、レーザビームの回転走査による測定方法を考案し、管路内面形状を3次元で表示するシステムを開発している。実管路に適用し、本システムが管路の不良箇所の検出に有効であることを明らかにしている。また、レーザビームの高速回転走査に伴う管壁の急激な反射率の変動に対して、受光量を一定に保つために必要なレーザパワー制御を実現するため、制御系をモデル化して応答性を計算し、各回路定数を適切に設定することにより、反射率の比率が大きな変動に対しても、正常な測定を維持できることを示している。さらに、管路の材質や腐食状況等の管路の内面性状を、受光量や反射率の情報から推定する方法を提案している。これらはフィールド実験により検証され、電話管路のみならず、化学プラントパイプなどにも適用できる重要な知見である。

第3章では、通信装置設置室保守用ニオイセンシングシステムの研究開発について述べている。火災の発生を発火前の早期に検出することを目的のひとつとして、ニオイセンサを用いたセンシングシステムを開発している。ニオイセンサとして、水晶振動子を用い、高感度の検出を実現するため、その共振周波数の変化を高分解能で検出する方法を考案し、周波数カウンタとしてLSI化して小型のセンサユニットに搭載し、火災検知システムに適用している。フィールド実験の結果、発火前に発生する燃焼ガスの検出が可能であることを明らかにしている。また、水晶振動式ニオイセンサを高湿度の環境下や低濃度のガス測定に用いる場合、外乱となる温湿度の変動を抑えることが必要となる。そこで、一般的なニオイを対象としたサンプルガスの温湿度制御方法と、水のニオイなどを対象とした比較的低い湿度設定が可能なサンプルガスの温湿度制御方法を考案している。さらに、上記の技術を応用して、油などが河川に流出する水質事故を早期に発見することを目的とした水の異常臭検出システムを開発している。本論文の新しいニオイセンシングが、新しい応用の可能性を明らかにしていることは工学上、重要な知見である。

第4章では、地下燃料タンク保守用油量センシングシステムの研究開発について述べている。油量を測定するセンサとして、超音波を用い、温度変化に影響されない測定方法を考案し、高精度で実用的な防爆型液面レベル計を開発している。また、本レベルの検出回路の主要な構成要素であるアナログ除算器として、単電源動作が可能で安価な時分割型除算器を考案し、本検出回路に適用している。液面レベルを油量に変換して表示する装置として、装置単体で校正曲線を設定できる安価な装置も考案している。さらに、現状の超音波素子のままで、測定範囲を拡大するための制御方法を考案し、本検出回路に適用している。本センシングシステムにおいて、 -20°C ～ $+40^{\circ}\text{C}$ における環境試験、および長期試験を実施

し、仕様を十分満たしていることを明らかにしている。本システムは商用化され、予備発電システムの燃料タンクの液面レベルモニタリングに供されていることは工学上重要な成果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、電気通信設備保守および運用において管路検査装置、ニオイセンシングシステム、地下燃料タンク油量センシングシステムの開発に成功するとともにその設計指針を明らかにしたものである。通信用センシングシステムの高機能化に有用な要素技術およびシステム化技術の開発に貢献し、ナノメカニクスおよび情報ナノシステム工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。