

自律移動型小型ロボットのための視覚・聴覚機構の開発

Development of visual and audio system for small autonomous mobile robots



松本 光春 (Mitsuharu MATSUMOTO Dr.Eng.)

電気通信大学先端領域教育研究センター特任助教

(University of electro-communications, Assistant professor,
Center for Frontier Science and Engineering.)

IEEE 電子情報通信学会 会員

受賞：第4回 FOST 熊田賞 (2011年) Best paper award in International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (2010年) Outstanding paper award in International Conference on Control, Automation and Systems (2010年) Best paper award in the area of intelligent system in 2nd International Conference on Human System Interaction (2009年) エリクソン・ヤング・サイエンティスト・アワード 2009 (2009年) 3rd place award in the IEEE 2008 International Student Experimental Hands-on Project Competition via Internet on Intelligent Mechatronics and Automation (2008年)

著書：センサが一番わかる(しくみ図解) 技術評論社 2012年 PowerPoint2010 ユーザーハンドブック 秀和システム 2010年 C#のドリル ソシム株式会社 2008年 次世代センサハンドブック (分担執筆) 培風館 2008年 10日でおぼえる Fedora Core6 サーバ構築・管理入門教室 2006年 LATEX 文書&デザイン指定 ユーザー便利帳 秀和システム 2006年 PowerPoint スライド&プレゼン ユーザー便利帳 秀和システム 2005年 10日でおぼえる Fedora Core4 サーバ構築・管理入門教室 翔泳社 2005年 UNIX ユーザーコマンドリファレンス ユーザー便利帳 秀和システム 2005年 Apache 辞典 翔泳社 2004年 10日でおぼえる Red Hat Linux9 サーバ構築・管理入門教室 翔泳社 2003年 など

研究専門分野：知覚情報処理 知能ロボティクス

あらまし 本研究は環境の中で能動的に情報を獲得可能な自律移動型小型ロボットの実現を目指している。本目標の実現のため、筆者らはこれまでに非線形フィルタリングである ϵ -フィルタに着目し、より大振幅な雑音への対応が可能な時間周波数 ϵ -フィルタの開発や照明変動だけでなく、雑音を含む画像からの特徴抽出が可能な自己商 ϵ -フィルタなどの開発を行ってきた。また、これらフィルタのパラメータ設定法として入力信号とフィルタの出力信号との無相関性を利用することでフィルタのパラメータ調整を行った。

さらに自己商 ϵ -フィルタのような出力が元の信号そのものではないような信号に対するパラメータの設定を行うため、認識システムを直接に利用したパラメータ設定について検討した。本稿では、これらフィルタリング技術とそのパラメータ設定法についてまとめる。

1. 研究の目的、狙い

自律移動型ロボットは家庭内の部屋や室内室外を自律的に移動し、自ら判断を行うためにカメラやマイクロホンなどを用いた視覚・聴覚情報を多用する。しかしながら、カメラから入ってくる画像には照明変動や雑音などが、また、マイクロホンから入ってくる音声には背景雑音などが含まれるため、人物認識や音声認識などが困難になるという問題がある。

また、自律移動型ロボットが人間の生活環境で活動する場合、雑音や照明条件などの予期しない環境の変化や思いもよらない場所からの突然の音の発生などに適応的に対応することが求められるが、これらの変化を事前の知識だけで予測することは難しい。このような未知環境においてロボットが滞りなく人間と共生できるようにするためには、周りの環境変化に頑健な画像・音声システムの開発や、環境変化に能動的に対応できるようなロボットの自己キャリブレーションシステムの開発が不可欠である。

本研究は上記のようなロボットを実現するための要素技術として、環境の騒音を的確に抑制できるような雑音抑制フィルタリング技術や環境変化に頑健な特徴抽出フィルタリング技術の開発を行うことで、人間との円滑なコミュニケーションを遂行する自律移動型ロボットの視覚聴覚機構の実現を目指す。また、環境変

自律移動型小型ロボットのための視覚・聴覚機構の開発

Development of visual and audio system for small autonomous mobile robots

化に能動的に対応できるような自己キャリブレーションシステム実現のための方法論として、信号源、雑音源の統計的性質に基づいたパラメータ設定技術や環境中にある主観的な情報を能動的に利用したパラメータ設定方法に関する研究を行う。

2. 研究の背景

ロボットの視覚聴覚系において音声認識や物体認識を頑健に行うためには雑音除去技術の確立や環境変化に依存しない頑健な特徴抽出技術が不可欠である。

このうち、音声に関する雑音除去技術としてはマイクロホンアレイ^{*1(1)}や独立成分分析^{*2(2)}などが知られるが、これらの手法はマイクロホンを複数利用するためモノラル音への適用が難しい。特に小型なロボットへの適用を考えた場合、モノラルでの雑音除去技術が重要となる。

単一のマイクロホンでの雑音抑制手法としては、スペクトルサブトラクション (SS)法^{*3(3)}カルマンフィルタ^{*4(4)}を用いた手法などが広く知られているが、それぞれ非定常性をもつ雑音への適用が不可能であるという問題がある。

本問題を解決するため、筆者らは ϵ -フィルタと呼ばれる非線形フィルタに注目した⁽⁵⁾。 ϵ -フィルタは原島らによって提案された非線形フィルタであり、簡易な処理で音声の形状を保持しながら雑音を除去できるという優れた特徴がある。

しかしながら、 ϵ -フィルタは原理的に小振幅雑音にしか適用できないという問題があった。そこで、筆者らはこの ϵ -フィルタを改良した時間周波数 ϵ -フィルタ⁽⁶⁾や Cross TF ϵ -フィルタ⁽⁷⁾を開発した。時間周波数 ϵ -フィルタは ϵ -フィルタを周波数軸上で複素スペクトルに対してかけることで大振幅雑音への対応が可能となるような非線形フィルタである。また、時間周波数 ϵ -フィルタを改良した Cross TF ϵ -フィルタによってインパルス性の雑音への対応も可能となった⁽⁸⁾。

一方、画像処理技術においては照明変動や雑音の影響をいかに取り除くかが問題となる。このうち、照明変動の影響を考慮した手法はいくつかの手法が知られるが、特に簡易な手法として自己商フィルタと呼ばれる手法が提案されている⁽⁹⁾。

自己商フィルタは入力画像を、その平滑化画像で除算して得ることのできる簡易なフィルタでありながら、入力信号に含まれる照明成分を除去できる技術として広く知られている。しかしながら、入力信号に雑音が含まれる場合には雑音の効果を抑制できないという問題があり、対応が困難であった。

これに対し、筆者らは照明成分だけでなく、雑音の効果も抑制可能な非線形フィルタである自己商 ϵ -フィルタを提案した⁽¹⁰⁾。

また、 ϵ -フィルタや提案する時間周波数 ϵ -フィルタなど多くのフィルタリング技術ではパラメータの調整を必要とする。この問題を解決するため、筆者らはこれまでに無相関基準を用いたパラメータ設定や認識機構を直接指標として用いたパラメータ設定法について提案した⁽¹¹⁾。多くのパラメータ設定技術においては、信号と雑音の無相関性や独立性などを仮定して、パラメータ設定を行う。筆者らもまた、信号と雑音の無相関性の仮定のもとでフィルタの入出力信号から推定した信号成分と雑音成分の相関係数を用いることによってパラメータの最適値を推定する手法を考案し、その有効性を実験的に確認した。しかしながら、音響処理における衝突音のような瞬間的な雑音や画像処理におけるエッジ画像や油絵風画像のように出力が元の画像そのものではない場合、パラメータ設定のために無相関性や統計的独立性のような客観的な仮定を設定することが難しいという問題がある。

これに対し、筆者らは認識機構を直接指標として取り入れることでフィルタ出力の値だけを見ることで評価が可能であるようなパラメータ設定法を提案した⁽¹²⁾。

提案手法は足音のような瞬間的な雑音や画像処理におけるエッジ画像や油絵風画像のように出力が元の画像そのものではない場合にも適用可能であるという利点がある。

また、自らの姿や声の情報をそのまま指標とすることができると、人間型ロボットによる自己キャリブレーションとの親和性も高いと考えられる。

3. 研究の方法

3.1 ϵ -フィルタ

まず、本稿で解説する技術要素と関連の深い ϵ -フィ

自律移動型小型ロボットのための視覚・聴覚機構の開発

Development of visual and audio system for small autonomous mobile robots

ルタについて簡単に記述する。

ϵ -フィルタとはエッジ成分を保持しながら小振幅雑音を除去可能な非線形フィルタである。

時刻 t における入力信号を $x(t)$ としたとき、 ϵ -フィルタの出力 $y(t)$ は以下のように表される。

$$y(t) = x(t) + \sum_{k=-N}^N a(k)F(x(t+k) - x(t))$$

ここで、 $a(k)$ はフィルタ係数であり、通常以下のように設定される。

$$\sum_{k=-N}^N a(k) = 1$$

また、 $M+N+1$ はフィルタの窓サイズであり、 $F(x)$ は以下の条件を満たす非線形関数である。

$$|F(x)| \leq \epsilon: -\infty \leq x \leq \infty$$

ここで ϵ は定数である。この処理によって、音声信号のような急激な変化をもつ信号を保持しながら雑音を抑制することが可能である。例として、非線形関数 $F(x)$ を以下のように設定する場合を考える。

$$F(x) = \begin{cases} x & (-\epsilon < x < \epsilon) \\ 0 & (x \leq -\epsilon, \epsilon \leq x) \end{cases}$$

この時、フィルタの注目点から ϵ 以上離れた点は、注目点の値に置き換えられた後平滑化される。 ϵ -フィルタはこのようにすることで音声やエッジ成分などの急激な変化を持つ信号に対する平滑化力を抑制し、雑音のみを除去することが可能になる。

ϵ -フィルタは実装が非常に単純であり、上記の $F(x)$ を用いた場合には置き換えと加算のみで実現が可能である。 ϵ -フィルタでは処理する信号に対して、入力信号と出力信号の差を有限の範囲に抑えることでエッジ保存平滑化を実現する。音響信号における音声や画像中のエッジなど、急峻な成分と見なせる信号の特徴は多く、 ϵ -フィルタは音声や画像などに幅広く応用されている。

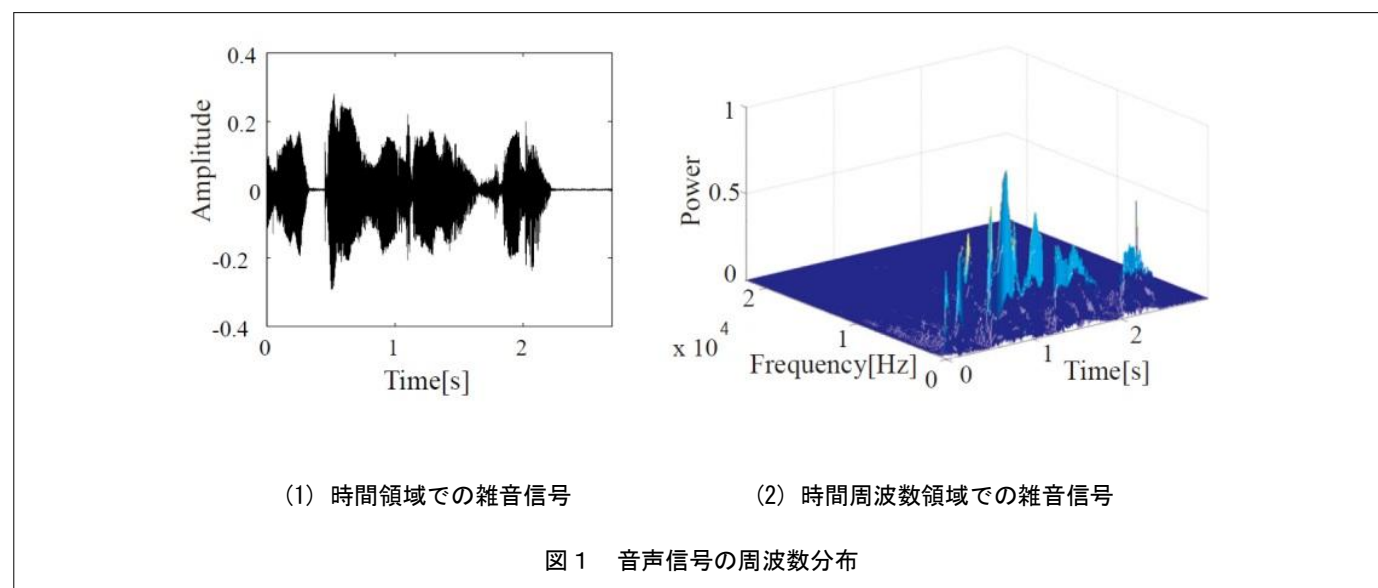
3.2 時間周波数 ϵ -フィルタと Cross TF ϵ -フィルタ

時間周波数 ϵ -フィルタは、小振幅雑音に対する雑音除去しかできないという ϵ -フィルタの持つ欠点を補うために改良された非線形フィルタである。

時間周波数 ϵ -フィルタは音声と雑音の周波数分布に対して以下の仮定を置く。

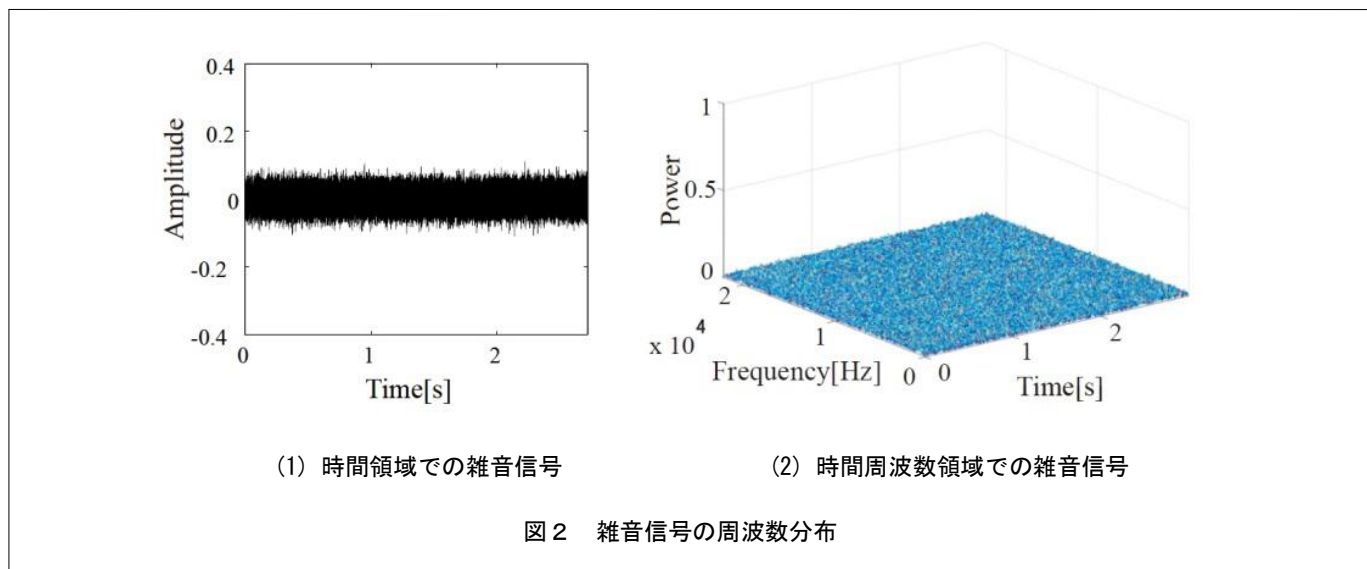
1. 雑音信号の周波数分布
雑音信号は、周波数軸方向に広範囲に分布し、時間軸方向の変化は緩やかである。
2. 音声信号の時間変化
音声信号は雑音信号よりも急峻な変化をもつ。

図1、図2に音声信号、及び、白色雑音の振幅と時間一周波数領域におけるそれぞれの信号のパワーを示す。なお、図中のパワーは音声信号の最大値を基準として正規化されている。



自律移動型小型ロボットのための視覚・聴覚機構の開発

Development of visual and audio system for small autonomous mobile robots



白色雑音に限らず、冷却ファン音など多くの雑音がこの図のようになり、仮定1、及び、仮定2が成立する。実時間信号として見た場合に雑音の振幅が信号に比べて大きくても、周波数空間では雑音が広い範囲に分布するため、周波数成分毎にみると雑音のパワーは信号のパワーに比べて相対的に小さくなる。時間-周波数 ϵ -フィルタは音声と雑音の持つこれらの性質を利用して、周波数成分毎に ϵ -フィルタをかけることで大振幅雑音を抑制する。

さらに本手法を改良した Cross TF ϵ -フィルタでは雑音信号が周波数軸方向に広範囲に分布するという性質をより積極的に用いるため、時間周波数領域で時間成分、周波数成分双方に対し、 ϵ -フィルタをかける。

このようにすることで大振幅雑音の抑制効果が向上するだけでなく、周波数軸方向に広範囲な分布を持つインパルス性雑音の抑制も可能となる。

3.3 自己商 ϵ -フィルタ

自己商フィルタは簡易な処理で照明変動の影響を抑制可能な非線形フィルタである。

自己商フィルタは、照明変動について Lambertian モデルと呼ばれるモデルを仮定する。そして、照明変動に関して以下の仮定を置く。

1 照明条件の普遍性

平滑化画像は原画像と同じ外部照明条件を持つ。

自己商フィルタでは外部照明条件に関し、上記のような条件を置き、原画像を平滑化画像で除算することで外部照明条件の影響をなくし、オブジェクトのテクスチャを抽出することを目指しており、簡易な操作で画像中の照明変動の効果をなくすことが可能となる。

しかしながら、自己商フィルタには入力画像に雑音が含まれるとフィルタの持つ自己商効果により、雑音の効果が増大してしまうという問題があり、雑音画像からの特徴抽出が困難となる。図3に雑音が含まれている画像と、雑音を含む画像からの自己商フィルタにおける出力をそれぞれ示す。図3に示すように雑音を含まない原画像からは目や顔の輪郭などについて特徴抽出が可能となっているが、雑音を含む画像に対しては特徴抽出が困難となっていることがわかる。

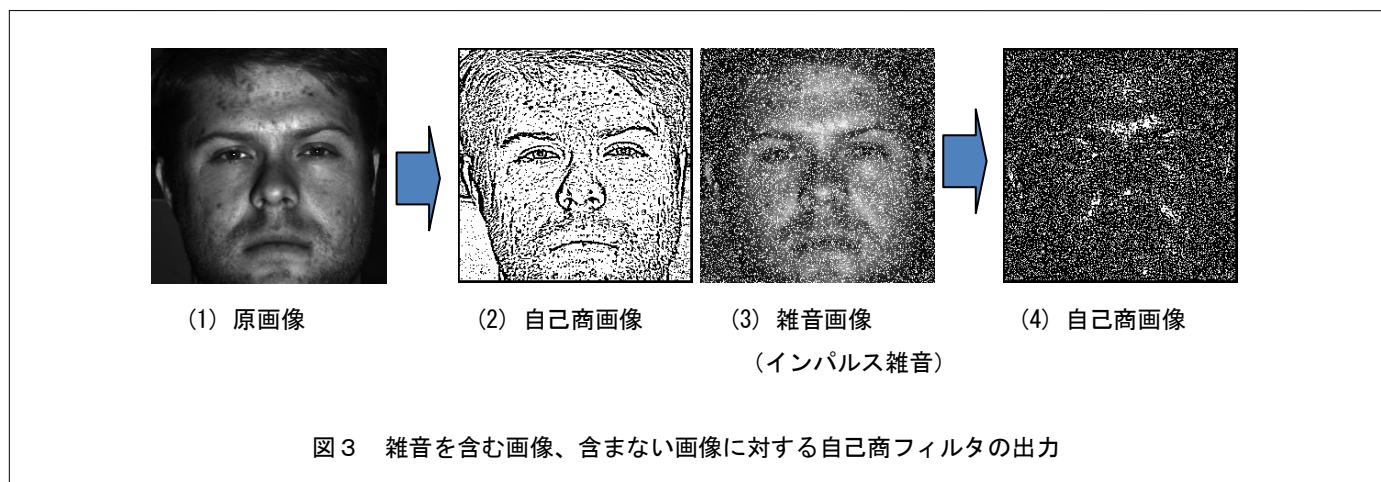
この問題を解決するため、筆者らは自己商フィルタの平滑化関数に ϵ -フィルタを導入した自己商 ϵ -フィルタを開発した。自己商 ϵ -フィルタでは単純な平滑化画像の代わりに、異なる平滑化力を持った2つの ϵ -フィルタを用いる。このようにすることでガウシアン雑音、インパルス雑音双方への対応が可能であるが、その理由は異なることに注意が必要である。

雑音源がガウシアン雑音である場合には雑音源が分子分母どちらも ϵ -フィルタによって平滑化されることで雑音が抑制され、結果として特徴抽出が可能となる。

一方、雑音源がインパルス雑音である場合には ϵ -フィルタの特性から、分子分母どちらについてもイン

自律移動型小型ロボットのための視覚・聴覚機構の開発

Development of visual and audio system for small autonomous mobile robots



パルス雑音が残るが、自己商効果によって残ったインパルス雑音の効果が打ち消され、結果として特徴抽出が可能となる。

このように自己商 ϵ -フィルタでは、 ϵ -フィルタの持つ特性と自己商フィルタの持つ自己商効果をうまく組み合わせることでガウシアン雑音、インパルス雑音双方への対応が可能な非線形フィルタを形成できる。

3.4 無相関基準によるパラメータ設定

多くのフィルタリング技術ではパラメータの設定が必要になるが、それらのパラメータは通常、実験的な操作によって手動で設定する必要がある。

フィルタリング技術において得られる信号は雑音が重畳された信号のみであり、多くの場合、雑音の種類や大きさは未知である。そのため、設定したパラメータが適切かどうかを評価することは難しい。このようなフィルタリングにおける出力の適切性を評価するため、筆者らは無相関基準によるパラメータ最適化について考察した。提案手法では、信号と雑音との間に以下の仮定を置く。

1. 信号と雑音は無相関である。

多くのパラメータ設定技術においては、信号と雑音の無相関性や独立性などを仮定して、パラメータ設定を行うが、フィルタ処理の場合、出力信号は1つであるため、このような関係性をそのまま利用することができない。そこで本手法では信号と雑音の相関を評価

するためにフィルタの入力と、入力と出力の差分との相関を評価関数とすることで目的のパラメータを得る。ここでは、 ϵ -フィルタを例にとり、その方法についてまとめる。

今、目的信号を $s(t)$ 、雑音を $n(t)$ とおく。また、 $s(t)$ と $n(t)$ の相関係数を $R(s(t), n(t))$ と定義する。前述のように、 $s(t)$ や $n(t)$ はフィルタ処理の過程では不明である。そこで、フィルタ出力と入力を用いてフィルタの適切さを測定することを考える。

入力信号と ϵ -フィルタの出力をそれぞれ $x(t), y(t)$ とする。フィルタへの入力 $x(t)$ は信号と雑音の加算として以下のように表される。

$$x(t) = s(t) + n(t).$$

今、入力信号に対して雑音を完全に抑制し、信号を完全に保存するような理想的なフィルタを考えると出力信号 $y(t)$ は以下のように $s(t)$ と等しくなる。

$$y(t) = s(t)$$

上記、2式より、雑音 $n(t)$ は $x(t), y(t)$ を用いて以下のようにあらわされる。

$$n(t) = x(t) - y(t).$$

したがって、理想的なフィルタでは以下の関係が成り立つ。

$$R(s(t), n(t)) = R(y(t), x(t) - y(t))$$

もちろん、 ϵ -フィルタは理想的なフィルタではないが、そのパラメータが適切に設定されていた場合、 $R(y(t), x(t) - y(t))$ の絶対値はパラメータが適切でない場合に比べて小さくなると考えられる。そのため、 ϵ の最適値 ϵ_{opt} は $R(y(t), x(t) - y(t))$ を用いて以下のように

自律移動型小型ロボットのための視覚・聴覚機構の開発

Development of visual and audio system for small autonomous mobile robots

表せる。

$$\epsilon_{opt} = \arg \min_{\epsilon} |R(y(t), x(t) - y(t))|$$

上記では簡単のため音声のような一次元信号についての議論を取り上げたが、二次元信号についても同様の議論が成り立つ。

3.5 認識システムを指標として用いたパラメータ設定

パラメータ設定には信号と雑音の無相関性や独立性などの客観的な指標が用いられることが多い。しかしながら、拍手音や足音などのように雑音が瞬間的な雑音である場合、雑音が存在する期間が短いため、無相関性や独立性などの評価指標を用いることができない。また、顔画像に対するエッジ画像のように出力信号が元の画像そのものではないような場合、客観的な指標を用いることが困難である。このような客観的な仮定を置けないような問題や人間の主観によってしか評価できないような問題を扱うため、認識システムを指標としたパラメータ設定を提案した。

提案手法は以下の2つのプロセスから成り立つ。

Step 1 認識システムの学習プロセス

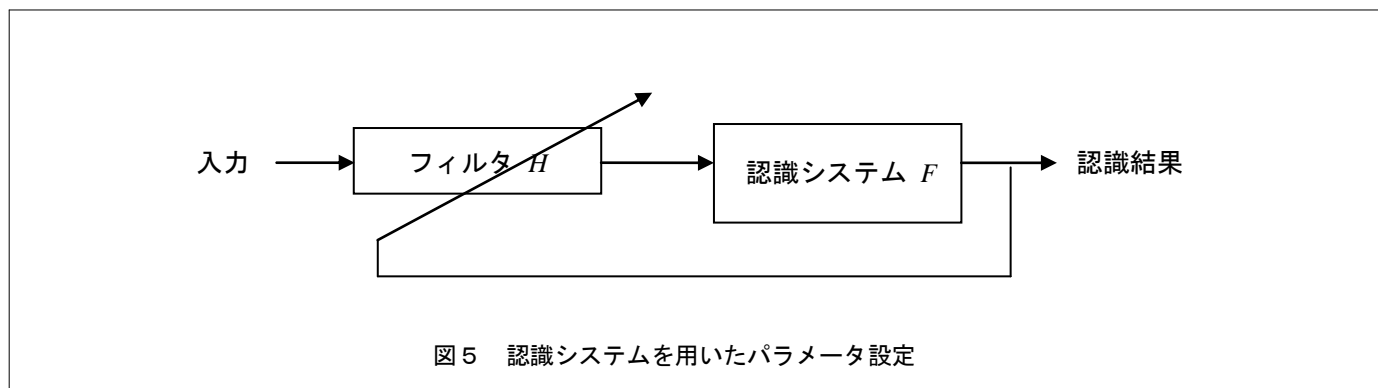
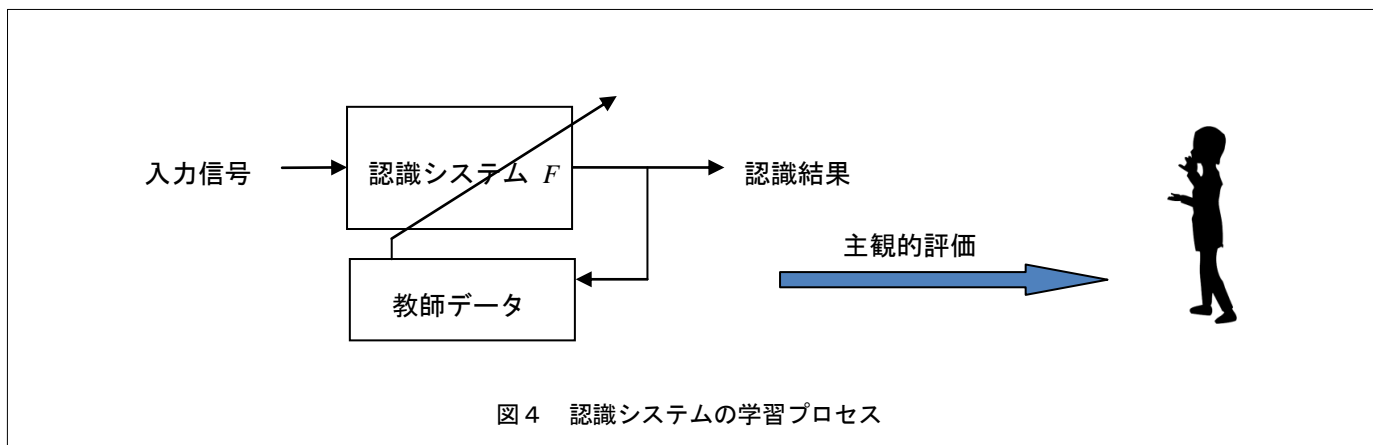
まず、大量の教師データを元に認識システム F を図4のようにトレーニングする。このプロセスは従来の認識システムの学習プロセスと変わらない。

Step 2 認識システムを用いたフィルタシステムのパラメータ最適化

次に、図5に示すように学習された認識システム F を用いて、認識システム F の認識結果が最大化されるようにフィルタ H のパラメータを調整する。

本手法は認識システムを直接に評価指標として用いているため、相関性や独立性などに着目した従来の手法と異なり、出力信号が好ましいものであるかどうかをチェックすればよく、単純な枠組みで実装が可能であるという利点がある。

また、認識システムを用いたパラメータ設定ではエッジ画像などのように出力信号が元の信号そのものでもなくとも学習データを変更することで同じ枠組みを利用可能である。



自律移動型小型ロボットのための視覚・聴覚機構の開発

Development of visual and audio system for small autonomous mobile robots

さらに、顔領域で雑音が低減されているが、非顔領域では雑音が残留しているような従来の枠組みでは評価しにくい極端なフィルタ結果についても主観的な評価が可能であり、認識システムとの親和性が期待できる。

4. 研究の結果

4.1 時間周波数 ϵ -フィルタと Cross TF ϵ -フィルタ

図6に時間周波数 ϵ -フィルタの出力を示す。

実験では、従来手法である ϵ -フィルタの改良法として報告されている CS ϵ -フィルタの出力と比較した。

図6(1)、(2)は、それぞれ原信号、雑音信号である。

また、図6(3)、(4)はそれぞれ CS ϵ -フィルタと時間周波数 ϵ -フィルタの出力である。

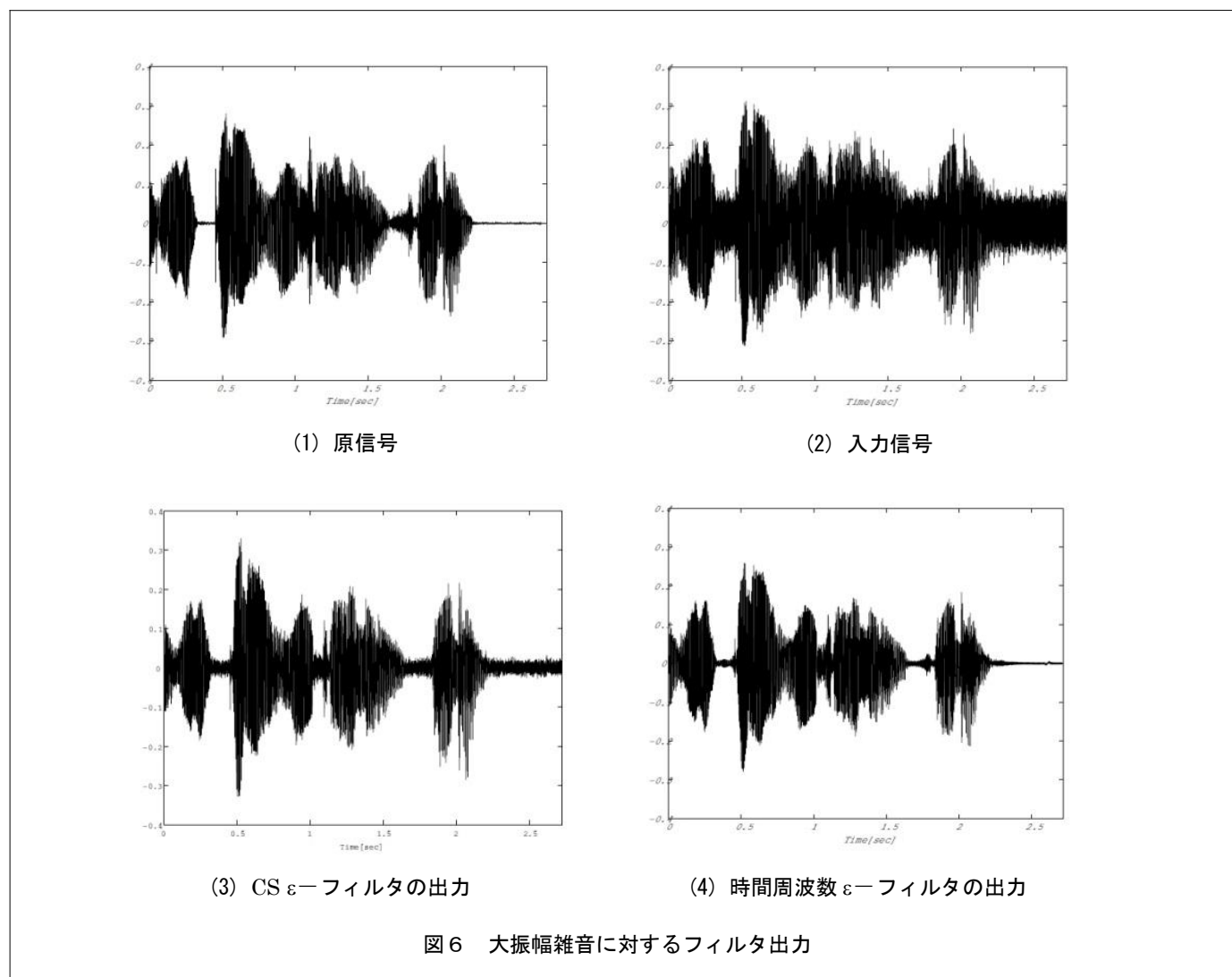
図6に示すように CS ϵ -フィルタでは不十分であつ

た雑音抑制性能が時間周波数 ϵ -フィルタを用いることで向上していることが見て取れる。

また、図7にインパルス雑音に対する時間周波数 ϵ -フィルタ、Cross TF ϵ -フィルタの出力波形を示す。

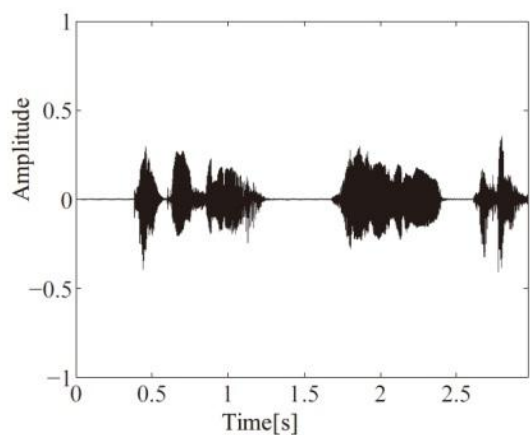
図7(1)、(2)、(3)は、それぞれ原信号、雑音信号、原信号および雑音信号を加算した入力信号である。また、図7(4)、(5)はそれぞれ時間周波数 ϵ -フィルタ Cross TF ϵ -フィルタのフィルタ出力である。

図7に示すように時間周波数 ϵ -フィルタではインパルス雑音除去のために強い平滑化作用を与える必要があるため、音声信号にゆがみが出てしまっている。一方、Cross TF ϵ -フィルタを用いると音声信号を保持しながらインパルス雑音を抑制できていることが確認できる。

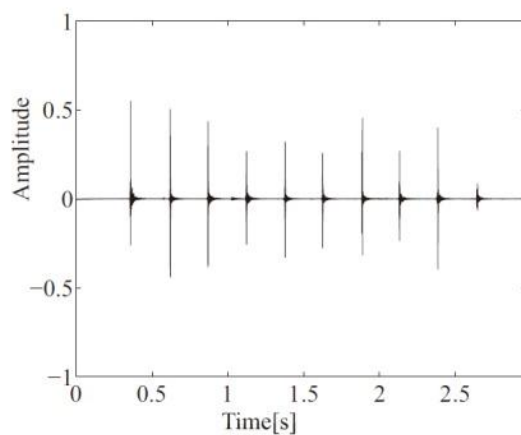


自律移動型小型ロボットのための視覚・聴覚機構の開発

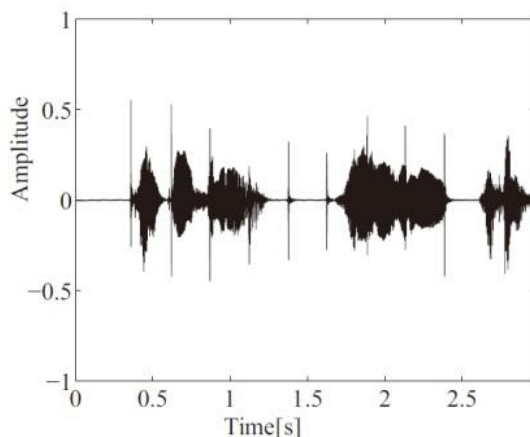
Development of visual and audio system for small autonomous mobile robots



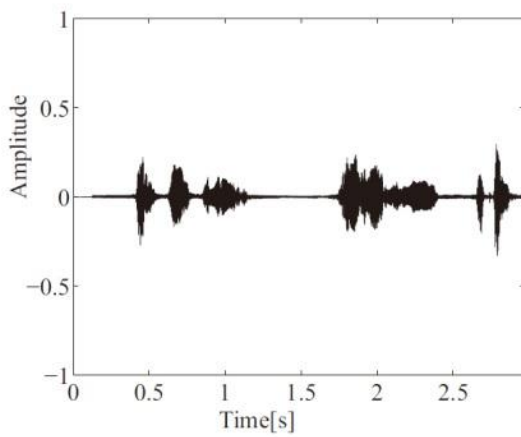
(1) 原信号



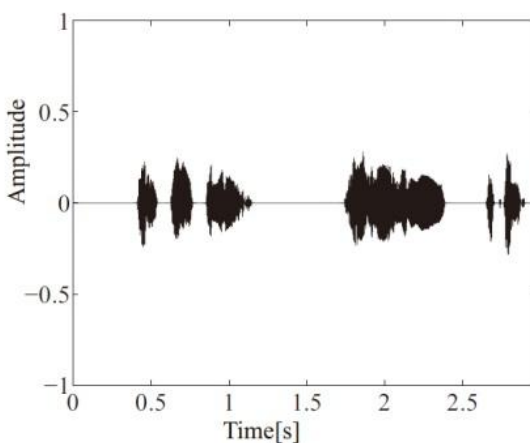
(2) 雑音信号



(3) 入力信号



(4) フィルタ出力 時間周波数 ϵ -フィルタ



(5) フィルタ出力 Cross TF ϵ -フィルタ

図7 インパルス雑音に対するフィルタ出力

自律移動型小型ロボットのための視覚・聴覚機構の開発

Development of visual and audio system for small autonomous mobile robots

4.2 自己小 ϵ -フィルタ

ガウシアン雑音、インパルス雑音が加わった画像に対するフィルタの出力例を図8、図9にそれぞれ示す。実験では、従来手法である自己商フィルタの出力と比較した。図8、図9内(1)、(2)は、それぞれ原信号、雑音信号である。図8、図9内(3)は自己商フィルタの出力を、図8、図9内(4)は自己商 ϵ -フィルタの出力をそれぞれ示す。

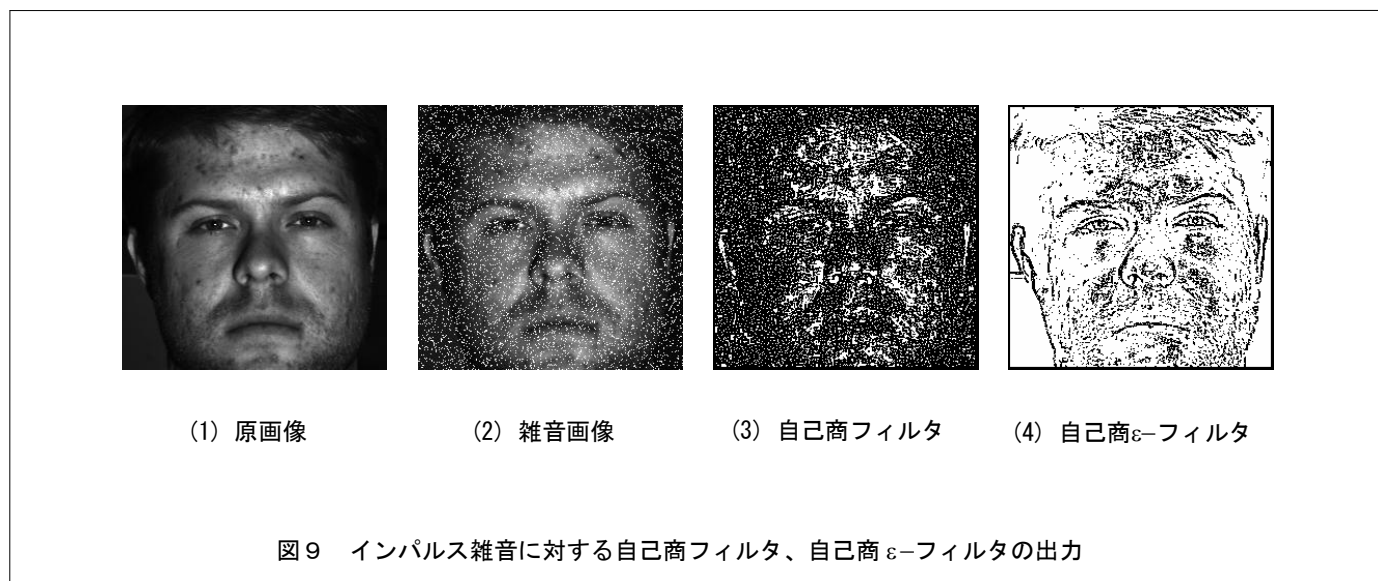
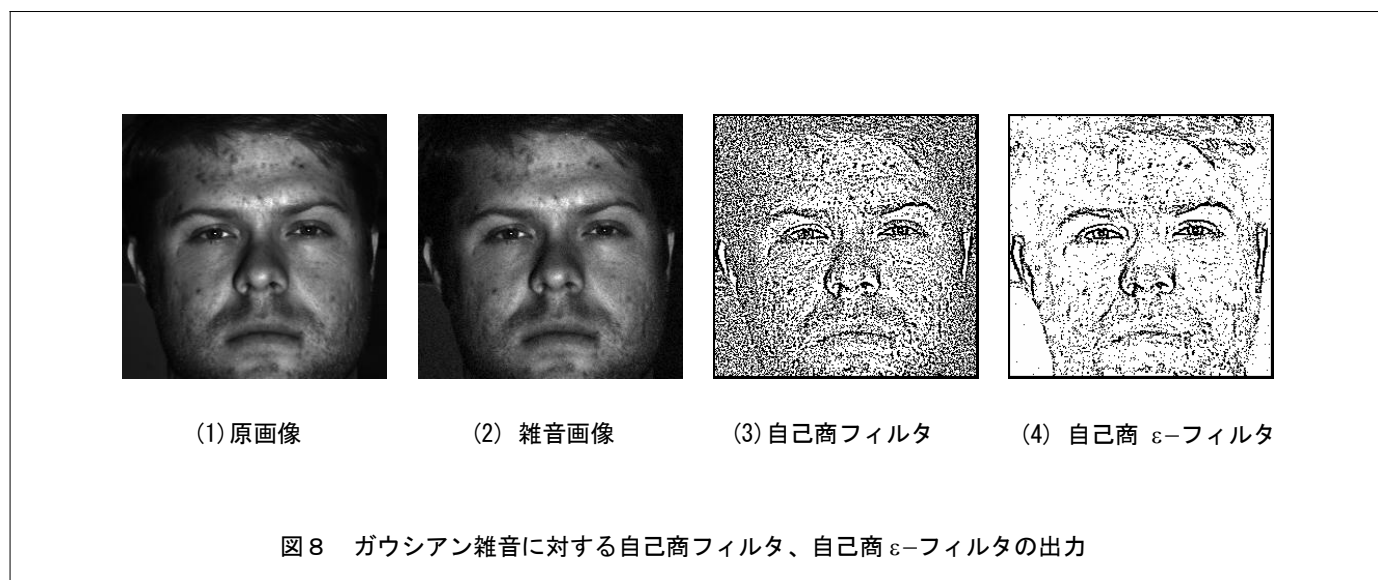
図8、図9に示すように自己商フィルタでは困難であった雑音画像からの特徴抽出が自己商 ϵ -フィルタを用いることで可能になっていることが確認できる。

4.3 無相関基準によるパラメータ設定

図10に本手法で得られたパラメータによる ϵ -フィルタの出力を示す。

図10(1)は原画像を、(2)は雑音画像をそれぞれ示す。また、図10(3)は無相関基準によるパラメータ設定によって得られたパラメータを用いた ϵ -フィルタの出力を示す。

図10に示すように提案手法によって得られたパラメータを用いて適切な出力が得られていることが確認できる。



自律移動型小型ロボットのための視覚・聴覚機構の開発

Development of visual and audio system for small autonomous mobile robots

4.4 認識システムを指標として用いたパラメータ設定

実験では認識システムとしてニューラルネットワークを用いた認識システムを利用した。

画像としては CMU Image Database からのデータを用い、インパルス雑音を顔の付近に付与した。フィルタには Center weighted メディアンフィルタを用いた。

図11に本手法で得られたフィルタ出力を示す。

図11(1)は用いた雑音付画像を示す。

図11(2)、(3)はそれぞれ誤差最小としたときと、認識率最大としたときの画像の出力である。図11に示すように部分的な雑音を含むような画像に対して誤差最小基準をとると、画像全体で評価がなされるため、顔の付近の雑音除去が不十分であることがわかる。

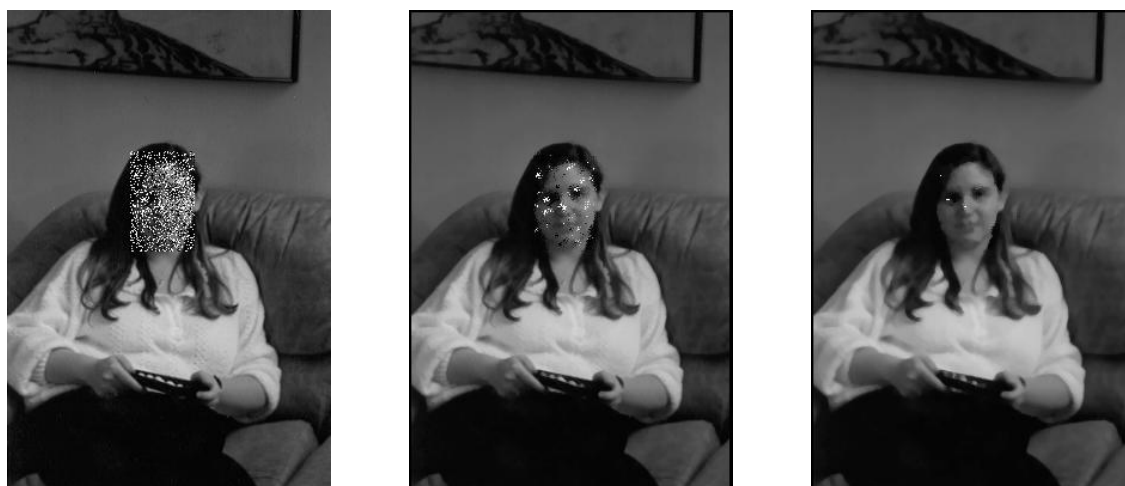


(1) 原画像

(2) 音画像

(3) ϵ -フィルタ

図10 無相関基準を用いて得られたパラメータによる ϵ -フィルタの出力



(1) 原画像

(2) 誤差最少

(3) 認識率最大

図11 部分的な雑音を含む画像に対する実験結果

自律移動型小型ロボットのための視覚・聴覚機構の開発

Development of visual and audio system for small autonomous mobile robots

一方、認識率最大となるようにパラメータを調整することで、顔に付加された雑音を強く除去するようにパラメータが調整されることが確認できる。

5. 将来展望

本稿では自律移動型ロボットの視覚聴覚の開発をめざし、効果的な雑音除去や照明変動に頑健な特徴抽出を実現するフィルタリング技術とそのパラメータ設定法について記述した。提案手法により、雑音や照明変動を含む画像や音声からの頑健な信号抽出・特徴抽出が可能になり、また、環境の変動に合わせた主観的なパラメータ調整の示唆を得た。

これらの技術をロボット自身の姿や声を利用した自己キャリブレーション機構として統合することで、未知環境に能動的に適応可能な自立移動型ロボットの実現を目指したい。

用語解説

* 1 マイクロホンアレイ：複数のマイクロホンのアレイ状に並べ、各マイクロホンに入る音の振幅差、位相差を利用することで音声を強調したり、雑音を抑制したりする手法のこと。

* 2 独立成分分析：複数の加算信号が互いに独立であると仮定し、混合信号をもとの複数の信号に分離するための手法のこと。

* 3 スペクトルサブトラクション法：音声をフーリエ変換などにより周波数変換し、雑音のパワーを減算してから逆フーリエ変換することで雑音を抑制する手法のこと。

* 4 カルマンフィルタ：誤差の観測値を用いてシステムの状態を推定するためのフィルタ技術の一つ。ルドルフ・カルマンによって提案された。

参考文献

(1) Y. Kaneda, S. Takahashi, H. Nomura, J. Kijima, "A microphone array system for speech recognition," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp.215-218, (1997).
(2) P. Comon, "Independent Component Analysis, a new concept?," *Signal Processing*, **Vol.36, No.3**, pp.287- 314,

(1994).
(3) S. F. Boll, "Suppression of Acoustic Noise in Speech Using Spectral Subtraction," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, **Vol.27**, pp.113-120. (1979).
(4) R.E.Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, **No.82**, pp.35-45, (1960).
(5) 荒川薫、原島博、宮川洋、"ε-分離非線形デジタルフィルタの統計的解析," **Vol.J66-A, No.1**, pp.32-39, (1983).
(6) T. Abe, M. Matsumoto, S. Hashimoto, "Noise reduction combining time-domain ε-filter and time- frequency ε-filter," *Journal of the Acoustical Society of America*, pp.2697-2705, **Vol.122, No.5**, (2007).
(7) T. Abe, M. Matsumoto, S. Hashimoto, "Noise reduction utilizing cross time-frequency ε-filter," *Journal of the Acoustical Society of America*, pp.3079- 3087, **Vol.125, No.5**, (2009).
(8) T. Abe, M. Matsumoto, S. Hashimoto, "Application of cross TF ε-filter to impulse noise reduction," *IASTED International Conference on Signal and Image Processing and Applications*, pp.47-51, (2011).
(9) H. Wang, S.Z.Li, Y. Wang, "Face Recognition under Varying Lighting Conditions Using Self Quotient Image," *Sixth International Conference on Automatic face and gesture recognition*, pp.819-824, (2004).
(10) M. Matsumoto, "Self-quotient ε-filter for feature extraction from noise corrupted image," *IEICE transactions on Information and Systems*, pp.3066- 3075, **Vol.E93-D, No.11**, (2010).
(11) T. Abe, M. Matsumoto, S. Hashimoto, "Automatic parameter optimization in ε-filter for acoustical signal utilizing correlation coefficient," *Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 896-901, **Vol.127, No.2**, (2010).
(12) M.Matsumoto, "Cognition-based parameter setting of non-linear filters using a face recognition system," *IET Image processing*, **Vol.6, No.8**, pp.1057-1063, (2012).

この研究は、平成19年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成20年度～22年度に実施されたものです。