

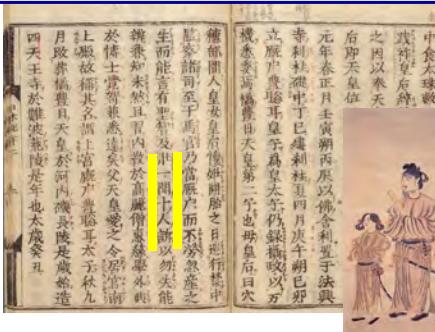
## あなたのスマートフォンは聞き分けができますか

- 口元にマイクがあれば、OK
- 口元からマイクが離れると、NG

なぜうまくいかないのか？

【私たちの立場】 入力が混合音だから  
 【世の中の研究者】 入力音のSN比低下

## 聖徳太子のように聞き分ける



- 人は同時に高々2つのことしか聞き分けられない [柏野他 1996]
- 聖徳太子は10人の訴えを同時に聞いてさばいた [日本書紀]

## ロボットが自分の耳で聞くと、何が難しいのか

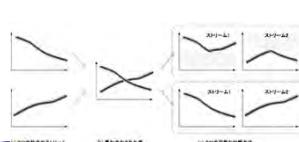
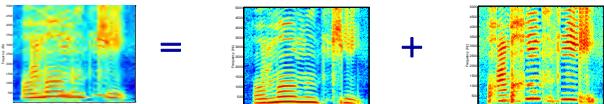


- 複数の音源からの音が聞こえる
- ロボットの発話中に他の人が割り込んで発話
- 部屋の反射や残響がある

## 聞き分けるための手掛かりは

- 音の高さ（ピッチ）
- 音のする方向（音源定位）
- 音の特徴（音声・性別・楽器・環境音…）
- 統計的な指標で分ける

## 音の高さだけではうまくいかない



## 方向情報を使う

- 人・動物： 両耳  
 ロボット： マイクロフォンアレイ

## ロボットの耳を作る

## ロボット聴覚用オープンソースソフトウェア

(Honda Research Institute Japan Audition for Robots with Kyoto University)

HARK



マイクロフォンアレイ

- どのようなロボットにも使えるソフトウェア
- 事前に測定するデータを極力減らす
- 商用のマイクロフォンアレイをサポート
- 多数の処理をわかりやすくプログラミング可能
- 実時間処理が可能
- マニュアル・ノウハウ集の充実

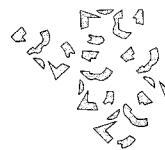


ソフトウェアの入手は

HARK

検索

## 音声認識ではノイズに意味を持たせる



大文字1つが並んでいます

何ですか？

ノイズを復活する



## 三話者の同時発話を聞き分ける



- マイク2本
  - 静止音源
  - 固定発話タイミング
  - 孤立単語認識
- (Nakadai et al. 2003)

- マイク8本
  - 人の実発話（料理の注文）
  - ほぼ実時間処理
  - ワードスポットティング
- (Yamamoto et al. 2006)



Copyright (c) 2012 Honda Research Institute Japan Co., Ltd. All Rights Reserved.

- マイク16本
- 11人の実発話（このデモでは方向を与える）
- 実時間処理
- ネットワーク文法

(Nakadai et al. 2012)

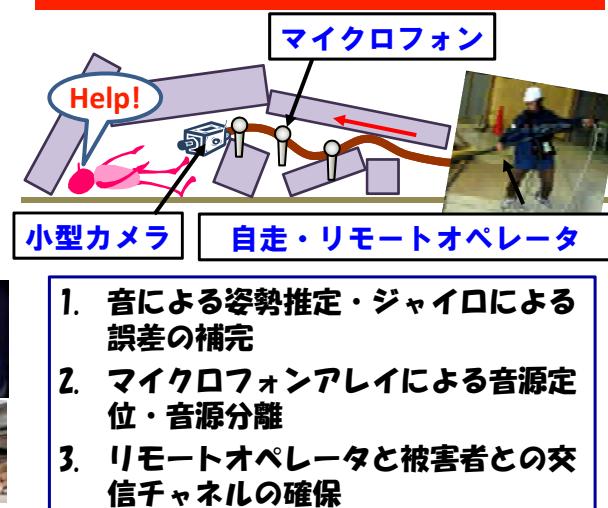
## 「聞き分ける」能力を多様な音へ、研究室から室内から屋外へ

基盤研究(S) H19~H23

基盤研究 (S) H24~H28



### 災害現場で聞き分ける

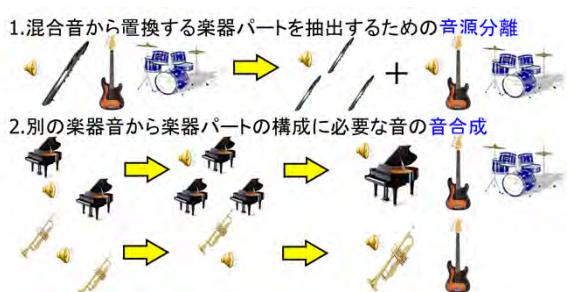
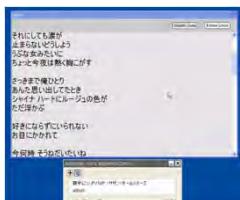


1. 音による姿勢推定・ジャイロによる誤差の補完
2. マイクロフォンアレイによる音源定位・音源分離
3. リモートオペレータと被害者との通信チャネルの確保

### 音楽(多重奏演奏)を聞き分ける

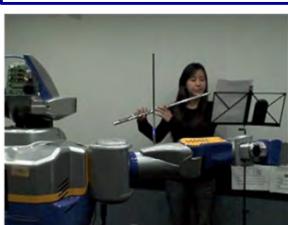
1. テンプレートでドラム音を聞き分ける
2. 調波・非調波の混合モデルで聞き分ける
3. 統計的手法で楽器音を聞き分ける
4. 歌い方を聞き分け、ビッグデータ、歌唱法へ

受け身から参加型へ

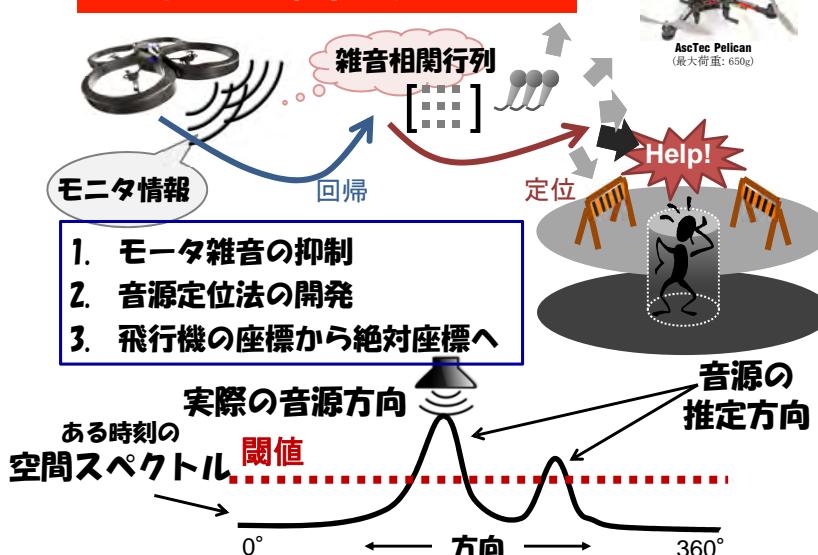


### 人の演奏を聞き分け合奏

1. 自分の演奏を抑制し、相手の演奏を聞き分け
2. 相手のビートを追跡し、テンポを予憶
3. 電子楽器「テルミン」を演奏しながら、歌う。
4. フルート演奏家の動きに合わせて、演奏



### 空中から聞き分ける



### ATTACK25のロボット司会者

1. 「はい」と早くいう「早言い」クイズ
2. 同時発話を認識、60msの違いを90%で認識
3. 発話とノイズとを区別
4. 児玉潔氏を模倣する司会者





# 見たり聞いたりさわったり ロボットはセンサで感じている

人は、見る・聞く・さわる・かぐ・味わうの5つの感覚（五感）を持っているね。ロボットにも五感と同じようなものがあるんだ。ロボットが感覚を受ける部分のことをセンサ（センサー）というよ。

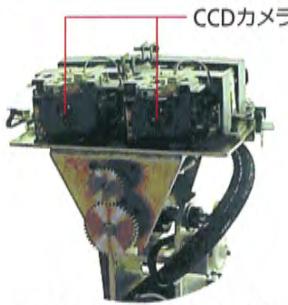
## ロボットの センサ

ロボットのセンサには、いろいろな種類があるんだ。  
人の感覚よりもするどいものもあれば、まだあまり発達していないものもあるよ。

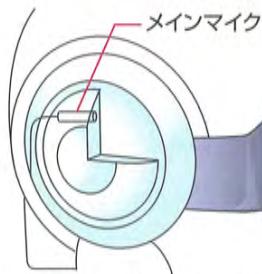
### 見る・聞く

人型ロボットは、\*CCDカメラなどの画像センサが目の代わりとなって、ものの形・色・大きさなどを見ていることが多い。画像センサがあれば、障害物があってもよけながら移動できるのはもちろん、人の顔を見分けたり、動くものを追ったりすることもできるんだ。

障害物があるかどうかを判断するセンサには、ほかにも、赤外線センサや超音波センサなどがあ



↑シグの目となるCCDカメラ

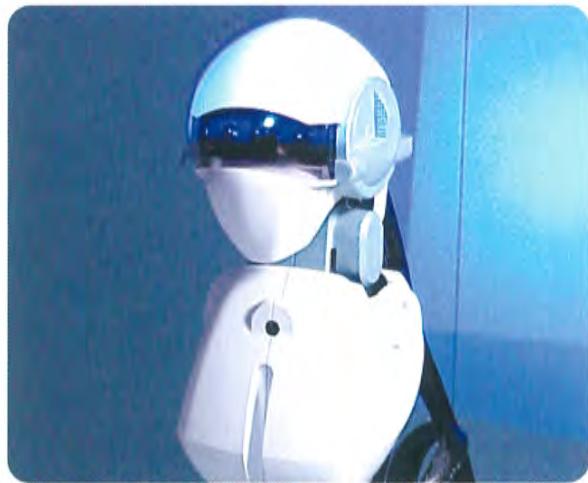


↑シグの耳の部分の内部の様子

るよ。

これらのセンサから発射した光や音が、ものにぶつかってはね返ってくるまでの時間や方向などを調べれば、障害物のある位置がわかるんだ。赤外線センサや超音波センサは、暗いところを進むときにも活やくするよ。

音を聞きとるためにしているセンサはマイク。マイクは、音の振動を電気信号に変えて伝えるんだ。ロボットには、音が聞こえてくる方向を調べるために音の内容を聞き分けるために何本ものマイクが使われている。音のする方向・大きさ・高さ・種類などを、人のように2つの耳だけでとらえるのは大変なことなんだね。



↑3人の言葉を同時に聞き分けるシグ(SIG)

人型ロボットのシグは、2つのCCDカメラと2つのメインマイクで、だれが何と言ったかを調べるんだ。また、人の声とシグの内部の機械が動く音を区別するためのサブマイクもついているんだって。

# ロボットの聴覚 まざまな声の聞き分け方

のなかは音であふれている。人間は話し声、音楽、さまざまな雑音・騒音を聞き分けているが、

ロボットの分野でも「聴覚」に関する研究が進められている。

## ロボットの聴覚機能

人間の日常的なコミュニケーションの基本は「聞くこと」である。人の話を聞き、質問に答えるや感想、自分の意見を返し、相手との行為を繰り返すことによって、会話とい葉のキャッチボールが成り立つ。人間のまわりで優れた感覚器官で、複数の音から特定の音を聞き分けるのも、音源の方向、どれくらいの距離のところにあるかも、瞬時に判断できる。

ロボットでは視覚と比べた場合、聴覚の研

究は遅れていた。従来の音声認識の研究はおもに1人の声の音声認識などが中心で、特定の声が入力された状態を想定して行われてきた。これはあくまでも基礎研究で、さまざまな音が飛び交うリアルな世界にそのまま通用するものではない。今後、コミュニケーションロボットやセキュリティロボットなど、人間の住環境とともに過ごすロボットが普及するには、人とのコミュニケーション力の向上が絶対条件の一つになる。そこで、ロボットの聴覚に関する研究が注目されて

いる。

音の研究のフィールドは、通常の場合、距離と音圧の間に逆二乗則（距離が倍になると音圧が6dB低減するという法則）が成立するかどうかで、ニアフィールドとファーフィールドに分けて扱われる。ロボットの場合は、その2つの境界にある1~2mの距離にある音源を対象とすることが多い。

## パソコンのマイク録音機能も応用

音一般を聞き分ける処理は「音環境理

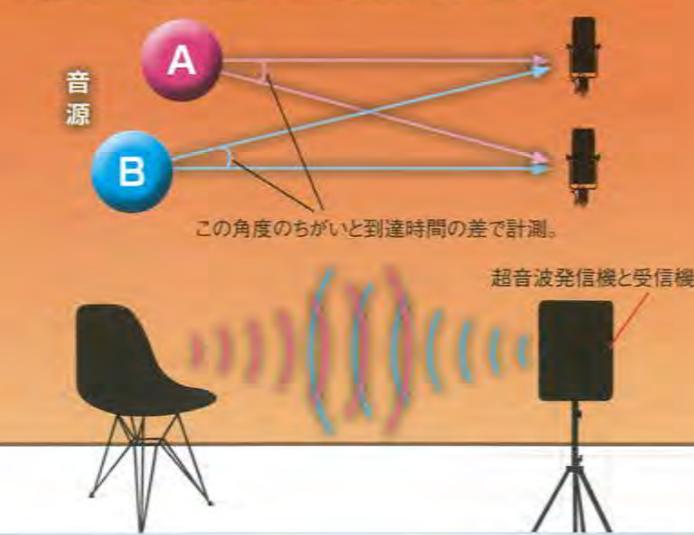
## ロボット聴覚機能の基本フロー

人間の耳にあたるマイクロホンから取り込まれた音は、「音源」「音源分離」「音声強調」「音声認識」といったプロセスを経て、特定の音として認識される。われわれが普通に行っている「聞く」という行為を、ロボットで再現するには相当な技術が必要だ。



## 複数のマイクを使って音源を探る

音源の定位は複数のマイクロホンを使って行われる。それぞれのマイクへの音の到達時間の差を計測することで、音源の位置を認識できる（上）。また、超音波発信機から超音波を発信し、対象からの反射を測定して、距離を測ることも可能（下）。



## 有名なヒューマノイドにも応用されたロボット聴覚システム「HARK」

任意の位置に置いた8本程度のマイクロホンを使い、音源定位、音源分離、分離音音声認識を、ほぼ実時間で行うことができるロボット聴覚システムHARK。2008年から、ロボット聴覚研究の成果として、Linuxベースのオープンソースソフトとして公開。これまでに、川田工業のHRP-2、ホンダのアシモ、ヴィストン社のRovovieなどさまざまなロボットに移植されている。3話者同時発話認識、言葉によるジャンケンの判定なども可能なになっている。



複数話者同時発話認識システムもHARK上で開発されている。ヒューマノイドロボットを使った実験でも、高い確率で聞き分けに成功した。写真は、2013年3月に京都大学で行われた3話者同時発話のデモの様子。

解」と呼ばれ、音源定位（音源の位置の特定）、音源分離（さまざまな音の中から聞きたい音のみを抽出）、分離音からの声の認識などが含まれる。音源定位は音源の方向を決める処理であり、マイクロホンが音をキャッチできるエリアや音圧から方向を特定する。音源の分離には、パソコンのマイク録音機能にも使われるビームフォーミング（指向性録音）が利用されることが多い。たとえばパソコンでテレビ電話などの通話をする場合、マイクの正面に位置している人の声だけを入力し、周囲の雑音はカットされる。ロボットの聴覚機能も同じで、音源方向が特定されると、その方向以外からの音の影響を除外しながら、音源分離を行うのだ。

分離した音源の中から音声を認識するには、分離過程によって起こる音のひずみやSN比（信号と雑音の比率）の低下に対応するため、音響モデル（音の波形サンプル）の構築が必要になる。これには、クリーンな音響データに加え、使用環境ごとに発生する雑音、たとえばエアコンの音などを加えた音や分離ひずみを含むデータを使用すると効果的だ。

## 聖徳太子並みのロボットが生まれる？

音が聞こえてくる方向を決める→聞こえて

くる音の種類を分離する→分離した音の中から、用意されたデータと照らし合わせながら、特定の音（声）を認識する、という人間があまりまえのようにやっている行為をロボットに置き換えると、大ざっぱにまとめただけでこれだけの複雑なプロセスが必要になるのだ。

実際のロボットに応用するには、こうした技術要素に加え、ロボットの形状への適用、マルチチャンネルA/D（アナログ／デジタル変換）装置への対応、最適な音響処理モジュールの提供などを含めたソフトウェアが必要になる。注目されるのは、日本の産学連携から生まれた「HARK」と呼ばれるソフトウェア。ロボットが音のする方向に顔や体を向け、話者や音源を追跡するシステムはいくつか存在するが、HARKを利用したシステムは、分離音のうち、指定した範囲の方向から来た音にだけ反応する。さらに、256語の組み合わせによる3話者同時発話認識では、単語正解率が中央の話者で90%超、両側の話者で80%を超えており、料理の注文だけでなく、声によるジャンケンの審判も可能だという。

その昔、聖徳太子は10人の訴えを同時に聞き分けたといわれているが、聴覚機能の研究が進めば、聖徳太子並みの聞く力を持ったロボットが誕生するのかもしれない。



「機動警察パトレイバー」などのアニメーションのメカデザインで著名な出澤裕（いづぶちゆたか）氏がデザインを担当した「HRP-2」にも、HARKの技術が使われていた。



2-25  
2008

NIKKEI ELECTRONICS  
日経エレクトロニクス



# 五感センサー 機器をヒトに近づける

解説

日の丸エアコンが欧州席巻  
低価格品に省エネで勝つ

解説

色を操り機器を差異化する  
カラー・センサ

ウォッチャー

中国テレビ市場で伸びる  
Samsung社、ソニーと  
何が違うのか

組み込みアカデミー2

プロトタイプの動作で  
モデルを検証

論文

ハイブリッド車向けの  
安全なLiイオン2次電池

<http://techon.nikkeibp.co.jp/NE/>

## 聴覚

# 聖徳太子の耳をすべての機器に

今から数年前。米Microsoft Corp.が「Windows Vista」の発売に先駆けてアーティスト向けに新OSの音声認識機能を公開実演した時に、この「事件」は起こった<sup>注9)</sup>。実演者は、「ねえママ」という音声を認識させて、テキストを表示させようとした。ところが、「ねえ叔母さん」と表示された。実演者が口頭で指示して修正を試みた末、以下のようなその場にふさわしくない一文が現れた。「Dear aunt, let's set so double the killer delete select all(叔母さん、殺し屋に2倍払って全部始末しちゃって)」。苦笑いの実演者は口に人さし指を当てて、聴衆に静かにしてくれるように頼んだ。

## 音源分離がキーワード

冒頭の出来事は、音声認識技術の難しさを端的に示す事例の一つだ。この分野で先端技術を持つMicrosoft社の技術を使っても、このような失敗が起きることがある。要は、認識対象になる音声と周囲の雑音を明確に分離する技術のハードルは高く、そしてまだ発展途上なのだ(図20)。

電子機器の聴覚に対応するセンサはマイクである。オーディオ機器、パソコン、カーナビなど、いまや多くの電子機器がマイクを搭載している。そして聴覚センサの素子としては、小型・高性能のSiマイク<sup>†</sup>の登場で、機器に

搭載する場所に悩むことなく聴覚機能を盛り込めるようになった。一つの機器に複数のSiマイクを搭載することで、機器がこれまでにない、優れた「耳」を持つこともできる(図21)。

本来なら、Siマイクを利用したヒューマン・マシン・インターフェースがもっと普及してもよいはずである。しかし、現実はそうなってはいない。その理由は、音声認識技術が未成熟であるからだ。逆に言えば、認識対象の音声から周囲の雑音など余分な音声を分離する「音声分離技術」の改善が、聴覚センサが普及するためのカギなのだ。

## 応用分野が急拡大の可能性

聖徳太子は同時に発せられた10人の言葉を聞き分ける能力があったといわれている。これは極端な例としても、人間は騒がしい環境下でも目の前で話している相手の声を、周囲の雑音と分離して聞き取ることができる。これは「カクテル・パーティー効果」と呼ばれる、人間の耳に備わった音を聞き分ける能力に起因する。

現在、電子機器に搭載されている音声認識技術でも、ヘッドセット型のマイクを使って、一人が発する声のみ

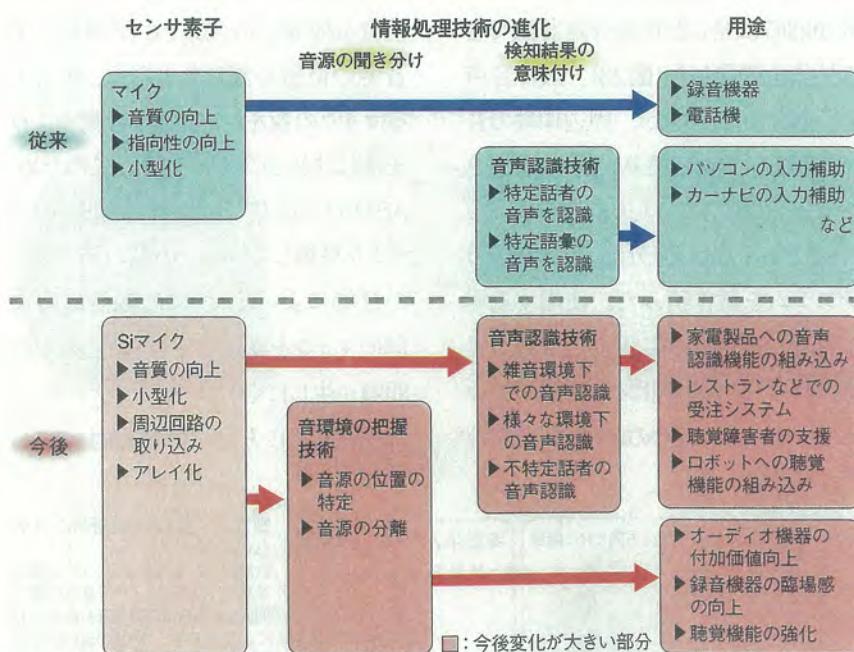


図20 聽覚センサ技術の進化の方向性

音源の位置を正確に把握し、複数の音源が発する音を聞き分ける聴覚機能の技術の開発が進んでいる。より信頼性が高く、使い勝手の良い電子機器のヒューマン・マシン・インターフェースを実現する可能性を開く。従来、聴覚の機能をつかさどるマイクは、実際の音を忠実に取り込むために音質などの向上が図られてきた。カーナビゲーション機器やパソコンなど一部の電子機器の入力補助としては、音声認識技術を組み合わせたヒューマン・マシン・インターフェースが利用されていた。しかし、人間の聴覚と比較すると、機械とのコミュニケーションを行うための手段としては、信頼性と使い勝手に問題を抱えていた。

注9) この時の模様を録画したビデオがYouTubeに投稿されている(URLは<http://www.youtube.com/watch?v=kX8oYoYy2Gc>)。

<sup>†</sup>Siマイク=MEMS技術を用いて製造する小型で高性能なマイク。ただ小型であるだけではなく、マイクと周辺回路をつなぐ配線の長さが短いため、電磁波雑音を混入しにくく高性能という特徴を持つ。

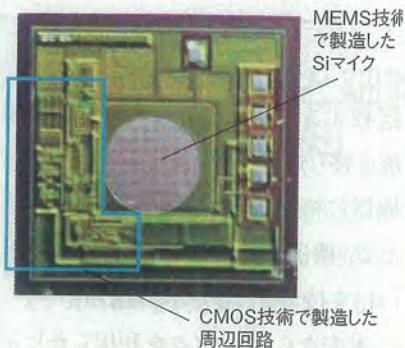


図21 小型のSiマイクが聴覚機能の応用を拡大  
MEMS技術を応用した小型Siマイクの利用が本格化し始めた。現時点では、ノート・パソコンや携帯電話機の録音や通信などに向けて搭載されている。今後は用途がさらに広がりそうだ。機器の形状や大きさに影響されずに搭載可能なほど小型であること、周辺回路を集積できるため電気的な雑音の影響を受けにくいためだ。図は、Akustica社のSiマイク「AKU2000」。4mm×4mmのSi基板上に、MEMS技術で製造したマイクに加えアンプやA-D変換器など周辺回路を集積している。中央の円形部分がマイク。

を拾えば、認識率は飛躍的に上がる。しかし、用途は必然的に限定される。目指すのは、聖徳太子のような能力を持った電子機器の実現である。現在よりはるかに優れる音声認識性能を持つとともに、機器が取得した音ごとに自由自在に加工を施せるようになる。

例えば、音楽の演奏の中から特定の楽器や音声だけを強調したり、消したりできるイコライザ機能を備えたオーディオ機器を開発できる。周波数の帯域ごとに強弱をコントロールする現在のイコライザとは、一線を画す機能である。特定の発言者の意見だけ

を抜き出したり、バックグラウンドに流れる音楽を消して聞きやすくしたりする会議システムも実現できる(図22)。それに画像データを合わせて使えば、位置情報を利用して、発言者のいる方向を矢印などで示すことができる。

また、補聴器が使用できない重度の聴覚障害者に向けてヘッド・マント・ディスプレイと組み合わせた聴覚支援システムを開発できる。どの方角から、どのような音がしているのか、文字にしてディスプレイに表示する。

### 3人の注文を同時に聞き分ける

音源分離の技術体系を確立し、同時にさまざまな応用を開発するなどこの分野の研究をリードしているのが京都大学教授の奥乃博氏のグループである。同グループは、複数の人が同時に発した声を分離認識できる技術を開発した(図23)。人の音声を分離するだけでなく、周辺環境の音楽や雑音も分離できる。既にレストランで3人のお客様から同時に発せられた注文を1.9秒で分離、認識できるシステムを試作済みだ。使用する場所は選ばず、不特定話者を認識対象にできる。この処理に必要なハードウェアの性能は、通常のパソコンと同等

のもので十分であるという。

実はこの技術は、ホンダの2足歩行ロボット「ASIMO」に組み込まれている。肝は、ホンダの子会社であるホンダ・リサーチ・インスティチュート・ジャパンと共同開発した「HARK」と呼ぶ音声を聞き分ける機能を持つミドルウェアである。HARKは2008年初夏に研究用途で公開される予定だ。

奥乃氏らが開発した技術は、大きく三つの要素で構成されている。①音の来る方向を把握する技術(音源定位), ②混合音から個別音を分離する技術(音源分離), ③分離によって生じた歪みがある音声信号を認識する技術(分離音認識)である。

①は、複数のマイクで取り込んだ音の違いから音源の位置を把握する。人間の耳は、左右を1対にして音源の位置を把握している。マイクを使って音源の位置を割り出す場合、利用するマイクの数を増やせば、位置をより正確に決めることができる。このため、ASIMOでは左右それぞれに四つのマイクを搭載している。小型のSiマイクの登場によって、一つの機器に複数個のマイクを搭載しても、実装面での問題が生じにくくなつた。

②は、同じ方向には音源は一つし



図22 将来の会議記録システムのイメージ

会議の内容を録音するとき、会議の参加者や周辺環境の音源の位置を把握し、それぞれの音を分離しておく。こうすると、雑音の原因になる室内に流れる音楽などをカットして、発言者の声だけを再生することができる。複数の発言者が同時に発言しても誰が何を言っているのかを指定して再生することができる。

かなく、同じ調波構造（基本的な音の表現）、つまり声の質は細かく見れば人それぞれ異なる、という原則に従って解析する。HARKでは、位置と調波構造の連続性を見て、音のデータをグルーピングし、音源を分離する。

ただし、分離したそれぞれの音源ごとの音声は、それぞれの音の重なりなどを引きはがした結果、波形が歪む。そのままでは、この歪みによって誤認識が発生する。

そこで、③では「ミッシング・フィーチャ・マスク（MFM）」と呼ばれる、歪んだ音声信号を認識できるようにする技術を導入した。MFMは、認識時に参照する言葉の音を出す音響モデルとの差が大きくなってしまった、歪みが大きい部分を覆い隠すマスクを使用して音声認識を行う。すなわち、誤差の原因になる部分を切り捨てて、

残りの確実な部分だけで音声を認識する。

### 音に込められた感情と状況

音声の分離技術のほかにも、この分野で重要とみられている技術開発の方向性は二つある。一つは、音声の中から話者の感情や周辺環境をくみ取る技術。もう一つは、話者周辺にある建造物などによる微妙な音の変化や影響などを含めた音響環境をそのまま取り込んで自由に出力する技術である。

人が発する音声には、通常の音声認識で得られる言葉の意味のほかに、話し手の感情が含まれている。例えば上気した声、震える声、沈んだ声などである。また、雑音の中には話者がいる周辺環境の情報も含まれる。

従来は切り捨てていたこうした情

報を読み取り、電子機器の動作や制御に生かす技術が必要になってくる可能性がある。例えば、自動車などで運転者が操作ミスを非常に起こしやすい精神状況に陥っていることを自動車が判断し、対策を講じるなどの応用が考えられる。「音に潜む微妙な情報の認識が、ストレスを感じさせない機器の開発につながるかもしれない」（東京大学教授の曽本順一氏）。

音源を含む音響空間の情報を伝送し、再生する側で非常に現実に近い音響空間を再現する技術開発も始まっている。目を閉じて聞くと、周辺に何があるのか、空気はどう流れているのか感じられるような究極の現実感を実現するための技術である。逆に、非常に不自然な音響空間をつくり出す研究も行われている。

例えば京都大学と国際電気通信基

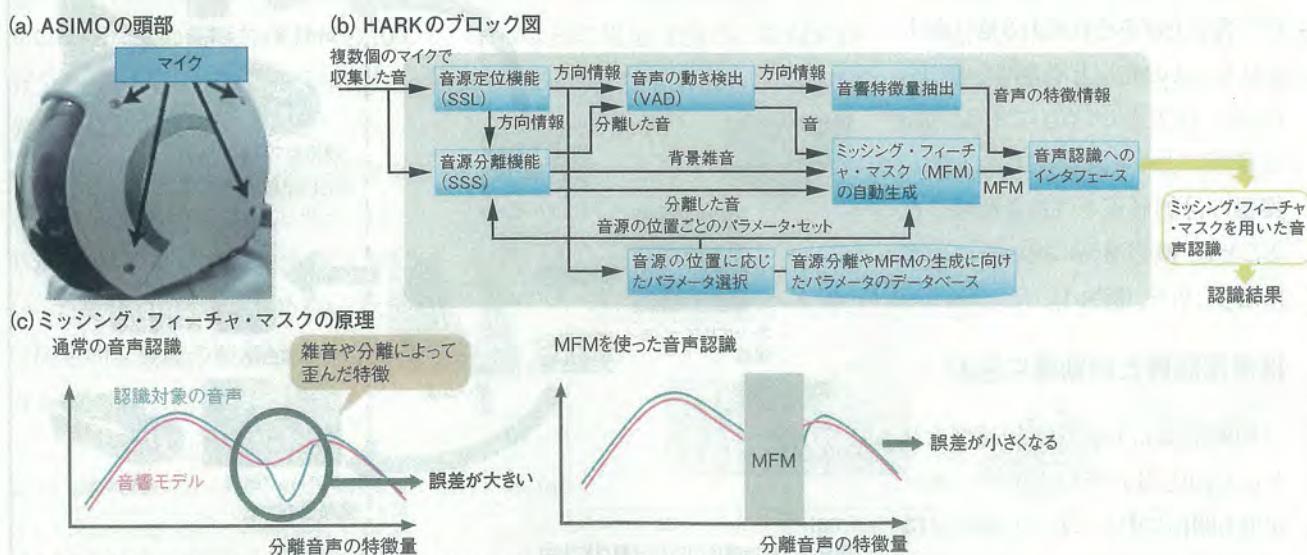


図23 音源の位置を把握し、分離することで認識の精度を向上

ホンダが開発した2足歩行ロボット「ASIMO」には合計8個のマイクが搭載されている(a)。このマイクを通じて同時に取り込んだ複数の音を聞き分けることができる。この技術で用いられる音声認識の前処理を行うソフトウエア「HARK」は、京都大学の奥乃氏のグループとホンダ・リサーチ・インスティチュート・ジャパンが共同開発した。(b)はHARKの機能ブロック図。雑音などの混入による誤認識を避けるために「ミッシング・フィーチャ・マスク（MFM）」と呼ぶ手法を採用了。認識に先駆けて音源の方向の把握、音源の分離、誤認識の原因を取り除くMFMの自動生成などを行う。さまざまな環境下で不特定話者3人が同時に発する音声を1.9秒で分離認識できる。(c)はMFMの原理。通常、音声認識において対象となる音には周辺環境の雑音が含まれるが、複数の話者の声を分離すると音声情報が歪んでしまう。こうした誤認識の原因を排除するために、認識時の参照データである音響モデルと対象のデータが著しく異なる部分を隠し、その他の部分で音声認識を行なう。このとき認識対象になる音声データを制限するマスクがMFMだ。

基礎研究所は、音響空間自体を遠隔地に伝送する技術を共同開発している。70個のマイクと聞く人の周りを取り囲むように配置した70個のスピーカーによって、遠隔地で同じ音響空間を共有できるようにしている。

また、東京理科大学 教授の溝口博氏のグループは、32個のスピーカーを3方向に配置して、スピーカーに囲まれた領域の中にいる特定の人にだけ音を伝える技術を開発した。それぞれのスピーカーが出力する音の遅延時間

や振幅を制御して、相互干渉によって円柱状の領域や球状の領域だけに6～8dBの音が聞こえるようにできる。街頭での広告などの用途に向ける。歩き回っている特定の人を追跡して、音を送り込むことも可能であるという。

## 耳のもう一つの感覚 前庭感覚対応のセンサは伸び盛り

耳には聴覚のほかに、もう一つの役割がある。加速度や頭の傾きなどを検知する前庭感覚である。加速度センサやジャイロ・センサなどが、これに対応するセンサである。

これらのセンサの市場は急速に拡大している。加速度センサの大手メーカーである伊仏合弁のSTMicroelectronics N.V.と米Analog Devices, Inc.は、2005年から2006年にかけて売り上げをそれぞれ3倍に向上させた。この売り上げ急増を牽引したのは、任天堂の「Wii」である。Wiiの登場によって、これらのセンサが機器の付加価値を高める源泉になることを、機器開発に携わる技術者に知らしめた。(図B-1)。

### 携帯電話機と自動車に注力

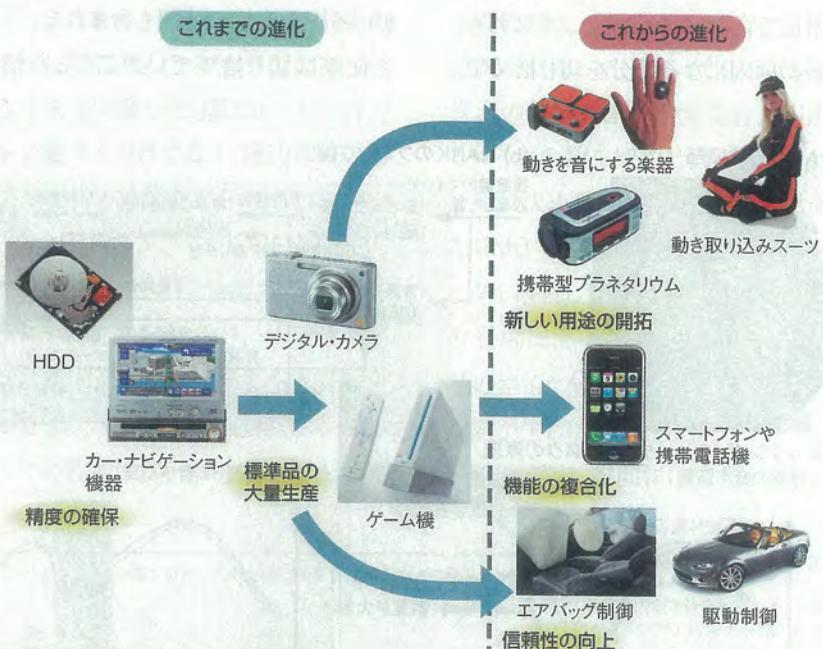
前庭感覚に対応する加速度センサなどの応用分野のうち、メーカーが最も開拓に力を入れているのが携帯電話機と自動車である。

携帯電話機への応用では、振ったり傾けたり、筐体をタッピングしたり

することによる操作を、ボタン操作に代える検討が行われている。機器に搭載する画面の大型化が進み、ボタンの配置場所が少なくなっていることへの対応策だ。特定の角度で機器を持ったときにディスプレイをオ

フにしたり、基地局との交信を禁止したりするアイデアも出ている。

一方自動車向けは、信頼性の向上が至上命題になる。アナログ・デバイセズの試算では、2010年には1台当たり14個の加速度センサやジャイロ・センサを使用するという。用途はカー・ナビゲーション機器、横滑り防止装置、エアバッグ制御などである。



図B-1 前庭感覚の応用分野が拡大中

前庭感覚に当たるセンサには、直線的な動きを検知する加速度センサや回転運動の動きを検知するジャイロ・センサがある。MEMS技術の進歩によって小型化、高性能化したこれらのセンサは、さまざまな機器に応用されるようになった。今後は、多くのセンサの集合体と化した携帯電話機向けの機能の集積化や、自動車の駆動制御などに向けた信頼性の向上が進む。ゲーム機やデジタル・カメラなどへの応用で実現した大量生産体制によって、低コスト化が進み、新しい応用分野が広がる。