

# 車載音響センサによる他車走行音定位の検討\*

小野順貴 (東大院・情報理工)、神沼充伸 (日産自動車 (株))、安藤繁 (東大院・情報理工)

## 1 はじめに

自動車には、安定した走行制御のために従来から様々なセンサが用いられてきたが、近年では Around View Monitor (AVM) [1] のように、ドライバの運転行動に必要な情報を提供することを目的としたセンサシステムについても研究が進められている。

我々は合流行動等において、自車に接近する車両に係る情報をドライバに提示する運転支援システムを実現するため、運転者の死角 (カメラおよび後写鏡を用いてすら視認できない領域) を検出可能なものとして音響センサに着目し、実現方法の検討を進めてきた。本稿では、車載音響センサの構成、音源定位アルゴリズムとともに、接近車走行音定位に係る実験および結果について報告する。

## 2 車載音響センサシステム

本研究の目的は走行中の自車に設置したマイクロフォンから他車の走行音を計測することであり、1) 走行中の自車周辺の空気の流体的擾乱により生じる低周波数の風切音、2) 自車から発生するエンジン音、走行音、走行による振動、といった大きな雑音要因が考えられる。

1) に対して我々は、自車の進行方向からの風切音を低減するための風防を設計し、その内部にマイクロフォンアレイを設置する構造を採用した。また 2) に対しては、予備実験からこれらの雑音のエネルギーが低周波数に集中することがわかったため、信号取得後にローカットフィルタを適用する構成とした。

Fig. 1 に試作システムの写真を示す。本システムでは、後方からの接近車両の定位をターゲットとし、車両の右後方側面にマイクロフォンを設置している。実際には 2 個程度のマイクロフォンを用いることを想定しているが、試作システムでは、マイクロフォン間隔や風防との位置関係について、最適な条件を検討できるようにするために、9 個を直線状に並べてある。また、風防内での音の反射を低減するために、風防内には吸音材を設置している。隣接マイクロフォン間隔は 20mm である。

## 3 荷重積分型時空間勾配法による音源定位

### 3.1 時空間勾配法

マイクロフォンアレイを用いた音源定位は様々な方法が提案されているが、本研究においては、高速に自車に接近し側面を通過していく他車を定位するために、時間分解能の高い音源定位手法が必要となるため、時空間勾配法 [2-11] の適用を検討した。時空間勾配法とは、ある微小な観測領域において波面とその時空間勾配を計測し、それらの間に成り立つ線形従属関係の係数を求めることにより定位を行う手法であり、1) 高い時間分解能が得られる、2) 最小二乗解が閉じた形で求める (探索や反復が不要)、3) 球面波モデルに基づき距離の推定値も得られる、といった特長を有するため、本研究目的に合致すると考えられる。以下、その概要を述べる。

### 3.2 波源拘束偏微分方程式

点音源から球面波として到来する音源信号をある観測点で観測するとき、観測点での音圧信号  $f(t)$ 、音

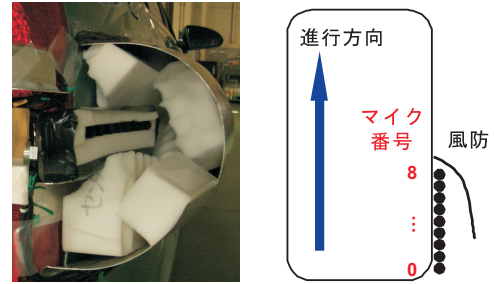


Fig. 1 試作車載音響センサの写真 (左) と模式図 (右)

圧の時空間勾配 (微分) 信号  $f_t(t)$ 、音圧の空間勾配 (微分) 信号  $f_x(t)$ 、 $f_y(t)$ 、 $f_z(t)$  の間には

$$f_x(t) - \frac{n_x}{R} f(t) - \frac{n_x}{c} f_t(t) = 0 \quad (1)$$

$$f_y(t) - \frac{n_y}{R} f(t) - \frac{n_y}{c} f_t(t) = 0 \quad (2)$$

$$f_z(t) - \frac{n_z}{R} f(t) - \frac{n_z}{c} f_t(t) = 0 \quad (3)$$

という関係式が成り立つ [4, 5, 10, 11]。ただし  $n = (n_x \ n_y \ n_z)^t$  は観測点から音源へ向かう単位ベクトル、 $R$  は観測点と音源の間の距離を表す。これらの関係式は、到来する音波が単一球面波であれば、ある観測点での音圧とその時空間勾配は線形独立ではなく、音源位置情報を係数とする線形従属関係を満足することを意味しているため、以下ではこれを波源拘束偏微分方程式と呼ぶ。また車載する際には、近接して配置した 2 本のマイクロフォンより  $f_x(t)$  のみを取得することを想定し、本稿では式 (1) のみに基づく音源定位について論じる。

### 3.3 荷重積分法による音源定位

$w(0) = w(T) = 0$  となるような窓関数を  $w(t)$  とする。式 (1) において、両辺に荷重関数  $w(t)e^{-j\omega t}$  を乗じて時間長  $T$  のフレーム内で積分し、 $f_t(t)$  が含まれる第 3 項を部分積分すると、

$$F_x(\tau, \omega) - \frac{n_x}{R} F(\tau, \omega) - \frac{n_x}{c} F_t(\tau, \omega) = 0 \quad (4)$$

という関係式を得る。ただし、

$$F(\tau, \omega) = \int_0^T f(t + \tau) w(t) e^{-j\omega t} dt \quad (5)$$

$$F_x(\tau, \omega) = \int_0^T f_x(t + \tau) w(t) e^{-j\omega t} dt \quad (6)$$

$$F_t(\tau, \omega) = \int_0^T f(t + \tau) \{j\omega w(t) - w_t(t)\} e^{-j\omega t} dt \quad (7)$$

である。 $F_t(\tau, \omega)$  は窓関数  $w(t)$  だけでなく、その時間微分  $w_t(t)$  にも依存することに注意する。この荷重積分法により、差分近似の誤差なく時間勾配情報が取得できると同時に、フレーム長に依存せず、時間領域表現である式 (1) と等価な時間周波数領域表現を得ることができる [8-10]。同様の原理は、近年、瞬時的な波源定位 [11] や高精度な正弦波周波数推定 [12] にも応用されている。

\*Localization of Driving Sound with In-vehicle Acoustic Sensors by Nobutaka ONO (The University of Tokyo), Atsunobu KAMINUMA (Nissan Motor Co., Ltd.) Shigeru ANDO (The University of Tokyo)

#### 4 時間周波数マスクによる雑音抑圧

式(4)に基づき、複数の時間周波数成分に対する最小二乗解を求めることにより安定な音源定位を行うことができるが、実際に取得される音源信号は自車エンジン音、自車走行音、別他車走行音などの影響を受けるため、観測される全ての時間周波数成分が同一の単一音源からの寄与とは限らない。本研究ではこうした雑音の影響を軽減するために、ある局所的な時間周波数領域に寄与する他車走行音は1台であると仮定し、平均的な音源方向から外れる時間周波数成分を雑音、もしくは他の音源からの寄与とみなして自動的に時間周波数マスクを設計する手法を構築した。具体的なアルゴリズムは下記の通りである。

1. 時間周波数マスクの初期値設定 (Low cut filter)

$$m(\tau, \omega) = \begin{cases} 1 & (\omega \geq \omega_c) \\ 0 & (\omega < \omega_c) \end{cases} \quad (8)$$

2. 積和量の計算 ( $\sum$  は隣接数フレームの  $\tau$  と全周波数  $\omega$  に対して計算する)

$$S = \sum m(\tau, \omega) |F(\tau, \omega)|^2 \quad (9)$$

$$S_{tt} = \sum m(\tau, \omega) |F_t(\tau, \omega)|^2 \quad (10)$$

$$S_{xx} = \sum m(\tau, \omega) |F_x(\tau, \omega)|^2 \quad (11)$$

$$S_t = \sum m(\tau, \omega) \text{Re}[F(\tau, \omega)^* F_t(\tau, \omega)] \quad (12)$$

$$S_x = \sum m(\tau, \omega) \text{Re}[F(\tau, \omega)^* F_x(\tau, \omega)] \quad (13)$$

$$S_{xt} = \sum m(\tau, \omega) \text{Re}[F_x(\tau, \omega)^* F_t(\tau, \omega)] \quad (14)$$

3. 音源定位結果の更新

$$n_x = \frac{SS_{xt} - S_x S_t}{SS_{tt} - S_t^2} \quad (15)$$

$$R = \frac{SS_{xt} - S_x S_t}{S_x S_{tt} - S_t S_{xt}} \quad (16)$$

4. 時間周波数マスクの更新 ( $\varepsilon$  は零割を防ぐ正規化項)

$$J(\tau, \omega) = \frac{|F_x(\tau, \omega) - \frac{n_x}{R} F(\tau, \omega) - \frac{n_x}{c} F_t(\tau, \omega)|^2}{|F_x(\tau, \omega)|^2 + \varepsilon^2} \quad (17)$$

$$m(\tau, \omega) = \begin{cases} 1 & (J(\tau, \omega) \leq \gamma_{th}) \\ 0 & (J(\tau, \omega) > \gamma_{th}) \end{cases} \quad (18)$$

5. 2. へ

#### 5 他車走行音定位実験

テストコースにおいて他車走行音定位実験を行った。マイクロフォンはSONYのECM-77Bであり、1kHzの正弦波94dBで、0.1Vp-pで校正してある。マイクロフォンアンプには、YAMAHA MLA-7を用いた。音響信号とともに、各車両位置をGPSシステム(Trimble社SPS851)によりあわせて計測した。録音条件はサンプリング周波数48kHz、量子化ビット数16bitであり、GPSデータはサンプリング周波数20Hzで取得した。

録音された音響信号には、懸念された流体雑音はあまりみられなかった。聴感上も自車走行音に加えて他車走行音が取得できていることを確認した上で、前節で議論した手法を適用した。分析条件は高い時間分解能を得るために、フレーム長は128点(2.67ms)、

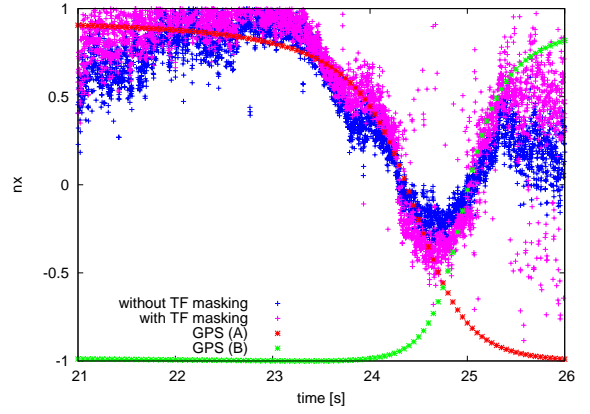


Fig. 2 音源方向定位結果とGPSデータとの比較

フレームシフトは64点(1.33ms)とした。1kHz以下の成分は自車走行に起因する雑音が大きいため、常に時間周波数マスクの値を0とすることで、分析からは除外した。積和量の計算は隣接3フレームで行い、時間周波数マスクの更新反復回数は3回、式(18)の閾値は $\gamma_{th} = 1.0$ とした。また予備実験に基づき、9本のマイクロフォンのうち、2と3のマイクロフォン対を用いて空間勾配を求めることとした(マイク番号はFig.1参照)。

Fig.2に音源定位結果の例を示す。このデータは、時速30kmで走行中の自車(中型セダン)の右隣車線を後方から接近車両(ハッチバック; A)が時速50km(相対速度20km)で追い越していき、さらにその右隣車線を対向車(大型セダン; B)がすれ違う、というシーンで録音されたものであり、追い越すとすれ違いはほぼ同時刻に起こっている。Fig.2の縦軸は音源方向ベクトルのx成分(x軸はマイクロフォンが並んでいる方向)であり、マイクロフォンアレイが車体の前後方向に対して77.69度傾いていることを除けば、前方、後方がそれぞれ-1, 1にほぼ対応している。Fig.2では、GPSデータから換算した真の音源方向と定位された音源方向を比較した。風防の影響により、側面より前方側( $n_x < 0$ )での定位範囲は限られているが、全体としてばらつきはみられるものの、概ねGPSデータと整合した正しい音源方向が推定されており、また時間周波数マスクによる雑音抑圧を行った方が、より広範囲で音源方向が推定できている様子が確認できる。今後は方位だけでなく距離の推定も含めて検討を行っていく予定である。

#### 参考文献

- [1] Oizumi *et al.*, Proc. SAE World Congress, 2003-01-0017, 2003.
- [2] 安藤他, 計測自動制御学会論文集, vol.29, no.5, pp.520-528, 1993.
- [3] S. Ando, Trans. IEICE, vol. E78-D, no.12, pp.1621-1629, 1995.
- [4] 小野他, 信学技報(EA), pp.1-8, 京都, 6月, 2003.
- [5] 小野他, 音講論(秋), pp.607-608, 9月, 2004
- [6] 小野他, 音講論(春), pp.607-608, 3月, 2005.
- [7] Ono *et al.*, Proc. Transducers, pp.792-795, Jun. 2005.
- [8] 藤田他, 音講論(秋), pp. 483-484, 9月. 2006.
- [9] Ando *et al.*, Proc. ICSV, Vienna, 2007.
- [10] Ando *et al.*, Proc. INSS, pp. 229-234, Braunschweig, Jun., 2007.
- [11] 小山他, 電気学会論文誌, vol.129-E, no.10, pp.350-356, 2009.
- [12] Ando *et al.*, IEEE Trans. SP, vol. 57, no. 9, pp.3317-3329, 2009.