

スマートモビリティのための低コスト車両センシングの実現に向けて

Toward Low Cost Vehicle Sensing for Smart Mobility

石田 繁巳

Shigemi ISHIDA

九州大学大学院システム情報科学研究所 / Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

1. はじめに

情報技術・交通の発展とともに、高度道路交通システム (ITS: Intelligent Transportation Systems) の重要性が高まっている。ITS の主な目的は、道路交通の安全性・信頼性・効率・コストパフォーマンス等を向上することである。近年では ETC (Electronic Toll Collection System) やカーナビゲーションシステムの普及により、ITS がより身近になりつつあると言える。

ITS では道路のリアルタイムな交通状況を利用する様々なアプリケーションが検討されている。例えば、道路通行料の価格設定を動的に調整するダイナミックプライシングや、交通状況に応じて確率的に道路案内を変更することで混雑を緩和するナビゲーションシステム、走行車両の位置に応じて信号のタイミングを調整することで混雑緩和・燃費向上を目指す信号制御などが挙げられる。

このようなアプリケーションの実現に向けて車両検出システムの導入が進められているが、車両検出システムの導入・運用コストが高いことから導入は交通量の多い一部の道路に限られている。導入・運用コストの低い車両検出手法として、既設のカメラを用いる手法 [1-3] やスマートフォンなどで取得した位置情報を用いる手法 [4-6] なども報告されているが、カメラの設置位置や必要となる位置情報の数などの制約により市街地などの交通量の多い道路にのみ適用可能である。

一方で、ITS アプリケーションではリアルタイムな車両検出を利用して車車間・歩車間事故軽減などの応用も検討されており [7]、交通量の比較的少ない住宅地などにおいても利用可能なリアルタイム車両検出システムの開発が必須である。車車間・歩車間事故軽減などに向けては多くの場所で車両センシングを行う必要があることから、より低コストに高い精度で車両を検出するシステムの実現が望まれる。

このような観点から、筆者らは音響センサ、すなわちマイクロフォンを用いた低コスト車両検出システムの開発を進めている [8]。本システムでは道路横の歩道に設置した2台のマイクロフォンを用いて車両の走行音を取得することで車両を検出する。可聴音の波長は車の大きさに比べて長いため、マイクロフォンを低い位置に設置しても回折により複数車線の車両を観測できる。片側の歩道の低い位置にマイクロフォンを設置するだけで車両を検出できることから、通行を規制する道路工事が不要という点で低コストでの導入・メンテナンスが可能となる。

本稿では、筆者らの開発している車両センシングシステムの概要及びこれまでの成果を報告し、実用化に向けた課題について言及する。

2. 関連研究

現在使用されている車両検出システムは埋没型と非埋没型に分類できる [9]。埋没型システムではループコイルや光電センサなどの車両検出センサを道路表面または道路下部に埋設して車両を検出する。非埋没型の車両検出システムではレーザーや赤外線、超音波、電波、カメラなどのセンサを道路側方または道路上方に設置して車両を検出する。いずれの場合にもセンサの設置に向けては道路工事が必要と

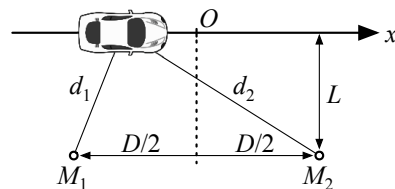


図1 路側に設置したマイクロフォン

なるために設置・運用に高いコストを要する。実際、一般に多用されている超音波センサを用いた車両カウンタの導入は1ヶ所あたり約1,000万円のコストを要する [10]。また、ループコイルや光電センサ、レーザーや赤外線などは検出範囲が狭いために二輪車の検出が困難であるという問題もある。

車両カウントシステムの設置・運用コストの削減に向け、CCTV (Closed-Circuit Television) を用いたカメラベースの車両カウントシステムが提案されているが [1-3]、CCTV は主に街中など限定された場所でのみ利用可能である。また、カメラベースの車両カウントシステムではカメラの角度・設置位置が精度に大きな影響を及ぼすことから、設置角度を変更できない CCTV では精度を担保することが難しい。

導入コストを削減する新たなアプローチとして、GPS (Global Positioning System) を搭載したスマートフォンやカーナビゲーションシステムで取得した車両の位置情報、すなわちフローティングカーデータを用いて交通量を推定する手法が報告されている [4-6]。フローティングカーデータを用いた交通量推定では、プライバシー保護や精度担保の観点から同一の道路を通行する多数の車両のフローティングカーデータを必要とする。このため、交通量の少ない道路には適用が難しい。

このような車両カウント手法に対し、音響センサを用いるアプローチは低コストでの設置・運用が可能であるという点で交通量の少ない道路のモニタリングに有用である。音響センサを用いるアプローチでは道路横に設置した2台以上のマイクロフォンで複数車線の車両を検出できる。可聴音は車両の大きさに比べて比較的波長が長いため、マイクロフォンと車両の間に別の車両がいる場合にも回折により走行音の一部がマイクロフォンに到達する。

走行音を用いた車両検出に関してはこれまでも研究が行われている [11-14]。これらの研究では、マイクロフォン・アレイを設置して「サウンドマップ」を描くことで車両を検出する。サウンドマップは、複数のマイクロフォンで観測した車両走行音の受信時間差を描いたものである。これまでに報告された研究ではサウンドマップを手動で解析し、車両を検出できることが示されている。筆者らはこれらのサウンドマップの研究を拡張し、音声によって自動的に車両を検出するシステムの実現を目指している。

3. 路側設置マイクロフォンによる車両検出システム

筆者らの開発している車両検出システムでは、図1に示すように道路横の歩道上に道路と並行に2台のマイクロフォン M_1 , M_2 を設置して車両を検出する。車両位置を x , マ

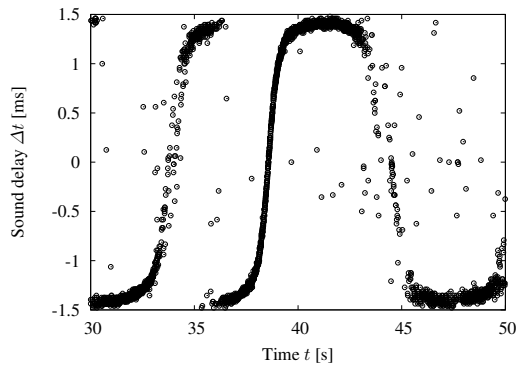


図2 サウンドマップの例

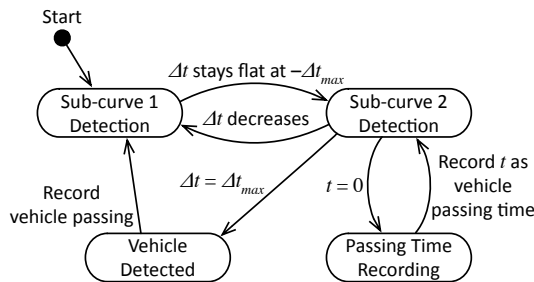


図3 車両検出ステートマシン

マイクロフォン間隔を D 、道路とマイクロフォンの距離を L 、音速を c とすると、2台のマイクロフォンに車両走行音が到達する時間の差 Δt は

$$\Delta t = \frac{1}{c} \left\{ \sqrt{\left(x + \frac{D}{2}\right)^2 + L^2} - \sqrt{\left(x - \frac{D}{2}\right)^2 + L^2} \right\} \quad (1)$$

となる。式(1)より、2台のマイクロフォンにおける音の到達時間差を計測することで車両を検出できることが分かる。

音の到達時間差は相互相関関数によって求められる。 Δt の信号に対する相互相関関数は時刻 $t = \Delta t$ において最大値を取るため、相互相関関数が最大となる点を探すことで音の到達時間差 Δt を求めることができる。提案システムでは音源定位の分野において一般的に利用されているGCC (Generalized Cross-Correlation: 一般化相互相関) [15] を用いて到達時間差を算出する。

算出した到達時間差が時刻とともに変化する様子を描いたものがサウンドマップである。図2にサウンドマップの例を示す。車両の通過とともに音の到達時間差 Δt が変化し、S字のカーブを描いていることが分かる。S字カーブの向きは車両の進行方向によって定まる。

最後に、サウンドマップを解析する車両検出アルゴリズムによりマイクロフォンの前を通過した車両を検出する。車両検出アルゴリズムはサウンドマップ上に描かれたS字カーブを検出するステートマシンである。図3に車両検出処理のステートマシン図を示す。S字カーブは、車両がマイクロフォンに向かってくる時のほぼ平らな部分、車両がマイクロフォンの目の前を通過するときの傾きのある部分、車両がマイクロフォンから離れていく時のほぼ平らな部分の3つに分解することができる。ステートマシンを用いてそれぞれの部分を順番に検出することで車両を検出する。

九州大学伊都キャンパス内の道路において提案システムの実証評価を行った。図4は評価環境を示している。対象の道路は片側1車線、合計2車線の道路であり、道路横の歩道に2台のマイクロフォンを設置してICレコーダを用いて車両走行音を約30分間取得した。ICレコーダはソニー社製PCM-D100、マイクロフォンはOLYMPUS社製ME30W

表1 評価結果

	正確度	精度	網羅率	F値
左から右	0.85	1.00	0.85	0.92
右から左	0.85	1.00	0.85	0.92
合計	0.85	1.00	0.85	0.92

である。走行音はサンプリングレート 48 kHz、量子化ビット数 16 bit で記録した。マイクロフォンの間隔は予備実験の結果に基づいて 50 cm とし、マイクロフォンを道路のすぐ横の歩道に設置したためマイクロフォンと道路の距離は約 2 m である。マイクロフォンの高さは現実的な設置のしやすさを考慮して 1 m とした。実際の車両通過有無に対する車両検出の有無にしたがって True Positive (TP)、False Negative (FN)、False Positive (FP) の回数をそれぞれ評価し、これらから正確度 (Accuracy)、精度 (Precision)、網羅率 (Recall)、F 値 (F-measure) を評価した。なお、True Negative (TN)、すなわち走行車両がない時に車両カウントをしなかった回数は数えることが困難であるため評価から除外し、正確度等の計算においては $TN = 0$ とした。

表1に評価結果を示す。表では車両の進行方向別の評価結果及び全体での評価結果を示している。提案システムのF値は0.92である。人手による車両観測においても数%~数十%の誤差があることから [16]、提案システムで十分に高い検出精度を実現できたと言える。

また、左右方向別の評価に差は見られないことが分かる。評価実験では左右同時に車両が通過する場合もあったが、マイクロフォンから遠い方の車線を走行した車両走行音も回折によってマイクロフォンに到達し、車両を検出できたと考えられる。

4. 実用化に向けての課題

提案する車両検出システムによって、F値0.92という高い精度で車両を検出できることをこれまでに確認したが、実用化に向けては3つの課題がある。

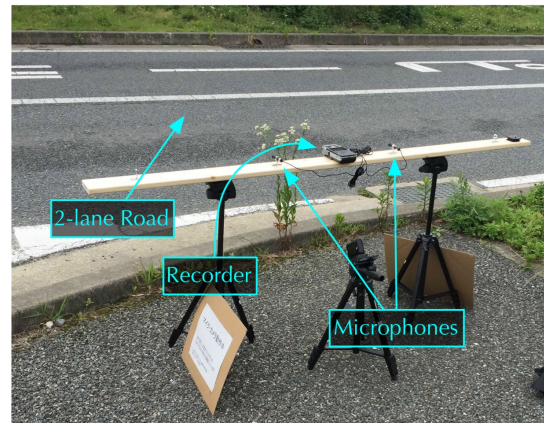


図4 評価環境

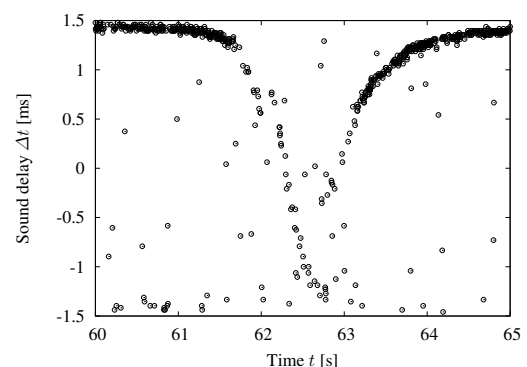


図5 2台の車両が同時に通過した場合のサウンドマップ

1つ目の課題は、複数車両同時通過時の精度低下である。複数の車両が同時に通過した場合、サウンドマップに描かれるS字カーブが薄くなり、検出精度が低下する。図5は左右に進む2台の車両が同時に通過した際に得られたサウンドマップの例を示している。サウンドマップを描くためにGCCが最大となる点を取得するが、2台の車両の存在によりGCCのピークが2つに分離し、雑音の影響が大きくなる。このために車両走行音以外の音源の点がサウンドマップ上に描かれ、薄いS字カーブとなる。

2つ目の課題は、低速走行車両の検出である。サウンドマップを用いた車両検出では、車両の移動により描かれるS字カーブを用いて車両を検出する。低速の車両ではS字の横幅が長くなり、ステートマシンによる検出が困難となる。また、長い時間のサウンドマップには環境雑音が含まれる可能性も高くなるため、車両速度に依存しない高精度な検出アルゴリズムを開発する必要がある。

3つ目の課題は、片側複数車線道路への対応である。片側複数車線道路では異なる車線を同一方向に進む車両が同時に通過する可能性がある。このような場合、各車両の走行音はほぼ同一の方向から到達するためにサウンドマップ上のS字カーブが重なり、検出精度が低下する。同時通過車両の検出は片側複数車線の道路への適用や自動車の横を通過する二輪車の検出などに向けても重要となる。

筆者らはこれまでに1つ目の課題「複数車両同時通過時の精度低下」の解決に向けて改良サウンドマップ手法を開発した [17]。改良サウンドマップ手法では車両の移動による相互相関関数の変化がノイズによる変化に比べてゆるやかであることに着目し、サウンドマップにおけるノイズの影響を軽減する。本手法の適用した初期の実験を行い、複数台の車両が同時に通過した場合の誤検出が削減されて網羅率 (Recall) を10%向上できることを確認した。これまでの開発によって片側一車線道路における実用化が可能であるのが現状である。

5. おわりに

本稿では、スマートモビリティの実現に向けて重要となる車両センシングの低コスト化について言及し、これに向けて筆者らが開発を進めている車両センシングシステムを示した。本システムは開発途上であり実用化に向けては課題があることについて述べ、現在は片側一車線道路における実用化に目処が立った状況であることを述べた。今後は本稿で示した課題の解決に向け、さらなる開発を進めていく。

謝辞

本研究の一部は、科研費 (15H05708, 15K12021, 16K16048) 及び東北大学電気通信研究所における共同プロジェクト研究の助成で行われた。

参考文献

- 遠藤正樹, 川原克美, 今井ひとみ, “CCTVを活用した新たな交通データ取得システムの提案,” 国交省北陸地方整備局 事業研究発表会資料集, pp.1-4, Sept. 2007.
- N. Buch, M. Cracknell, J. Orwell, and S.A. Velastin, “Vehicle localisation and classification in urban CCTV streams,” Proc. ITS World Congress, pp.1-8, Sept. 2009.
- A. Nurhadiyatna, B. Hardjono, A. Wibisono, W. Jatmiko, and P. Mursanto, “ITS information source: Vehicle speed measurement using camera as sensor,” Proc. Int. Conf. on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS), pp.179-184, Dec. 2012.
- G. Guido, V. Galleli, F. Saccomanno, A. Vitale, D. Rogano, and D. Festa, “Treating uncertainty in the estimation of speed from smartphone traffic probes,” Transporation Research Part C: Emerging Technologies, vol.47, pp.100-112, Oct. 2014.
- T. Seo, T. Kusakabe, and Y. Asakura, “Estimation of flow and density using probe vehicles with spacing measurement equipment,” Transporation Research Part C: Emerging Technologies, vol.53, pp.134-150, April 2015.
- T. Seo and T. Kusakabe, “Probe vehicle-based traffic state estimation method with spacing information and conservation law,” Transporation Research Part C: Emerging Technologies, vol.59, pp.391-403, Oct. 2015.
- F. Basma, Y. Tachwali, and H.H. Refai, “Intersection collision avoidance system using infrastructure communication,” Proc. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp.422-427, Oct. 2011.
- 石田繁巳, 三村晃平, 劉 嵩, 田頭茂明, 福田 晃, “路側設置マイクロフォンによる車両カウントシステム,” 情報処理学会論文誌, vol.58, no.1, Jan. 2017. (will appear).
- 井坪慎二, 塚田幸広, “情報機器の道路交通調査への適用に関する検討,” 土木技術資料, vol.47, no.8, pp.56-61, Aug. 2005.
- 東 俊孝, 高田知典, 井坪慎二, 内田 淳, “道路交通センサのための次世代情報収集システムの開発,” 土木情報システム論文集, vol.15, pp.103-110, Dec. 2006.
- J.F. Forren and D. Jaarsma, “Traffic monitoring by tire noise,” Proc. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp.177-182, Nov. 1997.
- S. Chen, Z.P. Sun, and B. Bridge, “Automatic traffic monitoring by intelligent sound detection,” Proc. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp.171-176, Nov. 1997.
- S. Chen, Z. Sun, and B. Bridge, “Traffic monitoring using digital sound field mapping,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol.50, no.6, pp.1582-1589, Nov. 2001.
- B. Barbagli, G. Manes, R. Facchini, and A. Manes, “Acoustic sensor network for vehicle traffic monitoring,” Proc. IEEE Int. Conf. on Advances in Vehicular Systems (VEHICULAR), pp.1-6, June 2012.
- C.H. Knapp and G.C. Carter, “The generalized correlation method for estimation of time delay,” IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process., vol.24, no.4, pp.320-327, Aug. 1976.
- 井坪慎二, “ITを用いた交通調査の高度化・効率化に関する研究,” PhD thesis, 京都大学, Sept. 2009.
- S. Liu, S. Ishida, S. Tagashira, and A. Fukuda, “[encouragement talk] enhanced sound mapping for successive vehicle detection in acoustic vehicle count system,” IEICE Tech. Report, pp.1-6, Tech. Committee Network Systems (NS2016-88), Oct. 2016.