原著論文

カルマンフィルタを用いた背景推定法による 農業用自律走行車両の検出

長谷川英夫*・瀧川具弘*・小池正之*・余田 章*

*国立大学法人筑波大学大学院生命環境科学研究所

Detection of an Agricultural Autonomous Vehicle by
Using Background Estimation Method Based on Kalman Filter

Hideo HASEGAWA*, Tomohiro TAKIGAWA*,

Masayuki KOIKE*, Akira YODA*

*Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

1. 緒言

精密農法は、欧米を中心に食糧保全と持続可能な環境保全を両立させる手法として認知され、積極的な利用が図られている。わが国では、欧米型の精密農法を経営規模や経営形態の点から解釈し直した日本型精密農法が普及している。そこでは、農業従事者の高齢化・婦女子化、農産物の低コスト生産及び消費者の食の安全に対する意識の高まりを背景として、自律走行車両の開発、画像計測及び各種センサを応用した植物の生育状態のセンシング等に関する研究が行われている。特に、自律走行車両に係る国内外の研究報告例を概観すると、その航法と作業性能を検討した研究（松尾ら2001）や欧米での研究例（Reidら2000, Keicherら2000）に代表されるようにその実現に向けた各種要素技術に関心が集中していることが多い。ここで、精密農法においても基幹動力源と位置づけられるべき自律走行車両が将来的に普及した場合を想定すると、車両保管、作業機の着脱、肥料・農薬の補給及びメンテナンス等を行う作業拠点の

設計に当たっては、従来型車両の場合とは異なる要件に配慮する必要があると考えられる。しかし、上述の研究報告例に比して、その作業拠点の在り方について総合的な視点から論じたものは、寡聞にして少ないのが現状である。

本研究は、上述の作業拠点を「作業ステーション」と名づけ、自律走行車両を取り巻く作業・交通環境に係る走行状況のモニタリングについて画像計測の観点から検討することを目標としている。本報では、作業ステーション付近での車両の検出を目的としてカルマンフィルタを用いた背景推定法によるシステムの構築を行い、いくつかの知見を得たので報告する。

2. 作業ステーションの概要

本研究では、農作業における自律走行車両の作業拠点を作業ステーションと呼称する（図1）。作業ステーションとは、自律走行車両が作業機の着脱、肥料・農薬の補給を行うほかに、メンテナンスあるいは車両保管などを行う場であると想定している。さらに、図1に示したように同ステーションは、完全に無人化したシステムのもとでの運用が目標ではない。その理由は、事故や故障などの非常事態における自律走行車両の緊急停止や事態の状況を正確に把握する必要性においてオペレータの存在が必要不可欠であると考えられるからである。図中には、上述のオペレータによる監視を説明する目的から右上に「監視センター」を

平成16年9月10日受付

平成17年11月18日受理

Corresponding author

長谷川英夫 Hideo HASEGAWA

〒305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1

1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8572 Japan

E-mail : hsgw@sakura.cc.tsukuba.ac.jp

図1 作業ステーションの概念図

意図した施設を示し、オペレータは目視により、作業に出發・帰還あるいは作業中の自律走行車両を監視可能であると想定している。

3. 背景推定手順

動画画像中の移動物体を検出する方法としては、背景差分などの差分処理を用いる方法と物体の移動方向を示すオプティカルフローを用いる方法の2つが挙げられる。前者の方法は、背景画像が比較的容易に得られる場合には背景差分が用いられ、背景が安定して得られない場合にはフレーム間差分が用いられる。しかし、フレーム間差分法のみでは物体が一時的に静止している場合などには対応できない。一方、後者の方法は、物体の動きを求めるのに有用であるが、計算コストの点で動画画像処理には向いていない。

一般的な背景差分処理法は、予め撮影した物体のない背景画像を利用する基本的な移動物体検出法であり、背景画像を $f(m, n)$ 、背景画像中に移動物体を含む画像を $g(m, n)$ とすると、差 $s(m, n)$ は、(1)式で表される。

$$s(m, n) = |f(m, n) - g(m, n)| \quad (1)$$

ここで、 m, n は画素の座標、 $f(m, n)$ と $g(m, n)$ は各画素の輝度を表す。

一方、本研究で提案する「作業ステーション」のように、自律走行車両を取り巻く作業・交通環境に係る走行状況をモニタリングする際、ビデオカメラの映像が主たる入力画像になると考えられる。その場合、取得した動画画像の中で物体の位置が時々刻々と変化するフレーム画像 $f_{i-1}(m, n)$ 、 $f_i(m, n)$ 、 $f_{i+1}(m, n)$ ……において、フレーム間差分 $s_i(m, n)$ は、次式で表される。

図2 カルマンフィルタのブロック線図

$$s_i(m, n) = |f_i(m, n) - f_{i-1}(m, n)| \quad (2)$$

さらに、自律走行車両を取巻く実際の交通環境を考えると、背景画像を容易に得られない状況や日照の変化などにより背景が頻繁に変化する状況が想定される。そこで本研究では、上述のフレーム間差分による移動物体の検出法に動的しきい値処理を適用した。すなわち、連続する3フレームの画像の $f_{i-1}(m, n)$ 、 $f_i(m, n)$ 、 $f_{i+1}(m, n)$ 2つの絶対値差分画像 $|f_i(m, n) - f_{i-1}(m, n)|$ 、 $|f_i(m, n) - f_{i+1}(m, n)|$ の共通領域を取り出すために論理積をとり、下記のしきい値処理することで移動物体の判定を行った。

$$M_i(m, n) = \begin{cases} 1 & |f_i(m, n) - f_{i-1}(m, n)| > Th \\ 0 & |f_i(m, n) - f_{i-1}(m, n)| \leq Th \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $M_i(m, n)$ は座標 (m, n) における画素の状態、 Th は、輝度変化を判定するしきい値を表す。

しかし、この手法では、背景とみなすべき物体が静止している場合は有効であるが、屋外の監視システムのように、雨や雪の自然環境の変化、風による背景物体のゆれ、供試カメラの振動による画像のゆれなどがある場合には適用が困難となる。そこで、まず、上述の背景変動を考慮した背景推定法に対して、以下に示すようなカルマンフィルタを追加した。

$$\hat{X}(t_i) = \bar{X}(t_i) + K(t_i) \cdot (Z(t_i) - Y(t_i) \cdot \bar{X}(t_i)) \quad (4)$$

$$\bar{X}(t_i) = S(t_i) \cdot \hat{X}(t_{i-1}) \quad (5)$$

ここで、 $\hat{X}(t_i)$ は更新値、 $\bar{X}(t_i)$ は予測値、 $K(t_i)$ はカルマンゲイン、 $Z(t_i)$ は入力値、 $Y(t_i)$ は測定行列、 $S(t_i)$ はシステム行列を表す。図2に供試カルマンフィルタのブロック線図を示す。

次に、(3)式に示したしきい値 Th は、上述の天候や時間帯による変化に適応する必要がある。そのため、過去の一定期間に取り込んだ複数フレームの輝度変化の分散を求め、しきい値 Th に重み付けして更新した(小林ら 2004)。フレーム $t-1$ か

図3 供試プログラムの背景推定手順

ら $t - 1$ までの輝度値の分散は次式のように求めた。

$$S_{t-1}^2(m,n) = \frac{I \sum_{i=1}^I s_{t-i}^2(m,n) - \left(\sum_{i=1}^I s_{t-i}(m,n) \right)^2}{I(I-1)} \quad (6)$$

以上のようにして、輝度変化の分散を反映したしきい値を(7)式のように更新した。

$$Th = \rho \cdot S_t(m,n) + (1 - \rho) Th_{t-1} \quad (0 < \rho < 1) \quad (7)$$

ここで、 ρ は、分散をしきい値にどの程度反映させるかについて決定する定数であり、しきい値が輝度変化に追従できるように試行錯誤で決定した。供試プログラムの背景推定手順の詳細を図示すると図3のようになる。

表1 キャプチャボードの仕様

入力信号	NTSC/PAL
キャプチャタイム	5-30fps
インターフェース	69-pin video connector, S-VHS, composite
対応 OS	IRIX

4. 供試解析装置

供試解析装置は、デジタルビデオカメラ (SONY DCR-PC7; ビデオ入力: NTSC (24bit), CCD サイズ: 1/3インチ, レンズ: 10 倍ズーム, 焦点距離: 4.0 ~ 40mm, F: 1.8 ~ 2.6, インタレース) とパーソナルコンピュータ (CPU: Celeron 850MHz, OS: Windows 2000) で構成した。また、トラクタは、Y 社製 AF230 (撮影時: 主変速, 副変速ともに 3 速) を供試した。車両の検出は、供試カメラで撮影した動画画像から静止画像を作成し、市販の画像処理開発環境により生成した C 言語プログラムで逐次処理することにより行った。なお、供試カメラによる撮影に際しては、カメラの絞りとシャッター速度が被写体にに応じて自動的に設定されるプログラムモードで行った。また、背景推定に供する静止画像の生成にあたっては、まず、上述の DV 形式 (720×480 画素) の動画画像を S-VHS ケーブルを介して SGI 社製ワークステーション O2(OS: IRIX6.5.22, CPU: R10000 250MHz) に取込み、付属する画像生成ソフトウェア MediaRecorder を用いて AVI 形式の動画画像ファイルを作成した。そして次に、その動画画像をソフトウェア MovieMaker に取込んで 30 フレーム / 秒 (以下、fps と略記) の JPEG 画像に変換した。表 1 にワークステーションに内蔵したキャプチャボードの仕様を示す。

5. 解析結果及び考察

本研究では、カルマンフィルタを用いた背景推定法による車両の検出を一般的な背景差分を用い場合と比較して、前者の適用可能性を検討した。

1) 供試画像の輝度分布

供試画像の取得は、2005 年 5 月 25 日 (晴天, 撮影開始時刻: 午後 3 時 5 分, 平均風速: 0.6m, 最大風速: 3.3m) と 2005 年 5 月 30 日 (曇天, 撮影開始時刻: 午前 10 時, 平均風速: 1.2m, 最大

図4 晴天時と曇天時の輝度分布

風速：7.6m)の2回に分けて行った。図4に晴天時と曇天時の初期背景画像と各々の輝度のヒストグラムを示す。晴天時と曇天時のヒストグラムのピークは、共に道路部分(木陰を除く)であった。

2) 一般的な背景差分を用いた場合の車両検出結果

晴天時と曇天時の画像に対して、一般的な背景差分を適用した結果を図5と図6に示す。ここで、図中の実線矢印はトラクタの走行経路を、破線矢印は2名の人の移動及び接近して遠ざかる自動車の走行経路をそれぞれ示している。図5上段は、トラクタが道路側に伸びた木陰を通過する様子を表している。図5(b)は、木陰に入る直前の様子を示しており、この時点において、トラクタの検出は良好である。しかし、図5(c)に見られるように、道路に伸びた木陰に侵入するとトラクタの全体を検出できず、オペレータを含めた高輝度部分とそれが移動する際につくる影が移動物体として検出された。一方、図5下段のように、図4(b)に見られる高輝度部分を走行する画像では、木陰の影響がないため検出は良好であった。また、図6上段は、図5の上段とほぼ同じ位置を走行している画像であり、図5で確認されたような木陰が存在しないためにトラクタの検出に支障は認められなかった。さらに、図6(c)の3つの白枠のうち、一番小さい7×7画素程度の大きさの移動物体(画像奥を左から右へ移動する人)も検出することができた。加えて、図6下段に示すように、時速20km程度の速度とトラクタに比べ高速に移動する自動車もほぼ正確に検出できることが確認できた。

図5 一般的な背景差分を用いた場合の車両検出結果(晴天)

図6 一般的な背景差分を用いた場合の車両検出結果(曇天)

ところで、図6(b)に示すようにトラクタが安全確認のために一時停止するとその検出が不可能となり、従前の背景差分の欠点が顕在化する結果となった。加えて、図5と図6に見られるように、風の影響により揺れた木々を移動物体と誤って認識する結果となった。以上から、一旦停止時にもトラクタの検出ができ、風などの観測雑音の影響を受けにくい検出方法が検討すべき課題として指摘できた。

3) カルマンフィルタを用いた場合の車両検出結果

晴天時と曇天時の画像に対して、カルマンフィルタを用いた背景推定法による検出結果を図7と図8に示す。カルマンフィルタを用いた背景推定では、初期背景画像を読込んで数百十フレーム目までは図8(a)に示すように検出に至る過渡的な画像が確認された。図7上段では、木陰を通過する際にトラクタ部分の輝度が相対的に低下して全体を検出できなかった点(図5(c))が改善された。また、図7下段のように輝度が安定している箇所での検出は図6と同様に良好であった。さらに、図5と図6で顕在化していた風の影響により揺れる木々を移動物体と認識する点は、図7と図

図7 カルマンフィルタを用いた場合の車両検出結果（晴天）

注1) (a)～(c)の走行経路は、図5 (a)に同じ。
(d)～(f)の走行経路は、図5 (d)に同じ。

図8 カルマンフィルタを用いた場合の車両検出結果（曇天）

注1) (a)～(c)の走行経路は、図6 (a)に同じ。
(d)～(f)の走行経路は、図6 (d)に同じ。

8から判断するかぎり改善されたことが確認できた。曇天時の画像では、トラクタ及び自動車の検出は良好であったが、供試画像の取得中に断続的に発生する強風の影響で木々が大きく揺れ、図7では確認できなかった木々の揺れを移動物体と誤って認識する検出結果が散見された。この点に関しては、画像中に占める木々の揺れによる誤認識を示す白枠が図6に比べて十分に小さいことと先に示した作業ステーションの概念図（図1）中のオペレータによる監視を考え併せると、検出に関する支障は少ないと判断した。また、図8 (b)では、一般の背景差分を適用した場合に問題となる一時的に停止した移動物体を明確に検出できることが確認できた。

以上、晴天時の画像と曇天時の画像に対して、一般的な背景差分を適用した場合とカルマンフィルタを用いた背景推定を適用した場合を比較検討した。今回の解析結果においては、カルマンフィルタを用いた背景推定を適用する場合、晴天と曇天の輝度の差異よりも、木陰を通過する際のよう

に、各々の画像中の輝度変化が検出結果に大きな影響を及ぼしていることが分かった。さらに、一般的な背景推定では除去が困難となる風の影響に対してもカルマンフィルタを用いた背景推定は有効であることが改めて確認できた。

4) 処理時間と検出精度

本研究では、デジタルビデオカメラで撮影した動画画像を静止画像に変換して、車両の検出を行った。供試プログラムの処理時間は、1フレーム当たり100msecを要した。ここで、本研究成果の適用可能性に関して、前述の「監視センター」を前提として考えてみると、事態把握の所要時間は、短い方が望ましい。その対応策としては、本研究で開発した特定のハードウェアに依存しない処理プログラムの利点を生かして、近年低価格化が著しい高速CPUで処理時間の短縮を図ることも一案であると考えられる。しかし、供試動画画像のサンプリングレートと1フレーム当たりの処理時間を考えれば、CPUの高速化だけでは処理能力に限界があると思われる。そこで、カルマンフィルタを用いた背景推定法を適用した検出結果（図7と図8）に基づき、対応する元動画画像に対してサンプリングレートを30fpsから1fpsの5水準に変更した静止画像を作成して画像処理プログラムで処理し、車両の検出精度と風などの観測雑音によって木々の揺れを移動物体と認識する割合を求め、処理時間と検出精度に係る考察を試みた（図9）。なお、1fpsに対応する静止画像に関しては、30fpsでサンプリングした静止画像を1fpsに合致するように選択して作成した。ここで、観測雑音の割合は、 $\left(\left(\text{トラクタと車両以外の白枠の面積} [\text{画素}] \right) / \left(\text{供試画像の面積} [\text{画素}] \right) \times 100 \right)$ から求めた。その結果、晴天時の画像では、サンプリングレートが大きくなるにつれて車両の検出領域の面積（白枠の面積）が増加する傾向が見られた。その際、観測雑音の割合は、3fpsを境界にして急激に増加した。一方、曇天時の場合、車両の検出領域の面積は、晴天の場合と類似した傾向が見られた。しかし、観測雑音の割合は、サンプリングレートが10fps (0.48%) から3fps (3.4%) に移行する過程で急激に増加する傾向を示した。曇天時の画像を撮影した際の強風の影響がその主な原因ではないかと推察された。以上、検出精度に関してサンプリングレートから判断すると、晴天

図9 サンプリングレートの違いによる車両検出領域の面積と観測雑音の割合

時・曇天時ともに10fps以上のサンプリングレートを確保する必要があると考えられた。

5) 今後の課題

本報では、作業ステーション付近での車両の検出を目的としてカルマンフィルタを用いた背景推定法による監視システムの構築を行った。今後の課題としては、作業ステーションの概念図(図1)に示した機能を実現するために1)作業機の検出と距離計測、2)作業機等への接近方法について画像計測の観点からさらに検討することが挙げられる。また、本報では屋上に設置したビデオカメラで画像取得を行ったが、近年目覚ましい発達を遂げているブロードバンド環境と無線ネットワーク対応カメラの活用も、サンプリングレートに配慮してネットワークへの負荷に配慮すれば、車両の検出に有効な手段になり得ると思われる。その場合、複数の作業ステーションを1ヶ所の監視センターで監視するなど作業ステーションのより一層の高度化が必要になると考えられる。本研究で考察したサンプリングレートに係る処理時間と検出精度についての考察をもとにネットワーク対応型への移行を現在進めているところである。

6. 摘要

本研究は、自律走行車両が将来的に普及した場合を想定して、車両保管、作業機の着脱、肥料の補給などを行う作業拠点を作業ステーションと名づけ、その周辺を往来する当該車両が直面する諸問題に対して、画像計測を適用して解決すること

を目的としている。

本報では、特に作業ステーション付近を走行する車両の検出を行う監視システムを構築した。得られた知見を要約すれば、以下のとおりである。

- 1) 一般的な背景差分の場合、トラクタが安全確認のために一時停止するとその検出が不可能となることと風などの観測雑音の影響が顕在化する結果となった。
- 2) カルマンフィルタを用いた背景推定を適用する場合、晴天と曇天の輝度の差異よりも、木陰を通過する際のように、各々の画像中の輝度変化が検出結果に大きな影響を及ぼしていることが分かった。
- 3) さらに、一般的な背景推定では除去が困難となる風の影響に対してもカルマンフィルタを用いた背景推定は有効であることが改めて確認できた。
- 4) 供試プログラムの処理時間は、1フレーム当たり100msecを要した。
- 5) サンプリングレートから判断すると、検出に際して、晴天時・曇天時ともに10fps以上のサンプリングレートを確保する必要があると考えられた。

謝 辞

本研究は、文部省科学研究費基盤研究(B)(課題番号09460113)の補助を受けて行った。記して感謝の意を表します。また、研究を遂行するに当たり、筑波大学農林技術センター技術専門職員松本安広氏にご協力いただきました。記して深く謝意を表します。

キーワード

自律走行車両、作業ステーション、カルマンフィルタ、背景推定、検出

引用文献

- 小林剛史, 藤吉弘亘, 矢入(江口)郁子, 香山健太郎, 吉水 弘(2004): 高齢者・障害者のための歩行者移動支援システム(RCT), 第10回画像センシングシンポジウム: 225-230.
- 片山 徹(1983): 応用カルマンフィルタ, 朝倉書店, 東京, pp.71-80.
- Keicher, R., Seufert, H. (2000): Automatic guidance for agricultural vehicle in Europe, Com-

puters and Electronics in Agriculture, 25 : 169-194.

Klaus-Peter Karmann, Achim von Brandt (1990) : Moving Object Recognition Using an Adaptive Background Memory ; Time-Varying Image Processing and Moving Object Recognition 2, Elsevier, Amsterdam, pp.289 - 296.

松尾陽介・行本 修・入江康夫・一杉則昭・野口 伸 (2001) : 耕うんロボットの航法技術と作業性能 (第1報), 農業機械学会誌 63 (3) : 114-121.

Reid, J. F., Zhang, Q., Noguchi, N., Dickson, M. (2000) : Agricultural automatic guidance research in North America, Computers and Electronics in Agriculture 25 : 155-167.

Abstract

This paper introduces an outline of a workstation for the agricultural autonomous vehicles. It also describes a background estimation method based on the Kalman filter for detecting an agri-

cultural autonomous vehicle. The detecting system has been achieved in eight steps : generation of a background image and initialization, adaptation of a background image, detection of a foreground image, computation for the connected components of a region ; computation for the intersection of two regions ; computation for regions with the aid of shape features ; transformation of the shape of a region, update of a background image. In this research, performance of the background estimation method based on the Kalman filter has been compared with that of general background subtraction in terms of accuracy, using both images captured on a sunny and cloudy day. The results showed that increasing the accuracy requires more than 10 frames per second to detect an agricultural vehicle in the above conditions.

Keywords

autonomous vehicle, workstation, Kalman filter, background estimation, detection