収穫物上部の計測データとカルマンフィルタを用いた 地表面高さの推定

Estimation of the Ground Position using Kalman Filter with Data Measured at the Top of Seedlings

○久保田亮平 (信州大), 千田有一 (信州大), 中村雄太 (信州大), 丸山寛智 (信州大),
平野幸助 (信州大) 土屋貴司 (信州大), 塩入敏夫 (JA 全農長野), 畠田武司 (JA 全農長野),
藤ヶ崎静男 (JA 長野八ヶ岳), 北沢進 ((株) 西澤電機計器製作所)

Ryohei KUBOTA, Yuichi CHIDA, Yuta NAKAMURA, Hirosato MARUYAMA, Kosuke HIRANO,
Takashi TSUCHIYA, Shinshu University, Wakasato 4-17-1, Nagano, Nagano 380-8553
Toshio SHIOIRI, Takeshi SHIMADA, JA National Federation of Agricultural Cooperative Associations
Nagano
Shizuo FUJIGASAKI, JA Nagano Yatsugatake
Susumu KITAZAWA, Nishizawa Electric Meters Manufacturing Corporation

This research paper proposes an estimation method of the ground position. This system will be used as a part of the automatic spinach harvest robot that is under development by our research group. Taking the characteristics of the spinach seedling heights into account, the Kalman filter is used for the proposal system. Experiments have confirmed the potential of the system to detect the ground position with the data measured at the top of seedlings.

Key Words: Harvesting Robot, Sensor, Kalman filter, Agriculture, Spinach

1. 緒言

現在, 日本の農業は従事者の人口減少, 高齢化などの問題を抱えている. この問題を解決するため, 耕耘, 種蒔き, 育成, 収穫などの様々な作業の機械化が盛んに行われ, 実用化されている. しかし, ホウレンソウを代表とする生食用軟弱野菜の収穫は未だに手作業で行われている. 既に開発されている生食用ホウレンソウ自動収穫機^{[1],[2]}は, 畑の環境や品種が限定されており広く普及するに至っていない. 最大の課題のひとつとして, ホウレンソウの根を一定の長さで切ることが挙げられている. 環境や品種によらず一定の長さで根切りを行うためには, 土中における切断刃の位置を制御することが欠かせない. さらに, その制御を正確に行うためには地表面高さを正確に計測する必要がある. しかし, 全面蒔きの畑を対象としたとき, ホウレンソウを収穫した後のみ地表面が露出し, その箇所を計測したデータは大幅な時間遅れを伴っている. よって, 切断刃の位置におけるリアルタイムでの計測ができない. 現在我々が開発している自動収穫機では, この時間遅れを伴った地表面高さのデータを用いて制御している^[3].

そこで本研究では, 収穫物上部の計測データとカルマンフィルタを用いて地表面高さを推定する手法を提案する. すなわち, 切断刃より前方におけるホウレンソウ上部からのデータを計測し, カルマンフィルタを用いて地表面高さの推定を行う. その際, 露出した地面から計測される時間遅れを伴うデータで補正を行う. 本稿では, 実際に畑で植わっているホウレンソウを計測したデータを基に検証する.

2. 自動収穫機の要素

2.1 自動収穫機の全容

開発したホウレンソウ自動収穫機を図 1 に示す. このホウレンソウ自動収穫機は切断刃, 高さ制御機構, 角度制御機構, 地表面位置センサ, コンベア, クローラで構成されている. 過去の実験結果より, 切断刃の角度を変化させることが安定した根切りの実現に有効であることが確認されている^[4]. そこでこの自動収穫機は, 地表面位置センサによる計測値を基に,

Fig.1 Harvest robot of spinach

Fig.2 Sensor structure

高さ制御機構, 角度制御機構を用いて切断刃を制御し, ホウレンソウの根切りを行う. その後コンベアによって根切りされたホウレンソウを回収する仕組みになっている.

2.2 地表面位置センサ

地表面位置センサの構造を図 2 に示す. 切断刃より 234[mm] 前方に設置した sensor1 でリアルタイムにおけるホウレンソウ上部を計測し, 切断刃より 374[mm] 後方に設置した sensor2 でホウレンソウを収穫した後の時間遅れを伴う地表面高さを計測する. なお, sensor1 と sensor2 は設置している高さが違うが, 2つのセンサの高低差である 167[mm] を sensor2 のデータに足

すことによって擬似的に同じ高さから計測しているものとしている。また, sensor2 と sensor1 は水平方向に 609[mm]離れており, クローラ速度を 5[cm/s]とすると, sensor2 で計測したデータは, sensor1 で計測したデータに対して約 12[s]の時間遅れを伴うことになる。

3. ホウレンソウ高さデータの特徴

図 1 に示した自動収穫機を用いて, 実際に野辺山高原のホウレンソウ畑でデータを計測した。計測したデータより平坦な地面に植わっているホウレンソウの高さを算出し, FFT 解析にかけたところ, 図 3 のような結果となり, 特徴的な周波数を有していないことが分かった。しかし, この結果は白色雑音を積分器に通して得られるランダムウォークを FFT 解析にかけた結果と似た波形であることが分かった。よって, この特徴を用いて観測システムのモデルの仮定を行う。

4. 観測システムのモデル

仮定したモデルを図 4 に示す。積分機を 2 つ有している形になっている。 y_1, y_2 はそれぞれ sensor1, sensor2 で観測可能な状態量である。未知の白色雑音である w_1, w_2 を積分機に通して x_1, x_2 が得られる。 x_1 はリアルタイムにおける平坦な地面に植わっているホウレンソウの高さ, x_2 はリアルタイムにおけるセンサから地表面までの距離であり, これらは観測不可能な状態量である。 x_2 から x_1 を引くことで y_1 を得る。また, x_2 を時間遅れを表現している伝達関数 G に通してやることで y_2 を得る。 G は以下に示す通りである。

$$G = z^{-m}, \quad m = \frac{T}{T_s} \quad (1)$$

なお, T は sensor1 に対する sensor2 の時間遅れ, T_s はサンプリング時間である。また, 出力の前には観測ノイズ v_1, v_2 が印加していると仮定した。

このモデルに対する状態推定器を設計することによって, 観測不可能である状態量 x_2 を推定することができ, リアルタイムにおける地表面高さが分かる。よって, 状態推定器を設計するためにこのモデルの状態方程式を求める。出力 y , 状態変数 x , システムノイズ w , 観測ノイズ v を以下のようにおく。

$$y[k] = \begin{bmatrix} y_1[k] \\ y_2[k] \end{bmatrix}, x[k] = \begin{bmatrix} x_1[k] \\ x_2[k] \\ x_2[k-m] \\ x_2[k-(m-1)] \\ \vdots \\ x_2[k-1] \end{bmatrix}$$

$$w[k] = \begin{bmatrix} w_1[k] \\ w_2[k] \end{bmatrix}, v[k] = \begin{bmatrix} v_1[k] \\ v_2[k] \end{bmatrix}$$

Fig.3 FFT analysis result

Fig.4 Model of observation system

Fig.5 Block diagram of Kalman filter

以上より, 仮定した観測システムのモデルの状態方程式は以下ようになる。

$$\begin{cases} x[k+1] = A_d x[k] + B_d w[k] \\ y[k] = C_d x[k] + v[k] \end{cases} \quad (2)$$

$$A_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \mathbf{0}_{2 \times m} \\ 0 & 1 & \mathbf{I}_{(m-1)} \\ \mathbf{0}_{(m-1) \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times m} \end{bmatrix}, B_d = \begin{bmatrix} T_s & 0 \\ 0 & T_s \\ \mathbf{0}_{m \times 2} \end{bmatrix}$$

$$C_d = \begin{bmatrix} -1 & 1 & \mathbf{0}_{1 \times m} \\ 0 & 0 & \mathbf{1}_{1 \times (m-1)} \end{bmatrix}$$

次に, このモデルに対する状態推定器を設計する。

5. カルマンフィルタの設計

状態推定器には, 外乱が白色雑音であるモデルに対して有効なカルマンフィルタを用いる。設計したカルマンフィルタのブロック線図を図 5 に示す。カルマンゲインは $(m+2)$ 行 2 列の行列であり, 以下のように求める。

$$K = P C_d^T [C_d P C_d^T + R]^{-1} \quad (3)$$

$$P = A_d (P - P C_d^T [C_d P C_d^T + R]^{-1} C_d P) A_d^T + Q' \quad (4)$$

なお,

$$Q' = B_d Q B_d^T$$

とおいている。推定値 $\hat{x}$ は以下のように求まる。

$$\hat{x}[k] = (I - K C_d) A_d \hat{x}[k-1] + K y[k] \quad (5)$$

本来, Q, R はそれぞれ w, v の共分散行列であるが, 本研究では Q', R をチューニングパラメータとして用いている。式(3), (4)より, Q' を大きくする, または R を小さくすると, カルマン

ゲイン K が大きくなり、カルマンフィルタの感度が良くなる。逆に、 Q' を小さくする、または R を大きくすると、カルマンゲイン K が小さくなり、カルマンフィルタの感度が悪くなる事がわかる。

6. 推定結果

6.1 目標設定

推定を行う前に、目標を設定する。ハウレンソウの根切りの条件として、以下の2つが挙げられる。

- ・生食用としての商品価値を保つため、値の長さを0.5[cm]以上とすること
- ・値が長いと回収が困難であるため、値の長さを5[cm]以下とすること

ここで、目標根切り長さを3[cm]とし、誤差を ± 2 [cm]に抑えることで、上記の条件を満たすことができる。そこで、本稿における目標は、推定誤差 ± 2 [cm]に抑えることとする。

6.2 推定結果

チューニングパラメータである Q' 、 R を以下の様に設定する。

$$Q' = I_{(m+2)}, \quad R = I_2 \quad (6)$$

上記のチューニングパラメータに加え、

$$T = 12, \quad T_s = 0.1, \quad m = 120 \quad (7)$$

として設計したカルマンフィルタに、実際のハウレンソウ畑で得られた計測データを入力した推定結果を図6に示す。なお、計測データには限りがあるため、データの最終値と初期値を合わせて同じデータを繰り返し入力している。図6からは誤差を評価することはできるが、時間遅れに対する評価ができないため、入力するデータを加工する。

6.2 性能検証

ハウレンソウ畑で入手した地表面高さのデータにステップ信号を印加し、擬似的に段差のある地面のデータを作成した。元の地表面高さのデータを図7に、作成した地表面高さのデータを図8に示す。なお、図8のような段差は実際の畑には存在せず、あくまでカルマンフィルタの性能を検証するための加工である。

作成したデータを入力とし、以下のCaseにおけるチューニングパラメータを用いて設計したカルマンフィルタによる推定結果をそれぞれ図9,図10,図11に示す。なお、 T, T_s, m は式(7)と同様である。

Fig.6 Estimation result

Fig.7 Ground position data

Fig.8 Processing data

Case1

$$Q' = I_{(m+2)}, \quad R = I_2$$

Case2

$$Q' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0_{2 \times m} \\ 0 & 10^4 & \\ 0_{m \times 2} & & I_m \end{bmatrix}, \quad R = I_2$$

Case3

$$Q' = \begin{bmatrix} 10^4 & 0 & 0_{2 \times m} \\ 0 & 1 & \\ 0_{m \times 2} & & I_m \end{bmatrix}, \quad R = I_2$$

Case2はCase1に比べて地表面高さの推定結果を真値の変化により対応できるような Q' を設定し、Case3はCase1に比べて地表面高さの推定結果の誤差が小さくなるような Q' を設定した。それぞれのCaseにおける x_1, x_2 に対応するカルマンゲインの1行目,2行目の成分を表1に示す。

図10を見ると、真値の変化に時間遅れなく追従できているが、最大誤差が9.5[cm]と大きくなってしまっていることが分かる。

また、図11を見ると、最大誤差が4[cm]と小さくなっているが、真値の変化に対応できていないことが分かる。

6.3 提案手法の問題点

誤差を小さくしたいことと、時間遅れなく地表面高さの推定を行いたいことは、トレードオフの関係にある。よって、本稿では適切なパラメータを試行錯誤的に求めようとしたが、目標を達成できるカルマンゲインは設計できなかった。よって、本稿で設計したカルマンフィルタだけでは目標は達成できず、改善が必要であると考えられる。そこで、最大誤差の原因でもある、推定結果の50[s]から60[s]の間における波形に注目した。この波形は、地表面高さの真値とはかけ離れており、何かの影響を受けていることが考えられる。そこで、図

Fig.9 Estimation result of Case1

Fig.10 Estimation result of Case2

Fig.11 Estimation result of Case3

Table 1 Kalman gain values in each case

Case	カルマンゲインの成分
Case1	-0.3660 0.0622 0.3660 0.0622
Case2	-0.0010 0.0865 0.9980 0.0865
Case3	-0.9980 0.0868 0.0010 0.0868

10 とその時の sensor1 で計測したデータとを比較したものを図 12 に示す。すると、推定値と sensor1 で計測したデータは、似た波形であることが分かった。そこで、sensor1 で計測するデータを平滑化してやることで問題が解決できるのではないかと考えられる。

7. 結言

今回は、ハウレンソウ上部から計測したデータを基にその地点における地表面高さの推定手法を提案した。畑に植わっているハウレンソウの高さには周期がなく、その特徴を利用したカルマンフィルタを用いることで、切断刃位置における地表面高さを推定できる可能性を見出した。しかし、推定誤差を $\pm 2[\text{cm}]$ 以内に抑えろといった目標を達成するためには、改善が必要であると考えられる。

Fig.12 Comparison of Fig.10 and y_1

今後は、最大推定誤差を小さくするために Sensor1 で取得するデータを平滑化する機構を作ることを予定している。また、根切り長さは $5[\text{cm}]$ 以内という条件を設けたが、これは厳密な値ではないので、目標値の見直しをすることも必要であると考えられる。

謝辞

今回、JA 全農長野殿、JA 長野八ヶ岳殿、株式会社西澤電機計器製作所殿、松山株式会社殿には、収穫機の開発にご協力いただきました。また株式会社アグレス殿にはハウレンソウ畑を、ハバジット日本株式会社殿にはモジュラーベルトを提供していただきました。またご意見を頂いた長野県テクノ財団の小野様、瀬在様には有益なコメントを頂きました。記して謝意を表します。

文 献

- [1] (株)広洋エンジニアリング, ハウレンソウ根切り機, <http://www.koyoeg.co.jp/>
- [2] 川辺農研産業(株), ハウレンソウ根切り機, <http://www.kawabenoken.co.jp/index.html>
- [3] 中村雄太, 他, “生食用ハウレンソウ自動収穫機の開発—回収・搬送装置の設計と検証—”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2012
- [4] 丸山寛智, 他, “ハウレンソウ自動収穫機における根切り刃動作の考察と位置制御”, 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2012
- [5] 片山 徹, “新板応用カルマンフィルタ”, 株式会社朝倉書店, 2008
- [6] 小郷 寛, 美多 勉, “システム制御理論入門”, 実教出版株式会社, 2011
- [7] 美多 勉, 原 辰次, 近藤 良, “基礎ディジタル制御”, コロナ社, 2009