

拡張カルマンフィルタによる土地被覆分類法の頑健性実験

信州大学工学部 正会員 奥谷 巖
信州大学工学部 学生会員 ○竹内 正軌

1. まえがき

1972 年に米国で地球観測衛星が打ち上げられて以来、リモートセンシングの応用分野は、多岐に渡ってきており、高い推定精度が要求されてきている。

本研究では、カルマンフィルタ法を基に輝度の平均値に加えて、輝度のバラツキの指標である分散・共分散を考慮した拡張カルマンフィルタ法を用いる。また、ランドサットデータに人為的にノイズを与えることにより、本方法の頑健性を検証する。

2. 拡張カルマンフィルタによる土地被覆分類

いま、 h_{ji} をカテゴリ i のバンド j の分光特性とする。データから直接その値が得られない時は分光特性の収束値をその値として用いる。観測方程式は、

$$y_j(k) = h_{j1}z_1(k) + h_{j2}z_2(k) + \dots + h_{jM}z_M(k) + e_j(k) \quad (j=1,2,\dots,N) \quad (1)$$

$z_i(k)$ はカテゴリ i の面積割合より、 $e_{N+1}(k)=0$ とすれば

$$1 = z_1(k) + z_2(k) + \dots + z_M(k) + e_{N+1}(k) \quad (2)$$

(1),(2)式において、ここでは分光特性 h_{ji} が現実には一定値とはならないという事実が反映されていない。カルマンフィルタ法は従来法より良好な土地被覆分類を行うが、例えば、水域といった特定のカテゴリにおいて精度的に劣る結果になった²⁾。この原因は、従来法では分光特性の分散・共分散が用いられているのに対し、カルマンフィルタ法では全く考慮されていないことが考えられる。

以上より、ここでは(1)式を基に分光特性 h_{ji} の分散・共分散といった輝度のバラツキを考慮した観測方程式の構築を行う。共分散の式は以下になる。

$$Q_{ij}(k) = \sum_{l=1}^M z_l^2(k) P_{ij}^{ll} + \sum_{l=1}^M \sum_{l'=1}^M z_l(k) z_{l'}(k) \cdot (P_{ij}^{ll'} + P_{ij}^{l'l}) + R_{ij} + e_i(k) \quad (3)$$

観測方程式の観測量をすべて $y(k)$ 、また右辺をベクトル関数 $g(z(k))$ 、誤差項を $e(k)$ とすると

$$y(k) = g(z(k)) + e(k) \quad (4)$$

一方、 $z(k)$ の状態方程式は、土地被覆分類を行う地域 k と $k+1$ に重なり部分ができるようにすると

$$z(k) = z(k-1) + w(k) \quad (5)$$

また、(4),(5)式に拡張カルマンフィルタを適用すると、 $z(k)$ の最適推定値は以下の式より求められる。

$$\hat{z}(k|k) = \hat{z}(k|k-1) + K(k)[y(k) - g(\hat{z}(k|k-1))] \quad (6)$$

ここで、 $K(k)$ はカルマンゲインを表している。

3. 適用性検討

3.1 対象地域と使用データ

対象区域は、小田原市近郊の $4\text{km} \times 8\text{km}$ の矩形地域で北側をトレーニングエリア、南側をテストエリアとする。ただし、テストエリアのうち海域にかかわる部分では今回は分析の対象から除外して考えた。

人工衛星データは Landsat 5 号による TM データ(ただし、熱バンドを除く)で 1993 年 10 月時点のものを、各小区域における土地被覆カテゴリ別面積割合の真値は 1/25000 の土地利用図と航空写真を利用。

なお、分類項目は、水域・耕作地・果樹園・森林・密集地の 5 カテゴリ、水域・水田・畑・果樹園・森林・草地・裸地・砂地・舗装路・鉄道路・鋼構造物・コンクリート建物・瓦屋根建物の 13 カテゴリの 2 種類。

3.2 推定結果とその評価

有効性の検証にあたり、従来法の適用において、5 分類の場合には分散・共分散を含めカテゴリ分光特性は直接収集したデータにより与えたが、13 分類の場合には分類が細かすぎるためデータ収集が不可能であり、カルマンフィルタのカテゴリ分光特性同定値と誤差分散行列で代用する。

表 1 は、5 分類におけるカテゴリ別に精度比較である。この場合は、水域を除くすべてのカテゴリで提案方法は比較手法を凌駕し、水域でもカルマンフィルタ法の結果を若干改善している。

4. 雑音に対する頑健性

データ収集にあたり、ランドサットデータには種々の要因に基づく雑音混入の可能性がある。こうした雑音混入により、推定精度が急激に劣化するようでは、その土地被覆分類手法の信頼性が問われることになる。そこで次のような 5 ケースに分けて人為的に入力データに雑音を混入し、本方法の頑健性をテストしてみた。なお、雑音の発生方法は、いま入力の真値を X 、新

表 1 RMSE による土地被覆カテゴリ別比較 (5 分類)

カテゴリ	カルマン フィルタ	拡張カルマ ンフィルタ	最尤法	判別分析
1	0.157	0.154	0.098	0.072
2	0.141	0.102	0.138	0.160
3	0.126	0.113	0.348	0.318
4	0.230	0.216	0.309	0.268
5	0.163	0.143	0.227	0.219
平均	0.167	0.151	0.244	0.224

(カテゴリ) 1.水域, 2.農地, 3.果樹園, 4.森林, 5.密集地

たな入力データを X^* 、 ε を誤差率とすると

$$X^* = (1 \pm \varepsilon)X \quad (7)$$

誤差率 ε の絶対値の与え方としては、まず、その期待値 ε_{mean} を与えて、その前後に幅を持たせて下図のように考える。

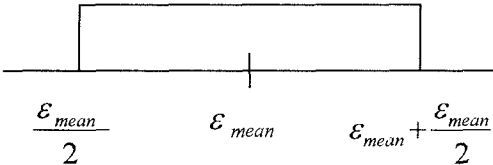


図1 一樣乱数の与え方

例えば $\varepsilon_{mean}=0.1$ のときは、0.05~0.15 の範囲で一樣乱数を与える。すなわち、 $|\varepsilon|$ は、 $\varepsilon_{mean}/2$ と $3\varepsilon_{mean}/2$ の間の一樣乱数になり、 $[0,1]$ の一樣乱数を r としたとき

$$|\varepsilon| = r \cdot \varepsilon_{mean} + \frac{1}{2} \varepsilon_{mean} \quad (8)$$

以下ケースの説明を簡単しておく。

- (ケース1) : すべてのピクセルの、すべてのバンドデータに ε の大きさと符号をランダムに決定しながら与える場合
- (ケース2) : 全ピクセル、全バンドデータに符号も含めて全く同一の ε を与える場合
- (ケース3) : 各メッシュ内では符号を含めて同一の ε を与えるが、各メッシュ間では異なる値の ε になるようにする場合
- (ケース4) : 各バンドごとに、全ピクセルで符号も含めて同一 ε を与える場合
- (ケース5) : ε の符号は全バンドピクセル共通とするが、 ε の大きさは各バンドごとに変える場合

通常、ノイズは大気中の物質による散乱光や機械的な測定誤差によって発生するが、ケース1はそうしたノイズがすべてのピクセルで全バンドに全くランダムに作用した場合を想定し、ケース2は逆に均一に作用した場合を、ケース3は小区域ごとに異なった作用を及ぼした場合を、ケース4はバンドごとに全域で均一に作用した場合を、ケース5は作用する方向（プラスまたはマイナス）は全バンド通じて同一であるが、作用の強さはバンドごとにより異なる場合をそれぞれ想定している。

ケース1~5において、50回のテスト(1回ごとに必要に応じ符号や ε の大きさを変化)を実行し、結果は全分類項目、全テストにわたる平均的な RMSE により

表2 入力雑音に対する分類手法の頑健性の比較 (5分類)

ずれ ケース	10%	20%	30%	40%	50%
1	0.156 0.290	0.161 0.329	0.167 0.335	0.174 0.335	0.181 0.335
2	0.229 0.386	0.287 0.446	0.286 0.456	0.290 0.464	0.297 0.463
3	0.192 0.392	0.234 0.449	0.260 0.455	0.276 0.460	0.286 0.464
4	0.229 0.394	0.268 0.446	0.281 0.459	0.299 0.462	0.302 0.453
5	0.220 0.378	0.287 0.452	0.287 0.457	0.299 0.469	0.282 0.480

上段：拡張カルマンフィルタ法、下段：最尤法による RMSE

評価する。また、最尤法の結果と頑健性の比較を行い、拡張カルマンフィルタ法の有効性を検討する。

表2において、ケース1では、従来法である最尤法の0%場合(表1参照)よりも常に優れた結果を示している。また、ケース2・4・5においては10%まで、ケース3では20%まで最尤法の0%より優れた結果が得られた。また、ずれが大きくなるに従って、拡張カルマンフィルタ法と最尤法の両手法の精度は当然ながら低下するが、すべてのずれに対して本方法の方が圧倒的に劣化の度合いが少ないことがわかる。以上より、本研究で提案した拡張カルマンフィルタ法は、入力時に入ってくる雑音に対して、頑健性を有しているといえることができる。

5. むすび

本稿では、カルマンフィルタ法を基に輝度のバラツキの情報を組み込める方法により、その有効性の検討を行った。その結果は、各分類とも明らかな改善効果が見られたが、特定のカテゴリにおいて若干劣った。また、入力時における雑音に対しても、すべてのケースにおいて最尤法よりも本方法の方が劣化の度合いが少なく、頑健性を有していることがわかり信頼性かなり高いことを示している。

参考文献

- 1) 稲村実：カテゴリー分解に基づくリモートセンシング画像データの解析，電子情報通信学会論文誌，Vol.J70-C, No.2, pp241-250, 1987.
- 2) I.Okutani and H.Wu: Land-cover classification of remotely sensed data using Kalman filtering, J.infrastructure Plan. and Man. JSC-E, IV-37, No.576, pp123-131, 1997.
- 3) ファジィ最小二乗法に基づくカテゴリー分光特性の同定と面積の推定，土木情報システム論文集，Vol.6, pp111-118, 1997
- 4) 奥谷巖、岡川英樹：ランドサットデータを用いたファジィ推論による土地被覆分類，電学論，pp520-526, 1993