主成分分析と規準バリマックス回転を統合した衛星画像の色合成

Color Composite of Satellite Remotely Sensed Image
Integrating Principal Component Analysis and Normal Varimax Rotation

清水 英 範・表 明 榮・四童子 隆

Eihan SHIMIZU, Myoung Young PIOR**, Takashi SHIDOUJI**

Abstract: Principal component analysis (PCA) is a multivariate statistical technique to summarize most of the variation in a observed multivariate system in fewer variables. It has been expected to be an useful technique to visualize the multiband remote sensing data. It is because the RGB color composite image using the summarized three principal components is expected to reflect as much information as possible of the original multivariate remote sensing data. It is known, however, that the actual color composite image employing PCA is not necessarily understandable one because the principal components are not distinctly correspondent to the electromagnetic wavelength, i. e. color, and consequently the relationship between the represented color and land cover becomes vague. This paper proposes a new type of the color composite technique by integrating PCA and the Normal Varimax Rotation (NVR). The NVR is employed to make more distinct the relationship between each principal component and the electromagnetic wavelength by rotating the three dimensional space constituted by the first to third principal components. Since the NVR gives the orthogonal rotation, the three components after rotation represent the whole information of the original three principal components. This paper also presents the practical comparisons among the color composite images which are constructed by the conventional false color composite, the ordinary PCA, and the proposed NVR integrated PCA technique.

1. はじめに

リモートセンシングデータのマルチバンド化が進む中、多バンドのデータをいかに有効に利用してリモートセンシングデータを視覚化(画像化)するかは、これまで以上に重要な問題になってきた。この問題に対応するための一つの方法として主成分分析の適用が提案されている¹⁻³⁾。これは主成分分析によって多バンドの情報を3次元情報に次元縮小し、これらの各々にRGBを割り当てることによりカラー合成を行う方法である。しかし、従来の主成分分析による画像合成で

は、電磁波の波長帯域との直接的な関連がない3次元量である第一から第三主成分に、適当にRGBを割り当てて画像合成を行っているため、主成分分析による画像は、土地被覆と色との対応が奇異であり、色によって土地被覆の解釈ができないという判読上の大きなマイナス面をもつ。

本研究は以上の背景のもと、主成分分析画像の長所を保持したままで欠点を改善することを目標とし、主成分分析によって得られる各主成分に規準バリマックス回転を施す視覚化手法を提案するものである。具体的には、規準バリマックス回転によって各主成分(因子)と波長帯域との関連を明示し、それを考慮した上でRGB合成を行う。これにより、得られた画像は主成分分析画像と同様に全バンドの情報を考慮し、かつ判読しやすいものとなることが期待されるのである。

* 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻
Department of Civil Engineering University of Tokyo
113 文京区本郷7-3-1

**運輸政策研究所
Institute for Transport Policy Studies
105 港区虎ノ門3-18-19

2. 従来の色合成手法（フォールスカラー合成）

現在，リモートセンシングデータの視覚化に際してはフォールスカラー合成と呼ばれる手法が広く利用されている。この方法は，多くのバンドの中から3つのバンドを選び，それぞれに赤，緑，青（R・G・B）を割り当てることで画像を作成するものである。この手法では，電磁波の波長帯域と色との関係，あるいは植物は近赤外線の反射率が高いといった地上物のスペクトル特性を踏まえた RGB の割り当てが可能であり，人間が判読しやすい画像が得られるという利点がある反面，より多くのバンドがあるにもかかわらず色の割り当てに選択された3バンド以外のバンド情報が画像の表示に反映されないという問題点を持つ。その結果として，RGB の割り当ての仕方の異なるいくつかのフォールスカラー合成画像を作成し，それらを見比べながらの判読作業を強いられる場合もある。一方，主成分分析画像は全バンドの情報を一枚の画像に集約できるという強力な利点があるが，各主成分と波長帯との対応が明確でないために RGB をどのように割り当てるべきかに関して指針がなく，また，そのために得られた画像の色と土地被覆の関係が意味解釈しにくいものとなるという重大な欠点を抱えている。

本研究の問題意識は，この主成分分析画像の利点は確保した上で欠点を改善できないかということにあり，そのための手法を提案する。そして提案した手法による画像と従来のフォールスカラー合成画像との比較を通して，その有効性を考察する。

本研究では，比較対象とするフォールスカラー合成の方法として，トゥルーカラー合成，ナチュラルカラー合成を用いた。なお，色合成手法の名称については文献等で統一されていない。本研究では以下に述べるように定義しておく。

トゥルーカラー合成：我々の目に見える可視領域の3バンドを用い，それぞれのバンドにもっとも近い色を割り当てる方法である。この方法による画像は我々が目で見るものにもっとも近いものとなる。

ナチュラルカラー合成：近赤外領域のバンドに緑を割り当てて合成される。これは植物に含まれるクロロフィルが近赤外線を強く反射するという性質を利用し

ている。すなわち，植物の存在するところが緑色になるため，人間による判読がしやすいという特徴をもつ。

3. 主成分分析とバリマックス回転

(1) 主成分分析⁴⁾

主成分分析とは，互いに相関のある多種類の変数の情報を，互いに無相関な少数個の総合特性値(主成分)に要約する方法である。

今， p 個の変数 $x_1, x_2, \dots, x_p$ が存在するとする。このとき，全ての変数の情報を考慮した m 個の総合特性値

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1p} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{m1} & w_{m2} & \cdots & w_{mp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_p \end{pmatrix} \quad (1)$$

を考え，これら $f_1, f_2, \dots, f_m$ を順に第一，第二，…第 m 主成分とする。

ここで， m 個の主成分を求める係数である因子負荷量

$$\mathbf{w}_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{ip})^t \quad (2)$$

は，もとの変数 $x_1, x_2, \dots, x_p$ の分散共分散行列 $\mathbf{C}_{xx}$ (または $\mathbf{C}_{xx}$ を基準化した後の相関行列 $\mathbf{R}_{xx}$) の固有値を大きい方から順に m 個 ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m > 0$) とった時の i 番目の固有値 λ_i に対応する正規固有ベクトル，すなわち

$$\mathbf{C}_{xx} \mathbf{w}_i = \lambda_i \mathbf{w}_i \quad (3)$$

$$w_{i1}^2 + w_{i2}^2 + \dots + w_{ip}^2 = \sum_{j=1}^p w_{ij}^2 = 1 \quad (4)$$

によって与えられる。

また，第 i 主成分 f_i の分散は分散共分散行列 $\mathbf{C}_{xx}$ の i 番目の固有値 λ_i に一致し，このとき，異なる主成分は互いに直交し， f_m の分散は $f_1, f_2, \dots, f_{m-1}$ の全てと無相関な1次式のなかで最大となる。

この主成分分析を多バンドのリモートセンシングデータに適用し，第三主成分までを採用して RGB 合成を行うことで，より多くの情報を含む画像を作成することができる。本研究では主成分分析の利用に際しては，各バンドのデータを平均0，分散1に基準化し，相関行列を始点とする方法を用いた。

(2) 規準バリマックス回転⁴⁾⁵⁾

主成分分析によって抽出された複数の主成分は、相互に無相関であるが、もとの変数とは互いに相関を有する。各主成分の因子負荷量が、各主成分ともとの変数の相関係数に一致するため、この因子負荷量に基づいて各主成分が意味する内容を考察するということが行われる。しかし実際には、ある主成分はどの変数とも相関が大きく、また、ある主成分はどの変数とも相関が小さいといった結果が生じ、各主成分が表現する具体について、解釈が困難であることも多い。そこで、主成分軸を適当に回転させ、各主成分が比較的少数のある変数群との相関のみが大きくなるようにし、解釈をしやすくするという方法が提案されている。これを主成分軸の回転と呼ぶ。原理的には因子分析においてしばしば用いられる因子軸の回転と全く同じである。抽出した第 m 主成分までに主成分軸の回転を施すことで、含まれる情報量の和(分散の和)を保ったままで各主成分の解釈が可能となる。本研究では、色空間内での距離を保つという制約条件を考えるため、直交回転の一つである規準バリマックス法を用いる。

いま、式(1)のように抽出された m 個の主成分の、回転後の因子負荷量を

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{p1} & b_{p2} & \cdots & b_{pm} \end{pmatrix} \quad (5)$$

とする。このとき回転は、各主成分がなるべく異なる特定の変数と大きな正あるいは負の相関を持つようになされる。すなわち、行列 B の各列は1あるいは-1に近い負荷量とゼロに近いもので構成されている必要がある。バリマックス法では、この定性的な最適化基準を、「因子負荷量の2乗値についての列内の分散の和を最大化する」という規準で置き換える。このとき、正規直交変換によって不変な共通度

$$h_i = \sum_{j=1}^m b_{ij}^2 \quad (i=1, \dots, p) \quad (6)$$

の小さい主成分の因子負荷量は、回転後も小さくなってしまいう問題を解決するために、規準バリマックス法では因子負荷量の第 i 行を共通度 h_i で除し、 $q_{ij}^2 = (b_{ij}/h_i)^2$ について列ごとの偏差平方和の総和

$$Q = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^p (q_{ij}^2 - \bar{q}_j)^2 \quad (7)$$

(ただし $\bar{q}_j = \sum_{i=1}^p q_{ij}^2 / p$)

を最大にするように回転を行う。

式(7)の最適化問題は多少複雑な非線形最適化問題となり直接解くのは困難であるため、一般には以下のような解法が用いられる。まず m 個の主成分について任意の2主成分を取り上げ、その2主成分の張る平面内で Q を最大にするように回転を行う。平面内の直交回転は、回転の角度を θ とすれば、

$$\text{直交行列} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

によって表わされ、第 k 主成分と第 l 主成分を取り上げた場合に変化を受けるのは行列 B の第 k 列と第 l 列だけである。その回転による Q の変化量は θ の関数として表わされるので、 Q が最も増大するように θ を定めればよい。

角度 θ の範囲を $-\frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{\pi}{4}$ とすると θ は次式で求まる。

$$\theta = \frac{1}{4} \tan^{-1} \frac{\delta - 2\alpha\beta/p}{\gamma - (\alpha^2 - \beta^2)/p} \quad (8)$$

ここで、

$$\alpha = \sum_{i=1}^p (q_{ik}^2 - q_{il}^2), \quad \beta = 2 \sum_{i=1}^p q_{ik} q_{il},$$

$$\gamma = \sum_{i=1}^p \{(q_{ik}^2 - q_{il}^2)^2 - 4q_{ik}^2 q_{il}^2\}, \quad \delta = 4 \sum_{i=1}^p q_{ik} q_{il} (q_{ik}^2 - q_{il}^2)$$

である。この回転を m 個の主成分から選んだ $m(m-1)/2$ 通りの2主成分の組み合わせについて順に行い、それを一巡として Q が最大値に収束するまで繰り返す。

4. 適用実験

(1) 使用データ

実験に使用したデータはタイ・バンコク周辺の LANDSAT・TM データ(1987年12月撮影)であり、熱バンドを除く6バンドを対象にした。地上分解能は約30m、ピクセル、ライン数は共に480である。

(2) 主成分分析の適用

テストデータに主成分分析を適用した結果、得られた主成分の寄与率等は表1のようになった。

表 1 主成分分析の結果

主成分	固有値	寄与率	累積寄与率
1	4.2031	70.1%	70.1%
2	1.3802	23.0%	93.1%
3	0.2700	4.5%	97.6%
4	0.0954	1.6%	99.2%
5	0.0316	0.5%	99.7%
6	0.0196	0.3%	100.0%

結果の累積寄与率に注目すると、第一から第三主成分までで全体の情報の97%以上の分散を説明しており、元の多バンドの情報を、情報の損失を2%程度に抑えて3次元情報に次元縮小できたことがわかる。このことによって、第一から第三主成分までを用いてRGB合成した画像は、従来のフォールスカラー画像に比べ、少なくとも物理的には多くの情報を含むことになる。

(3) 主成分分析画像の作成

第一から第三主成分を用いて作成した画像が図1である。この画像は第一主成分に赤、第二主成分に緑、第三主成分に青を割り当てて合成している。この割り当てについては必ずしも一意なものではなく、色と主成分の全ての組み合わせ(6通り)について検討し、著者が最も好ましいと判断したものが図1である。図2にトゥルーカラー画像、図3に近赤外領域に緑を割り当てたナチュラルカラー画像を示す。水域と陸地の境界や市街化地域の連続性に注目してこれらを比較すると、土地被覆の差異の識別性という点では、トゥルー

カラー画像よりもナチュラルカラー画像の方が、そしてナチュラルカラー画像よりも主成分分析画像の方が優れているように思える。

一方、表2(a)を見ると、第一主成分(F1)はどの波長帯とも相関が大きく(因子負荷量が大きく)、第三主成分(F3)は逆にどの波長帯とも相関が小さいことが分かる。すなわち、各主成分は人間に見える色(可視光の各波長帯)との対応、あるいは土地被覆との対応(近赤外線との相関が大きければ植生といった対応)という点において、意味解釈が困難な3次元量であるといえる。このため、RGB合成に際しての色の割り当てについては何ら指針となるべきものがなく、このことによって主成分分析画像は色彩と土地被覆の対応が奇異なものとなり、また、得られる画像は単に土地被覆の差異を異なる色で表示するだけのものとなっている。つまり、主成分分析画像を見るだけでは、土地勘の乏しい判読者には土地被覆の分布を把握することは困難である。

(4) 規準バリマックス回転の適用

主成分分析画像が以上のような欠点をもつのに対し、フォールスカラー画像は含む情報量は少ないものの、表示される色と土地被覆との対応が分かりやすいという点で優れた面を持っている。このフォールスカラー合成の利点は、物体の分光特性を考慮した色の割り当てが可能であることに起因している。

以上のことから、主成分分析画像では抽出される主成分因子と波長帯との関連が不明確であることが、色彩と土地被覆の対応が奇異なものとなる原因であると

表 2 回転の前後の因子負荷量

バンド (波長帯域)	(a)回転前の因子負荷量 (各主成分の因子負荷量)			(b)回転後の因子負荷量		
	F1	F2	F3	VF1	VF2	VF3
1 (可視)	.790	-.057	-.011	.935	.252	-.109
2 (可視)	.893	-.386	.186	.951	.212	.177
3 (可視)	.938	-.247	.107	.879	.342	.250
4 (近赤外)	.561	.760	.312	.036	.300	.948
5 (短波長赤外)	.860	.470	-.166	.310	.742	.585
7 (短波長赤外)	.920	.213	.315	.473	.809	.338
説明量	4.20	1.38	.27	2.87	1.52	1.46
寄与率	70.1%	23.0%	4.5%	47.9%	25.3%	24.4%
意味解釈	解釈困難			可視	短波長	近赤外

0.7以上 0.5~0.7

図1 主成分分析画像

図3 ナチュラルカラー画像

図2 トゥルーカラー画像

図4 規準バリマックス回転画像

考えられ、この問題を解決するために、本研究では規
準バリマックス直交回転を用いる。回転を直交変換に
限定するのは、各ピクセル間の色空間上での距離を保
持するためである。

主成分分析による第三主成分までを3次元情報と
し、これにRGBを割り当てるとする。このとき、3次
元色空間上の各ピクセルの距離は求まるが、この距離
は回転に対して自由であり、色空間上での距離を変え
ずに直交回転により回転させることができる。このこ
とにより3次元情報は無相関ではなくなるが、各ピク
セルの色空間上の距離を保ったまま、各因子に意味解
釈を与えることが可能となる。

主成分分析によって、抽出された第一から第三主成
分までに、規準バリマックス回転を適用した。回転前
後の因子負荷量を表わしたのが表2(b)である。この
因子負荷量の解釈を容易にするために、因子負荷量が
0.7以上、0.5以上のものにマークをつけた。回転の前
後を比較すると、主成分軸の回転によって因子負荷量
は、絶対値の大きいものは一層大きく、小さいものは
より小さくなっている。

表2(b)によると回転後の第一主成分(VF1)は可
視領域のバンドと相関が高く、不可視領域のバンドと
は相関が低いため、可視領域の情報を表わしていると
考えられる。同様に第二主成分は短波長赤外、第三主
成分は近赤外領域の情報をそれぞれ表わしていること
がわかる。

このようにして、波長帯域との関連が不明確な単な
る3次元情報であった主成分に、主成分軸を回転する
ことで波長帯域との関連という意味解釈を加えること
ができ、このことを踏まえたRGBの割り当てが可能
になる。

例えば、近赤外領域の情報を表わす第三主成分は、
植物に良く反応しているはずであり、これに緑を割り
当てれば植物の存在する地域は緑色で表現される。つ
まり、第三主成分に緑を割り当てた画像を見る場合、
緑色の強いところは植物があるところだという解釈が
可能となる。また、水域は赤外線をはほとんど反射し
ないことから、第一主成分に青を割り当ててことで水域
を青色で表示することが期待できる。以上に基づき合
成した画像が図4である。

この画像では地表の植物が存在すると推察されると
ころが黄緑色で表され、また川をはじめ水域と予想さ
れるところは青色となっている。その点において、人

間が先験的に有している土地被覆と色との対応に合致
した画像であることが確認できる。また、回転によっ
ても因子軸の直交性は保持されているため、色彩はカ
ラフルであり、図1の主成分分析画像と比較しても地
上物の識別可能性は高いままに保たれた。

5. ま と め

主成分分析画像はそこに含まれる物理的情報量が多
く、異なる地物を異なる色で表すという意味での識別
可能性は一般に優れる。しかし、各主成分に波長帯域
との関連という意味がないため、画像を構成する色と
土地被覆の対応関係が解釈しにくいものとなり、その
色彩は人間の感覚に合わない奇異なものとなる。しか
し、この欠点は、主成分分析によって抽出された各主
成分に規準バリマックス回転を行うことで解決可能と
なった。

規準バリマックス回転による画像を実際に合成し、
従来のフォールスカラー画像、主成分分析画像と比較
実験を行うことで、本手法による画像の有効性を示し
た。

実験によって、主成分軸回転による画像はフォール
スカラー画像よりも地上物の識別可能性に優れ、かつ
主成分分析画像では不可能であった色と土地被覆との
対応関係が解釈可能な画像であることが明らかになっ
た。

特に、水域に関してはフォールスカラー画像と比較
して、規準バリマックス回転による画像では水域と陸
地の境界が強調され、識別可能性の大きな向上が確認
された。これは、赤外領域を含めた全バンドの情報を
考慮していることに起因している。この結果から、水
域の多い画像では主成分軸回転の適用がより有効であ
ることが示唆される。

なお本研究では、主成分軸の回転によって各主成分
と波長帯との関係を明確にするという点について、そ
の原理の説明と実データによる検証を主たる目的とし
て行った。そのため、規準バリマックス回転画像に表
示される色と土地被覆との対応関係に関する事実確認
についてはまだ不十分な段階である。規準バリマッ
クス回転画像を用いた判読作業の効率性や精度が従来
のフォールスカラー画像、あるいは従来の主成分分析
画像と比較してどの程度向上するかの実験、検証につ
いては今後の課題である。

(受付日1997.5.9, 受理日1997.9.12)

参考文献

- 1) Eklundh, L. and Singh, A.: A comparative analysis of standardised and unstandardized Principal Components Analysis in remote sensing, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 14, No. 7, pp.1359-1370, 1993.
- 2) Kramber, W. J., Richardson, A. J., Nixon, P. R., and Lulla, K.: Principal component analysis of aerial video imagery, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 9, No. 9, pp.1415-1422, 1988.
- 3) Richards, J. A.: Remote Sensing Digital Image Analysis, Springer-Verlag, pp.127-147, 1986.
- 4) 奥野忠一, 久米 均, 芳賀敏郎, 吉澤正: 多変量解析法 改訂版, 日科技連出版社, pp.208-219, 1981.
- 5) 杉山高一: 多変量データ解析入門, 朝倉書店, pp. 13-42, 1983.