スパース正則化を用いたショースルー除去

野口　喜実†　中村　尚道††　酒井　智弥†††　全　炳東††††

† 千葉大学大学院工学研究科　〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33
†† 千葉大学工学部電子機械工学科　〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33
††† 長崎大学大学院工学研究科　〒 852-8521 長崎市文教町 1-14
†††† 千葉大学総合メディア基盤センター　〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33
E-mail: †y_noguchi@graduate.chiba-u.jp, †††tsakai@cis.nagasaki-u.ac.jp, ††††zen.h@faculty.chiba-u.jp

あらまし　両面印刷された出版物を複写・スキャンすると，裏面の印刷が透けて見えることがある．これはショースルー (show-through) などと呼ばれ，複写の品質を損ない，文字読み取り（OCR）の精度低下の原因にもなる．このような問題に対して，さまざまなショースルーの除去手法が提案されているが，本研究ではスパース正則化を用いたショースルーの除去手法を提案する．スパース正則化は統計科学や信号処理，圧縮センシングなどの分野で研究されてきたが，画像分離やノイズ除去にも応用されている．信号のスパース性を利用し，未知の原信号を推定することができ，高速に解を求める手法も提案されている．スパース正則化を用いる上でショースルーの生成過程をあらわす適切なモデルが必要である．そこでわれわれは，スパース正則化の最小化問題の式を評価関数として利用し，モデルの最適化を行った．実際に 30 年近く経過した書籍やコミック誌を用いて実験を行い，ショースルーの低減を確認した．

キーワード　ショースルー，スパース正則化

1. はじめに

近年，さまざまな文書の電子化が進んでいる．しかし，両面印刷された書籍などをスキャンするときに裏面が透けて見えてしまうことがある．この現象を「ショースルー」(show-through) とよび，複写や電子化した文書が読みづらくなることに加え，OCR の読み取り精度低下を引き起こすなど，大きな障害となる．ショースルーを除去する最も簡単な方法は，閾値処理を行うものである．しかし，閾値による除去では，グレースケール画像や，ショースルーが強く生じている画像の場合，本来の印刷部分を残しつつ，ショースルーを完全に除去することはできない．これまで提案されてきたショースルー除去手法には Sharma の手法 [1] や，Boaz らの手法 [2]，野口らの手法 [3]，ハリムらの手法 [4] などがある．Sharma の手法は，光が紙面を透過する際の減衰や拡散，印刷面での反射係数などを用いてショースルーをモデル化し，フィルタ処理によってショースルーの除去を行っている．Boaz らはモデルは Sharma の手法と同様のものを使用し，TV（Total Variation）正則化と呼ばれる手法を用いて，画像中の輝度変化を最小にするような信号を推定し，補正を行うものである．また野口ら [3] ハリムら [4] の手法はクラスタリングを用いて，表裏の印刷面を分離し，各面の画像を推定するものである．Sharma の手法や Boaz らの手法は，パラメータを得るために白紙など特定の領域が必要である．またクラスタリングを用いた手法では，誤分類により除去がうまくいかない場合がある．

本研究では，Sarma の手法 [1] に類似したショースルーのモデルを使用し，スパース正則化を用いてショースルーを除去する手法を提案する．スパース正則化は，観測された信号は少数の基底で表されるべきであるという仮定の下で，信号の推定・復元などに利用されている．統計科学 [5] や信号処理 [6][7] の分野で研究されていたが，画像中からテクスチャを分離する研究 [8] や圧縮センシング [9]，物体認識 [10] などにも用いられている．

以降，2 章では本研究で用いるショースルーのモデルについて説明し，3 章ではスパース正則化によるショースルー除去手法について述べる．4 章で提案手法を示し，5 章で実験結果を示す．

2. ショースルーのモデル

一般的に，ショースルーの生じる原因はスキャンを行う際に照射される光が，紙内部を透過し，スキャナ上部

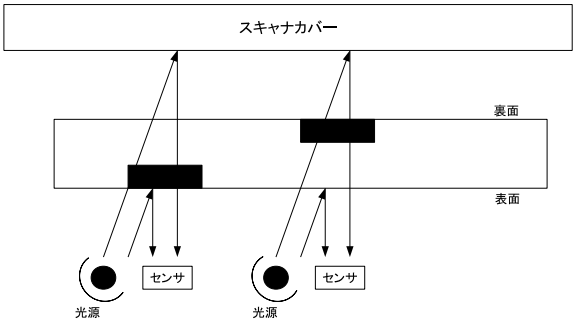


図 1　ショースルーのモデル

のカバーで反射されて，裏面の印刷物がかげとなって観測されることによる．よって，表面で観測される画像は，表面に印刷されていた画像と裏面からの透過を足し合わせたものとなることが予想される (図 1)．そこで本研究では式 (1) のようにショースルーをモデル化した．

$$
\begin{aligned}
Y_f &= X_f + B * X_b \\
Y_b &= X_b + B * X_f
\end{aligned} \tag{1}
$$

ここで Y_f，Y_b は観測された表面および裏面の画像，また X_f，X_b は推定したい本来の表裏の画像を表す．表面で観測される裏面の印刷物 (ショースルー) は，本来裏面に印刷された濃度値より薄く，またぼけて観測されると考えられる．よって，透過による減衰とボケを内包した関数 B を畳み込むものとする．この関数 B については，4 章で詳しく論じる．

3. スパース正則化を用いたショースルー除去

スパース正則化を用いたショースルーの除去手法について述べる．まず今回用いたショースルーのモデルである式 (1) を以下のように行列形式で表現する．$\boldsymbol{B}$ は関数 B による変換を表す変換行列とする．

$$
\begin{bmatrix} \boldsymbol{Y}_f \\ \boldsymbol{Y}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I} & \boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{B} & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_f \\ \boldsymbol{X}_b \end{bmatrix} \tag{2}
$$

ここで，推定したい本来の画像 $\boldsymbol{X}_f$，$\boldsymbol{X}_b$ について基底 $\boldsymbol{\Psi}$ を用いて直行変換を行ったとすると，式 (2) は以下のように書くことができる．

$$
\begin{bmatrix} \boldsymbol{Y}_f \\ \boldsymbol{Y}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I} & \boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{B} & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Psi} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{\Psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\alpha} \end{bmatrix} \tag{3}
$$

ここで $\boldsymbol{\alpha}$ は表裏の画像の直行変換後の係数の行列となる．画像は直行変換を行うとその係数の大多数は 0 ないしは非常に小さい値となることが知られている．この性質は画像の圧縮技術にも応用されているものである．適切な基底を用いることで，この行列はそのほとんどの成分が 0 であるような疎な行列となる．また，以下のように定義し，整理すると

$$
\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I} & \boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{B} & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Psi} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{\Psi} \end{bmatrix}
$$

$$
\boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Y}_f \\ \boldsymbol{Y}_b \end{bmatrix}
$$

$$
\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha} \tag{4}
$$

と書くことができ，スパース正則化を定式化すると，以下のような最小化問題となる．

$$
\min_{\alpha} \|\boldsymbol{\alpha}\|_0 \ \textit{subject to}\ \boldsymbol{Y} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha} \tag{5}
$$

式 (5) を解くことで得られた $\boldsymbol{\alpha}$ によって表裏の画像を推定することができる．しかしながら，l_0 ノルム最小化問題は一般的に NP 困難であることが知られており、実用的に取り扱うことのできる問題の規模は厳しく制限されてしまう．そこで l_0 ノルム最小化問題を l_1 ノルム最小化問題で近似することで，高速に疎行列 $\boldsymbol{\alpha}$ を求める手法が提案されている．l_1 ノルム最小解は高い確率で l_0 ノルム最小解と一致することが Candes らの研究 [11] により証明されている．本研究では Mario らが開発した l_1 ノルム最小化手法 [12] を用いた．この手法は，原信号との 2 乗誤差を最小化問題に組み込むことで，ノイズを含むような場合でも頑健に疎な解を推定することができる．この手法が解く最小化問題の式を以下に示す．ここで τ は第 1 項による忠実性と第 2 項による疎性とのトレードオフパラメータである．

$$
\min_{\alpha} \left(\frac{1}{2} \|\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}\|_2^2 + \tau \|\boldsymbol{\alpha}\|_1 \right) \tag{6}
$$

4. 観測行列の最適化

スパース正則化において重要となるのが式 (4) における $\boldsymbol{A}$ である．$\boldsymbol{A}$ は観測行列などと呼ばれ，スパース正則化を行う際，この $\boldsymbol{A}$ を事前に定義しておく必要がある．基底 $\boldsymbol{\Psi}$ は事前に適切に設定しておけばよい．しかしながら $\boldsymbol{B}$ を事前に定義することは不可能である．それは，印刷工程や紙の質の違いによって，ショースルーの程度は書籍ごとに異なっているのはもちろん，同一紙面内であっても部分ごとに異なっていることがあるためである．そこでわれわれは，式 (7) のように $\boldsymbol{B}$ を裏面からの透過の程度を表す透過率 γ とボケの程度を表すガウス関数の分散 σ の 2 つのパラメータで表現することにした．裏面からの透過光は，透過率 γ を乗算され，ガウシアンフィルタによってぼけるものとする．ガウシアンフィルタの分散 σ を調節することによって，ボケの程度を変更することができる．

$$
\begin{aligned}
Y_f &= X_f + B(\gamma, \sigma) * X_b \\
Y_b &= X_b + B(\gamma, \sigma) * X_f
\end{aligned} \tag{7}
$$

つまり，何らかの方法でこの 2 つのパラメータを評価することができれば，適切な $\boldsymbol{A}$ を決定することができることになる．今回われわれは正則化に用いる，式 (6) を評価関数とすることにした．ある γ，σ において，式 (6)

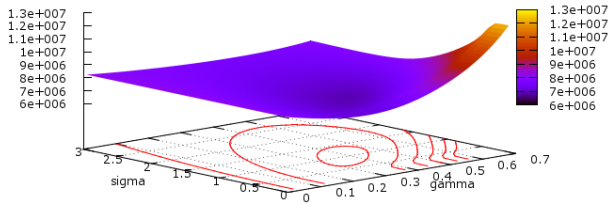


図 2　合成画像による解空間

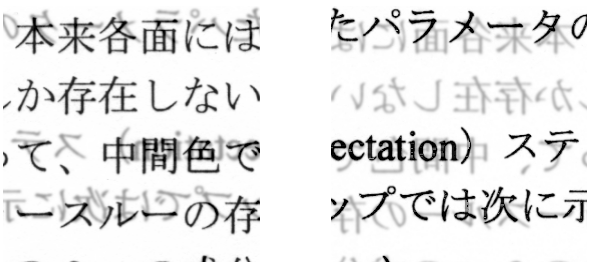


図 3　入力画像表裏

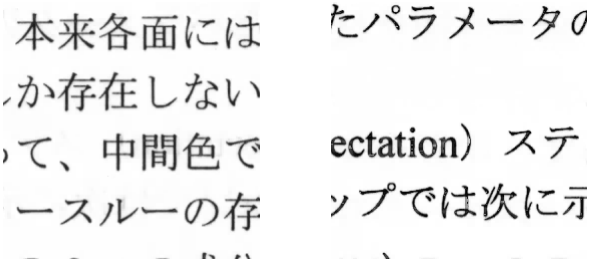


図 4　処理結果表裏

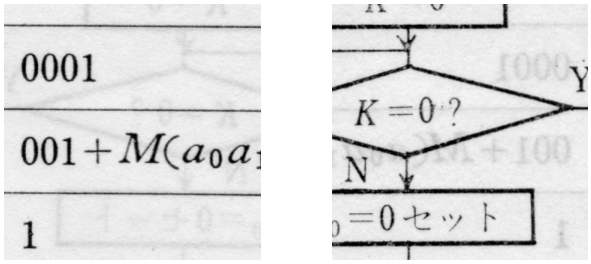


図 5　入力画像表裏

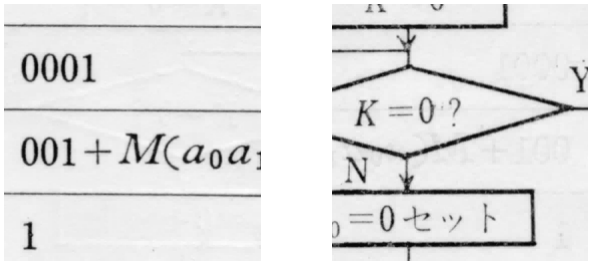


図 6　処理結果表裏

は一意の値をとる．よりモデルが適切であれば，値は小さくなると考えられる．検証のため，予備実験を行った．実験には，γ，σ のパラメータを用いて合成した画像を用い，解空間の探索を行った．$\gamma = 0.4$，$\sigma = 1.0$ として合成した画像を用いた場合の解空間を図に示す（図 2）．式 (6) が最小になるパラメータが合成時と一致することが確認できた．

そこで γ，σ の両パラメータと α に関して，2 段階の l_1 ノルム最小化を行うことにする．以下に最小化に用いる式を示す．

$$\min_{\gamma,\sigma}\left(\min_{\alpha}\left(\frac{1}{2}\|\boldsymbol{Y}-\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}\|_2^2+\tau\|\boldsymbol{\alpha}\|_1\right)\right) \tag{8}$$

まず適当な初期値で観測行列 $\boldsymbol{A}$ を定義しておき，$\boldsymbol{\alpha}$ についての最小化を行う．その後 γ,σ を変更する．γ,σ の解空間（図 2）を見てわかるとおり，複雑な形状は見られないため，これらのパラメータの変更には最急降下法を用いることにした．これを繰り返すことによって，最適な $\boldsymbol{B}$ における l_1 ノルム最小解 $\boldsymbol{\alpha}$ を求めることができる．

5. 実　　験

3 種類の異なるタイプの画像を用いて，ショースルー除去を行った結果を示す．実装には MATLAB を使用し，Core i7 2.67GHz 単一コアで実験を行った．基底としてハール関数によるウェーブレット変換を用いた [11]．また計算時間短縮のため，画像サイズはすべて 256 × 256 画素である．

まず，合成画像を用いて実験を行った．今回用いた画像を図 3 に示す．この画像は前述の予備実験に使用したものである．合成に用いたパラメータはそれぞれ $\gamma = 0.4$,$\sigma = 1.0$ である．処理結果を図 4 に示す．推定された値は合成時のパラメータと同一となった．

次に，昭和 57 年発行の書籍(注1)の抜粋したページを使用し，実験を行った．図 5 に入力画像，図 6 に除去結果を示す．

また，昭和 51 年発行のコミック雑誌(注2)を用いて実験を行った．図 7 に入力画像，図 8 に除去結果を示す．

どの画像においても，ショースルーの低減が確認できたが，ショースルーの完全な除去にはいたらなかった．特にコミック誌では顕著であり，これは「裏面から表面への透過」と「表面から裏面への透過」で γ や σ が異なっているためではないかと考えられる．そこで表裏において個別に γ，σ を定義し，除去を行った結果を図 9 に示す．裏面のショースルーがより低減されたことがわかる．一方表面では若干ショースルーが残ってしまった．また，画像サイズが大きい場合，画像を矩形に分割し各領域において処理を行うことで除去が可能である．図 10 に入力画像，図 11 に処理結果を示す．矩形サイズは 256 × 256 とした．

6. おわりに

本研究ではスパース正則化を用いたショースルー除去手法を提案した．実験により，ショースルーを除去できることを確認したが，十分な除去とはいえないと考えられる．また定量的な評価方法を検討し，結果の評価を行う必要がある．

今回使用したモデルは，非常に簡単なものであり，ショースルーの発生過程を忠実に再現しているとは言いがたい．本手法の特徴として，モデルの変更を行っても計算の大枠を変更する必要性はないので，実際の紙面お

(注1)：FAX，OA のための画像の信号処理　著：吹抜 敬彦 日刊工業新聞社

(注2)：週刊少年チャンピオン第 9 号　昭和 51 年，2 月 23 日号より，ザ・のら犬　原案：平塚八兵衛　劇画：石川球太

図 7　入力画像表裏

図 8　処理結果表裏

図 9　処理結果表裏

よび紙内部での光の反射や透過，拡散，紙内部のインクの状態などを考慮し，より詳細なモデルに変更することで除去性能の向上や，適用範囲の拡大が見込めると考えられる．また最小化手法は繰り返し計算を行っているため，非常にコストがかかることも問題であるが，マルチコアプロセッサや GPU などによる並列計算を用いることで高速化が可能であると思われる．今後上記の内容について検討，実験を行っていく予定である．

謝辞　この研究の機会を与えてくださった国立国会図書館長長尾真先生に心より感謝いたします．

文　　献

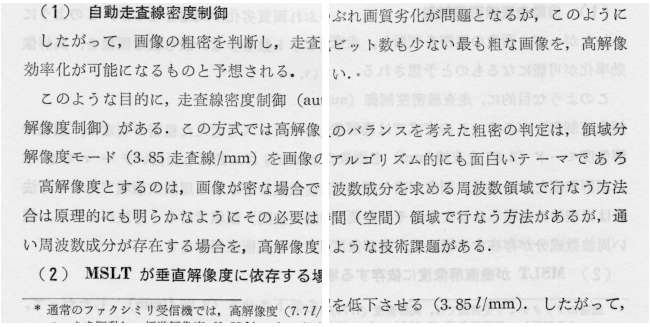
[1] Gaurav Sharma. ”Show-through cancellation in scans of duplex printed documents,” IEEE Transactions on Image Processing, vol.10, no.5, pp.736-754.May 2001.

[2] Boaz Ophir, David Malah, ”SHOW-THROUGH CANCELLATION IN SCANNED IMAGES USING BLIND SOURCE SEPARATION TECHNIQUES,” ICIP,pp.233-236,2007.

[3] 野口喜実, 井口敬人, 全炳東, ”クラスタリングによるショースルー除去,” Meeting on Image Recognition and Understanding(MIRU)2010,pp.1029-1032,2010.

[4] ハリムサンディ, 和田俊和, ”文書表裏面スキャン画像の輝度値分布変換による裏写り除去法,” Meeting on Image Recognition and Understanding(MIRU)2010,pp.2037-2043,2010.

[5] R. Tibshirani, “ Regression shrinkage and selection via the lasso,” J. Roy. Stat. Soc. B, 58, 1, pp.267-288,1996.



（1）　自動走査線密度制御

したがって，画像の粗密を判断し，走査

効率化が可能になるものと予想される．

このような目的に，走査線密度制御（au

解像度制御）がある．この方式では高解像

解像度モード（3.85 走査線/mm）を画像の

高解像度とするのは，画像が密な場合で

合は原理的にも明らかなようにその必要は

い周波数成分が存在する場合を，高解像度

（2）　MSLT が垂直解像度に依存する場

* 通常のファクシミリ受信機では，高解像度（7.7 l/

ぶれ画質劣化が問題となるが，このように

ビット数も少ない最も粗な画像を，高解像

い．

のバランスを考えた粗密の判定は，領域分

アルゴリズム的にも面白いテーマであろ

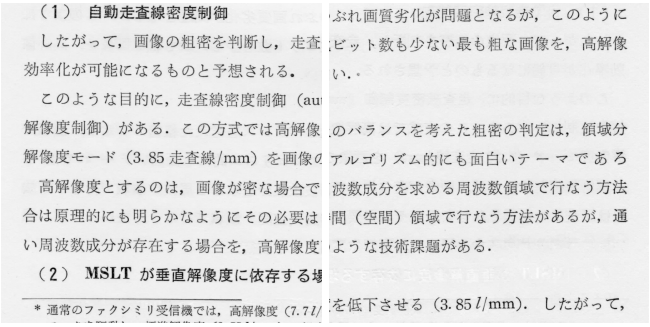
波数成分を求める周波数領域で行なう方法

間（空間）領域で行なう方法があるが，通

ような技術課題がある．

を低下させる（3.85 l/mm）．したがって，

図 10　入力画像表裏



（1）　自動走査線密度制御

したがって，画像の粗密を判断し，走査

効率化が可能になるものと予想される．

このような目的に，走査線密度制御（au

解像度制御）がある．この方式では高解像

解像度モード（3.85 走査線/mm）を画像の

高解像度とするのは，画像が密な場合で

合は原理的にも明らかなようにその必要は

い周波数成分が存在する場合を，高解像度

（2）　MSLT が垂直解像度に依存する場

* 通常のファクシミリ受信機では，高解像度（7.7 l/

ぶれ画質劣化が問題となるが，このように

ビット数も少ない最も粗な画像を，高解像

い．

のバランスを考えた粗密の判定は，領域分

アルゴリズム的にも面白いテーマであろ

波数成分を求める周波数領域で行なう方法

間（空間）領域で行なう方法があるが，通

ような技術課題がある．

を低下させる（3.85 l/mm）．したがって，

図 11　処理結果表裏

[6] S. Chen, D. Donoho and M. Saunders,“ Atomic decomposition by basis pursuit, ”SIAM J. Sci. Comput, 20, 1, pp.33-61,1998.

[7] I. F. Gorodnitsky and B. D. Rao,“ Sparse Signal Reconstruction from Limited Data Using FOCUSS: A Reweighted Minimum Norm Algorithm, ” IEEE Trans. Signal Process., 45, 3 ,1997.

[8] Jean-Luc Starck, Michael Elad, David L.Donoho, ”Image Decomposition via the Combination of Sparse Representations and a Variational Approach”IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, vol.14,NO.10,OCTOBER,pp.1570-1582,2005.

[9] 田中利幸, ”圧縮センシングの数理,” IEICE Fundamentals Review Vol.4,No.1,pp.39-47,2010.

[10] 酒井 智弥, ”スパース正則化に基づく多重ラベリング複数物体認識への応用に向けて,” Meeting on Image Recognition and Understanding(MIRU)2010,pp.1459-1466,2010.

[11] E. J. Candes, T. Tao, ”Decoding by linear programming,” IEEE Trans. Inform. Theory, 51 pp.4203-4215,2004.

[12] Mario A. T. Figueiredo, Robert D. Nowak, Stephen J. Wright, ”Gradient Projection for Sparse Reconstruction: Application to Compressed Sensing and Other Inverse Problems,” IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing: Special Issue on Convex Optimization Methods for Signal Processing,vol.1,No.4,pp.586-598,2007.

[13] Rice Wavelet Toolbox http://dsp.rice.edu/software/rice-wavelet-toolbox (H22.11.21 参照)