

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500212

研究課題名(和文) 多次元Eスプライン標本化の理論と応用

研究課題名(英文) Multidimensional E-spline sampling theory and applications

研究代表者

平林 晃 (Hirabayashi, Akira)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：50272688

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：Eスプライン関数で特性をモデル化した多次元信号の標本化理論において、画像に含まれる直線ステップエッジの高精度抽出法を提案した。まず、直線エッジを方向角を含む3種類のパラメータで表現し、これらのパラメータの三角型Eスプラインで標本化した場合の解析解を導出した。この解をもとにパラメータ推定を行うための評価基準を導出した。その中には重みパラメータが含まれており、この値をエッジ方向角のラフ推定に基づいて調整することにより、方向依存性の少ない推定を可能にした。計算機実験により従来の標準的な手法であるハフ変換より高い雑音耐性が得られることを示した。更に、超解像度処理への応用を示し、提案法の有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：We proposed step line edge extraction method using E-spline functions as sampling model. A straight line-edge can be described by three parameters of orientation, offset, and amplitude. The standard method to extract these parameters is Hough transform, which has a limitation in principle to achieve sub-pixel accuracy. Such a limitation can be resolved by introducing a pixel acquisition model. Conventional approaches along this context used analytic solutions for the three parameters, which are sensitive to noise in pixels. To solve the problem, we proposed an optimization approach. We first define a criterion that evaluates a distance between exponential moments obtained from noisy pixel values and its theoretical closed form. Its optimization is conducted by a simple coarse-to-fine search. Computer simulations showed that not only noise resilience is much improved by the proposed method but also it extracts line-edges from real images more accurately than the Hough transform.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：エッジ検出 ハフ変換 点広がり関数 標本化理論 E-Spline 不確定率有限信号

1. 研究開始当初の背景

急峻に変化するパルス信号やエッジを含む画像など、帯域制限を受けていない信号を含めた新しい信号のクラスである不確定率有限信号に対する標本化理論が注目を集めてきた。本研究ではそのような信号の中でも、多次元情報である画像を想定し、重要な特徴量の一つである直線エッジに着目した。この特徴量は画像位置合わせや、物体認識、車両誘導など多くの場面で用いられている。

直線エッジは通常ハフ変換を用いて抽出される。この方法には、直線が通る点の座標が検出画素の中心座標によって代用されることや、いわゆる「投票作業」において、投票数と推定パラメータ精度のトレードオフが生じるなどの問題点がある。これらの問題点を解決する為に撮像素子の画素値変換特性を B スプライン基底関数でモデル化することにより、直線ステップエッジを厳密に抽出できるアルゴリズムが提案されている。ここでは、直線ステップエッジの抽出を画素値からの連続画像再構成問題と捉え、不確定率有限信号に対する標本化理論の手法が適用された。即ち、直線ステップエッジを方向角、切片（位置）、振幅の 3 種類のパラメータで表現し（不確定率有限信号）、これらの値を画素値から求める手法を開発した。しかしこの理論で用いられている B スプライン基底関数は表現能力が十分ではないので、現実の標本化特性を正確に表現する事が難しく、実画像の直線エッジを精度よく抽出することが困難であった。

2. 研究の目的

上記の背景のもと、本研究では E スプラインと呼ばれる関数を用いて標本化特性をモデル化する事により、この問題点の解決を目指すこととした。E スプラインには表現パラメータがあり、それを調整することにより B スプラインに帰着できるが、現実の標本化特性に近いパラメータを選択することも可能である。とりわけ、三角型 E スプラインを用いれば、雑音特性も向上させることができる。この考えに基づき、本研究では標本化特性に三角型 E スプライン基底関数を用いて、実画像から安定して精度よく直線エッジを抽出できるアルゴリズムの開発を目的とした。

3. 研究の方法

- (1) 標本化特性を三角型 E スプラインでモデル化した場合の直線パラメータの解析解の導出：B スプラインに関して得られていた解析解を E スプラインに対しても導出することにより、直線パラメータ推定の出発点とする。
- (2) 直線パラメータ推定のための最適化アプローチの導入：解析解そのもの

をパラメータ推定に用いると、各種雑音に対して敏感になってしまい、結果としてパラメータ推定が不安定になる。そこで、適切な評価基準を設定し、そのもとで最適な直線パラメータを推定する手法を確立する。この評価基準には直線の方向指向性も考慮する。

- (3) 最適パラメータ探索のための初期値についての検討：最適化パラメータの探索には初期値が必要となるが、この値に解析解の利用を検討する。
- (4) 凸最適化に基づく高速探索法の検討：最適解の高速探索を実現するために、凸最適化手法の利用を検討する。ただし、(2) で設定する評価基準が複雑な場合には、より簡単な問題に立ち返って手法を検討する。

4. 研究成果

- (1) 標本化特性を三角型 E スプラインでモデル化した場合の解析解を導出し、理論データから直線パラメータを求められることを示した。また、三角型 E スプラインの表現パラメータを 0 に近づけた場合の極限が B スプラインであることに着目し、本研究で導出した解析解が、これまで B スプラインに基づいて求められていた解析解に収束すること、すなわち表現パラメータに関して連続になっていることを示した。
- (2) 上記(1)で求めた解析解をもとに、直線パラメータ推定のための評価基準を定義した。提案手法では直線エッジの方向のラフ推定に基づいて評価基準を使い分けることとした。また、この評価基準は凸になっていないので、凸最適化手法を適用することは難しい。そこで、本研究では粗精探索を用いることとした。適切な初期値周辺で評価基準値を計算し、その中で最適な値の周辺を更に精度よく計算して、最適パラメータを求める手法である。
- (3) 上記(2)で述べた評価基準を使い分けるためのラフ推定、および粗精探索の初期値を設定するために、解析解を用いた。ただし、着目画素単一の解では信頼性が低いので、周辺 3 画素の解析解の平均値を用いた。

以上で開発したアルゴリズムを用いてシミュレーションを行った。まず、理論データに雑音を加えてパラメータを推定した結果を図 1 に示す。横軸が信号対雑音比 (SNR) で、縦軸が方向角推定結果の平均 2 乗誤差である。SNR が 10dB であるときに、方向角推定精度が 1.86 dB 改善されていることがわかる。切片は 9.64 dB 改善されている。また、実

画像に対して直線エッジを抽出した結果を図2に示す。極めて精度よくエッジ抽出できていることがわかる。

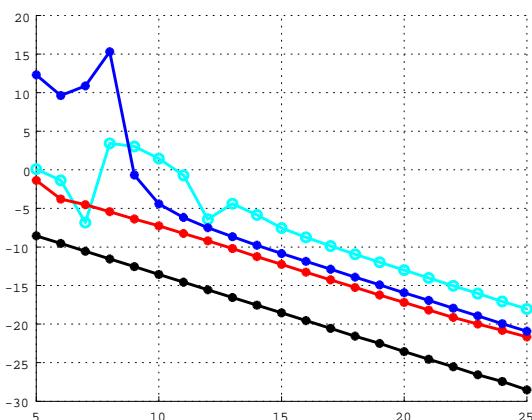


図1：方向角推定シミュレーション

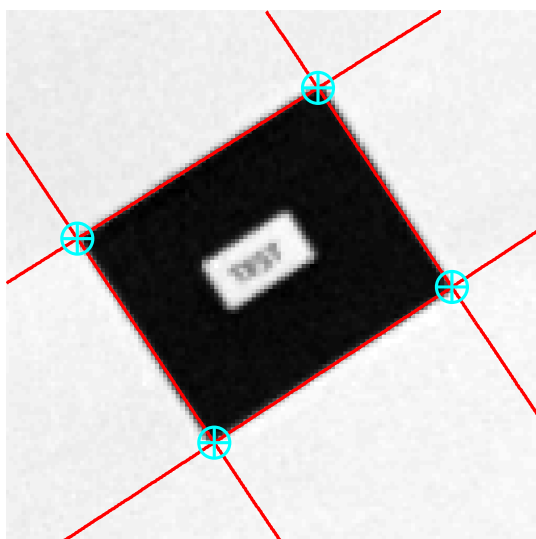


図2：直線エッジ推定シミュレーション

最後に、(4)について、提案アルゴリズムを高速化するために、凸最適化アルゴリズムの適用を検討した。本課題においては1次元信号に対する考察に留まったものの、パラメータ推定を構造制約付き低ランク行列近似問題に置き換えることにより、精度を低下させることなく高速推定できることを示した。今後、直線パラメータ推定問題への適用を目指していく。

5. 主な発表論文等

【論文】9件

Akira Hirabayashi, Jumpei Sugimoto, Kazushi Mimura, Complex approximate message passing algorithm for two-dimensional compressed sensing, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer

Sciences, 査読：有, vol. E96-A, no. 12, 2013, pp. 2391-2397.

Akira Hirabayashi, Yosuke Hironaga, Laurent Condat, Sampling signals with finite rate of innovation and recovery by maximum likelihood estimation, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読：有, vol. E96-A, no. 10, 2013, pp.1972-1979, 10.1109/ICASSP.2013.6638828.

平林晃, 連続信号のスパースサンプリング- ナイキストの壁を越えて, 電子情報通信学会誌, 査読：有,招待論文, vol. 96, 2013, no. 4, pp. 269-273.

Akira Hirabayashi, Kil Hyun Kwon, Jekyu Lee, Consistent sampling with multi pre and post filtering, International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, 査読：有, vol.11, no.1, 2013, pp.1350008-1-1350008-16, 10.1142/S0219691313500082.

Akira Hirabayashi, Consistent sampling and signal reconstruction for noisy under-determined case, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読：有, vol. E95-A, no. 3, 2012, pp. 631-638, 10.1587/transfun.E95.631.

Akira Hirabayashi, Sampling and reconstruction of periodic piecewise polynomials using sinc kernel, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読：有, vol. E95-A, no. 1, 2012, pp.322-329, 10.1587/transfun.E95.1.322.

向川康博, 長原一, 平林晃, 光学系・撮像過程・信号処理の工夫による光学センシング技術, 精密工学会誌, 査読：有,招待論文, vol. 77, no. 12, 2011, pp. 1104-1108.

【発表】22件

Akira Hirabayashi, Jumpei Sugimoto, Kazushi Mimura, Approximate message passing algorithm for complex separable compressed imaging, the 2013 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), 2013年10月30日, Taiwan, China.

Akira Hirabayashi, Satoshi Makido, Laurent Condat, MAP recovery of polynomial splines from compressive samples and its application to vehicular signals, SPIE, 2013年8月28日, San Diego, USA.

Laurent Condat, Akira Hirabayashi, Yosuke Hironaga, Recovery of nonuniform Dirac pulses from noisy linear measurements, the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2013), 2013年5月29日, Vancouver, Canada.

Akira Hirabayashi, Yosuke Hironaga, Laurent Condat, Sampling and recovery of continuous sparse signals by maximum likelihood estimation, the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2013), 2013年5月29日, Vancouver, Canada.

A. Hirabayashi, P.L. Dragotti, Line-edge extraction based on E-spline acquisition model and a fast optimization algorithm, the 2012 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP2012), 2012年10月2日, Orlando, USA.

Akira Hirabayashi, Takuya Iwami, Shuji Maeda, Yosuke Hironaga, Reconstruction of the sequence of Diracs from noisy samples via maximum likelihood estimation, the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP),

2012年3月30日, 京都国際会館, 京都府.

平林晃, 圧縮センシングの基礎と今後の展望, 第17回画像センシングシンポジウム, 2011年6月10日 パシフィコ横浜アネックスホール, 神奈川県.

平林晃, 圧縮センシング 基礎から今後の展望まで, システム情報制御学会チュートリアル講演, 2011年6月23日, 常翔学園, 大阪府.

A. Hirabayashi, Hyperbolic E-spline sampling for precise line-edge extraction, the 2011 Sampling Theory and Applications (SampTA 2011), 2011年5月6日, Singapore.

【図書】1件

Akira Hirabayashi, Springer, Sampling and recovery of continuously-denied sparse signals and its applications, in Subspace Methods for Pattern Recognition in Intelligent Environment, Y.W. Chen, ed., 2014, pp151-170.

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等

<http://www.ms.is.ritsumeai.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平林 晃 (HIRABAYASHI Akira)
立命館大学・情報理工学部・教授
研究者番号: 50272688

(2) 研究分担者

柳原 宏 (YANAGIHARA Hiroshi)
山口大学・理工学研究科・准教授
研究者番号: 30200538

(4) 研究協力者

Pier-Luigi Dragotti
ロンドンインペリアル大学・准教授
研究者番号: なし