

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月12日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21510005

研究課題名（和文）サブピクセルシフト観測画像列の超解像再構成とそのリモートセンシングへの応用

研究課題名（英文） Super-resolution reconstruction from subpixel shifted image sequence and its application to remote sensing

研究代表者

伊藤 直史（ITO TADASHI）

群馬大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20223159

研究成果の概要（和文）：画像センサがもつ固有の解像度をさらに高解像度化する手法（超解像再構成）を開発した。この手法は光学系のボケがある場合も適用できる。画僧センサの画素よりも小さなシフト量で移動しながら得た画像（サブピクセルシフト観測画像列）を用いて高解像度化画像を生成する。リモートセンシング画像や熱画像センサの熱画像に適用し、5倍程度の高解像度化に成功した。また、リモートセンシングへ応用するためのセンサアーキテクチャも考案した。

研究成果の概要（英文）：A new super-resolution reconstruction method has been developed. This method can synthesize a high resolution image whose resolution is beyond the specific resolution of the image sensor. It can be applied when there is image blur in the optical system. To generate a high resolution image, the method utilizes a series of images observed by the image sensor while moving its position by a shift amount smaller than the pixel of the image sensor. The method has been applied to the satellite remote sensing images and thermal images, and it succeeded in achieving images whose resolution is about five times higher than that of the observed images. A sensor architecture for super-resolution reconstruction of the satellite remote sensing image was also proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：計測工学

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：リモートセンシング、計測工学、地球観測、サブピクセルシフト多重観測画像、超解像再構成、熱赤外画像

1. 研究開始当初の背景

CCD イメージセンサをはじめとする固体撮像素子の集積化の進展により、取得できる画像の解像度（画素の密度）はますます高度化している。しかし、撮像素子の高密度化には受光素子の量子効率やデータ転送速度の制約があり、ハードウェアだけによる高解像度化には限界がある。このため、得られる解像度が観測目的や用途に対して充分でないことがあり、より一層の高解像度化が求められている。この要請は、特に熱赤外画像やマイクロ波画像など、観測波長が可視光よりも長い画像計測システムにおいて強い。

画像の高解像度化を行う手法の一つに、同一センサ、同一解像度で観測位置を変えて取得した複数画像から、ソフトウェア的に高解像度の画像を合成する超解像再構成がある。これをハードウェアによる高解像度化と組み合わせ、さらなる高解像度化を図ることも可能である。

研究開始当初までに、サブピクセル単位で観測位置をシフトして取得した画像（サブピクセルシフト多重観測画像）から超解像画像を得る手法が開発されてきた。この手法は、主として衛星リモートセンシング画像への応用を想定しており、シフトバリエーションなボケや不等間隔なシフト量を観測画像から推定し、超解像度化の際に利用している。また、観測画像が不足している場合にも適用可能である。

しかし、この手法を実際に適用するためには、サブピクセルシフトで繰り返し観測中は、対象状態が不変であることを必要とする、この条件の克服はリモートセンシングでは極めて困難である。この条件をどの様にクリアするかでリモートセンシングへの応用の成否が決定する。この問題の他にも観測系のボケや雑音の処理を含むリモートセンシングデータへの本手法の実利用は全く手つかず状態であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、次の(1)～(3)である。

(1) ボケや雑音を含む実画像のサブピクセルシフト超解像再構成法の確立：現在のサブピクセルシフト超解像再構成法は、まだシミュレーションの段階であり、しかも撮像素子の光学的ボケを考慮していない。しかし、これが再構成画像の結果を大きく左右する。本研究ではこの問題を、ニューラルネットワーク等を用いた超解像再構成法で解決することを目的とする。

(2) 空間分解能が低い熱赤外画像、受動マイクロ波画像の地上における実験観測画像での超解像再構成の適用と、その基本性能の確認：本手法の熱画像センサの高解像度化への

応用を試みて実験を行う。従来の熱画像計測システムは、InGaAs、HgCdTeなどの半導体による光電形素子を用いたものが主流で、数百万円もする高価なものであった。近年、熱電形素子の性能が向上し、非冷却で小型、価格も従来と比較して非常に安価になった熱画像センサが開発されており、多数のセンサを設置して設備の温度異常の監視などに応用され始めている。しかし、この種の熱画像センサは、コストの制約から低解像度のものが多い。センサに簡易なシフト機構を付加し、取得した観測画像から高解像度画像をソフトウェアで合成することができれば、熱画像センサの応用分野を広げることができる。

(3) サブピクセルシフト多重観測画像を観測するリモートセンシングセンサの設計、試作に向けて、新しいセンサアーキテクチャを提案する。

なお、(2)で目的としていた受動マイクロ波画像の実験観測画像での超解像再構成の適用に関しては、電波法に適合した実験装置が研究期間中に準備できなかったため、代替として音響を用いた実験を実施中である。

3. 研究の方法

(1) 理論的準備

まず、ボケを含む実画像に対する超解像再構成のアルゴリズムを開発した。サブピクセルシフト超解像再構成法において撮像素子の光学的ボケを考慮する方法としては、ニューラルネットワークによるものの他、ボケ関数を混合正規分布関数で近似し、数値的にボケ補正を行うものがある。両手法には得失があり、超解像再構成法を実画像へ適用するには、この両方法のどれが、どの様に良いかを明らかにする必要があるが、今回は光学的ボケが数値的にモデル化しやすい対象と考え、後者を適用した。

アルゴリズムの有効性を、衛星画像を用いたシミュレーション（低解像度画像を元の高解像度画像から作成）により評価した。また、熱画像センサで取得した画像を対象とする超解像再構成の実験を行った。実験方法については、次項で説明する。

(2) 実画像を用いた実験

実証実験として熱赤外画像に対するサブピクセルシフト超解像再構成を行った。

熱画像センサとして47×48画素の解像度をもつTP-L0225EN（チノー製）を用いた。測定対象として、直径の異なるいくつかの円形の開口をあけた塩ビ板を通して背後の氷を観察した。塩ビ板の表面温度はほぼ室温に保たれる一方、開口内部では背景の氷が見えるため、冷温スポットのある温度分布が観測される。表面が解け始めた状態の氷の板を楔形に置き、開いている側から観測することによ

り、開口ではほぼ温度 0°C、放射率 1 となる。熱画像センサを XZ 軸自動ステージによって縦横方向に 1mm 間隔 (0.2 画素) ずつマトリクス状に移動させ、55 枚のサブピクセルシフト画像を収集し、超解像再構成を行った。

観測画像に加わる雑音や画素毎の感度不均一性は、再構成結果に悪影響を与える。今回は同一画像 10 枚を画素毎に平均 (画面平均化) して雑音を低減した。また、温度分布が室温で一様な対象の観測画像から全画素の平均値を計算し、各画素値の平均値からの偏差を補正することによって、感度を均一化した。図 1 に熱画像センサとサブピクセルシフト画像を得るための XZ 軸自動ステージの外観を示す。

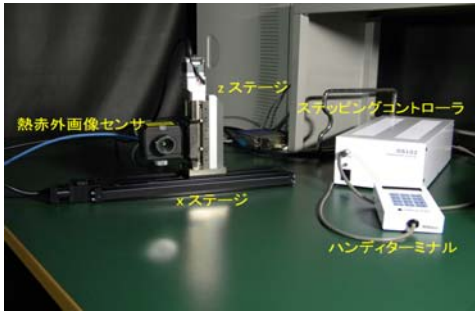


図 1 熱画像センサと XZ 軸自動ステージの外観

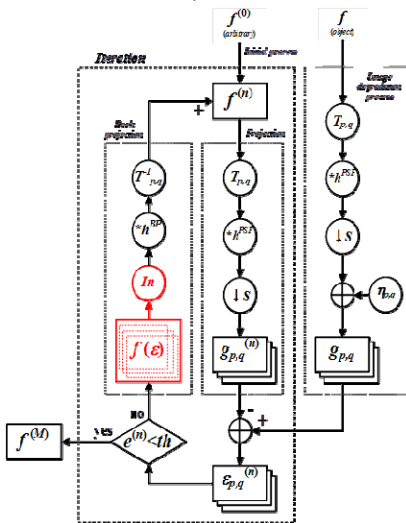


図 2 超解像再構成法のブロック図

4. 研究成果

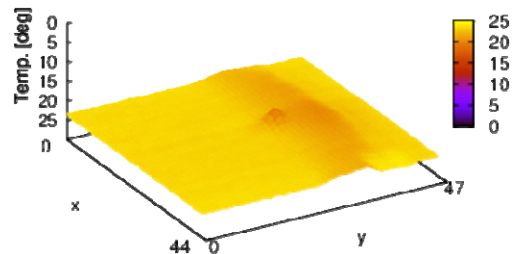
(1) ボケや雑音を含む実画像のサブピクセルシフト超解像再構成法の開発：サブピクセルレベルで位置ずれた観測画像を反復逆投影 (IBP) 法と 2 次元予備補間を用いて超解像再構成するアルゴリズムを開発した (雑誌論文 (2)、学会発表 (3))。この手法は、同一解像度の観測画像の平行移動または回転移動に対して場合、位置ずれの量が未知の場合は、位相限定相関法を用いることにより 1/100 ピクセル以下の誤差で位置ずれ量を推定している。また、光学系のボケは Gauss 型

点拡がり関数で近似して考慮した。図 2 に開発した超解像再構成法のブロック図を示す。

また、衛星画像をサンプル画像とし、解像度を 4 倍にする実験を行い、良好な結果を得た。元の高解像度画像と超解像再構成で得られた画像の差を PSNR (Peak signal to noise ratio) と MMSE (Mean square error of modulation transfer function) という定量的な指標で評価したところ、必要な観測画像枚数 (16=4²枚) の半分の枚数までは超解像再構成が可能で、従来方法よりも最大で約 4dB 誤差が少ないことが示された。

(2) 空間分解能が低い熱赤外画像、受動マイクロ波画像の地上における実験観測画像での超解像再構成の適用と、その基本性能の確認：市販の熱画像センサ (TP-L0225EN) を用いて取得した熱赤外画像を対象に解像度を 5 倍にする実験を行い、良好な結果を得た

(学会発表 (1)、(2))。図 3 に画面平均化と感度均一化を行って観測した冷温スポットの画像の一つを示す。なお、3 次元プロットではピークの高い方が冷温を表す。冷温スポットは直径が 1, 2, 5, 10mm の 4 種類の直径を準備した。このうち 5mm が画像センサの画素の大きさに対応し、したがって画像センサの光学系がボケを持たない理想的な場合には、大きい方から 2 つ目の冷温スポットまで判別可能ではある。しかし、光学系のボケにより、観測画像では 5mm の冷温スポットは識



別できない。

図 3 熱画像センサによる観測画像の一つ

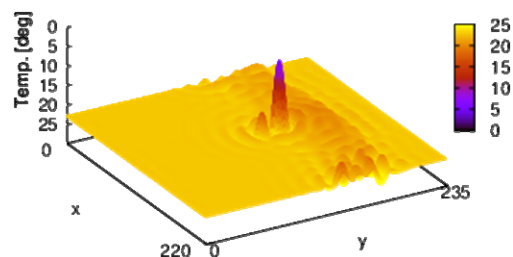


図 4 5 倍の超解像再構成画像

これに対して、5×5 枚のサブピクセルシフト画像を収集し、(1)で開発したアルゴリズムを用いて超解像再構成を行った結果を図4に示す。ピークが19.4℃から7.1℃まで高まった。再構成後にピークの裾幅は変わらないが、半値幅は狭まっている。また、元の観測画像では判別できなかった2番目の開口まで見えている。これらにより、高解像度化の効果が示された。

(3) サブピクセルシフト多重観測画像を観測するリモートセンシングセンサの設計、試作に向けた、新しいセンサアーキテクチャ：開発した超解像アルゴリズムを応用した新しいセンサアーキテクチャを考案し、その性能をシミュレーションにより検討した (学会発表(4))。

常に変化している対象に対する超解像再構成用画像センサの基本形は、従来、単一のセンサであったものを複数のセンサとし、これを束ねる事で対象を同時にサブピクセルシフトした画像の取得が可能となる(図5)。ただし、センサ数の増大はコスト、容量、重量などの増大を意味するので、走査方向にだけ複数のセンサを配置してサブピクセルシフト観測を行い、衛星の進行方向は走査方向と同様のオーバーラップ観測となるように走査速度を合わせるという簡便法も考えられる(図6)。もちろん、この場合のS/N比は縦横に複数センサを配置した場合に比べれば低下する事になるが、縦にセンサを配置しない分、大幅にセンサ数を削減できる。サーモレーサで取得した熱画像の解像度を落とし、これから超解像再構成によって元の解像度に戻して、元画像と比較した。結果を図7に示す。温度パターンに関して4倍程度の詳細な情報が得られている。提案するセンサアーキテクチャが有効であることが確認できた。



図5 提案する超解像用リモートセンシングセンサの概略

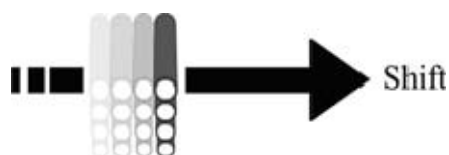


図6 サブピクセルシフト画像取得時のセンサの移動

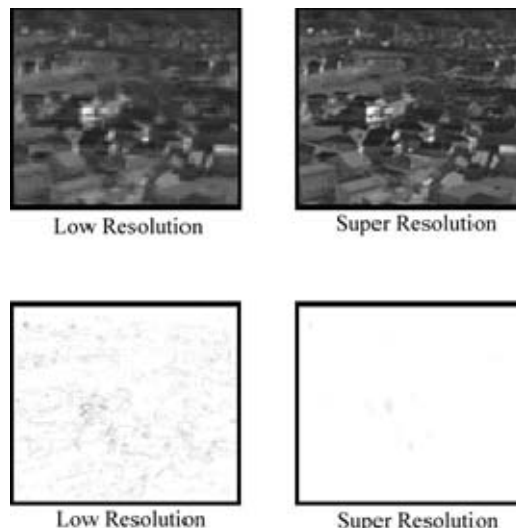


図7 超解像用リモートセンシングセンサによる超解像再構成結果
上段：観測画像と超解像再構成画像
下段：元画像との残差

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

(1) 稲村實、環境のリモートセンシング、電気設備学会誌、査読無、31-5、pp. 327-331 (2011)

(2) 美齊津宏幸、稲村實、不完全なリモートセンシング観測画像からの超解像再構成、日本リモートセンシング学会誌、査読有、29-3、pp. 485-496 (2009)

[学会発表] (計5件)

(1) 伊藤直史、超解像再構成を用いた熱画像センサの高解像度化の試み(2報)、電子情報通信学会総合大会、2012年3月20日、岡山大学・津島キャンパス(岡山)

(2) 伊藤直史、超解像再構成を用いた熱画像センサの高解像度化の試み、電子情報通信学会総合大会、2011年3月17日、東京都市大学(東京)

(3) 美齊津宏幸、不完全なリモートセンシング画像列を用いた超解像再構成における正則化のための拘束条件の検討、第48回日本リモートセンシング学会学術講演会論文集、2010年5月27日、産業技術総合研究所つくばセンター共用講堂(つくば市)

(4) 萩原智宣、高分解能熱赤外画像観測のための超解像リモートセンシングセンサについて、第48回日本リモートセンシング学会

学術講演会、2010年5月27日、産業技術総合研究所つくばセンター共用講堂(つくば市)

(5)稲村實、カテゴリーの分類と分解、その特徴と性能、2010年度統計関連学会連合大会、2010年9月5日、早稲田大学(東京)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 直史 (ITO TADASHI)
群馬大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：20223159

(2) 連携研究者

稲村 實 (INAMURA MINORU)
群馬大学・大学院工学研究科・名誉教授
研究者番号：10111206