

T D I 手法を用いた CCD カメラの S/N 向上の実験と解析

徳田武朋¹ 高橋文穂² 奈倉理一³

1 大学院 工学研究科 電気電子工学専攻 (tokuda@ele.kanagawa-it.ac.jp)

2 電気電子工学科 (fumihot@ele.kanagawa-it.jp)

3 電気電子工学科 (nagura@ele.kanagawa-it.ac.jp)

Experiment and Analysis Regarding the S/N improvement of CCD Camera by Time Delay and Integration Method

Taketomo Tokuda¹ Fumiho Takahashi² Riichi Nagura³

Abstract

Recently, the importance of the earth observation from the space has been recognized from the standpoint of the global environmental problem. As various methods for acquiring the image has been developed rapidly, the improvement of the signal to noise ratio (S/N) becomes a subject for the high-resolution image. To solve the problem, the time delay integration (TDI) method has been introduced and investigated in this paper. This paper describes the influence of the attitude change of the satellite and the noise which is generated during the image acquisition. And the S/N improvement based on the TDI is shown experimentally.

Key Words : High Resolution Imaging, CCD, Time Delay Integration, S/N Improvements

1. まえがき

衛星からの地球観測を行うシステムにおいて、1次元 CCD を用いたプッシュブルーム撮像方式は軌道が正確で広範囲の精密な画像撮像が可能である。それに伴う現在の高性能化の進展とともに、技術的課題の解決が問題となっている。高分解能化への発展に伴い、地表の1画素分の面積から衛星へ到達する光量は急激に減少し、画質を低下させる^[1]ことが問題の1つである。このため画像の信号対雑音比(S/N)の向上や確保が課題となる。

人工衛星の観測システム等における複数の1次元 CCD 出力を合成する時間遅延積分方式は、光学系の口径を増加させずに高品質画像を得ることが可能である優れた方式である^[2]。本稿では、研究

室内での撮像実験より現実的な状況下での衛星の姿勢変動や搭載機器による擾乱、または衛星が撮像時に発生する雑音の影響をうけた S/N を時間遅延積分を用いて改善させる方式について、実験から得られた撮像画像、数値シミュレーションで得られたものとの比較から検討・考察する。

2. 衛星光学系の口径と S/N の関係

地表面は完全平坦でかつ完全拡散の条件とし、また大気による散乱の影響も小さな状態について解析をしたとすると、光学系に入射する光量 $\Phi [W]$ は、太陽仰角を β 、太陽の分光放射照度を $H_0 [W/m^2]$ 、地表面の反射率を ρ 、衛星高度を $h_s [m]$ 、衛星の有効口径を $D [m]$ 、画素寸法を $w_s [m]$

とすると以下のごとく表すことができる。

$$\Phi = \frac{H_0}{4} \rho \cdot w_s^2 (D/h_s)^2 \sin \beta \quad (1)$$

また、受光素子の出力電流 I_s [A] は光学系の透過率を T_R 、受光素子の感度を R_i [A/W] とすると、次のように書ける^[2]。

$$I_s = \frac{R_i \cdot T_R \cdot H_0}{4} \rho \cdot w_s^2 \cdot (D/h_s)^2 \sin \beta \quad (2)$$

上式(1)(2)からもわかる通り、観測システムに到達する光量は高分解能化によって急激に減少するため光学系の口径を大きくしなければならない。しかし観測システムが巨大化してしまうため現実的には大口径の光学系の搭載は困難であり、撮像画像の信号対雑音比の減少が問題になっている。

3. 時間遅延積分の原理

時間遅延積分方式は図1に示すように撮像用光学系の結像面に衛星の進行方向と直角の方向に複数の1次元 CCD を配列させて撮像を行い、この出力をそれぞれの時間遅れを補正して合成することにより信号量の増加および S/N 値の改善を図る方式である。

図1に示すように、 n 組の1次元 CCD は地表面の衛星進行方向に互いに距離 p_y だけ離れた地点を撮像しながら地表との相対速度 v で進行する(図では各 CCD 間隔を広げて示す)。各 CCD が同一地点を撮像する時間差は $\tau_p = p_y / v$ となり、各 CCD 間の距離が等しい場合には図に示すように τ_p の整数倍の遅延時間を各 CCD の出力信号に加えることにより、地表の同一地点を撮像した信号が加算され出力信号を n 倍に増加させることができる。一方、雑音は、独立変動量とみなせるため、 n 組の CCD 出力の加算により雑音出力は \sqrt{n} 倍となり、理論的には合成する CCD の配列数 n の平方根 \sqrt{n} 倍に比例して S/N を改善できる^{[3][4]}。

図2では雑音を加えた画像に100回の時間遅延積分を行うシミュレーション解析によって得られた画像を示す。図に示すように 20[dB] の改善が得られていることがわかる。

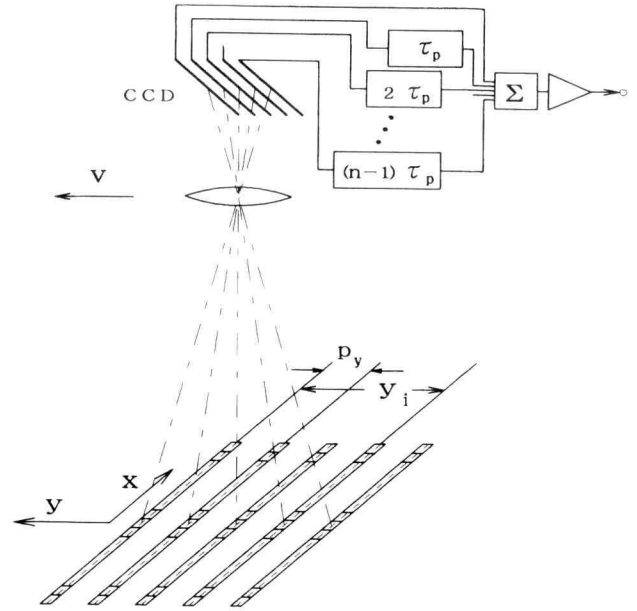


図1. 時間遅延積分方式原理図

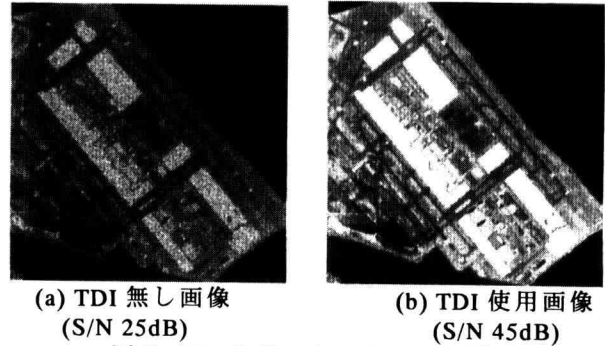


図2. TDI シミュレーション画像

4. 姿勢変動時の S/N 特性

時間遅延積分方式は前述のように高品質画像を得ることができる有効な方式である。但し、実際には衛星は姿勢変動やその他の擾乱の影響を受けることで、各 CCD の撮像位置は完全に一致しない状態で撮像が行われる。本研究では、観測の際にロール(進行方向軸回り)、ピッチ(ロール・ヨー軸に垂直)、ヨー(撮像方向軸回り)の各軸回りの変動を考え、各々が画像に与える影響を検証し、時間遅延積分方式による改善を試みる。

しかし、変動実験は研究室内の現在の設備では行うことができないために理論による数値解析を行った。

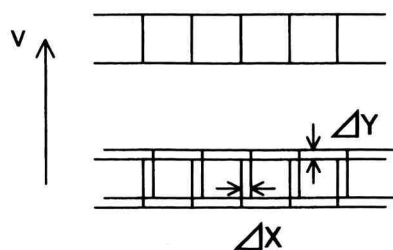


図3. 変動説明図

撮像位置は図3のように進行方向に対してロール軸によって ΔX 、ピッチ軸によって ΔY の変動があることが考えられる。ロール、ピッチ、ヨーそれぞれの軸の角度の変化量を Δr 、 Δp 、 Δy として、撮像する衛星の高度を H とすると、以下の式のように表すことができる。

① ロール軸：

$$\Delta x = H \Delta r \quad (3)$$

② ピッチ軸：

$$\Delta y = H \Delta p \quad (4)$$

③ ヨー軸：ヨー軸回りの変動は撮像位置を回転させる効果となるが、3軸の変動が微小角であり観測幅を L とあらわすとするとヨー軸における ΔX 、 ΔY の変動は以下の式のように書くことができる^[3]。

$$\Delta X = (L/2 - x) \Delta y^2 / 2 \quad (5)$$

$$\Delta Y = (L/2 - x) \Delta y \quad (6)$$

高分解能地球観測システムでは H は数百キロメートル、 L は数十キロメートルとなる。そのためヨー軸回りの変動の影響は前記式からもわかるようにロール、ピッチ軸変動に比較して小さく、 x 軸方向ではほとんど無視できる値となる。 y 軸方向の影響も最大でもピッチ軸回りの変動を数%加算させる程度の変動である。したがってヨー軸での角変動量が特に大きくない場合では、ロール軸回りとピッチ軸回りの検討を十分に行うことでヨー軸の変動も範囲に入れた検討が可能となる。

5. 衛星におけるプッシュブルーム撮像

プッシュブルーム撮像とは1次元の CCD を使用し、視線固定をした状態で、全て電子的に走査する方式であり、衛星では進行方向と垂直に CCD を配列し移動撮像を行っている。

本研究においてはレールの上を1次元 CCD カメラが移動撮像する装置を設置し、衛星に見立てて撮像をする。実験概念図を図4に示す。

また変動が大きくなれば時間遅延積分による S/N 値改善効果が小さくなる問題があるため、姿勢変動に細心の注意を払って実験を行う。

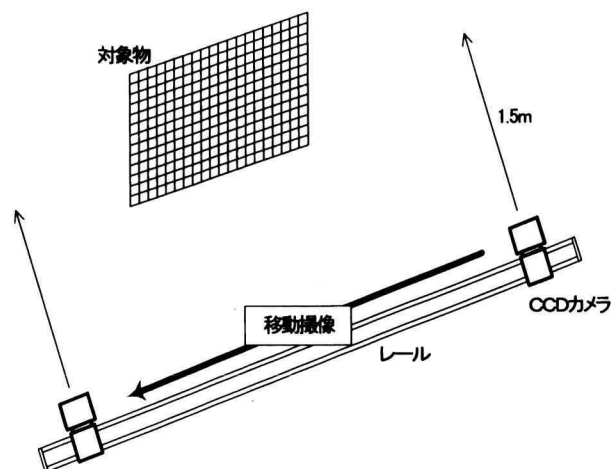


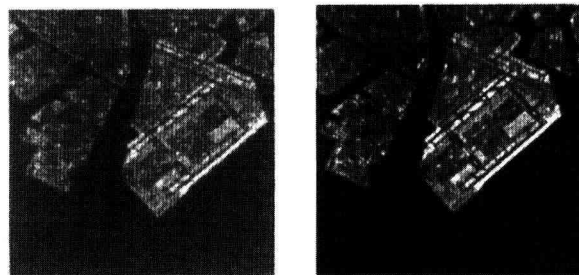
図4. 移動撮像実験概念図

図に示すように、対象物までの距離1.5[m]の位置でレール上の1次元 CCD カメラを動かし、移動撮像する。

6. 撮像結果とその考察

6.1. 撮像結果

下図5の(a)(b)は衛星写真を撮像対象とし、縦512×横512で取得した。図中の(a)は通常の CCD カメラの画像、(b)は同じ対象物を96回時間遅延積分を行った出力画像である。



(a) 通常撮像 (b) TDI 撮像
図5. 通常撮像と TDI 撮像の比較

また図6(a)(b)は S/N 値を算出するために白板を撮像したもので、算出方法は撮像した画像と、画像から雑音成分を除去したものの差分から平均二乗誤差を取り、算出した。算出用の撮像は通常、TDI撮像を3回ずつ行った。表1はそれぞれの S/N の値と求めた平均二乗誤差の値である。表中の S/N 値は白板を撮像する際に光による飽和が起こり、通常時と TDI 時で条件が変わってしまったため、光量を変えて撮像を行った時の値である。その後、光量の変化分をレンズの特性から算出し、

信号量と雑音量を TDI 方式の場合のみ補正を行った。その値を補正值として表に表す。

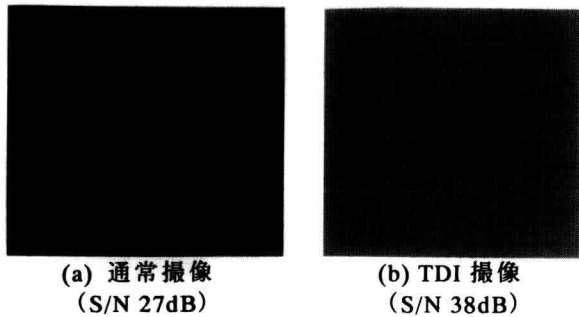


図 6. S/N 算出画像

表 1. 平均二乗誤差(RMS)と S/N 値

	RMS	S/N 値 [dB]	補正值 [dB]
通常撮像(1回目)	0.8360	27.01	—
通常撮像(2回目)	0.8548	27.80	—
通常撮像(3回目)	0.8406	27.59	—
TDI 撮像(1回目)	2.269	36.60	48.46
TDI 撮像(2回目)	1.840	36.63	48.67
TDI 撮像(3回目)	1.433	38.08	50.12

6.2. 考察

図 5 より視覚的に時間遅延積分方式の改善を見ることができ、表 1 により数学的にも改善が示された。時間遅延積分を行い、補正した値は通常撮像時に比べ、21[dB]前後の S/N 値改善が図られた。これは図 2 で示したシミュレーション結果の理論値と、極めて近い値が得られた。理論値より値が良くなってしまったことについては、RMS 値を出す過程に用いたローパスフィルター(LPF)の影響があると考えられる。

以下の表は S/N とフィルタの影響を示したものである。fcR はナイキスト周波数とカットオフ周波数とを比較したものである。これは予想していた通り fcR の値を小さくすると S/N 値が理想値に近づく結果となった。なお、表 2 の TDI 撮像の S/N 値は補正值である。

表 2. フィルタと S/N 値

fcR	0.05	0.1	0.2
通常撮像 1 回目 [dB]	26.77	27.01	27.60
通常撮像 2 回目 [dB]	27.59	27.80	28.38
通常撮像 3 回目 [dB]	27.42	27.59	28.15
TDI 撮像 1 回目 [dB]	46.45	48.64	50.79
TDI 撮像 2 回目 [dB]	46.78	48.67	50.47
TDI 撮像 3 回目 [dB]	49.11	50.12	51.21

姿勢変動については今回使ったレーンにおいてはほぼ影響無く撮像されていた。しかし CCD によるプッシュブルーム撮像方式の特性である 1 つのラインを同時に撮像を行う方式は、ロール軸、ピッチ軸方向の変動に対して 1 つのラインで各画素が等しく変動を受けるため、各変動により時間遅延積分による改善度の減少が考えられる。この改善度の向上策としては配列する CCD の間隔を小さくして、各画素間での変動量を小さくすることが考えられる。

7. 結論

本研究は現実的な状況下での衛星の姿勢変動や搭載機器による擾乱、または衛星が撮像時に発生する雑音の影響を時間遅延積分を用いて S/N 改善させる方式についてシミュレーションとの比較を行った。その結果、時間遅延積分効果については、96 回の積分で通常撮像と比較して 20[dB]程度の改善比を得られ、理想値と非常に近い値が得られた。それにより光学系の観測システムの小型化に貢献できることが確認できた。

今後の課題と対策として、実験方法としては現在の撮像時の問題点を改善し、補正を行わないより理想に近い撮像を行うことが必要である。同時に様々なパターンを撮像して解析を行う。また実験と並行して姿勢変動や位置変動時の時間遅延積分の有効性を検討する必要がある。

参考文献

- [1] 奥石 肇, “なぜプッシュブルーム走査か, その限界は”, 写真測量とリモートセンシング, 31, 1, pp15-21(1992-01).
- [2] 奈倉理一, “高分解能地球画像の時間遅延積分による画質向上,” 電子情報通信学会宇宙航行エレクトロニクス研究会資料, SANE92-103, pp13-18, 1995.
- [3] 奈倉理一, “高分解能地球観測における入射光量, S/N 及び加速帯域幅の検討,” 日本リモートセンシング学会誌 Vol.14 No.1 (1994).
- [4] 奈倉理一, 安居院猛, 3 次元画像解析, pp30-39, pp116-119, 株式会社昭晃堂, 東京, 2001.