

超小型人工衛星テレメトリの元データ推定手法の開発：総当たり探索と推定値はずれ判断による評価実験

An Evaluation Experiment of the Original Data Estimation Technique for Corrupted Telemetry Data in Amateur Satellite Communication

寺西 勇裕**, 徳光 政弘**, 高田 拓***, 浅井 文男****, 若林 誠*****

Yusuke TERANISHI, Masahiro TOKUMITSU, Taku TAKADA, Fumio ASAI,

Makoto WAKABAYASHI

概要

本研究では、誤りを含む人工衛星テレメトリデータの元データ推定手法を考案し、その性能を評価実験した。提案手法では、誤り検出符号を用いて、すべてのデータビットの組み合わせを総当たり探索し、受信データ群の統計情報による推定値のはずれ判断によって、元データを推定する。評価実験により、ランダムに生成したデータに対する元データ推定の可能性を検証した結果、1ビットの誤りを含む長さ1024ビットのランダムデータから元データの推定が可能であることを示した。さらに提案手法を256ビットの実際のテレメトリデータに対して適用した結果、最大2ビットの誤りを含むデータから元データを高い成功率で推定できることが明らかになった。

1 はじめに

世界中の大学や高等専門学校、ベンチャー企業等で新技術実証や科学観測を行うために、超小型衛星の開発と打ち上げが活発に行われている。超小型衛星から送信され、地上局で受信する人工衛星テレメトリデータは伝送中に様々な要因により誤りが発生する可能性がある。そのため、送信データには誤りが発生したかどうかを調べるために誤り検出符号が付加される。誤り検出符号により、データ本体の誤りの有無を確認できるが、誤りを訂正することはできない。通常は、受信データに誤りが発生したことを検出した場合、受信データは破棄する。

本研究では、本来破棄される受信データの有効活用を目的として、誤りを含む受信データから元の正しいデータを推定する手法を考案し、その手法の実用可能性について評価実験する。先行研究 [1] で扱ったデータ長の約10倍のテレメトリデータを用いて、元データ推定手法

の性能を検証する。

2 超小型衛星における衛星通信

2.1 通信回線の制約

超小型衛星の1つに $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ (1Uサイズ) を基準とした小型で軽量かつ低コストに打ち上げることのできる CubeSat がある。CubeSat では、衛星と地上局間の通信に主に 144MHz と 430MHz のアマチュア無線帯がよく使用されており、通信速度は 9600bps が主流で、通信可能時間は最大 15 分程度と通信回線に制約が多い。そのため、衛星と地上局は限られた時間の中で効率的に通信を行う必要がある。さらに、衛星から送信されたデータは次のような要因によって誤りが発生する (図1)。

- 大気中を伝搬する際に生じる大気減衰
- 不法無線局から発せられる不法電波による干渉など
- 衛星が移動することにより地上局との相対的な速度差によって生じるドップラーシフト

* 原稿受理 令和2年1月10日

** 米子工業高等専門学校 電子制御工学科

*** 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科

**** 米国アマチュア衛星通信協会 会員

***** 新居浜工業高等専門学校 電気情報工学科

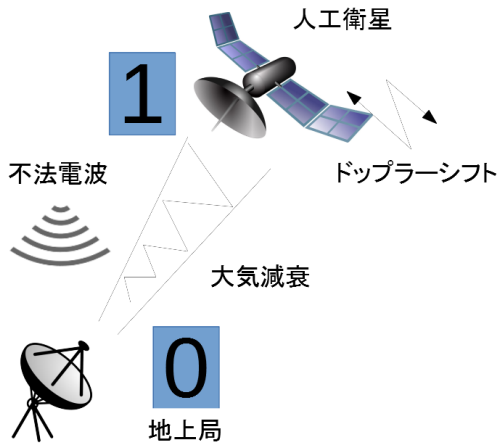


図1 伝送中にデータが誤る要因

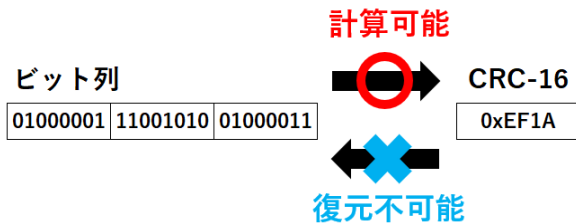


図4 巡回冗長検査の不可逆性

2.2 人工衛星テレメトリデータ

人工衛星テレメトリデータとは、地上から衛星の状態を把握するために衛星が送信するデータである。超小型衛星通信では、テレメトリデータのデータフレームは通常、メッセージとフレームチェックシーケンス (Frame Check Sequence, 以下 FCS とする) で構成される (図 2)。FCS とは、データの伝送中に誤りが発生したかどうかを検証するためのデータである。メッセージ部分には衛星の状態を把握するための、筐体内の温度や各回路の電圧値などの情報が含まれる。

地上局でデータを受信すると、受信データの FCS を確認することで受信データに誤りがふくまれているかどうかを検証できる。超小型衛星の通信では誤り検出符号を用いた前方誤り訂正方式が使用されることが多い。この方式では、地上局で受信データの誤り検出符号を検証し、受信データに誤りが含まれていた場合、受信データを破棄する。

2.3 巡回冗長検査

CubeSat では、誤り検出符号に巡回冗長検査 CRC-16 が使用されることが多い。CRC-16 は誤り検出符号であり、データ本体の誤りの有無は確認できるが、誤っているビットを特定することはできない (図 3)。

巡回冗長検査は、あらかじめ決めておいた特定の数

データフレームの構成

メッセージ	FCS
-------	-----

データ項目例

バッテリーの出力電圧	ソーラーパネルの出力電圧	筐体内の温度	誤り検出符号
------------	--------------	--------	--------

図2 データフレームの構成とデータ項目の例

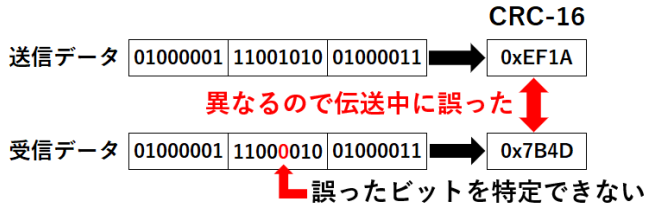


図3 CRC-16 による誤りの判定方法

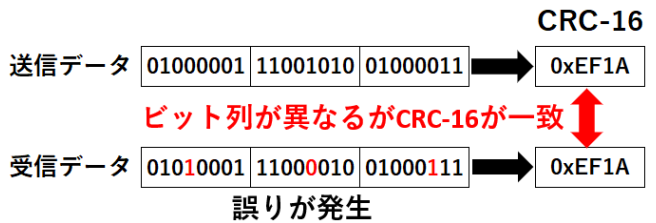


図5 コリジョンの例

(生成多項式) の除算によって計算される。ビット列の除算は排他的論理和によって計算でき、ビット列に対して一方向に計算できるため、巡回冗長検査は不可逆性を有する (図 4)。

巡回冗長検査は同じビット列に対して常に同じ値を示す。しかし、CRC-16 の情報は $65536 = (2^{16})$ 通りと少ないため、異なるビット列で同じ CRC-16 の値となることがあり、衝突 (コリジョン) が発生する。図 5 にコリジョンの概要を示すが、CRC-16 の長さ 16 ビットに対して、データ本体は 24 ビットである。データ本体の情報が CRC-16 の情報量に対して多いため、一意に対応させることができず、コリジョンが発生する。コリジョンが発生すると、誤ったデータと正しいデータの CRC-16 が一致するため、誤ったデータを正しいと判断することがある。

巡回冗長検査においてコリジョンの回避は重要であり、コリジョンが発生すると正しいデータを得ることができない。一方、データ本体の誤りを訂正したい場合には誤り訂正符号を用いる必要がある。しかし、超小型衛星の通信では誤り検出符号 CRC-16 がすでに主流となっており、この誤り検出法式を変更すると従来の受信ソフトウェアの改修や置き換えが必要になり、ポラン

送信データ	01000001	11000010	01000001	0xEF1A
受信データ	01000001	11001010	01000001	0xEF1A
		↓ 伝送中に誤った		
推定データ1	11000001	11001010	01000001	0x7B5D
推定データ2	00000001	11001010	01000001	0xC112
		⋮		
推定データ13	01000001	11000010	01000001	0xEF1A
		⋮		
推定データ24	01000001	11001010	01000000	0x9A6F

図6 元データ推定の例

ティア受信者の支援を得られにくくなる．そこで，本研究では，すでに主流となっている誤り検出符号 CRC-16 を用いて，誤りを含まない元データの推定を試みる．先行研究 [1] で扱ったデータ長の約 10 倍のデータを対象とし，元データのデータ長と誤りビット数を把握し，推定手法の実用可能性を評価する．

3 元データの推定方法

3.1 総当たり探索

元データの推定のために，誤った受信データに対して誤ることができる組み合わせのビットを反転して照合する総当たり探索によって元のデータを探索する．データ長 n ビットに対して誤ることができる組み合わせを m ビット反転する．ビット反転したデータに対して CRC-16 を計算し，受信データの CRC-16 と一致した場合，元データの可能性がある．実際には，受信データの誤りビット数は不明であるため，総当たり探索は，誤りビット m ビットを仮定して探索する反復深化深さ優先探索である．この手法は ${}_nC_1 + {}_nC_2 + \dots + {}_nC_m$ の組み合わせを $O(n^m)$ で全て列挙し，その都度 CRC-16 を $O(n)$ で計算するため， $O(n^{m+1})$ の時間計算量になる．

図6に1ビット誤り時の元データ推定の例を示す．衛星から送信されたデータの上位ビットから13番目が伝送中に誤りを含んで受信されたとする．データ本体は24ビット，誤りは1ビットであるから ${}_{24}C_1$ の組み合わせのビットを反転し，その都度 CRC-16 を計算する．誤ったビットは13番目であるから，13番目を反転させたときの CRC-16 が送信データの CRC-16 と一致する．CRC-16 が一致するとき，推定データが元データの可能性があるが，1ビット誤りの場合は，他候補がないため，元データを推定できたことになる．

3.2 各データ項目値の統計情報によるはずれ値判断

総当たり探索において，データ長や誤りビット数が増加すると，コリジョンが多く生じる．元データ推定を成

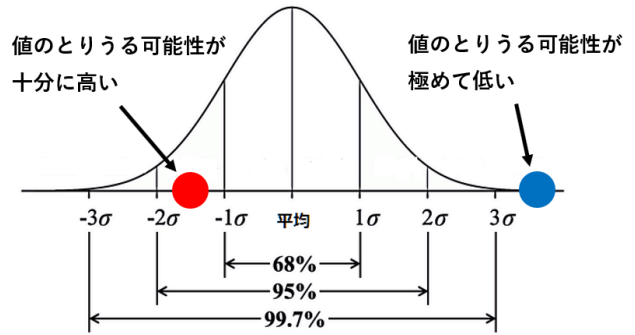


図7 統計情報による値の分類

功させるためには，コリジョンの数をできるだけ少なくする必要があります．

コリジョンする場合，同じ CRC-16 の値を持つデータ本体は様々な値をとる．衛星テレメトリデータでは，データ本体は複数のデータ項目からなり，各データ項目の値はおおよそ取りうる範囲が決まっている．例えば，バッテリー電圧であれば5V前後といったものである．各データ項目の値が取りうる値の統計情報と比較することで，コリジョンしたデータが妥当な範囲に含まれているかどうかを判断できる．各データ項目が明らかにおかしな値やはずれ値をとる場合には，推定データは間違っていると判断して，コリジョンの数を減らすことができる．

統計処理のために，過去の受信データに対して，各データ項目の平均と標準偏差を求めた．各データ項目の値が正規分布に従うと仮定すれば，推定した値がどのくらいの可能性で存在するかを調べることができる．図7は，正規分布の場合のデータ値の頻度分布を示しており，平均値からのずれの範囲で分布に占める値の割合を示している．データ値が平均値から標準偏差の3倍のずれの場合，分布に占める割合は99.7%に及び，青丸の範囲の値をとることは極めて低いことが分かる．

図8に実際に統計情報を使用して元の正解データを推定した例を示す．バッテリーの出力電圧や筐体内の温度など各データ項目について，事前に過去の受信データから平均と標準偏差を計算する．次に，総当たり探索によって元データを推定するが，推定データ1と推定データ2がコリジョンした．各データ項目に注目すると，推定データ1はすべてのデータ項目が平均から3倍の標準偏差の分布内だが，推定データ2はソーラーパネルの出力電圧値が分布外である．したがって，推定データ1は推定データ2に比べて分布内なデータ項目が多いため，正しい可能性が高い．

図9に推定に失敗した例を示す．この例では，推定

データ項目	バッテリーの出力電圧	ソーラーパネルの出力電圧	筐体内の温度	誤り検出符号
平均±標準偏差	5.02 ± 0.05	11.98 ± 0.09	22.34 ± 5.67	
正解データ	5.03	12.01	18.99	0xEF1A
推定データ1	5.03 分布内	12.01 分布内	18.99 分布内	0xEF1A
推定データ2	5.03 分布内	3.45 分布外	18.99 分布内	0xEF1A

↑ ↓ コリジョン

図8 統計情報で推定データを判断する成功例

正解データ	5.03	12.01	18.99	0xEF1A
推定データ1	5.03 分布内	12.01 分布内	18.99 分布内	0xEF1A
推定データ2	4.99 分布内	11.91 分布内	25.67 分布内	0xEF1A

↑ ↓ コリジョン

図9 統計情報で推定データを判断する失敗例

データ1, 推定データ2の全てのデータ項目がどちらも分布内であるため, どちらが正しい元データか判断することができない。コリジョンが多くなるほど, 1つの推定データに絞り込めない場合が多く出てくる。

4 シミュレーション

4.1 総当たり探索によるコリジョン数と実行時間

元データ推定にあたり, データ長と誤りビット数に対して発生するコリジョン数と実行時間を調べる。C言語プログラムを作成し, シミュレーションを行った。シミュレーションの方法としては, 正解データとなるランダムデータを生成し, このときのCRC-16を正解CRCとする。正解データに対してランダムに誤りを付与し, 総当たり探索によって各ビットを反転させてCRCを計算する。計算したCRCと正解CRCが一致した回数をコリジョン数とする。データ長は16ビットから1024ビットまで8ビット刻みで変更し, 付与する誤りは最大3ビットまで増やし, 試行回数は各パラメータにつき10

回とした。

データ長と誤りを変化させたときのコリジョン数のグラフを図10に, 実行時間のグラフを図11に示す。1ビット誤りでは, 誤りの組み合わせは1つだけなので, ビット長がCRCビットの216まではコリジョン数は1である。シミュレーションにおいて, 1ビット誤りの場合のコリジョン数はデータ長が1,024ビットの範囲では1となっている。コリジョン数は, 2ビット誤りでは最大で20程度であるが, 3ビット誤りでは1000以上となり, 元データを推定できない。図11より, 実行時間は2ビット誤りまでは1秒未満であるが, 3ビット誤りでは10秒から100秒程度となる。シミュレーション結果より, 総当たり探索において1ビット誤りであればわずかな時間で元データを推定できることを確認した。また, データ長や誤りビット数が増えると, コリジョン数と実行時間は指数関数的に増加することを確認した。

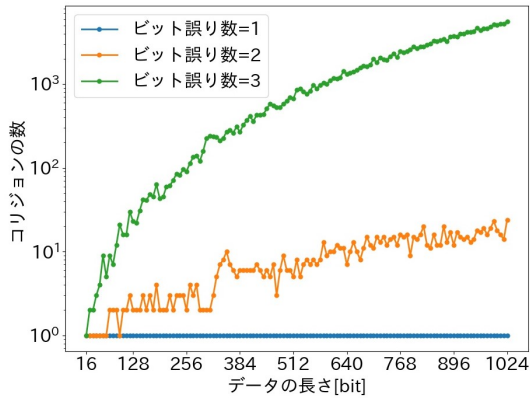


図 10 データ長に対するコリジョン数

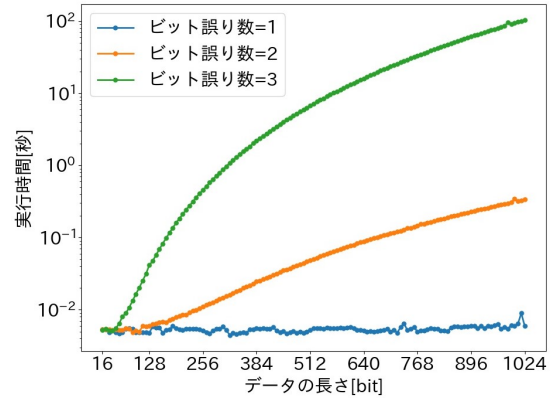


図 11 推定に要する実行時間

表 1 統計情報適用前と後のコリジョン数

誤りビット数	1	2	3	4
統計情報適用前	1.0	3.5	82.5	4172.1
統計情報適用後	1.0	1.2	3.1	24.9

表 2 統計情報適用前と後の元データ推定成功率

誤りビット数	1	2	3	4
統計情報適用前[%]	100.0	49.0	1.5	0.0
統計情報適用後[%]	100.0	92.8	77.0	56.7
受信データの改善度	1.0	1.9	53.1	2025.0

4.2 はずれ値判断による元データ推定成功率

実際のテレメトリデータのデータ項目を用いて、統計情報からコリジョンの数がどの程度削減できるかシミュレーションする。さらに、統計情報適用前と後での推定成功率を算出し、実用可能性について評価する。

図 12 にはずれ値判断による元データ推定の概要を示す。テレメトリデータとして FUNCube[2] が公開しているデータを用いた。FUNCube プロジェクトは教育分野へ貢献するために FUNCube プロジェクトと称して、2013 年から 2019 年の 1 分値ごとのテレメトリデータを公開している [3]。本実験では、FUNCube の 1 万件のデータを使用した。1 万件のデータを学習用データ 7 : テストデータ 3 に分け、学習用データの統計情報からテストデータに対して元データ推定を行った。学習データに対しては、データ項目ごとの平均と標準偏差を計算する。テストデータに対しては、ビット列にランダムに誤りを付与する。FUNCube のテレメトリデータは、バッテリーの出力電圧や筐体内の温度など計 15 個と CRC-16 のデータ項目からなり、各データ項目は 16 ビットの整数か浮動小数のいずれかである。C 言語では、16 ビット整数は int16_t 型に対応するが、16 ビット浮動小数は標準で実装されていないため IEEE 754 に準拠し半精度浮動小数を実装した。テストデータをビット列に変換後、ランダムに誤りを付与する。その後、誤りを含むテストデータのビット列に対して総当たり探索

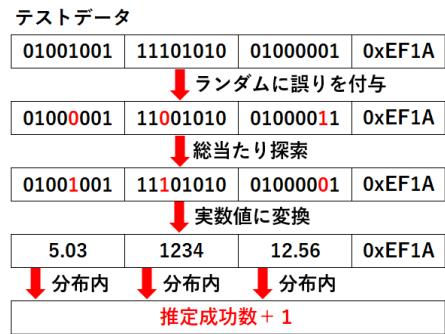


図 12 はずれ値判断による元データ推定

を行い、各データ項目が学習データの平均値の $\pm 3\sigma$ に収まるかどうかを調べる。 $\pm 3\sigma$ に収まるデータ項目の数が最も多いデータを推定データとし、推定データの数を削除後のコリジョン数となる。削減後のコリジョンが 1 の場合はそのデータを、複数ある場合はランダムに 1 つのデータを推定データに採用する。最終的に推定データと誤りを付与する前の元データが一致した場合、推定成功となる。テストデータは、1 データ項目あたり 16 ビットで表現し、合計でデータが 15 項目と CRC-16 のデータで 256 ビットである。誤りは最大 4 ビット、合計試行回数を 10 万回としてシミュレーションした。

表 1 に、はずれ値判断の有無によるコリジョン数を示す。1 ビット誤りや 2 ビット誤りでは、はずれ値判断によりコリジョン数がおおよそ 1 となり、元データが推定できる。3 ビット誤りや 4 ビット誤りでは、はずれ値判

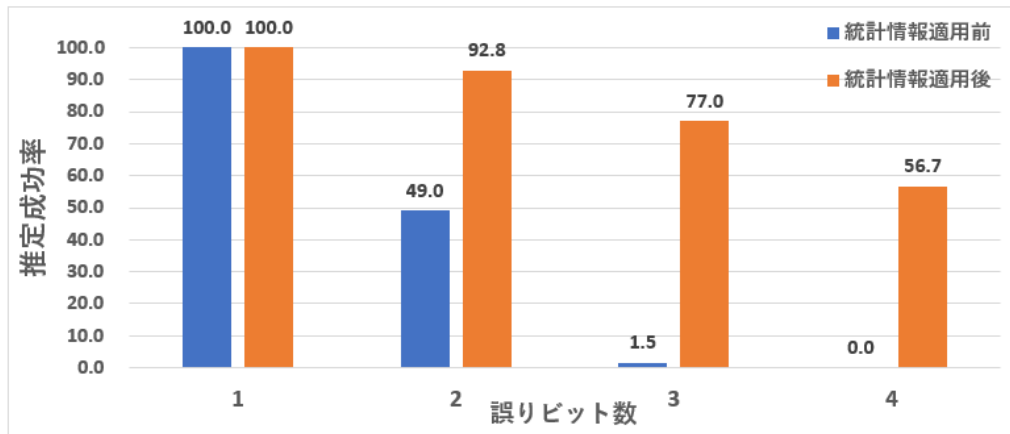


図 13 統計情報適用前と後の推定成功率

表 3 推定値と正解値の平均二乗誤差と標準偏差内の存在割合 (抜粋)

	筐体温度 [°C]	太陽電池パネル X 出力電圧 [V]	電流値合計 [mA]
平均値	9.27	4332.7	8287.2
標準偏差	9.71	223.3	88.3
平均二乗誤差	6.73	93.9	48.8
平均二乗誤差 / 標準偏差 [%]	69.3	42.1	55.4

断により、コリジョン数は大幅に削減できるが、1には収束していないため元データを推定できていない。

図 13 にはずれ値判断の有無による元データ推定成功率のグラフ、表 2 に元データ推定の成功率改善度を示す。元データ推定に関しては、1 ビット誤りでは 100 % の成功率、2 ビット誤りでは約 93 % の成功率となった。3 ビット誤りや 4 ビット誤りでは推定成功率が 77 %、57 % とやや低くなる。特に 4 ビット誤りでは、はずれ値判断により推定成功率約が約 0 % から 56.7 % に改善し、統計情報適用前と比較すると適用後はデータ推定成功率が 2000 倍以上になった。

表 3 に、3 ビットの誤りを含むテストデータに対して元データ推定をした結果について、推定値と正解値との平均二乗誤差と、標準偏差に対する平均二乗誤差の比を求めたものを示す。表 3 に示すデータ項目は、評価実験で使用したデータ項目の抜粋である。太陽電池パネル X の出力電圧は、標準偏差が 4332.7 で、標準偏差が 223.3 であった。標準偏差に対する平均二乗誤差の比は 42.1% で、標準偏差に対して誤差が小さいことがわかる。一方で、筐体温度は、平均値に対する標準偏差が 9.71 で、平均二乗誤差は 6.73 であった。筐体温度の標準偏差に対する平均二乗誤差の比は 69.3% となり、値の変動幅が大きく、標準偏差が広い。太陽電池パネル X の出力電圧

と比較して、平均二乗誤差が大きいく。これは、元データ推定が難しかったためだと考える。

5 考察

図 14 に、総当たり探索と統計情報を用いたはずれ値判断によって、元データを推定できた例を示す。地上で受信したテストデータのうち、赤色で示す 3 ビットが誤っている。このデータの CRC-16 を再計算すると 0x9C7D となり、データに含まれている CRC-16 の 0x5CD3 と異なるため、データに誤りが生じていることがわかる。受信データに対して 3 ビット反転させると、推定データ 1 と推定データ 2 の CRC-16 の値が 0x5CD3 となり、受信データと同じ CRC-16 の値である 0x5CD3 となり、正解データとコリジョンしている。推定データ 1 と統計情報を比べると、全てのデータ項目が $\pm 3\sigma$ に収まっているため、この推定データは正しい可能性が高い。一方、推定データ 2 と統計情報を比べると、データ 1 とデータ 3 が $\pm 3\sigma$ に収まっていないため、この推定データは間違っている可能性が高い。最終的に、はずれ値と判断される項目がない推定データ 1 が最も正しい可能性が高く、元データとも完全に一致しており、データ推定に成功したことがわかる。

ここで、図 14 のここで、図 14 の不正解データの誤り

元データ（衛星が本来送信したいデータ）

	データ1	データ2	データ3	データ4	CRC-16
数値	15.7188	19.5156	22.8281	23.1875	0x5CD3
ビットデータ	0100101111011100	0100110011100001	0100110110110101	0100110111001100	0101110011010011

統計情報

平均	16.1992	19.8707	23.5174	23.6926	
標準偏差	1.15777	0.987535	1.50886	1.23375	

誤ったデータ（地上局で受信したデータ）

数値	3.92969	18.5156	20.8281	23.1875	0x5CD3
ビットデータ	0100001111011100	0100110010100001	0100110100110101	0100110111001100	0101110011010011
受信データのCRC-16と異なるのでデータに誤りが生じたことがわかる				再計算したCRC-16	0x9C7D

推定データ1（正解データ）

数値	15.7188	19.5156	22.8281	23.1875	0x5CD3
ビットデータ	0100101111011100	0100110011100001	0100110110110101	0100110111001100	0101110011010011

推定データ2（不正解データ）

数値	3.42969	16.5156	28.8281	23.1875	0x5CD3
ビットデータ	0100001011011100	0100110000100001	0100111100110101	0100110111001100	0101110011010011

注) 赤色のビットが誤ったビット、橙色のビットが反転したビットを示す

図 14 コリジョンしたが推定に成功する実際のデータ

元データ（衛星が本来送信したいデータ）

	データ1	データ2	データ3	データ4	CRC-16
数値	15.7188	19.5156	22.8281	23.1875	0x5CD3
ビットデータ	0100101111011100	0100110011100001	0100110110110101	0100110111001100	0101110011010011

統計情報

平均	16.1992	19.8707	23.5174	23.6926	
標準偏差	1.15777	0.987535	1.50886	1.23375	

誤ったデータ（地上局で受信したデータ）

数値	15.7188	19.5000	22.8281	23.4531	0x5CD3
ビットデータ	0100101111011100	0100110011100000	0100110110110101	0100110111011101	1101110111011110
受信データのCRC-16と異なるのでデータに誤りが生じたことがわかる				再計算したCRC-16	0xDDDE

推定データ1（正解データ）

数値	15.7188	19.5156	22.8281	23.1875	0x5CD3
ビットデータ	0100101111011100	0100110011100001	0100110110110101	0100110111001100	0101110011010011

推定データ2（不正解データ）

数値	14.2188	19.5156	22.8281	23.4531	0x5CD3
ビットデータ	0100101100011100	0100110011100001	0100110110110101	0100110111011101	0101110011010011

推定データ3（不正解データ）

数値	15.7188	19.5625	365.25	23.2031	0x5CD3
ビットデータ	0100101111011100	0100110011100100	0101110110110101	0100110111001101	0101110011010011

注) 赤色のビットが誤ったビット、橙色のビットが反転したビットを示す

図 15 コリジョンしたが推定に失敗する実際のデータ

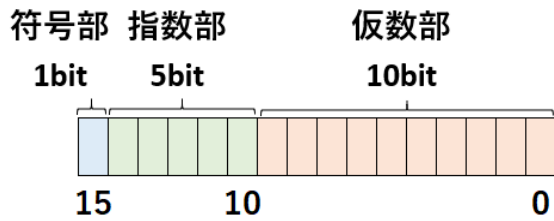


図 16 半精度浮動小数の交換形式 [4]

ビットの位置に注目する．図 16 には実数のデータ形式である半精度浮動小数の交換形式を示すが，誤りビットが符号部，指数部，仮数部のいずれに位置するかによって，実数の値が大きく異なることが想定される．図 14 の不正解データのデータ項目 1 では，誤りビットが指数部にあり，実数値が統計的な分布の範囲から外れることがわかる．そのため，推定データの値を統計情報の分布内に収めるためには，誤った指数部のビットそのものを反転させる必要がある．つまり，1 ビット確定されたように捉えることができ，残りのビット数の反転で表現できるビット列でコリジョンする組み合わせが格段に少なくなるため，推定しやすくなる．したがって，伝送中に偶発的に指数部もしくは符号部が誤った場合は推定が容易であることがわかる．

図 15 に，はずれ値判断によっても推定データを 1 つに絞れなかった例を示す．衛星から送信されたデータのうち，赤色のビットが誤りであるが，再計算された CRC-16 の値は 0xDDDE となり，データが誤っていることがわかる．受信データに対して 3 ビット誤りの総当たり探索を行うと推定データ 1, 2, 3 が候補になる．推定データ 3 は，データ 3 が分布から大きく外れているため，間違っている可能性が高い．推定データ 1 と 2 は，どちらも全てのデータ項目が分布内 $\pm 3\sigma$ に収まっており，どちらが正しいデータかを推定することができない．

推定に成功した場合と失敗した場合の違いは，誤りビットが各データ項目の上位ビットにあるか，下位ビットにあるかである．上位ビットの誤りの場合，元の値から大きく外れるが，下位ビットの誤りの場合，元の値からのずれが小さく，統計情報の範囲に収まれば，はずれ値と判断されない．このことは，半精度浮動小数のように上位ビットが指数部で下位ビットが仮数部となる場合，その差が顕著になると考えられる．

今後は，データ長が長く，誤りビットが多い場合にも，元データ推定を可能にするために提案手法を改良する．具体的には，CPU のマルチコアを利用した総当たり探索の並列化，GPGPU を利用した CRC-16 の並列計算

等が課題である．さらに，地上での通信実験データに対して，元データ推定手法を適用して評価実験を行い，実際の衛星運用での利用可能性を検討する．

6 まとめ

本研究では，人工衛星テレメトリの誤りを含むデータに対して，元データの推定可能性を検証した．ランダム誤りを含むデータに対する巡回冗長検査 CRC-16 を用いたシミュレーションでは，データ長が長く，誤りビットが多いほど，コリジョンが多発し，実行時間が増大することを示した．元データ推定手法では，誤りを含むデータのビットを反転させる総当たり探索後に，データに含まれるデータ項目値の統計情報からはずれ値判断をして元データを推定した．シミュレーションでは，超小型衛星 FUNCube の 256 ビットのテレメトリデータに対して，誤りビット 2 の場合は，提案手法は約 93 % の高い成功率で推定できた．データの誤りビット数が多い場合は，はずれ値判断することでコリジョン数を大幅に減らすことができた．

謝辞

本研究の遂行にあたって高専スペース連携の研究者に助言や支援をいただきましたので，ここに感謝の意を表します．本研究は総務省 平成 31 年度 戦略的情報通信研究開発推進事業 (192208001) の支援を受けたものです．

参考文献

- [1] M. Tokumitsu, K. Mikami, F. Asai, T. Takada, M. Wakabayashi, and Y. Ishida, "A Data Estimation Technique for Incomplete Telemetry Data based on a Genetic Algorithm with Data ' Statistical Properties," in Proceedings of the 2019 International Conference on Artificial Life and Robotics, ICAROB'18 (2018).
- [2] The FUNCube project, Welcome to the FUNcube Web Site, <https://funcube.org.uk/>. (Accessed on 27/1/2020)
- [3] D. Johnson, G4DPZ, The Data Warehouse, <http://warehouse.funcube.org.uk/>. (Accessed on 27/1/2020)
- [4] IEEE Computer Society (August 29, 2008), IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic, IEEE, doi:10.1109/IEEESTD.2008.4610935, IEEE Std 754-2008