

データの誤り・欠落を推定するオープンな人工衛星テレメトリ受信システムの構築と評価実験

代表研究者 徳光 政弘 米子工業高等専門学校 電子制御工学科 准教授
共同研究者 浅井 文男 The Radio Amateur Satellite Corporation 会員

1 目的と背景

本研究の目的は、人工衛星から送られてくるテレメトリ信号受信を支援するボランティア参加型のグローバルな地上局システムの構築、およびボランティアに向けた簡易型受信装置の開発を行い、両成果物の評価を行うことである。本研究では、ボランティア参加型により構成される協調型受信のしくみを「ソーシャルダイバーシティ」と定義する。また、ソーシャルダイバーシティを実現する情報システムを「ソーシャルダイバーシティ型情報システム」と呼ぶ。ソーシャルダイバーシティ型情報システムを実現するために、世界中のボランティア共にオープンな衛星信号受信システムの構築を目指す。

本提案システムでは、ボランティアが受信した人工衛星から送られてくるテレメトリ信号を、ウェブアプリケーションが集約して知能情報処理を行う。知能情報処理では、各受信者のデータを相互に関連付けながら、各テレメトリ信号を検査し、信号に含まれる誤りを検出、訂正もしくは欠落部分を推定し、データの品質向上を図る。したがって、本提案システムでは、集約した大量のデータ（いわゆるビッグデータ）からデータの検査、誤りの推定を行うため、世界中のボランティア受信者からデータを収集・蓄積する必要があり、さらにこれらを実現するための枠組みが必要となる。

提案システムの実現のために、以下の小課題の取り組みを行う。

- (課題1) 衛星運用チームを支援するソーシャルダイバーシティ型情報システムの実現
- (課題2) ボランティア受信者向けの信号記録プログラム・SDR利用簡易衛星受信機キットの実現
- (課題3) 受信したテレメトリ信号から元の信号を推定する知能情報処理技術の実現
- (課題4) 受信実験によるソーシャルダイバーシティ型受信の評価実験

課題1では、ソーシャルダイバーシティを実現するための情報システムを構築する。課題2では、ボランティアが受信した信号を本提案システムが必要となることから、ボランティアに対して導入・操作の敷居の低い簡易型の受信装置を提供する。課題3では、通常の情報処理技術だけでなく、衛星のテレメトリデータの特徴（例えば衛星の状態に関する統計情報）を加味した知能情報処理技術の実現を目指す。課題4では、多地点で受信したデータを知能情報処理し、ソーシャルダイバーシティ型受信システムの評価実験を行い、問題点等を考察する。

本研究の背景として、今日、世界中の大学・高専、ベンチャー企業等で超小型衛星の開発・打ち上げ・運用が活発に行われている。各衛星運用チームは、人工衛星のバッテリー電圧等の稼働状態の把握に関するデータ（ハウスキーピングデータ）や、カメラで撮影した観測データ（ミッションデータ）を得るために、人工衛星から地上局へ向けて送信されるテレメトリデータの収集に多大な労力を要している。

しかし、人工衛星から地上局へ送信されるテレメトリデータの電波は、様々な理由により元の信号が失われる（図1）。例えば、人工衛星と地上局間の通信でドップラーシフトが発生している場合、送信側・受信側の周波数がずれるため信号を正確に受信できない（この場合は周波数を調整する）。また、超小型衛星はアマチュア無線帯の周波数が主に使用されているが、地上の不法無線局による衛星通信への妨害がある。他の要因としては、人工衛星と地上局間の通信が長距離のため、大気減衰により元の信号の振幅情報が失われる。

これらの課題に対処するために、世界中のボランティア受信者は、衛星運用チームを支援するためにテレメトリデータの受信に協力している。そして、衛星運用チームは提供されたデータを元に送信されたデータの復元・推定を行っている。

しかし、データの収集方法が衛星運用チームごとに異なり（独自ソフトの使用や、ファイルのアップロード等）、ボランティア受信者への負担となっている。同時に衛星運用側も衛星やチームごとに個別の対応をする必要がある。また、データの復元・推定に関しても、標準的なツールが整備されておらず、新規に衛星を運用するチームにとって負担となっている。

そこで、知能情報処理によりテレメトリデータを推定・復元することが可能な、統一的な運用支援のため

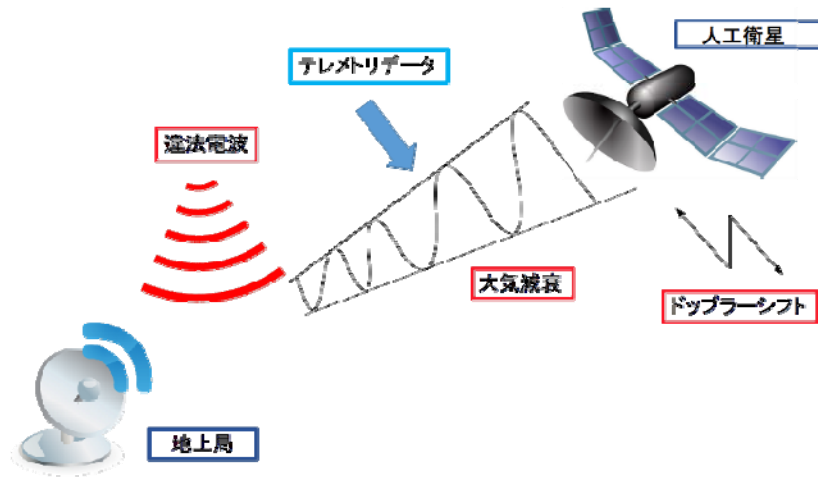


図1 衛星通信へ影響を与える要因

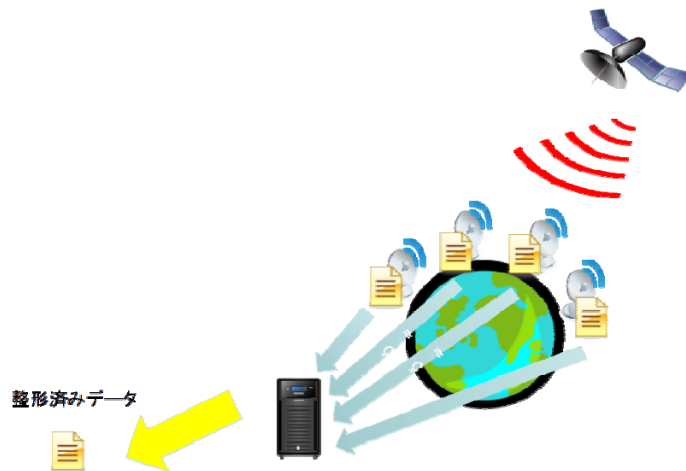


図2 ソーシャルダイバーシティ型情報システムの概観図

の情報システムを構築する。特に本研究が提案する情報システムは、予算や人的リソースに制約の多い大学・高専、ベンチャー企業等で衛星運用の支援が可能だと考えている。

本研究に関連する情報システムとしては、Online Telemetry Forwarder[1]、SatNOGS[2]がある。これらのプロジェクトでは、専用のクライアントソフトウェアを用いて、受信したテレメトリデータをウェブアプリケーションに集約し、公開しているプロジェクトである。このプロジェクトでは、データの公開のみにとどまっている。本研究では、さらに集約したデータを利活用することで、衛星運用チームを支援することを目指す。

以上の課題点を克服するために本研究は、ソーシャルダイバーシティ型情報システムの開発を進めている。本報告では、提案システムのこれまでの検討状況、提案受信システム・簡易型受信装置の状況、誤り・欠落を含むデータの元データの推定手法について報告する。

2 提案システム

2.1 提案システムの概要

本提案では、大学・高専等の超小型衛星の運用チームの支援をするためのボランティア参加型の情報システムを構築する。図2はソーシャルダイバーシティ型情報システムの概観図で、世界中のボランティアが受信したテレメトリデータをウェブアプリケーションで収集し、知能情報処理することで元のテレメトリ信号を推定する。



図3 多地点受信データによる元データの復元

本提案では、ソーシャルダイバーシティ型情報システムのソフトウェアはウェブアプリケーションとして実現し、様々な形式のクライアントソフト（コマンドラインプログラム、ウェブブラウザ、GUI アプリケーション）に対応できるようにする。ウェブアプリケーションは、収集したテレメトリデータを統計処理することや、クライアントソフトウェアからの要求に対して、対応するテレメトリデータを応答として送信する。

本提案のシステムでは、ボランティア受信者に対して、特定の機器を使ってテレメトリ信号を受信することを義務付けてはいない。テレメトリ信号の受信を行うボランティア受信者は、衛星ごとに決められている変調方式に対応した受信装置で信号を受信する。しかし、本提案では、より多くのボランティア受信者から協力を得るため、受信に必要な機材を揃える手間と費用削減、受信活動に対する敷居を下げることを目的として簡易型の受信機を製作する。

テレメトリデータに対して知能情報処理を施すプログラムは、本提案システムの核の部分となる。知能情報処理プログラムはウェブアプリケーション内に含まれる。知能情報処理プログラムは、多地点で受信されたデータを集約し、特徴情報の抽出やデータに含まれる誤りの推定を行う。

図3は多地点受信によるデータ復元の例である。この例では、衛星のテレメトリ信号を3地点で受信し、受信データが3地点分あるとする。元の送信データと比較するとデータ2では4ビット目に、データ3では6ビット目に誤りが発生している。例では、多地点受信の利点を活かし、多数決に各ビットの推定を行っている。データ1からデータ3の各ビットで出現率が高いものを選び、元のデータとして推定する。多数決の結果、4ビット目と6ビット目の誤りはそれぞれ1と0に訂正される。多数決は単純な比較方法ではあるが、この例で示したようにウェブアプリケーションはより高度な知能情報処理によって、テレメトリデータの推定を行う。

ウェブアプリケーションでは、テレメトリデータの蓄積、知能情報処理だけでなく運用チームは、推定されたテレメトリデータや元のテレメトリデータを参照することができる。本提案では、テレメトリデータの収集から情報処理、配信まで行う情報システムを構築する。

2.2 ウェブアプリケーション

簡易型受信機に搭載するクライアントプログラムと利用者がデータの保存や参照が行いやすいように、サーバのプログラムをウェブアプリケーションとして実装した。ウェブアプリケーションの Google App Engine をプラットフォームとし、大量のテレメトリデータを高速かつ並列で処理できるように Go 言語を開発プラットフォームとした。Go 言語はコンパイルが高速で、プログラミング言語レベルで並列処理に対応している。簡易型受信装置のクライアントソフトウェアおよびウェブブラウザのデータ交換は HTTP 上で JSON (JavaScript Simple Object Notation) 形式[3]のデータをやりとりする。

簡易型受信機のクライアントプログラムは、サーバへデータ送信するが、具体的にやり取りするデータの種類は次のようなものになる。

1. クライアントプログラムの認証に関するもの
2. 受信者の登録情報（メールアドレス、名前）

```
{
  "name": "米子高専情報ネットワーク実験室",
  "callsign": "JE4YMP",
  "email": "tokumitsu@yonago.kosen-ac.jp",
  "password": "*****"
}
```

図4 ユーザ情報を表す JSON データの例

```
{
  "address": "Hikonacho 4448, Yonago, Japan",
  "observer_id": 5629499534213120,
  "latitude": 35.457637,
  "longitude": 133.289024,
  "grid_locator": "PM65PK"
}
```

図5 地点情報を表す JSON データの例

```
{
  "norad_id": "10000",
  "location_id": 4785074604081152,
  "observer_id": 5629499534213120,
  "timestamp": 1478339390000000,
  "frequency": 435.382,
  "encoding_format": "text",
  "data": "This is a 1200bps AFSK packet message beacon from JJ3YUJ"
}
```

図6 受信テレメトリデータを表す JSON データの例

3. 受信地点の情報（緯度・経度）
4. レコード（受信したテレメトリデータと関連するメタデータ）

1 の認証に関しては、JSON Web Token[4]を使用した認証を実装する。ユーザ認証を導入することで、レコード情報と受信者情報を紐づけ、受信地点を把握できるようにする。3 の受信地点に関する情報はユーザのプライバシーに考慮し精度の高い緯度・経度の情報ではなく、グリッドロケータ[5]を採用する。グリッドロケータは6桁のアルファベットと数字から構成される区画で区切られた地点情報で、世界全体を網羅している。

図4から図6に簡易型受信機からサーバへ送信する JSON データの例を示す。図4にボランティア受信者の JSON データを示す。名前やパスワードの認証に関する情報を含む。このデータはクライアントプログラムからサーバへユーザ登録のために送信されるデータを示す。図5は受信者の地点状を表すデータで、図6に示すレコードと関連付けられる。受信したテレメトリデータをレコードと予備、受信周波数やデータの形式、受信時刻等の付加情報が含まれる。これらのデータはプログラムから直接 HTTP の通信をしてサーバに送信することもできる。加えて、受信者が cURL 等のプログラムを使って手動でサーバに送信することも可能である。図7は、提案システムの試験運用を行っているウェブサイトを示している[6]。テレメトリデータの受信例を示している。

4 簡易型受信機

4.1 簡易型受信機の概要

簡易型受信機（図8）は、ソーシャルダイバーシティ型の受信システムの構築へ向けて、ボランティアが利用できる標準的な簡易型受信機である。図8は本研究で設計・製作した簡易型受信機の外觀図である。本

最新の受信状況

収集したテレメトリデータ(最大100件分)を表示しています。

| 番号 | 衛星カタログ番号 | 衛星名 | 時刻 | 地点 (グリッドロケータ) | データの長さ | データへのリンク |
|----|----------|----------|----------------------|---------------|--------|---------------------|
| 1 | 40043 | TIGRISAT | 2017-05-03T04:54:26Z | PM74VR | 56 | データ |
| 2 | 40043 | TIGRISAT | 2017-05-03T04:51:29Z | PM74VR | 56 | データ |
| 3 | 40043 | TIGRISAT | 2017-05-03T04:44:13Z | PM74VR | 56 | データ |
| 4 | 40043 | TIGRISAT | 2017-05-03T02:45:28Z | PM74VR | 56 | データ |



図8 簡易型受信機の外観



図9 QFH アンテナの外観

提案システムのボランティア受信者はアマチュア無線家、受信愛好家を想定している。しかし、参加するボランティアにより技術レベルも大幅に異なるから、広くボランティアに参加してもらえるように人工衛星の信号を受信できる標準的な受信機構成を検討し、情報提供することを考える。設備や技術を有するボランティア受信者は自身の設備を使用して、簡易型受信機のプログラムと提案システムへのデータ送信が可能である。

4.2 簡易型受信機の構成

簡易型受信機は、大学衛星等が VHF/UHF 帯のアマチュア無線周波数で送信するバケットテレメトリを受信してデータベースに送るために使用する、ソフトウェア無線 (Software Defined Radio、SDR) を利用した簡便な衛星データ受信装置である。大学衛星等の送信電波を確実に受信するには利得の高い指向性アンテナが必要であるが、ローテーター等の装置と追尾操作が必要になる。そのため、これらが不要な無指向性のアンテナを採用した。この種のアンテナで容易かつ安価に入手できるものはグランドプレーン (GP) アンテナであるが、垂直偏波であるためフェージングと地上交信の影響を強く受ける。そこで、これら影響を受けにくい QFH アンテナを採用した。図9に示す QFH アンテナ (QFH-435[7]) は 430MHz 帯用であるが、137MHz 帯や 144MHz 帯

表 1 受信機 (Raspberry Pi) の消費電流の測定結果

| 使用条件/モデル | 平均消費電流[mA] | | | |
|---------------------|------------|----------|----------|--------------|
| | Model B+ | Model 2B | Model 3B | Model zero W |
| 本体のみ(電源接続時) | 200 | 210 | 240 | 120 |
| 本体のみ(シャットダウン時) | 90 | 100 | 120 | 0 |
| RTLSDR Dongle 接続時 | 300 | 310 | 340 | 240 |
| RTLとWi-Fi Dongle接続時 | 410 | 420 | | |
| 受信・解読ソフト実行時 | 550~580 | 560~590 | 520~590 | 400~470 |
| 価格(円) | 3,200 | 4,400 | 4,900 | 1,300 |



図 10 USB ドングルの比較

表 2 各種 RTL-SDR ドングルの比較

| 製品 | 電流[mA] | 価格(円) | 備考 |
|-------------------------|--------|-------|-----------------------------|
| RTL-SDR Blog Dongle V3 | 560 | 2,200 | R820T2+RTL2832U 1ppm TCXO |
| NooElec NESDR Nano 2+ | 510 | 3,500 | R820T2+RTL2832U 0.5ppm TCXO |
| NooElec NESDR SMARt | 510 | 2,900 | R820T2+RTL2832U 0.5ppm TCXO |
| ThumbNet N3 Dongle | 660 | 3,800 | R820T2+RTL2832U 0.5ppm TCXO |
| SHAFT Corp. R820T2 TCXO | 550 | 5,900 | R820T2+RTL2832U 0.5ppm TCXO |

用も市販されており、N型コネクタが使用されている点や、自作では難しい堅牢で信頼性の高い構造になっている点も利点である。また、QFHアンテナは複雑な形状のため加工が難しい。アンテナの自作を行うボランティアはParasitic Lindenbladアンテナ[8]も選択肢になる。

受信機本体は、安価かつ小型、運用側に特別な条件が求められないものを選定した。最も容易な選択は市販の広帯域受信機であるが、コンピュータに受信機からの信号を取り込むには配線の手間がかかる。また、アマチュア無線用トランシーバを使用することも選択肢に挙がるが、トランシーバを使用するには無線従事者の資格と無線局の免許が必要になる。そのため、Raspberry PiとSDRを利用して受信機を構成することにした。受信機の手操作をCUIベースに限定するならばモデルB+でも使用できるが、表1に示す消費電流の測定結果を比較すると、B+、2B、3Bはほぼ同じである。そのため、GUIベースの操作もある程度できる3Bを採用した。

Raspberry Piに装着するSDRフロントエンドには多数の選択肢があるが、安価に入手できて対応ソフトが豊富なRTL-SDR(DVB-T Tuner)ドングルと呼ばれる製品から選択することにした。図10に示すように、RTL-SDRドングルにも多数の製品があるが、表2のとおり、チューナーチップにR820T2、復調チップにRTL2832Uを使用している点は共通なので、受信感度、ダイナミックレンジ、受信周波数帯、最大受信帯域幅などの基本性能はほぼ同じである。そのため、最も安価なRTL-SDR BlogドングルV3[9]を採用した。TCXOは1ppmであるが、VHF/UHFのFM受信には支障ない。なお、表2の電流はドングルをRaspberry Pi 3Bに装着し、受信・解読ソフトを実行したときの消費電流である。

製作した標準型受信機の部品構成を図11に示す。ノイズの発生を抑えるため、Raspberry Piとプリアンプの電源にはそれぞれモバイルバッテリーとニッケル水素乾電池を使用している。また、各種プリアンプの仕様を表3、受信機接続時の基本性能の比較を表4に示す。ANSAT製プリアンプ[12]の利得は仕様どおり約16dBあり、15エレシングル八木アンテナを使用するのと同等の性能である。したがって、AMSAT製プリアンプは、


```
#!/bin/bash
bash -c 'rtl_fm -M fm -s 48k -f 435M - | direwolf -q d -t 0 -r 48000 -B 9600 - | python SDP-Client.py'
```

図 13 図 12 の連携動作を実行させるシェルスクリプトの例

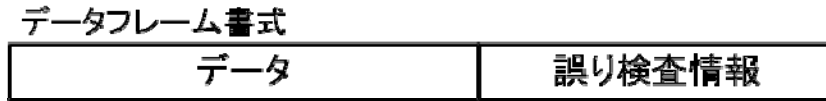


図 14 データのフレーム構成

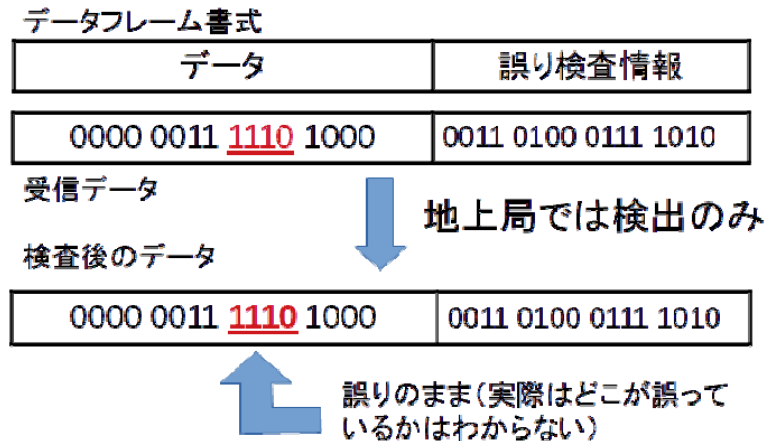


図 15 受信データを誤り検査情報から検査

けなら操作は容易で、解読性能も高い。

DireWolf で解読したパケットデータは受信時刻などの情報を付加してデータベースサーバにアップロードする必要がある。そのため Python スクリプト (SDP-Client.py) を作成した。SDP-Client は解読データを受信時刻などの情報を付加した JSON データに変換し、データベースサーバにポストする。ポストした JSON データのログも生成できる。標準型受信装置に実装した rtl_fm、DireWolf、SDP-Client の連携動作を図 12 に示す。

実際に簡易型受信装置で衛星パケットデータを受信し、リアルタイムで JSON データをサーバにポストするには Wi-Fi または有線でインターネット接続し、SSH 操作で図 13 に示すようなシェルスクリプトを実行する必要があるが、接続できない場合でもログを生成・保存することはできる。

4 データの誤り・欠落の推定手法

この章では、受信したテレメトリデータの誤り・欠落を推定する情報処理手法を述べる。テレメトリデータでは、バイナリ値で表されるデータである。一般的にテレメトリデータはデータ本体の部分と、データの誤りや訂正を行うための情報が付加されている。例えば、人工衛星の稼働状態を表すハウスキーピングや観測データと、これらデータに関する誤り検査情報もしくは訂正情報が付加される。本研究では、図 14 に示すようにテレメトリデータは、データ本体と誤り検査情報から構成されるデータとする。

地上局側で、巡回符号を用いた受信データの誤り検査を行う場合、データに誤りが含まれているかどうかまでは検出ができる。しかし、受信データのどの部分が誤っているかどうかまでは調べることはできない(図 15)。誤り検出の精度は、基本的には誤り検査情報を表すデータが長いほど、精度が高くなる。

本研究データは、誤り・欠落を含む不完全なテレメトリデータを、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm、GA) [15] を基本とした手法で推定する。受信したテレメトリデータから元のデータの推定を試みるとき、データを信号レベルやフレームデータレベルのようにどのレベルのデータとして捉えるかで、どういった推定で行うのがよいか異なる。本研究では、フレームデータのレベルで受信データを捉え、遺伝的アルゴリズム

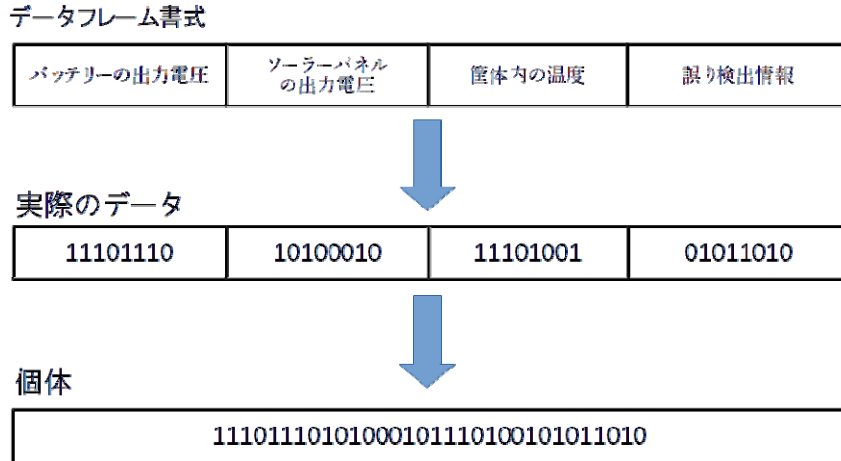


図 16 受信データと遺伝的アルゴリズムの個体との対応関係

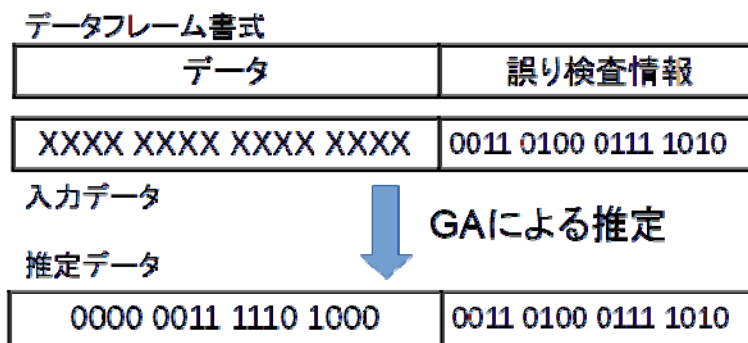


図 17 元データを誤り検査情報のみから推定

の適用を考える。フレームデータのレベルであれば、遺伝的アルゴリズムを用いて推定する場合、フレームデータのバイナリ値と遺伝的アルゴリズムの遺伝情報との間の親和性が高い。遺伝的アルゴリズムでは、様々な遺伝情報で記述された個体を評価関数により選別し、淘汰する。遺伝的アルゴリズムでは、遺伝情報を構成するシンボルを組み合わせて個体を表現する。したがって、遺伝的アルゴリズムは、フレームデータのバイナリ値を遺伝的アルゴリズムの個体情報に直接対応付けることができるため、データ推定の手法に適している。

遺伝的アルゴリズムでは、生物の自然淘汰を模した手順により個体を選定する。そして、評価関数に従って最適な個体が世代を経て選ばれる。提案手法では、元データの推定を誤り検査情報（FCS、Frame Check Sequence）を手がかりに行う。もし、個体があらかずデータから計算される誤り検査情報と受信したデータの誤り検査情報が一致すれば、最適解となり推定が終了する。しかし、遺伝的アルゴリズムによる元データ推定過程では、集団内の個体数によるが多く解候補となる個体がある。さらに解候補を絞り込むために、他のテレメトリデータに関係するデータや情報を活用することでも可能である。

受信データと遺伝的アルゴリズムにおける個体の対応関係を図 16 に示す。受信データはデータフレームの書式に則って解釈する。図 17 の例では、3 つの人工衛星の観測データと誤り検査情報から構成されている。各データは 8 ビットで表現されている。この書式に則った受信データのバイナリ値をそのまま並べて、遺伝的アルゴリズムの個体に対応付ける。ただし、個体に変換したデータ内の誤り検査情報の部分は、データの誤り検査のみに使用する。

本研究では、初期実験として誤り検査情報に巡回符号の CRC-16（CRC-CCITT）を使用する。CRC-16 は代表的な誤り検査に使われる方式である。データフレームの各データは、16 ビットの長さで表現される。ビットデータの並びは、ビッグエンディアン方式とする。提案手法の遺伝的アルゴリズムの計算手順では、集団内の個体数は 30 とし、個体の突然変異の方式は、個体を表現するビット列の任意の二つのビットを入れ替える交差方式とする。提案手法における個体淘汰では、評価関数を用いて上位の個体を選別する。適応度の計算

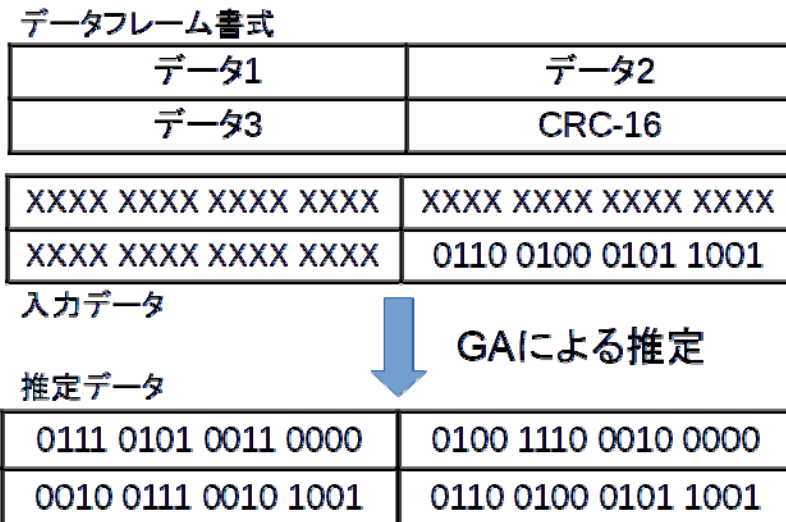


図 18 元データを誤り検査情報のみから推定

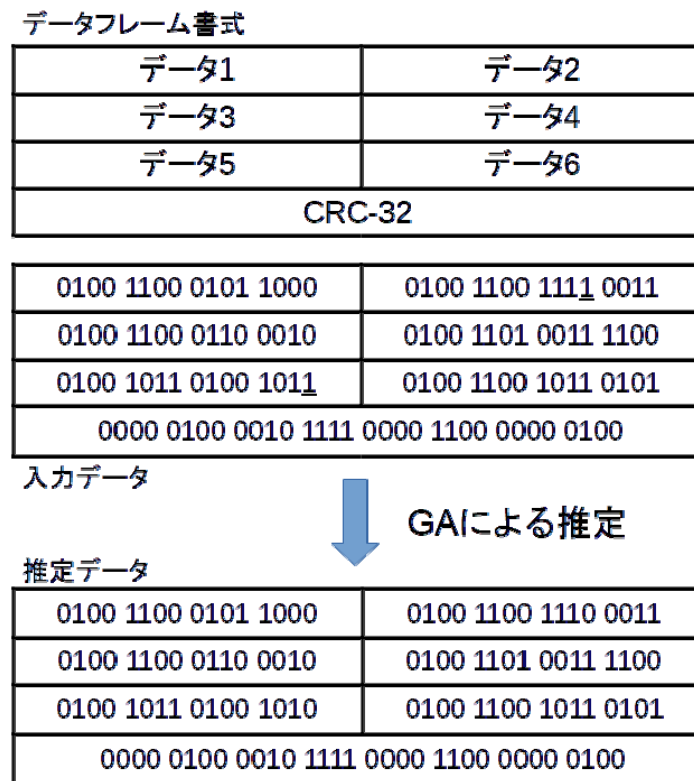


図 19 6種類のデータもつデータフレームの推定

を行う評価関数は、各データフィールドの値と受信データの各観測値の平均値との誤差を総和した値を計算する。淘汰の手順では、個体ごとに評価関数の計算にこの誤差を計算し、上位の個体を選定する。

本研究では、遺伝的アルゴリズムのプログラム作成に Go 言語で記述されている gago[15]を使用した。gago は遺伝的アルゴリズムのライブラリで、基本的な計算のひな型を提供し、並列計算に対応している。図 17 は提案手法による元データ推定の概要を示したものである。16 ビットの誤り検査情報から元データを推定している。誤り検査情報の 16 進数表現は 347A であり、元データの 10 進数表現は 1000 である。実際にプログラムを作成して検証し、誤り検査情報のみから元データを推定できることを確認した。

図 18 は、データフレームの観測データの個数を 3 種類に拡張し、提案手法で推定した例である。誤り検査

表 2 提案手法による元データ推定成功率

| 項目\使用データ個数 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 使用データ項目 | 1-3 | 1-4 | 1-5 | 1-6 | 1-7 | 1-8 |
| データの長さ | 48 | 64 | 80 | 96 | 112 | 128 |
| テストデータ総数 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| 推定成功数 | 346 | 283 | 237 | 202 | 162 | 133 |
| 推定成功率 | 0.692 | 0.556 | 0.474 | 0.404 | 0.324 | 0.266 |

表 4 使用するデータ項目の例

| 番号 | データの名前 |
|----|-----------------------|
| 1 | Black Chassis deg. C |
| 2 | Silver Chassis deg. C |
| 3 | Black Panel deg. C |
| 4 | Silver Panel deg. C |
| 5 | Solar Panel +X deg. C |
| 6 | Solar Panel -X deg. C |
| 7 | Solar Panel +Y deg. C |
| 8 | Solar Panel -Y deg. C |

情報は 16 進数表現で 6459、データ 1 からデータ 3 は 10 進数表現でそれぞれ 30000、20000、10025 を表す。この例ではデータフレームのメッセージ部分の長さが合計で 48 ビットになっている。この例でも、提案手法により元データを推定することができた。

さらに提案手法を、実際に衛星から得られたデータを元に評価実験を行った。評価実験に使用したデータは、AMSAT-UK により運用されている FUNCcube-1 (A0-73) [17] という運用中の衛星である。衛星を運用しているプロジェクトでは、毎週ごとの衛星から受信したテレメトリデータ [18] を公開している。公開されているテレメトリデータは主に人工衛星の稼働状態に関するデータ (ハウスキーピングデータ) で、太陽電池の出力電圧や筐体内の温度等のセンサデータが含まれている。本研究では、いくつかの衛星データ項目から長さが異なるテストデータを生成した。表 1 は FunCube-1 の公開されている評価実験で使用したテレメトリデータの項目である。各観測データは浮動小数になっているが、16 ビットの長さの IEEE 754-2008 形式で表現する。図 19 は合計でメッセージ部が 128 ビットの長さを持つデータフレームの推定例を示している。

評価実験では、統計情報計算用とテスト用のデータを分類した。統計情報計算用とテスト用の全データの観測期間は約 3 ヶ月 (19 日分) で、総数は 24503 個である。その中から、統計情報計算用に 22050 個、テストデータに 2450 個をランダムに抽出した。これは、受信したデータの中に 2450 個 (全データに対して 10%) の誤りを含むデータが有ったことを仮定している。テスト用テレメトリデータの長さを使用する観測データの個数を変化させて、作成した。使用するデータの個数を 3 個から 8 個とし、メッセージ部分のデータの長さは 48 ビットから 128 ビットになる。各テストデータには、2 ビットのエラーを意図的に挿入した。また、誤り検査情報に CRC-32 を使用した。予備実験で、CRC-16 を使用して元データの推定を行うと誤検出が多く、CRC-32 で評価することにした。

表 2 は評価実験の結果を示している。テストデータは、データセットから 500 個の入力データをランダムに抽出し、提案手法で元データの推定を行った。48 ビット (項目数は 3) のテストデータで約 70% のデータを推定することができた一方で、データの長さが長くなるにつれて推定成功率が低下している。この原因としては、データの長さが長くなると解候補 (元データ) の数が増え、元のデータと一致する誤り検査情報を得ることができる個体の発見が難しくなるためである。より推定成功率を高めるためには、遺伝的アルゴリズムで絞り込みを行うための統計情報、その他付加的な情報が役に立つと考える。また、今回の評価実験では CRC-32 を使用したため、CRC-16 を使用したデータフレームに対する手法を検討する必要がある。

6 受信実験の準備状況

課題 4 について、ボランティアによる受信と知能情報処理を融合した多地点受信システムをソーシャルダ

イバーシティという概念で位置付け、ソーシャルダイバーシティの受信性能の評価に取り組んだ。ボランティア受信者に本研究で検討した簡易型受信機のキットを配布と運用に向けて、組み立て、操作方法をまとめた資料を作成した。組み立てに関する資料は、部品の画像、組み立て順を画像付きで整理し、試験運用中のウェブサイトに掲載した。

また、衛星受信に関心があるボランティアが参加できるように低軌道を周回する衛星の受信に関する資料も併せて整備を行った。具体的には、簡易型受信機とパケット通信に関する資料になっている。簡易型受信機に使われる Raspberry Pi の OS が Raspbian のため Linux のコマンドライン操作が必要になる。コマンドを使ったコンピュータ操作に不慣れなボランティアのために、受信の動作確認、設定等について資料をまとめた。他にも、衛星信号の受信を始めるのに適した衛星の情報も掲載した。現在、多地点受信と知能情報処理による受信性能を評価するために実験に取り組んでいる。

7 まとめ

本研究の目的の達成である受信システムの構築と評価実験へ向けて、課題 1 から課題 4 の小課題に取り組んだ。受信システムを構成する簡易型受信機のハードウェア・ソフトウェアの部品選定と評価を行い、衛星信号の受信に利用できることを確認した。また、サーバサイドのプログラム開発も主要機能の実装が終わり、サーバへのデータ送信ができるようになった。収集したデータも知能情報処理により、データの誤り・欠落を推定可能な手法も検討し、基盤技術を確立することができた。今後の課題は、受信システムに必要な各種基盤技術は確立できたため、構築した受信システムを運用し実際の衛星テレメトリデータを取集、評価実験を行うことである。

【参考文献】

- [1] Mike Rupprecht (DK3WN) : Online Telemetry Forwarder, <http://www.dk3wn.info/p/?p=69954> (2018 年 6 月 28 日閲覧)
- [2] Libre Space Foundation, SatNOGS Network, <https://network-dev.satnogs.org/> (2017). (2018 年 6 月 28 日閲覧)
- [3] T. Bray : The JavaScript Object Notation (JSON) Data Interchange Format, Request for Comments, 7159, Internet Engineering Task Force, 2014, <https://tools.ietf.org/html/rfc7159> . (2018 年 6 月 28 日閲覧)
- [4] M. Jones, J. Bradley, N. Sakimura: JSON Web Token (JWT), Request for Comments, 7519, Internet Engineering Task Force, 2015. <https://tools.ietf.org/html/rfc7519> . (2018 年 6 月 28 日閲覧)
- [5] 日本アマチュア無線連盟: グリッド・ロケータとは, http://www.jarl.org/Japanese/1_Tanoshimo/1-2_Award/gl.htm (2018 年 6 月 28 日閲覧).
- [6] Social diversity project, Social diversity: a global and integrated telemetry receiving system with volunteers and an intelligent information processing, <https://social-diversity-devel.appspot.com/>, 2017. (2018 年 6 月 28 日閲覧)
- [7] ナガラ電子工業: QFH-435, <http://www.nagara-ant.com/> (2018 年 6 月 28 日閲覧)
- [8] A. Monteiro (AA2TX) : A Parasitic Lindenblad Antenna for 70cm, <http://www.amsat.org/wordpress/wp-content/uploads/2014/01/70ParaLindy.pdf> . (2018 年 6 月 28 日閲覧)
- [9] RTL-SDR.com: RTL-SDR Blog Dongle V3, <https://www.rtl-sdr.com/buy-rtl-sdr-dvb-t-dongles/> . (2018 年 6 月 28 日閲覧)
- [10] コスモウェーブ: 広帯域プリアンプユニット LNA3215MB-BNCJ, <http://www.cosmowave.jp/scb/shop/shop.cgi?No=1231&> . (2018 年 6 月 28 日閲覧)
- [11] コスモウェーブ: 430MHz 帯プリアンプユニット LNA-BPF430C, <http://www.cosmowave.jp/scb/shop/shop.cgi?No=1399&> . (2018 年 6 月 28 日閲覧)
- [12] The Radio Amateur Satellite Corporation: Original Broadband Satellite RX Preamp,

- <https://www.amsat.org/product/original-broadband-satellite-rx-preamp/> . (2018年6月28日閲覧)
- [13] A. Csete (OZ9AEC): GQRX SDR, Open source software defined radio, <http://gqrx.dk/> . (2018年6月28日閲覧)
- [14] J. Langner: DireWolf, <https://github.com/wb2osz/direwolf> . (2018年6月28日閲覧)
- [15] J. H. Holland: Adaptation in Natural and Artificial Systems, 1975, MIT Press.
- [16] M. Halford: GitHub - MaxHalford/gago: Golang genetic algorithm library, <https://github.com/MaxHalford/gago> 2017. (2018年6月28日閲覧)
- [17] The FUNCube project, Welcome to the FUNcube Web Site, <https://funcube.org.uk/>. (2018年6月28日閲覧)
- [18] D. Johnson (G4DPZ): The Data Warehouse, <http://warehouse.funcube.org.uk/realtime.html?satelliteId=2> . 2013. (2018年6月28日閲覧)

〈発表資料〉

| 題名 | 掲載誌・学会名等 | 発表年月 |
|--|---|---------|
| A Prototype of an Integrated Telemetry Receiving System with Volunteers: Designs of a Simple Receiver, a Protocol, and an Intelligent Information Processing | Procedia Computer Science、 Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems: Proceedings of the 21st International Conference (KES 2018) | 2017年9月 |
| 人工衛星テレメトリデータの誤り・欠落を推定するための知能情報処理の検討 | 第23回高専シンポジウム in KOBE | 2018年1月 |
| A Data Estimation Technique for Incomplete Telemetry Data based on a Genetic Algorithm with Data ' Statistical Properties | The 2019 International Conference on Artificial Life and Robotics | 2018年2月 |
| 人工衛星テレメトリデータの誤り・欠落を推定するための統計情報を活用した遺伝的アルゴリズムの検討 | 2018年電子情報通信学会総合大会 | 2018年3月 |