

# 人工衛星の広帯域姿勢決定

島 岳也\*  
藤井悠太\*\*

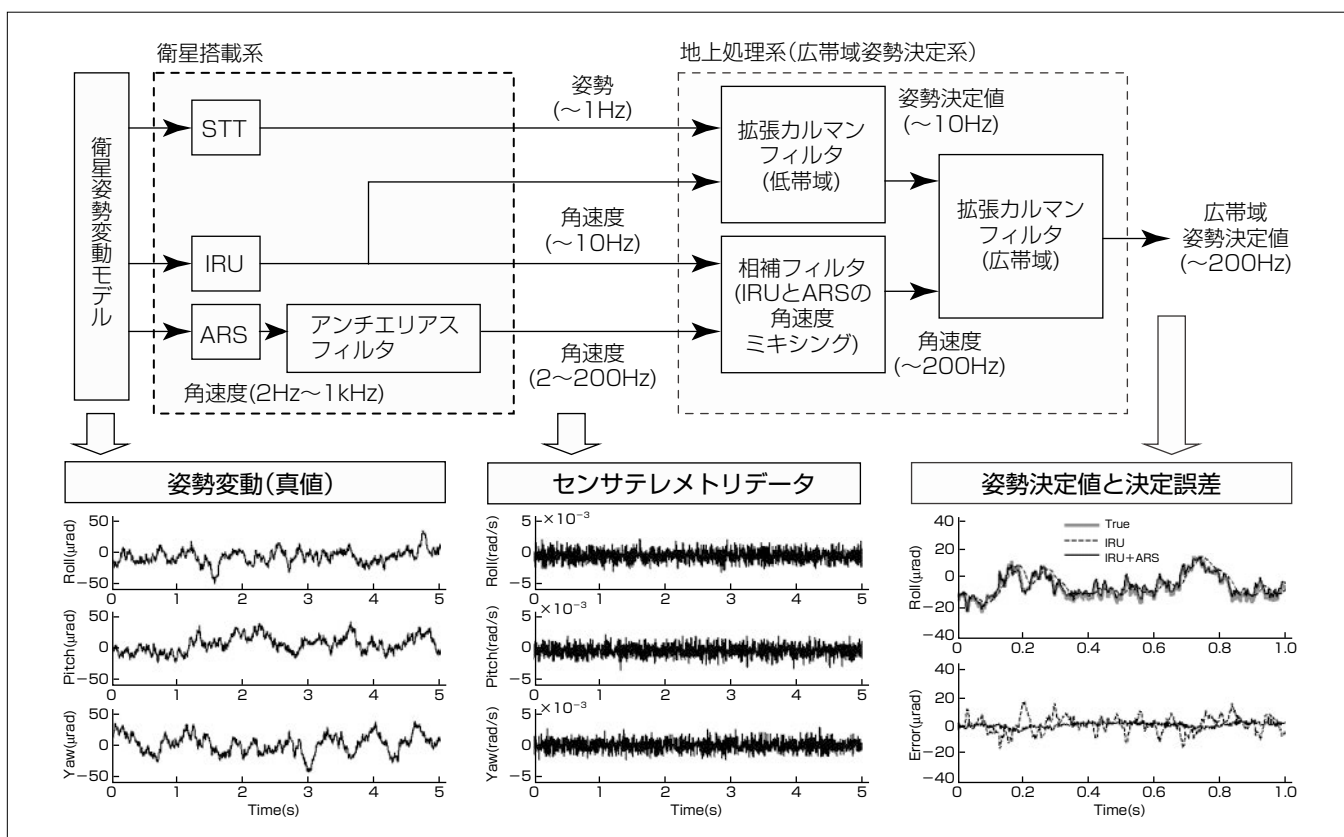
## Spacecraft Attitude Determination Using High-bandwidth Angular Rate Sensors

Takeya Shima, Yuta Fujii

### 要 旨

人工衛星に搭載した観測センサを用いて、高品質な観測画像を生成する際には、観測センサの指向方向を高精度に決定し、地表面上での観測点の位置決めを行い、これをもとに画像幾何補正などの種々の補正処理が実施される。観測センサの指向方向決定のためには、それを搭載した人工衛星の姿勢決定が必要となるが、これは通常、衛星搭載センサデータを地上に取得し、拡張カルマンフィルタなどを用いたオフライン処理によって高精度に決定される。しかし、近年、地球観測衛星や天文観測衛星等における画像分解能要求の飛躍的な高まりを背景として、これまで姿勢決定の対象ではなかった衛星姿勢変動の中・高周波成分の取得画像への影響が問題となってきた。

そこで観測帯域の異なる複数のセンサを衛星に搭載し、これらのセンサデータを用いた信号処理によって、従来の姿勢決定系の観測帯域を超える広帯域姿勢決定について検討を行った。また開発した広帯域姿勢決定系の有効性を検証するために、軌道上の衛星姿勢変動モデルを用いた数値シミュレーションを実施した。まず衛星姿勢変動モデルと各センサの観測モデルを用いて、衛星姿勢決定で用いる各センサのテレメトリデータ(衛星姿勢と角速度の時系列データ)を模擬生成する。これを用いて姿勢決定シミュレーションを実施し、姿勢決定帯域及び姿勢決定精度の評価を行った。これによって、衛星基本設計段階で、開発した広帯域姿勢決定系の有効性を検証することができた。



### 広帯域姿勢決定系と姿勢決定シミュレーションの一例

広帯域姿勢決定のために、人工衛星には従来搭載センサの姿勢センサ(STT: STar Tracker, 帯域 $\sim 1$ Hz程度)と角速度センサ(IRU: Inertial Reference Unit, 帯域 $\sim 10$ Hz程度)に加え、高周波角速度センサ(ARS: Angular Rate Sensor, 帯域 $2$ Hz $\sim 1$ kHz程度)を搭載する。異なる観測帯域をもつこれらのセンサデータを組み合わせた信号処理によって、広帯域の姿勢決定値を得る。開発した広帯域姿勢決定系の有効性を検証するために、軌道上の衛星姿勢変動を模擬した数値シミュレーションを実施した。広帯域姿勢決定系(実線)では、従来の低帯域姿勢決定系(破線)に比べて、より姿勢決定誤差の低減が図られているのが確認できる。

1. ま え が き

人工衛星に搭載した観測センサを用いて、高品質な観測画像を生成する際には、観測センサの指向方向を高精度に決定し、地表面上での観測点の位置決めを行い、これをもとに画像幾何補正などの種々の補正処理が実施される。観測センサの指向方向決定のためには、それを搭載した人工衛星の姿勢決定が必要となるが、これは通常、衛星搭載センサデータを地上に取得し、拡張カルマンフィルタなどを用いたオフライン処理によって高精度に決定される<sup>(1)</sup>。

一般に人工衛星の姿勢は、衛星搭載機器が発生する擾乱(じょうらん)によって、低周波から高周波にわたって広帯域に姿勢変動している。近年の地球観測衛星などにおける画像分解能要求の飛躍的な高まりを背景として、これまで姿勢決定の対象ではなかった衛星姿勢変動の中・高周波成分の取得画像への影響が問題となってきた。

これを受け、従来の姿勢決定帯域を超える広帯域姿勢決定系について検討を行った。広帯域姿勢決定で問題となるのは、宇宙空間で利用可能な広観測帯域をもつジッタセンサ(角度センサや角速度センサ)が存在しないことである。そこで異なる観測帯域をもつ複数のセンサを組み合わせることで広帯域姿勢決定系を構成し、軌道上の衛星姿勢変動を模擬した数値シミュレーションによって、姿勢決定精度の評価を行い、広帯域姿勢決定系の有効性を検証した。

2. 広帯域姿勢決定系

2.1 衛星搭載センサの特性

衛星姿勢決定のためのセンサとして、通常、衛星本体にはIRU等の三軸角速度センサが搭載される。IRUの入力角速度から出力角速度までの伝達特性は、二次のローパス特性でモデル化され、その観測帯域は10Hz程度である。図1(a)はIRUの角速度観測特性モデル(ゲイン特性と位相特性)の一例を示したものである。これよりIRU単体では10Hz程度までの姿勢変動しか観測できず、数十から数百Hz程度の中・高周波の姿勢変動は観測できない。

IRUより高い観測帯域をもつジッタセンサとして、高周波姿勢変動を観測可能なADS(Angular Displacement Sensor)や、高周波角速度を観測可能なARSがある<sup>(2)</sup>。ADSやARSの入出力伝達特性はバンドパス特性でモデル化され、その観測帯域は2Hzから1kHz程度である。図1(b)はARSの角速度観測特性モデルの一例を示したものである。図から分かるようにDC(Direct Current)成分を含む低周波の角速度は観測できないが、IRUでは観測できない10Hz以上の中・高周波の角速度は観測が可能である。

2.2 姿勢決定フィルタの構成

図1に示したセンサ伝達特性から、IRUとARSによる角速度観測値を補完的に用いることで、IRU単体では得られ

ない広帯域の角速度の観測が可能となる。すなわちDCから低周波域をIRU、中・高周波域をARSで受け持つことによって、DCから高周波までの広帯域にわたって角速度を観測できる。この広帯域角速度を用いることによって、従来の姿勢決定フィルタでは得られない、広帯域の姿勢決定値を得ることができる。

図2に広帯域姿勢決定系の全体像を示す。衛星本体には、従来の搭載センサであるSTTなどの姿勢センサとIRUなどの低帯域角速度センサに加え、高周波角速度センサARSを搭載する。またARSの高周波サンプリングによるエリアシングの影響を抑えるために、アンチエリアスフィルタも実装される。

IRUとARSによって観測された角速度をミキシングして広帯域角速度を生成するブロックが、図2における相補フィルタである。相補フィルタでは、まずARSのアンチエリアスフィルタによる位相遅れ補償を実施する。これは、衛星に実装したアンチエリアスフィルタと同じ特性をもつデジタルフィルタを時間逆向きに適用することで可能となる。次にIRUとARSによる角速度観測値のミキシングであるが、図1のセンサ観測特性に示すように、両センサは重複した観測帯域をもっている。したがって高精度姿勢決定のためには、ミキシングによって角速度観測特性(ゲイン特性と位相特性)を歪(ひず)ませないことが重要である。相補フィルタの設計パラメータは、位相遅れ補償後の

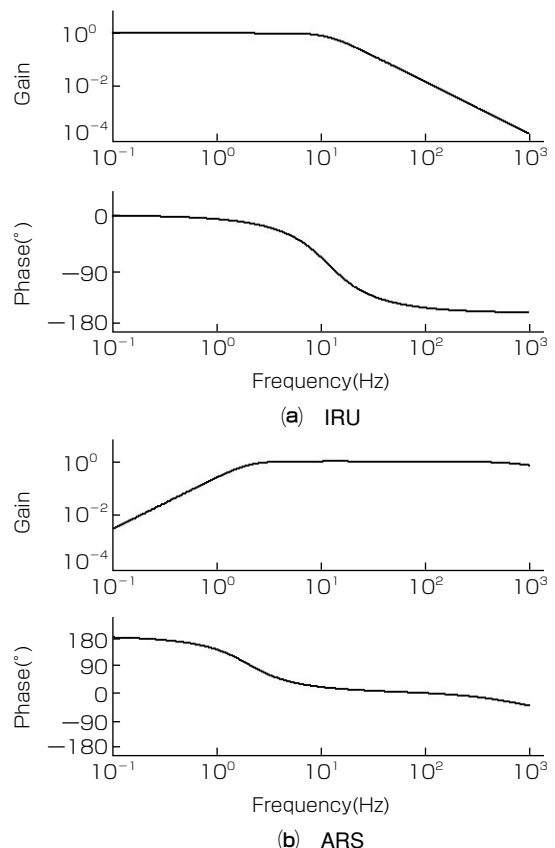


図1. IRUとARSの角速度観測特性モデル

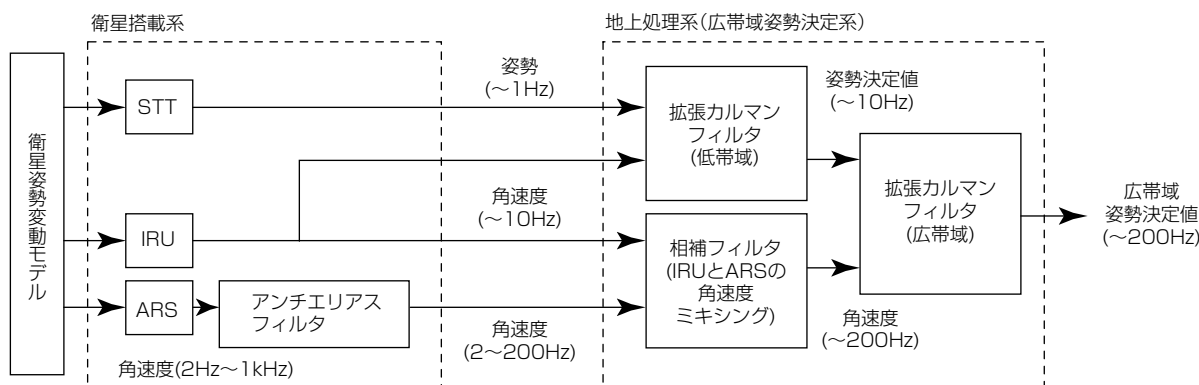


図 2. 広帯域姿勢決定系の全体像

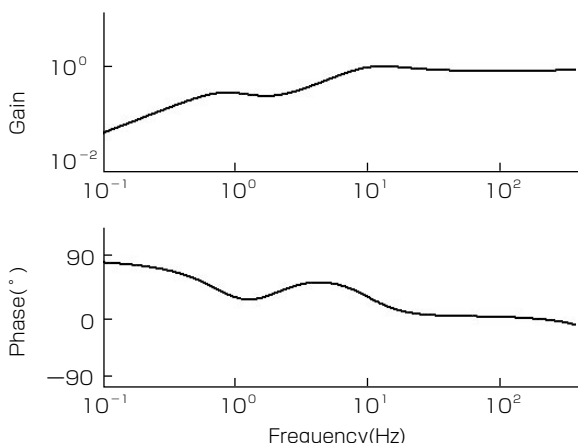


図 3. ARSの角速度観測値に乗じる周波数重みの特性

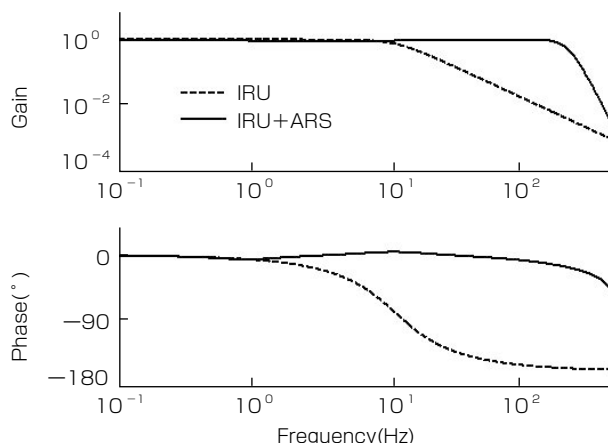


図 4. 相補フィルタによって実現される角速度観測特性

ARSの角速度観測値に乗じる周波数重みである。図 1 のセンサ特性を用いて設計した周波数重みの特性を図 3 に示す。相補フィルタでは、IRUによる角速度観測値と、周波数重みを乗じたARSの角速度観測値の和を広帯域角速度として出力する。この相補フィルタによって実現される入力角速度から出力角速度までの伝達特性を図 4 に示す。ここで破線がIRU単体の特性、実線がIRUとARSを用いた相補フィルタの特性を示す。DCから200Hz程度(アンチエイリアスフィルタのカットオフ周波数)までの広い周波数帯域にわたって、ほぼ平坦(へいたん)な周波数特性(ゲインと位相)が得られている。

### 3. 数値シミュレーションによる評価

衛星姿勢決定フィルタの姿勢決定精度は、衛星本体の姿勢変動に依存する。ここでは衛星姿勢変動モデルとして、欧州宇宙機関(European Space Agency: ESA)における光通信実証プログラムSILEX(Semiconductor laser Intersatellite Link EXperiment)の設計基準値を用いる。このモデルは、軌道上の衛星姿勢変動を片側パワースペクトル密度(Power Spectrum Density: PSD)で規定したものとなっており、ESAのOLYMPUS衛星で、衛星定常時の加速度計の軌道上実測値に基づき設定されたものである<sup>(3)</sup>。

考慮している周波数区間でパワースペクトル密度が規定

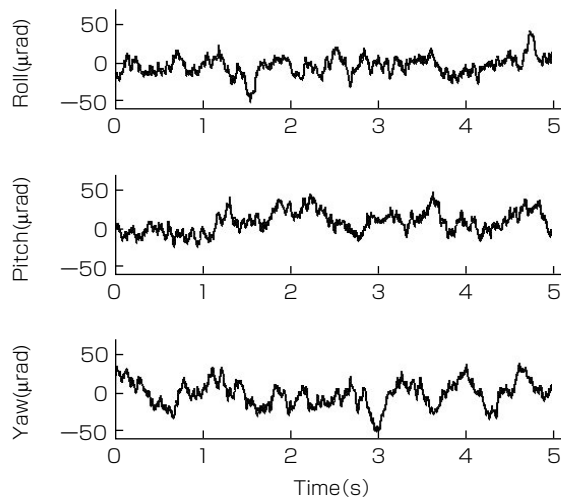


図 5. 模擬生成した衛星各軸の姿勢変動

されると、それを満たす姿勢変動の時系列データは、その周波数区間内のランダムな波の重ね合わせとして模擬生成できる<sup>(4)</sup>。こうして生成した衛星各軸の姿勢変動模擬データの一例を図 5 に示す。先に述べた姿勢変動モデルを用いると、各軸16μrad(1σ)程度の姿勢変動を仮定することになる。この姿勢変動模擬データと、各センサの観測モデルを用いて姿勢決定に使用するセンサテレメトリデータ(IRU, ARS, STT)を生成したものを図 6 に示す。

この模擬テレメトリデータを用いて姿勢決定シミュレー

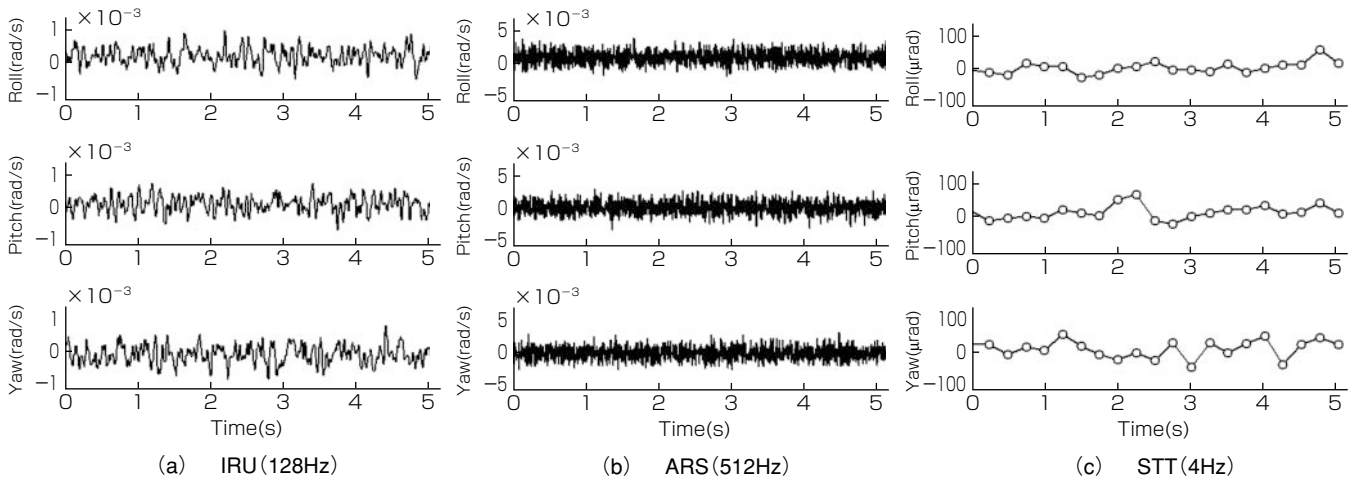


図6. 各センサのテレメトリデータ

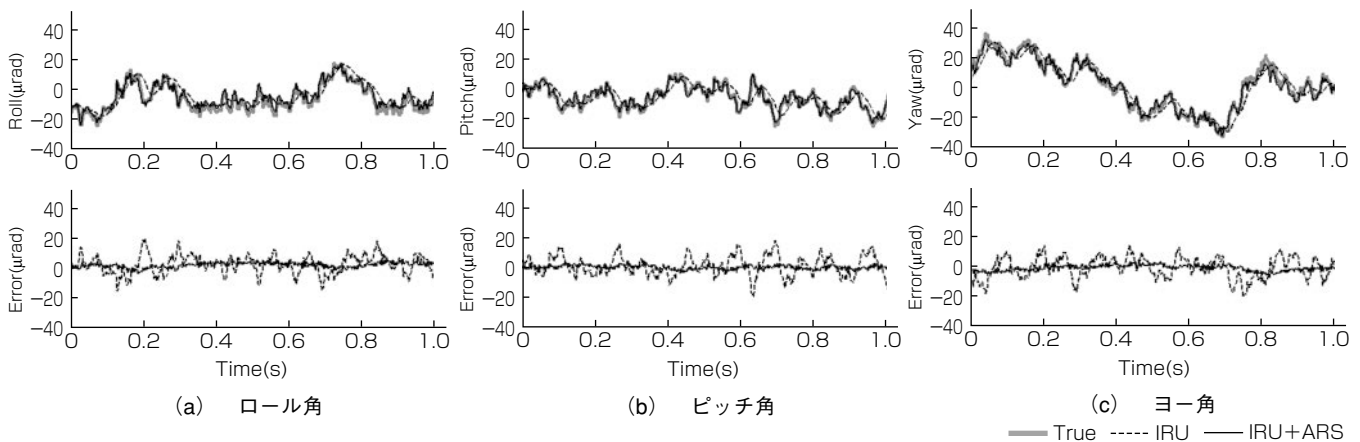


図7. 姿勢決定値と決定誤差

ションを行い、姿勢決定精度を評価した。図7は衛星姿勢各軸の姿勢決定値と決定誤差の評価結果の一例を示したものである。ここでグレー実線(True)が衛星姿勢変動真値、破線(IRU)が従来の低帯域姿勢決定フィルタ、実線(IRU+ARS)が今回開発した広帯域姿勢決定フィルタの結果を示している。この図から広帯域姿勢決定フィルタでは、より衛星姿勢変動真値に近い姿勢決定値を出力できているのが分かる。これは、広帯域姿勢決定フィルタでは、IRUの観測帯域を越えた中・高周波域でも姿勢決定が可能であり、それによって姿勢決定誤差が低減されるためである。

#### 4. むすび

人工衛星の広帯域姿勢決定系について述べた。観測帯域の異なる複数のセンサを組み合わせた信号処理によって、従来の姿勢決定帯域を超える広帯域にわたって姿勢決定が可能となる。軌道上の姿勢変動を模擬した数値シミュレーションによって、衛星基本設計段階で、開発した広帯域姿勢決定系が姿勢決定誤差低減に有効であることを検証した。

#### 参考文献

- (1) 二宮敬虔, ほか: 天文観測用科学衛星の姿勢決定系におけるカルマンフィルタ, 宇宙科学研究所報告, No.102, 4~60 (1999)
- (2) Laughlin, D., et al.: A Dual Function Magnetohydrodynamic (MHD) Device for Angular Motion Measurement and Control, 25th Annual AAS Guidance and Control Conference, **111**, AAS02-061, 335~348 (2002)
- (3) Witting, M., et al.: In-Orbit Measurement of Microaccelerations of ESA's Communication Satellite OLYMPUS, SPIE, **1218**, 205~214 (1990)
- (4) 西口憲一, ほか: 救難用トランスポンダの視認性に対する波浪の影響について, 電子情報通信学会論文誌B, **J82-B**, No.5, 1073~1081 (1999)