



指向管理標準

平成 26 年 3 月 17 日 制定

宇宙航空研究開発機構

免責条項

ここに含まれる情報は、一般的な情報提供のみを目的としています。JAXA は、かかる情報の正確性、有用性又は適時性を含め、明示又は黙示に何ら保証するものではありません。また、JAXA は、かかる情報の利用に関連する損害について、何ら責任を負いません。

Disclaimer

The information contained herein is for general informational purposes only. JAXA makes no warranty, express or implied, including as to the accuracy, usefulness or timeliness of any information herein. JAXA will not be liable for any losses relating to the use of the information.

発行

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

宇宙航空研究開発機構 安全・信頼性推進部

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)

目次

1.	総則	1
1.1	目的	1
1.2	適用範囲	1
1.3	関連文書	1
1.4	用語・略語	1
1.5	単位	1
1.6	構成	1
2.	指向管理	2
2.1	指向管理とは	2
2.2	指向管理のプロセス	2
2.3	問題点と必要性	2
2.4	指向管理の要件	3
2.5	指向と姿勢	4
3.	基本事項	5
3.1	座標系	5
3.2	時系	10
3.3	統計的概念	11
4.	ミッション要求	13
4.1	実時間要求とオフライン要求	13
4.2	地球観測ミッション	13
4.3	宇宙科学ミッション	16
4.4	通信・放送ミッション	18
5.	指向要求定義と体系	20
5.1	基本的な考え方	20
5.2	指向要求定義において注意すること	20
5.3	指向制御精度、姿勢制御精度、位置制御精度	21
5.4	指向安定度、姿勢安定度	24
5.5	指向決定精度、姿勢決定精度、位置決定精度	26
5.6	指向精度、姿勢精度、アライメント精度、位置精度	28
5.7	指向要求の周波数領域表現	29
6.	ミッション要求と指向要求との関係	31
6.1	地球観測ミッション	31
6.2	宇宙科学ミッション	34
6.3	通信・放送ミッション	37

付録1. 用語・略語表..... 40

1. 総則

1.1 目的

本標準は、人工衛星の総合システムを対象として、ミッションの指向に関する要求設定・設計・検証の End-to-End プロセスと、その基礎をなす指向要求定義を定める。これにより、ミッションの指向要求実現の活動に、明確さと、総合システム全体のベースとなる共通の理解を与える。

1.2 適用範囲

人工衛星のオンボード側では、ミッション機器、姿勢軌道制御系、構体系、熱制御系、データ処理系、テレメトリ・トラッキング・コマンド系等を、また、地上では、姿勢決定系、軌道決定系、画像処理系、校正系等を対象として、総合システムにおける指向に関連する全ての要素に適用される。また、要求定義、設計、製作、検証、運用、軌道上校正をカバーする人工衛星の End-to-End のライフサイクルを適用範囲とする。

1.3 関連文書

本標準は、「JERG-2-100 システム設計標準 (TBD)」の下位文書に位置付けられる第3階層文書である。関連する文書を以下に示す。

- (1) JERG-2-100 システム設計標準 (TBD)
- (2) JERG-2-500 制御系設計標準
- (3) JERG-2-510 姿勢制御系設計標準
- (4) JERG-2-100-HB101 標準座標系・時系利用マニュアル
- (5) JERG-2-152A 擾乱管理標準
- (6) JERG-2-151 ミッション・軌道設計標準

1.4 用語・略語

本標準で用いている主な用語・略語を付録 1. に示す。

1.5 単位

国際単位系 (SI) を使用する。但し、慣用的に SI に抛りがたい場合は、慣用的な単位を併記する。

1.6 構成

本標準は以下の通り構成する。2章にて、指向管理の必要性と概要を説明する。3章にて、その後の章の規定に必要となる、座標系、時系、統計的概念などの基本的な事項について説明する。4章にて、指向に関連する主なミッション要求を説明する。これに対して、5章にて、ミッション要求からシステム要求として導かれる指向要求を定義する。さらに、6章にて、4章で示したミッション要求と5章で定義した指向要求の関係を示す。

2. 指向管理

2.1 指向管理とは

指向管理とは、人工衛星の総合システムを対象とした、ミッションの指向に関する要求設定・設計・検証のEnd-to-Endプロセスである。指向管理は、システム技術であり、人工衛星のオンボード側では、ミッション機器、姿勢軌道制御系、構体系、熱制御系、データ処理系、テレメトリ・トラッキング・コマンド系等を、また、地上では、姿勢決定系、軌道決定系、画像処理系、校正系等を対象とする。このため、衛星のバス系担当だけでなく、ミッション側や地上システム側も、このEnd-to-Endプロセスに参加して指向管理を進める必要がある。指向管理を必要とする指向ミッションには、地球や月惑星を対象とした観測ミッション、天体等を対象とした観測ミッション（宇宙科学ミッション）、通信・放送ミッションなどがある。

2.2 指向管理のプロセス

指向管理は、表 2.1 に示すプロセスからなる。

表 2.1 指向管理プロセス

No.	フェーズ	内容
1	要求定義	指向に関連するミッション要求を理解し明確にする
2		明確にしたミッション要求を指向要求の概念・言語に変換し規定する
3	設計(総合システム) (各システム) (各サブシステム)	各指向要求を、物理的な構成に基づき、分割・配分・定義する。この際、分割・配分・定義した指向要求が、製造・試験・軌道上等に対し自ら定義する検証フェーズにおいて測定可能なものとなっているよう留意する。
4		分割・配分・定義された各指向要求を、衛星システム、地上システム、及びそれぞれのサブシステムに配分する
5		各システム、各サブシステムにおいて、配分された指向要求の実現方法を設計する
6	検証(各サブシステム) (各システム) (総合システム)	各システム、各サブシステムにおいて、配分された指向要求の設計結果を検証する
7		各指向要求の設計・検証結果を衛星/地上システム及び全体システムで総合し評価する
8	フィードバック	必要に応じて、あるいは、デザインフェーズ毎に、上記の必要なステップにフィードバックしプロセスを繰り返す(要求の見直しを含む)

2.3 問題点と必要性

1) これまでの問題点

これまで、指向管理というプロセスは、明確に定義されていなかったが、指向要求に関するプロセスには、表 2.2 に挙げる問題があった。

表 2.2 指向要求に関するプロセスの問題点

No.	フェーズ	内容	
1	要求定義	本当に必要なミッション要求が何なのか明確でないことが多い	
2		各指向要求の定義・物理的意味が曖昧であることが多い	
3		物理的、数学的に厳密に定義されていない	
4		統計的な規定なしに用いている	
5		No. 1 から No. 4 の結果として	用語を感覚的に用いてコミュニケーションしている
6			サブシステムや衛星により、また、衛星側とミッション側で、またしばしば同じ組織の中でも人により、同じ用語を異なる意味で用いている
7			設計解析の進捗に伴い、状況により要求の解釈が変わることがある
8	設計(総合システム) (各システム) (各サブシステム)	各指向要求の誤差構成・集計が不適當であることが多い	
9		定義の物理的意味を考えないまま集計されるため、集計方法が根拠のないものであったり、恣意的であったりする	
10		評価の方法や項目が確立されていない(設計方法)	
11		要求定義における曖昧さの陰で、本当に考慮しなければいけない諸要因が考慮から抜け落ちる	
12	検証(各サブシステム) (各システム) (総合システム)	評価の方法や項目が確立されていない(試験方法)	
13		要求定義における曖昧さの陰で、本当に考慮しなければいけない諸要因の評価が不十分になる	
14	フィードバック	No. 8 や No. 10 の結果、適切な配分見直しが行われない	

2) 指向管理の今後の必要性

こうした問題点に加えて、さらに以下のような理由から、指向管理が今後必要になっている。

- ・ミッションの高度化、高精度化に伴い、個別コンポーネント、サブシステムのみでは、ミッション要求を実現することが困難になってきている
- ・衛星システム、さらに地上システムを含めた総合システムとして、ミッション/システムを設計することが必要になってきた
- ・このため、ミッションを構成する各要素間で、要求の定義を曖昧さを排した形で共有するとともに、各要素への配分・インタフェースを明確にすることがより必要になってきた

2.4 指向管理の要件

指向管理には以下の領域に対する理解・知識が必要である。

- ・ミッション機器とその動作原理
- ・ミッションのプロダクト
- ・ミッションのプロダクトの利用方法・利用形態
- ・座標系、時系
- ・ジオメトリ
- ・統計的信号処理

- ・周波数領域
- ・姿勢、軌道
- ・衛星システム
- ・アライメント、構体、熱制御
- ・データ伝送、データ処理
- ・地上システム

2.5 指向と姿勢

指向と姿勢は、いずれも宇宙機の座標系の向きに関する性質であるが、異なる座標系と性質に対して定義されていて、通常、一致しない。指向は、ミッション機器の向きを表す概念で、ミッションの基準座標系により規定される。ミッションの基準座標系の例としては、観測センサの視線ベクトルが挙げられる。一方、姿勢は、衛星全体の向きを表す概念で、通常、姿勢決定基準座標系により規定される。姿勢決定基準座標系の例としては、恒星センサを基準とした座標系や機体固定座標系などが挙げられる。

指向と姿勢の差は、主にアライメントと高周波振動、および座標変換である。指向を表現するものとして、例えば、地球観測ミッションには、ジオメトリックセンサモデルがあるが、これは、視線ベクトルの回転と並進からなる。回転は、CCD 座標系で表現された視線ベクトルから、姿勢決定基準座標系を経て、J2000.0 慣性座標系への回転からなり、並進は、光学的基準位置の衛星固定座標系における座標により表現される。

3. 基本事項

3.1 座標系

本節では、指向管理で使用する座標系について概説する。指向管理で使用する座標系は、大きく、一般座標系、衛星座標系、サブシステム座標系に分けられる。一般座標系は、個別の衛星によらない一般的な環境の基準を表す座標系群である。衛星座標系は、個別の衛星における衛星レベルの基準を表す座標系群であり、サブシステム座標系は、個別の衛星におけるサブシステムレベルの基準を表す座標系群である。

1) 一般座標系

一般座標系には、主に、以下のような座標系がある。それぞれの座標系の定義の概要を、表 3.1 に示す。詳細な定義については、JERG-2-100-HB101 標準座標系・時系利用マニュアルを参照されたい。

- ・慣性座標系 (J2000.0、TOD、擬似 TOD 等)
- ・軌道基準座標系
- ・軌道座標系
- ・地球固定座標系 (WGS84、ITRF 等)
- ・地球楕円体 (WGS、GRS 等)

2) 衛星座標系

使用される衛星座標系とその定義は、厳密には、衛星毎に異なるものの、代表的な衛星座標系には、以下のような座標系がある。それぞれの定義を、表 3.2 に示す。

- ・モデル基準軌道座標系
- ・センサ基準軌道座標系 (地球センサ、GPS 受信機、等)
- ・制御基準座標系 (制御基準軌道座標系、制御基準慣性座標系、等)
- ・センサ基準座標系 (スタートラッカ)
- ・姿勢決定座標系
- ・衛星座標系
- ・衛星固定座標系

3) サブシステム座標系

使用されるサブシステム座標系とその定義は、厳密には、衛星のサブシステム毎に異なるものの、代表的なサブシステム座標系には、以下のような座標系がある。ここでいうセンサには、姿勢センサとミッションセンサの両方がある。それぞれの定義を、表 3.3 に示す。

- ・センサ座標系、センサ基準座標系、センサ固定座標系、センサキューブ座標系、センサ光軸座標系
- ・センサ CCD 座標系、センサ CCD 局所座標系
- ・センサ機械座標系、センサ電気座標系
- ・アンテナ座標系、アンテナ基準座標系、アンテナ固定座標系
- ・アンテナ送受信機座標系、アンテナ送受信機局所座標系
- ・アンテナ機械座標系、アンテナ電気座標系

主な座標系間の関係を、図 3.1、図 3.2 に、1 軸回転により模式的に示す。「姿勢」、「指向」、「アライメント」といった概念は、ここに示した座標系間の回転として定義される。図 3.1 において、「姿勢」は、基準座標系から姿勢センサ（姿勢決定基準）座標系への回転として、「指向」は、基準座標系からミッション機器（ペイロード）座標系への回転として、定義される。「姿勢」は、概念的には、衛星本体固定座標系の基準座標系からの回転として理解されることが多いが、厳密には、計測され制御されるのは姿勢センサ（姿勢決定基準）座標系であるので、厳密な「姿勢」は、基準座標系から姿勢センサ（姿勢決定基準）座標系への回転として定義される。「姿勢」や「指向」の「決定」は、これらの「姿勢」や「指向」に相当する回転を計測し、計測情報から誤差が小さくなるよう推定する活動である。また、「姿勢」や「指向」の「制御」は、図中で、青色で記した部分に相当し、「決定」した「姿勢」や「指向」の値に基き、それぞれ「制御」と示した、目標座標系との間のずれ（回転）を小さくする活動として定義される。

本来であれば、衛星本体固定座標系と姿勢センサ（姿勢決定基準）座標系は常に一致し、姿勢センサ（姿勢決定基準）座標系とミッション機器（ペイロード）座標系の間は一定のバイアス角度の回転のみで維持されることが望ましい。しかし、姿勢センサやミッション機器の衛星本体への取付公差によるミスアライメントが存在する上、荷重・振動・温度変化により、それが変動する。こうした要素を「アライメント」と呼び、衛星固定座標系から姿勢センサ（姿勢決定基準）座標系への回転や、姿勢センサ（姿勢決定基準）座標系への回転として定義される。

姿勢センサ、ミッション機器（ペイロード）、衛星本体との間の「アライメント」は、図 3.2 に示すように、それぞれのアライメントキューブにより姿勢センサ（姿勢決定）光学基準座標系、ミッション機器（ペイロード）光学基準座標系、衛星光学基準座標系との間の回転として、地上で計測される。これらの 3 座標系は、それぞれ、姿勢センサ（姿勢決定基準）座標系、ミッション機器（ペイロード）座標系、衛星本体固定座標系と一致することが望ましいが、現実の世界では、それぞれの間にもミスアライメントが存在する。さらに、姿勢センサ、ミッション機器（ペイロード）、衛星本体との間のアライメントのみならず、これらのミスアライメントも変動する。また、姿勢センサやミッション機器（ペイロード）は、一般に独立した構造を持つ機器であるため、それぞれのアライメントは、機器内と衛星システム側で独立して管理されることが多い。このため、それぞれの取付点に、インタフェース座標系を設定して、そこから、姿勢センサ（姿勢決定基準）座標系やミッション機器（ペイロード）座標系へのアライメントが管理されることも多い。

表 3.1 一般座標系の定義

名称	定義	備考
慣性座標系	軸方向を慣性空間に固定した座標系。X 軸を Epoch の真春分点方向、Z 軸を Epoch の真赤道面に垂直で北極方向を正とする方向、Y 軸をこれらに垂直。原点は一般に地球中心。このうち、J2000.0 慣性座標系は、Epoch を力学時 2000 年 1 月 1 日 12 時に取る。TOD 慣性座標系は、J2000.0 慣性座標系から、地球の歳差、章動を考慮した現時点における慣性座標系。擬似 TOD 座標系は、GPS 受信機の出力を定義する簡易的 TOD 座標系で、WGS84 座標系から地球自転補正 UTC だけ座標変換したもの	擬似 TOD 座標系から TOD 座標系への変換のためには、地球の極運動の補正が必要
軌道基準座標系	昇交点での軌道座標系に一致。原点は昇交点	
軌道座標系	衛星の軌道運動とともに回転する座標系。原点は真の衛星軌道における衛星質量中心、Z 軸は地球中心方向、Y 軸は軌道面ベクトルと逆方向、X 軸はこれらに直交	
地球固定座標系	地球に固定され、地球の回転運動とともに回転する座標系。原点は地球中心、X 軸は地球回転パラメータ計算のために国際時報局により定義されている X 軸方向、Z 軸は国際時報局が地球回転パラメータを計算するために基準とする Z 軸である慣用自転軸に並行	左記は WGS84 地球固定座標系の定義。他に、ITRF 地球固定座標系などがある
地球楕円体	地球のジオイドの形を近似した回転楕円体で、地球の形を代表するものとして使用。中心は地球の重心に、短軸は自転軸に一致	WGS84 楕円体、GRS80 楕円体を用いることが多い

表 3.2 衛星座標系の定義

名称	定義	備考
モデル基準軌道座標系	軌道座標系を規定する衛星軌道が、真の衛星軌道ではなく、軌道モデルにより計算で求められる軌道座標系。原点は軌道モデルにより算出される衛星軌道推定値における衛星質量中心、Z 軸は軌道モデルにより求められる地球中心方向、Y 軸は軌道モデルにより求められる軌道面ベクトルと逆方向、X 軸はこれらに直交	通常、衛星に搭載した計算機により計算される
センサ基準軌道座標系	軌道座標系を規定する衛星軌道ないしは相対的地球中心方向が、真の衛星軌道ではなく、搭載センサの計測値より求められる軌道座標系。原点は計測値より推定される衛星質量中心、Z 軸は計測値より推定される地球中心方向、Y 軸は計測値より推定される軌道面ベクトルと逆方向、X 軸はこれらに直交	搭載センサには、地球センサや GPS 受信機などがある
制御基準座標系	姿勢制御・指向制御の制御目標として、衛星内で算出・設定される座標系	制御目標や使用する姿勢センサによって制御基準軌道座標系や制御基準慣性座標系などがある
センサ基準座標系	姿勢センサやミッション機器 (ペイロード) の取り付けられた指向方向を代表するものとして、地上でアライメント測定で決定される座標系。原点はキューブミラー、X 軸、Y 軸、Z 軸は、それぞれキューブミラー測定結果で定義される衛星 X 軸方向、衛星 Y 軸方向、衛星 Z 軸方向	
姿勢決定座標系	衛星の姿勢を規定し、姿勢決定がなされる座標系。原点は衛星重心で、X 軸、Y 軸、Z 軸は、それぞれ軌道上で決定される衛星 X 軸、衛星 Y 軸、衛星 Z 軸	一般に軌道上で初期運用後に規定される
衛星座標系	衛星本体に固定された座標系。原点は衛星重心、X 軸、Y 軸、Z 軸は、それぞれ、姿勢センサ基準座標系の各軸に平行	
衛星固定座標系	衛星本体に固定された座標系。原点は衛星分離面の中心線と分離面の公転、X 軸、Y 軸、Z 軸は、設計時に規定される機械的 X 軸、機械的 Y 軸、機械的 Z 軸	

表 3.3 サブシステム座標系の定義

名称	定義	備考
センサ座標系	姿勢センサやミッション機器（ペイロード）の指向方向を表すものとして、軌道上で使用される座標系	
センサ固定座標系	センサ単体に固定された座標系	
センサキューブ座標系	センサのキューブミラーを表す座標系。センサ光学基準座標系と同じ	
センサ光軸座標系	光学センサの場合の光軸を表す座標系。一般にセンサの指向方向を表す	
センサ CCD 座標系	CCD を持つ光学センサにおいて、CCD 面上に規定される座標系	
センサ／アンテナ機械座標系	センサ／アンテナの機械的取付を表す座標系。原点はセンサ／アンテナの機械的インタフェース点（取付点）、X 軸、Y 軸、Z 軸は、衛星固定座標系の各軸に平行	
センサ／アンテナ電気座標系	センサ／アンテナの電気的機能・性能を表す座標系	センサであれば光軸座標系、アンテナであれば原点をアンテナ面中心、1 軸をアンテナボアサイトに向けた座標系とすることが多い

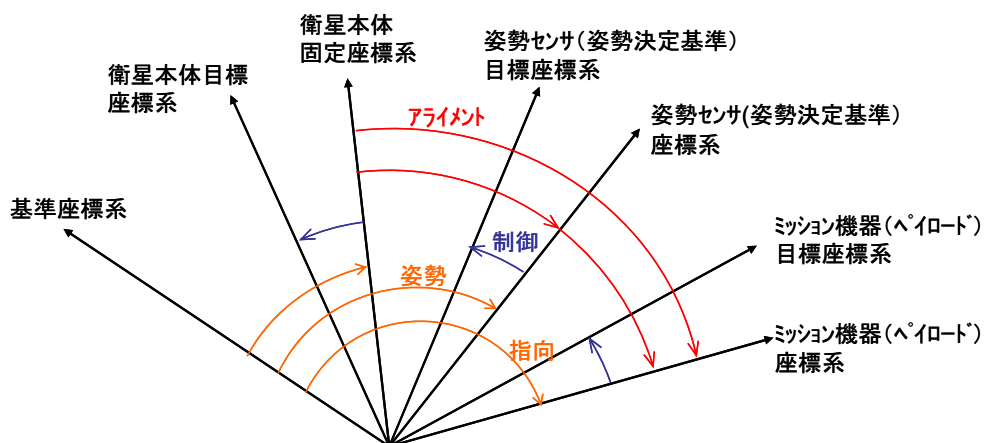


図 3.1 主要座標系間の関係（指向、姿勢、アライメントの概念と決定、制御）

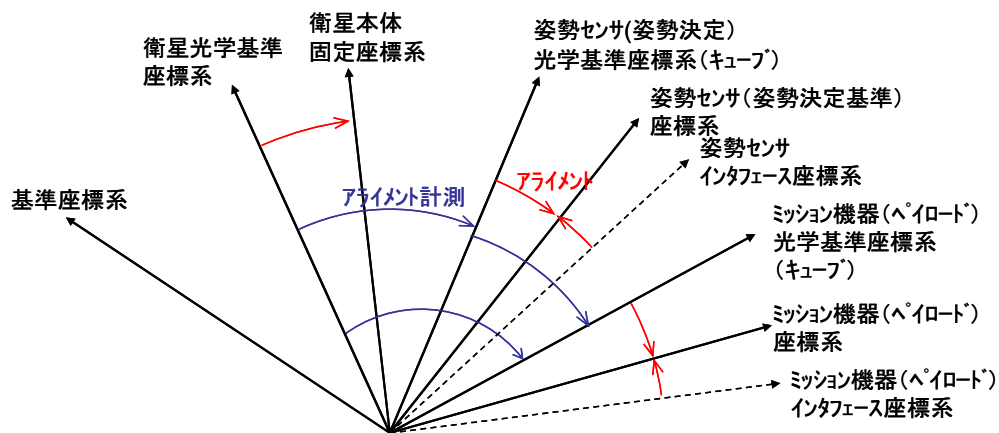


図 3.2 主要座標系間の関係 (アライメントの計測と制御)

3.2 時系

本節では、指向管理で使用する時系について概説する。指向管理で関連する時系は、大きく、一般時系、衛星時刻、サブシステム時刻に分けられる。以下、それぞれについて、記述する。

1) 一般時系

代表的な一般時系には、以下のような時系がある。それぞれの定義を、表 3.4 に示す。詳細は、JERG-2-100-HB101 標準座標系・時系利用マニュアルを参照されたい。

- ・ GPS 時刻
- ・ UTC 時刻
- ・ UTC-TAI

2) 衛星時刻

- ・ 衛星基準時刻

3) サブシステム時刻

- ・ サブシステム固有時刻
- ・ 時刻付け

表 3.4 時系の定義

名称	定義	備考
UTC 時刻	協定世界時 (UTC) による時刻。地球の自転の天文学的観測により決められる世界時に対し、地球の極運動や自転速度の変動による不規則性を補正し、さらに原子時計の様な時間の進みに合わせた恒星時系の一つ。現在日常的に使われている時系	
UTC-TAI	UTC は、国際原子時 (TAI) との間に整数秒のオフセットがある。2012 年 7 月 1 日時点で、UTC-TAI=-35sec	
GPS 時刻	GPS が使用している専用の時系で、1980 年 1 月 6 日 0 時 UTC を起点とする原子時系の一つ。GPS 時刻では、UTC のような閏病調整はされない。2012 年 7 月 1 日の修正後で、GPS 時刻は UTC から 16 秒進んでいる。TAI からは 19 秒遅れている	
衛星基準時刻	衛星内で基準として使われる時刻。UTC 時刻か、GPS 時刻が使われ、テレメトリ・トラッキング・コマンド系 (TT&C) の計算機が管理することが多い	GPS 時刻が使われる場合は、GPS 受信機が時刻の源泉を TT&C に提供する
サブシステム固有時刻	固有の計算機を持ち、時刻情報が意味を持つサブシステムでは、サブシステム固有の時刻が存在する。サブシステム時刻は、衛星基準時刻にスレーブされ同期される場合、差だけを時刻付けにより管理される場合、完全な非同期で差も管理されない場合がある	

3.3 統計的概念

要求仕様の設定や評価の際には、その統計的性質について注意すべき事項がある。以下にそれらのうち、代表的なものについて挙げる。

- 1σ 、 3σ : 標準偏差 (分散の平方根)、標準偏差の 3 倍。分布を仮定しない限り、サンプル (誤差) の割合 (%) についての情報を示していない
- RMS : Root Mean Square。分散同様、単なるデータの 1 評価方法。しかし、 1σ 、 3σ と比較して分布に関して、誤解のない指標。分布を仮定しない限り、サンプル (誤差) の割合 (%) についての情報を示していない
- 我々が扱う世界は、多くの場合、正規分布には従っていない。このため、分散や RMS は、必ずしも分布・割合 (%) について正確な結果を伝えてはくれない。しかし、正規分布や他の分布により近似すれば、上記の標準偏差や RMS は、誤差の分布・割合についてある程度の指標にはなる。このため、標準偏差や RMS が暗黙のうちに誤差の分布・割合の期待を反映していることがあるので注意が必要である。

- ・誤差の集計の際の注意事項： 一般的ルール（厳密には統計的によく考えて適用する必要がある）は以下の通り
 - ・独立した確率的事象： RSS (Root Sum Square)
 - ・相関のある確率的事象： LS (Linear Sum)
 - ・確定的事象： 状況により LS

4. ミッション要求

4.1 リアルタイム要求とオフライン要求

ミッション要求には、宇宙機のオンボードで要求されるリアルタイム要求と、地上処理等の後に実現すればよいオフライン要求がある

4.2 地球観測ミッション

周回軌道上から地球を観測するミッションは、可視光、赤外線、マイクロ波などの領域で、光学系やアンテナを使って地表の目標を観測する。センサとしては、光学系やアンテナを使って受動的に観測する放射計や、アンテナを使って能動的に（つまり、目標に電波を放射して）観測する合成開口レーダ（SAR）など、また、光学系を使って能動的に（つまり、目標にレーザを照射して）観測する LIDAR など、がある。地球観測ミッションにおいて、指向に関するミッション要求には、以下のような要求がある。なお、月や惑星を、それぞれの周回軌道上から観測するミッションでも同様の要求があるが、本標準では表記を簡略にするため、これらを含めて地球観測ミッションと呼ぶ。

1) 画素地表位置決定と画素地表位置決定精度

画素地表位置決定（地表位置決定）は、撮像した画像の各画素が地表のどの位置に対応しているか推定することである。画像の幾何補正に必要となる。画素地表位置決定では、撮像タイミング毎の観測センサの視線ベクトルの起点からの向きが地球回転楕円体と交差する交点の緯度・経度を推定する。一般に、撮像周期は、数百～数千 Hz 程度になる。実際に撮像した点の真の緯度・経度と、計算により求めた緯度・経度との絶対的な差が画素地表位置決定精度であり、幾何補正では、画素地表位置決定により推定した緯度・経度から画素を地図上の推定位置に配置する。要求例を以下に示す。

- ・画素地表位置決定精度要求例： ± 3 画素以内 (3σ)

2) 幾何歪（シーン、画素間）と画素地表位置安定度

幾何歪とは、撮像し幾何補正した 1 枚 1 枚の画像が地図と比較してシーン内で相対的にどれだけ歪んでいるかである。この際、画像全体の平均位置の絶対的なズレは、幾何歪では問題としない。プッシュブルーム方式リニア CCD センサの場合、光学系の歪の他、1 シーンを撮像する間の指向方向の揺れや、衛星軌道の揺れ、が寄与する。幾何歪は、概ね、画素地表位置安定度ないしは相対画素地表位置決定精度と同等になる。要求例を以下に示す（図 4.1 参照）。

- ・幾何歪要求例： 35km 四方のシーン内で相対的に 1 画素 p-p 以内 (3σ)

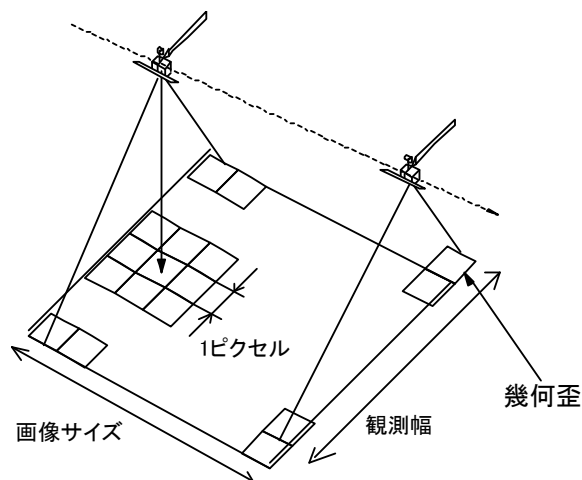


図 4.1 幾何歪の概念

3) MTF (画像のボケ (手ブレ)) と画素地表位置安定度

図 4.2 に示すように、1 画素 (1 ライン) を撮像する非常に短い時間中に指向方向が揺れると画像がぼやけて、手ブレのような状態になる。センサ側の光学性能と合わせて、画像に対する MTF (Modulation Transfer Function) の劣化許容量として規定される。従って、1 画素を撮像する間の指向方向の揺れが、MTF に寄与する。要求例を以下に示す。

- ・MTF 劣化許容量要求例： 指向変動による MTF 劣化許容値： 0.8 以上@ナイキスト周波数

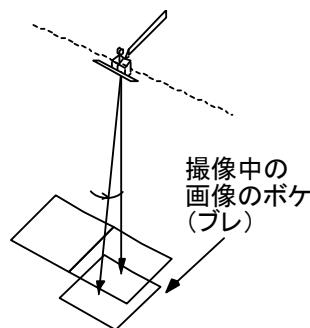


図 4.2 MTF の概念

4) 画像の重なりと画素地表位置制御精度、RSP (Reference System for Planning) 軌道保持精度^{注)}

地球観測衛星では、図 4.3 に示すように、地球上のどの地点の上空でも (極域を除く)、隣接軌道からの観測幅の重なりを確保し、画像に抜けがないようにする。最も条件の厳しい赤道上のクロストラック方向の観測幅の重なりで定義する。要求例を以下に示す。

- ・要求例： 赤道上クロストラック方向の隣接軌道間の観測幅の重なり 1km 以上 (3σ)

注) RSP: Reference System for Planning。観測計画の立案のため、軌道の準回帰性を利用して地表面に固定して設定された衛星直下点軌跡群

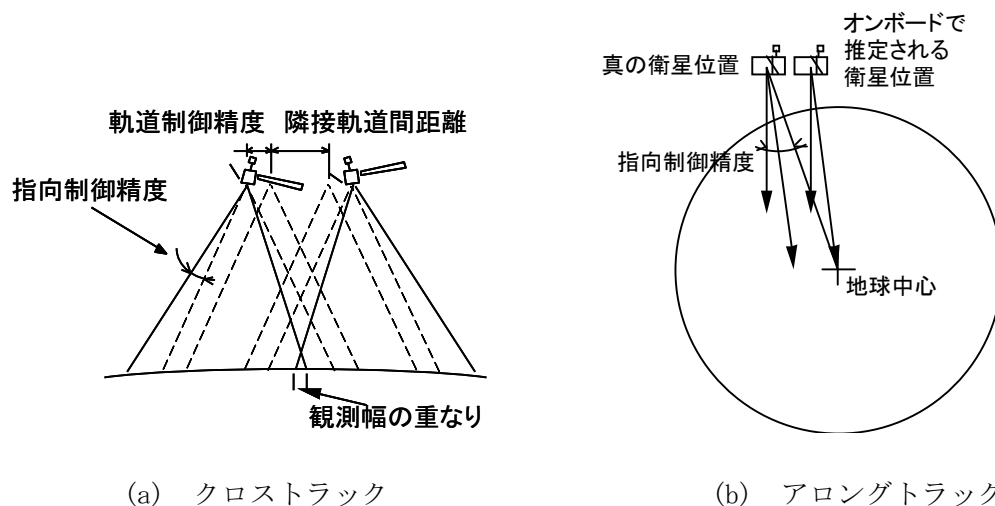


図 4.3 画像の位置、重なる概念

5) 標高抽出精度

光学センサのステレオ視画像や、干渉 SAR 画像により、数値地表モデル (DSM: Digital Surface Model) を作成する場合、DSM の各メッシュの高さ方向の精度が重要な性能要求となる。標高抽出精度は、各地点の標高方向の真値と推定値の差で定義される。要求例を以下に示す。

- ・要求例： 標高抽出精度 5m 以下 (1σ)

6) SAR 位置決定精度

SAR では、衛星位置に対する要求が厳しい。SAR の画像処理を容易にするために、高い位置決定精度が求められる。また、7) で後述するように、SAR インターフェロメトリを可能にするために、衛星位置に高い再現性が求められる。

7) SAR インターフェロメトリ軌道保持精度

SAR インターフェロメトリを実現するためには、同一 RSP パスの地球固定座標系に対する軌道軌跡が、同一直下点上では (同一緯度上では)、一定の範囲内に入ることが必要となる。要求例を以下に示す。

- ・要求例 1： 地球固定座標系に固定された基準軌道から高度差 $\pm 500\text{m}$ 以内、クロストラック方向誤差 $\pm 500\text{m}$ 以内の回廊 (Corridor) に入ること (図 4.4 参照)
- ・要求例 2： 基準軌道から半径 500m 以内のチューブに入ること

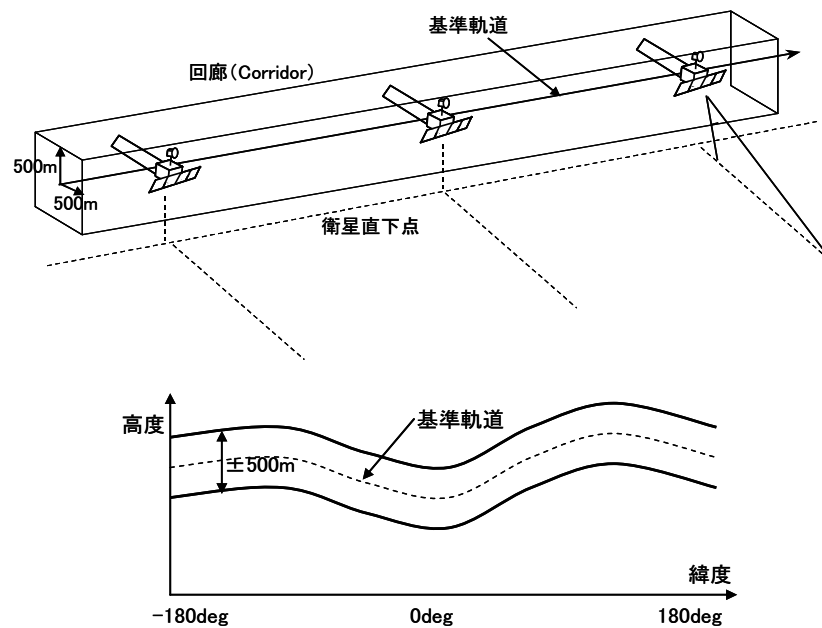


図 4.4 SAR インタフェロメトリ軌道保持精度の例 (要求例 1)

4.3 宇宙科学ミッション

ここで宇宙科学ミッションとは、宇宙科学観測を目的とした衛星ミッションを意味する。天文観測衛星や小惑星探査衛星などに代表される宇宙科学ミッションにおいて指向に関するミッション要求は、そのミッションの具体的な目的に応じて多岐にわたる。ここでは、これらの中で特に高い指向性能が求められる X 線天文衛星及び電波天文衛星について指向要求を示す。

4.3.1 X 線天文ミッション

X 線天文ミッションでは、観測星からの微弱な X 線を X 線望遠鏡により観測する。X 線を集光するには、金属板をリング状にした反射ミラー（ここでは、これを X 線レンズと称するが、ミッション側ではこれを望遠鏡と称している）で反射させることにより X 線の光路を曲げて焦点面上に配置された検出器に導く。この際、X 線の性質から大きな角度の光路変更ができないために望遠鏡の焦点距離が長くなる。例えば、ASTRO-H の場合には、光学ベンチを伸展させて 12m 程度の焦点距離となっている。

この X 線望遠鏡による観測システムに対して光軸と中心軸が図 4.5 のように定義される。ここで、中心軸は、検出器中心点と X 線レンズ中心点を結ぶ軸として定義される。X 線は、この軸に沿って集光され、検出器面上に結像する。光軸は、X 線レンズに固定された軸であり、X 線の集光効率が最大になる軸（方向）として定義される。光軸方向に対して集光感度が影響するのは、X 線光路変更のために幾重にも重ねられた薄い金属板の隙間が小さいためにここをすり抜ける X 線の許容角度範囲が極めて小さくなることによる。

X 線観測においては、下記に示す 5 つの指向に関連した観測要求が存在する。

1) 像中心位置制御精度要求

観測対象の星像位置が、検出器視野内の規定された領域内に位置するように制御するための条件である。単に視野内に存在するだけでなく、観測性能を確保するための条件として設定される。

2) 像位置安定度要求

撮像時間を有するセンサによって撮像する際に、撮像時間内において像が許容値以上に移動しないようにする必要がある。このために撮像時間内に検出器面上の像位置移動量を規定する。

3) 絶対指向決定要求

観測対象のマップを作成する際に対象星の天球上の位置を決定する必要がある。この要求条件は、観測時において検出器が天球上のどの方向からのX線を捉えていたかを規定するための精度要求である。一般にこの要求条件は、観測装置毎に設定されるのではなく衛星内の観測機器を代表する観測軸に対して唯一設定される。

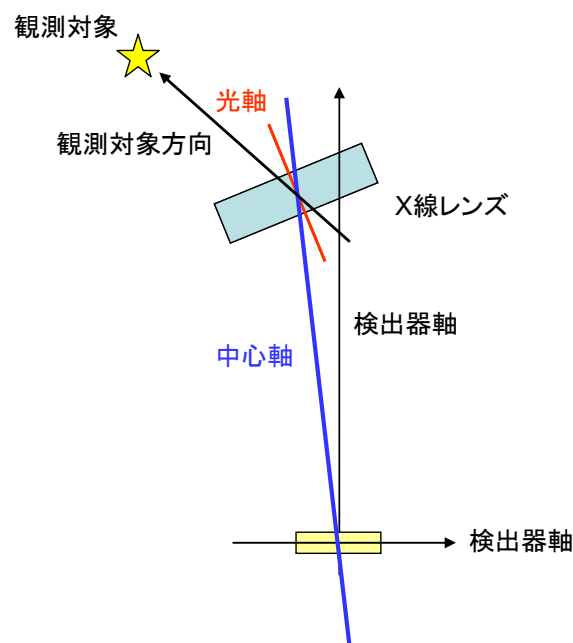


図 4.5 X線天文ミッションの軸の定義

4) 像再構成精度要求

1つの観測対象に対して複数回の観測データを地上の処理によって重ね合わせる際、複数回にわたる観測データの相対的な角度変位情報が必要になる。この精度を像再構成精度と定義する。この要求条件は、観測装置毎に設定される。

5) 検出強度確保要求

観測対象からの信号強度を確保するための条件である。通常の光学レンズと異なり、X線レンズを通過するX線強度は、観測対象方向と光軸のなす角度の正弦 (\sin) に比例して変化するため、観測対象方向と光軸とのずれが入射X線の受信感度に大きく影響する。この要求条件は、観測機器毎に設定される。

4.3.2 電波天文ミッション

電波天文衛星の場合、遠くの電波源から飛来する電磁波を大型アンテナで収集し観測を行う。

一方、衛星での観測だけでは、観測は完結せず、地上に点在する電波天文台での同時観測によって初めてインターフェロメトリ観測が成立する。ミッション上重要な要素は、電波望遠鏡（大型アンテナ）によって得られる目標星からの電波の収集効率（観測ゲイン）およびインターフェロメトリ解析を行うために必要なアンテナ位置（時刻を含む）精度である。この観測ゲインは、アンテナの理論性能である理想アンテナゲインを基準として、様々な損失が影響する。主な損失は、アンテナ自身の熱的・機械的変形に伴う受信ゲインの劣化やアンテナ表面の電磁気的特性に起因する損失（経年劣化を含む）などがあるが、アンテナの指向誤差に起因する劣化（ポインティング損）も主要な要因である。

ASTRO-G 衛星では、観測上の必要性から観測対象星と 3deg 程度の離れたバックグラウンドの双方を一定周期で繰り返し観測することが求められた。このために姿勢系には、これら 2 つの目標を交互に指向する動作（スイッチングマヌーバ）が求められていた。電波観測は、スイッチングマヌーバ直後に開始されるので、ポインティング損は、マヌーバ直後の姿勢変動やアンテナ揺らぎに起因する変形の影響も考慮して規定された。

1) アンテナ位置決定精度要求

VLBI 観測における干渉解析を行う上で目標星からの電波観測時刻に対応するアンテナ位置を精度よく知る必要がある。このため、以下の 2 つの要求に帰着する。

- ・観測時刻精度要求
- ・アンテナ（衛星）位置精度要求

2) 観測ゲイン要求

観測対象からの受信電波ゲインに対する要求である。電波望遠鏡の主構成要素であるアンテナの理想アンテナとしての利得から下記の各損失要因に対する要求に分類できる。

- ・給電ロス
- ・BOL 時の鏡面エラー（理想鏡面からのズレ）による損失
- ・アンテナ単体熱歪み、衛星構体熱歪みによる損失
- ・アンテナ表面状態の劣化に起因する損失
- ・ポインティング損失

4.4 通信・放送ミッション

通信・放送ミッションからの最上位の要求は、宇宙機を介した通信回線の稼働率（Link Availability）である。通信回線稼働率は、その通信回線がある規定時間内で正常に（すなわち、要求される通信品質を満足する状態で）接続されている時間の割合（時間率）として定義される。回線稼働率は、回線を構成する全ての要素の稼働率に関係し、また通信路の構成（1 対 1 通信か通信網か、回線路の冗長性の有無、等）にも依存する。

衛星を使用する回線の場合、地上-宇宙間について、一方向の回線稼働率か双方向の回線稼働率のいずれの要求かという問題が生じるが、通常は上り回線（Uplink）、下り回線（Downlink）それぞれに対して、一方向の回線稼働率を考える。なぜならば、双方向の回線稼働率とすると、発信側の地上局（複数）と送信側の地上局（複数）の組み合わせにより、極めて多数の組み合わせケースが生じて、一元的な取扱いが困難になるためである。衛星間通信のように、複数の宇宙機間の衛星通信を考える場合にも、上り回線と下り回線が存在するので、地上-宇宙間の場合に準じて、

上りまたは下りの一方向の回線稼働率を考える。一方、放送ミッションの場合は、基本的に、下り回線に対する回線稼働率がミッション要求となる。通信・放送ミッションにおける指向に関する代表的なミッション要求を以下に記す。

1) 通信回線稼働率 (Link Availability)

通信回線（上り。または下り）が、ある規定時間内で要求される通信品質を満足する状態で接続されている時間の割合（すなわち、時間率）

2) 通信品質

デジタル回線における伝送情報の符号誤り率で規定

3) 符号誤り率 (BER=Bit Error Rate)

符号の総数に対する、誤って受信した符号の比率

通信ミッション要求は、想定する通信回線の稼働率が規定時間に対して一定値以上であることが基本的な要求である。ここで、通信回線が稼働しているとは、単に回線が物理的に接続されているだけではなく、要求された通信品質を満たしている状態を指す。通信品質が要求を満たさないことは、最悪の場合、通信回線が遮断することを意味するためである。結局、通信ミッションでは、規定時間（通常は 1 分間）で通信回線稼働率が規定値以上（通常は 99.7%以上、99.99%を使用することもある）であることが基本的な要求となる。

なお、上記要求は、基本的にサービスエリア内で想定する全ての地上局（固定、移動）に対する要求である。しかし、地上局を想定しないで、サービスエリア全体に対する規定とする場合には、上記要求をサービスエリア内の任意の点に対する要求とする規定方法以外に、サービスエリアの割合（面積率）とサービスエリア内の各点の時間率の割合の積（"%time-%area"）で規定する規定方法がある。後者の規定法は、サービスエリア周辺では、一般に回線稼働率が中心部より悪くなるが、サービスエリアの中心部の方が回線のトラフィックが多い点を考慮したものであり、点对点の回線ではなく点对面の回線になるという衛星回線特有の性質を反映した規定と言える。

この基準は地上の通信回線に対して適用される通信品質の要求に準ずる、国際基準 (ITU-T 勧告)^注として定められているものである。このタイプのミッション要求が課せられる衛星には、通信衛星の他、放送衛星、データ中継衛星等がある。

(注) ITU-T=International Telecommunication Union - Telecommunication
Standardization Sector, 国際電気通信連合 電気通信標準化部門

5. 指向要求定義と体系

5.1 基本的な考え方

指向要求は、宇宙機の指向、姿勢、アライメント、位置、時刻を対象とした要求である。これら対象とする物理的特性に対して、制御精度、安定度、決定精度などの精度要求が組み合わせられて、指向要求となる。特に、以下が、代表的な指向要求である。

- ・指向制御精度、姿勢制御精度、位置制御精度
- ・指向安定度、姿勢安定度、位置安定度
- ・指向決定精度（絶対指向決定精度）、姿勢決定精度（絶対姿勢決定精度）、位置決定精度（絶対位置決定精度）
- ・相対指向決定精度、相対姿勢決定精度、相対位置決定精度
- ・アライメント制御精度（バイアス分、変動分）
- ・アライメント決定精度（バイアス分、変動分）
- ・時刻（制御）精度（バイアス分、ジッタ成分）
- ・時刻計測精度（バイアス分、ジッタ成分）
- ・指向精度、姿勢精度、位置精度、アライメント精度

このうち、指向精度、姿勢精度、位置精度は、定義が曖昧で、人によって意味するものが違うため、要求として使用することは推奨しない。使用する場合は、ここに挙げた様々な指向要求の包括的概念としてのみ用いるべきである。

5.2 指向要求定義において注意すること

指向要求を定義する際には、以下を明確化することが必要である。

- ・物理的定義： 座標系、時間軸定義、3軸毎／距離誤差
- ・短期的・個々の瞬間のデータの確定的定義： \pm 、p-p (peak-to-peak)、0-p (zero-to-peak)、最悪値 (worst case value)
- ・長期的な多数のデータの統計的性質： 1σ 、 3σ 、RMS、95%誤差、90%誤差、CE90、最悪値 (worst case value)、統計的分布（正規分布、uniform distribution、レイリー分布、等）
- ・適用時間フレーム： 絶対／相対
- ・適用周波数帯： 全周波数帯（連続系）、0～特定周波数迄、サンプリング周期において
- ・規定と評価： 規定している統計的性質は、地上／軌道上評価では得られないかも知れない
- ・適用時間帯、適用モードの明確化
- ・指向要求項目間の関係、内訳： 指向要求ツリーの明確化
- ・誤差と精度（要説明）

以下に、それぞれを簡単に説明する。

- 1) 物理的定義： 指向要求が規定される座標系を定義する必要がある。また、要求が連続的時間に対するものか、離散時間に対するものか、一定の時間・期間に対するものか、といった時間軸における定義を明確にする必要がある。要求値が、3軸の各軸に対して求められているものか、それとも、ベクトルの大きさ（距離など）に対するものか、についても明確にしなければならない。
- 2) 短期的・個々の瞬間のデータの確定的定義： ある瞬間の確定的な1サンプルの指向要求の

精度・誤差定義がどのように規定されるかを明確にする必要がある。一般に、 \pm 、p-p (peak-to-peak)、0-p (zero-to-peak)、最悪値 (worst case value) などが使われる。 \pm は、望ましい値からの差 (誤差量) に対して使う。p-p (peak-to-peak) は、瞬間瞬間に規定される一定の時間枠 (時間フレーム) の間の [最大値-最小値] である。0-p (zero-to-peak) は、同様に規定される時間枠 (時間フレーム) の間の [(最大値-最小値)/2] である。最悪値 (worst case value) は、一定の時間枠 (時間フレーム) の間の望ましい値からの差の絶対値の最大値である。

3) 長期的な多数のデータの統計的性質： 上記のように定義された各瞬間毎のサンプルの集合が長期的に (一定の期間で) どのような統計的 (あるいは確定的) 性質を持つかを規定する必要がある。代表的な性質には、標準偏差 (1σ)、標準偏差 $\times 3$ (3σ)、RMS (Root Mean Square) がある。また、95%以上のサンプル (時間) が規定した誤差以内に入っていることを求める 95%誤差や、90%以上のサンプルを求める 90%誤差がある。加えて、統計的ではなく確定的な性質になるが、全期間での最大誤差/最小誤差が一定値以内であることを求める最悪値 (Worst Case Value) がある。ここまでの統計的性質は、サンプルの集団の統計的分布を課程していない。さらに、正規分布、Uniform Distribution、等といった統計的分布を仮定することで、要求が全体の%のサンプルで満たされるかの期待を表すことが出来る。

4) 適用時間フレーム： 指向要求が、どの時間においても満たされるべき絶対的なものか、一定時間の間の相対的な変動を規定したものか、を示さなければならない。

5) 適用周波数帯： 指向要求が、全周波数帯の連続的な物理量に適用されるものなのか、それとも、物理量の 0Hz~特定周波数迄の周波数成分に適用されるものなのか、あるいは、サンプリング周期のタイミングのサンプルにのみ適用されるものなのか、を明らかにする必要がある。

6) 規定と評価： 規定している統計的性質は、場合によっては、地上の評価、さらには、軌道上の評価でも検証・確認できないかも知れないことに留意しなければならない。

7) 適用時間帯、適用モードの明確化： 指向要求が、全ての時間帯の全ての運用モード・衛星モードに適用されるのか、それとも、一定の時間帯や軌道周回の部分、あるいは一定の運用モード・衛星モードにのみ適用されるものなのか、を明確にする必要がある。

8) 指向要求項目間の関係、内訳： 指向要求項目間の関係や、指向要求がどのような構成要素から成るかの内訳を明確にし、指向要求ツリー・配分を定義しなければならない。

9) 誤差と精度： 「誤差」と「精度」を安易に使い回さず、明確な意図に基いて使い分ける必要がある。

以下、それぞれの指向要求を定義する。

5.3 指向制御精度、姿勢制御精度、位置制御精度

指向制御精度、姿勢制御精度、位置制御精度などの制御精度は、真値 (指向角、姿勢角、位置を規定する座標系の真の状態) と目標値 (その座標系に対して実現したい本当の状態) との差である。この中には、与えられる (生成する) 目標値が持つ誤差、すなはち、制御に使用する目標値と実現したい本当の状態との差を含む。制御精度は、全周波数帯域に対して規定される連続な物理量に対する指標であり、制御系が担当する帯域のみに限定した精度ではない。また、制御精度は、一定の時間枠に対して規定される量ではなく、絶対精度である。指向制御精度、姿勢制御精度、位置制御精度の定義を、模式的に図 5.1 に示す。なお、軌道制御精度は、位置に加えて速度も含めた 6 自由度 (位置・速度ベクトルで表現されることもあれば軌道要素で表現されることもある) の真値と目標値の差である。

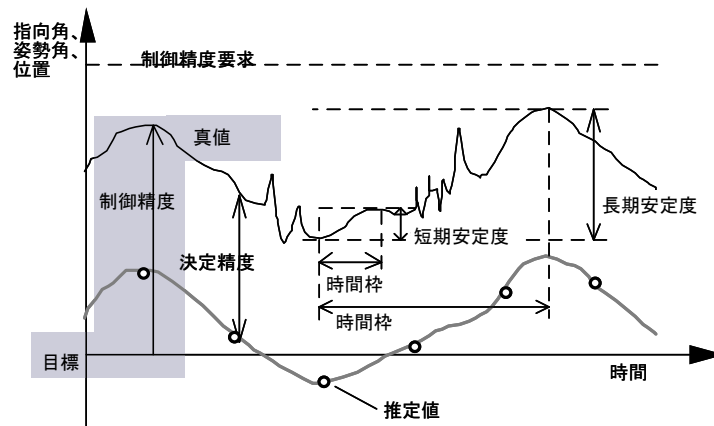


図 5.1 指向制御精度、姿勢制御精度、位置制御精度の定義

1) 規定座標系例

指向制御精度、姿勢制御精度、位置制御精度を規定する座標系の例を以下に示す。

- ・ 指向： 光学センサ光軸座標系
- ・ 姿勢： 姿勢決定基準座標系、光学姿勢センサ光軸座標系
- ・ 位置： GPSR アンテナ衛星固定座標系、衛星質量中心衛星固定座標系

2) 姿勢制御精度の例

ここでは、指向制御精度、姿勢制御精度、位置制御精度のうち、姿勢制御精度を例として取り上げ、その定義を示す。姿勢制御精度は、時間的に連続な瞬時瞬時の時刻において、衛星の真の位置により規定される真の姿勢制御基準座標系（姿勢制御目標座標系）に対する、その時刻の真の衛星座標系の回転（誤差角）である。目標座標系としては、地球中心指向軌道座標系や、地表面（楕円体面）鉛直指向座標系、恒星指向慣性座標系などが選択肢としてあり、その選択はミッションに依存する。しかし、衛星の真の位置や真の恒星方向はオンボードでは知りえないため、姿勢制御系に与えられる、あるいは姿勢制御系が生成する姿勢制御基準座標系は必ず誤差を持つ。なお、ヨーステアリング時や、ロール・ピッチマヌーバなどの姿勢マヌーバ時には、姿勢制御誤差は、姿勢制御基準座標系を理想的なマヌーバプロファイル分だけ回転させた姿勢制御基準座標系と真の衛星固定座標系との誤差角となる

姿勢制御精度は、目標値からの正負（±）の差で表され、制御系のサンプリング周期や閉ループ周波数帯域とは関係なく、時間領域では時間的に連続な全ての瞬間に、周波数領域では全周波数帯に、適用される。また、一定の長期間のデータ集団に対して、 3σ や最悪値が、統計的規定として典型的に使用される。

3) 姿勢制御精度要求の例

姿勢制御精度要求の規定例を以下に示す。指向制御精度要求も同様に規定することが可能である。

- ・ 姿勢制御精度：

定常制御モード高精度姿勢決定系使用制御時

ロール、ピッチ、ヨー： 各軸 $0.0 \pm 0.095 \text{deg}$ 以内 (3σ)

これらは衛星の真の位置により規定される地球中心方向と軌道面で決定される軌道座標系に対する衛星座標系の誤差角であり、軌道座標系と衛星の真の位置の違いによる誤差を含む。

ヨーステアリング時には、軌道座標系にヨーステアリング角を加えた座標系からの誤差角である。本要求は全周波数帯成分を含む。

- ・注： 定常制御モード高精度姿勢決定系使用制御時の全時間帯に適用される仕様である
- ・注： 使用する座標系は別途規定する

4) 軌道制御精度要求の例

軌道制御精度要求の規定例を以下に示す。

例 1：

- ・軌道制御精度： 降交点通過時クロストラック方向に基準軌道から±0.5km 以内（最悪値）

例 2：

- ・軌道制御精度： 全ての緯度引数において高度方向に基準軌道から±0.5km 以内（最悪値）
- ・軌道制御精度： 全ての緯度引数において基準軌道から、高度方向に±0.5km、クロストラック方向に±0.5km、アロングトラック方向に±5km のコントロールボックス内（最悪値）

5) 指向制御精度・姿勢制御精度の要因と構成

指向制御精度、姿勢制御精度の要因と構成を図 5.2 に示す。指向制御精度は、姿勢制御精度とアライメント制御精度から成る。指向制御精度の構成要素には、高周波ジッタによる指向変動もあるが、これは姿勢センサ（姿勢決定基準）座標系とミッション機器（ペイロード）座標系との間の差の変動成分であるので、アライメント制御精度に含めて考える。また、アンテナやミラーの向きを動かすことでミッション機器の指向方向を変更することが出来る場合、これらにミッション機器内指向制御精度が加わる。指向制御精度を構成する要因のうち、姿勢制御精度は、制御基準座標系誤差（目標姿勢の生成誤差）と制御基準に対する制御誤差から成り、制御基準に対する制御誤差は、姿勢決定誤差と制御残差から成る。制御残差は、制御帯域内の制御残差と制御帯域外のより高周波の制御残差から成る。一方、アライメント制御精度は、姿勢基準とミッション機器基準座標系間のアライメント精度とミッション機器内の指向座標系までのアライメント精度から成る。また、それぞれのアライメント制御精度は、バイアス成分と変動成分から成る。但し、望遠鏡衛星のように、ミッション機器が衛星本体を構成している場合などは、姿勢基準－ミッション機器間 I/F アライメントとミッション機器内アライメントは区別できない場合もある。ミッション機器内指向制御精度は、それぞれのミッション機器の動作メカニズムにより構成が異なる。観測用・通信用のアンテナや観測用のミラー・光学系を機械的に駆動させる場合、観測用・通信用のアンテナを電子的に指向させる場合、などがある。また、前述したミッション機器内のアライメント制御精度は、ミッション機器内指向制御精度が定義される場合、この中の構成要素として定義されるべきである。

今日では、従来の地球センサベース姿勢決定系や太陽センサベース姿勢決定系と比較して、恒星センサベース姿勢決定系により姿勢決定精度が向上した結果、指向制御精度の主要誤差要因は、制御基準座標系誤差、制御残差、アライメント制御誤差がより重要になってきた。但し、地球指向低軌道衛星では、制御基準誤差は GPS オンボード航法値による制御基準生成で低減することが可能である。将来的には、姿勢基準－ミッション機器間アライメントバイアス、ミッション機器内アライメントバイアスが主要誤差要因として残るが、この内の低周波成分は軌道上校正によりある程度補正し、低減することが可能である。

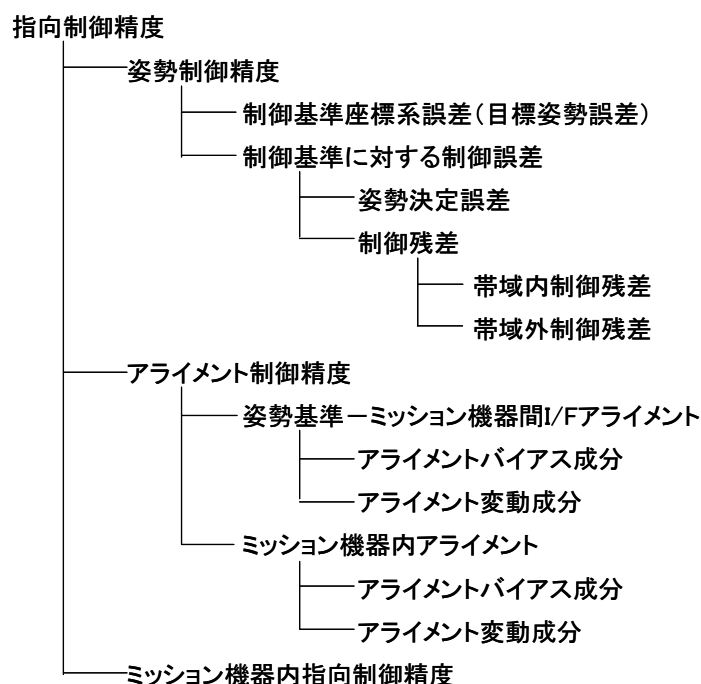


図 5.2 指向制御精度・姿勢制御精度・アライメント制御精度の要因と構成

5.4 指向安定度、姿勢安定度、位置安定度

指向安定度、姿勢安定度、位置安定度などの安定度は、規定した時間枠（時間フレーム）の間の、真値（指向角、姿勢角、位置を規定する座標系の真の状態）と目標値（その座標系に対して実現したい本当の状態）との差（＝制御誤差）の変動量であり、一般にその時間枠（時間フレーム）の間の変動量の最大値で規定する。この際、与えられる（生成する）目標値が持つ誤差、すなわち、制御に使用する目標値と実現したい本当の状態との差の変動量を含む。安定度は、全周波数帯域に対して規定される連続な物理量に対する指標であり、制御系が担当する帯域のみに限定した精度ではない。また、安定度は、相対精度であるが、角速度、速度などのレートとは異なる物理量である。なお、ミッションにおいて、複数のミッション機器に対応するため、あるいは、幾何歪や MTF といった異なるミッション要求に対応するため、複数の時間枠（時間フレーム）に対する安定度が要求されている場合、これらを区別するため、時間枠（時間フレーム）の相対的長さに応じて、長期安定度、短期安定度などと呼ぶ。指向安定度、姿勢安定度、位置安定度の定義を、模式的に図 5.3 に示す。

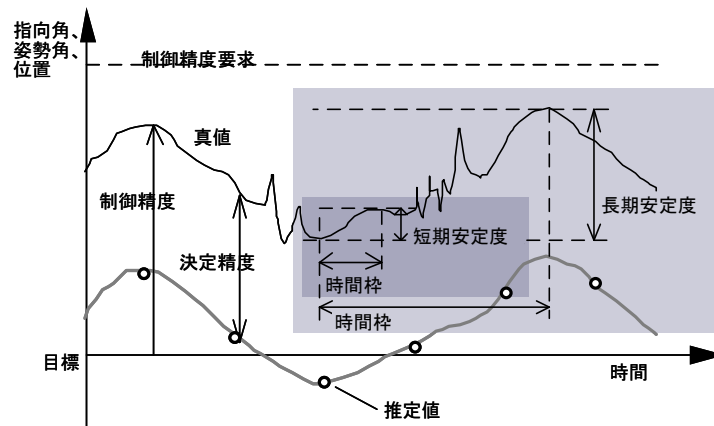


図 5.3 指向安定度、姿勢安定度、位置安定度の定義

1) 姿勢安定度の例

姿勢安定度は、時間的に連続な瞬時瞬時の時刻において、決められた時間フレームの間に姿勢制御誤差が変動した量の最大値である。最大値とは、時間フレームの間の、最大姿勢制御誤差－最小姿勢制御誤差、すなわち、Peak-to-Peak の値のことであり、このため安定度は正の値となる。ヨーステアリング、ロール・ピッチマヌーバを始めとした姿勢マヌーバの寄与分は差し引くためこのプロファイルの安定度は影響しないが、マヌーバすることで（トルクを印加することで）、一般に安定度は劣化する。また、姿勢決定誤差の変動も姿勢制御誤差の変動につながり、姿勢安定度を劣化させる。安定度は、制御系のサンプリング周期や閉ループ周波数帯域とは関係なく、時間領域では時間的に連続な全ての瞬間に、周波数領域では全周波数帯に、適用される。期間データに対する要求精度の統計的出現頻度の要求として、 3σ や最悪値が典型的に使用される。

2) 姿勢安定度要求の例

姿勢安定度要求の例を以下に示す。指向安定度要求も同様に規定することが可能である。

・姿勢安定度：

定常制御モード高精度姿勢決定系使用制御時

長期安定度 ロール、ピッチ、ヨー： 各軸 1.9×10^{-4} deg/5sec (p-p) 以下 (3σ)

短期安定度 ロール、ヨー： 2.0×10^{-5} deg/0.37msec (p-p) 以下 (3σ)

ピッチ： 1.0×10^{-5} deg/0.37msec (p-p) 以下 (3σ)

衛星座標系の慣性座標系に対する姿勢変動のうち、地球中心指向のためのピッチレート成分、ヨーステアリングのためのヨーレート成分、及び地球中心指向とヨーステアリングを同時に行うために生じるロールレート成分を除外したものである。擾乱源に関しては、AOCs の内外いずれについてもその発生起源を問わず姿勢安定度要求の対象とする。但し、衛星日照開始、日陰開始から 7 分は適用除外とし、この間の姿勢安定度は別途定める。本要求は全周波数帯成分を含む。

・注： 定常制御モード高精度姿勢決定系使用制御時の全時間帯に適用される仕様である

・注： 使用する座標系は別途規定する

3) 指向安定度・姿勢安定度の要因と構成

指向安定度、姿勢安定度の要因と構成を図 5.4 に示す。指向安定度を規定する時間枠（フレーム）

はミッション機器の観測原理に由来する。典型的には、20分～数十秒～数百 μ 秒である。数十秒～数百 μ 秒程度の短時間であれば、熱歪によるアライメント変動はほとんど寄与しない。このため、一般に、衛星やミッション機器の構造の最低次モードより高い周波数の高周波擾乱がない場合は、

指向安定度 \approx 姿勢安定度

となる。しかし、時間フレームが10分、20分と長くなると、熱歪によるアライメント変動の寄与を無視できなくなる。また、前述したように、高周波擾乱がある場合は、指向と姿勢は一致しなくなり、安定度の値やプロファイルも異なるようになる。

指向安定度は、主に、姿勢安定度とアライメント変動からなり、姿勢安定度は、さらに、制御基準座標系誤差の変動と制御基準に対する制御誤差変動から成る。姿勢制御精度の場合と同様に、後者は、姿勢決定誤差変動と制御残差変動からなり、制御残差変動は、制御帯域内制御残差変動と制御帯域外制御残差変動から成る。一方、アライメント変動は、姿勢基準とミッション機器基準座標系との間のアライメント変動とミッション機器内のアライメント変動から成る。これらのアライメント変動は、熱歪などによる低周波の変動と擾乱による高周波の変動から構成される。

今日の恒星センサベース姿勢決定系では、姿勢決定誤差変動は小さく、姿勢決定誤差変動の姿勢安定度への寄与も相対的に小さい。また、環境外乱による帯域内制御残差変動の多くは周波数が低く、姿勢安定度に対する寄与は小さい。以上から、指向安定度の主要要因は帯域内外の内部擾乱による制御残差変動となる。

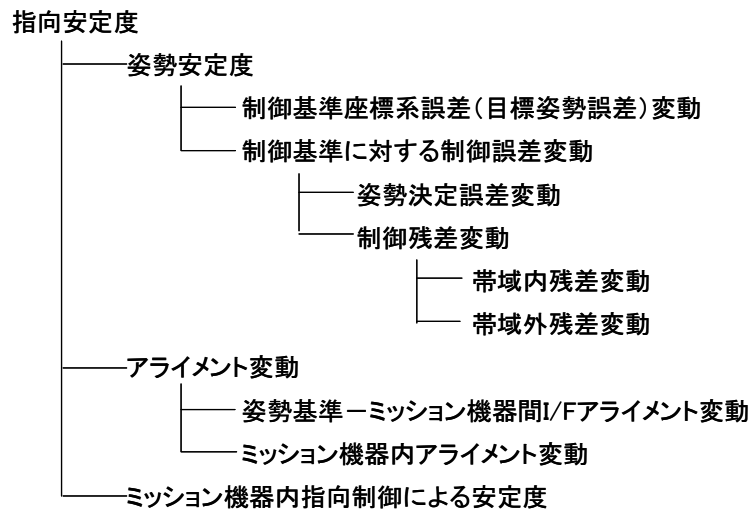


図 5.4 指向安定度・姿勢安定度・アライメント変動の要因と構成

5.5 指向決定精度、姿勢決定精度、位置決定精度

指向決定精度、姿勢決定精度、位置決定精度などの決定精度は、各推定時刻における、推定値（推定した状態）と真値（指向角、姿勢角、位置を規定する座標系の真の状態）との差である。推定値には、時刻タグがつけられており、この時刻計測精度の影響も含めて、決定精度となる。決定精度は、サンプリングタイミングのみに対して定義され、サンプリングタイミング間の挙動については規定していない。このため、サンプリング周波数（あるいはナイキスト周波数）までの帯域に対してしか有効ではない。さらに、推定フィルタを用いて決定する場合、その帯域の制約を受けた平滑化された情報となる。従って、サンプリングタイミング間及び有効帯域以上の領

域での瞬間瞬間の推定誤差は決定精度と安定度を合わせたものとなる。決定精度は、絶対精度であり、サンプリング周期より長い一定の時間の間の決定誤差の変動は相対決定精度として規定される。指向決定精度、姿勢決定精度、位置決定精度の定義を模式的に図 5.5 に示す。なお、軌道決定精度は、位置に加えて速度も含めた 6 自由度の推定値と真値との差である。

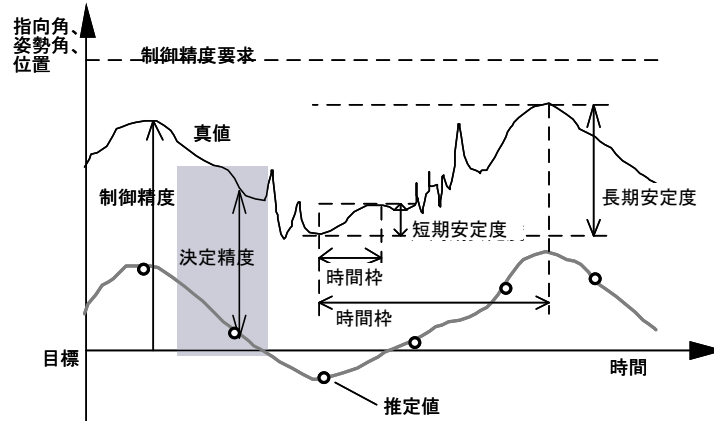


図 5.5 指向決定精度、姿勢決定精度、位置決定精度の定義

1) 姿勢決定精度の例

姿勢決定精度は、姿勢決定周期（国内宇宙機では典型的には 250～62.5ms）毎のタイミングにおける、基準座標系（慣性座標系ないしは軌道座標系）からの姿勢角推定値と基準座標系からの真の姿勢角の間の差であり、真値からの正負（±）の差で表される。姿勢決定精度は、DC（0Hz）から姿勢決定系のサンプリング周期や周波数帯域までの範囲で有効な情報となる。また、一定の長期間のデータ集団に対して、 3σ や最悪値が、統計的規定として典型的に使用される。

2) 姿勢決定精度要求の例

姿勢決定精度要求の規定例を以下に示す。指向決定精度要求も同様に規定することが可能である。

- ・姿勢決定精度：

定常制御モード高精度姿勢決定系使用時オンボード姿勢決定精度

（任意の 2 台の恒星センサ使用時、ヨーステアリング実施・非実施を問わず、高精度姿勢決定系立上げ 10 分後以降）

ロール、ピッチ、ヨー： 各軸 $\pm 3.0 \times 10^{-4}$ deg 以下 (3σ)

これは、慣性座標系からの衛星座標系（姿勢決定基準座標系）の姿勢角の真値からの誤差であり、10Hz の各姿勢決定タイミングにおいて満たされるものとする。また、これらの精度は、恒星センサの各光学部間、及び恒星センサと慣性基準装置間を含んだ姿勢センサ間のアライメントの影響を含んだ要求である。

- ・注： 定常制御モード高精度姿勢決定系使用時立上げ 10 分後以降の全時間帯に適用される仕様である

- ・注： 使用する座標系は別途規定する

3) 位置決定精度要求の例

位置決定精度要求の規定例を以下に示す。

- ・位置決定精度：

定常制御モード時

距離誤差： 1m 以下 (3σ 、オフライン位置決定精度)

これは、TOD 慣性座標系（あるいは WGS84 地球固定座標系）における衛星位置推定値の真の衛星位置からの誤差ベクトルの大きさに対する要求である。1Hz の各位置決定タイミングにおいて満たされるものとする。

4) 指向決定精度・姿勢決定精度の要因と構成

指向決定精度、姿勢決定精度の要因と構成を図 5.6 に示す。指向決定精度は、姿勢決定精度とアライメント推定精度から成る。このうち、姿勢決定精度は、センサに起因する誤差やフィルタ誤差などと姿勢センサ間のアライメント推定誤差から成る。一方、アライメント推定誤差は、姿勢基準とミッション機器基準座標系間のアライメント推定誤差とミッション機器内の指向座標系までのアライメント推定誤差からなる。また、それぞれのアライメント推定誤差は、バイアス成分と変動成分から成る。

指向決定精度を決める主要因は、光学姿勢センサ（角度センサ）である。今日では、光学姿勢センサに恒星センサが導入されたことにより、姿勢決定精度・指向決定精度はドラスティックに向上した。この結果、以前の地球センサベースの姿勢決定では姿勢決定精度が指向決定誤差の多くを占めていたが、最近の恒星センサベース姿勢決定・指向決定では、軌道上校正を行わない場合は、アライメント推定精度が支配的な誤差要因になる。指向決定精度や姿勢決定精度の更なる精度向上には、姿勢基準－ミッション機器間、ミッション機器内、姿勢センサ間のアライメント変動を小さくするとともに恒星センサの精度向上とアライメント軌道上校正が必要になる。

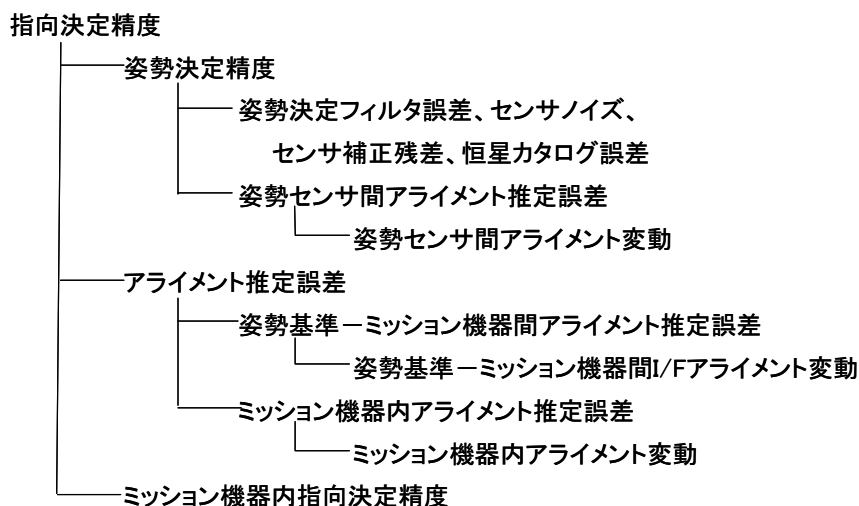


図 5.6 指向決定精度・姿勢決定精度の要因と構成

5.6 指向精度、姿勢精度、アライメント精度、位置精度、時刻精度

指向精度、姿勢精度、アライメント精度、位置精度は、それぞれ、指向、姿勢、アライメント、位置の制御精度、安定度、決定精度、相対決定精度を包括する抽象的概念であり、指向要求群を指す。例えば、指向精度は、これまでの節で定義した、指向制御精度、指向安定度、指向決定精度、相対指向決定精度から成る要求全体を指す。同様に、姿勢精度は、姿勢制御精度、姿勢安定度、姿勢決定精度、相対姿勢決定精度から成る要求全体を指す。時刻精度も、時刻情報の決定精

度、相対決定精度、安定度や制御精度を包括する要求全体を指す。

これらの指向精度、姿勢精度、アライメント精度、位置精度、時刻精度といった用語は、指向要求をグループとして指し示したいとき、あるいは、敢えて、個別の要求の特定を避けて曖昧に話したい時にのみ使用するべきである。しかし、時には、制御精度や決定精度を意味して使用される場合があるので注意が必要である。そのような場合は、必ず、使用者に意図した意味の明確化を促す必要がある。一方、包括的な意味ではなく、敢えて特定の要求の意味で使用したい場合には、プロジェクト内で明確に定義する必要がある。

5.7 指向要求の周波数領域表現

ここまでの各節で示した指向要求は、いずれも時間領域で定義してきた。本節では、こうして時間領域で定義された指向要求を周波数領域で表現する。各指向要求は、以下の式により周波数領域で解釈する。

$$\theta \leq \theta_{req} \sin(2\pi f)$$

これに基いて、指向を例に取って、指向制御精度要求、長期指向安定度要求、短期指向安定度要求、指向決定精度要求の一式の例を周波数領域で図示したものが図 5.7 である。要求を満足するためには、図 5.7 中に赤い線で例示した指向角データの周波数領域表現が、全ての周波数において、指向制御精度要求を表す直線や、指向安定度要求を表す折れ線群より下にある必要がある。また、指向決定については、指向角の周波数領域表現（赤い線）が、指向決定精度要求を表す直線より上にある帯域では、意味のある指向決定が可能になる。姿勢、位置に対しても同様な周波数領域表現が可能である。但し、ここで、これらの周波数領域表現は、実際の応答と指向要求がある単独の周波数成分のみから成り立っている場合の、すなはち、ラインスペクトラムが 1 本である場合の要求適合を示す。しかし、現実の応答は、単独の周波数成分から成ることは滅多になく異なる周波数成分の合成となる。このため、単独周波数での要求との大小のみ考えていると要求を逸脱する可能性があるので注意が必要であり、十分なマージンを持って考える必要がある。ここで示した表現は、周波数領域での見通しを得るため、簡便に集約して示したもので、厳密には時間領域で表現し評価する必要がある。

なお、安定度要求の周波数領域表現の求め方を図 5.8 に示す。正弦波信号に対する安定度は、安定度を規定する時間枠（時間フレーム）と比較して信号が低周波数領域にいる間は左図のようになり、高周波領域にいくと右図のようになる。指向角を表す正弦波 $\theta(t) = A \sin(2\pi ft)$ の振幅の 2 倍が指向安定度要求値 $\Delta\theta_{p-p}$ より大きい場合は、左図のように、正弦波は、安定度を規定する時間枠（時間フレーム） T_f と安定度要求値で制約される枠の中には収まらない。このため、単位時間あたりこの正弦波の最大変動量を与えるのは、正弦波が 0 を横切るタイミングであるので、近似的にこのタイミングの指向角変動レート（ $\dot{\theta}_{max} = 2\pi fA$ ） \times 時間枠（時間フレーム T_f ）が、安定度要求値 $\Delta\theta_{p-p}$ より小さければ、安定度要求を満足する。すなはち、 $\Delta\theta_{p-p} \geq 2\pi AT_f f$ となり、指向角振幅に対して

$$A \leq \frac{\Delta\theta_{p-p}}{2\pi T_f f}$$

という条件を満足することが周波数領域における指向安定度要求となる。一方、指向角を表す正

弦波 $\theta(t) = A \sin(2\pi ft)$ の振幅の2倍が指向安定度要求値 $\Delta\theta_{p-p}$ より小さい場合は、右図のように、正弦波は、安定度を規定する時間枠（時間フレーム） T_f と安定度要求値で制約される枠の中に収まってしまふ。このため、周波数に関係なく、振幅の2倍が、安定度要求値 $\Delta\theta_{p-p}$ より小さければ、安定度要求を満足する。すなはち、 $\Delta\theta_{p-p} \geq 2A$ となり、指向角振幅に対して

$$A \leq \frac{\Delta\theta_{p-p}}{2}$$

という条件を満足することが周波数領域における指向安定度要求となる。

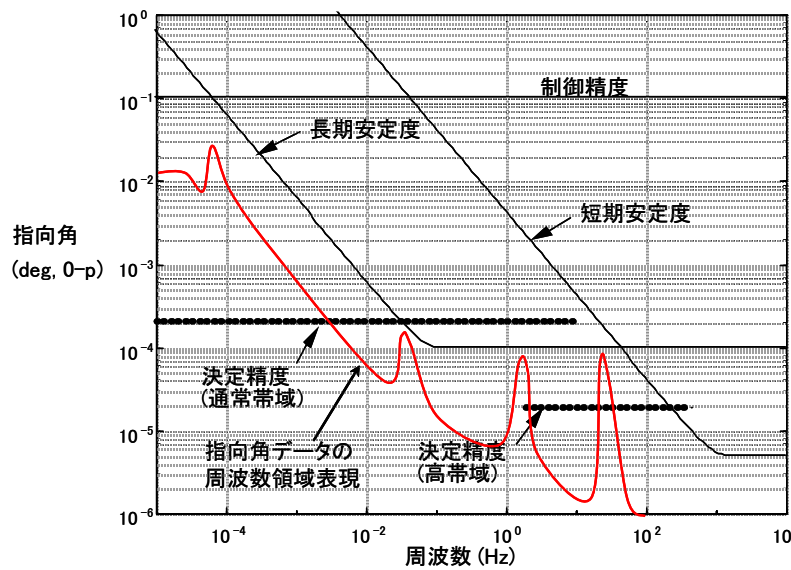


図 5.7 指向要求の周波数領域表現

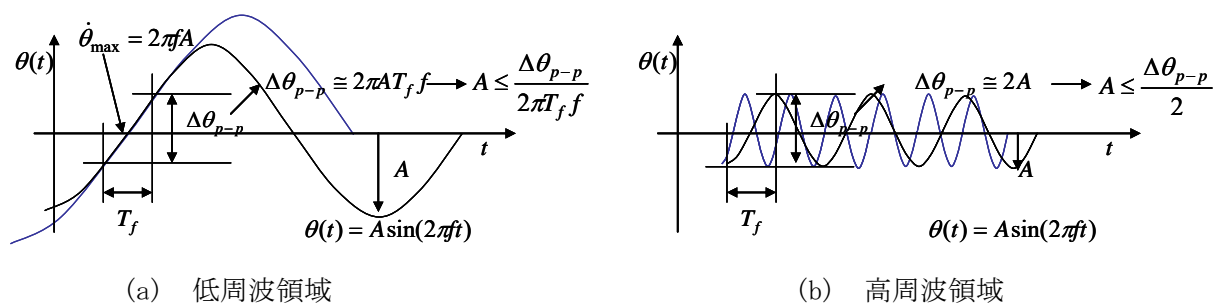


図 5.8 安定度要求の周波数領域表現の考え方

6. ミッション要求と指向要求との関係

第4章では、地球観測、宇宙科学、通信・放送という3つの代表的ミッション分野において、指向要求を規定するミッション要求を紹介した。第5章では、ミッション分野に依存せずシステム要求として共通的に規定される指向要求を定義した。本章では、第4章で紹介したミッション要求と第5章で定義した指向要求との関係を示す。関係は、主として、ミッション要求から精度要因を指向要求にブレークダウンした形で示す。

6.1 地球観測ミッション

本節では、以下に、4.3節に挙げた地球観測分野の各ミッション要求と第5章に定義した指向要求との関係を示す。

1) 画素地表位置決定精度

観測センサが観測した画像の各画素の地表位置は、指向推定値、すなはち、観測センサの指向方向の推定値と、衛星位置推定値から求めることができる。しかし、センサ撮像周期（画素地表位置決定周期）は、通常、姿勢決定周期や位置決定周期より大幅に短い。このため、センサ撮像タイミング毎の画素地表位置推定値を求める際、異なるタイミングで一般により粗い時間分解能で求められた指向推定値や衛星位置推定値を補間して、センサ撮像タイミングの指向角や衛星位置を推定することになる。従って、指向決定タイミング間に指向の変動があれば、それは画素地表位置決定精度を劣化させる。このため、指向決定精度や衛星位置決定精度だけでなく、指向安定度が、画素地表位置決定精度に寄与する。なお、衛星位置安定度も、原理的には同様の理由で画素地表位置決定精度に寄与するが、一般に、衛星位置決定タイミング間の真の衛星位置の、補間によるセンサ撮像タイミングにおける衛星位置推定値からの変動は小さいため、無視できることが多い。

図6.1に、ミッション要求である画素地表位置決定精度が、指向決定精度、指向安定度、位置決定精度などの寄与から構成される構造を示す。すなはち、画素地表位置決定精度は、主として、指向決定精度、指向安定度、位置決定精度からなり、他に、位置安定度、撮像時刻精度、座標系誤差や、大気屈折の変動、光行差誤差、標高モデル誤差などが寄与する。さらに、第5章で示したように、指向決定精度には、姿勢決定精度と指向アライメント推定精度が、指向安定度には、姿勢安定度と指向アライメント安定度が寄与する。

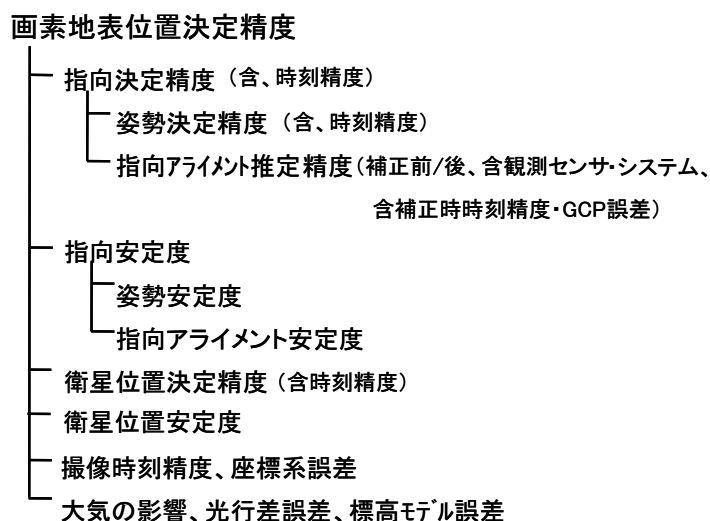


図 6.1 画素地表位置決定精度の構成

2) 幾何歪と画素地表位置安定度、相対画素地表位置決定精度

図 6.2 に、画像の幾何歪に寄与する要因の構成を示す。主として、画像の幾何歪は、1 枚の画像を撮影する時間の間の指向方向の変動、すなはち、指向安定度で決まる。但し、1 枚の画像を撮影する時間の間に、より高い頻度で指向推定値が得られる場合は、この指向推定値により画素地表位置を幾何補正することが出来るため、幾何歪に対する指向安定度の寄与は、指向決定タイミング間の時間フレームに対する指向安定度を考えればいい。しかし、一方で、指向推定値や位置推定値が 1 画像を撮影する時間の間に相対的な誤差を持つ場合、すなはち、相対指向決定精度や相対位置決定精度が寄与する場合は、これらの精度も幾何歪に影響する。

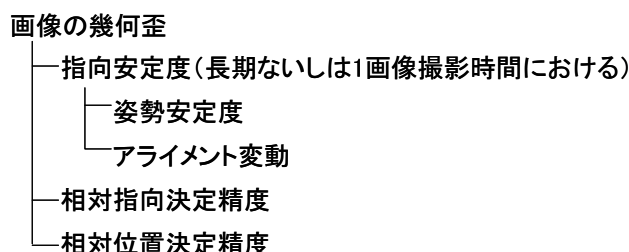


図 6.2 幾何歪の構成

3) MTF と画素地表位置安定度

図 6.3 に、画像の MTF に寄与する要因の構成を示す。MTF は、観測センサの光学的要因の他に、画素地表位置安定度に依存する。つまり、1 回の一般に非常に短い検出素子撮像時間内に、(1) 観測センサの指向方向と (2) 位置によって決まる撮影地表位置が、本来の望ましい軌跡からどれだけ変動するかには依存する。しかし、(2) については、このような短い時間内の衛星位置の本来の軌跡からの変動量の寄与は非常に小さいため、MTF は、ほぼ、短期の指向安定度のみに依存する。

また、画素地表位置推定値で補正できる幾何歪と異なり、MTF は物理的な変動・揺れが画質を劣化させるという影響であるため、画素地表位置推定値により補正することが出来ない。このため、画素地表位置安定度や指向安定度そのものを、MTF の指向への配分の中に収める必要がある。

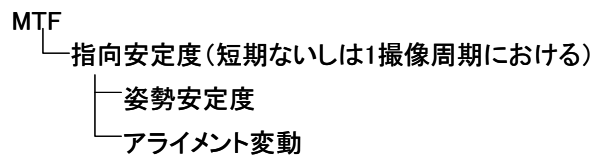


図 6.3 MTF の構成

4) 画像の位置・重なりと画素地表位置制御精度、RSP 軌道保持精度

観測画像の位置を制御し、隣接軌道飛行時の観測幅との間に重なりを確保することで、観測した画像が地表面の目標とする位置を捉え、さらに、1 回帰で全球の地表面を抜けがないよう限なく観測することが出来る。宇宙機のこの能力は、画素地表位置制御精度と呼ぶことが出来る。画素地表位置制御精度は、図 6.4 に示すように、衛星位置を制御する性能、すなわち、軌道制御精度と、観測センサの指向方向を制御する性能、すなわち、指向制御精度、から構成される。さらに、指向制御精度は、姿勢制御精度とアライメント制御精度や、これに加えて観測センサ内にアンテナやミラーの向きを動かす仕組みがある場合は、観測センサ内指向制御精度から成る。

観測計画の立案と取得した画像の管理を容易にするとともに、画像の全球カバレッジを確保する手段が RSP であるが、これも観測画像の位置と重なりを確保する方法だと言える。従って、画像の位置、重なりを確保する目標が RSP であるとき、それは、RSP 軌道保持精度と、別途規定された指向制御精度により実現される。

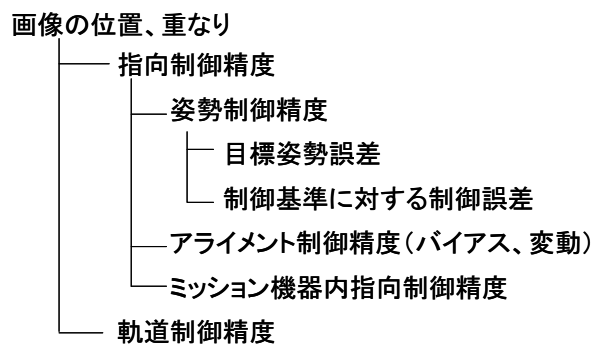


図 6.4 画像の位置、重なりの構成

5) 標高抽出精度

標高抽出は、光学センサの場合、同一パスないしはリピートパスで異なる角度から同一地点を観測した画像を用いステレオ視することによって実現される。この時、標高抽出精度に寄与するのは、ステレオ視に用いるそれぞれの画像の画素地表位置決定精度と、画像品質に依存するマッチング性能である。従って、標高抽出精度は、1)に示した画素地表位置決定精度を介して、指向決定精度、指向安定度、位置決定精度に依存する。

6) SAR 位置決定精度

画像処理を容易にするために、SAR で求められる SAR 位置決定精度要求は、そのまま衛星の位置決定精度要求となる。

7) インターフェロメトリ軌道保持精度

一方、合成開口レーダの場合、リピートパスで観測した画像を用いた SAR インターフェロメトリにより、標高抽出や地殻変動検出を行うが、SAR インターフェロメトリの干渉を実現するために、リピートパス間の高い軌道保持精度が必要になる。特に、全緯度帯で SAR インターフェロメトリを実現するためには、全緯度引数にわたり、宇宙機を地表面に固定した回廊の中を飛行させる必要がある。

6.2 宇宙科学ミッション

本節では、X線観測ミッションと電波天文ミッションを例に、4.3節に挙げた宇宙科学分野の各ミッション要求と第5章に定義した指向要求との関係を示す。

6.2.1 X線天文ミッション

1) 像中心位置制御精度要求

観測対象から飛来する X 線は、X 線レンズによって集光され焦点面上の検出器に導かれる。この集光作用は、中心軸に沿って行われる。それ故、観測対象の像を検出器視野内の規定された領域内に精密に結像するには、中心軸が精度良く観測対象を指向する必要がある。つまり、この要求条件は、観測対象方向と中心軸とのなす角度の制御精度要求として定量的に設定される。

まず、中心軸そのものは、X 線レンズ中心と検出器の相対位置により定まりため X 線レンズと検出器の相対位置関係が重要になる。つまり、中心軸方向は、これらの位置のアライメント精度として規定される。なお、これらの相対位置が変化する場合でも、機上でリアルタイムに測定ができれば、これを指向制御の目標方向計算部分に補正をかけることで精度向上を図ることができる。

このように定義された中心軸方向と観測対象の間の指向精度は、衛星の指向制御精度により規定される。指向制御精度は、姿勢制御および（角度の）アライメント制御精度により規定される。もちろん、衛星からみた観測対象方向は、地球公転運動や衛星軌道運動に起因する光行差の影響を受けるのでこれらの影響も目標姿勢計算誤差とし考慮される必要がある。

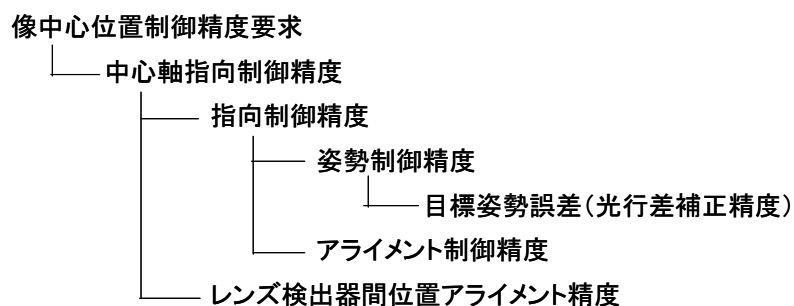


図 6.5 像中心位置制御精度の構成

2) 像位置安定度要求

X 線検出時に焦点面上の検出器が露光する時間内において X 線像が許容値以上に移動しない（ブレない）ようにする必要がある。これには、中心軸方向の観測対象に対する変動量を規定する必要がある。これは、中心軸そのものの安定度と衛星の指向安定度として定量的に設定される。こ

の指向安定度要因は、中心軸方向を定義する X 線レンズと検出器の相対位置変動および姿勢変動量を規定する姿勢安定度とアライメント変動より構成される。

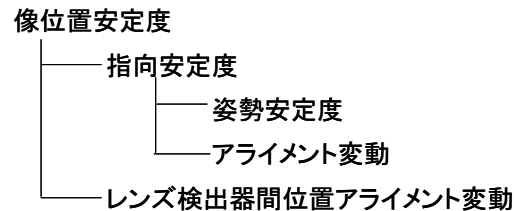


図 6.6 像位置安定度の構成

3) 絶対指向決定要求

観測天体の天空上での位置を精密に確定するために観測軸方向の絶対的な指向方向精度を規定する必要がある。この絶対指向決定精度は、中心軸方向の定義精度および中心軸指向決定精度により構成される。さらに、中心軸指向決定精度は、姿勢決定精度とアライメント推定精度に分解できる。これらの精度は、地上におけるオフライン処理性能として定量的に設定される。通常、中心軸方向は、衛星開発時に X 線レンズと検出器の相対位置を測定することで得られ、軌道上での熱変形などの影響は全て精度劣化要因となる。しかし、機上でレンズと検出器の相対位置測定を行うことができれば、地上処理時にこれを補正でき中心軸方向決定精度を改善することが可能になる。

また、非常に厳密には、観測対象の位置は、地球公転運動や衛星軌道運動による視差の影響を受けるために軌道位置誤差やこれに関連する時刻精度も絶対指向決定精度に影響をする。しかし、一般にこの影響は極めて小さく、且つ緩慢であるためにここでは、誤差要因として計上していない。ここで計上している撮像時刻精度は、衛星姿勢変動などの比較的変動速度の速い誤差要因との相関補正誤差に影響する要因として挙げている。

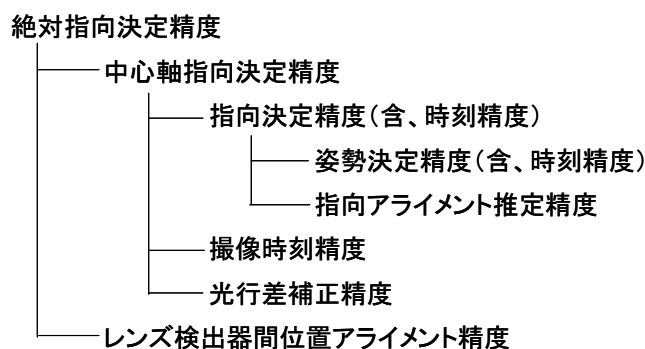


図 6.7 像中心位置制御精度の構成

4) 像再構成精度要求

複数回の観測データを地上の処理によって重ね合わせることを求められる。この際に発生する誤差の要因は、観測データ毎の相対的な角度変位に対する決定誤差となる。前出の像位置安定度要求は、短時間 (X 線検出器の露光時間) における焦点面上での X 線像の変動量としているが、

像再構成精度では、この期間が複数の観測期間に及ぶ長期となる点およびオフライン処理における指向決定における相対的な精度である点が異なる。この要求条件は、地上処理において観測対象と中心軸とのなす角度の処理期間内の相対的な指向決定精度として定量的に設定され、指向決定の長期変動に対する安定度として設定される。

なお、本要求においても X 線レンズと検出器間の相対位置変動にともなう中心軸方向変動が影響する。これに関しては、相対位置のアライメント精度として分類することができ、アライメント変動を抑制する努力はアライメント制御精度として分類し、アライメント変動を直接機上で測定できる場合には、アライメント決定精度として分類する。

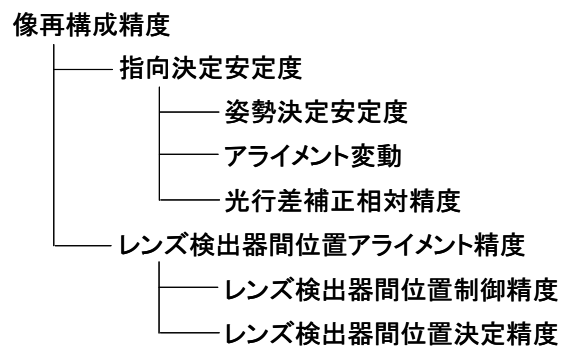


図 6.8 像再構成精度の構成

5) 検出強度確保要求

X 線レンズを通過する X 線強度は、観測対象方向と光軸のなす角度の正弦 (\sin) に比例して変化するため、観測対象からの信号強度を確保するためには、観測対象方向と光軸との指向制御精度を規定する必要がある。この誤差要因は、光軸の観測対象に対する指向制御精度として規定される。なお、ここでのアライメント精度とは、光軸方向と中心軸方向とのずれを意味する。

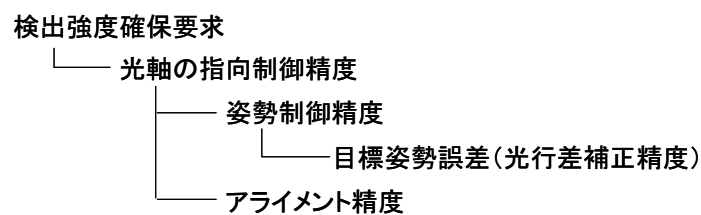


図 6.9 検出強度確保要求の構成

6.2.2 電波天文ミッション

1) アンテナ位置決定精度要求

電波天文ミッションとして、インターフェロメトリによる干渉解析を行う場合に地上天文台と衛星との同時観測データは、時刻とその観測相対位置が重要な観測データとなる。

また、衛星軌道位置計測のための GPS アンテナやミッションアンテナの位置は、衛星姿勢が変動するとわずかではあるが、地上局との相対位置変動を伴う。それによる精度劣化要因を以下に姿勢決定精度として分類した。

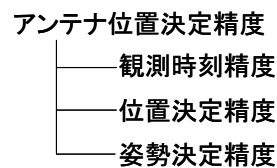


図 6.10 アンテナ位置決定精度の構成

2) 観測ゲイン要求

観測ゲイン要求は、目標星からの電波収集効率を規定する要求であるが、この中で指向に関する要求は、主にアンテナボアサイト方向の指向精度に関する要求とアンテナの柔軟付属物としての振動モード励振に起因する損失に関する要求に分解される。

ここで 5 点法とは、軌道上でのアンテナボアサイト方向を校正する手法である。これによるボアサイト方向校正誤差を「5 点法校正誤差」として分類している。

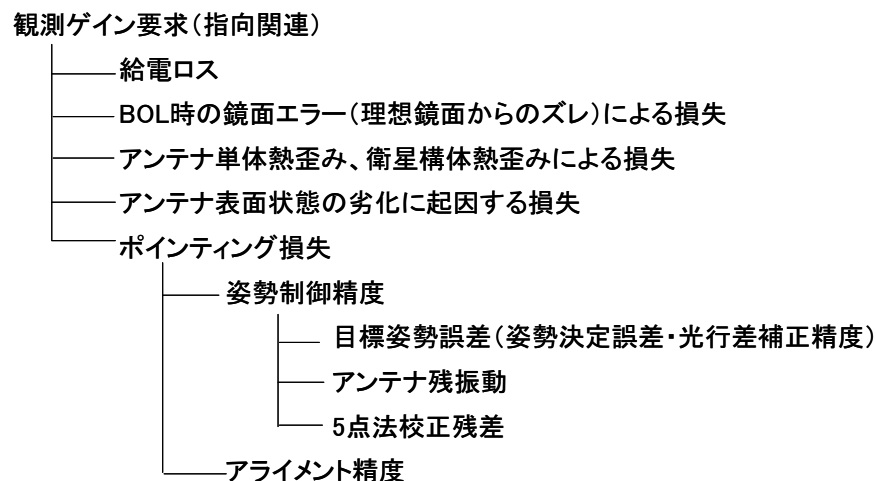


図 6.11 観測ゲイン要求の構成

6.3 通信・放送ミッション

上りまたは下りの一方向の衛星回線に対する通信回線稼働率要求とアンテナ指向制御精度要求の関係を図 6.12 に示す。

この図に示すように、通信回線稼働率は、伝送路を構成する要素の故障率と、通信品質が要求値を満足しない時間率によって決まる。通信品質は、デジタル通信の場合、符号誤り率 (BER=Bit

Error Rate) で規定される。符号誤り率 (BER) は C/N 比 (CNR=Carrier to Noise Ratio) の関数であり、C/N 比は、衛星側と地上 (または相手宇宙機) 側の回線諸元、および衛星-地上 (または相手宇宙機) 間の伝播損失や降雨減衰等によって決まる。ここで回線諸元とは、送受信機や増幅器の利得 (ゲイン)、給電器 (フィード) の損失等を指す。

衛星アンテナに指向制御誤差が存在すると、衛星から見た地上または軌道上の指向目標方向がずれる。搭載アンテナの送受利得は、指向目標がアンテナパターン上のどの方向に存在するかによって一意的に決まるから、他の回線条件が同一であれば、指向誤差によって衛星アンテナの送信または受信利得が変化することになる。結局、通信・放送ミッションにおける衛星のアンテナ指向制御精度要求は、回線設計の結果決まる回線バジェット (Link Budget) により配分される。

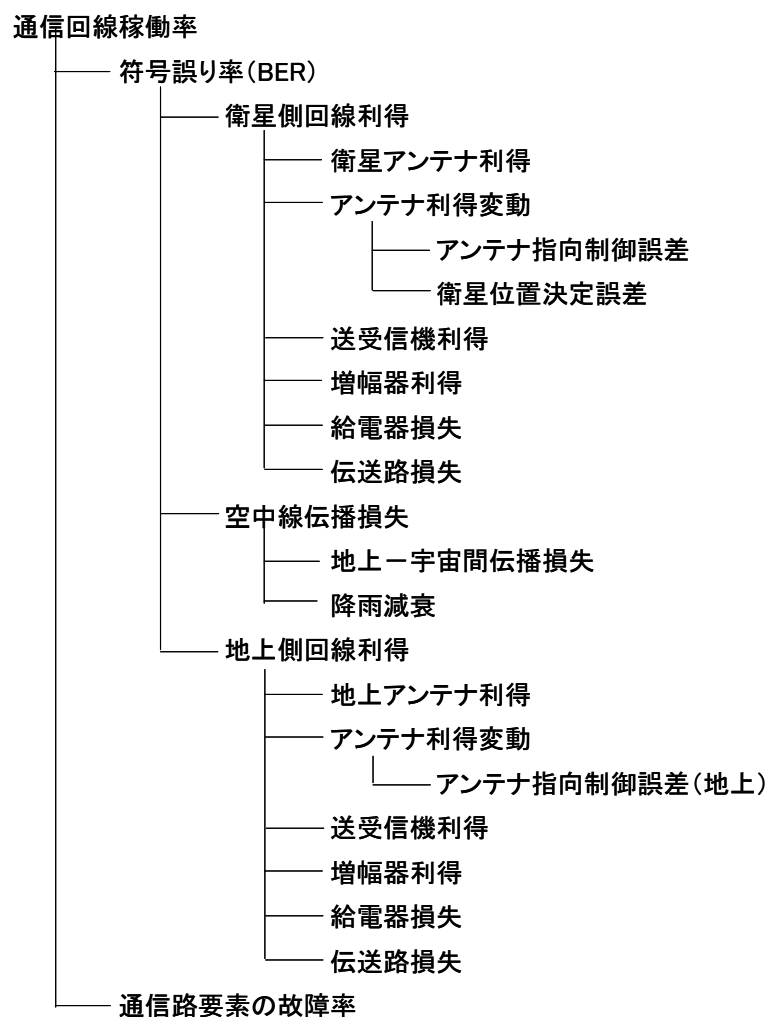


図 6.12 通信・放送ミッション要求と指向要求の関係

アンテナ指向制御精度の大小は、搭載アンテナ送受利得の大小、ひいては通信回線品質と直結することになるが、要求された通信品質を確保するという観点からは、ある時間内の指向制御誤差の相対的な変動幅ではなく、指向制御誤差の絶対値が重要である。指向制御誤差の時間変化は、アンテナ送受利得の時間変動、ひいては通信品質の時間変動を引き起こすが、指向制御誤差の絶対値が要求値内に収まっている限りは、特に問題にならない。

以上述べたことを要約すると、通信衛星では、指向制御誤差の絶対値が規定値以内に収まる時間率（ある規定時間に対して通信品質が規定を満たす時間の割合）が要求を満たすこと、という形の要求に換算される。また、前述のように、指向制御誤差の絶対値が問題であって、変動幅や時間変化率は問題にならないから、指向安定度の規定は通信ミッションでは存在しない。したがって、通信衛星型のアンテナ指向制御精度に対する要求は、典型的には以下のような形式となる。

例： 衛星のアンテナ指向制御精度は、定められたサービス中断期間を除く全ミッション期間中のいかなる1分間においても、99.7%以上の時間において規定値以内であること。

付録1. 用語・略語

用語・略語	出現ページ
BER	19, 37, 38
GPS 時刻	10, 11
MTF (MTF 劣化許容量)	14, 24, 32, 33
RSP	14, 15, 33
SAR 位置決定精度	15, 33
UTC-TAI	10, 11
アライメント	4, 5, 6, 8, 9, 20, 23, 27, 28
アライメント決定精度	20, 36
アライメント推定誤差	28
アライメント制御誤差	23
アライメント精度	20, 23, 38, 29, 34, 36
アライメント変動	26, 28, 35, 36
アンテナ位置決定	18, 37
アンテナ基準座標系	5, 9
アンテナ機械座標系	5
アンテナ固定座標系	5
アンテナ座標系	5
アンテナ送受信機局所座標系	5
アンテナ送受信機座標系	28
オフライン位置決定精度	10, 11
サブシステム固有時刻	5, 9
サブシステム座標系	5
センサ CCD 局所座標系	5, 9
センサ CCD 座標系	5, 9
センサキューブ座標系	5, 8
センサ基準軌道座標系	5, 8
センサ基準座標系	5
センサ機械座標系	5, 9
センサ固定座標系	5, 9, 22
センサ光軸座標系	5, 9
センサ座標系	5
センサ電気座標系	5
ポインティング損失	18
ミッション機器基準座標系	23, 26, 28
モデル基準軌道座標系	5, 8
安定度	20, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 34, 35
位置安定度	13, 14, 17, 29, 24, 25, 31, 32, 34, 35
位置決定精度	13, 15, 18, 20, 26, 27, 28, 31, 32, 33, 37
位置制御精度	14, 16, 20, 21, 22, 33, 34, 35
位置精度	18, 20, 28, 29
衛星位置推定値	28, 31
衛星基準時刻	10, 11
衛星座標系	5, 8, 22, 25, 27
画素地表位置安定度	13, 14, 32
画素地表位置決定	13, 31, 32, 33
画素地表位置決定精度	13, 31, 32, 33
画素地表位置制御精度	14, 33
回線稼働率	18, 19, 37

用語・略語	出現ページ
観測時刻精度	18
幾何歪	13, 14, 24, 32
軌道基準座標系	5, 7
軌道座標系	5, 7, 8, 22, 23, 27
軌道制御精度	21, 23, 33
軌道保持精度	14, 15, 16, 33, 34
決定精度	20, 26, 27, 28, 29
検出強度	17, 36
姿勢安定度	20, 24, 25, 26, 28, 31, 35
姿勢決定基準座標系	4, 22, 27
姿勢決定誤差	23, 25, 26
姿勢決定座標系	5, 8
姿勢決定精度	20, 23, 26, 27, 28, 31, 35, 37
姿勢制御基準座標系	22
姿勢制御精度	20, 21, 22, 23, 24, 26, 28, 33
姿勢精度	20, 28, 29
指向安定度	20, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 39
指向管理	1, 2, 3, 5, 10
指向決定精度	20, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 35, 36
指向推定値	31, 32
指向制御誤差	38, 39
指向制御精度	20, 21, 22, 23, 24, 28, 29, 33, 34, 36, 37, 38, 39
指向精度	20, 28, 29, 34, 37
指向要求	1, 2, 3, 16, 20, 21, 28, 29, 30, 31, 34, 38
時刻（制御）精度	20
時刻計測精度	20, 26
時刻精度	18, 28, 29, 31, 35
時刻付け	10, 11
制御基準慣性座標系	5, 8
制御基準軌道座標系	5, 8
制御基準座標系	5, 8, 22, 23, 26
制御誤差	22, 23, 24, 25, 26, 38, 39
制御精度	14, 16, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 28, 29, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39
絶対位置決定精度	20
絶対姿勢決定精度	20
絶対指向決定	17, 20, 35
絶対指向決定精度	20, 35
相対位置決定精度	20, 32
相対姿勢決定精度	20, 28
相対指向決定精度	20, 28, 32
像位置安定度	17, 34, 35
像再構成精度	17, 35, 36
像中心位置制御精度	16, 34, 35
地球固定座標系	5, 7, 15, 28
通信品質	18, 19, 27, 38, 39
標高抽出精度	15, 33
符号誤り率	19, 37, 38