

Japanese introduction to SPICE toolkit

N. Hirata (Univ. of Aizu)

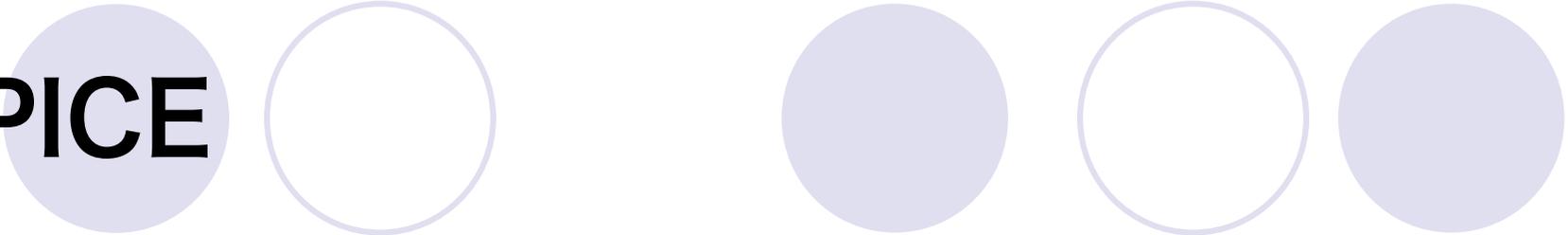
Ancillary Data



- Science (Instrument) Data (科学/観測データ)
 - ある観測の結果として、直接取得されたデータ
- Ancillary Data (補助データ)
 - ancillary: 付随, 補助
 - Science Dataに付随し, これを補助するためのデータ
 - データに意味付けを行う

Ancillary Data (cont.)

- 月惑星探査において，補助データは探査機の運用記録として保存される
- 補助データの管理，利用のため必要な
 - データ保存フォーマット
 - データの読み出し方法
 - データ利用のためのルーチン
- を定義する枠組みが必要



SPICE

- NASAジェット推進研究所(JPL)が開発した，補助データに関する枠組み
 - 補助データを保存するファイル
 - カーネル(kernel)
 - 補助データを扱うツール
 - SPICE toolkit (or NAIF toolkit)
- ミッションに依存しない，共通の枠組み
 - 日本でも「はやぶさ」以降使われている
 - 「かぐや」， Planet-C...
 - 国際的にも広く用いられている (IPDA: International Planetary Data Alliance)

運用計画と補助データ

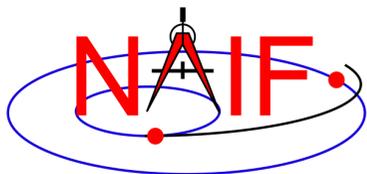
- 運用計画

- 未来の運用「記録」

- 探査機の未来の状態を知って，データ取得の計画を立てる

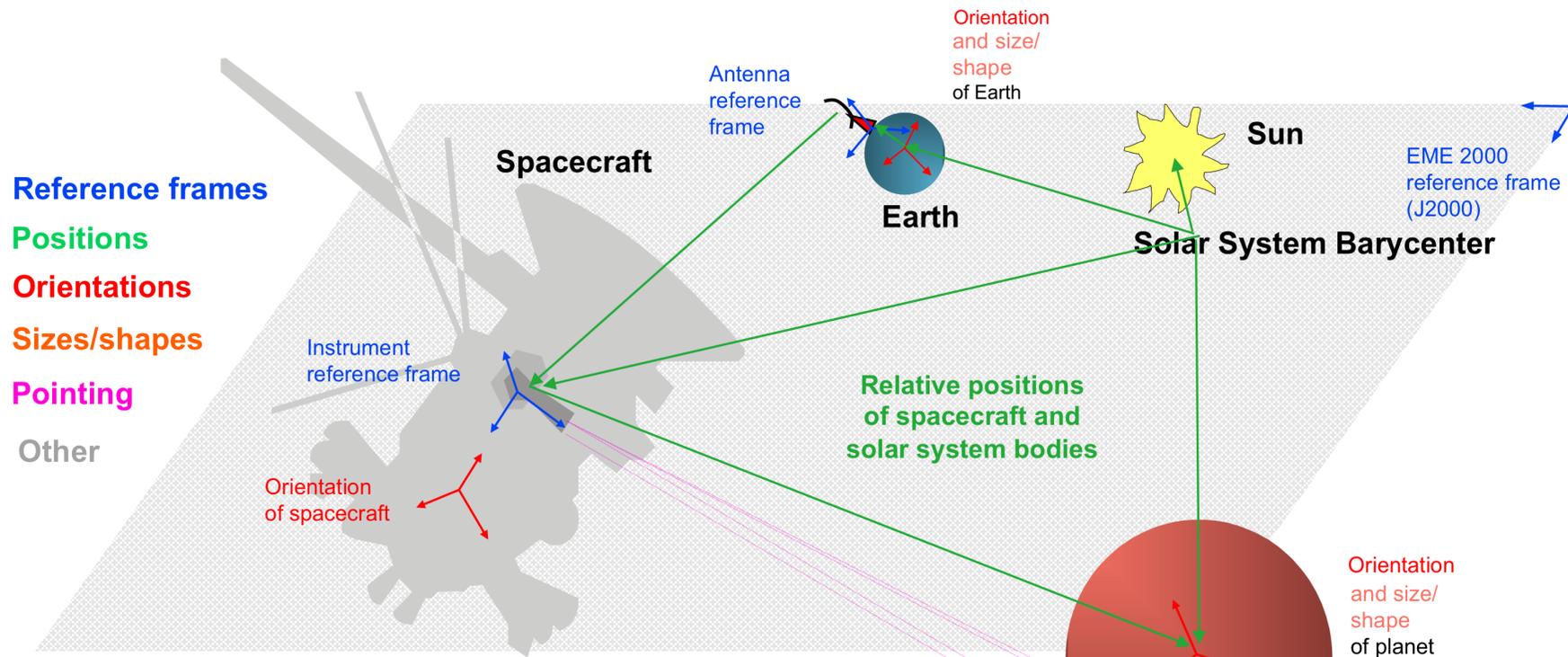
- 将来のことを扱うが，考え方は運用記録と同じ

- 補助データの枠組みで取り扱う



What are “Ancillary Data?”

Navigation and Ancillary Information Facility



Reference frames

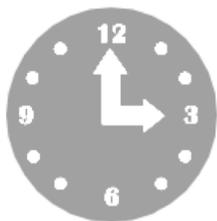
Positions

Orientations

Sizes/shapes

Pointing

Other



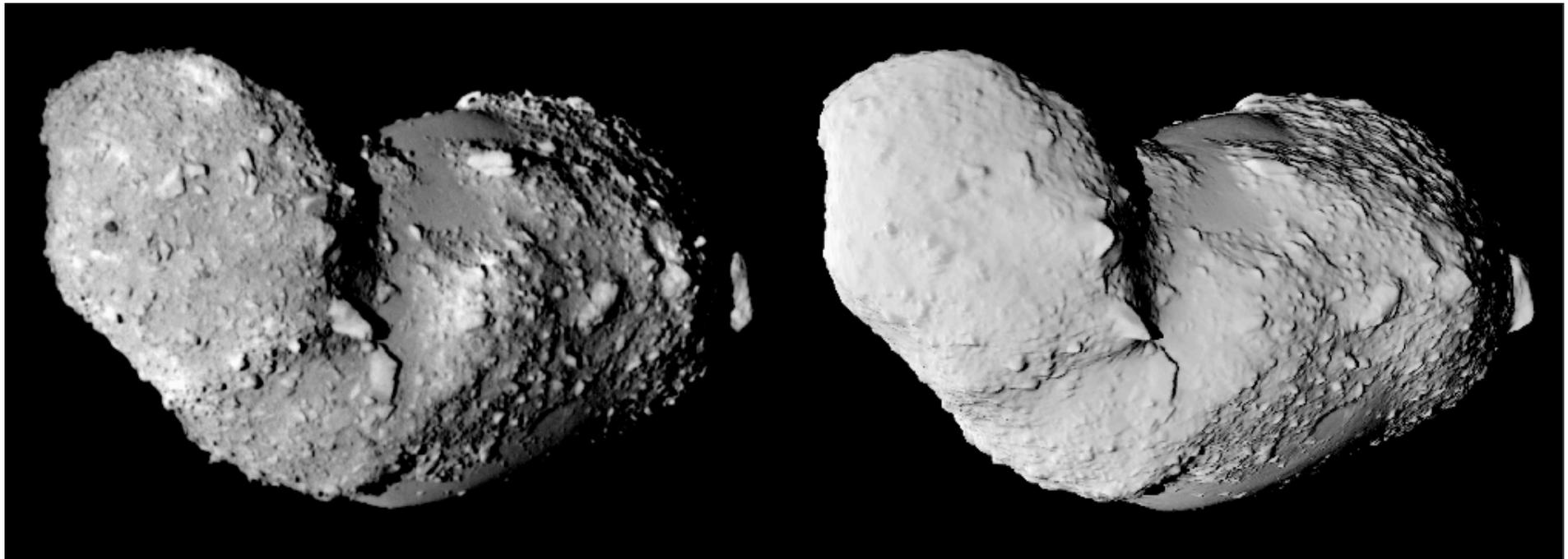
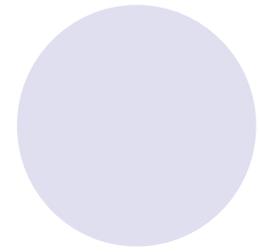
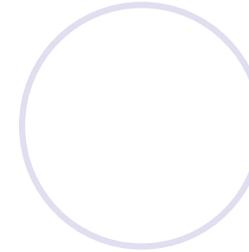
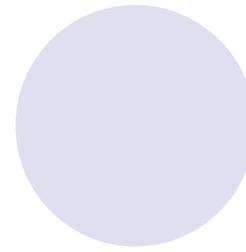
Time Conversion Calculations



Logs of Commands and Events

Overview of SPICE

SPICEの活用例



はやぶさが
撮影した
実際の画像

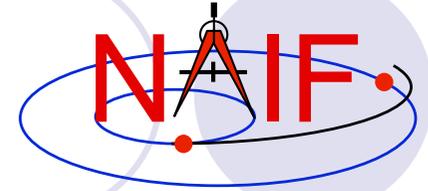


時刻
探査機位置・姿勢
天体, 光源位置, 形状
機器情報



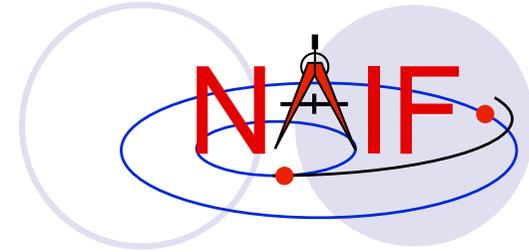
SPICEを使って
作成した
模擬画像

カーネル



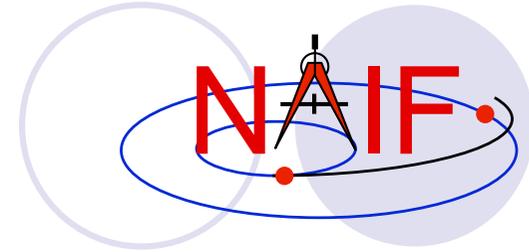
- 補助データの実態であるデータファイル
 - OSのkernelと語源は同じ（果物の芯，核心）
- 情報の種類ごとに個別のファイルで保存
 - ミッション共通のカーネルとミッション固有のカーネルがある
 - 共通
 - 天体の位置（軌道）情報，うるう秒情報など
 - 固有
 - 探査機の位置情報，カメラの視野情報など

SPICE Kernels Family



- **SPK**
 - 位置情報
 - 自然天体と人工物
 - 位置と速度の時系列データ
- **PcK**
 - 自転, 形状情報
 - 自然天体
 - 自転軸の向き, 周期, 楕円体形状
- **IK**
 - 機器情報
 - 視野方向など
- **CK**
 - 姿勢情報
 - 姿勢の時系列データ
- **EK**
 - イベント
 - 廃止予定
- **FK**
 - 座標系情報
 - 座標系のID, 親座標系との関係
- **SCLK**
 - 時刻情報
 - 探査機の時刻カウンタと世界時の関係の時系列データ
- **LSK**
 - うるう秒情報
- **メタカーネル Meta-Kernel (a.k.a. “FURNISH kernel”)**
 - カーネル群の可用性を上げるための仕組み
- **Plate kernel**
 - Shape model

Text and Binary Kernels



SPICE **text** kernels are:

- text PCK (the most common type of PCK)
- IK
- FK
- LSK
- SCLK

- MK (“Furnsh” meta-kernel)

SPICE **binary** kernels are:

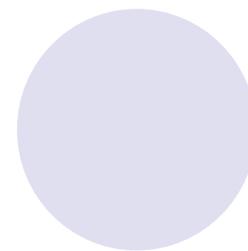
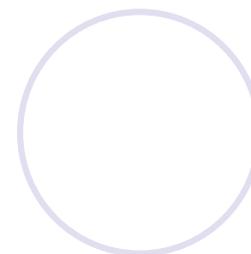
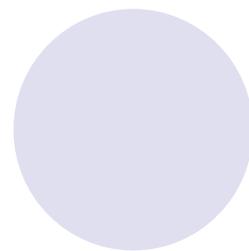
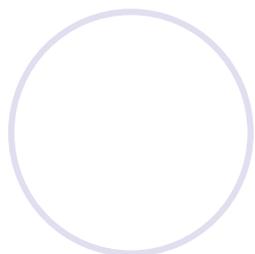
Architecture Independent

- SPK
- binary PCK (exists only for Earth and moon)
- CK

Architecture Dependent

- ESQ (part of the E-kernel)
- DBK (database kernel)
- Plate kernel

語源



S

Spacecraft

P

Planet

I

Instrument

C

C-matrix

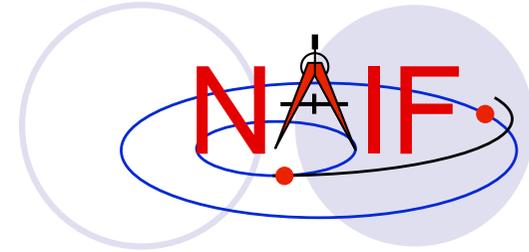
E

Events

SPICE Toolkitでできること

- 一言で言えば以下の二点
 - kernelからのデータ読み出し
 - データの変換
 - 座標系の変換
 - 時間系の変換
- データも，データ変換のための情報も kernelに含まれている
 - 必要な全てのカーネルを用意し，読み込むことが重要

SPICE Toolkit



- 入手元

- <http://naif.jpl.nasa.gov/naif/toolkit.html>
- <ftp://naif.jpl.nasa.gov/>

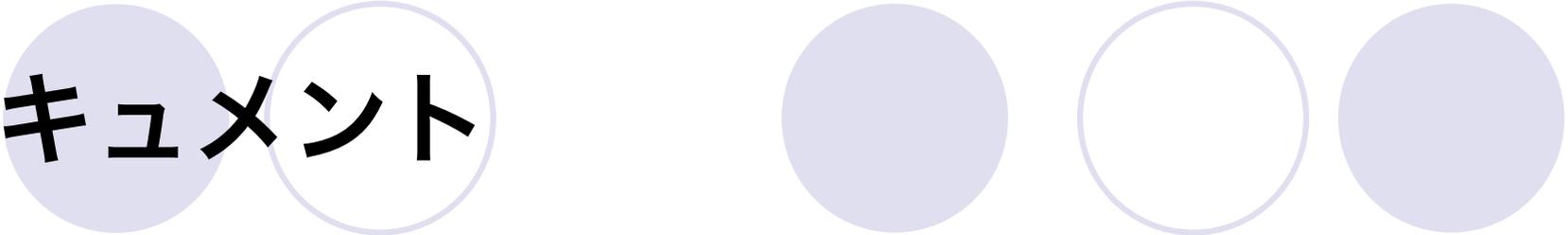
- 動作環境

- FORTRANで開発後, C, IDL, MATLABへ移植
- UNIX系OS (linux, solaris, MacOSX, Cygwin) と Windows上で動作

- 今回はC版 (CSPICE) を使用

- 当初の開発言語はFORTRANのため, tutorialなどではFORTRAN版での関数用例が書いてある
- 引数などの使い方はC/FORTRANで同じ
- 関数名: SPKEZR → `spkezr_c`

ドキュメント



- チュートリアルがtoolkit本体とともに配布
- doc/ディレクトリにusers guideと詳説文書 (required reading)
 - HTML版もavailable
- “Hands-on”レッスンで自習も可能

SPICE IDとSPICE Name

- SPICE toolkitにおいて識別すべき要素
 - 天体
 - 惑星と衛星
 - 探査機
 - 搭載機器
 - 座標系
- SPICEではこれらにIDと名称を付与し、識別できるようにしている
 - 数字のIDコードは主に古い関数で用いる
 - 名称は比較的新しい関数で用いる
 - 関数によってはどちらでも認識する

SPICE IDとSPICE Nameの例

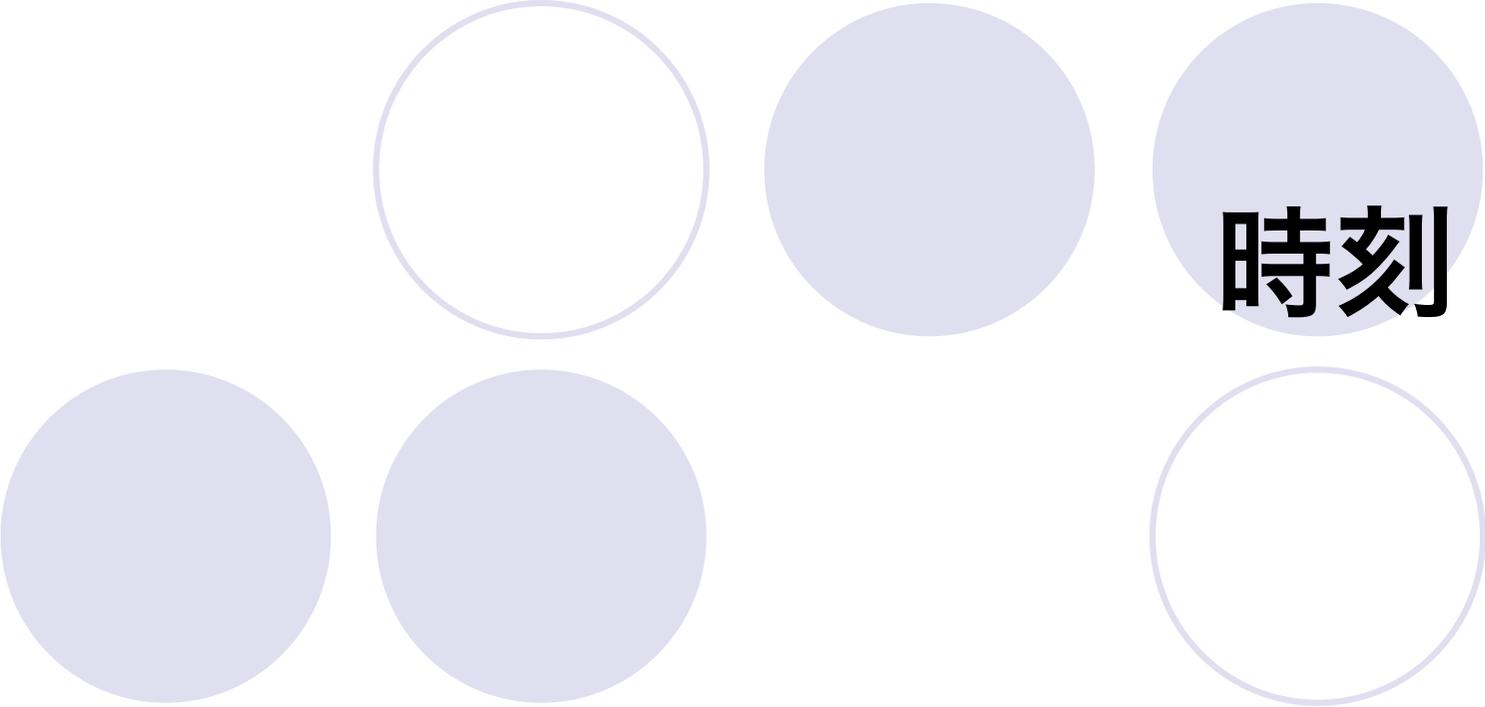
- 人工天体のID (S/C ID) は負の整数
 - -130 'HAYABUSA', 'MUSES-C'
 - -131 'SELENE'
 - -500 'RSAT', 'SELENE Relay Satellite'
 - -502 'VSAT', 'SELENE VRAD Satellite'
- 人工天体の搭載機器, 内部座標系はS/C IDx1000-機器番号
 - -130000 'HAYABUSA_SC_BUS_PRIME'
 - -130102 'HAYABUSA_AMICA'
 - -130200 'HAYABUSA_NIRS'

SPICE IDとSPICE Nameの例

- 自然天体と系の重心は正の整数
 - 0 'SOLAR SYSTEM BARYCENTER'
 - 10 'SUN'
 - 1 'MERCURY BARYCENTER'
 - 199 'MERCURY'
 - 3 'EARTH MOON BARYCENTER'
 - 399 'EARTH'
 - 301 'MOON'
 - 2000001 'CERES'
 - 2025143 'ITOKAWA'

SPICE IDとSPICE Nameの例

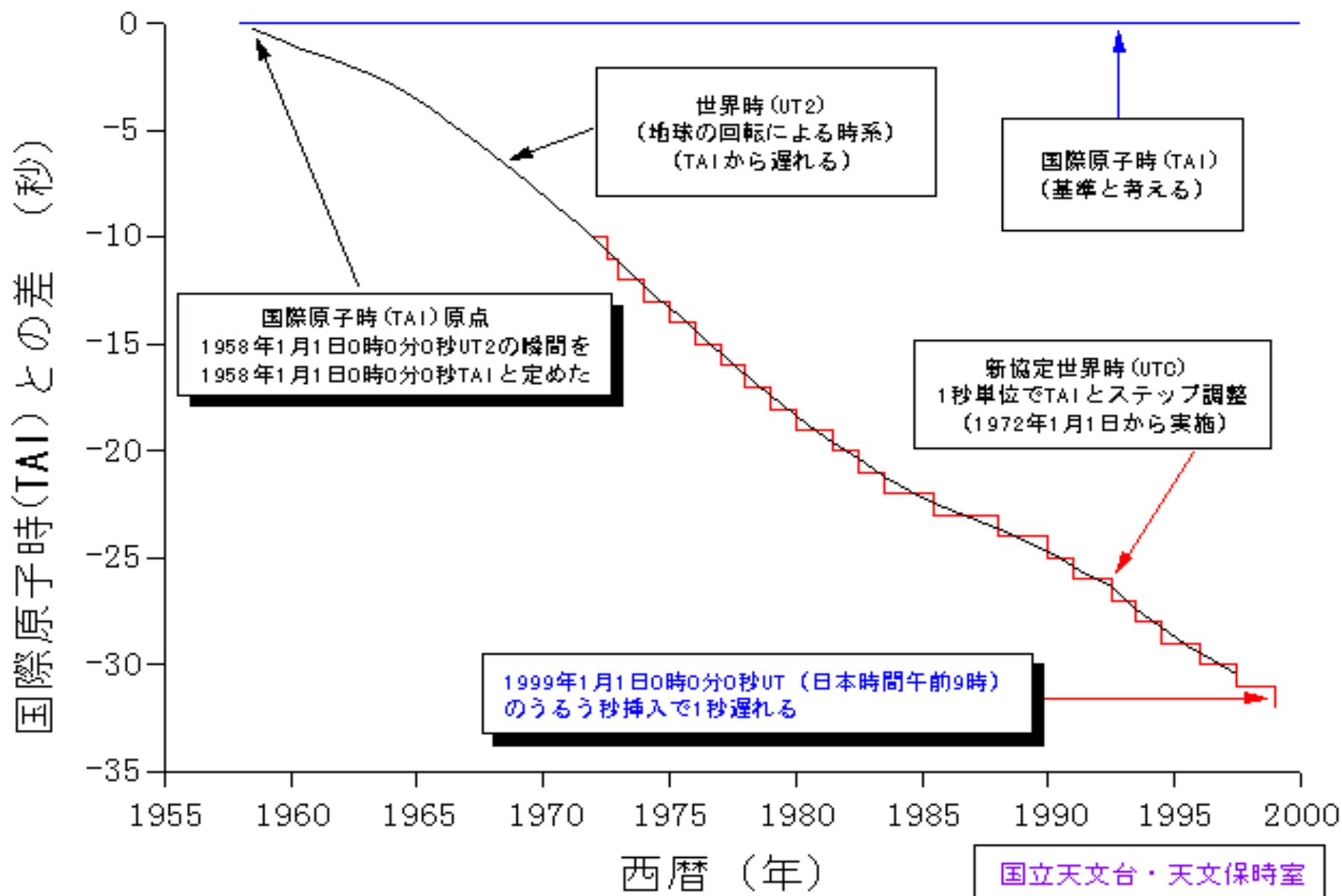
- 慣性座標系や自然天体に関する座標系は基本的にはSPICE Nameを用いる
 - 'J2000'
 - 'ECLIPJ2000'
 - 'EARTH_FIXED'
 - 'IAU_MOON'
 - 'ITOKAWA_FIXED'
- 多くはtoolkit内で定義されているが、FK, IKなどでローカル定義を行うこともできる
 - -130900 'HAYABUSA_HP_FRAME'
 - -130910 'ITOKAWA_-Z_SUN_+X'
 - これらはHAYABUSA_HP.TFで定義



いろいろな時系 (time system)

- 国際原子時 (TAI:International Atomic Time)
 - 一番正確な, 一定刻みの時計
 - セシウム原子の振動数が基準
- UT (世界時, Universal Time)
 - 地球の自転 (昼/夜) を基準とする
 - 自転速度の変化に合わせて, 刻みの伸び縮みがある
- UTC(協定世界時, Coordinated Universal Time)
 - 「普通の」時計
 - 世界時(UT1)とTAIの兼ね合わせで決められる
 - TAIと同じく一定刻みだが, うるう秒 (leap second) の挿入によってUT2と合わせている
 - うるう秒情報はlskで管理される

国際原子時(TAI)と協定世界時(UTC)・うるう秒の関係

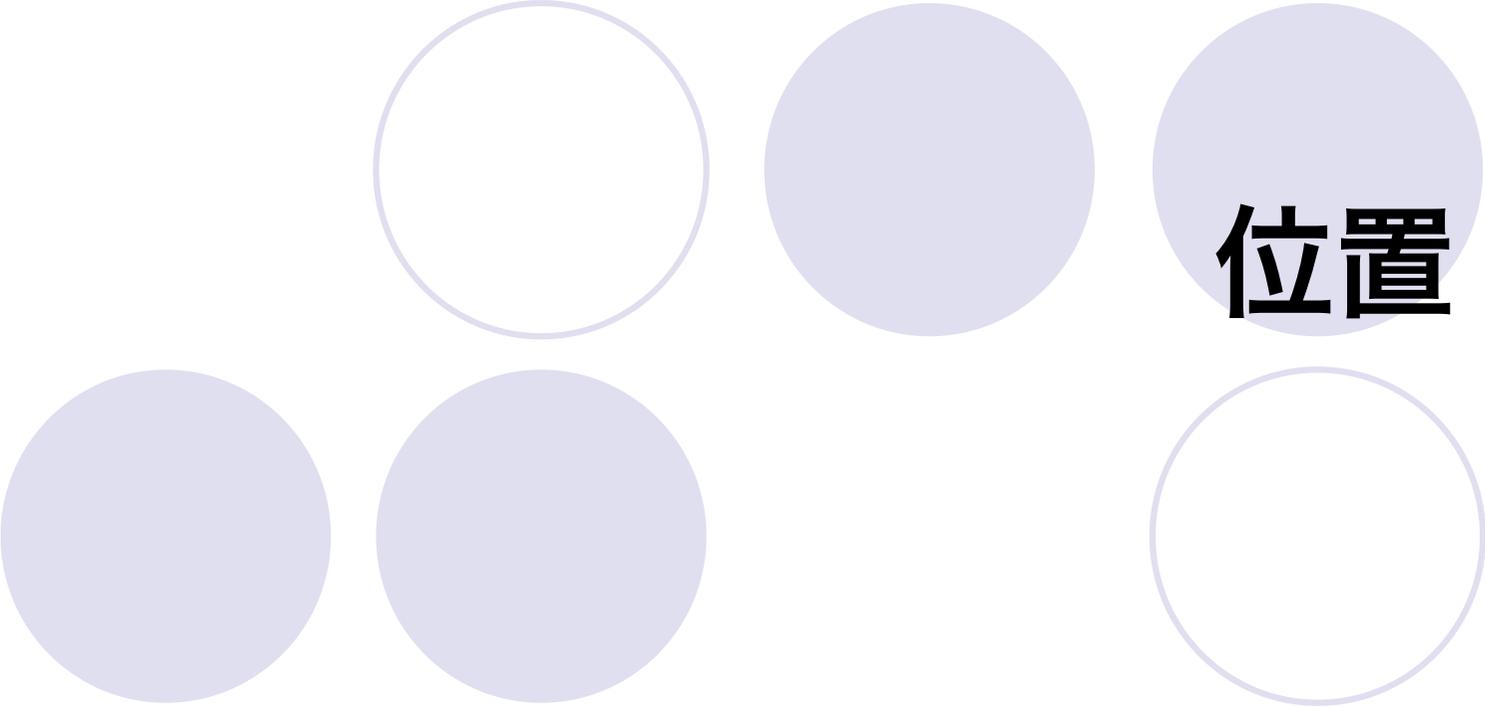


いろいろな時系 (time system)

- ET (暦表時, Ephemeris Time)
 - 軌道計算などに用いられていた
 - 地球の公転を基準とする
- DT (力学時, Dynamical Time)
 - ETに替わって用いられる (1984年以降)
 - 刻みは原子時による
 - 相対性理論に基づくので、基準位置によって異なる2種類の時系がある
 - 地球重心基準 (TDT: Terrestrial Dynamical Time)
 - 太陽系重心基準 (TDB: Barycentric Dynamical Time)
 - TDT/TDBとETは連続していると見なされる (SPICE上ではET=TDBとして扱う)
 - SPICEでの標準時間単位は「秒」

探査機の時計 (TI)

- ただのストップウォッチ
- 刻みは様々 (tickと呼ぶ)
 - はやぶさでは1/8192sec
 - ただし, 表示などは1/32sec
 - ST_2420777432_v.fitsの2420777432は1/32sec刻みのTI (機上処理の時刻を表す)
- 進んだり, 遅れたりする
- “0”に戻ったりすることもある
 - 地球上での時刻との時刻合わせが必要
- 時刻合わせ情報 : sclk
- うるう秒情報 : lsk



ケプラーの軌道6要素

- 軌道の形状

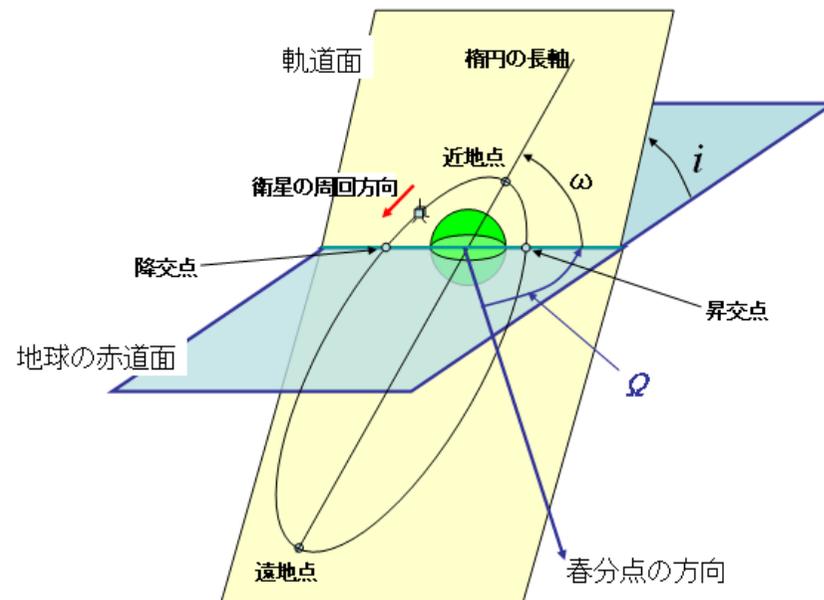
- 軌道長半径: a
- 離心率: e

- 軌道の配置

- 軌道傾斜角: i
- 昇交点赤経: Ω
- 近点引数: ω

- 軌道上の位置

- 平均近点角: M
- 元期: epoch



カルテシ안의6要素

- ある時刻における自然天体/探査機の
 - 位置 (X,Y,Z)
 - 速度 (V_x,V_y,V_z)
- ケプラーの要素と同じく, 6つの変数で対象物の軌道(状態)を表現できる
- 3要素で位置(position)ベクトル
- 6要素で状態(state: 位置+速度)ベクトル

SPICE toolkitでの位置情報

- SPICEでは, SpiceDoubleの配列 (ベクトル) で表現
 - 3要素で位置ベクトル
SpiceDouble position[3];
 - 6要素で状態 (位置+速度) ベクトル
SpiceDouble state[6];
 - 標準単位はkmとkm/s
- spkに保存
 - 基準座標系, 状態の時系列情報, 補間方法

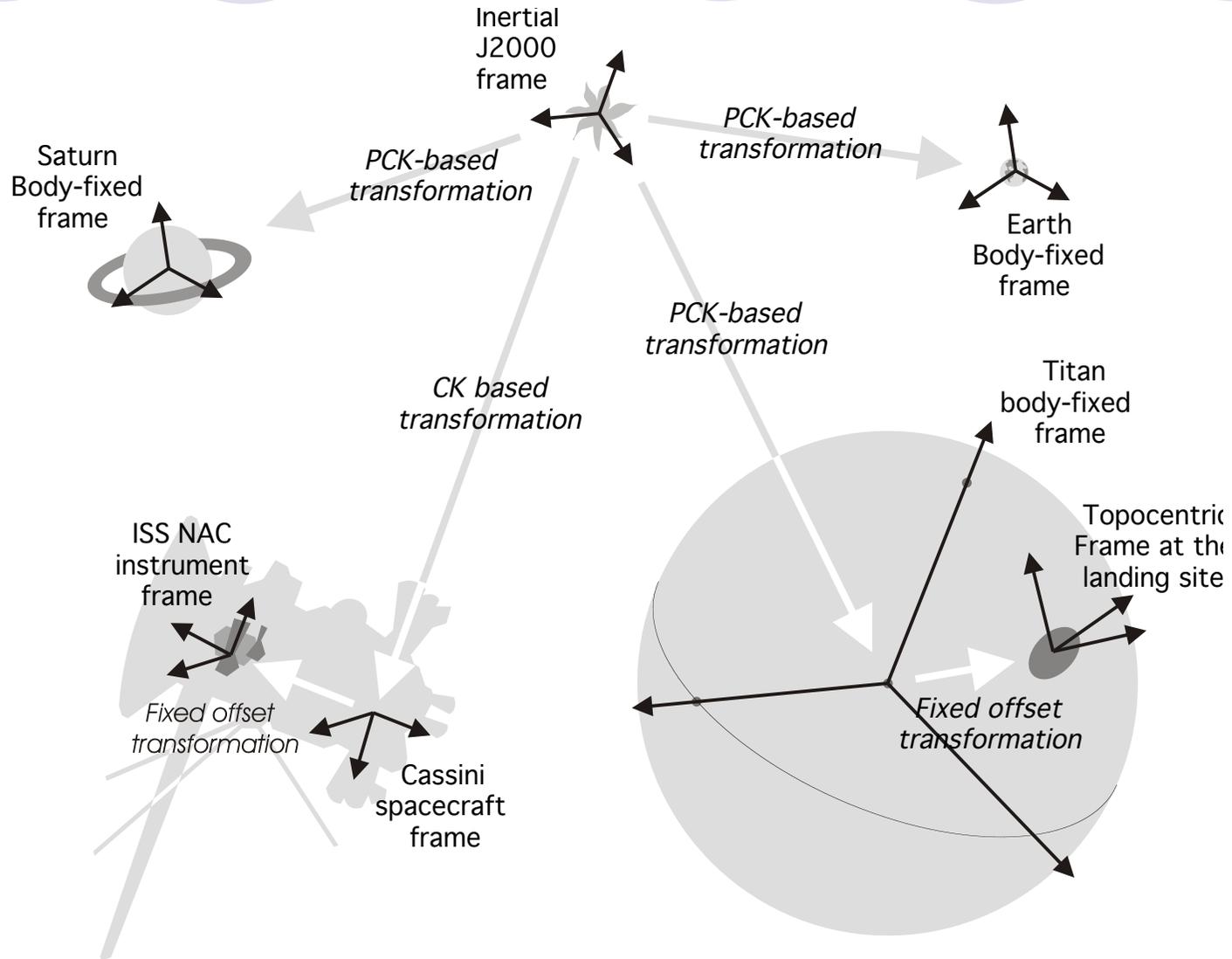
座標系

- 位置, 状態を示す時には座標系の定義が必要
- 中心
 - 地球, 太陽, 他の天体, 探査機
 - Geocentric, Heliocentric, Planetocentric
- 座標軸の向き
 - 慣性系に固定, 自転する天体に固定: 緯経度
 - Non-rotating, Body-fixed
- 緯経度の地理座標系, 地心座標系
 - Geocentric, Geographic

J2000 (J2000.0)

- 2000年1月1.5日（基準元期，元来はこの元期そのものをJ2000と呼ぶ）における，
 - 春分点方向をX軸
 - 赤道面をXY平面
 - 北極方向をZ軸にした右手系の慣性座標系
- SPICEの座標系のrootになっている

Sample Frame Tree and Chains



SPICEにおける座標系

- 座標系は上位の座標系に対して静的または動的に変化する
 - 慣性座標系における探査機の姿勢
 - 探査機構体に対する観測機器の取り付け方向
- SPICEでは座標系間の変換をユーザから隠蔽した形で処理する
 - 座標系を指定すれば内部で変換してから出力
 - 軌道情報 (spk), 自転情報 (pck), 姿勢情報 (ck), 指向情報 (ik), 座標系管理情報 (fk)

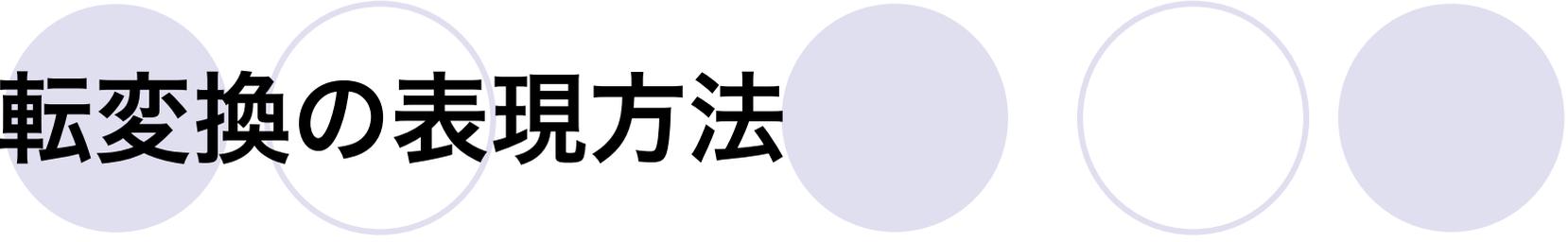
SPICE toolkitでの回転変換情報

- 探査機の姿勢など、時間変化するものはクォータニオンでckに情報を保存
 - 姿勢の変化レートはroll, pitch, yawの角度レート (deg/sec) で保存
- 時間変化しないものはオイラー角の形でik, fkなどに情報を保存

SPICE toolkitでの回転変換

- 明示的に回転変換を行うことも可能
- 主に回転行列を用いる
 - カーネルから回転行列を読み出し，位置/状態ベクトルにかけ算する
 - 行列同士のかけ算，行列-ベクトルのかけ算などを行うための関数が準備されている

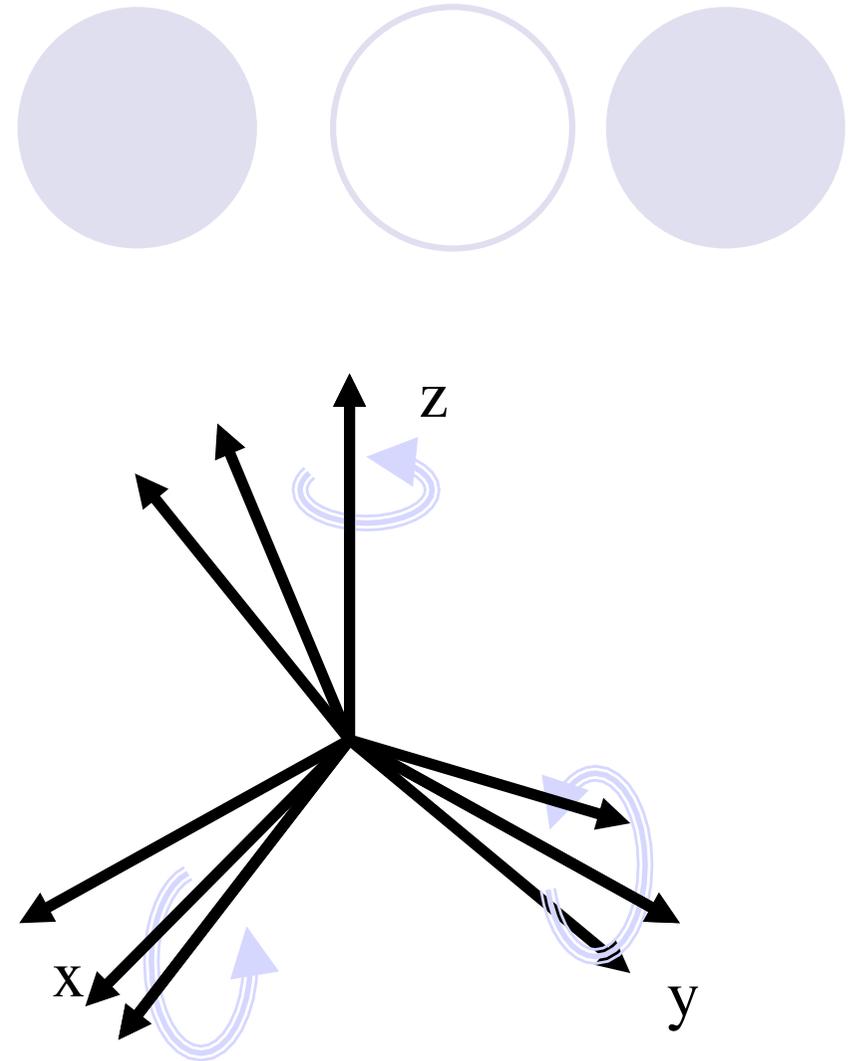
回転変換の表現方法



- オイラー角
- 方向余弦行列
- 四元数（クォータニオン）

オイラー角

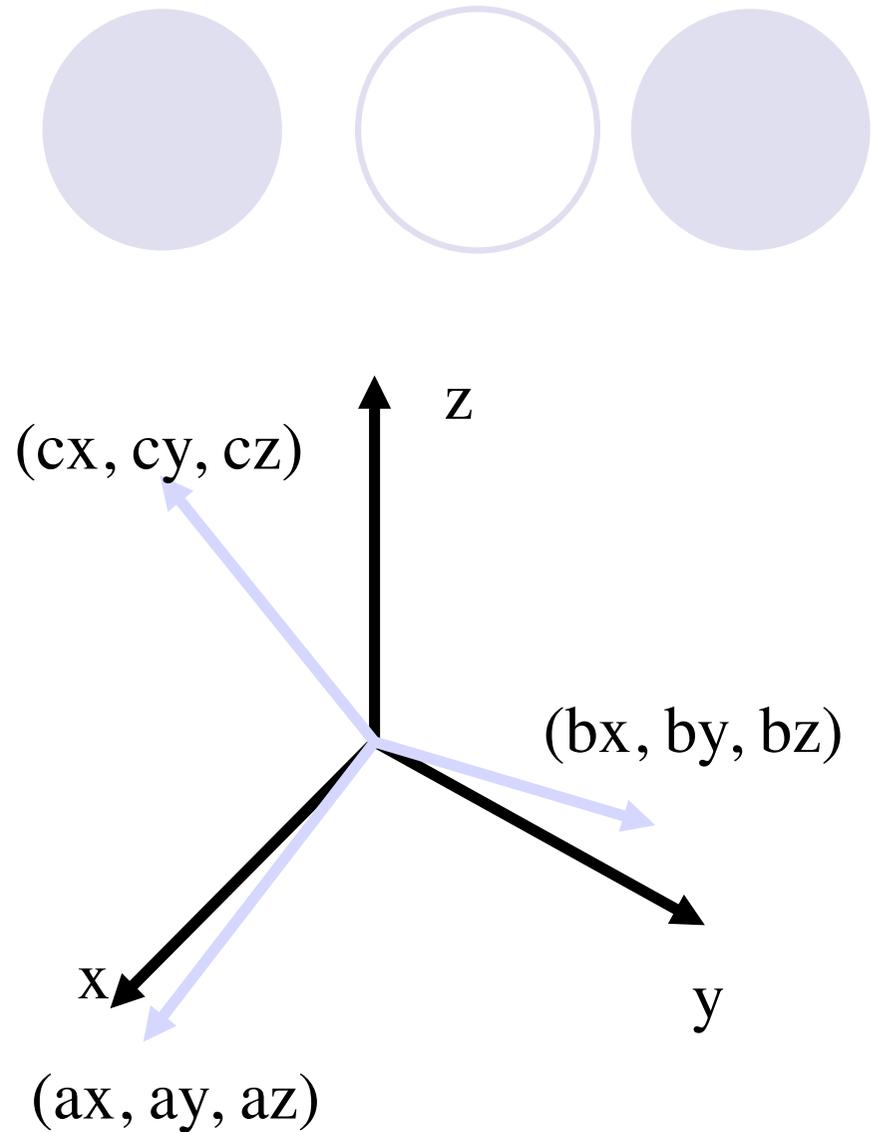
- 軸周りの回転角度で表現する
- 角度なので理解しやすい (最初は)
- 回転軸は三種類必要
- 回転軸の選び方で様々な表し方があり, 混乱しやすい
 - SPICEでは明示可能
- 三角関数の演算が必要
- 特異点を持つ (回転の順番と角度によっては表現できないところがある)



方向余弦行列

- 回転行列そのもの
- 3つの直行する単位ベクトル
- 計算が簡単
- 9変数が必要なため冗長

$$\begin{pmatrix} ax & bx & cx \\ ay & by & cy \\ az & bz & cz \end{pmatrix}$$



四元数 (クォータニオン)

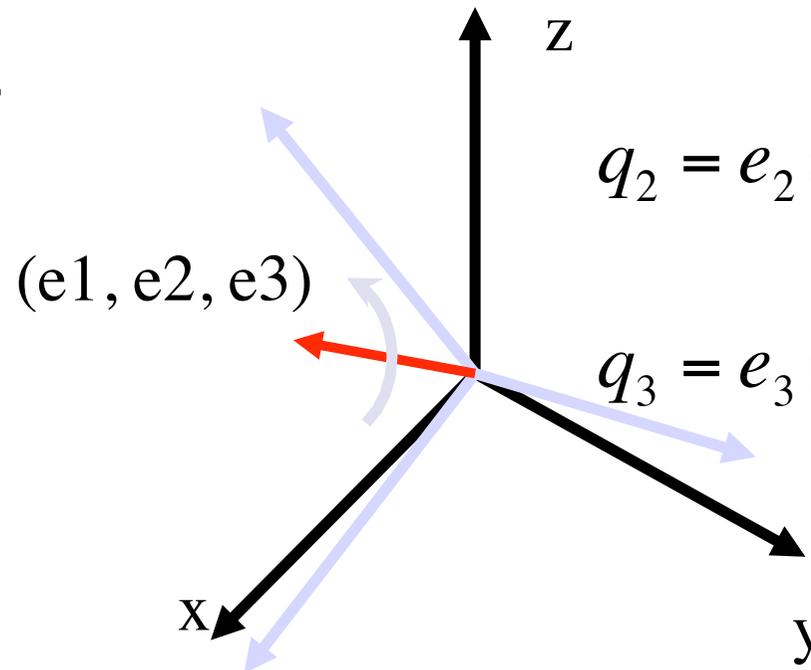
- 回転変換がある軸 (オイラー軸) 周りの角度 α で表される
とき, 右記の q_1, q_2, q_3, q_4 を
四元数 (クォータニオン) と
呼ぶ
- 4変数なので冗長 (方向余弦行
列よりはよい)
 - 4変数の順番に方言がある
- 計算はやや難しい
- 特異点は存在しない
- 人工衛星の分野から利用が広
まった

$$q_0 = \cos \frac{\alpha}{2}$$

$$q_1 = e_1 \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$q_2 = e_2 \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$q_3 = e_3 \sin \frac{\alpha}{2}$$



光時補正と光行差補正

- 光速が有限であるため，見かけの位置が実際の位置と異なる現象
- 光時 (light time)
 - 対象の運動と，対象までの距離に依存
- 光行差 (aberration of light)
 - 観測者の運動と，対象の方向に依存
- SPICEではこれらを簡単に補正できる
 - 補正手順はユーザから隠蔽されている