



1. シリコンとファイバ上の天文学

4. 赤外線位置天文観測衛星 (JASMINE) 計画に使われるオブジェクト指向技術

山田 良透

京都大学 大学院 理学研究科 物理学宇宙物理学専攻
yamada@amesh.org

オブジェクト指向は、情報科学の世界では歴史のある技術である。初期の頃に複雑なシミュレーションを行うためのオブジェクト指向言語も開発されたように、衛星システムのシミュレーションなどには適している。また、ビジネスプログラミングの世界ではすでに広く浸透している。天文学のプロジェクトにおいてもオブジェクト指向技術が導入されるようになってきた。本稿では、赤外線望遠鏡による高精度位置天文観測衛星プロジェクト (JASMINE) における衛星シミュレーションシステムでのオブジェクト指向技術の導入について紹介する。

■ JASMINE プロジェクトとその天文学的意義 ■

本稿では、以下に述べる JASMINE プロジェクトにおけるシミュレーションシステムの開発で、オブジェクト指向技術がどのように活かされているかについて紹介する。

国立天文台を中心として、およそ20の大学および宇宙航空開発研究機構 (JAXA) の研究者100名程度が参加して、JASMINE (ジャスミン) というプロジェクトが進行中である^{1), 2)}。JASMINE は Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration の略で、位置天文観測、すなわち星の位置と運動を正確に観測するための赤外線望遠鏡を搭載した人工衛星を用いた観測計画である。

天文学は、古来より航海術に不可欠な技術であった。正確に位置が分かった星図をもとにして、船の上で行う星の位置の測定と比較することにより、船の位置を正確に求めることに使われてきた。位置天文学は、その意味で古い天文学である。現在でも航海術としての天文学は生きていて、海ではなく宇宙空間での航海術の道具となっている。人工衛星が、搭載した星図と観測の結果を比較して、自分自身の位置を知るために使われている。20世紀の天文学は、物理学の知識を組み合わせ、スペクトルの観測や測光と呼ばれる観測によって、天体の温

度や化学組成などを知る方向に向かった。また、従来の可視光線 (目に見える光) による観測から、赤外線やX線、電波など広い波長域の電磁波による観測、またニュートリノや重力波といった、電磁波以外での観測などが行われるようになっていった。こういった中で、位置天文学は「古い学問」となった。しかし、21世紀を迎え、この化石のような学問が、再び注目を集めはじめています。

位置天文観測は、従来は地上の望遠鏡で行われていた。望遠鏡自身の正確な姿勢を知ることが、星の位置の正確な測定の鍵となる。そこで、写真天頂筒や子午環と呼ばれる特殊な望遠鏡が開発された。しかしながら、地球大気の揺らぎのため、観測精度には限界があり、およそ35ミリ秒角 (1ミリ秒角は1/1000秒角、1秒角は1/3600度である。35ミリ秒角は、およそ100km先にある1円玉の直径を見込む角度) である。1989年に、ヨーロッパ宇宙機関 (ESA) が打ち上げたHIPPARCOS (ヒッパルコス) という人工衛星による観測で、初めて宇宙からの位置天文観測が行われ、大気の影響を受けないため1ミリ秒角という精度での観測が可能であることが示された。HIPPARCOSの成功を受けて、ESAでは次の位置天文観測計画としてGAIA (ガイア) が、米国航空宇宙局 (NASA) ではSIM (シム) が計画されている。これらのプロジェクトの目標精度はおよそ10マイクロ秒角 (1マイクロ秒角は1/1000000秒角) であり、10マイクロ秒角は月の上に置いてある1円玉の直径を見込む角度に相当

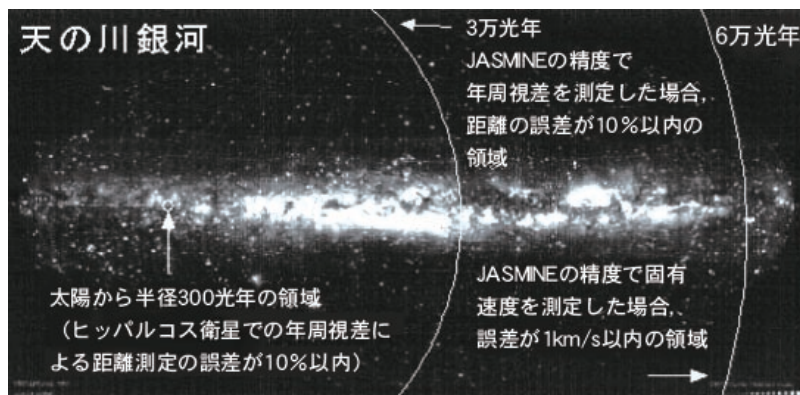


図-1 距離を正確に観測できる領域の変遷
 天の川銀河を横から見た図。太陽系のまわりにつけた小さな○は、HIPPARCOS衛星で距離が10%の精度で求められる範囲。JASMINE、GAIA、SIMではこの領域が天の川銀河の中心を含む大きな円の領域に広がる。一番右の円は、天球面上の運動速度が1km/s以内で決められる領域を示す。

する。JASMINEの目標精度も10マイクロ秒角である。

位置天文で得られるパラメータは、星の天球上の位置(2)、天球上の運動(2)、星の距離(1)の5つのパラメータである。星の距離は、地球が太陽の周りを公転する運動による星の天球上の位置の微妙なずれ(年周視差)から測定する。距離は、年周視差の逆数として求められる。距離と年周視差が線形(1次)ではなく逆数の関係であることから、バイアスが生じ、年周視差の測定誤差が10%では距離の推定誤差は10%程度だが、年周視差の誤差が10%を超えると距離の推定誤差は急激に悪くなり、年周視差の誤差が25%程度となると距離の推定誤差は発散してしまう。10%というはおおざっぱな目標ということではなく、位置天文学で距離を推定する場合の重要な基準となっている。つまり、年周視差が10%の精度で求まる程度の距離が年周視差法による測定限界である。その限界は位置天文の測定精度が35ミリ秒角ではおよそ10光年、1ミリ秒角ではおよそ300光年、10マイクロ秒角では3万光年となる。

我々の天の川銀河の大きさは、太陽から天の川銀河の中心までの距離でおよそ27000光年、薄い銀河ディスクの厚みが300光年程度である。HIPPARCOSの観測は画期的であったとはいえ、銀河全体から見れば太陽近傍の距離にしてわずか1%程度のところまでの距離を正確に求めたに過ぎない。JASMINEやGAIAの精度になると、天の川銀河の中心付近までの星の距離が正確に求められる。したがって、JASMINEやGAIAの成功により、初

めて天の川銀河の(地球側半分ではあるが)全貌を知ることができることになる(図-1参照)。

特に、天の川銀河のディスク面や中心の膨らんだ部分(バルジと呼ばれる)は、星が集中している領域である。銀河の形成や進化の問題にアプローチするためには、バルジはまさに情報の宝庫であり、詳細な観測が望まれる領域である。しかし、この領域には光を吸収する星間塵(ダスト)がたくさん存在する。したがって、ダストによる吸収を受けにくい赤外線による観測が望ましい。GAIAは、可視光による観測であるが、JASMINEは初めてスペースでの赤外線による位置天文観測を行おうという、チャレンジングな試みである。

■ JASMINEプロジェクトで使われる情報技術 ■

人工衛星を用いた観測の場合、地上のプロジェクトと異なるいくつかの特徴がある。

- 装置の運用期間は搭載機器の機械的寿命や放射線による劣化などのため、地上観測機器に比べて極端に短い。この期間内に、効率的な観測を行う必要がある。
- 一度装置を宇宙に打ち上げてしまうと、あらかじめミッションプログラムで想定されている機器の調整以外は不可能である。何か予想外の不具合が発生しても、現場で修正することは不可能である。

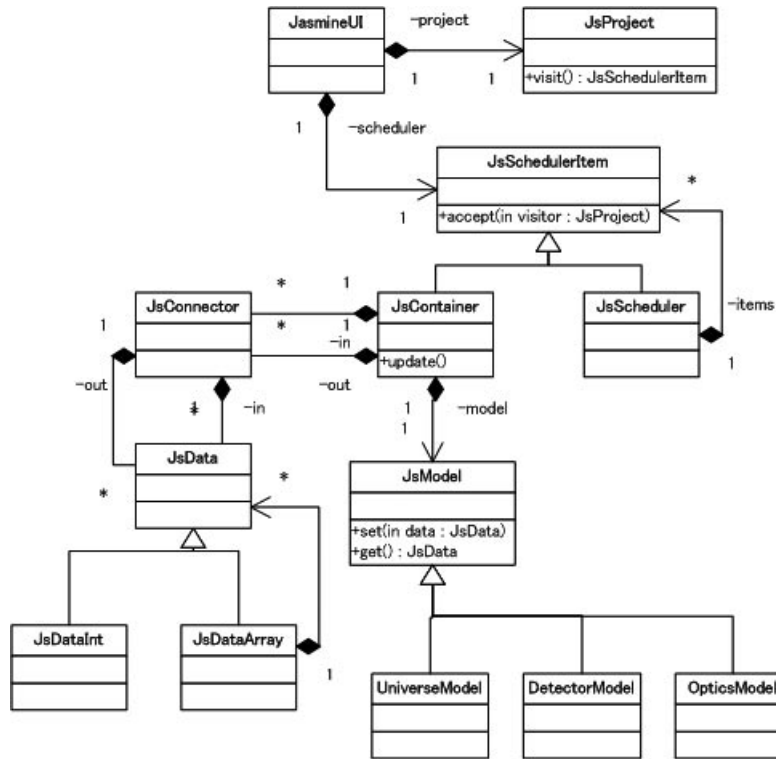


図-2 JASMINE シミュレータのフレームワークのUML図

- 天文学者以外に、ロケット・衛星などの専門家とのディスカッションが必要となる。
- 一部の機器は地上環境では完全な予備実験が困難である。

このため、天文学・観測装置・ロケット・衛星の要求をクリアにして、予想できることには万全の準備を行うとともに、予想外のことが起こった場合も対処しやすいようにしておく必要がある。それには、計算機を用いて、衛星の軌道から観測、データ転送にいたるまでの一連のシミュレーションが有効である。

このシミュレーションソフトウェア構築のため、JASMINEではオブジェクト指向技術³⁾を導入している。オブジェクト指向技術は、情報科学では古い技術であり、ビジネスプログラミングの世界などではいまや当たり前前の技術となっている。しかしながら、天文学におけるシミュレーション分野ではスーパーコンピュータとFORTRANが幅を利かせている。スーパーコンピュータで行われているシミュレーションは、計算量は膨大だが計算の内容自体は単純なものの繰り返しで、オブジェクト指向を導入するメリットがあまりないのかもしれない。

しかしながら、JASMINEのシミュレーションが目指すものは、事象間の非常に複雑な関連を再現することであり、その意味でオブジェクト指向の助けなしにはシミュレーションシステムの構築は難しい。そこで、適用可能なパターンの分析やUML図を用いた設計（UML図は図-2に示す）といった現代的プログラミングスタイルを科学計算に導入することとなる。自然科学研究では世界的に見ると現代的なプログラミングスタイルを導入する試みは早くから行われている。衛星による位置天文学のプロジェクトであるGAIAやSIMのシミュレーションシステムでも、こういった技術の導入が始められている⁴⁾。天文学全体でも10年くらい前からソフトウェア開発にオブジェクト指向法が採用されるようになってきている。

■ 現在までの進捗状況 ■

JASMINEは現在、衛星のグランドデザインを決める段階にある。このため、JASMINEチームではシミュレーションシステム（JASMINE シミュレータ）を開発している。ここで言うシミュレーションは、グローバルなデザインをモデル化して、全体的な誤差あるいは精度評



価を行うことである。鏡の大きさ、CCDの量子効率などの観測装置由来のパラメータや、衛星姿勢誤差のようなシステムパラメータを変化させることにより、観測で得られる生データの精度がどの程度になるかを評価する。さらに、これらのデータを用いて行われるサイエンスの精度はどの程度のもが期待できるかということシミュレーションする。この結果として、どういったサイエンスに、どの程度の知見を与えることができるか、ということをおおまかじめ評価することがこのシミュレータの目的である。

衛星のデザインとして、たとえば十分に大きな鏡を用いれば得られるサイエンスの精度は向上する。しかし、鏡が大きくなれば、衛星も大きく、重くなり、費用もかかる。逆に、あまり小さいおもちゃのような衛星を作っても、先端的なサイエンスはできない。その妥協点を探ることは、现阶段の重要な作業であり、このためには鏡の大きさなどといった衛星デザインのパラメータが、最終的なサイエンスに対してどの程度の影響があるかを知る手段が必要となる。

しかしながら、これらのパラメータと観測精度、あるいはサイエンスの成果の関係は、単純な式では表現できない。式で表すとかなり複雑になり、またパラメータの数も多いので、最適値の計算を電卓などに頼ることは現実的ではない。パラメータを入力することで精度を評価できるシステムがあると、評価効率は大きく向上する。単に、入力値を柔軟に変化させて、入力値から出力値を得て表示するだけであれば、単純なGUIプログラムに過ぎない。しかしながら、複数のパラメータのあいだに従属関係があったり、出力も単純な値である場合もあればグラフや画像である場合もある。そういった状況に柔軟に対応する必要があり、また一度構築したモデルを複数の評価の中で再利用できるようにする必要がある。

そこで、パラメータを「宇宙」「光学系」「検出器」「衛星システム」などの括りでモデル化し、それぞれのモデルの内部でのパラメータの従属関係は内部で処理する。衛星システムの検討には、さらに、あるモデルの出力パラメータが他のモデルの入力値になって誤差や精度が順次伝播してゆく様子を知るためのツールが必要である。こういったモデル化は、情報科学の言葉で言えば、依存性を表す有向グラフを構築するツールと、このグラフに沿って個々のモデルのパラメータの計算をして、次のモデルにパラメータを渡すということになる。我々は、問題を単純化するために、グラフを有向非巡回グラフに限定してこのシステムを構築した。グラフの構築には「箱」と「線」を用い、グラフの構築を視覚的に行うことができるようにした。我々は、このプロトタイプを製作した。起動画面は

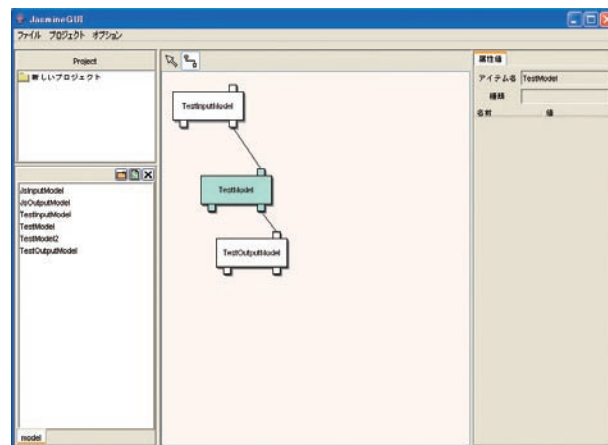


図-3 JASMINE シミュレータの起動画面

図-3に示す通りである。左下のウィンドウにJASMINE固有の光学系や検出器に相当するモデル、図や文字を表示するモデルなどを配置し、これらのモデルを選択して編集画面に配置し、モデルのパラメータ同士の接続をマウスで行うことができるようになっている。

ここまで一般化したとき、Berkeley大学で開発されたPtolemy IIと呼ばれる製品が存在することを知った。この基本設計は、我々のものと同じである。Ptolemy IIは非常に高機能で、さまざまな用途の利用に対応しており、パーツも豊富である。しかし、入力パーツの変化を常時監視して出力値に反映するようなグラフを構築すると非常に応答が遅くなるなど、JASMINEシミュレータの用途には不適切な部分もある。そこで、今後もJASMINEに特化したシミュレータのフレームワークの機能を拡張してゆく必要がある。

今後早急に行ってゆかなければならないシミュレーションとして、焦点面シミュレーションがある。JASMINEは光学観測であるが、星からのphotonは確率的に衛星に到達する。このphotonが検出器面上でどう像を結ぶかは、点像分布関数と呼ばれる確率分布関数で与えられる。さらに、検出器はすべてのphotonに反応するわけではなくて、波長に依存したある確率(90%程度)で反応し、CCD検出器の上での電荷の転送も確率的に(1/1000000程度)失敗する(焦点面でのphotonの分布の様子は図-4に示す)。こういった観測的なものだけでなく、衛星システムに関連する衛星姿勢擾乱、通信エラーなどすべてが確率的に与えられる。この確率をどの程度に抑える必要があるかというシミュレーションを

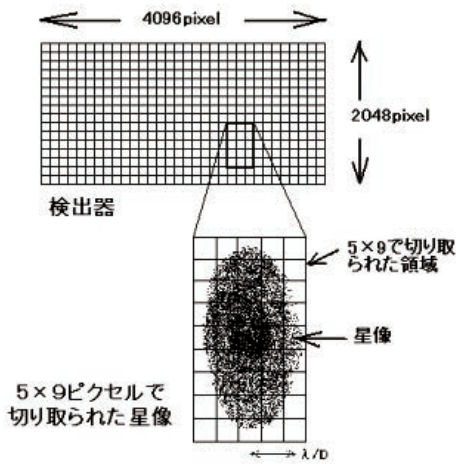


図-4 星が撮像されたときの CCD 上での photon 分布

行う必要がある。

前に構築したフレームワークは論理的依存性を管理する仕組みである。一方、焦点面シミュレーションでは確率的に起こる事象を時間的な順序に従って実行してゆく必要がある。事象を時間的に順序良く実行する仕組みを実装するために、ワークキューの構築を参考にした。いくつかの独立の確率事象（たとえば星からの photon 放出と衛星姿勢擾乱は独立である）に対して、乱数により時系列キューを発生させる。これらの複数のキューから、時間順序で事象を取り出し、事象を逐次処理することで、実際の衛星の動作に沿ったシミュレーションが可能となる。このキュー管理を行うパーツを前に実装したフレームワークの枠組みの中に構築すると、目的のシミュレーションが行えるようになる。

このように、JASMINE シミュレータではオブジェクト指向による設計技術を用いることにより、保守性の高

いプログラミングを行うことを心がけている。DAG を管理するフレームワークの構築では、UML 図を見ても分かる通り、いくつかの「パターン」を適用している。今後の拡張においても、積極的にソフトウェア科学分野で発展した技術を取り入れてゆきたいと考えている。

■ 今後の予定 ■

今後、この JASMINE シミュレータを実際に使用しながら、機能的にも使用性の上でも良いソフトウェアとして発展させることが必要となる。拡張性の面で十分に考慮されたかたちにより、今後の大型プロジェクトへの転用の可能性なども期待される。

このソフトウェアプロジェクトを成功させることは、こういったプログラミングスタイルを天文学の広い領域に根付かせるためにも重要である。JASMINE などの衛星プロジェクトはもとより、地上大型プロジェクト、理論のシミュレーションなどの分野においても、こういったソフトウェア開発技術がさらに浸透してゆくことを期待したい。また、今まで科学計算で培ってきた並列化などの高速化の技術を先端の情報科学の言葉で語れる理学研究者が増えてくれば、ここで培われたノウハウを情報科学の研究にフィードバックできるようになるかもしれない。

参考文献

- 1) Gouda, N., Tsujimoto, T., Kobayashi, Y., Nakajima, T., Matsuhara, H., Yano, T., Yasuda, N., Kan-ya, Y., Yamada, Y. and Ueno, M.: Introduction of Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration (JASMINE), IR Space Telescopes and Instruments, Proceedings of the SPIE (Mather, J. C. (ed.)), Vol.4850, pp.1161-1168 (2003).
- 2) JASMINE チーム: 赤外線位置天文観測衛星 (JASMINE) 計画第一回検討報告書 (2003).
- 3) Gamma, E., Helm, R., Johnson, R. and Vlissides, J.: オブジェクト指向における再利用のためのデザインパターン, 邦訳ソフトバンクパブリッシング (1999).
- 4) O'Mullane, W. and Lindegren, L.: An Object-Oriented Framework for GAIA Data Processing, Baltic Astronomy, Vol.8, pp.57-72 (1999).

(平成 16 年 11 月 15 日受付)

