

みさと天文台におけるインタラクティブ・リモート望遠鏡システムの構築

曾我真人^{*1}，豊増伸治^{*2}，奥野拓馬^{*3}，
下代博之^{*4}，田中俊成^{*5}，尾久土正己^{*6}，
田中英明^{*7}，坂元誠^{*8}

^{*1}〈和歌山大学システム工学部 〒640-8510 和歌山市栄谷 930〉

^{*2}〈みさと天文台 〒640-1366 和歌山県海草郡美里町松ヶ峯 180〉

^{*3}〈(元)和歌山大学システム工学部(現)日立ソフトウェアエンジニアリング(株)〉

^{*4}〈生石高原天文台 〒643-0131 和歌山県有田郡金屋町大字生石 803〉

^{*5}〈日本大学原子力研究所 〒274-8501 船橋市習志野台 7-24-1〉

^{*6}〈和歌山大学/みさと天文台〉

^{*7}〈美里町情報通信センタ 〒640-1366 和歌山県海草郡美里町松ヶ峯 180〉

^{*8}〈西はりま天文台 〒679-5313 兵庫県佐用郡佐用町西河内 407-2〉

1996年から和歌山大学とみさと天文台が協力して進めてきたリモート望遠鏡システムのプロジェクトについて解説する。インターネット経由で利用できるライブ映像配信型リモート望遠鏡としてはおそらく世界初となった第一世代のシステムと、現在、構築中の第二世代のシステムについて述べる。第二世代のリモート天文台システムでは、GUIやドームに数々の工夫をこらしている。

1. はじめに

本稿はインターネット望遠鏡関係の特集の中の一つとして掲載される、と聞いている。したがって、他稿の多くの著者は、天文学か天文教育を専門とする、天文出身の人たちであると思われる、おそらく、解説記事に近い書き方をされると思われる。そこで、本稿では、某放送局のプロジェクト○ではないが、前半は、あえて第一世代のリモート望遠鏡システムの開発過程をドキュメンタリー風にとまとめた。そのあと、現在開発中の第二世代のリモート天文台システムについて述べる。本稿は共著であるが、主に、情報工学出身のシステムの開発担当者が執筆を担当しているので、他稿とは異なった視点でリモート望遠鏡システムを

とらえていただけたならば幸いである。

2. 第一世代のリモート望遠鏡システムの開発

今では、望遠鏡をインターネットにつないで遠隔地から操作し、天体を観察するというようなシステムは、とりたてて話題になるような新鮮さは失われてしまった。しかし、我々のグループが和歌山県のみさと天文台でリモート望遠鏡システムの研究を始めた1996年は、インターネットが一般に普及し、Webが爆発的に普及する途上であった年である。ブラウザも初期のNetscapeが主体であり、まだ、世の中に存在するほとんどのホームページが単純に情報をHTMLで記述して公開しているだけの時代であった。ちょうどその頃、

今ではおなじみの CGI (Common Gateway Interface) という技術が米国で普及し始めていた。この CGI という仕組みについて、ある ML (メーリングリスト) で知った筆者は、これは大変すばらしい技術だと感じた。情報を単に一方方向で発信するだけでなく、インタラクティブな Web ページの構築が可能だからである。以前からコンピュータの教育利用を研究対象の一つにしていたので、これまで、スタンドアローンのマシンの上で動くように作られるのが普通であった学習支援システムが、将来、Web 上に構築され多くの学習者に同時に利用されるようになるのではないかと直感した。CGI は、単純にマウスボタンのクリックのようなイベント情報だけでなく、空欄に書き込んだ文字列をサーバーに送信する仕組みも備えている。したがって、学習者が問題の解答を文字列で記入し、サーバーで添削して結果を返すということも可能になる。実際、90年代の終わり頃から、多くの学習支援システムが Web 上に構築され、e-learning という巨大市場を世界中に形成するまでに発展している。

話は前後するが、みさと天文台は、リモート望遠鏡システムの第一バージョンができあがる前年の 1995 年 7 月 7 日に開台している。開台の直前に、みさと天文台に引くインターネットを和歌山大学に接続するため、台長の尾久土が和歌山大学を訪れたことから、みさと天文台と和歌山大との協力関係が始まった。このあたりの詳しい経緯は、尾久土の著書³⁾に詳しく書かれている。それ以降、百武彗星の Web ページの構築と写真の公開などから始まって、リモート望遠鏡システムの開発においても、プログラムの構築などを主に和歌山大学が担当し、みさと天文台が実践実験を行うという形で、今日まで協力関係が続いている。

リモート望遠鏡システムの開発については、どのようにすればそのシステムが構築できるか、最初はとまどった。しかし、まもなく、これも CGI を使えば容易に解決できることがわかった。初め

て CGI のプログラミングを始めたのは、百武彗星の Web ページを作ったときである。1995 年といえば、Web が普及し始めた年であり、国内では、まだ、CGI の本は一冊も発行されていなかった。そこで、ML から得た断片的な情報をたよりに、手探りの状態からスタートした。C 言語による CGI の簡単なサンプルプログラムが、当時 Netscape 等の Web 技術を開発していたイリノイ大学で公開されていたので、それをダウンロードしてきて、ソースプログラムの解析を行った。そして、それを改良して、目的に応じた CGI プログラムを作る技術を身に付けた。

最初にとりあえずできあがったシステムは、Web 上に構築したインタフェースから、天体の座標値を赤経、赤緯で入力し、CGI によってサーバーに送り、望遠鏡サーバーがその値を読み取って、みさと天文台の 105 cm 反射望遠鏡の鏡筒をその方向に向けるというものであった。望遠鏡サーバーにおいて、ユーザーの入力座標値を受け取って望遠鏡を目標天体へ動かすための数千行に及ぶ望遠鏡コントロールソフトウェアは、日大の田中俊成が作成を担当した。第一世代のシステムの成功は、この部分の貢献がもっとも大きかったと思われる。

このシステムは、1996 年の西はりま天文台で開催されたプロとアマの合同研究会にて、電話回線経由でみさと天文台の望遠鏡を遠隔操作するデモによって、一般に認知された。使い勝手は大変悪かったが、公共の回線を使って途中で人手を介さずに遠隔操作できる望遠鏡としては、国内で初めての試みであった。また、接眼部に小型 CCD カメラを取り付け、天体のライブ映像を配信できるリモート望遠鏡としては、おそらく、その時点では、世界初ではなかったかと思われる。その後、翌年には、赤経赤緯方向に微動させることができるボタンを透過 GIF を用いて作成して追加し、また、尾久土により接眼部カメラとドーム内カメラの切り替えリンクも付加されて、使いやすい

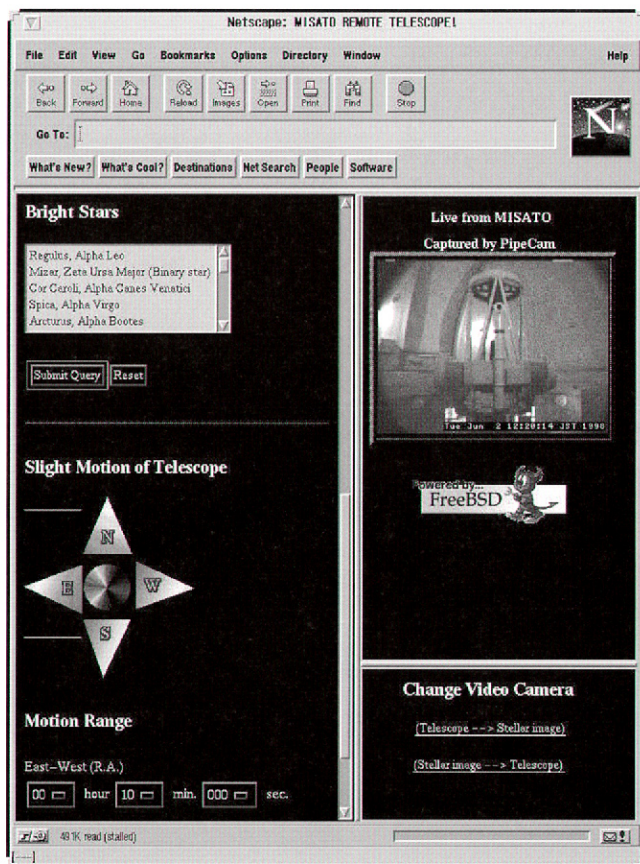


図 1 第一世代のリモート望遠鏡システムの Web 上のユーザーインターフェース。左側に、選択可能な天体のリストや微動ボタンがある。右側には、ライブ映像が映っている。ライブ映像は、天体のライブ映像とドーム内カメラによる望遠鏡映像を右下のリンクによって、切り替えることができる。最初は、この写真のようにドーム内カメラで望遠鏡のライブ映像を見せておき、天体を選択後、鏡筒が目標に向かって始動するところを見せ、目標天体をとらえた後に、天体のライブ映像に切り替えて利用する。

ユーザーインターフェースになった (図 1)。

あとから調べてみてわかったことだが、冷却 CCD を取り付けたリモート望遠鏡は、すでに 1994 年に英国のブラッドフォード大学の J. Baruch らのグループによって完成されていた²⁾。冷却 CCD を使うと、暗い天体の撮影ができる反面、ライブ映像を配信することができない。このあたりは、一長一短である。ブラッドフォード大学のシステムは、ユーザーは Web 上で撮影したい天体名を選択し、露出時間などを入力しておくだけである。あとは、システム側が、晴れた日を選んで、その天体を自動撮影し、Web 上にその画像を

自動アップロードしてくれる。すなわち、非常にインテリジェントなシステムであり、ロボティック・テレスコープと呼ばれている。しかし、ライブ映像が見られなければ、ユーザーにとって、「自分で望遠鏡を遠隔操作している」という実感は得られない。そして、せっきくのインターネットの双方向性の利点が活かさない。そこで我々のグループは、小中高校などで利用してもらい、天体観察に興味をもってもらうことを第一の目的として、ライブ映像配信を中心に備えたインタラクティブ・リモート望遠鏡を構築することにしたわけである。第一世代のシステムには、本稿の共著

者以外に、多くの人に尽力していただいた（謝辞参照）。尾久土が全国規模で人材を探し、適材適所に協力していただいたことが、成功の大きな鍵になっている。

この第一世代のリモート望遠鏡システムは、1997年から1999年にかけて、尾久土により知名度も向上し、国内外のさまざまな場所から利用された。和歌山や京都の小中高校、海外からは、HOU³⁾に参加しているドイツのミュンヘン工科大学、スウェーデンのストックホルム天文台、米国のカリフォルニアやヤーキス天文台などから利用してもらった。利用ごとに、みさと天文台の豊増、田中（現在は美里町情報通信センター）、坂元（現在は西はりま天文台）らが準備を行い、そして、CU-SeeMeのライブカメラに出演した。1997年当時、みさと天文台のリモート望遠鏡システムは、国内では唯一のシステムであったので、特に、海外からの時差を利用した利用希望が多かったのである。

2000年2月には、ドイツのフランクフルト日本人学校に赴き、小学校5年生26名を対象に、時差を利用した理科授業実験を行い、評価を行った。



図2 フランクフルト日本人学校での時差を利用した授業実験風景。学校からインターネットへの接続は128bpsであるので、回線容量のパンクを防ぐため、1台のPCでみさと天文台のリモート望遠鏡システムに接続し、そのモニター画面をプロジェクターでスクリーンに投影して授業実験を行った。



図3 フランクフルト日本人学校での授業実験時のモニター画面。上弦の月を観察している。画面の右上にユーザーインターフェースのウィンドウが、左上に、Activiewというソフトで配信された月の広角映像が、下にCU-SeeMeによるチャットと、みさと天文台のスタッフの映像が映っている。

評価実験の詳しい様子と結果は、文献4に掲載されている。ドイツが13~15時の授業時間帯に、みさと天文台は21~23時であり、夜の土星と月のライブ映像を見せながら天文の授業を行った(図2, 3)。特に、月の観察では、月面の一部の映像が見えるため、微動ボタンを利用して、生徒に望遠鏡を操作してもらった。この学校からインターネット接続点までの回線が128 bpsと細いので、ボタンを押してから望遠鏡が始動する映像が送られてくるまで、約8秒のタイムラグがあった。しかし、それでも事後のアンケート調査では、天体のライブ映像を見ることや望遠鏡が動く様子を見ることは大変興味深く面白い、と評価してくれた生徒が多かった。

3. 第二世代のリモート天文台システムの開発

2000年夏に天文台の105 cm 望遠鏡のコント

ロールボードを新型のものに交換したため、それまでのコントロールソフトが動かなくなった、このため、第一世代のリモート望遠鏡システムは引退することになった。また、105 cm 望遠鏡は、巨大であり、かつ、高価でもあるので、リモート利用する場合でも、天文台スタッフが常に監視をしながらの利用であった。さらに、ドームについてはリモート操作できないという欠点もあった。そこで、これらを解消するため、25 cm のミード社製シュミットカセグレン望遠鏡を用いて、リモート利用専用のリモート天文台システムの構築を現在行っている途中である。

3.1 GUIの開発

この第二世代のリモート天文台システムのグラフィカル・ユーザインタフェース(GUI)は、すでに1999年から2001年にかけて、当時、和歌山大学システム工学部の大学院生だった奥野らにより構築されている。このGUIの最大の特徴は、図4

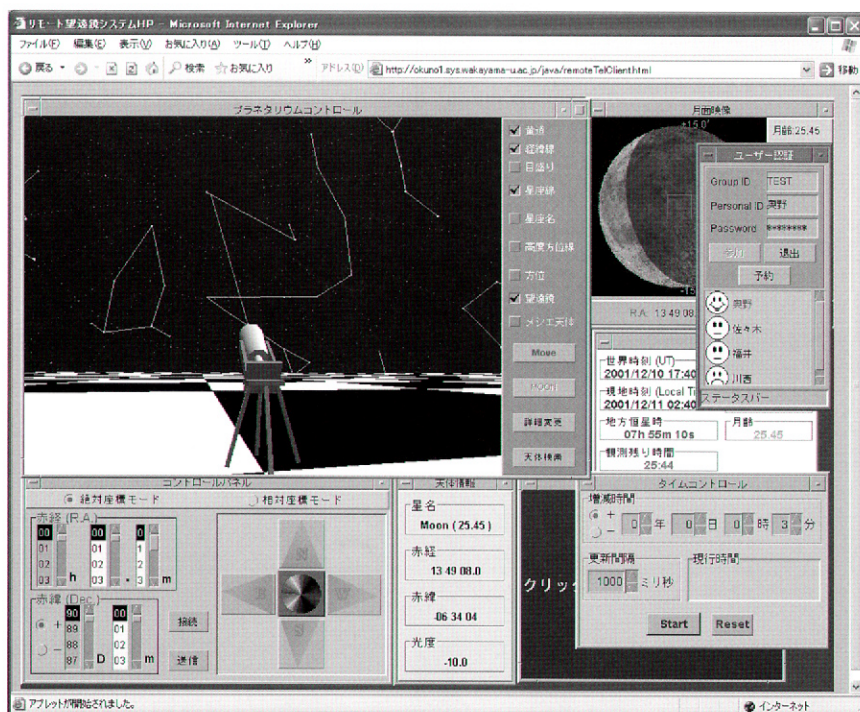


図4 第二世代リモート天文台システム用のGUI。左上に仮想プラネタリウムと仮想望遠鏡モデル、右上に月面インタフェース、下部に微動ボタン、右に利用者待ち行列表示用ウィンドウが見える。

に示すように、3次元仮想空間にプラネタリウムと仮想望遠鏡を備えていることである。一般に、リモート望遠鏡システムは、ユーザーがいる場所と、望遠鏡が設置されている場所が遠く離れているので、両地点の星空は異なる。そこで、ユーザーは、望遠鏡が設置されている場所で観測できる天体を知る必要がある。そのためにグラフィカルなプラネタリウムは必要不可欠となる。もっとも、ここまでなら、各地の天文台の望遠鏡が、ローカルにサポートしている制御ソフトにも、プラネタリウムのようなGUIは用意されているので、さほど新規性は感じられないかもしれない。しかし、本システムは天文初心者ユーザーとして想定しているので、中心に3次元の仮想望遠鏡モデルを設置している。ユーザーは、観察したい天体をプラネタリウム上でマウスによりクリックする。すると、そのコマンドがリモート天文台システムに送信され、実際の望遠鏡が始動する。同時に、GUI上の仮想望遠鏡もプラネタリウム上の目標天体に向かって始動する。この仮想望遠鏡は、単なる遊び的要素だけでなく、次のような利点がある。

(1) 仮想望遠鏡が向いている方向へ視線ベクトルが表示されているので、望遠鏡が空のどちらを向いているのかを迅速に知ることができる。一方、一般の天文台の望遠鏡制御ソフトに付属のGUIでは、全天の星空が円形に表示され、その中に、現在、望遠鏡が向いている位置と、目標天体の位置をカーソルで表示するものが多い。この場合、全天を一覧表示しないと、カーソルを見つけて出すのが困難だが、そのために、周辺部の星座は形状がゆがんでしまう。星座をゆがまないようにするには、表示範囲を限定するしかないが、そうすると、カーソルが表示範囲外にある場合、望遠鏡がどちらを向いているかわからない。そこで、本GUIでは、プラネタリウムは、全天のうちの一部の星空を表示してゆがみを防ぐと同時に、仮想望遠鏡から視線ベクトルを伸ばし、望遠鏡が向い

ている方向が、表示範囲外であっても、容易にその方向を認識できるようにした。

(2) 仮想望遠鏡モデルは、赤道儀を再現しているので、赤道儀の仕組みを学習者に教えるための教材としても利用可能である。

(3) 仮想3次元内にプラネタリウムと仮想望遠鏡モデルが構築されており、視点移動もできるため、実際の星空を観察している実感を、ある程度、ユーザーが得ることができる。

また、本GUIは、月面観測用に月面インタフェースを用意している。月は、視直径が変化し、また、ひょう動(月の首振り運動)により、クレータの見かけの位置も変化する。したがって、あるクレータをピンポイントで望遠鏡の視野に捕らえようとする、視直径やひょう動を正確に計算する必要がある。本GUIでは、まず、月面の3Dモデルを作成しておき、計算によって得られた視直径ひょう動の方向と大きさの値を用いて3Dモデルを回転させ、それを2Dに投影したデータを月面インタフェースとしてユーザー側に送信している。月面の3Dモデル作成時には、NASAのデータを利用してテキストチャッピングを行っている。したがって、月面の細かい地形まで、比較的よく再現されている。

ユーザーは、月面インタフェース上にある赤い枠をドラッグし、観察したい場所にもっていったから、ボタンをクリックすれば、望遠鏡が月面上のその場所をピンポイントで導入することになる。これらの利点を備えた仮想プラネタリウムGUIは、プログラミング言語としては、Javaとその3DライブラリであるJava3Dを用いて構築されている。クライアント側には、Java3Dのプラグインソフト(フリーソフト)をインストールするだけで、利用可能である。

3.2 ドームの開発

みさと天文台の敷地の一部に、生石高原天文台の下代が独自開発したドームを設置して、リモート天文台システムを構築中である。ここでは、そ

のドームについて解説する。主要寸法などは、次のとおりである。全幅 1650 mm、全長 3400 mm、全高 2170 mm 可動時最大高さ 3060 mm、ドーム直径 1500 mm、重量 920 kg、定格動力 0.5 kVA である。リモート望遠鏡用格納ドームの要求仕様は、25 cm クラスのシュミットカセグレン望遠鏡が格納できること、遠隔地で無人運転が可能なこと、台風などの風雨に耐え雨漏れをしないこと、停電時に自動的にドームが閉まること、極力故障の少ない機構とすることなどであった。

次に、設計について述べる。ドーム回転制御をしないスライディングルーフ型の予定であったが、なるべく広い視野を確保でき、なおかつ雨漏れのない屋根構造を追求した結果、半球のドームをヒンジにより 180 度反転して開閉する構造が最適であると考えた。ドーム屋根は炭素鋼板 $t=3.2$ mm の溶接構造とし、屋根を可動させるのに十分な強度を確保した。腰壁も同じく炭素鋼板で製作し、屋根と壁の取り合い部には高さ 50 mm の水返しと水切りを設け、雨仕舞いを完全なものとした。

ドームの駆動装置には、空気圧アクチュエータを使用した。停電時であっても、空気だめに溜まっている空気圧で 5 回程度の開閉が可能である。また、動きの加速、減速や停止する直前のショック吸収など無理のない自然な動きを簡単に実現できるのも空気圧動力の特徴である。また、非常停止やドーム内部からの手動操作も、空気圧回路で制御しているので、停電時も正常に動作する。計算機からの指令をリレーでいったん受けて電磁弁を開閉することによりドームを開閉する。停電や故障で指令信号が遮断すると、電磁弁の励磁が切れて弁が復旧し、アクチュエータがドームを閉める方向に動作する。

架台鉄骨は H 型鋼で製作し、据付運搬は架台ごと重機で吊り上げることができるようにした。床板はチッカープレート $t=4.5$ mm を溶接止めとして、架台の水平剛性を高めた。

次に、実際の制作について述べる。直径 1500 mm の半球ドームは $t=3.2$ mm と比較的薄いので、熱間成型ができず、4 枚に分割して溶接構造とした。そのために若干のひずみが生じ、このひずみを矯正するのに時間がかかった。架台部分は全溶接構造で、駆動装置の取り付け部は大型マシニングセンタで加工し、芯出しを完全なものとした。塗装は、シアナミド鉛錆止め塗料 2 回塗りの上にマリンペイント 2 回塗りとした。色は直射日光による熱を考慮し白色とした。

この格納ドームは架台一体型なので、工場で調整しておけば据付によるずれはごくわずかである。みさと天文台での据付は、芝生の上にコンクリートブロックを 4 隅に置き鉄板でレベル調整をした上に据え付けた。普通の土質であれば、基礎コンクリートは不要であると思われる。駆動部分が手で軽く動くように、ヒンジの取り付けを調整し、腰壁とドーム屋根の芯を出して固定して完成である。

このリモート望遠鏡用格納ドームは、構造が簡単で雨漏れがほとんどないのが特徴である。また、スライディングルーフに比べて視野を広く確保できた。空気圧駆動を採用したことにより、高信頼性で安全性が高く、停電時の動作も確実である。

4. 現 状

第二世代のリモート天文台システムの GUI は、実は 2 年ほど前にすでに奥野によって大部分ができていた。にもかかわらず、リモート天文台の設置がここまで遅れているのは、ドームの設置費用が見いだせなかったのと、人手不足による。幸い、2002 年に行われた関西ブロードバンド活用術企画コンペにて、豊増らがリモート天文台システムの構想と GUI のデモンストレーションを取り入れて応募した「星のお兄さん発掘事業（インターネット望遠鏡を使った参加型星空観望会）」が、見事最終審査を通過して事業費を獲得し、前述の

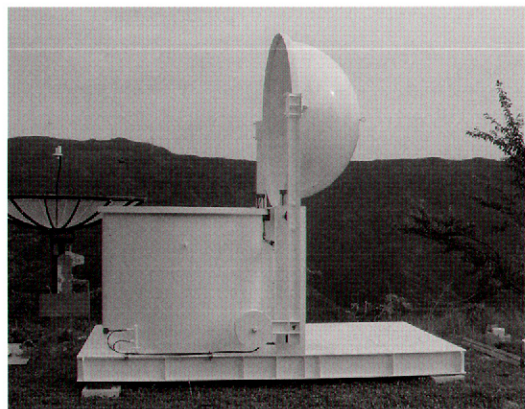


図5 第二世代のリモート天文台システム用のドーム。下代による設計・開発で、炊飯器のようにふたを空気圧で開閉するユニークな方式である。停電時にもタンク内のエアでドームを閉めることが可能である。

ドームを開発・設置することができた。気がかりなのは、GUIの開発者の奥野が、すでに和歌山におらず、今後、協力を得られないことである。しかし、何とか、開発されたGUIを活かして、リモート天文台システムを実用レベルまでもっていきたいと考え、現在、少人数ながらも努力しているところである。

5. 今後の展望

今後、リモート天文台は、まだ、改良の余地があるのだろうか？ リモート天文台を利用した天文教育カリキュラムの開発は、読者に専門家が多いと思われるのでお任せすることにして、ここでは、情報工学屋の立場から、未来を概観してみる。コンピュータ関連の歴史を振り返ってみると、80年代のPCのハードの開発と普及、80年代後半の人工知能ソフト、90年代のインターネットのインフラ整備とWebの普及で現在に至っている。ハード、ソフト、インフラの三つが周期的に繰り返され、およそ20~30年で一巡するという説がある。これから2010年にかけては、ハード開発の時代であり、ユビキタスコンピューティングの時代である。ユビキタスとは、「いつでも、どこで

も」という意味があり、日常生活のあらゆる場所にICチップが導入され、生活が便利になると予想されていて、現在、ユビキタス用小型ICチップの開発が進んでいる。広くとらえれば、モバイルもユビキタスの一つとも考えられる。携帯電話はモバイル機器の代表だが、今後、携帯電話は機能が高度になるにつれ、携帯型高度情報端末に変化していくだろう。そうすると、リモート天文台システムも、そのような携帯型高度情報端末から利用できるように改善しなければならない。

また、ユビキタスを広くとらえた場合のもう一つのキーワードとして、ウェアラブルコンピューティングがある。ウェアラブルとは、「体に身に付けることができる」という意味である。たとえば、めがねのように装着して、ディスプレイされた情報を読み取ることができる小型ヘッドマウントディスプレイも開発されてきている。こういう機器をリモート天文台システムと組み合わせると、面白い応用システムが考えられ、筆者らも現在取り組んでいる途中である。機会があれば、別稿で紹介したいと思う。

以上、みさと天文台のリモート望遠鏡システムの開発史を振り返ってみた。早いものですでに8年も経ってしまった。実に多くの人の協力に支えられたプロジェクトだということを改めて感じ、深く感謝する次第である。昨今の大学改革で、国立大学までが特許などの取得に走り、研究成果を即座に公表しづらくなってきている。しかし、やはり、成果を公共の議論の場であるPublic Domainに迅速に戻し、お互いに相乗効果で刺激を与え合い、新しいアイデアを出していくことが重要なのだと、このプロジェクトを振り返ってみて感じた。

謝辞

第一世代のシステムの成功は、本稿の共著者以外にも、多くの人々の協力で実現している。望遠鏡サーバーのLinuxの不具合を解消していただ

いた九州大学の岡村耕二氏, みさと天文台でインターネット関連の技術を提供していただいた佐賀大学の渡辺健次氏, デモでご協力いただいたみさと天文台の矢動丸 泰氏, フランクフルト日本人学校での評価実験で1999年11月のLiveLeonids 99でシチリア島からの流星中継プロジェクトでもご協力いただいた日本政策投資銀行フランクフルト駐在事務所の牧野光朗氏に大変お世話になった。また, 当時, 同校の教諭をされていた原田法人氏, 今木敏浩氏, 高橋慈郎氏をはじめとする同校の方々には大変お世話になった。この場を借りて深謝します。

参考文献

- 1) 尾久土正己, 1999, インターネット天文台, 岩波書店
- 2) Cox M., J. John E., Baruch F., 1994, Robotic Telescopes: An Interactive Exhibit on the World Wide Web, 2nd Int. Conf. of the World Wide Web
- 3) Pennypacker C., 1998, Hands-On Universe and Plans for Large-Scale Internet-Mediated Teacher Training, Astronomical Education with the Internet (Universal Academy Press, Inc.), pp. 45-60
- 4) 曾我真人, 尾久土正己, 豊増伸治, 田中俊成, 田中英明, 坂元 誠, 矢動丸泰, 原田法人, 今木敏浩, 牧野光朗, 渡辺健次, 2001, 教育システム情報学会誌 Vol. 18, No. 3, 4

Development of Interactive Remote Telescope Systems at the Misato Observatory

Masato SOGA¹, Shinji TOYOMASU², Takuma OKUNO³, Hiroyuki GESHIRO⁴, Toshinari TANAKA⁵, Masami OKYUDO⁶, Hideaki TANAKA⁷, Makoto SAKAMOTO⁸

¹ Faculty of Systems Engineering, Wakayama University, 930 Sakaedani, Wakayama 640-8510, Japan

² Misato Observatory, 180 Matsugamine, Misato, Wakayama 640-1366, Japan

³ Hitachi Software Engineering Co., Ltd.

⁴ Oishi-kogen Observatory, 803 Oishi, Kanaya, Wakayama 643-0131, Japan

⁵ Atomic Energy Research Institute, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funahashi 274-8501, Japan

⁶ Wakayama University/Misato Observatory

⁷ Information Communication Center of Misato Town, 180 Matsugamine, Misato, Wakayama 640-1366, Japan

⁸ Nishiharima Astronomical Observatory 407-2 Nishigaichi, Sayo-cho, Sayo, Hyogo 679-5313, Japan

Abstract: This paper describes the project of remote telescope systems developed by Wakayama university and Misato observatory. This includes the first version that could broadcast live pictures of stars, and the second version that will support interesting GUI and a dome.