

可変形状トラスを用いた可動型構造物の開発

—2005年愛知万博可動モニュメントへの適用—

井上文宏 諸戸竜一
栗田康平 古屋則之

Development of Adaptive Structure using Variable Geometry Truss

— Application of Movable Monument at Expo 2005 —

Fumihiko Inoue Ryuichi Moroto
Kohei Kurita Noriyuki Furuya

Abstract

This paper describes a large-scale movable monument exhibited at the International Expo 2005 Aichi, Japan, as the first application of an adaptive structure using a VGT mechanism. This monument is composed of three identical movable towers comprising four truss members connected by VGTs at its joints. The VGT is an adaptive truss with an elastic actuator, which enables the monument's shape to be changed variably by controlling the length of each of its elastic actuators. In applying the VGT to the movable monument, security against accidents was examined and the evaluation of the structure's design was evaluated. During the 185 days of the Expo, the monument was operated continuously for about 13 hours a day, and there was not a single breakdown or accident. Continuous safe and excellent performance was achieved, and the monument received high praise from promoters and many attendees.

概要

可変形状トラスを利用した可動型構造物の初めての適用として、2005年愛・地球博長久手愛知県館で展示された大型可動モニュメントの構造概要および稼動状況について紹介する。可動モニュメントは3本の可動鉄塔から構成され、各鉄塔は独立して制御できるため、演出に応じて様々な形状に変化することができる。可動モニュメントの設計・製作にあたっては、構造評定を取得し、十分な安全性を確保する部材断面形状の選定およびVGTアクチュエータの仕様を決定した。また可動機構の制御システム、安全機構、管理・運用体制についても承認を得た。万博開催期間中の185日間、可動モニュメントは一度の故障・事故もなく安全で良好な連続稼働が実現され、関係者や多くの来場者から高い評価を受けた。可動モニュメントへの適用により、VGT機構を用いた可動型構造物の有効性および実用性を検証することができた。

1. はじめに

21世紀最初の国際博覧会である2005年愛・地球博では“自然の叡智”をテーマに人と自然との関わりを発見する様々な展示や催し物、また魅力ある建物が作られ、予想をはるかに超える来場者が訪れるなど、成功のうちに閉会した。その中で特に話題になった出し物の1つに様々な自動化されたロボットの活躍があろう。演奏するパフォーマンスロボット、接客や警備ロボット、掃除ロボットなどがあり、近未来のロボット社会をイメージさせる光景と考えられる。

一方、会場の中心部にあたる日本ゾーン愛知県館では伝統的なからくり人形と共にゆらゆら動く巨大な可動モニュメントが来場者を手招きしながらその存在感を表現していた（Photo 1）。これは“踊る指南鉄塔”と呼ば



Photo 1 愛知万博長久手愛知県館の概観
Overview of Aichi Prefecture Pavilion in Expo

れ、伝統と最先端の技術が融合した愛知のものづくり文化を象徴するものとして展示された。方式や形状は異なるが、ここにもロボット技術の活躍の場があり、万博全体を盛り上げていた。

ところでこのモニュメントは可変形状トラス(Variable Geometry Truss 以下VGTと記述)を利用した可動型構造物で、言わば多関節マニピュレータのように動く大型の構造型ロボットである¹⁾。VGTはFig. 1に示すようにヒンジ、伸縮部材および固定部材から構成されるトラス構造であり、伸縮シリンダの伸縮長を制御することで様々な形状を作り出すことができる。VGTは元々展開型宇宙構造物として開発が試みられたもので、宇宙空間における様々なミッションに対応するため、冗長性のある知的構造物や可変構造物として研究が進められてきた。前報ではこのVGTを応用した屋根形状が変化する半球状の開閉ドームについて、その基礎特性、縮小モデル実験および各種の実用化提案について報告した^{2) ~5)}。

本報文においては、このVGTを用いた初めての可動型構造物として、2005年愛・地球博長久手愛知県館で展示された大型可動モニュメントの概要について報告する。開発の経緯、設計・製作の詳細、稼働状況およびそれらの評価等について紹介する。

2. 可動モニュメントの概要

2.1 開発経緯

万博で展示されたモニュメントは、万博来場者を愛知県館へと招くウェルカムモニュメントとして、また愛知県のシンボルタワーとして開発の依頼があり、開発中のVGTを利用した可動構造物の応用として可動モニュメントの提案を行った。従来までの回転やワイヤー駆動等の可動形式に比べ、VGTでは可動の自由度が高く、構造的に安定しており、安全面でも十分な信頼性があると評価され、採用が決定した。

Fig. 2に可動モニュメントが設置された万博会場全体および長久手愛知県館の概略図を示す。愛知県館は会場中央の日本ゾーンに属し、日本庭園やかえで池に面した位置にある。会場の西ゲートから正面にあたり、グローバルループに併設しているため、来場者のアクセスが容易である。愛知県館はおまつり広場、大型劇場・舞台、中部広域交流館、管理棟からなり、管理棟の屋上に可動モニュメントは設置された。

2.2 建物概要

愛知万博で展示された建物全体は大型可動モニュメントと併設されたからくり演出装置から構成される。各々は独立に設計、製作、据付された機構であるため、ここでは可動モニュメントのみについて報告する。ただし、全体は内部の制御信号で結合されており、可動モニュメント単体および両装置の協調による様々な稼働演出が実施された。

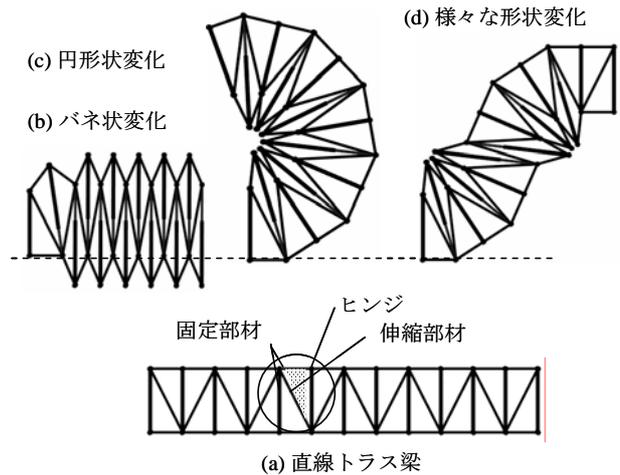


Fig. 1 VGTを用いた梁部材の形状変化
Basic Transformation of Beam Shape Using VGT

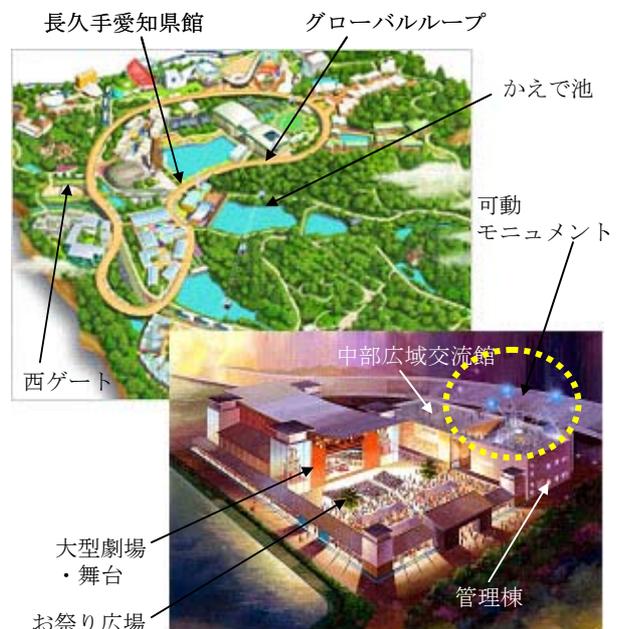


Fig. 2 万博会場全体および愛知県館の概略図
Overall Map of Expo Site and Aichi Pavilion

Table 1 可動モニュメントの概要
Outline of Movable Monument

設置場所	愛知万博長久手愛地県館内
主要用途	可動式のモニュメント
構造種別	鉄骨構造 (一部伸縮シリンダーを含む)
基礎形式	建物屋上に架台を介して緊結
建物高さ	地上: 26.6m モニュメント: 18.0m
工期	2004年11月1日~2004年12月31日
使用期間	2005年3月25日~2005年9月25日 までの185日間

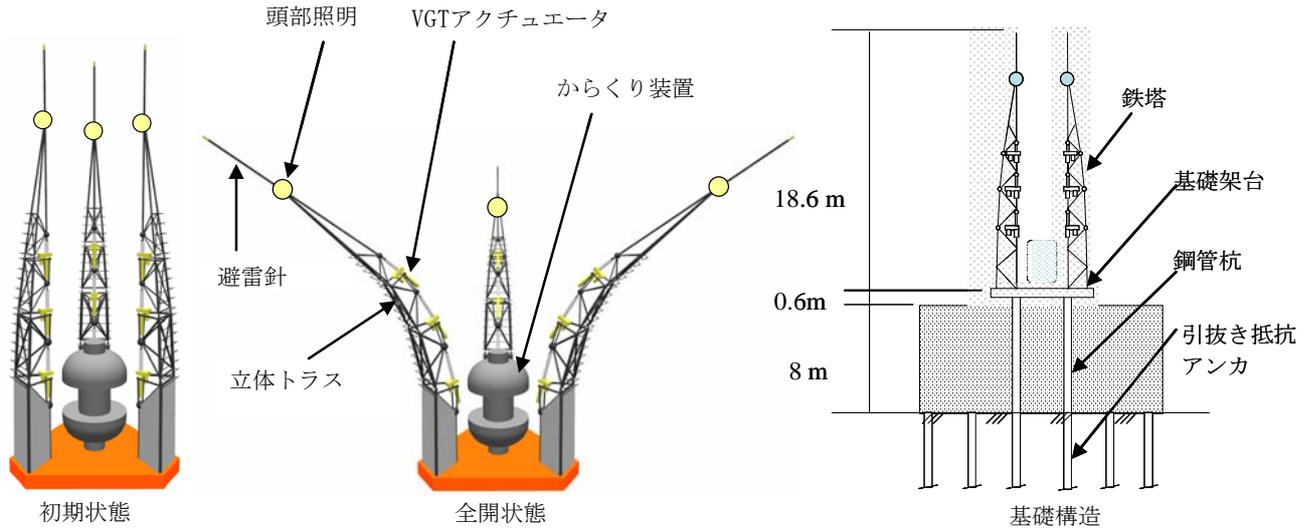


Fig. 3 可動モニュメント全体の概要図
Schematic Pictures of Entire Movable Monument and Base Structure

Fig. 3 に可動モニュメント全体の概要図を、Table 1 その建物概要を示す。全体は同一仕様の3本の可動鉄塔から構成され、円周に沿って120°間隔で据付けられている。1基の鉄塔は全長18m、4個のフレームと3台のVGTが各々結合されている。各フレームは立体トラス構造からなり、外側はヒンジ、内側は伸縮アクチュエータが取り付けられ、伸縮長に応じて全体形状が変化する。またモニュメントの先端部には頭部照明があり、さらに意匠を考慮した避雷針が設置されている。基礎部は建物2階屋上より内部を貫通し、頑丈な基礎杭に達している。

2.3 モニュメントの設計

可動する構造物の設計にあたっては十分な安全性を検討する必要がある。そこで構造設計の公的審査機関より構造評定を取得し、安全性の確認を実施した。モニュメントの設計にあたっては、建物の屋上に設置した仮設工作物（装飾塔）に対する条件を使用し、各荷重に対して直立、全開、全閉状態に応じた弾性解析を行った。また各荷重の組合せに応じた設計応力を算出し、十分な安全性を確保する部材断面形状の選定、VGTアクチュエータの各仕様（荷重、速度、構造形式など）を決定した。設計荷重として以下を考慮し、荷重の組合せと部材設計目標をTable 2 に示す。

- ・固定荷重(G)：鉄骨、アクチュエータ、トラス重量
- ・積載荷重(P)：点検時等を考慮した積載荷重
- ・温度荷重(T)：温度変化による影響
- ・雪荷重(S)：開催期間、設置場所、構造物への積雪
- ・風荷重(W)：地域平均風速(32m/s)に基づく風荷重
- ・地震荷重(K)：屋上突起物に対する水平震度(1.0G)
- ・衝撃荷重(I)：最大速度での非常停止時にも衝撃荷重ただし、温度荷重、雪荷重、衝撃荷重は部材断面の決定への影響は小さく、解析および部材設計は省略した。なお、設計の詳細については関連文献を参照されたい⁶⁾⁷⁾。

Table 2 荷重の組合せと部材設計
Outline of Movable Monument

主荷重	荷重の組合	荷重検討	部材設計目標
長期荷重	G+P	○	長期許容応力
温度荷重	G+P+T	△	長期許容応力
積雪荷重	G+P+S	△	短期許容応力
風荷重	G+P+W	○	短期許容応力
地震荷重	G+P+K	○	短期許容応力
衝撃荷重	G+P+I	△	短期許容応力

○：部材断面の決定に影響を及ぼす荷重
△：部材断面の決定に影響を及ぼさない荷重

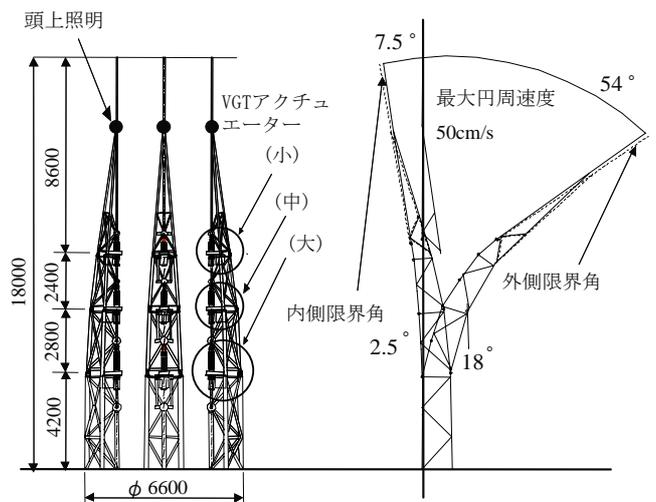


Fig. 4 VGTのアクチュエータ配置と鉄塔の可動範囲
Arrangement of VGT actuator and the movement range of monument tower

3. VGTと制御システム

3.1 VGTのアクチュエータ配置と構造

Fig. 4に可動モノメントに用いたVGTの配置とその可動範囲を示す。1基の鉄塔には出力が異なる3台のVGTが設置されており、各々のVGTは独立して制御することができる。伸縮アクチュエータはVGTの弦材位置に配置した。束材型に比べ剛性が高く精度性能が高いこと、荷重負荷が小さい範囲で扱うことができるなどの利点がある²⁾。各VGTの可動偏角は内側に2.5° 外側に18° であり、鉄塔の全体では外側に最大54°、内側に7.5°の範囲で可動することができる。

Fig. 5にアクチュエータの内部構造と安全機構を示す。サーボモータからの回転力を、歯車を介してボールネジに伝達し回転ロッドを伸縮させる。回転ロッドの先端はトラスノードに結合されており、回転ロッドの伸縮に伴ってモノメントの形状が変化する。トラスノードに接続するサポートは、回転ロッドの伸縮に伴って外部ストッパの内部を移動するため、万一回転ロッドが破損した場合でもサポート材が外部ストッパ内部に保持されるので、鉄塔本体は倒壊することなく安全な状態を維持することができる。

サーボモータの回転は通常エンコーダによって検出し、その値を基に回転ロッドの伸縮長を算出する。ロッドカバーには伸縮長の限界位置を検出する近接センサを設置されている。またサーボモータは防水カバーに覆われ、冷却ファンによって適切な温度状態を維持される。

Fig. 6に鉄塔に設置した各アクチュエータの伸縮長に対する軸荷重と偏角との関係を示す。軸荷重は偏角に対してほぼ比例の関係があり、引張での荷重域が広く、高い値となる。偏角が3~6°の範囲で圧縮から引張へと加重が変動する不安定領域がある。アクチュエータの伸縮速度は最大20mm/sであり、3台のVGTが同時に稼動した際の先端周速度は500mm/s以上にもなり、従来の動くモノメントに比べ極めてダイナミックで迫力のある動きが期待できる。

3.2 アクチュエータの安全機構と制御システム

可動モノメントは常に稼動状態にあることを考慮し、十分な安全を維持する制御システムを開発した。アクチュエータの制御にはモータの回転をフィードバックする位置検出制御を使用し、各アクチュエータの状態を常に管理・記録した。また各種の故障を想定して、チェックシートと復帰手法、各段階でのリスク・安全管理の確認を実施した。特に、アクチュエータの制御異常やロッド破損に対しては、Fig. 5に示すように、伸縮長に応じて5段階の安全装置や機構を導入し、対応を図った。

Fig. 7に操作システムおよび安全システムのフローを示す。モノメントの操作は初期操作を除いて自動運転で実施し、オペレータはシステムの安全な運行と維持管理業務が主となる。万一故障しても常にモノメントが

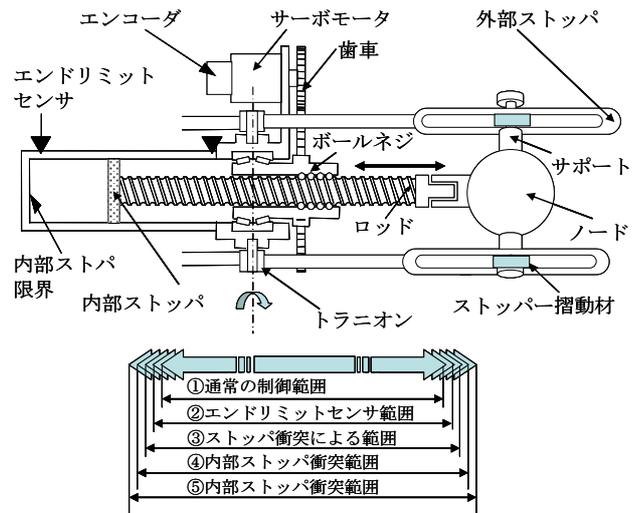


Fig. 5 アクチュエータの内部構造と安全機構
Inner Structure of the Elastic Actuator of VGT and related to Safe Mechanisms

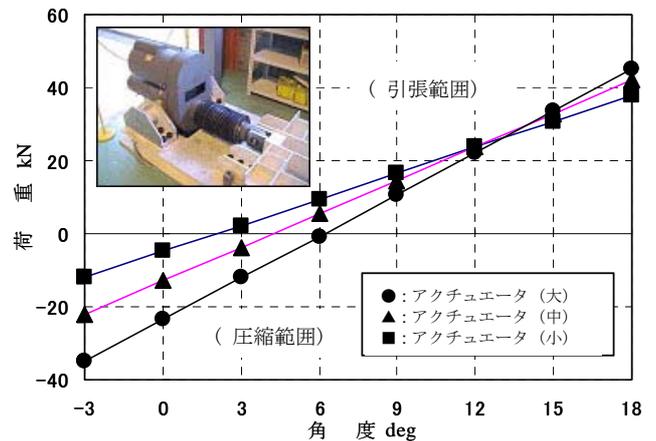


Fig. 6 アクチュエータ伸縮に伴う荷重と偏角の関係
Relation between the Load Acting on Rod and the Angle of each VGT Actuator

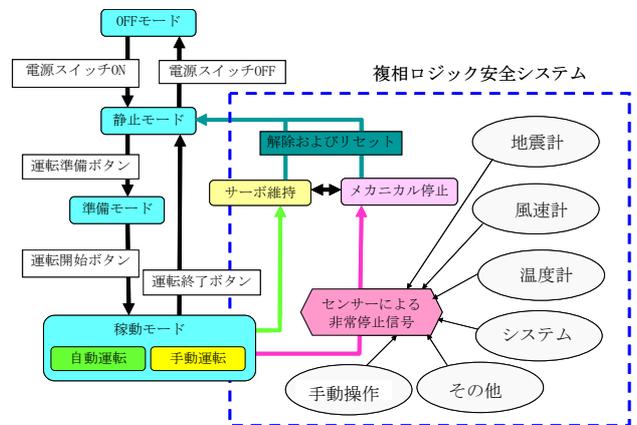


Fig. 7 操作システムおよび安全システムのフロー
Flowchart of the Operation System and the Monument Safety System

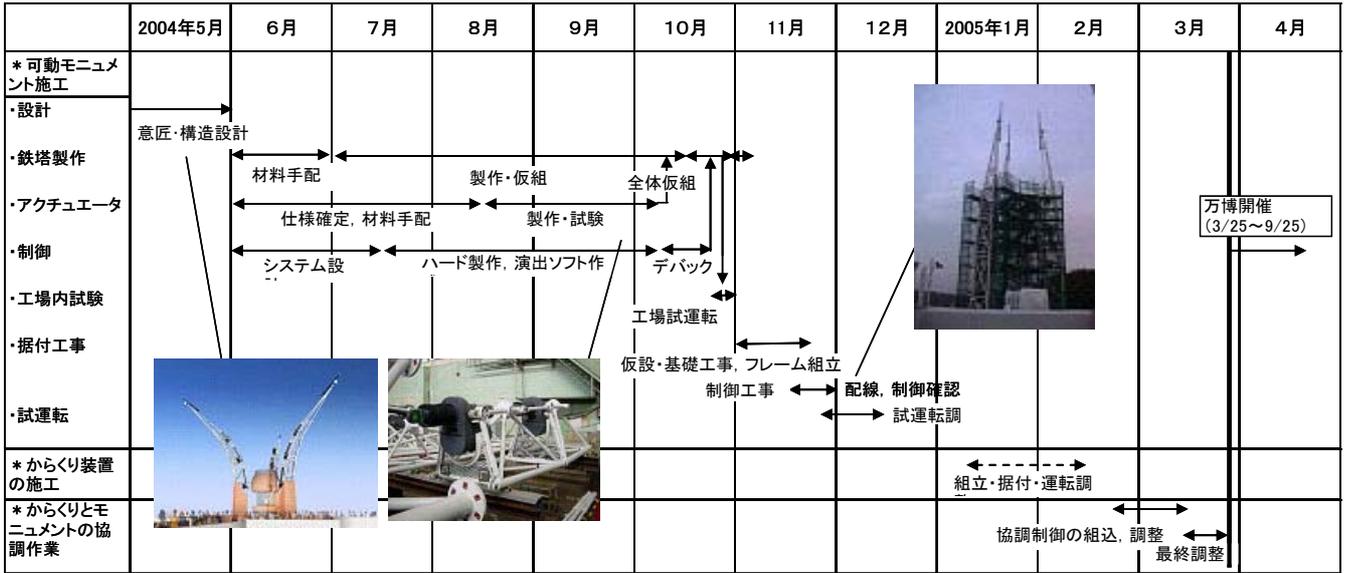


Fig. 8 可動モニュメントの製作・施工のスケジュール
Schedule for the Movable Monument Manufacture and Construction

安全な状態を維持できるための複数ロジックによるフェールセーフ機構を導入した。非常時の対応として、手動緊急停止装置の配備、地震・落雷・強風・豪雨時の自動停止・警報システムの導入、漏電・停電等に対するバックアップシステムを備えている。

また、モニュメントの維持管理を目的とした点検を期間中、1ヶ月毎に実施し、システムの制御チェックの他、アクチュエータの振動・騒音計測や構造物の検査を実施し、安全状態を維持できる体制を整えた。

4. 可動モニュメントの製作・施工

万博愛知県館管理棟の設計・施工スケジュールに合わせて、可動モニュメントの製作、関連施設の施工が開始された。Fig. 8 に製作・施工のスケジュールに示す。

モニュメントの設計終了後、本体のフレーム、基礎部の製作に入り、並行してアクチュエータの選定・製作・組立を実施した。万博現場での据付工事前にモニュメント1基について工場内の稼動試験を実施した。Photo 2 に稼動試験の様子を示す。試験では本体構造部、アクチュエータ、制御システムやテストプログラムによる動きの確認、非常時におけるシステムの安全性について検証した。モニュメントの稼動状況は良好であり、制御システム、各種の安全機構が適正作動することを確認した。

2005年11月よりモニュメントの現地組立、据付工事を開始した。その後、電気配線、制御システム等の施工を行い、試運転調整を実施して、Photo 3 に示すようにモニュメントの単体の作業を年内に終了した。

2006年1月より付属するからくり装置の現地組立、据付工事を開始された。また2月下旬から、からくり装置と可動モニュメントの協調演出のためのシステム構築、自動運転プログラムの修正を実施した。特にモニュメント単

体および協調演出のタイミング、故障や非常時の対応などの動作確認等が続けられた。3月中旬より、万博開催に向けた最終調整試験を実施し、システム全体が完成した。

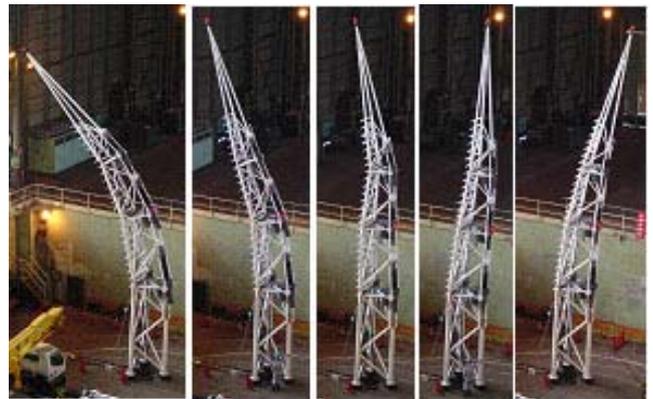


Photo 2 モニュメント1基の工場内の稼動試験
Trial Test of a Monument Tower in the Factory



Photo 3 可動モニュメント単体部分の完成状態
Finished Construction of Movable Monument



Photo 4 万博会場で稼働する可動モニュメントおよび来場者の様子
Overview of Movable Monument and Visitors at Expo Site

5. 可動モニュメントの稼働状況と記録

愛知万博2005の開催と共にモニュメント全体の運用が開始された。Photo 4 に稼働する可動モニュメントおよび来場者の様子を示す。からくり装置とモニュメントとの協調演出の状況であり、モニュメントは全開し、その中央部ではからくり装置（唐子指南車）による踊りが披露されている。多くの来場者がモニュメントの周囲に集まり、2つの展示物の演出を觀賞している状況がわかる。なお、夜間時には各展示物はライトアップされ、頭上照明と共にモニュメントフレームの不思議な動きが強調される。

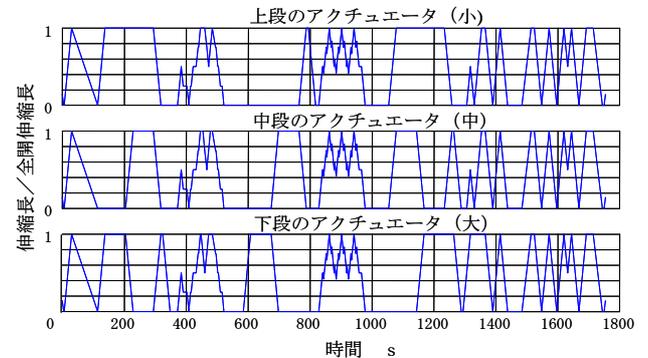
5.1 演出パターンと形状変化

モニュメントの動きや形状変化は演出パターンにより異なる。演出の1ループは30分毎に繰り返され、初めにモニュメントの単動演出（25分）、次いでからくりとモニュメントの協調演出（5分）が各々実施された。

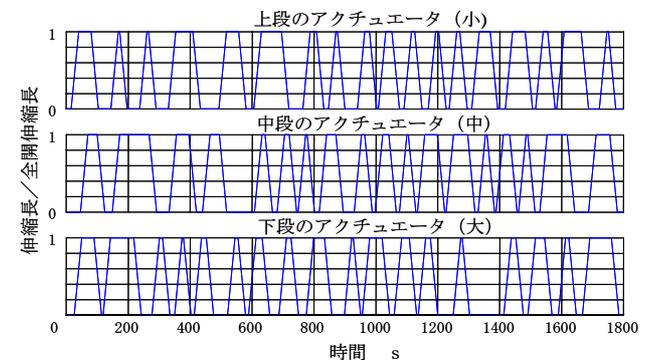
モニュメントの単動演出には複数の演出モードがあり、主に（1）予め動きの変化を入力した定型モード、（2）各アクチュエータの動きを乱数によって決める不定型モード、（3）自然のデータ（風速や温度、時間など）の状態をモニタし、その情報を基に伸縮長の速度や停止時間を決定する自然モードなどを使用した。Fig. 9 に代表的な演出モードに対するアクチュエータの伸縮長比ダイヤグラムを示す。定型モードではモニュメントの統一的な動きを表現することを意図した変化であり、不定型モードあるいは自然モードでは、鉄塔の各部分是不規則な形状変化を連続して行い、同一形状変化になることはほとんどない。一方、からくりとの協調演出では、からくり演出に合わせてモニュメント全体を開閉させるもので、

からくり演出を際立たせる役割を行っている。

Photo 5 に1ループにおけるモニュメントの演出パターンの例を示す。モニュメントは自然モードによる演出で稼働され、鉄塔の各フレームは不規則な動きを行い、様々な形状に変化する様子がわかる。一方後半ではからくり演出の開始と共に全開し、また終了と共に全閉する



(1) 定型モードの例



(2) 不定型モードの例

Fig. 9 アクチュエータの伸縮長比ダイヤグラム
Examples of Diagram for Actuator Length

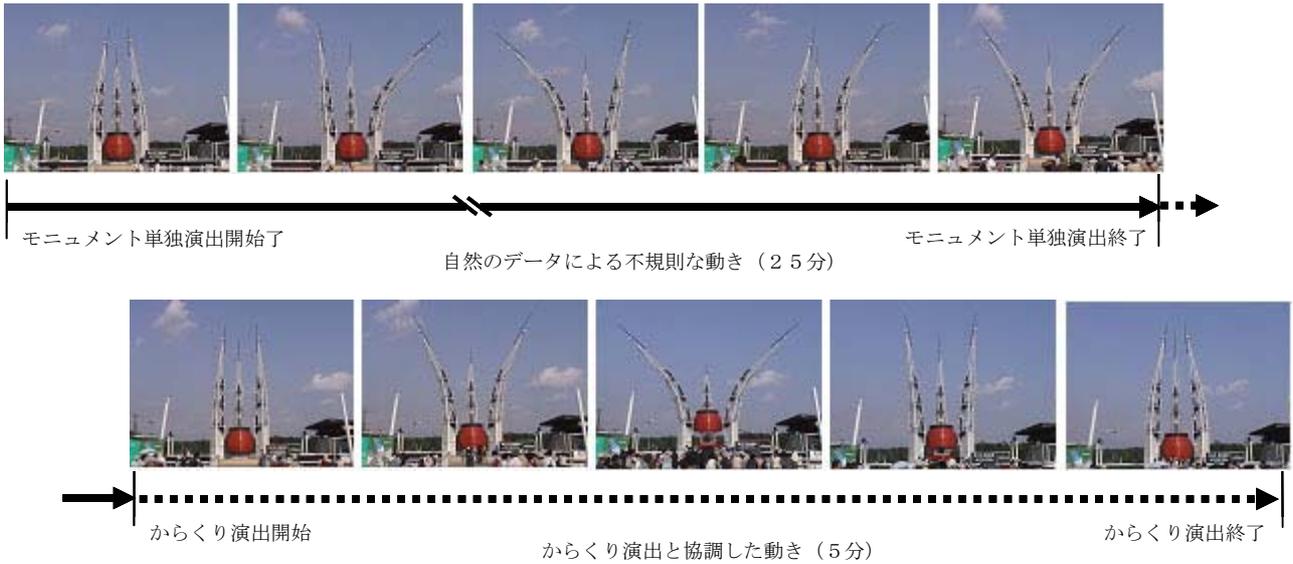


Photo 5 1 ループ演出におけるモニュメントの形状変化
Shape Changes of Monument According to a Loop Performance

シンプルな動きを行うが、全てのアクチュエータが高速で開閉するため、極めてダイナミックな動きが表現され、演出の開始と終了を来場者に知らせるサインとしての役目を果たしている。

5.2 稼働記録

万博開催中、モニュメントの演出は9時～22時、1日約13時間（26 ループ）連続稼働された。ただし、特別来場者やイベント時には特別演出が随時割り込める運用が可能であり、稼働計画は日々異なる。

Fig. 10 に可動モニュメントの稼働記録を示す。稼働回数は可動モニュメントの全閉から全開までの往復を1回として計算した。万博開催前期では、アクチュエータの平均速度をやや低速状態で稼働させ、また曜日毎に速度を変化するなど、モニュメントの状態を確認しながら運用を行った。中期から後半では速度を増加させ、曜日毎の速度を一定とした。後期では速度を最大として会場の盛り上がりへと可動モニュメントの動きを呼応させた。

万博開催中、点検・調整や悪天候等の影響により、モニュメントの稼働回数が減少する値を示す日もあったが、185日間一度の故障や事故もなく安全で良好な連続稼働が実現され、関係者や多くの来場者から高い評価を受けた。累積稼働回数は約50,000回に達し、当初の計画内で運用することができた。

万博終了後、可動モニュメントおよび付随する各装置、施設は現地より解体された。一方、モニュメントの製作に関わったメーカーおよび関連自治体から、モニュメントの再建が要望され、その再建が実現に至った。Photo 6 に再建され可動モニュメントの様子を示す。現在、モニュメントはVGTの耐久性能試験を兼ねながら、万博の記念塔として一般に公開されている。

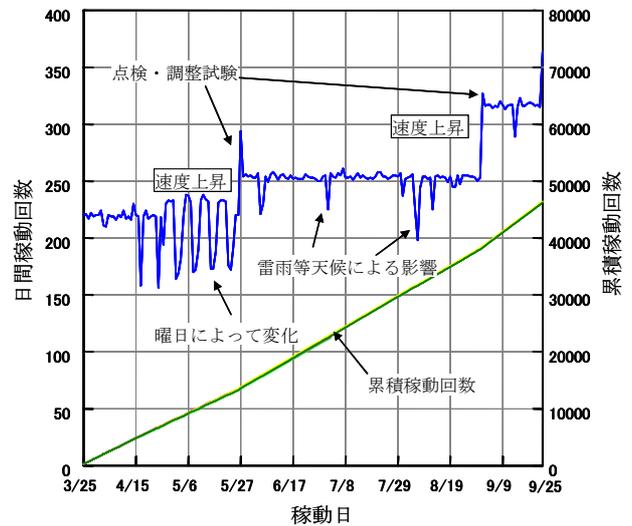


Fig. 10 可動モニュメントの稼働記録
Record of monument's operation during Expo

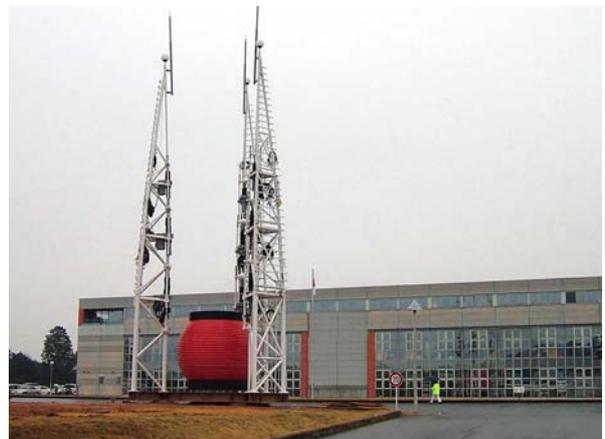


Photo 6 再建された可動モニュメント
Reconstruction of Movable Monument

6. まとめ

可変形状トラスVGTを利用した可動モニュメントの愛知万博での適用状況（計画，設計，製作，施工，運用）について，その適用概要を報告した。VGT技術の開発・実用化は初めての試みであり，構造設計，VGT可動機構，制御システムなどを含め構造評定を取得し，十分な安全性を考慮して開発を実行した。万博開催中は様々な故障・事故を想定したが，無事終了できたことに安堵した。今回適用したモニュメントのように，形状が変化する可動型構造物の適用に対しては，VGT技術が非常に有効であり，実現可能であることを確信した。今後，VGT技術の様々な利用，展開を図り，新しい可動型構造物の提案を実施して行きたい。

最後に本開発および万博適用に際してご協力頂いた関係各位に記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 名取通弘：知能化する宇宙構造物，日本機械学誌，Vol. 96, No. 900, 1993. 11, P. 958 - 961.
- 2) 井上文宏，他：可変形状トラスを用いた可動型構造物適用実験（第1報），第9回建設ロボットシンポジウム論文集，pp. 259 -266, (2002)
- 3) F. Inoue, K. Kurita, et al, “Application of Adaptive Structure And Control by Variable Geometry Truss” , Proc. of The CIB International Conference on Smart and Sustainable Built Environment, pp.59-65, (2003).
- 4) 井上文宏，他：可変形状トラスを用いた可動型構造物適用実験（第2報），第10回建設ロボットシンポジウム論文集，pp. 341-346, (2004)
- 5) 井上文宏，他：可変形状トラスを用いた可動型構造物に関する研究（VGTの基礎特性と開閉屋根式ドームの試作実験），大林組技術研究所報，No. 68, pp. 1-8, (2004)
- 6) 古屋則之：愛知県館可動モニュメント，構造評定書，日本建築センター，BCJ評定-ST0103-01, (2004)
- 7) F. Inoue, K. Kurita, R. Moroto et al “Development of Adaptive Structure by Variable Geometry Truss”, Proc. of 22th International Symposium on Automation and Robotics in Construction”, pp.63-68, (2006)