

斜張橋ケーブル検査ロボット昇降機構の開発

浦池 隆文, 波 通隆, 多田 達実, 鈴木 慎一
須永 俊明*, 若山 昌信*, 森木 洋全*
西岡 勉**, 宇都宮 光治**, 杉井 謙一**, 山下 欣也**

Development of Elevating Mechanism for Inspection Robot of Cable-stayed Bridge

Takafumi URAIKE, Michitaka NAMI, Tatsumi TADA, Shinichi SUZUKI
Toshiaki SUNAGA*, Masanobu WAKAYAMA*, Hiromasa MORIKI*
Tsutomu NISHIOKA**, Kouji UTSUNOMIYA**, Kenichi SUGII**, Kinya YAMASHITA**

抄 録

橋梁構造の一つである斜張橋は、ケーブルが主塔と桁の間に長距離・急角度で張られる構造となっている。このことから、ケーブルの検査および保守作業においては作業範囲の制限や交通規制および作業の危険性の問題を生じ、適切に点検することが困難な状況にある。安全で確実な検査作業を行うため、単体でケーブルへの設置が可能な自走式遠隔作業ロボットの開発が求められている。

本研究では、斜張橋ケーブル検査ロボットの要である昇降機構の開発を行った。3D-CADおよびシミュレーション技術による仮想空間上での設計・検証手法を活用することで開発の効率化を図るとともに、昇降機構に必要な機能や構造の最適化を行った。その後仮想試作に基づいた実証機の製作と室内試験および実橋試験による検証を行い、必要な能力を有する昇降機構を実現した。

キーワード：斜張橋, 検査ロボット, 昇降機構, 3D-CAD, シミュレーション

Abstract

In the cable-stayed bridge, the cable is stretched between the girder and the main tower, and that is steep-angle and long-distance. Accordingly, there are restriction of the work range, a problem of traffic restriction, and danger, it is difficult to perform the inspection task of a cable appropriately. Therefore, the robot which can operate by remote control is demanded in order to perform an inspection task safely and certainly.

In this research, the elevating mechanism which is one of the important elements of the robot was developed. 3D-CAD and simulation technology were utilized and efficient development was performed by performing the design and verification on virtual space. And structure and function of the elevating mechanism were optimized. The testing machine was manufactured based on the trial production on virtual space. Finally, verification by an indoor examination and real bridge examination was performed, and the elevating mechanism that has the sufficient performance was realized.

KEY-WORDS : Cable-stayed bridge, Inspection robot, Elevating mechanism, 3D-CAD, Simulation

* 株式会社帝国設計事務所, * Teikoku Design Office Co., Ltd.

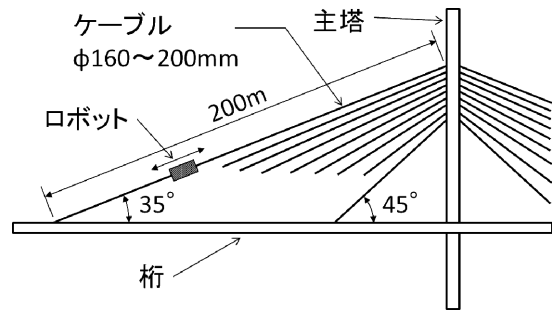
** 阪神高速技術株式会社, ** Hanshin Expressway Engineering Co., Ltd.

事業名：一般共同研究

課題名：斜張橋ケーブル検査ロボット昇降機構の開発



図1 動作試験を行った斜張橋



1. はじめに

橋梁構造の一つである斜張橋は、ケーブルが主塔と桁の間に長距離かつ急角度で張られている。その検査および保守作業において、高所作業車やクライミング技術等を応用した人力による従来の手法では、作業範囲の制限や交通規制および作業の危険性の問題があり、適切に点検することが困難な状況にある。このような現状から、これまでに安全で確実な検査作業を行うことを目的として、単体でケーブルへの設置が可能な自走式遠隔作業ロボットの実用化が検討されてきた。しかしその開発にあたっては、試験機の設計・製作や試験環境の確保に多大なコスト負担と時間的・空間的な制約があり、実証試験の実施と設計へのフィードバックによる改良といった、機械装置開発における一般的な開発サイクルを効率的に回すことが困難であり、十分な能力を持つ昇降機構の実現には至っていない。

そこで本研究では、ロボット化において最も重要な要素である昇降機構の構造について、3D-CADやシミュレーション技術による仮想空間上での設計・検証手法を有効に活用することで開発の効率化を図り、確実に安定した動作が可能な昇降機構を実現することを目的として開発を行った。ケーブルの形状や物理的特性を考慮した昇降シミュレーションを繰り返し行うことで、昇降機構に必要な機能や構造の最適化を行った。その後、仮想試作に基づいた実証機の製作と室内試験を行い、シミュレーションとの整合性の確認および実作業への適用性について検証した。さらに、実作業を想定した実橋における試験を行うことで、必要な能力を有する昇降機構を実現した。

2. 基本構造と仕様の検討

昇降機構の動力性能については、図1に示す斜張橋において確実な昇降動作が可能であるとともに、昇降機構に対する要求事項である表1を満足することを目標とした。最長で約200m、最大傾斜角約45°のケーブルに対し、走行速度は、1本の検査に要する時間を1時間以内と想定して10m/min以

表1 昇降機構に対する要求事項

昇降距離：最長200m	・軽量
傾斜角：最大45°	・着脱が容易
昇降速度：10m/min以上	・φ160~200mm
可搬質量：2kg以上	

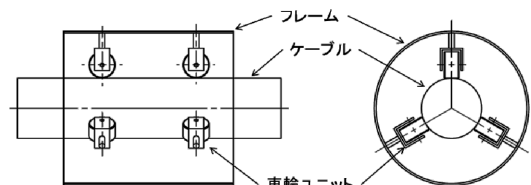


図2 昇降機構の基本構造

上、可搬質量は、本研究とは別途検討されている検査用カメラシステムを想定し、2kg以上とした。動力性能の他、軽量であることやケーブルへの脱着容易性、および複数存在するケーブル径(φ160~200mm)に対応可能であること等が求められる。

図2に昇降機構の基本構造を示す。動力は電動による車輪駆動式とし、フレーム内に、ケーブルに対して三方向から接するよう車輪ユニットを配置し、これをフレーム長手方向に2組設ける構造とした。車輪ユニットには、昇降用の動力伝達機構と、ケーブル軸回りの機体の回転を制御するステアリング機構、およびケーブルに対して確実な接触を維持するためのサスペンション機構が必要となる。また、それぞれの車輪ユニットの取り付け方向(図2は逆Y字)や、取り付け角度(ユニット間の開き角)を検討する必要がある。以上を踏まえ、動力伝達機構と操舵機構、およびフレーム構造について検討を行った。

3. 機構シミュレーションによる動作解析について

3.1 機構シミュレーションの例

昇降機構の詳細構造の決定にあたっては、設計に使用する3D-CADであるSolid Worksに組み込まれている、機構シミュ

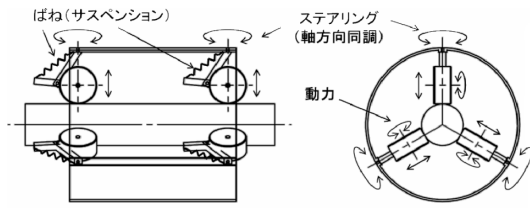


図3 解析した構造の例

レーション機能を活用し検討を行った。図3に解析の例として、すべての車輪ユニットにサスペンション機構を設けた構造を示す。また図4に、上昇動作のシミュレーション結果の例を示す。この構造は、ばね力を用いることでケーブルに対してフレームの位置や姿勢を保持することを期待した構造といえる。図4の上段は側面図、下段は側面図の右下からケーブル軸方向を見た図を表す。これより、時間の経過とともにフレームはケーブルに対して回転し、かつフレームとケーブルの軸がずれていく様子がわかる。図4(c)では車輪とケーブルの接触は維持されているが、さらに時間が経過すると、最終的には車輪がケーブルから逸脱し、動作不能となる。こ

のような現象は、車輪ユニットの配置（Y字・逆Y字）や、車輪表面形状の変更（凸型・凹型・平型）、およびサスペンション機構におけるばね定数等のパラメータの変更にかかわらず発生した。また、このような現象は、本研究以前に検討・試作された試験機においても確認されていたことから、機構シミュレーションによる動作検証は、実機の挙動を事前に予測するうえで有効であることを確認した。

3.2 ケーブルと車輪の間の摩擦係数について

ケーブルと車輪の間の摩擦は、昇降能力を直接左右する重要な要素と考えられるが、前述の解析例では、仮定値としてシミュレーション機能のデフォルト値である静止摩擦係数0.3および動摩擦係数0.25（いずれもゴム対鋼と仮定）に設定していた。ここでは、これ以降の解析精度向上を目的として、実橋ケーブルに使用されているPE（ポリエチレン）と各種車輪素材との摩擦係数の測定を行ったのでその結果を示す。

図5に試験に供した各種タイヤを、図6に測定装置を示す。PEパイプに車輪を接触させた状態で錘と自重により荷重F0を負荷し、引張り荷重を徐々に増加させ、タイヤが滑り始め

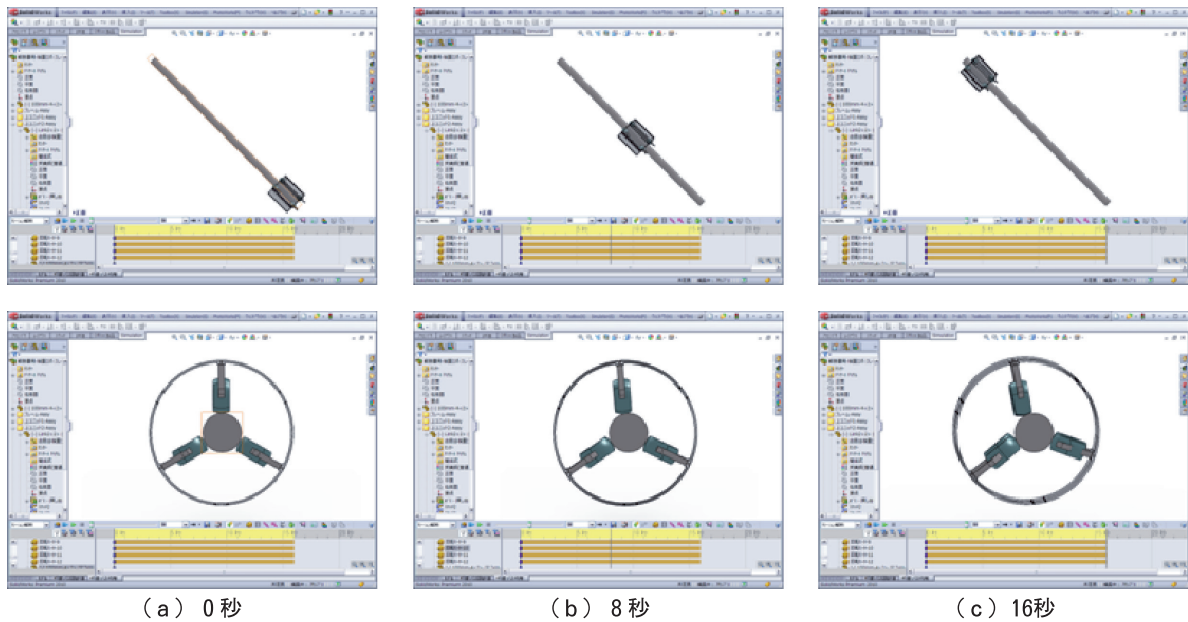


図4 シミュレーション結果の例（傾斜角45°、上昇速度10m/min、ケーブル長3m）



図5 摩擦係数の測定に供試したタイヤ各種

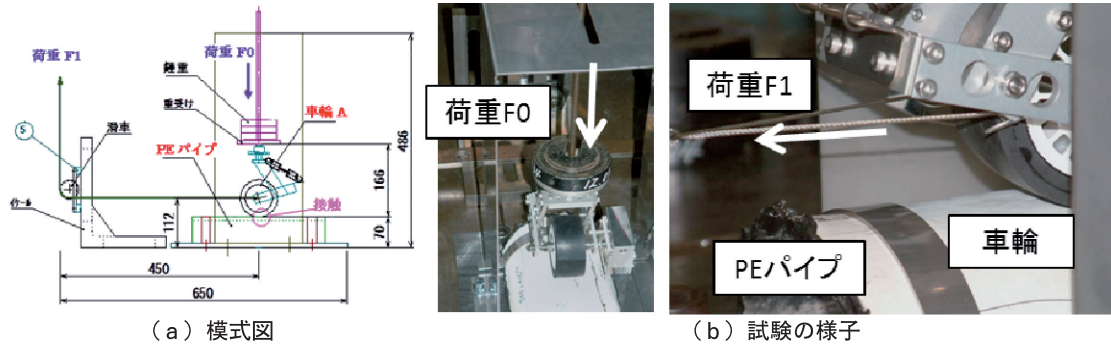


図6 摩擦係数測定装置

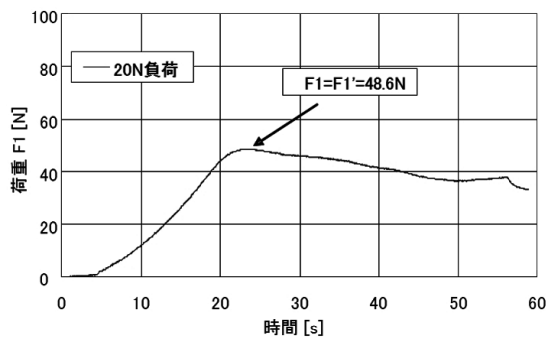


図7 測定結果の例 (ゴムシート巻き付け)

表2 摩擦係数測定結果

車輪の区別	初期荷重(自重) [N]	錘荷重 [N]	負荷荷重F0 [N]	F1 [N]	F1' [N]	摩擦係数	
						F1/F0	F1'/F0
(a) ゴムシート巻き付け	13.0	20.0	33.0	48.6	48.6	1.47	1.47
		50.0	63.0	86.2	89.5	1.37	1.42
		100.0	113.0	150.0	158.9	1.33	1.41
(b) RCバギー用タイヤ	9.0	20.0	29.0	67.2	69.5	2.32	2.40
		50.0	59.0	139.8	151.4	2.37	2.57
		100.0	109.0	191.0	302.4	1.75	2.77
(c) スケート用ウレタン	7.9	20.0	27.9	101.0	101.0	3.62	3.62
		50.0	57.9	190.4	190.4	3.29	3.29
		100.0	107.9	357.0	357.0	3.31	3.31

際の荷重F1を測定した。また、測定中最大の引張り荷重が記録された時の値をF1'とした。図7に測定結果の一例を示す。図ではタイヤが滑り始めた際にF1の最大値F1'も同時に記録されている。供試タイヤの違いによりグラフの形状が変化した。それぞれの供試タイヤについてF1とF1'から求めた摩擦係数をまとめたものを表2に示す。表中のF1/F0が静止摩擦係数に相当する。負荷荷重の大小にかかわらず、各供試タイヤにおいて摩擦係数は概ね一定の値が測定された。また供試タイヤ別では(c) スケート用ウレタンで3以上と最も高い摩擦係数が測定され、最少でも(a) ゴムシート巻き付けで1以上の摩擦係数が測定された。これらの値は当初想定したものより非常に大きく、シミュレーション機能で設定可能な値(静止摩擦係数1.0以下)を超える結果となった。昇降機構実機では、適切な負荷荷重(タイヤ反力)が得られていれば何れのタイヤを使用したとしても摩擦力不足により

スリップ等が発生する可能性は低いと考えられ、今後の解析での摩擦係数の設定は一律1.0として行うこととした。

4 安定した動作が可能な構造の検討

前述の解析例より、すべての車輪ユニットにサスペンション機構を設けた構成では、安定した動作は不可能であることが確認された。機構各部の寸法精度や設置初期状態が理想的に設定されていれば、各車輪のばね力が均等となり、想定通りの動作が可能と考えられるが、実際には困難である。ばね力では、フレームが空間に対して有する6自由度(並進3自由度、回転3自由度)のいずれも拘束することができない。したがって機構自体に、冗長な4自由度(並進2自由度、回転2自由度)を拘束する構造を組み入れる必要がある。フレームの自由度を拘束する最も簡単な方法は、サスペンション機構を固定することが考えられる。サスペンション機構は並進1自由度を有するので、4個のサスペンションを固定することで、フレームの4自由度を拘束することが可能である。以上のような考察にもとづき、図8に示す構造で検討を進めることとした。

車輪ユニットをY字に配置し、上半部4輪と下半部2輪で機能を分担する構造とした。上半部4輪は駆動輪として動力とステアリング機構を、下半部2輪は従動輪としてサスペンション機構のみを組み込んでいる。駆動輪のサスペンションを省略することでケーブルとフレームの軸が一致した状態を維持し、自重と従動輪のサスペンションにより駆動輪をケーブルに押し付けることで摩擦力を確保する。ステアリング機構については、軸方向に対をなすユニットが、平行リンク機構により同調して動作するよう構成されている。このように

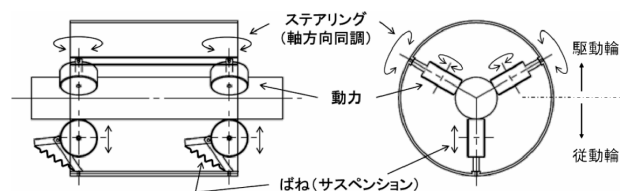


図8 安定動作を考慮した構造

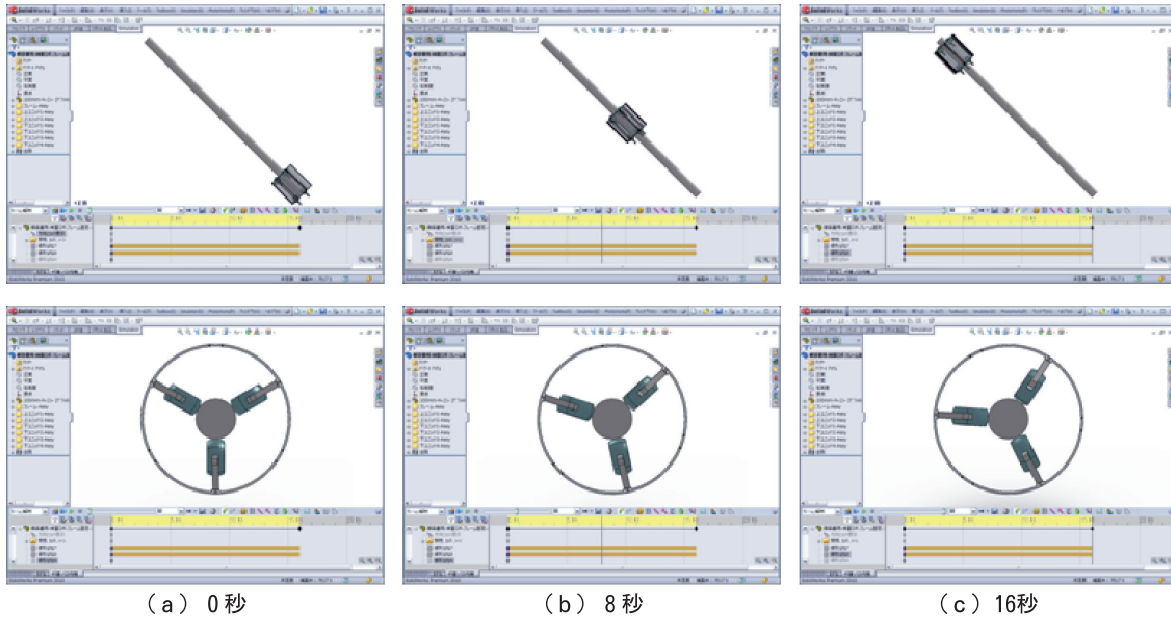


図9 シミュレーション結果（傾斜角45°，上昇速度10m/min，ケーブル長3m）

構成した構造について、機構シミュレーションによる動作解析を行った結果を図9に示す。図4の解析例と同様にフレームがケーブルに対して回転する挙動は見られるが、ケーブルに対して駆動輪が均等に接触し、フレームとケーブルの芯が一致した状態が維持されているのがわかる。図はステアリング機構を固定した際の解析例を示しているが、上昇途中でステアリング機構を動作させ、意図的にフレームが回転するよう設定した場合においても、フレームとケーブルの芯が一致した状態を維持できることを確認した。また、実際のケーブル断面は軸方向に様に真円ではなく、微妙な凹凸や断面形状の変化が存在する。このことを考慮した解析の結果も同様に、安定した動作が可能であることを確認した。

5 小型試験機および実証大型機の製作と屋内試験による評価

5.1 小型試験機の製作と動作試験

前述の検討結果にもとづき、動作確認用の小型試験機を製作し、屋内における模擬試験を行った。小型試験機では2章で検討した仕様のうち、複数のケーブル径に対応するフレーム構造は省略し、特定の径のみに対応する簡易構造で設計を行った。表3に主要諸元を、図10に外形図を示す。機体は、ラジコンによる無線操縦で制御する。駆動ユニットは、ウレタンローラをギヤとタイミングベルトを併用した減速機構で駆動する。動力源として選定したモータの定格出力より、設計上の動力性能は、牽引力約160N、走行速度約16m/minとなっている。フレームは駆動輪側と従動輪側の2分割構造とし、ケーブルへの設置時はヒンジとロック機構で開閉する構造とした。

以上により製作した小型試験機の外観を図11に、動作試験の様子を図12に示す。動作試験は、斜張橋ケーブルを模擬したφ165mmの塩ビパイプ6mを傾斜角約35°で設置して行った。試験の結果、ステアリングを固定した一定姿勢での昇降、および昇降と同時にステアリング操作を行った際の機体の回転について、車輪がケーブルから逸脱することなく、シミュレーションと同様、安定して動作可能であることを確認した。昇降動作を繰り返し行った際の消費電流を測定した結果を図13に示す。駆動ユニットは、前側左右2個と後側左右2個を、それぞれ1個ずつのバッテリーで駆動している。グラフより、前後とも大差はなく、上昇時3.5～4.0A、下降時0.5A程度の電流値が記録されている。バッテリー容量は4000mAhなので、およそ1時間程度連続動作が可能である。動作距離4.5mを約13秒で上昇したことから、走行速度は20m/min以上であり、十分な動力性能を有していることを確認した。

5.2 実証大型機の製作と動作試験

実証大型機は、小型試験機で検証した駆動系をスケールアップして製作した。また、φ100～200mmのケーブル径に対応するため、サイズ調整機能を持ったフレーム構造を採用した。表4に主要諸元を、図14に外形図を示す。駆動ユニットは小型機と同様に、ウレタンローラをギヤとタイミングベルトを併用した減速機構で駆動する。ここで駆動用モータについては、搭載を想定しているカメラシステムと合わせて機体質量を20kg程度と想定したため、1ランク出力の大きなものを使用した。モータの定格出力より、設計上の牽引力約400N、走行速度約15m/minの動力性能を有している。また大型機では実作業への適用を見据え、主に次に挙げる4点を考慮して設計を行った。

表3 小型試験機主要諸元

フレーム		駆動輪ユニット	
全長	420mm	車輪材質	ウレタンシヨアA70
全幅	370mm	車輪径	54mm
全高	480mm	車輪幅	40mm
質量	約8kg	動力	タミヤ模型 ギヤードモーター 380K300
取り付け方法	ヒンジとスナップ錠による二分割開閉式	減速比	1/160(ギヤ1/300、ベルト60/32)
無線装置および電源		従動輪ユニット	
無線装置	双葉電子工業 RC飛行機用10chプロポ	車輪材質	MCナイロン
電源	7.4V 4000mAh LiPo バッテリー	車輪径	40mm
	駆動用 2本	車輪幅	40mm
	無線装置用1本	サスペンション	コイルばねにより任意の強度に設定可能

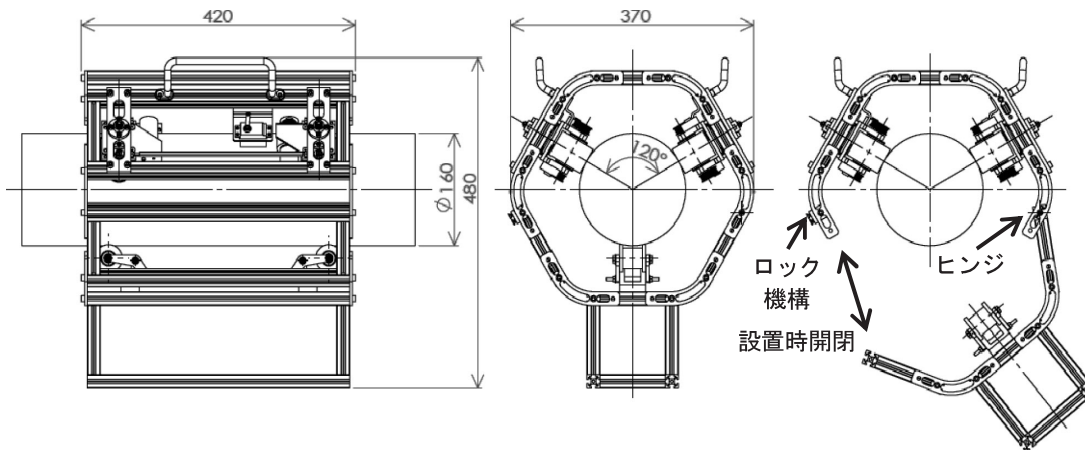


図10 小型試験機外形図

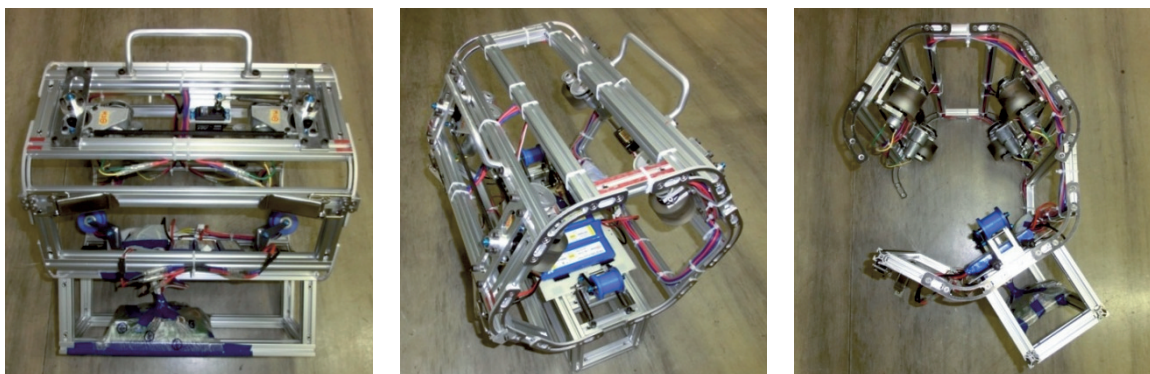


図11 小型試験機の外観

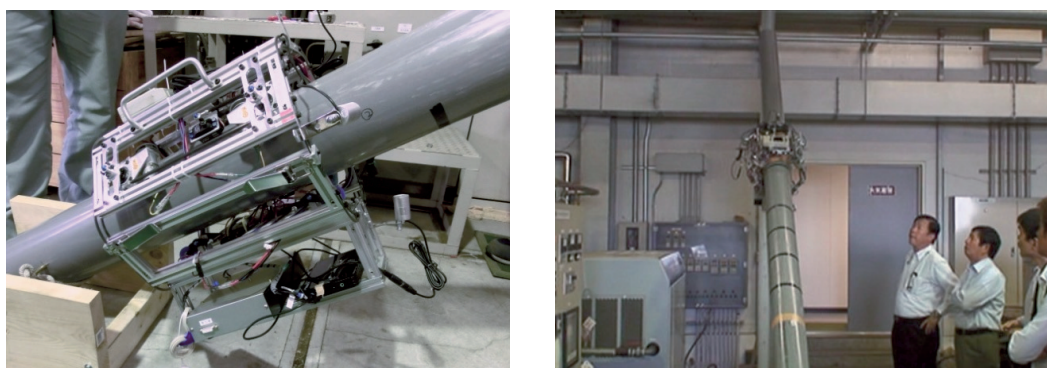


図12 動作試験の様子

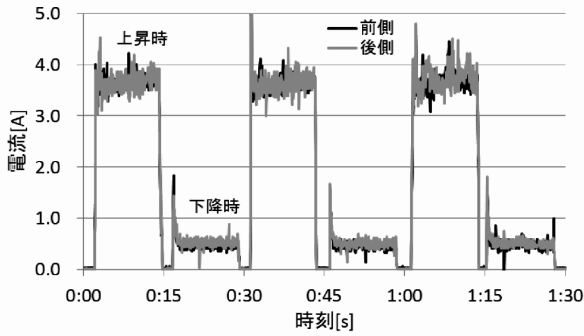


図13 昇降動作時の消費電流

- ①モータの選定は検査用カメラユニットおよび制御用ユニットの搭載に配慮し大型とする。
- ②一般的なケーブル径φ100~200mmに対応できるようにフレーム継ぎ手部にスライド機構を設ける。

- ③取り付け時の作業性改善のため、従動輪のサスペンションを一時的に解放可能な機構を設ける。
- ④ローラーの径は段差乗り越えに配慮し大型とする。

以上により製作した実証大型機の外観を図15に、動作試験の様子を図16に示す。小型機による試験と同様に、斜張橋ケーブルを模擬したφ165mmの塩ビパイプ6mを傾斜角約35°で設置して行った。動作試験の結果、ステアリングを固定した一定姿勢での昇降、および昇降と同時にステアリング操作を行った際の機体の回転について、車輪がケーブルから逸脱することなく、安定して動作可能であることを確認した。また、昇降動作時の消費電流を測定した結果を図17に示す。実証大型機では前後左右合計4個の駆動ユニットを、それぞれ1個ずつのバッテリーで駆動している。グラフは前側左ユニットの消費電流を示す。上昇時4.0A程度、下降時0.5A程度の電流

表4 実証大型機主要諸元

フレーム		駆動輪ユニット	
全長	約700mm	車輪材質	フレタン ショアA70
全幅	約450~500mm	車輪径	80mm
全高	約710~760mm	車輪幅	600mm
質量	20.3kg(カメラ想定質量2kg含む)	動力	タミヤ模型 ギヤードモーター 540K150
取り付け方法	スライド、ヒンジ、手ねじによる二分割開閉式	減速比	1/230(ギヤ1/150、ベルト26/40)
無線装置および電源		従動輪ユニット	
無線装置	双葉電子工業 RC飛行機用10chプロポ	車輪材質	フレタン ショアA90
電源	7.4V 4C00mAh LiPo バッテリー	車輪径	80mm
	駆動用 4本	車輪幅	60mm
	無線装置用1本	サスペンション	引張りばねにより任意の強度に設定可能

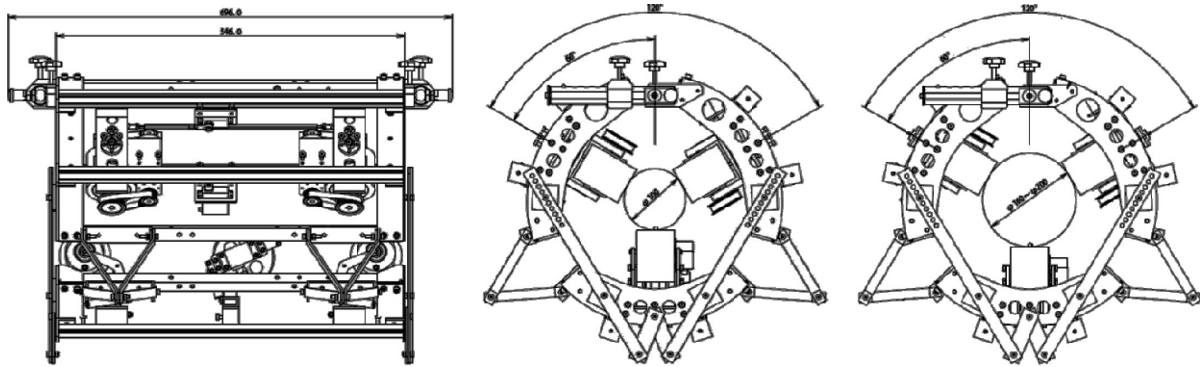


図14 実証大型機外形図



図15 実証大型機の外観

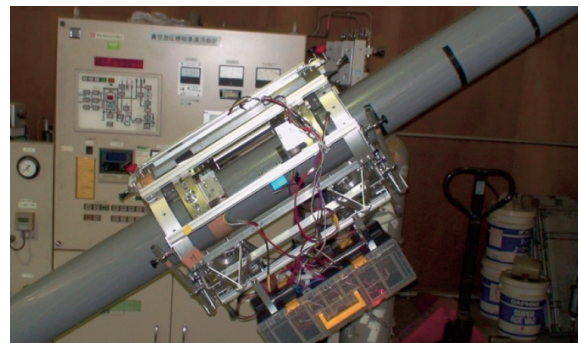


図16 動作試験の様子

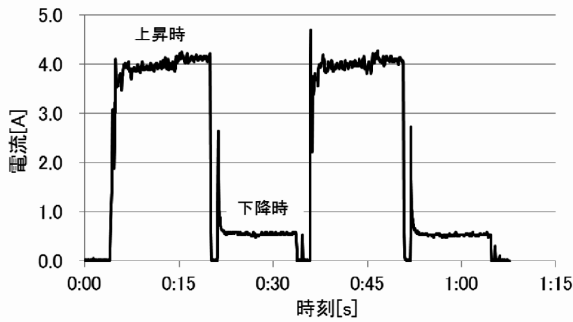


図17 昇降動作時の消費電流

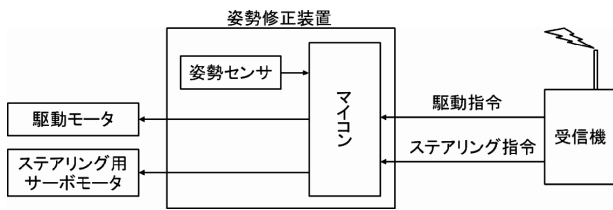


図18 姿勢修正装置のブロック図

値が記録されている。バッテリー容量は4000mAhなので、およそ1時間程度連続動作が可能である。動作距離4.5mを約15秒で上昇したことから、走行速度は18m/min以上であり、実証大型機においても十分な動力性能を有していることを確認した。

5.3 昇降時の姿勢安定化について

小型試験機および実証大型機の動作試験の結果より、いずれにおいても安定した昇降動作が可能であることを確認したが、シミュレーションの結果と同様に、ステアリングを固定した場合でもケーブル軸に対して機体が自然に回転する挙動が確認された。その原因としては主に、ステアリング機構のニュートラル調整と、重量バランス、およびケーブル（屋内試験では塩ビパイプ）断面形状の不均一によるものと考えられる。姿勢の修正には手動によるステアリング操作が必要となる。しかし実際の橋梁現場では、長距離を上昇した際や夜間の作業時には、目視による姿勢の確認が困難になることが想定されるため、姿勢修正装置を別途設けることとした。機械的な対策として振りやヨットなどの船舶に見られるキール

を応用した復元構造が考えられたが、機体寸法の拡大や重量の増加を伴うことからこのような手法は取らず、センサとマイコンを用いた電子制御により姿勢を安定化することを試みた。図18に姿勢修正装置のブロック図を示す。受信機が受けた駆動モータへの指令とステアリング用サーボモータへの指令を、姿勢センサとマイコンで構成される姿勢修正装置へ取り込み、適切な演算を行った後、新たな駆動指令とステアリング指令を出力する。屋内試験によりこのような構成で姿勢の安定化（一定姿勢での昇降）が可能であることを確認し、以下の実橋試験を行った。

6. 実橋試験による評価

実橋試験は図1に示す斜張橋で行った。図1の斜張橋ではケーブルが車線上空に架かることから、装備品の落下や上空での不具合による暴走および停止など不測の事態に備え、三車線のうちケーブルが架かる左側一車線を規制したうえで、高所作業車で到達可能な範囲（鉛直高さ約12m）にストッパーを設けることや、介錯ロープによる機体の誘導等の安全対策を施し試験を行った。現場の状況を図19に示す。試験はφ160mmのケーブルを対象として行い、傾斜角約35°と約45°の2か所で行った。

図20と図21に小型試験機および実証大型機による試験の様子を示す。鉛直高さ約12mの範囲内で、昇降動作を繰り返した。実橋試験では室内試験と比較して、以下の環境の相異が、昇降性能に影響をおよぼすことが懸念された。

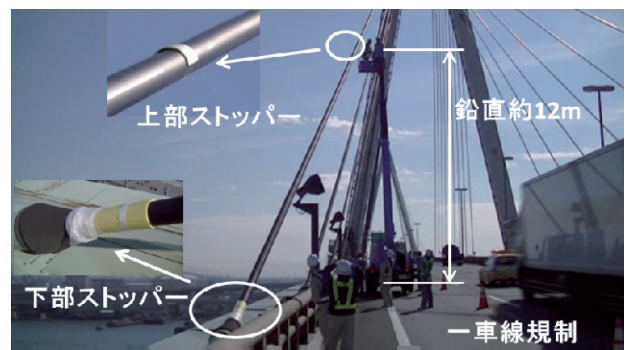


図19 実橋試験現場の状況



図20 小型試験機による実橋試験の様子



図21 実証大型機による実橋試験の様子

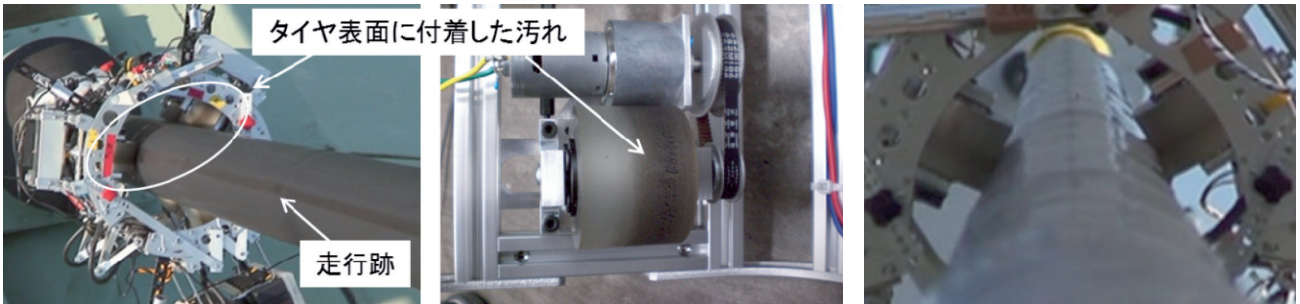


図22 ケーブル表面の走行跡とローラーに付着した汚れ

図23 ケーブルのうねり

- ①ケーブル材質（塩ビパイプ→PEパイプ）
- ②ケーブル表面の汚れによる駆動輪摩擦力の低下（排ガス・排煙成分、塵・埃、塩分）
- ③グラウト注入口の段差
（グラウト：鋼製ケーブルと被覆PEパイプの空隙に注入する樹脂やセメント等の薬液）
- ④グラウトの注入によるPEパイプの膨らみやへこみ（軸方向断面形状の変化）
- ⑤車両の通行による振動
- ⑥風による外乱
- ⑦降雨による水分

7. おわりに

本研究では、3D-CADとシミュレーション技術による仮想空間上での設計・検証手法を活用することで開発の効率化を図るとともに、確実に安定した動作が可能な昇降機構の最適構造を見出した。これをもとにした実証機による屋内試験、および実橋試験を通じ、当初目標とした性能を有する昇降機構を実現した。また、本研究の成果について特許を出願した。今後は、長期的に動作させた場合の耐久性や信頼性に関する検証を行うとともに、検査用カメラシステムや自動制御・モニタリングシステムを統合した実用ロボットシステムの開発を進める予定である。

これらのうち、②と④について図22および図23のような状況が確認された。図22のようにケーブル表面の汚れがローラーに付着し、機体の走行跡がケーブル表面に残った。また図23のように、ケーブルを軸方向に見るとうねりが存在し、軸方向の断面形状が変化していることがわかる。しかしながら、極端な摩擦力の低下やケーブルからの逸脱など、動作に支障をきたすような現象は確認されなかった。⑦の水分に関しては降雨状況での試験は行っていないが、ケーブル表面を水で濡らし、湿潤状態としても動作に影響はなかった。その他懸念された振動や風についても特段昇降動作に影響をおよぼすような現象は確認されず、試験現場として設定した35°および45°のケーブルにおいて、終始安定した動作が可能であることを確認した。以上の実橋試験結果より、当初目標とした性能を有するケーブル昇降機構が実現された。