

令和元年6月25日現在

機関番号：32706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02981

研究課題名(和文) 平常時および災害時にも使用できる建物外壁の検査ロボットシステムと劣化診断方法

研究課題名(英文) Inspection Robot System and Deterioration Diagnosis Method of Building Wall Which Can Be Used Also for Normal and Disaster Situations

研究代表者

井上文宏(INOUE, Fumihiro)

湘南工科大学・工学部・教授

研究者番号：50211751

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では平常時や災害時にも使用できる建物検査システムの開発と災害損傷を受けた建物の劣化診断方法を確立し、検査システムの継続的な運用を行うことを目的とする。

「拠点ロボット」は高出力のダクトファンを用いて本体を壁に押付けながら壁面を登れる機構であり、壁面上で強固な検査拠点を築くこと可能にした。検査・診断を行う「検査ロボット」は本体にワイヤー巻取り機構を有して自由に昇降でき、打音装置によって外壁状態を検査した。検査診断は打音波形やウェーブレット波形を利用して劣化部の判定を実施した。2つのロボットは協力して作業を行い、基本構成は完成している。実現場での確認試験を重ねることで実用化を目指して行く。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で目指す検査ロボットシステムは、地震等の大災害時には建物や建物周囲の安全性は確保されず、作業員や復旧車が建物に近づけない場合を想定した。建物検査を行う際には検査ロボットをワイヤー等で支持する拠点(通常時では作業員によって対応)が必要となるが、災害時には作業員が対応できないため、本研究ではロボット自身が拠点を確保し、検査ロボットを用いた協力作業で建物検査を可能にする点が独創的であり、学術的に意義あると思われる。また、このシステムは通常時および災害時でも活用できる検査システムであり、継続的に長い期間での検査が可能であり、建物検査の安定性や安全性を確保できる点で社会的に意義あると思われる。

研究成果の概要(英文)：This research aimed to develop the building inspection system that can be used also for normal and disaster situations and to establish the method for diagnosing deterioration of buildings damaged by disasters, then the continuous operation of inspection system was conducted.

The "base robot" was the mechanism that can press the body against the wall using a high-power duct fan to climb the wall, and it was possible to build a strong inspection base on the wall. The "inspection robot" that performs inspection and diagnosis has the wire take-up mechanism on the main body and can freely move up and down, and the external wall condition was inspected by the hammering device. The examination diagnosis was performed on the judgment of the deteriorated portion using the sound waveform and the wavelet waveform. The two robots work in cooperation, and the basic configuration has been completed, and we will aim for practical use by repeating confirmation tests on real property.

研究分野：社会・安全システム科学

キーワード：検査ロボット 拠点ロボット ダクトファン 災害対応 壁面検査 安全性

1. 研究開始当初の背景

(1) 2011年3月に発生した東北沖大地震の発生では、津波による甚大な災害、また原子力発電所の倒壊、放射能漏れが起こる事態となった。原子力発電所では人が被災現場に近づくことができず、災害情報の正確な把握が非常に遅れる結果ともなった。そのため遠隔操縦による重機や自律型のロボットの適用が試みられたが、必ずしも十分な成果は得られなかった。これまで災害対応用ロボット開発は実施されてきたが、開発された移動ロボットや探査ロボットはこのような災害対応には不向きであり利用が難しいこと、発生時期が不明な災害に対して常時万全な体制でロボットを維持するためのコストや管理が十分に整備されておらず、現場への適用は殆んど無理な状況であったと考えられる。

(2) 一方、建築分野では、建築ビルの老朽化や経年変化に伴い、建物の外壁やタイルの検査には様々なタイプのロボットが開発されてきた。大手の建設会社や検査会社では、検査ロボットを継続して使用する維持・管理体制が整いつつあり、災害対応を想定した関連ロボットの併用も十分に期待できる状態にあった。通常時にロボットが活躍できる状況にあり、維持・管理体制が継続的に確保できれば、発生予測が難しい自然災害への対応にも可能であると判断した。

2. 研究の目的

本研究では上記の研究開始当初の背景を基に、災害時にも活用できるロボットの実運用を可能にするため、平常時にロボットの使用が継続されている建物の劣化診断技術に着目し、災害発生時でも様々な条件を克服しながら建物の健全性評価ができる検査ロボットと付随するシステムの研究・開発を行うことを目的とする。

具体的な研究内容には、害時には人や作業員は建物や検査中の検査ロボットに近づくことができないことを想定し、以下の4項目に大別できる。

- (1) 不整地移動と垂直壁面を昇降できる「拠点ロボット」の開発と制御技術の確立
- (2) 拠点ロボットを支持位置とし、垂直壁面を高速昇降・移動できる「自走検査ロボット」の機構と制御技術の確立
- (3) 災害時を想定した建物外壁面の劣化診断方法と定量的評価のための解析手法の確立
- (4) 検査ロボットの維持・管理体制

以上のように、本研究では通常時および災害時でも利用できる検査・診断ロボットを構築することで、ロボットの継続的な利用を可能にする体制を確立し、その普及・活用を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、発生時期が不明な災害時（あるいは通常時）でも使用可能な建物検査用ロボットシステムの開発を行うことを計画した。目指す検査ロボットシステムでは、地震等の大災害時には建物や建物周囲の安全性は確保されず、作業員や復旧車が建物に近づけない場合を想定した。研究方法の手順としては、

(1) 拠点ロボットの製作と制御手法の確立

「拠点ロボット」は不整地を移動でき、壁面上を自力で上昇できる機構を目指すため、本体に高出力の浮上機構と押付け機構、検査ロボットにベルトを引下げる機構、建物拠点を確保するため固定治具を有するロボットの設計、製作を行った。次いで、各機構の動作や制御機構を確認し、移動状態を検証した。

(2) 検査ロボットの機構と制御技術の確立

「検査ロボット」は検査ロボットから降ろされたベルトを手繰り上げる機構、壁面接触する押付け機構、建物上を移動できるクローラ機構、壁面検査を行う検査機構（打診装置、騒音計測装置）を有するロボットの設計、製作を行った。次いで、各機構の動作や制御機構を確認し、建物検査を検証した。

(3) 劣化診断方法と定量的評価

建物壁面の診断には、打診方法を活用し、模擬タイル壁（健全と劣化部位を含む）を作成して検査診断手法を検証した。検証した診断機構をロボットに搭載して実壁面での適用を図った。

(4) 検査ロボットの維持・管理体制

本研究で示したロボットシステムの活用および今後の維持・管理体制を整備した。

4. 研究成果

本研究で検討したロボットは、「拠点ロボット」と「検査ロボット」に分けられ、その設計・製作および制御機構を確立し、稼動実験を行ってその性能を検証した。以下にその成果を示す。

4.1 拠点ロボットの開発

(1) 拠点ロボットの概略 拠点ロボットは災害時に建物壁の上部に拠点を築くために、対象となる建物付近まで移動し、自力で建物に行ける機能が求められた。本研究では、建物付近まで空中を飛行して、その後、建物壁に沿って昇降することでも拠点ロボットの本質的な機能は満足するため、本体の重量軽減と機能の複雑さを避ける理由から合理的な設計を実施した。本研究では軸流ダクトファンを利用して建物壁面反力を取りながら移動する移動機構を採用した。拠点ロボットの概略設計案を図1に示す。

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

拠点ロボットは垂直推進方向が固定のファン2台と推進方向が可変できるファン1台から構成した。拠点ロボットは可変ダクトの噴射角により、以下の3つの移動形態をとる。

(a) 可変ファンが垂直方向にある場合には、浮上および飛行移動状態であり、可変ファンの角度を微妙に調整して移動方向を決める。基本的には拠点となる建物への移動を目指す。

(b) 建物壁面で本体はホバリングを行い、その後可変ファンを徐々に垂直から水平に移動させる。この結果、本体は壁に押付けられ、押付け力と推進力でほぼ壁で静止状態となる。

(c) 押付け力が十分となったことを確認し、2台の垂直ファンの出力を上げることで、壁面に沿って本体を移動させる。

以上のように、可変ダクトファンの角度調整により、ロボット本体の昇降・押付けがほぼ達成できる設計とした。

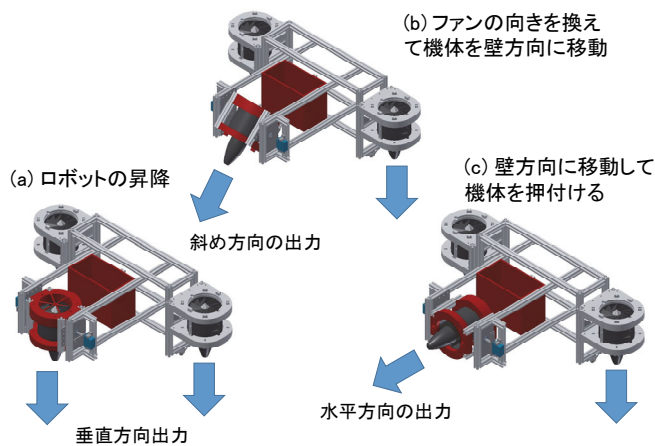


図1 ダクトファン拠点ロボットの昇降・押付けパターン

(2) 拠点ロボットの駆動原理と仕様

ダクトファンを用いた拠点ロボットの駆動の原理と力学的な関係図を図2に、ロボットが壁に押付きながら昇降する運動方程式を式(1)～(4)に示す。

・垂直方向：

$$M\alpha = F_v + F_h \sin \theta - Mg - N\mu \quad (1)$$

・水平方向

$$N = F_h \cos \theta - F_N \quad (2)$$

・ダクトファンの推力

$$F_v = \frac{1}{2} C_v \rho A_v v^2 \quad (3) \quad F_h = \frac{1}{2} C_h \rho A_h v^2 \quad (4)$$

ここで、 M は拠点ロボットの全体質量、 F_h は可変ダクトファンの水平方向推力、 F_v は固定ダクトファンの垂直方向推力、 N は車輪の押付けによる壁の垂直反力、 F_N は固定ダクトファン自体のトルクによる反力、 μ は壁と車輪の動摩擦係数、 α はロボットの昇降加速度を C は揚力係数、 A はダクトファンの有効面積をそれぞれ表す。

固定ダクトファン（垂直方向）の推力を十分に保ち、可変ダクトファン（水平方向）の角度 θ を適時調整することで、拠点ロボットの壁面への押付けおよび昇降を制御することができる。ただし、ロボット自体は、固定ダクトファン自体のトルク発生により、壁面から離れようとするモーメントが常に作用する。 F_h を一定力で維持する必要があるが、 F_h を大きく取ると車輪の摩擦効果が大きくなるため、 F_v と F_h のバランスをとる制御システムを構築した。

拠点ロボットに使用したダクトファンとその仕様を表1に示す。拠点ロボットには、No.1のダクトファン3台を使用し、十分な推力が得られる機構とした。なお、No.2のダクトファンは、後述する検査ロボットの水平方向力を得るために使用した。

(3) 拠点ロボットの推力試験

ダクトファン1台の推進力を計測するため、3台のダクトファンを構成した実験台を作成した。一方、定盤に対してロードセルを設置し、ファン駆動時の推進力を連続計測できる推力計測装置を製作した。操作プロポのスティック位置に対して、1台のファンに流れる電流値と押付け力の関係を図3に示す。電流値に対して押付け力は双曲線となり、運用可能な電流値100Aでは、約70Nの力

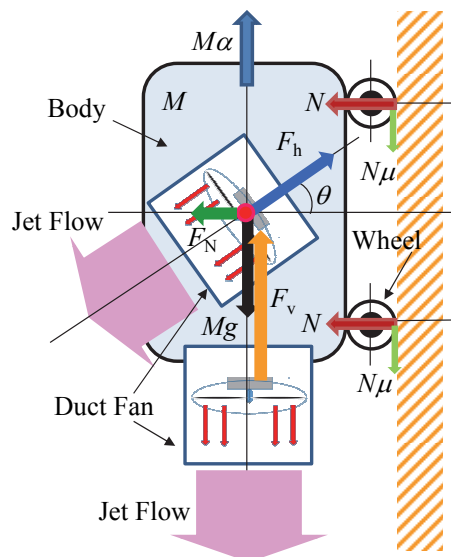
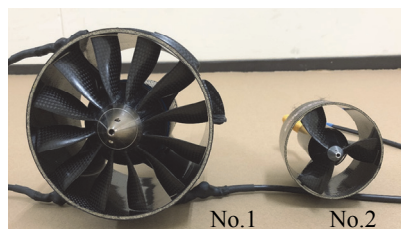


図2 拠点ロボットの駆動の原理と力学的な関係

表1 使用したダクトファンの仕様

DucT Fan Type	No.1	No.2
Maker	Schubeler	Schubeler
Weight, Fan diameter	1240 g , 120 mm	500 g , 69 mm
Force	71-91 N	15-22 N
Voltage	54 V,	24 V,
Max.curent	120 A/Num.	50 A/Num.
Max. Rotation Num.	28,000 rpm	32000 rpm



を得ることが確認できた。プロポの基準位置では、約 40N が出せるため、2 台の推進力で本体（本体重量 60N）を浮上、維持することができた。3 台のファンを同時に駆動した結果は、ほぼ 1 台の推力の 3 倍となり、単純和で表すことができた。

次いで、ダクトファンの浮上実験を実施した。図 4 に浮上実験の様子を示す。ダクトファンはそれ自体トルクを生じるため、ガイドフレームに設置して実験を実施した。プロポの基準位置でファン本体は浮上を開始し、その後ファンの回転を上昇させると徐々に上昇して、推力と自重が釣り合った安定な状態で静止した。同様な実験をダクトファン数 1～3 に対して実施した。図 5 にダクトファンを複数結合した本体に対するダクトファン数と浮上時における電流値の関係を示す。図の初期位置は浮上開始時の電流値であり、安定上昇は本体が上昇後安定した状態での値を表す。

ダクトファン数が増えるほど、初期および安定上昇時の電流値は低下し、ほぼ比例関係にあることが分かる。1 台のファン噴射力が複数になることで、大きな推進力となることが確認できた。2 台のダクトファンの推進力で本体重量（60N）を浮上、維持することが可能である。3 台のファンでは三角形にファンを配置し、全体として安定した浮上状態となることを確認した。

(4) 拠点ロボットの完成仕様

拠点ロボットの設計、試作製作、予備実験結果を基に、実施可能な拠点ロボットの製作を実施した。図 6 に当初の仕様を満たした拠点ロボットを示す。本体は 2 台の垂直方向ダクトファンと可変型水平ダクトファンから構成した。軽量化を計るため、構造体はアルミフレーム、各種のフレームは 3D プリンタによるプラスチック部材から構成される(図 6-a, b)。最後に拠点ロボットが拠点を築く、把持機構、突っ張り機構を設置し(図 12-c, d)、内部にワイヤー降下機構を組み込ませ、ロボットの全体が完成した。

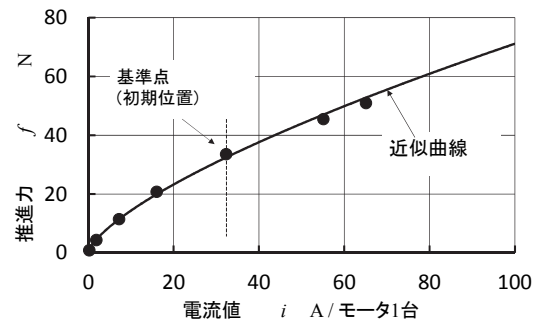


図 3 ダクトファンの推力と電流値の関係

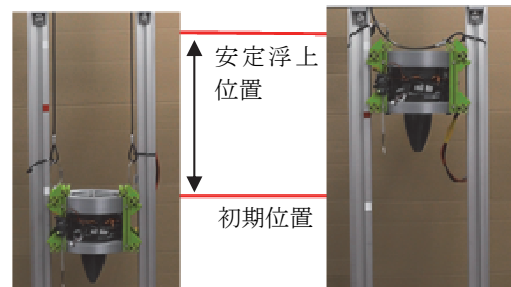


図 4 ダクトファンの推力確認実験

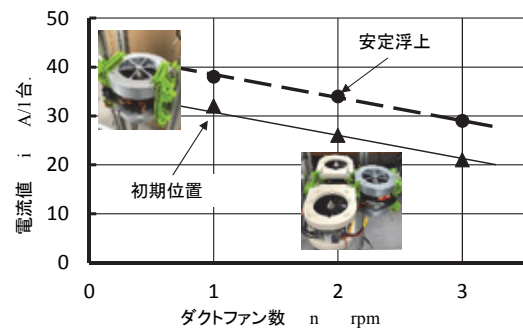
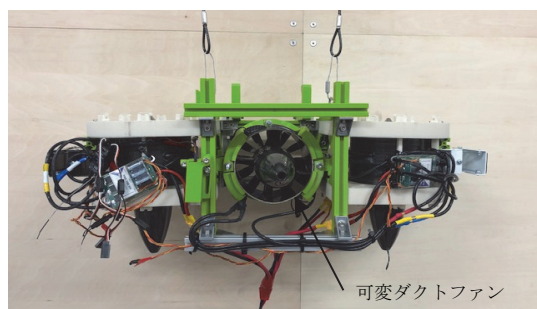


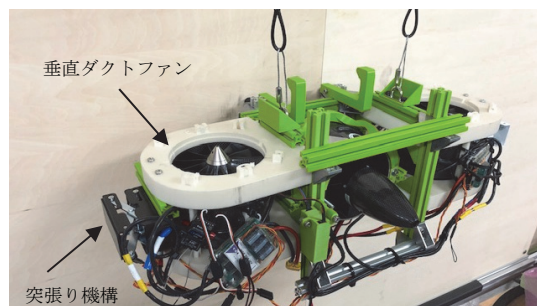
図 5 ダクトファン数と全体推力の関係



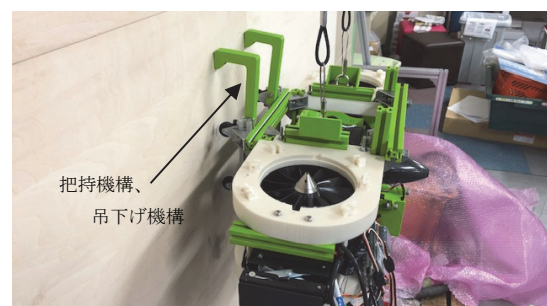
(a) 拠点ロボットの全体正面図



(b) 拠点ロボットの全体側面図



(c) 把持機構を搭載した拠点ロボット



(d) 把持機構を稼動した拠点ロボット

図 6 当初仕様を満たした拠点ロボット

4.2 点検ロボットの開発

(1) 点検ロボットの概略

本研究で設計・製作する検査ロボットは、不整地面や外壁面移動などを可能にするため、その用途に応じて最適なモジュールを交換可能な形式とした。図7に標準使用の検査ロボットの概略を示す。各パーツを標準サイズ(六角形)にモジュール化して、構成を容易にした。検査ロボットのモジュールは、クローラ車輪、反力ファン、計測制御(通信装置を含む)、打診検査機構、ベルト巻取り装置で構成され、各モジュールを結合して全体を構成した。各モジュールは3Dプリンタで製作するため、軽量・強固であり、詳細部位まで容易に製作できた。

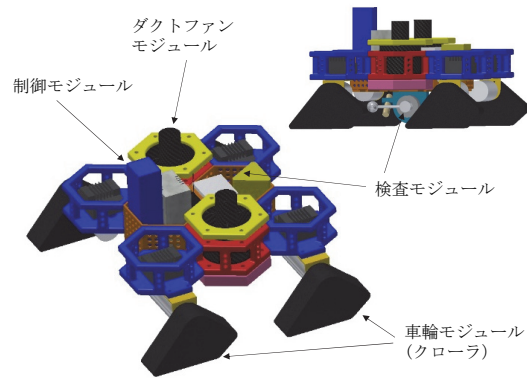
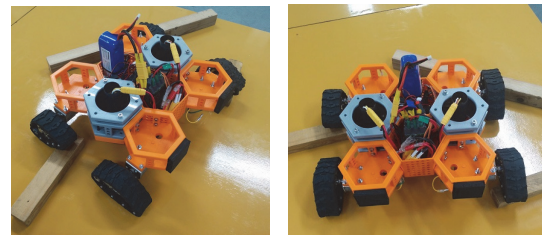


図7 標準的な検査ロボットの概略

(2) 検査ロボットの不整地の移動性能

検査ロボットは、拠点ロボットが壁面上に拠点を築いた後に使用される。拠点ロボットとは異なり、不整地上を移動して建物近辺まで移動する。通常タイヤ車輪によるモジュールを使用するが、図8に示すように、車輪にクローラモジュールを取付けることで、傾斜角度45度の不整地面でも移動でき、また段さ約30mmの障害物を乗り越えることが可能となった。また、本体は2台連結しながら移動できるため、起伏が大きい面では2台が強調して使用できた。



(a) 側面からの移動性能 (b) 背面からの移動性能

図8 標準的な検査ロボットの不整地移動性能

(2) 垂直壁面の接触性能

検査ロボットを吊下げているベルトの壁面からの距離を変化させ、ロボットの壁面への接触性能を確認した(図9)。ロボット本体には2台のダクトファンがあり、表1に示した2倍の反力で壁面に押付け力を作用させた。ベルト($l=1500\text{mm}$)が離れるほど接触角 θ は大きくなり、接触するためには、 $Mg \cdot \tan \theta$ 以上のファン反力が必要となる。 $s=500\text{mm}$, ($\tan \theta = 0.353$)では距離も短く容易に接触し、十分な押付け反力が作用している。

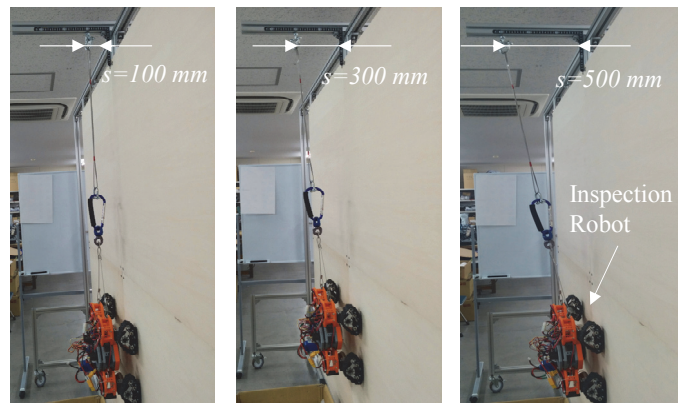


図9 検査ロボットの垂直壁面の接触性能試験

$s=100\text{mm}$, ($\tan \theta = 0.066$)のかなり離れた場合ではやや接触に時間がかかるが、前後輪とも接触できる。実際の壁面では様々な凹凸部(窓の庇、配管類)があるため、壁面からワイヤーを離せることができれば、ワイヤーの処理が容易となる。

上記のように、開発した検査ロボットは、押付け力を基に、壁面上を移動しながら、検査を行うことができることを確認した。

4.3 劣化診断方法と定量的評価

検査装置の裏面には、壁面検査用の打診ハンマと騒音計測システムが設置され、移動しながら壁面の劣化状態を検査できる機構とした。図10にタイル試験壁面を打診した場合の騒音波形を示す。ハンマはソレノイド磁力で回転し、先端の接触時間も調整できる。タイル接着が劣化した壁面を打診するとパルス状の減衰波形が得られた。このような減衰波形はタイル剥離部に見られる特徴であり、本検査機構でも同様な現象を捉えられることを確認できた。タイル面の診断方法には、これまで開発した波高値、相互相関、ウェーブレット解析を使用した。通常のタイル剥離はパルス状の減衰波形となるが、下地剥離は低周波数域での減衰が特徴となる。ウェーブレット解析では、2つの剥離状態を独立して検出できるため、タ

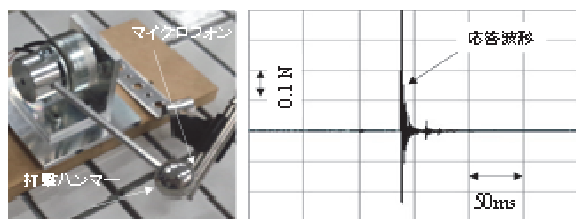


図10 ハンマ打診とマイクロフォン計測

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

イル面を4つの評価（健全、タイル剥離、下地剥離、タイル+下地剥離）で診断できることを再確認した。この診断手法をコンパクト化して、検査ロボットに搭載して検査を行いことで、壁面劣化状態におけるデータ解析の迅速化、通信、診断のリアルタイムを検討した。

4.4 検査ロボットシステムの維持・管理体制

開発したロボットシステムは、現在、建物模擬壁面で、拠点ロボットによる拠点構築、検査ロボットによる壁面検査試験を実施している。今後、2つのロボットを結合したロボットシステム実施する予定であり、早期に実運用に向けた対応を行う。また、ロボットシステムの維持・管理を併せた実施しており、当初の目的達成に向けた開発を進める。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計3件）

- ① F. Inoue, A. Honjo, T. Makino, S. Kwon, “Inspection Robot System Using Duct Fan and Deterioration Estimation of Building Wall that Can Be Applied Even in Disaster”, Proc. of 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2018), Oct. 17~20, 2018; Yong Pyong Resort, Korea. DC-5, PP.331-334.
- ② 井上文宏、牧野 伎、本庄 慧、“災害用建物外壁検査ロボットシステムの開発”、日本建築学会、建築の自動化技術シンポジウム論文集、Vol. 22、PP. 29-33.
- ③ Fumihiko Inoue, Daich Nakgawa, Takumi. Makino, Akira Honjo, “Development of Wall Inspection Robot Using Duct Fan that Can Be Applied Even in Disaster”, Proceedings of the SICE Annual Conference 2019, September 10-13, 2019, Hiroshima, Japan, on printed.

〔学会発表〕（計5件）

- ① 井上文宏、他、“災害時でも使用できる建物外壁の検査ロボットシステムと劣化診断方法（第1報）”、日本機械学会、ロボティクス・メカトロニクス講演 2016、2016. 5、2A2-09a3, PP. 1-2.
- ② 井上文宏、他、“災害時でも使用できる建物外壁の検査ロボットシステムと劣化診断方法（第2報）”日本機械学会、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016、2016. 5、2A1-09b1, PP. 1-2.
- ③ 井上文宏、他、“災害時でも使用できる建物外壁の検査ロボットシステムと劣化診断方法（第3報）”、日本機械学会、ロボティクス・メカトロニクス講演会（郡山）2017、2017年5月、1P1-D02, PP.1-2.
- ④ 井上文宏、本庄 慧、蟹澤力矢、牧野 伎、和田 麗、北洞 貴也、“災害時でも使用できる建物外壁の検査ロボットシステムと劣化診断方法（第4報、ダクトファン式拠点ロボットの性能実験）”、日本機械学会、ロボティクス・メカトロニクス講演会（小倉）2018、2018年6月、2A1-C03, PP.1-2.
- ⑤ 井上文宏、他 “災害対応用建物外壁検査ロボットシステムの開発”、建設ロボット研究連絡協議会、第18回建設ロボットシンポジウム論文集、Vol. 18、P1-11, PP1-2.

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：壁面移動ロボット

発明者：井上文宏、熊谷紳一郎、野島昭二、正司明夫、渡瀬 博、高橋謙一、佐藤 智

権利者：オリエンタル白石株式会社、株式会社ティ・エス・プランニング

種類：特許

番号：特願 2018-214048

出願年：2018年

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：北洞 貴也

ローマ字氏名：Takaya Kitahora

所属研究機関名：湘南工科大学

部局名：工学部機械工学科

職名：教授

研究者番号（8桁）：30204910

(2) 研究協力者

・研究協力者氏名：大野 英隆

ローマ字氏名：Hidetaka Ohno

・研究協力者氏名：大田 有

ローマ字氏名：Yutaka Ohta

・研究協力者氏名：土井 暁

ローマ字氏名：Satoru Doi