

# Twin-tube 式配管探索ロボット

穂坂 憲一, 劉 海博, 楯 貴志, 塚越 秀行 (東工大)

**Abstract:** In this study, a new method to advance and to carry wired sensors like a camera inside narrow and curving pipelines is proposed, which is aimed at watching the condition inside the pipelines. In order to increase the advancing distance and to carry a wired camera, the alternately-actuated drawing out type drive is proposed. In this method, since the tube is alternately pressurized, the area of the tube which passes in  $\Lambda$ -drive can be confined. As a result, the robot has many features with the superiority of the drawing-out type drive actuator. Finally, it is experimentally verified through experiments that this robot is able to go through some narrow and curving pipelines.

**Key words:** Mobile mechanism, Pneumatic, Pipe inspection robot

## 1. はじめに

長年地中に埋設されていたガス管は、腐食などにより破断や亀裂の恐れがある。このため、定期的に配管内の検査を行う必要があるが、コストなどの観点から、配管を掘り起こさずに内部の映像を取得する方法が求められている[1,2]。小口径配管内の検査方法として、カメラなどの探査機を押し込む方式が用いられてきた。しかし、このような方式では、直線状の経路に対しては有効であるもの、複雑に湾曲した管内深奥部に挿入することは困難であった。

この課題解決のため、筆者らは Twin 構造チューブによる狭隘地形内の移動探査ロボットを開発しその有効性を確認してきた(図1)[4]。

本稿では、長距離推進を実現する三つの方策を新たに紹介する。すなわち、1)鉛直配管内でも大きい支持力を発生しやすい能動蛇行機構,2)ラダー構造による推力の増加,3)分岐管において推進方向を選択する操舵機構、などである。

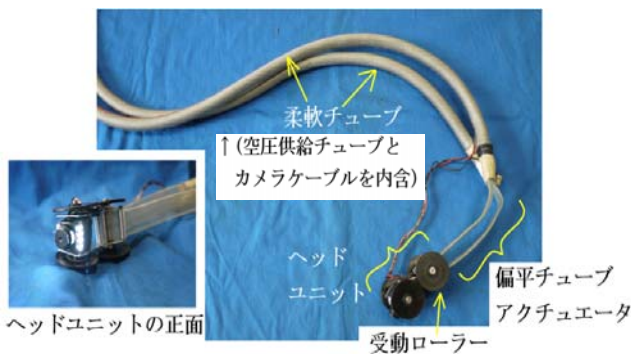


図1 試作した Twin-snake-I の外観

## 2. 基本構成と推進原理

Twin 構造チューブは、図2に示すように2本の柔軟チューブ・それらを連結する偏平チューブ・ヘッドユニットなどから構成されている。推力は、 $\Lambda$ -drive(ラムダドライブ)[3]と名付けた駆動原理によりヘッドユニットで生成される。すなわち、偏平チューブの内部を一方から流体圧で加圧すると座屈が生じ、この座屈点が流路を遮断しつつ下流側にスライドするという原理である。従って、加圧側チューブを環境に固定すると、無加圧側チューブが前方に繰り出される。また、加圧側チューブを切替えることにより、交互に前進することが可能となる。さらに、

無加圧側チューブを固定して加圧すると、加圧側チューブが後退する動作も生じる。以上の前進・後退方法により、鉛直の配管内でも体幹を支えながら推進することが可能となる(図3,4)。

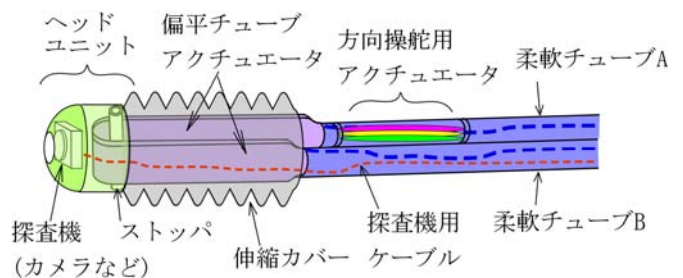


図2 基本構成

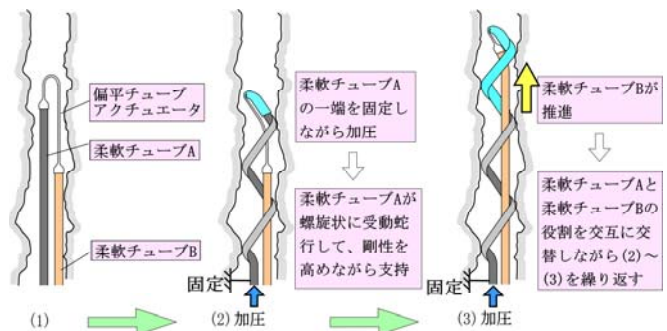


図3 受動蛇行による鉛直方向への推進原理

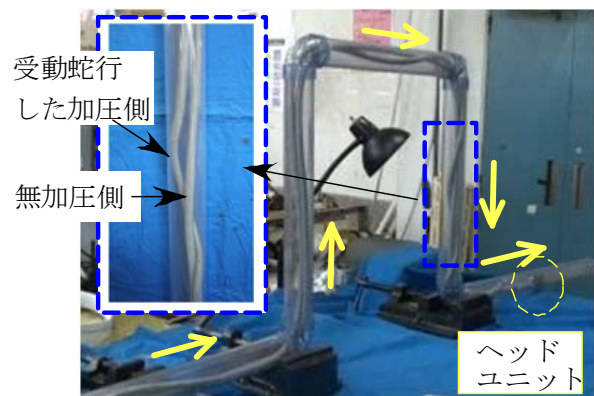


図4 鉛直管を含む内径50mmの4曲がりの屈曲管内の移動

### 3. 能動蛇行による支持力の向上

鉛直配管内の推進距離を長くするには、剛性増加だけに頼らず、一定間隔毎にチューブを配管内に支持固定しながら推進する機能が求められる。

そこで、受動的支持の限界(図5)を克服し、能動的に力を生成して蛇行する構造を導入する。図6に示す能動蛇行機構は、扁平チューブとマッキベン人工筋肉との並列構造を柔軟チューブの途中に設けたものである。柔軟チューブの一方を加圧すると、扁平チューブとマッキベン人工筋の双方も加圧される。このとき、マッキベン人工筋が収縮する効果により、扁平チューブは螺旋状に変形しながら剛性を増すため、配管内壁を押し付けながら加圧側チューブを配管内に固定できる。

上記能動蛇行機構として、外径7mm 全長300mmのマッキベン人工筋肉、および外径8mm 全長300mmの扁平チューブを使用した。内径50mmの塩ビ管内において、チューブ内の圧力と発生した支持力とを測定結果から、内径50mmの配管内で0.4MPaに加圧された能動蛇行機構は約17Nの支持力を発生でき、約20mのチューブを鉛直方向に支えられるものと見積もれた。

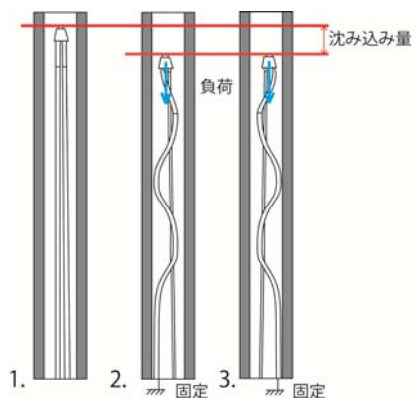


図5 受動蛇行の限界

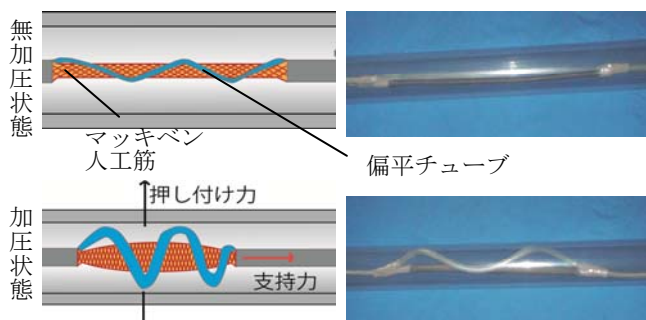


図6 能動蛇行による支持力の生成原理

### 4. 実験

試作した探査機のTwin-snake-IIの外観を図7に示す。探査機の推力と湾曲方向を操作するために、双方を同時に操作できるコントロールボックスも開発した。

まず、先行研究において推進困難な内径50mmの分岐管における方向操舵実験を行った。コントロールパネルにあるジョイスティックを用いて、短時間でスムーズな方向操舵を行えることを確認した(図15)。さらに、試作1号機であるTwin-snake-Iでは推進不可能だった内径50mm、高さ4mの鉛直管内の推進実験を行った。能動蛇行機構により、高さ4m程度の配管に対して、1分間程度で上れることを確認した。また、内径50mm、全長14m、6つの曲り部がある長距離配管における推進実験も行い、14mの距離を約5分間(推進速度50mm/s)で踏破できることが確認した(図7)。



図7 全長14mの配管の推進実験

### 5. 結論

柔軟なTwin構造チューブによる配管内移動距離を拡張するために、能動蛇行機構とラダー状推進ユニットを導入し、これらの有効性を実験により確認した。また、探査機の前頭ユニットに柔軟構造の方向操舵ユニットを装備することにより、曲がり部の適応性を損なうことなく、分岐管で推進方向を選択可能となることも確認できた。

今後は、配管内に存在する障害物の踏破性能や操作性の向上策を検討していく予定である。

謝辞：本研究は科研費基盤B(課題番号：25289057)および油空圧機器技術振興財団のご支援を受けて行われた。

### 参考文献

- [1] "平成22年度地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査「次世代保安向上技術調査」(保安技術調査)(総合調査)調査報告書", 社団法人日本ガス協会, 2013
- [2] "繰り出し式アクチュエータを利用したカメラのガスパ管内相通性評価試験について", 東京ガス(株)パイプライン技術センター, 2011
- [3] 森 庸太郎, 塚越 秀行, 北川 能, 鎌倉 圭: "リア流体アクチュエータ:  $\Delta$  (ラムダ) ドライブの提案", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'08, 1A1-B24(2008)
- [4] 穂坂 憲一, 塚越 秀行, "繰り出し式柔軟流体アクチュエータによる狭隘地形内の移動探査ロボット—第2報: 方向操舵手法, ロボティクス・メカトロニクス講演 2012

# スライド式柔軟流体アクチュエータ: $\Lambda$ -drive

東京工業大学 森 庸太郎 塚越 秀行

**Abstract:** This paper discusses a new type of fluid powered actuator sliding along a flexible tube. The actuator named  $\Lambda$ -drive is composed of a flat tube and a slider. In the slider, the tube is bent and then the buckling point occurs, which helps to cut off the fluid passage and to seal in order to provide the driving force to the slider without generating large friction. In this paper, after the conventional sliding actuators are compared, the design method of the proposed actuator for making stable drive possible, the classification of the driving mode, and the analysis of the output force are discussed. Finally, as one of the applications of the actuator, the active drive of the zipper is proposed and its feasibility is shown.

**Key words:** Soft actuator, Pneumatics, Water hydraulics, Search & rescue, medical robot

## 1 はじめに

流体アクチュエータの駆動方式の1つとして、チャンバー内の流路の一部をなんらかの方法で遮断し、加圧しながらその遮断部を上流から下流にスライドさせる方式が存在する。「遮断部スライド駆動」とも呼べるこの方式は、チャンバーとして長い柔軟チューブを用いたときにその有用性が高く、1) 装備したチューブの自然長とほぼ同等のストローク長を得られ、2) 湾曲経路に沿った運動も生成でき、3) 遮断部およびチューブのどちらでも出力ポートとして使用できる、など特異な性質を備えている。そのため、これまでも複数の構成例が模索されてきたものの、摩擦の低減とシール機能の向上を同時に望める遮断方法が課題となっていた。

本稿では、上記課題解決を図る遮断方法として、チューブの座屈現象に着目する。そして、「 $\Lambda$ -drive(ラムダドライブ)」[1]と名付けた遮断部スライド駆動を紹介し、遮断部の特性や安定な駆動力を生成するための設計方法を検討する。そして、これらの適用例も紹介する。

## 2 $\Lambda$ -drive の動作原理とチューブの製作

チューブを押しつけることなく流路を遮断する方策として、筆者はチューブの座屈に着目した。Fig.1に示すように、無加圧状態で断面の潰れた扁平チューブを曲げてリング状のスライダに通し、その一方から内部を流体圧で加圧すると、スライダは下流側に搬送される。曲げ部中央のチューブが屈服座屈に達し、流路を遮断したまま座屈点の下流側に移動するからである。曲げ部の形状とギリシャ文字 $\Lambda$ との類似性から、この構成を $\Lambda$ -driveと名付けた(Fig.2)。なお、扁平チューブの代わりにパイプ状チューブの使用は適さない。なぜなら、流路は遮断できるもの

の、座屈点を境に下流側のパイプ状チューブを押し潰す力が抵抗となり、座屈点がスムーズに移動しにくいからである。よって、本稿で以降述べるチューブは、すべて扁平チューブを示すものとする。

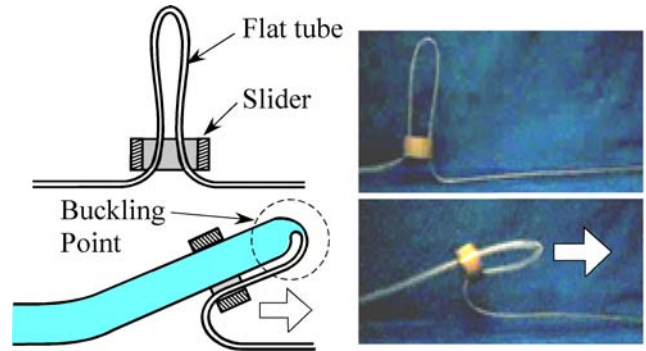
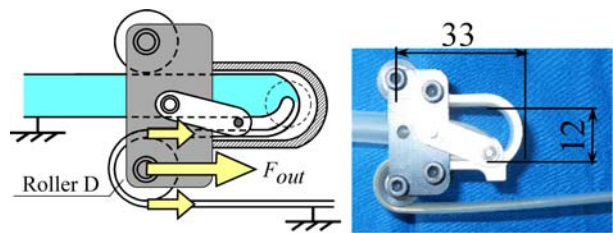
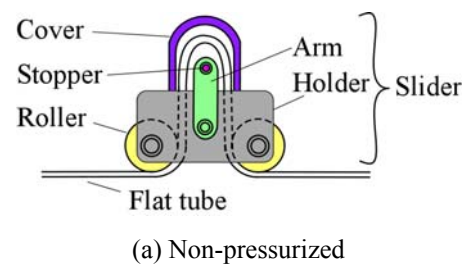


Fig.1 Basic principle of  $\Lambda$ -drive



(b) Pressurized  
Fig.2 Slider Structure of  $\Lambda$ -drive

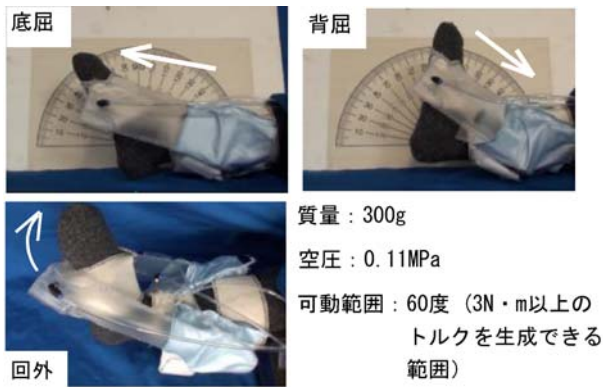


Fig.3 Application to Motion Socks to prevent from blood clot

チューブまたはスライダのいずれかを固定したとき、その他方が本アクチュエータの出力として取り出される。チューブを円筒に巻き付けた状態でチューブの一端を空気圧で加圧したとき、スライダは螺旋運動を生成し、スライダを人体の脛部に固定したとき、チューブが足関節の屈伸運動 (Fig.3) を生成することが確認されている。

### 3 海洋探査用流体ロープウェイへの適用

災害によりがれきが流出した港湾施設内、岩場の散在する浅瀬、磯波帯、などにおいては荒波や障害物の影響を受けるため、ダイバーによる捜索作業や自立式潜水ロボットによる情報収集作業は困難である。このような状況でも目標軌道に沿って海中を安定に移動する方策の1つとして、流体ロープウェイ (Fluid Powered Ropeway)[1]の適用を試みることにした。すなわち、海洋内に簡易的に設置したホースに沿って、ゴンドラ探査機を移動させるという方法である (Fig.4)。ホースの設置方法として、ヘリからの空中落下、ボートで迂回しながらの搬送、または近距離の場合には投擲なども挙げられる。

ここで、ホースとして扁平チューブと同様に無加圧状態で扁平形状を有する消防ホースを用いることとした。消防ホースは摺動に対して耐摩耗性が高く、そのうえ耐圧1.2MPa程度まで有するため、 $\Lambda$ -driveの高出力化を図るうえでも有望である。

試作したゴンドラ探査機は Fig.5 および Table1 に示すような構成となった。ホースの一端を岸辺に固定し、アンカーを用いて他端を海底に固定したうえで (Fig.5)、水道水圧により消防ホース内を加圧したとき、約 300mm/s の速度で海上に露出した岩場を乗り越えながらゴンドラ探査機が移動できることを確認した (Fig.6)。さらに、浮力調整用容器内の水量調整により、ゴンドラは海中を安定に移動できることも確認された。

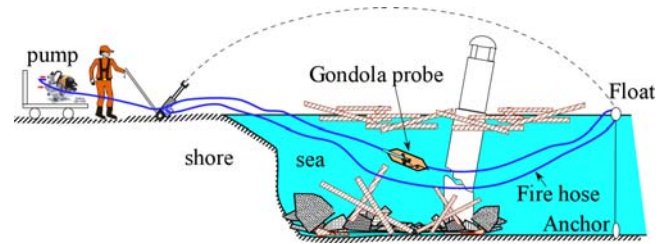


Fig.4 Marine inspection by Fluid Powered Ropeway

Table 1 Specification of the developed gondola

Length	920mm
Height	282mm
Width	250mm
Weight	21kg
Applied water pressure	0.4MPa
Speed	300mm/s
Output power	180W
Payload	60kgf



Fig.5 Gondola traversing over the rocks in the sea



Fig.6 Gondola sliding along the fire hose inside the sea

### 4 結言

本稿では、装備したチューブの自然長と同等のストローク長を得られる遮断部スライド駆動に着目し、 $\Lambda$ -driveと称する新たな駆動方式を紹介した。また、それらの妥当性を検証するために、海洋探査機への適用例も示し、その有効性を確認した。

[1] Yotaro Mori, Hideyuki Tsukagoshi, Ato Kitagawa, "Fluid Powered Ropeway: Self-propelled Probe Sliding Along Flexible Tube", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.2, 215-224 (2011)

# 飛行マニピュレータ —ドア開け動作を目指して—

Aerial work robot with manipulation function  
-Aiming for door opening operation-

浜田 貴弘, 飯塚 隆真, 渡辺 将広, ダメートリ アシュリ, 塚越 秀行 (東工大)

Takahiro HAMADA, Tokyo Institute of Technology  
Ryuma IIZUKA, Tokyo Institute of Technology  
Masahiro WATANABE, Tokyo Institute of Technology  
Dameitry Ashlih, Tokyo Institute of Technology  
Hideyuki TUKAGOSHI, Tokyo Institute of Technology

This paper describes on the development of an aerial work robot with the manipulation function. Until now, a moving means of the search robot for a dangerous building has been developed by the crawler. However, the crawler is difficult to correspond to the place uneven terrain and the elevation of the ladder. In order to solve the problem, it is suggested the flying robot with a manipulation function approach to make its own access road. This time, we propose a method for implementation of door opening. And, through experimentation, we have verified the effectiveness of this approach to the problem.

**Key Words:** Rescue robot, Aerial manipulator, Pneumatic actuator

## 1. 緒言

火災や放射能汚染事故などの災害の対応策として、作業者の安全性を確保しつつ遠隔操作により危険建物内の情報を収集できるロボットが求められている。このようなロボットの移動方法に着目してみると、先般の福島第一原発事故において、原子炉建屋内に投入されたロボットはいずれもクローラ型であった。操作が比較的簡便な割に高い対地適応性が得られ、そのうえ高いペイロードも維持しやすいため、現状では実用性の高い移動方式の1つと思われる。

しかし、災害現場では、障害物の散乱した凹凸の激しい地面や梯子の昇降による垂直移動を要する場所など、クローラでは対応しづらい環境が少なからず存在する。このような状況にも対応する一策として、3次元空間を自在に浮遊できる飛行ロボットの活用が有効である。そのうえ、仮に進路が閉ざされた場合でも、飛行ロボット自体が経路を切り開く機能を有していれば、建物内を広域に探査することも可能となる。

そこで本研究では、「飛行マニピュレータ」と名付けた力作業も行える飛行ロボットの新たな概念を導入し、その一例として、4枚の回転翼を搭載したヘリコプター(クワッドローター)によるドア開け作業の実現方法を検討している。第一報では、クワッドローターをドア面に吸着固定する方法を提案し、回転翼の揚力によりドアの押し開け動作が可能となることを示した[1]。第二報では、飛行マニピュレータの概念と構成を整理し直したうえで、ドアノブを回す動作を軽量・高出力な構成により生成するための「アクセス動作分離駆動式アーム(ADD-Arm)」を提案した[2]。

本報では、ドア開け動作手順と機能を検討し、実現に要したマニピュレータについて詳細に報告する。

## 2. ドア開け動作手順

### 2.1 飛行マニピュレータの構成

本研究で目指す「飛行マニピュレータ」とは、張り付き動作を行うための姿勢変換機能、作業時の反動を支えるための固定支持機能、そして、ペイロードの小さな飛行体に搭載可

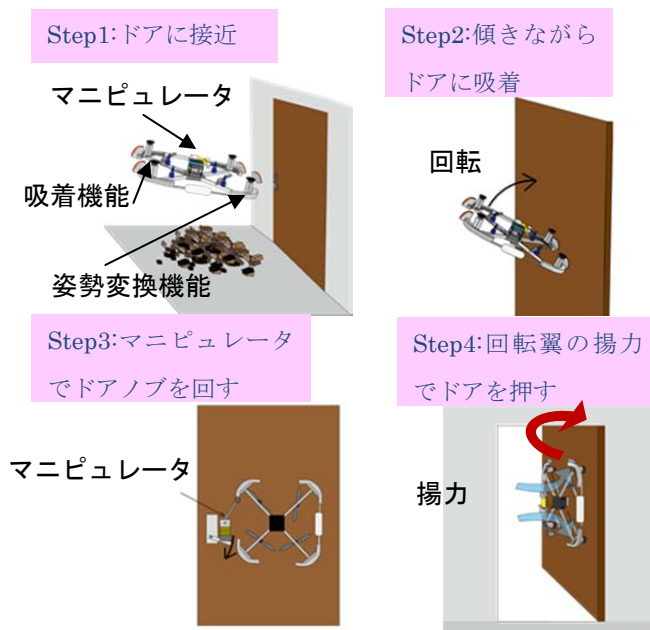


Fig.1 Process of door opening by Aerial Manipulator

能な軽量高出力のマニピュレーション機能を融合した新しい飛行作業ロボットである。浮遊しながら軽量物体を掴む飛行ロボットはすでに報告されているが[5]、本研究で目指す飛行マニピュレータはこれとは異なり、飛行体を環境に固定支持したうえで、人間の行う日常作業の一部を代行できる程度の力の生成を目指したものである。

筆者らはこのような飛行マニピュレータの一例として、クワッドローターによるドア開け動作の実現を目指している。そのプロセスは、Fig. 1 に示すように、1)前傾姿勢のままドアに接地し、2)後方回転翼の揚力を高めて本体平面がドア面と平行になるまで前転させてドア面に固定し、3)マニピュレータでドアノブを回した後、4)回転翼の揚力によりドア開け動作を実現するというものである。この実現のための機能について述べる。

## 2.2 姿勢変換機能

クワッドローターは、前方二つの揚力に対し、後方2つの揚力が大きくと前進を行う。その特性を生かし、前方を固定しながら前進すると、自然とピッチ軸周りの回転が起こる。その実現のために、ヒンジと吸盤を用いた機構を導入した。すなわち、前進時にドアに衝突することで吸着し、ピッチ軸周りに回転して、後方の吸盤を張り付けるという手法である。これにより、前傾姿勢のままドアに接地し、本体平面をドア面と平行になるまで前転させることが可能になった。

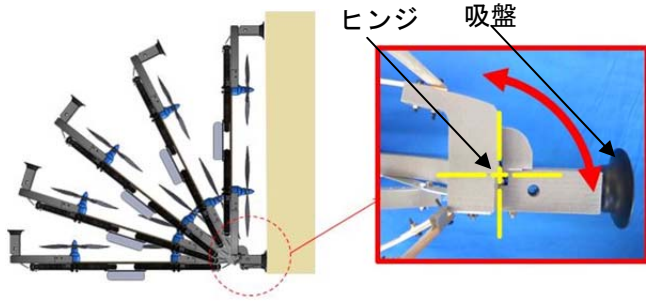


Fig.2 Rotation mechanism

## 3. ADD-Arm ソフトバッグ主体式

可変拘束機構の全体像は Fig.3 のように、拘束ワイヤと復元力を発生する引きバネで構成されており、SMA アクチュエータの ON・OFF 動作で拘束状態を切り替える。初期状態では縮んでおり、SMA アクチュエータを OFF にし、ロック状態で加圧すると、拘束を施していない箇所から膨らみ、大きな湾曲角を生成する。SMA アクチュエータを ON にし、ロック状態を解除すると、ワイヤが送り出され、まっすぐの状態になる。減圧すると、引きバネの復元力で初期状態に戻る。

動作の様子を Fig.5 に示す。可変拘束機構を二つ設け、左右の湾曲動作ができるものをドアノブ回しへ応用すると、湾曲しながらドアノブ上面へアプローチしていることがわかる。そして、拘束状態を解除し、ドアノブ回しを行う。これにより、ドアノブを回せる範囲は拘束無しに比べ、拘束を施し湾曲動作を実現することで、約3倍に拡張される。

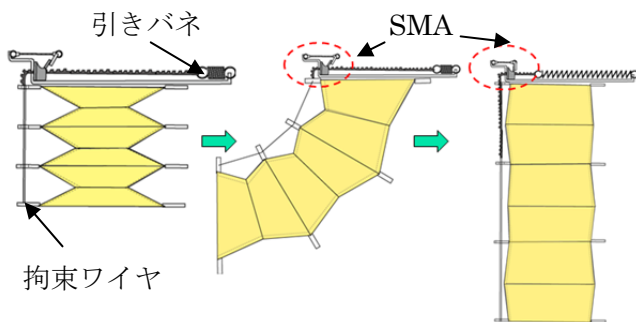


Fig.3 variable restriction mechanism

## 4. ドア開け動作の実現

### 4.1 全体構成

Fig.4 に飛行マニピュレータを示す。総重量 1700g になり、ADD-Arm は側面に搭載し、カウンタウェイトに吸着用とアーム用のマイクロポンプ(電装産業：型番 DSA-1-12)を2個搭載することにより重心バランスをとる。コントローラとして Ardupilot2.6 を用いており、飛行と吸着機能、アームの操作を行っている。飛行時間は5分間で、通信距離は最大で 100m である。

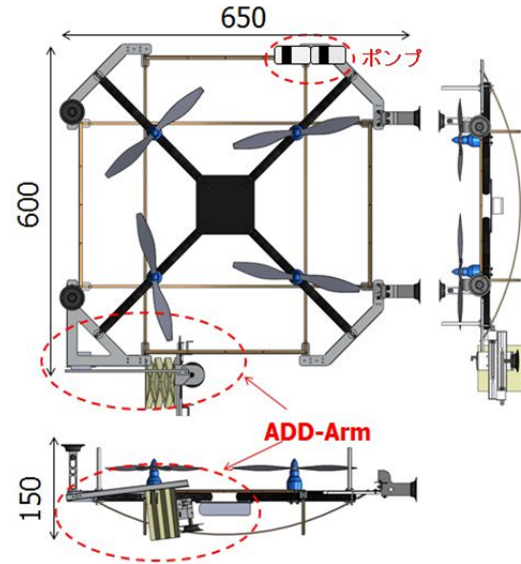


Fig.4 Over view of the aerial manipulator

### 4.2 動作実験

Fig.5 にドア開け動作実験の様子を示す。①ドアに接近し、目標位置にアプローチしている。②後方回転翼の揚力を高めて本体平面がドア面と平行になるまで前転させてドア面に固定している。③ADD-Arm ソフトバッグ主体式を用いて、手先の吸盤を吸着させ、約2分間の時間でドアノブを回すことができています。④回転翼の揚力を用いて、ドアを押しあけています。このように、ドア開け動作の一連の流れを可能だと示すことができた。

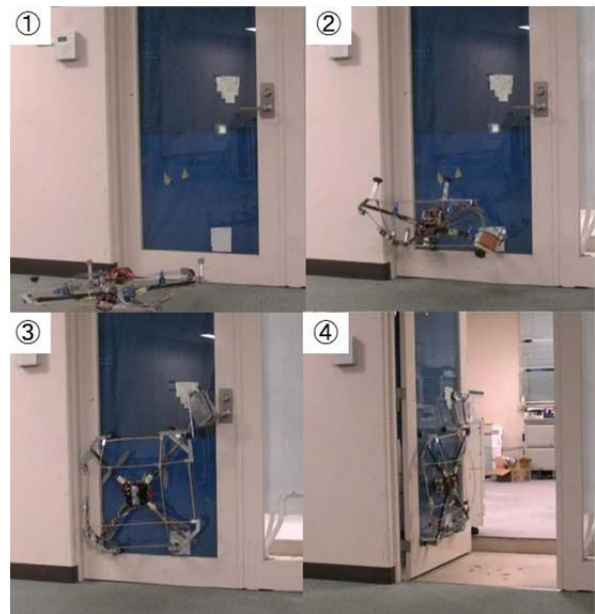


Fig.5 Implementation of door opening

## 参考文献

- [1] 碓, 浜田, Dameitry, 塚越, 北川: マニピュレーション機能を有する飛行作業ロボット ー第1報: 吸着固定方法の提案, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2013), 1P1-P06(2013)
- [2] 浜田, 飯塚, Dameitry, 塚越: マニピュレーション機能を有する飛行作業ロボット ー第2報: 軽量高出力マニピュレータの提案, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門 講演会 SI2013 論文集, 1C1-1(2013)