

# 2006 年度 科学技術共同研究センター 研究プロジェクト実績報告書

課 題	翼の羽ばたきによるホバリングロボットの開発
研究組織	渋谷 恒司 (理工学部・講師) 塩見 洋一 (理工学部・助教授) 辻上 哲也 (理工学部・助教授)

## 1. 研究発表

- (1) 渋谷恒司, 翼の羽ばたきによる飛行ロボットのホバリングに関する基礎研究, (社)日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06, 2P2-C05, (2006)
- (2) 渋谷恒司, 長谷川 慧, 米田 竜, 塩見洋一, 辻上哲也, 羽ばたきホバリングロボットを目指して～浮上に必要な羽ばたき周波数と電力～, (社)日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007, 2A2-B04 (2007)

## 2. 2006 年度の研究計画

近年, 生物型ロボットに関する研究が盛んである。これらの研究は, 生物が持つ高度な移動能力, 知能などを, 実システムとして実現しようという試みである。それらのロボットは, 陸上, 水上, 水中などが主な活動範囲である。しかしながら, 空を飛べるようなロボットは, まだ十分開発されていない。特に, 羽ばたきによる飛翔を目指したロボットは, ごく小さなサイズでは試みられているが, 鳥のようなある程度の大きさがあるロボットでは, ほとんど無い。このような羽の羽ばたきによるロボットを開発することにより, 陸上を移動する生物には見られないような 3 次元的な空間把握能力, 体勢感覚などの研究に応用できるのではないかと期待できる。

本研究の最終的な目標としては, 鳥の羽ばたきロボットを製作し, それを用いて鳥の知能, 特にその 3 次元空間把握能力などを明らかにすることにある。その第一歩として, 本研究ではまず, 羽ばたきによるホバリングロボットの開発を目標とした。2006 年度は研究の初年度であり, 羽ばたきロボットによるホバリングの実現可能性の検討, およびロボットの性能の把握や流体力学的な解析に必要な基礎技術の確立を中心に研究を行った。以下に本年度の具体的な研究計画について示す。

### (1) 羽ばたきによるホバリングの実現可能性の検討

羽ばたきによるホバリングを実現するためには, 自重を浮上させるだけの推進力を羽ばたきのみで得なければならない。推進力は様々なパラメータによって影響を受けていると考えられるが, ここでは羽ばたき周波数に着目し, 羽ばたき周波数と浮上させることのできる質量, および必要な電力との関係について検討した。

### (2) 推進力測定方法の確立

本研究プロジェクトの最終目的はホバリングによって飛翔する鳥型ロボットの製作である。ホバリングの実現においては, 空中静止するための羽ばたきによる推進力の把握が重要になる。本研究では翼の発生させる推進力の測定に主眼を置いた。簡便に推進力の大きさを測定するには, ばねやはりが利用されることが多いが, 羽ばたきによる推進力は変動しており, 推進力以外の力も作用していると考えられるため, ばねやはりをを用いた単純な測定では正確な値を求めることが困難である。そこで, 本研究では片持ちばりをを用いたひずみ測定から, FFT 解析, はり理論, 振動理論等を駆使して, 推進力を推定する方法を考案した。

### (3) 翼周りの空気の可視化

羽ばたきロボットの開発には、流体力学的な検討が必要である。このためには、可視化レーザーによりホバリング時の翼まわりの空気の流れを観察することが有効であると考えら得る。しかし、翼のような動く対象物の流れ場を可視化する手法はまだ確立できていない。そこで、まず翼の周りの空気の流れを可視化する手法を確立した。

### 3. 研究実績の概要（研究経過と成果）

#### 3.1 ホバリング実現性の検討

##### 実験目的

ホバリングするためには羽ばたきにより浮上することが必要である。そこで、羽ばたきにより、どの程度の質量まで浮上が可能かどうか、またどの程度の羽ばたき周波数と電力が必要かを実験により求めた。

##### 実験方法

実験に用いるロボットとしては、市販の羽ばたきラジコン飛行機(商品名「サイバード」、以下、鳥型ロボット)を改造したものを利用した。市販品から不要な部分を取り除いて実験を行った。

図1に示すように、鳥型ロボットを垂直に張ったワイヤに取り付けた。これにより機体は垂直方向のみの運動に拘束される。

D.C.モータに直流電源を直接つなげ動作させた。機体に滑車を通してカウンターウェイトをつなげ、また機体に直接おもりをつけることにより、機体の質量を調節した。各質量において、電圧を15Vに設定し、電源からの電流を少しずつ増やし羽ばたかせ、もとの位置から3cm以上、かつその位置に10s以上とどまったとき浮上したと認定し(浮上基準)、そのときの電力、羽ばたき周波数を計測した。電力は、電圧と電流の値から、羽ばたき周波数は、羽に取り付けたひずみゲージの出力から算出した。



図1 垂直に置かれた鳥型ロボット

##### 実験結果

まず、電流を増加させることにより機体自体は浮上した。これにより、十分な電力があればこの鳥型ロボットの質量でも浮上することが確認された。

次に、機体の質量と先に述べた浮上基準を満たすため必要な最小限の電力、および羽ばたき周波数を計測した。その結果、図2および図3に示すようなグラフが得られた。それぞれのグラフにおけるプロットは、計測値を、また、直線は回帰直線を示している。このように、質量が大きくなると、必要な電力と羽ばたき周波数は大きくなる。また、電力と羽ばたき周波数はほぼ比例していることもわかった。

##### 考察

ホバリングの力学モデルでは、羽の上にある空気を下に押し出すことによって、すなわち空気に運動量を与え、その運動量の変化と自重とが釣り合うことによって空中で静止すると考える。ホバリング時に空気に与えるべきエネルギーは以下の式で求められる。

$$P_{ind} = \sqrt{\frac{m^3 g^3}{2 r r^2 f}} \quad (1)$$

ただし、 $m$  は機体の質量、 $g$  は重力加速度、 $\rho$  は空気の密度、 $r$  は半翼幅、 $\alpha$  は羽の羽ばたく角度である。これを今回の実験に当てはめて計算してみる。今回それぞれの値は  $m=0.125\text{kg}$ 、 $g=9.8\text{kg/m}^2$ 、 $\rho=1.23\text{kg/m}^3$ 、 $r=0.37\text{m}$ 、 $\alpha=0.85\text{rad}$  であるので、これを代入すると、約  $2.5\text{W}$  となる。実測した電力は  $21.5\text{W}$  だったので、その約  $12\%$  となる。

この差として、モータや減速機における損失、羽ばたきに伴う空気抵抗に抗して行う仕事が挙げられるが、この他に、摩擦による損失が大きいのではないかと考えられる。今回の実験装置では鳥型ロボットがワイヤのガイドに拘束されており、また羽ばたく際、大きな振動を起こすため、ワイヤとの摩擦力が大きいと考えられる。

次節(3.2)で述べる結果では、片持ち梁とひずみゲージを用いて、同じ機体の推力を計測している。その結果、羽ばたき周波数[Hz]  $\times 0.29 =$  推進力[N] という結果が得られている。今回の結果に当てはめれば、例えば  $10\text{[Hz]}$  において  $2.9\text{N}$  得られることになるが、図3のグラフを見ると、約  $140\text{gf}=1.4\text{N}$  と、約半分の値となっている。すなわち、理論的にはより多くの推力を得られるはずだが、摩擦などの損失により小さくなっているものと考えられる。

### 3.2 推進力測定方法の確立

#### 目的

鳥型ロボットの性能を評価する上で、どの程度の推進力を得られるかを計測することは非常に重要である。しかしながら、梁とひずみゲージによる計測データは、推進力以外の様々な振動も同時に計測してしまうため、これらの要素を除くことが必要である。そこで、この問題を解決する手法を考案し、実験により計測データから推進力を推定した。

#### 実験方法

図4に、実験の様子を示す。鳥型ロボットは図のように垂直に取り付けられており、推進力は梁に貼り付けられたひずみゲージによって計測する。鳥型ロボットが羽ばたくことにより、下向きの推進力を計測することになる。

#### 実験結果

図5に鳥型ロボットの羽ばたき周波数を変化させた時のひずみ波形を示す。A、B、C、D各領域では羽ばたきの周波数が異なり、E領域では羽ばたきを止めた際の波形を示している。C領域では共振による著しい振幅の増加が見られる。この様に、羽ばたき周波数によりはりの振動特性が大きく影響することがわかる。本研究ではこの波形から推進力を推定することにした。具体的には以下の手順1～4により推定を行った。

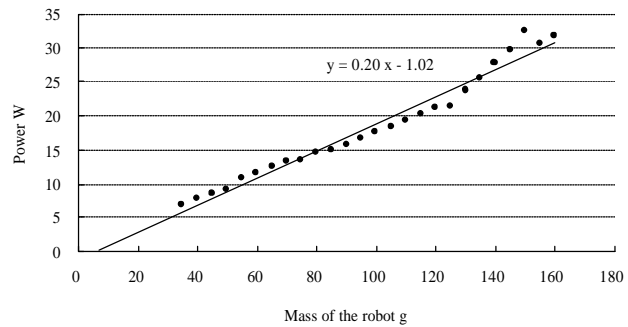


図2 浮上基準を満たす最小電力と機体質量との関係

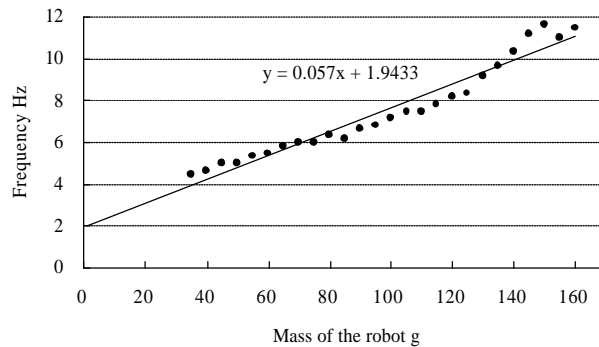


図3 浮上基準を満たす最小羽ばたき周波数と機体質量との関係

- 手順 1 : 実験から得られた出力波形のフーリエ級数展開から , 出力波形の時間関数を取得する .
- 手順 2 : 出力波形の時間関数とはりの運動方程式の理論から入力波形を取得し , 入力波形の時間関数を取得する .
- 手順 3 : 入力波形の時間関数から羽ばたきの周期に関する余弦項のフーリエ係数の取得を行う .
- 手順 4 : 手順 3 の結果から最大ひずみとそれを生み出すときの羽ばたき周波数を得 , 最大ひずみから片持ちはりの曲げ理論より推進力の推定を行う .

以上の手順を実験から得られた波形の A , B , D 領域について推進力を求めた結果を図 6 に示す . この結果より , 本研究で用いた鳥型ロボットの羽ばたきによって得られる推進力  $F [N]$  と , 羽ばたき周波数  $f [Hz]$  の関係は ,

$$F [N] = 0.29 \times f [Hz] \quad ( 2 )$$

となることが推定できた . このように , 片持ちばりによる簡便なひずみ測定により , FFT 解析やはりの理論等を用いることで複数の波が混在する測定データから推進力のみを推定することが可能となった .

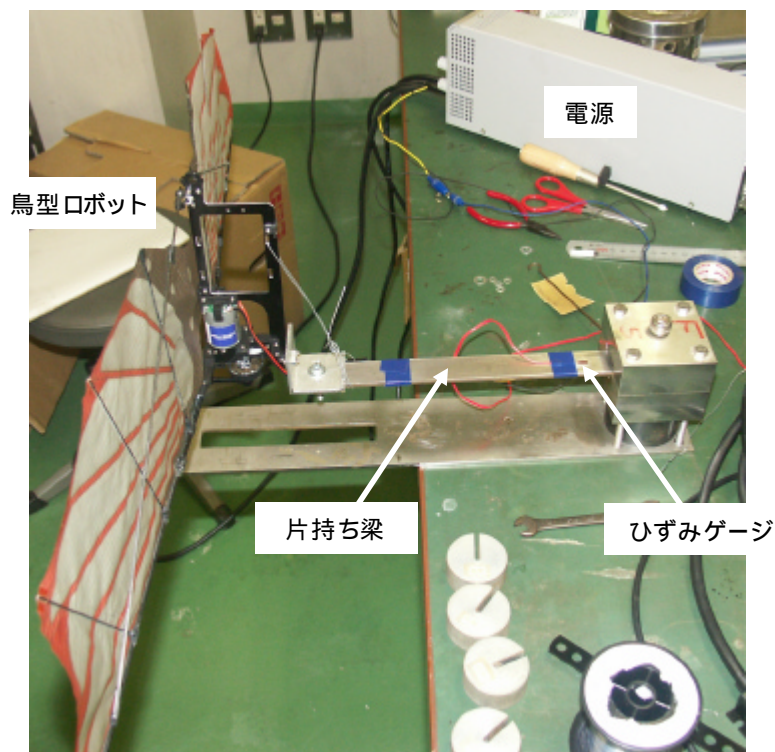


図 4 実験装置の様子



図5 羽ばたき周波数変化に伴うひずみ振幅波形

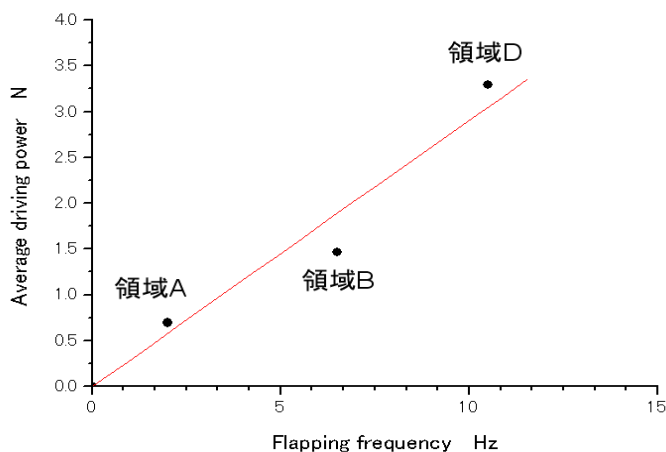


図6 推進力の推定結果

### 3.3 翼周りの空気の可視化

#### 目的

本研究は実際にホバリングを行うロボットを製作するうえで重要となる翼周りの流れの様子を把握するために、PIV(粒子画像流速測定法:Particle Image Velocimetry)を用いて実際に羽ばたきを行う鳥型ロボットの翼周りの流れの解析を行った。

#### 実験方法

前節までに用いたものと同じ鳥形ロボットを用い、その翼周りについて、煙発生装置であるポータースモークを用いて流れを可視化し、得られた画像から PIV で流れの解析を行い、速度分布を定量的に求めた。

#### 実験結果

図7に鳥型ロボットが羽ばたくときの翼周りのベクトル図を示す。サイバードが最上点から下方向に羽ばたくとき、翼の下面に最上点に至るまでに形成された斜め後方への速い流れが生じている(図7(a))。なお、この速い部分の流速はPIVより約3.5m/sであることがわかった。

鳥型ロボットがほぼ水平の状態から下向きに羽ばたくとき、翼の下面では下向きに押し出す流れが生じている。さらに、羽の前縁では押し出された流れが羽の上面に流れている。また、斜め後方に排出された流れと翼上面での下向きの流れによって渦が形成され始めている(図7(b))。なお、下向きに押し出す流れおよび翼の上面に流れている部分の流速は約3m/sであり、渦が形成し始めている部分の流速は2.5m/s~3.5m/sであることがPIVよりわかった。

鳥型ロボットがほぼ水平の状態から上向きに羽ばたくとき，翼周りには翼の動きに誘引された上向きの流れが生じている．さらに，そのときは後方に排出される流れがほとんどない（図7(c)）．これは翼の動きに伴って後方に排出される流れがなくなったと考えられる．また，翼の上面から押し出された流れによって渦ができています．なお，翼周りの流速は約3m/sであり，渦を巻いている部分の流速は約2.5m/sであることがPIVよりわかった．

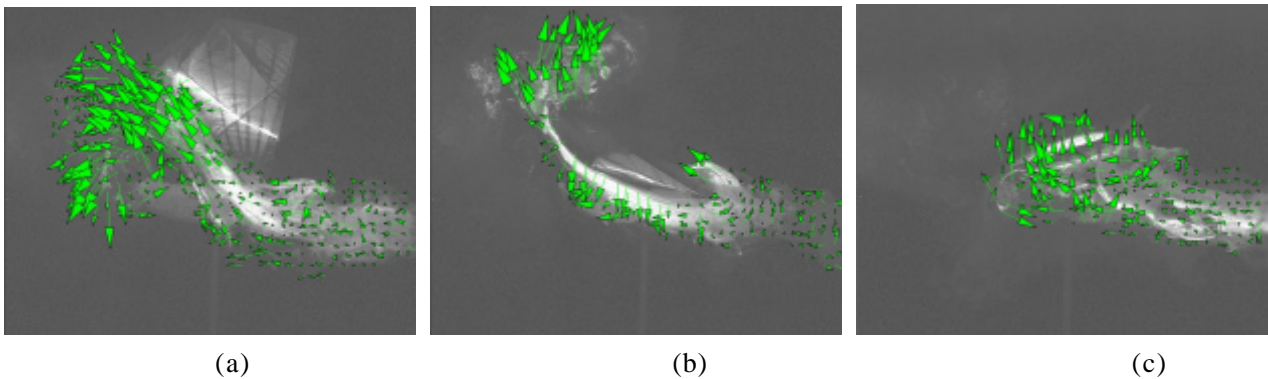


図7 サイバードの翼周りのベクトル図

### 3.4 まとめと今後の課題

今年度は，鳥型ロボットを用いて，浮上するかどうかの検討，および推進力の計測方法と翼周りの流れの可視化手法の確立を重点に行った．今後は，まず，推進力と翼周りの流れの可視化を同時に行い，これらの関係を明らかにしていきたいと考えている．特に，翼の材質や形状を変化させたとき，どのような流れが生じ，それが推進力にどのような影響を与えているのかを考察する予定である．また，羽ばたく際非常に大きな振動が生じており，ホバリングする際には問題となる．そこで，羽ばたきの際の振動を減少させる機構の検討を行う予定である．

## 4. 本研究課題のキーワード

- |           |              |            |           |
|-----------|--------------|------------|-----------|
| (1) ホバリング | (2) 羽ばたき     | (3) 鳥型ロボット | (4) エネルギー |
| (5) 推進力   | (6) フーリエ級数展開 | (7) 流れの可視化 | (8) PIV   |