

ドローン安定飛行のためのロボスト で高精度な風速・距離計測 — ロータ損傷の検出 —

金沢大学 理工研究域 フロンティア工学系
教授 得竹 浩

2024年7月30日

従来技術とその問題点

小型のドローンや現在開発が進められている空飛ぶ車などでは、耐故障性の確保が幅広い実用化のカギとなる。特に浮力を生み出しているロータの信頼性は最も重要である。

■ ドローンの損傷検出

従来手法

回転するロータの発生する音や機体振動から損傷を推定

→ 特定の飛行姿勢でしか検出できない。

外乱に弱い。

提案手法

ロータ損傷と相関の高いロータの吹き降ろし速度を推定する。

従来技術とその問題点

■ 従来の風速計測

直接計測

熱線風速計, ベーン式, ピトー管等

→ 流れを乱す.

吹き下ろし

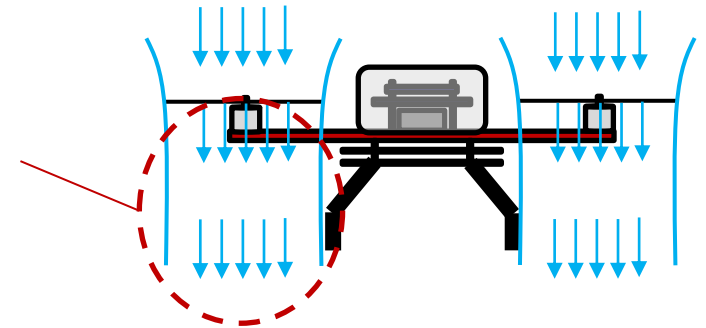


図1 ドローン吹き降ろし

遠隔計測

超音波風速計 (位相差やバースト波の立ち上がりを検出)

→ 乱れに弱い

新技術の特徴・従来技術との比較

- 流れの中を通過する超音波の到達時間から吹き降ろし速度・ロータ損傷を推定する.
- 拡張カルマンフィルタを適用し、特徴的な波形をマッチングすることで到達時間をロバストに計測する.
- 従来技術の問題点であった、乱れた風の中で正確に風速を検出するアルゴリズムの開発に成功した.

■ 提案システム

ロータ下部に超音波マイク, スピーカを設置し, 到達時間から吹き降りし速度やその特徴, 損傷の有無を推定する.

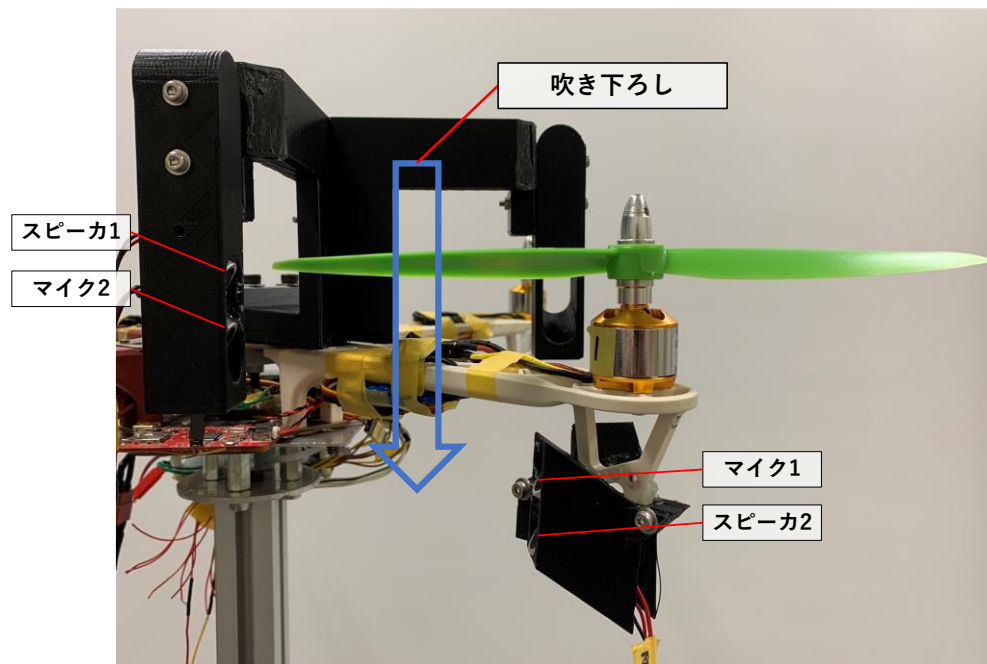


図2 超音波による吹き下ろし推定システム

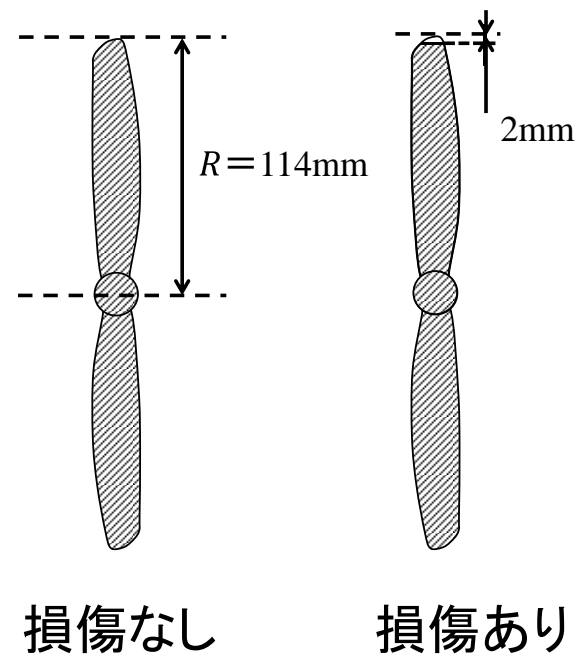


図3 実験ロータ

■ 予備実験(直接計測)

熱線流速計でロータ下部の吹き降ろし速度分布を計測(直接計測)

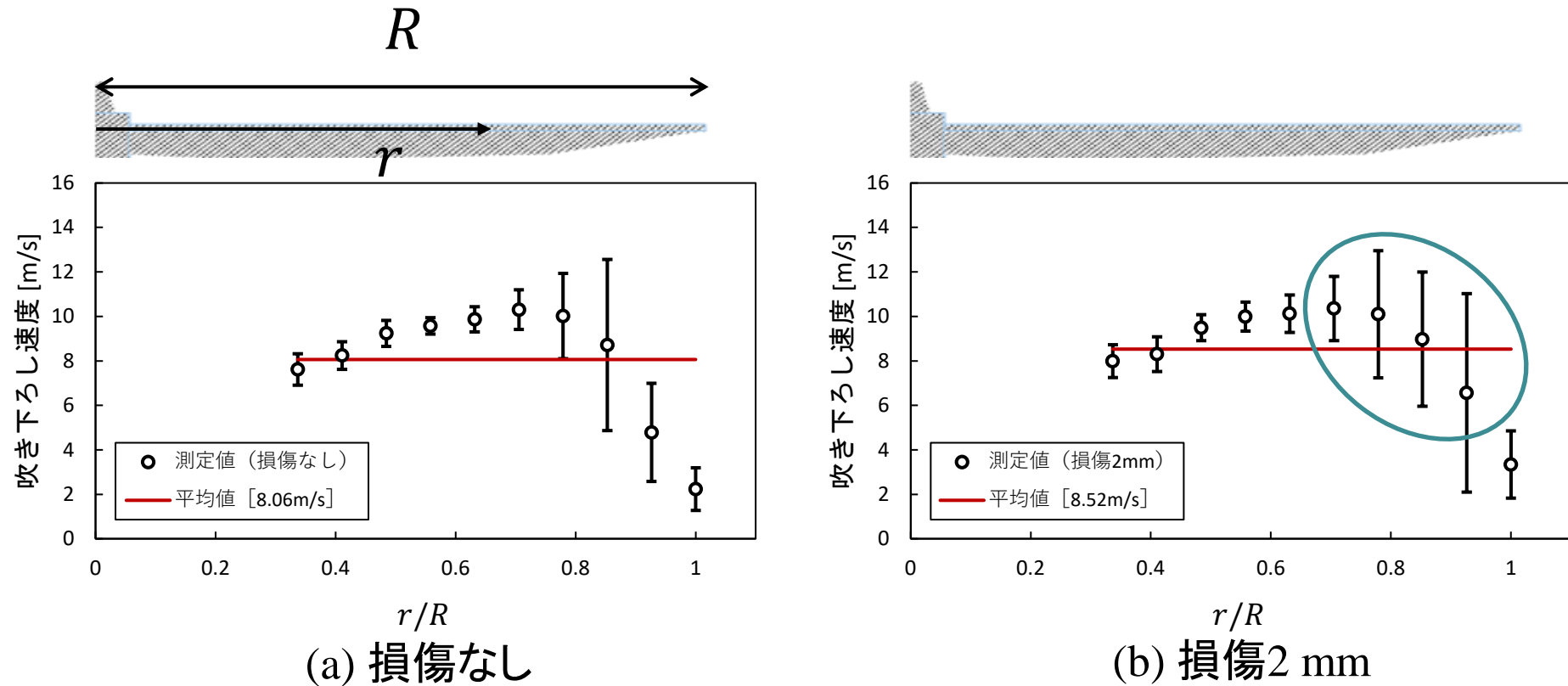


図4 吹き下ろし速度測定結果(熱線流速計)

- 吹き下ろし速度分布は損傷の有無で変化しなかった.
- ロータ先端側で吹き下ろし速度の標準偏差が増加した.

■ 予備実験(直接計測)

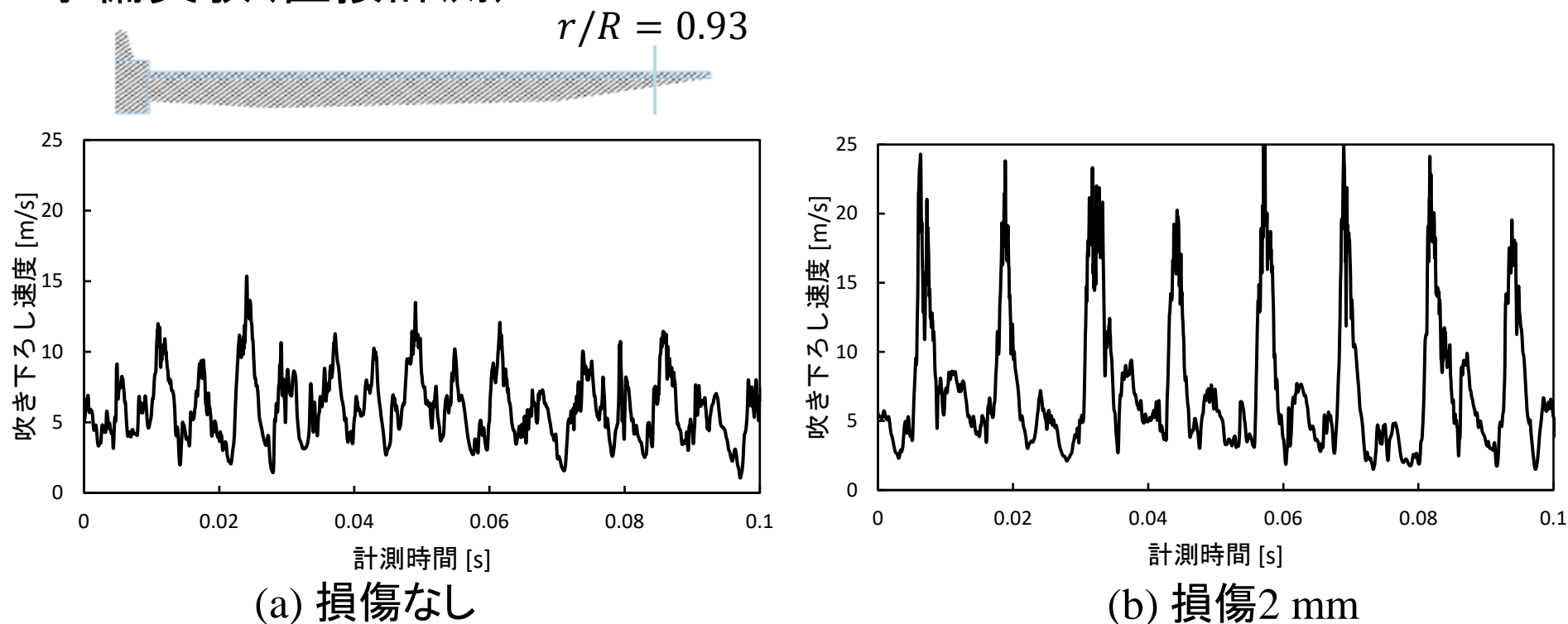


図5 吹き下ろし速度時間履歴

- 損傷なしのロータの場合, 160 Hz で吹き下ろし速度が振動
- 損傷2 mm のロータの場合, 80 Hz で吹き下ろし速度が振動

損傷によって生じる吹き下ろしの振動周期の変化を特徴量として損傷検出を目指す。

■ 超音波流速計の原理(既知の原理)

超音波マイクとスピーカを吹き下ろしに対して斜めに配置し、到達時間の差から測定区間の平均流速を計算する。

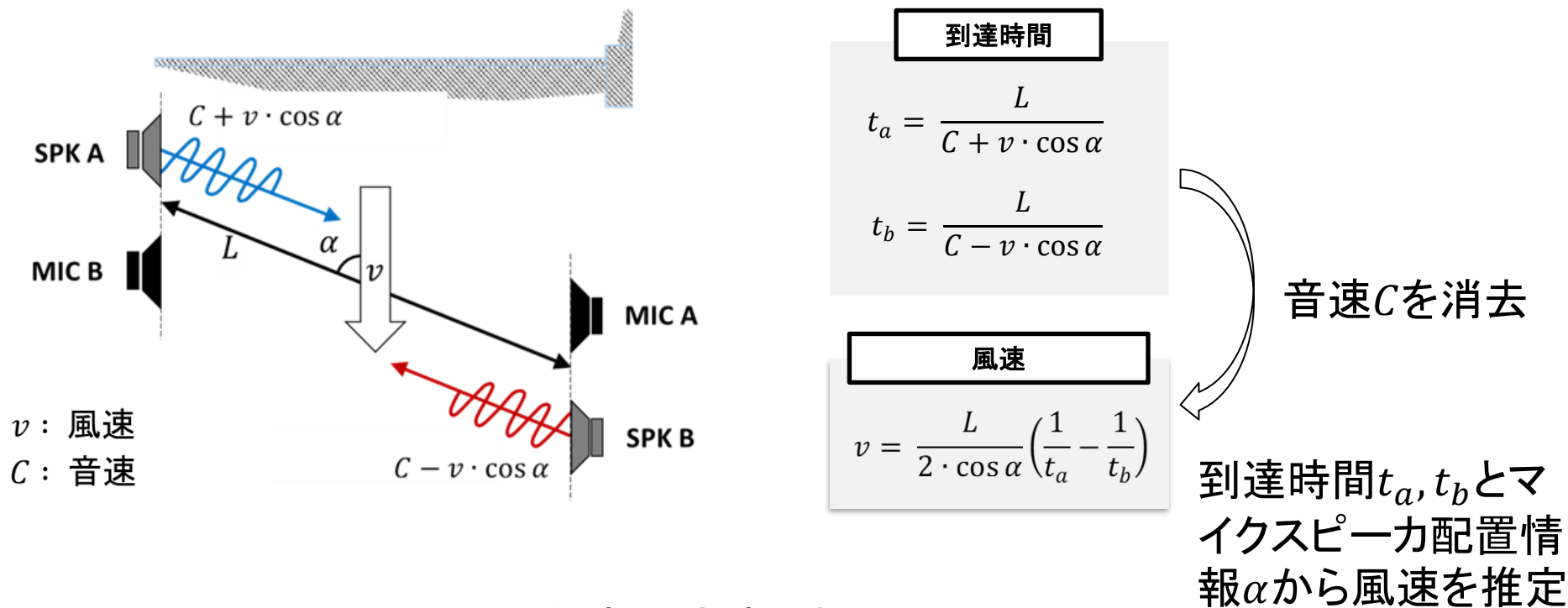


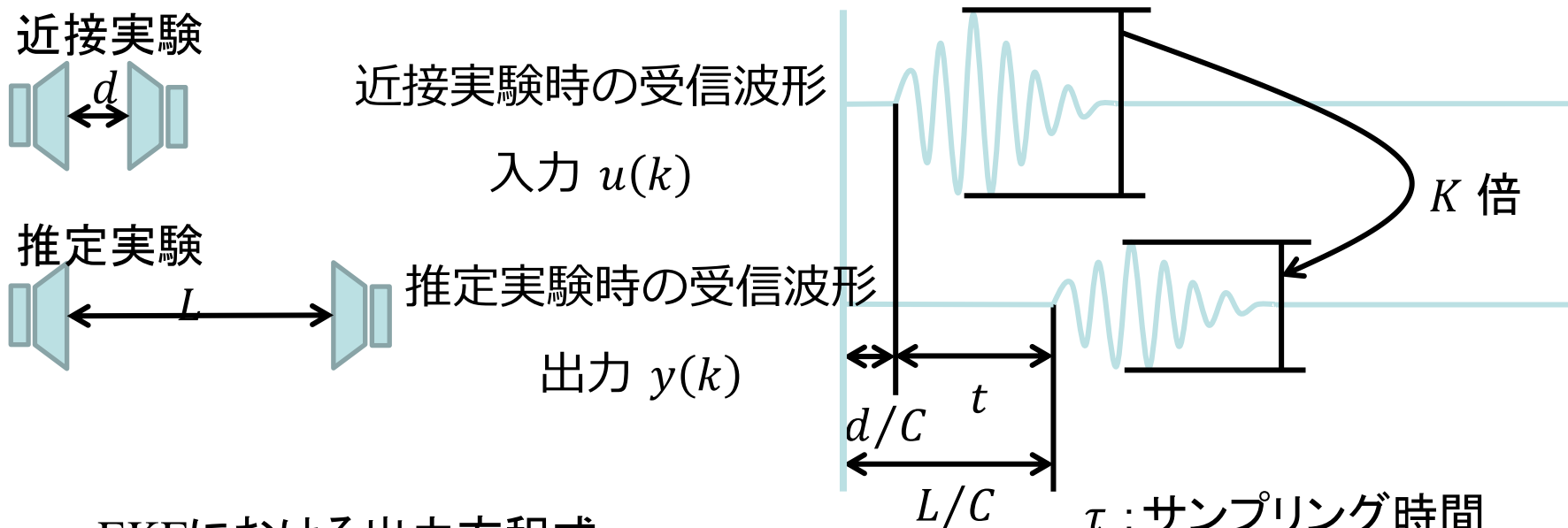
図6 超音波流速計概要

■ 乱れにロバストな到達時間計測手法(提案手法)

使用する計測データ

- ・ 超音波センサを接近させた際の, マイク受信波形
- ・ 超音波センサをロータ直下に配置した際の, マイク受信波形

以上の2つのデータを用いて, 拡張カルマンフィルタ (EKF) で超音波到達時間を推定



EKFにおける出力方程式

$$y[k] = Ku[k - l]$$

遅れ時間 : $t = l \times \tau$

τ : サンプル時間

d : 近接実験時センサ間距離

L : 推定実験時センサ間距離

C : 音速

■ 遅れ時間モデルの状態方程式表現

状態方程式

$$\mathbf{x}[k + 1] = A\mathbf{x}[k] + B_u u[k] + B_v v[k]$$

出力方程式

$$y[k] = h(\mathbf{x}[k]) + w[k]$$

入力 $u(k)$: 近接実験時のマイク取得波形

出力 $y(k)$: 推定実験時のマイク取得波形

遅れを表現する状態方程式を構築

EKFを用いて遅れ時間 $\phi(x_{m+1}[k])$ を推定

遅れ時間モデル概要

$$h(\mathbf{x}[k]) = \sum_{i=1}^m F_m(\mathbf{x}[k], x_{m+2}[k], \phi(x_{m+1}[k]))$$

$$\mathbf{x}[k] = [x_1[k] \ x_2[k] \ \cdots \ x_m[k] \ x_{m+1}[k] \ x_{m+2}[k]]^T$$

$$g(z, a) = \exp\{-M(z - a)^2\}, \quad (0 \leq a \leq 1, M > 0)$$

$$F_m(\mathbf{x}[k], C, a) = \sum_{i=1}^m \left[C g\left(\frac{i}{m}, a\right) x_i[k] \right]$$

$$\phi(b) = \frac{\phi_{max} - \phi_{min}}{2} \tanh b + \frac{\phi_{max} + \phi_{min}}{2}$$

$$A = \begin{bmatrix} A_m & 0 \\ 0 & A_d \end{bmatrix}, B_u = \begin{bmatrix} B_m \\ 0 \end{bmatrix}, B_v = \begin{bmatrix} 0 \\ B_d \end{bmatrix}$$

$$A_d = \begin{bmatrix} e^{-\frac{\Delta t}{T_1}} & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\tau \Delta t}{T_2}} \end{bmatrix}$$

$$B_d = \begin{bmatrix} K_{d_1} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_1}}\right) & 0 \\ 0 & K_{d_2} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_2}}\right) \end{bmatrix}$$

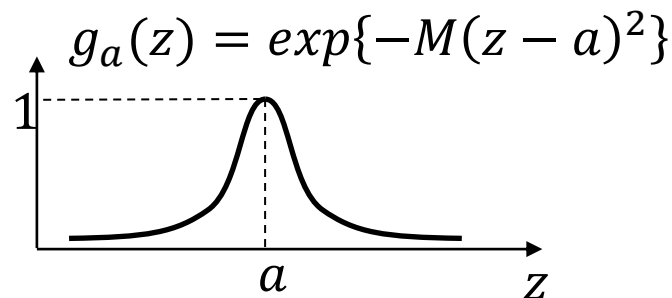
■ 遅れ時間モデルの状態方程式表現

離散時間系 出力方程式

$$y[k] = h(\mathbf{x}[k])$$

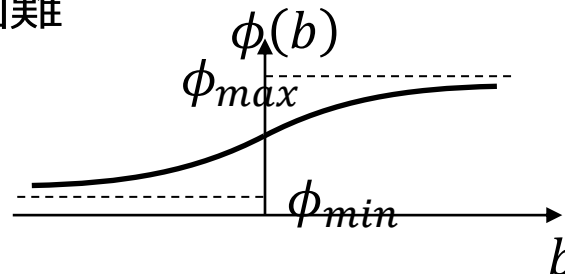
$$h(\mathbf{x}[k]) = \sum_{i=1}^n \left[C \exp \left\{ -M \left(\frac{i}{m} - a \right)^2 \right\} x_i \right]$$

$g_a(z)$



- $M \gg 1$ のとき $h(\mathbf{x}[k]) \cong C x_{a \times n}$
- \mathbf{x} に加えて C, a を未知パラメータとして推定 (ただし $0 \leq a \leq 1$)
- 推定値の範囲を拘束してEKFを適用するのは困難

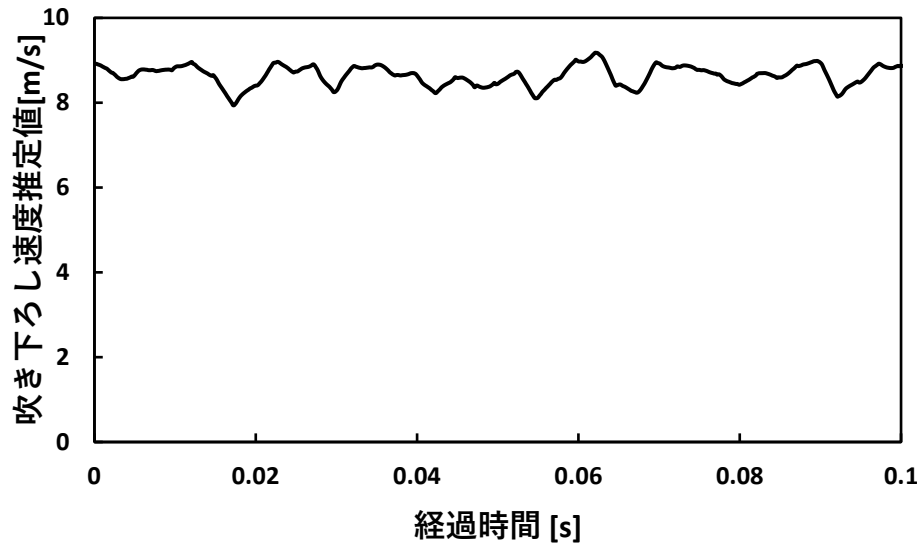
$$a = \phi(b) = \frac{\phi_{max} - \phi_{min}}{2} \tanh b + \frac{\phi_{max} + \phi_{min}}{2}$$



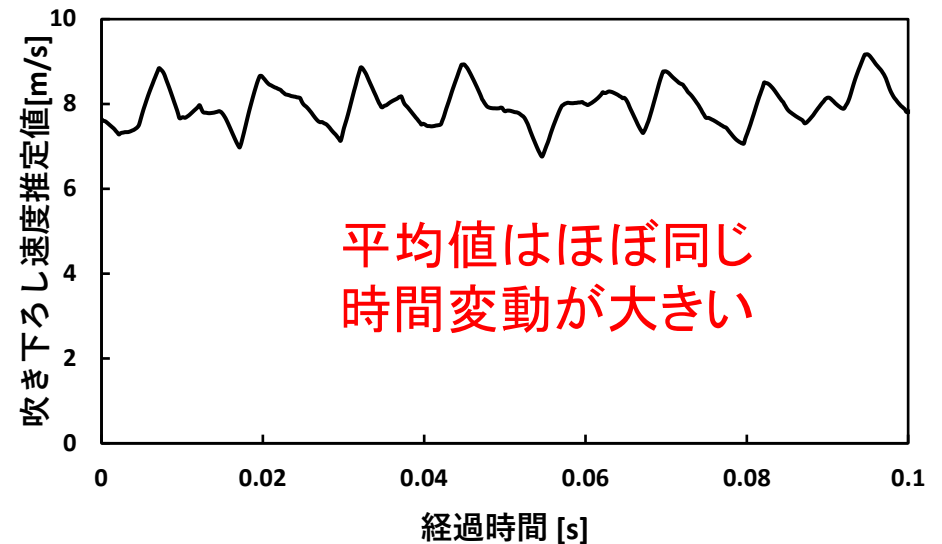
- $x_{m+1}[k] = b, x_{m+2}[k] = C$ として状態変数に含める
- 拡大した非線形状態方程式の状態量をEKFで推定する

■ 吹き下ろし速度推定実験(提案手法)

- ・実験条件は熱線流速計による計測と同条件で行った.



(a) 損傷なし



(b) 損傷2 mm

図7 吹き下ろし速度推定結果 (超音波流速計)

- ・ 損傷なしは一定の吹き下ろし速度であった.
- ・ 損傷2 mm の吹き下ろし速度では80 Hz の振動が見られた.

■ 吹き下ろし速度推定実験(提案手法)

吹き下ろし速度推定結果を周波数解析を行い、パワースペクトル密度 (Power spectral density, PSD)を計算した。

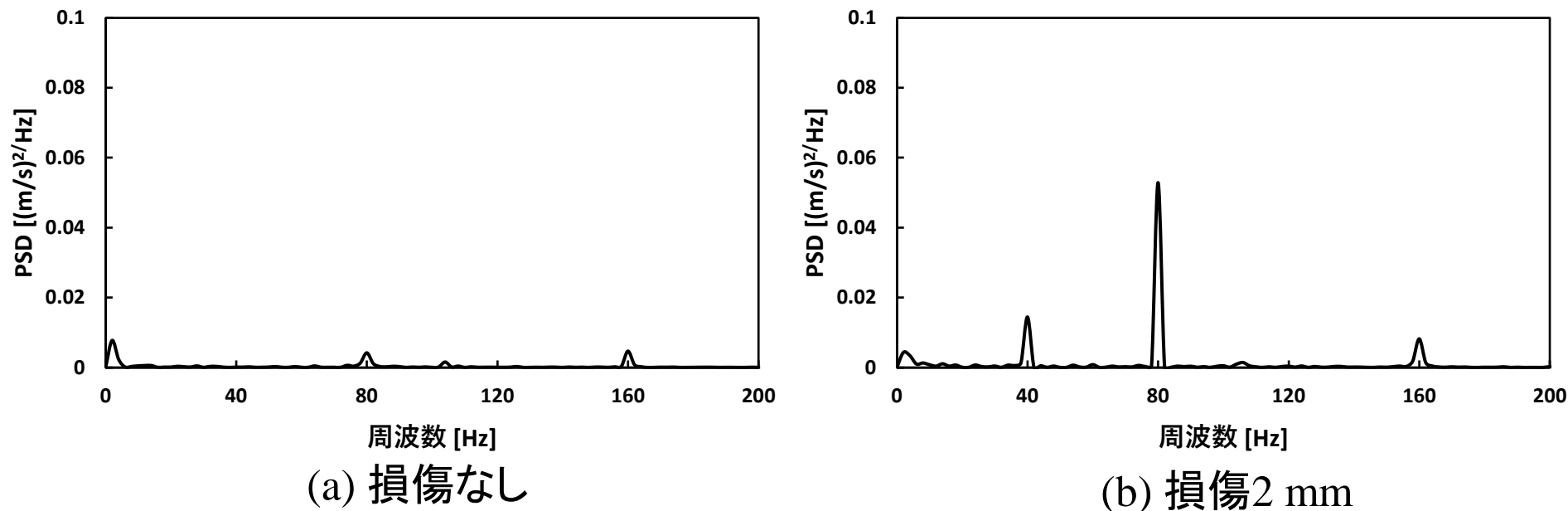


図8 吹き下ろし速度 PSD分布(超音波流速計)

- 損傷なしのPSD分布図から、80 Hz と160 Hz で吹き下ろしが 振動していることが分かった(ロータ通過周波数).
- 損傷2 mm ではより80 Hz でより大きく振動していることが分かった.
- 損傷による振動周期の変化を超音波流速計により計測できた.

■ ロータ損傷判定アルゴリズム(提案手法)

- 超音波センサを用いた損傷検出のために、160Hzと80HzのPSDを用いた評価指標を定義する。

$$J = 10\log_{10}(PSD_{80\text{Hz}}/PSD_{160\text{Hz}})$$

- 経過時間0.4秒で損傷する吹き下ろし速度時間履歴を作成して、評価関数を適用した。

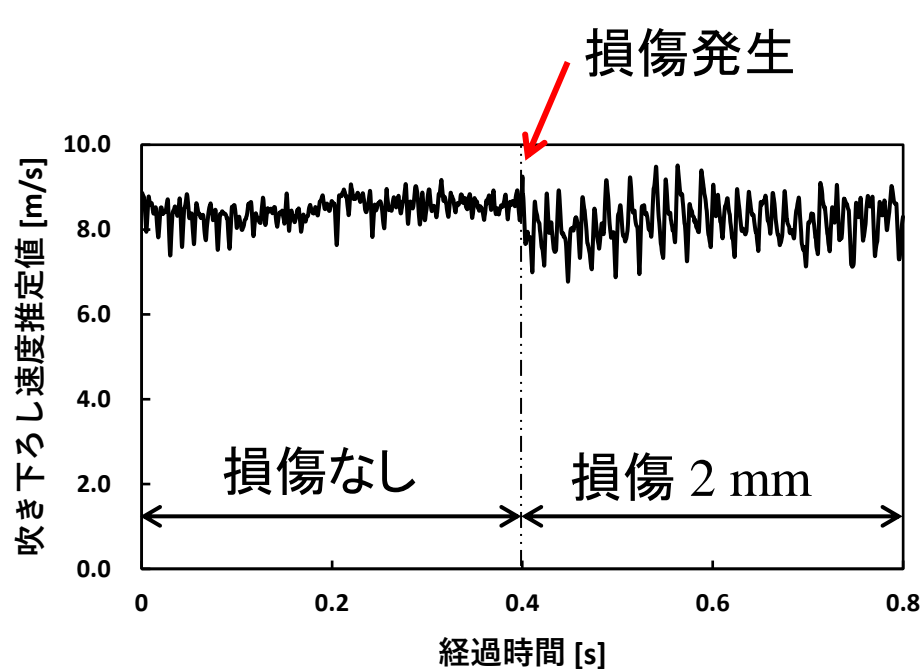


図9 損傷発生シミュレーション

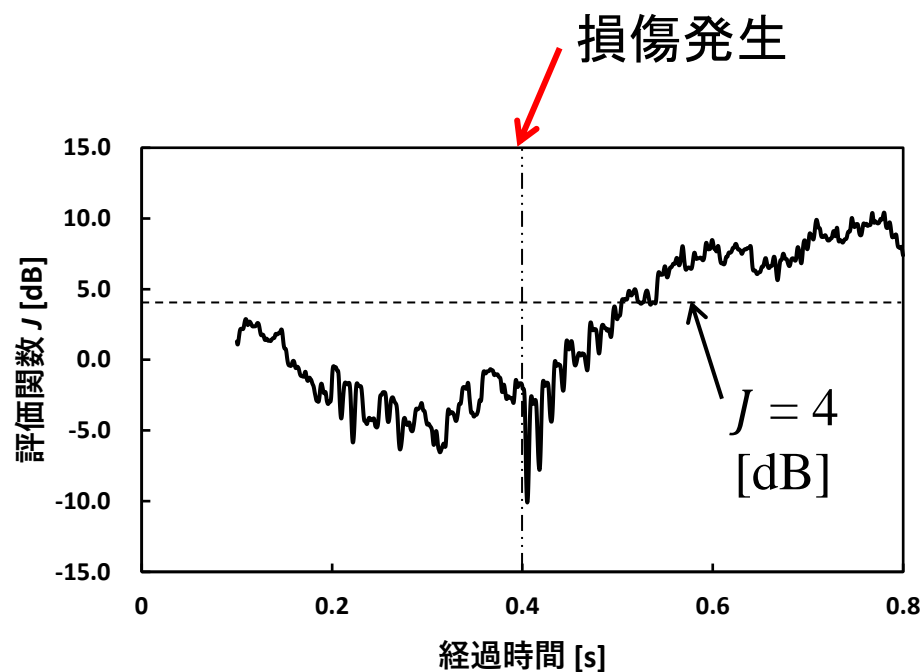


図10 評価関数 J の時間履歴

$J = 4$ [dB] を閾値とすることで損傷の有無を判別できた。

想定される用途

- 物体周りの流れの乱れ度推定
- 風洞内風速分布測定
- ドローン吹き降ろし速度の推定
- ドローンロータブレード損傷推定

■ 風速, 距離推定

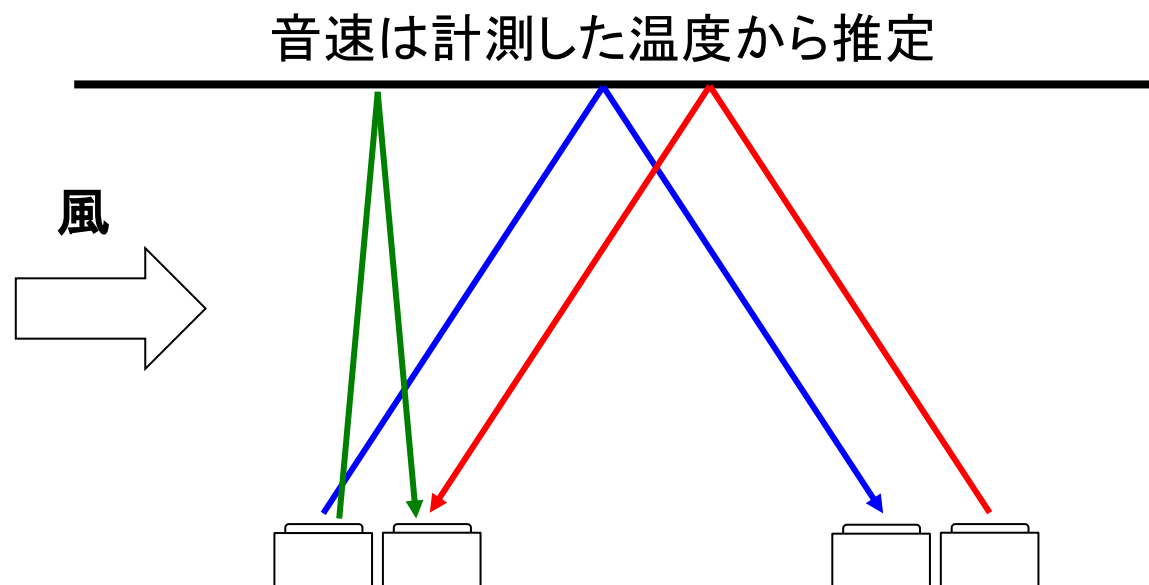


図11 壁との距離・風速の同時推定

- 壁に反射した超音波の到達時間を計測することで, 壁との距離及び周囲の風速を推定

実用化に向けた課題

- 市販の超音波センサを使った吹き下ろし速度推定，ロータブレード損傷推定の基本的な実験を実施.
- 実装に向けた小型化（超音波センサの小型化，最適な機器構成・配置，アルゴリズムのブラッシュアップ）が必要.

企業への期待

- 超音波センサの高度化
小型化, フェーズドアレイ化
- 流れの乱れを検出することが有意義な分野の
提案

企業への貢献、PRポイント

- ドローンやその他流体機械のモニタリングやヘルスチェック, 故障検出に応用できる.
- 本技術の導入にあたり必要な追加実験を行うことで科学的な裏付けを行うことが可能.
- 本格導入にあたっての技術指導等

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 計測装置、移動体、及び計測方法
- 特許番号 : 特許第7054507号
- 出願人 : 金沢大学
- 発明者 : 得竹 浩、米村 哲

産学連携の経歴

- 2003-2004年 車両メーカー研究所との共同研究でF1車両の先行研究を実施
- 2005年 車両メーカー研究所との共同研究でドライバ操縦のモデル化の研究を実施
- 2006, 2007, 2015年 企業と共同で, ドローン用アビオを開発
- 2008-2010年 車両メーカーとの共同研究で操縦履歴を利用したドライバの眠気検出システムを開発
- 2008年 航空計器メーカーとの共同研究でスタンバイ計器を開発
- 2009年 企業との共同研究で高齢者用自転車を開発
- 2011-2014年 車両メーカーとの共同研究で低環境負荷の将来型車両の試作に協力
- 2009年 航空・宇宙器機部品メーカーとの共同研究で姿勢センサーを開発
- 2009,2011-2013年 遠隔制御機器メーカーとの共同研究で無人ヘリコプターを開発

お問い合わせ先

金沢大学ティ・エル・オー

T E L 076-264-6115
e-mail info@kutlo.co.jp