



Title	Real-Time Future Response Predictions Considering Multiple Floating Bodies Based on Kalman Filter Algorithm: A Digital Twin Application for Offshore Wind-Farm
Author(s)	Isnaini, Rodhiatul
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/92966">https://doi.org/10.18910/92966</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## Abstract of Thesis

Name (ISNAINI RODHIATUL)

Title

Real-Time Future Response Predictions Considering Multiple Floating Bodies Based on Kalman Filter Algorithm: A Digital Twin Application for Offshore Wind-Farm (カルマンフィルタを用いた複数浮体応答のリアルタイム将来予測 ～デジタルツイン技術のウィンドファームへの応用～)

## Abstract of Thesis

This thesis examines the potential of forecasting future waves and non-measured responses based on measured responses. The proposed idea is projected to be implemented as a part of the digital twin (DT) of a windfarm. DT of a windfarm can be built upon two components: the windfarm itself, comprising out of hundreds of wind turbines, and software for monitoring and optimizing the operability and power generation efficiency. Typically, the spacing between two adjacent wind turbines is taken  $10D$  where  $D$  is the rotor diameter, to avoid wake-loss effect. An algorithm capable of identifying environmental conditions, particularly the incident wave, and future responses plays a vital role. The predictions need to be performed in real-time and should be both reliable and efficient. Hence, a system utilizing Kalman filter algorithm is proposed, incorporating the spatial distance.

In Chapter 1, the background, motivation, and problem statements of the study are elaborated.

In Chapter 2, the theory of the Kalman filter algorithm and its modelling for the wave prediction adopted in this study is given. The wave is assumed to be linear, hence, the wave is decomposable into many elementary waves within the range of the spectrum. The Kalman filter is prescribed to predict the Fourier coefficients of the elementary waves. Measured structural response is incorporated as the inputs and transfer functions (TFs) are used to relate the input and output of the filter.

In Chapter 3, wave predictions based on the aforementioned Kalman filter algorithm is undertaken. In this chapter, floating offshore wind turbine (FOWT) is adopted as the subject structure. Since this study projects that the wave predictions should be incorporated as part of the digital twin of a windfarm, it is important to first investigate the employability of the Kalman filter itself for wave predictions surrounding an FOWT. In this case, the semisubmersible type of FOWT is adopted. Two different designs of the semisubmersible FOWT are taken into account. These designs are referred as Semisub-A and Semisub-B, where the main difference lies on the corresponding TFs, with Semisub-B having a less pronounced resonance peak in the considered wave frequency domain compared to Semisub-A. The resonance peak is most notably caused by the viscous damping that induces nonlinear effect. Filter dependencies towards TFs and nonlinear effects from combined wind and wave loads on the prediction accuracy are further uncovered.

In Chapter 4, causality limitation that dictates the experiment set-up in 2D tank using multiple floating bodies is explained. The basis of the algorithm extension to obtain future predictions is discussed here as well. This extension is prescribed centering around the spatial distance of multiple floating bodies.

In Chapter 5, the future prediction results based on the experiment in 2D flume tank are presented. The experiment accounts for multiple floating bodies intended to replicate a row of multiple FOWTs in a windfarm. The TFs retrieved from the experiment is compared with simulated TFs from a numerical tool developed based on the boundary element method. After the TFs are confirmed, the wave prediction on the first point is undertaken. Next, the future wave predictions at two other points away from the first point are carried out. Lastly, since the future waves are known, it is shown that the future responses at the two points away from the first point then can be estimated as well. These future prediction results are important, especially in the context of maintenance and blade pitch control optimization purposes. By adopting a scaling factor of 1/100, the experimental result translates to a future prediction of response occurring 50-120s ahead for the second FOWT, under the considered condition.

In Chapter 6, the conclusion of the current study is discussed, as well as the suggestions for future work.

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( ISNAINI RODHIATUL )			
論文審査担当者	(職)	氏 名	
	主 査	教授	飯島 一博
	副 査	教授	大沢 直樹
	副 査	准教授	千賀 英敬

## 論文審査の結果の要旨

将来、洋上に大規模展開されるウィンドファーム内には 100 基オーダーの多数の浮体式洋上風車があると想定される。ひとつの浮体式洋上風車の計測から周囲の波浪場を把握できれば、隣接する他の浮体式洋上風車周りの将来の波浪場や運動を推定でき、これによって出力を最大化するための風車制御に役立てることができる。さらに、緊急時にヘリコプターが浮体上に着地する際の着地プロセスの支援や、ボートから浮体への飛び移り時期判断に利用するなど、波浪中応答の将来予測技術の利用価値は高い。本論文はこの考えのもと、応答計測から現在の波浪場の推定を行い、決定論的に将来の応答時刻歴を予測する手法の開発を目的としている。波浪場の推定にはカルマンフィルタを利用する。本論文は上記の研究背景と目的を論じた第 1 章を含む、全 6 章で構成されている。

第 2 章では、ファーム内のひとつの浮体式洋上風車に着目し、周囲の波浪場のモデル化とカルマンフィルタを用いて、応答計測から波浪場を推定する手法を示している。線形の波浪場を仮定し、不規則波を規則波の重ね合わせで表現し、伝達関数により応答と波浪を関係づけ、各規則波成分の重みづけ係数をカルマンフィルタで推定する。

第 3 章では、数値シミュレーションによって、提案手法の有効性を確認している。二種類の浮体式洋上風車モデル Semisub-A と Semisub-B について検討を行っている。Semisub-A では、波浪エネルギーの主要周波数帯である  $0.3\text{rad/s}$  から  $1.2\text{rad/s}$  の範囲に同調周波数が見られ、非線形減衰による同調時応答の不確実性が相対的に顕著に表れる特徴を有する。二つのモデルを比較し、線形重ね合わせが成立する場合には波浪推定の精度が高いが、同調周波数での非線形応答が顕著な場合に、減衰モデルに係る応答関数の不確実性が、波浪推定精度に影響することを報告している。

第 4 章では、ひとつの浮体式洋上風車から、近傍の別の浮体式洋上風車まわりでの波浪場を推定するに際して、重要な考え方のひとつとなる、因果律について議論が展開されている。ウィンドファーム内では風の遮蔽効果を無視し得る距離として、ローター直径  $D$  に対して  $10D$  ほどの風車間距離を取る計画を行うことが多く、この浮体間の距離を考慮したとき、因果律が満たされると考えてよいことを示している。

第 5 章では、二次元水槽での縮尺模型による検証実験を論じている。ウィンドファームの中から一列を選んだとき、直線上に複数の浮体式洋上風車が並んでいると考えられる。実験では水槽内に浮体式洋上風車を模した三体の縮尺模型を配置することで、これを模擬している。まず、境界要素法に基づく数値計算より得られた応答関数と、実験で計測された応答関数を比較し、数値計算の精度は十分であり、線形性を仮定しておおむね問題がないことを確認している。ついで、第 2 章で提案した手法の検証のために、不規則波中での三体の模型の応答を同時計測している。この結果から、最も波上側の浮体運動から、波下側に位置する浮体の運動について決定論的に将来予測できることを示している。模型実験の縮率が  $1/100$  であると想定したときに、実験で得られた結果は、 $50\text{--}120\text{s}$  程度先の応答まで将来予測可能であることを報告している。

第 6 章では、本論文で得られた結論を提示するとともに、将来課題を摘出している。

以上のように、本論文は、浮体式洋上風車からなるウィンドファームの、効率的運用という課題に対して、波浪や運動の決定論的な将来予測を行うことで、解決を図るものであり、ウィンドファームの運用の各場面で活用しうる基礎技術を提示している。将来の浮体式洋上風車を取り扱う船舶海洋工学に裨益するところ大であるといえる。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。