



Title	Study on Optimal Prediction Horizon Length in Model Predictive Control to Maximize Energy Absorption Efficiency by a Point Absorber Wave Energy Converter
Author(s)	Kaiser, Md Shahidullah
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/103231
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (KAISER MD SHAHIDULLAH)	
Title	Study on Optimal Prediction Horizon Length in Model Predictive Control to Maximize Energy Absorption Efficiency by a Point Absorber Wave Energy Converter (ポイント・アブソーバー型波力発電機のエネルギー吸収効率を最大化するためのモデル予測制御の最適な予測時間長の研究)
<p>Abstract of Thesis</p> <p>The growing global energy demand has increased interest in ocean renewable energy as a promising source of enormous amounts of energy. The point absorber wave energy converter (PA-WEC) is particularly noteworthy for its compact design, adaptability, and suitability for investigating advanced control strategies. Implementing advanced control strategies in real-time for PA-WECs is essential to enhance power absorption capabilities. Model Predictive Control (MPC) has emerged as one of the most promising strategies for improving the energy absorption efficiency of PA-WECs. For the real-time application of MPC, predicting the future wave exciting force is crucial. The primary issue with MPC in PA-WEC is determining how far in advance predicting the future wave exciting force is required. In MPC formulation, the prediction horizon length determines how far in advance the prediction of the wave exciting force is required for real-time control. If the optimal prediction horizon length is identified, it is straightforward to predict the future wave-exciting force within this time frame, allowing MPC to optimize the power take-off (PTO) control forces to maximize energy absorption efficiency. This thesis proposes an optimal prediction horizon length in MPC to maximize energy absorption efficiency by PA-WEC. Consequently, this thesis comprises the following six chapters.</p> <p>Chapter 1 provides an overview of the background, literature review, and research objectives. This chapter also presents a brief outline of the chapters that follow.</p> <p>Chapter 2 describes the PA-WEC subject model, formulates the problem, and derives the motion equation from this formulation.</p> <p>Chapter 3 presents the MPC formulation. A continuous-time state space model is employed to represent the motion equation of the entire PA-WEC system. To facilitate the implementation of the MPC algorithm, the state-space model is transformed from continuous time into a discrete version. Subsequently, the MPC formulation is developed, and the objective function is derived to optimize energy absorption over the prediction horizon length. After the optimization process, the fourth-order Runge-Kutta method is employed to solve the motion equation.</p> <p>Chapter 4 shows the analysis for regular waves. Initially, the numerical condition is described, followed by the analysis procedure. The responses obtained under both no-control and optimal linear damping control conditions are validated through frequency and time domain analyses using the boundary element method (BEM). The responses obtained by MPC are compared with those of optimal linear damping control. The influence of the prediction horizon length and sampling interval in MPC on energy absorption efficiency is investigated. Three time horizon lines have been established with respect to frequency, leading to the determination of an empirical optimal value for the prediction horizon length in MPC to maximize energy absorption efficiency by a PA-WEC. The limitations of the proposed optimal solution in real-time are explained.</p> <p>Chapter 5 demonstrates the analysis for irregular wave cases. The spectrum of irregular waves is generated based on sea state information, and frequency and time domain analyses are employed to validate the spectrum. The dimensions of the floating body are adjusted according to the sea state to maximize energy absorption efficiency. The responses of the floating body under no control force are validated through frequency and time domain analyses. The superposition theorem is used to validate the absorption power obtained by the MPC and the constant damping control force method, and these results are subsequently compared with each other. Lastly, the optimal prediction horizon length in MPC is adapted to account for the irregular wave analysis.</p> <p>Chapter 6 provides a summary of the research findings and presents the overall conclusions.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (KAISER MD SHAHIDULLAH)		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主 査	准教授 飯田 隆人
	副 査	教授 箕浦 宗彦
	副 査	教授 牧 敦生

論文審査の結果の要旨

2040 年には世界のエネルギー消費は 25%上昇すると見積もられており、脱炭素化を達成しエネルギー需要に対応するためには再生可能エネルギーは欠かすことができない。再生可能エネルギーの中でも海洋エネルギーは膨大なエネルギーを有している。波力はエネルギー密度が他の資源（風力や太陽光など）より高く、将来的には有望なエネルギー源と期待されている。本論文で対象としているポイント・アブソーバー型波力発電は、スパーとフロートの間の波に対するそれぞれの鉛直方向（ヒープ）の運動の相対運動からエネルギーを取り出す装置である。モデルがシンプルで建造が比較的容易でありつつ、波の入射方向に依存しない無指向性を有するため、世界中で研究開発が進んでいる。一方で、1 基あたりの発電量がさほど大きくはないため、適切な制御によって発電量を増やすこと、および複数基の同時運用（ファーム化）によって総発電量を増やすことが必要になる。

本論文では制御について焦点を当てている。波力発電の制御に関する研究はこれまで多く行われており、古典制御のみならずラッチング制御やモデル予測制御など様々な適用事例がある。ポイント・アブソーバー型波力発電の発電量は予測制御によって向上することが分かっているが、ほとんどの先行研究において、それらの前提として「現時点において、将来的に浮体に入射する波およびそれにより受ける力が既知である」ことが仮定されている。しかしながら波の位相はランダムであり、浮体位置での過去から現在までの波の情報から、短時間後の未来の情報を予測することは非常に困難である。そのため予測制御を実際の波力発電で利用するためには、別の方法で未来の波を予測する手法を確立することが必要になる。本研究チームでは本論文に先立ち、波力発電の波上に波浪ブイを設置して波を計測することで、短時間後の浮体位置における波と波浪強制力を予測する手法を確立している。本論文では、特にモデル予測制御に焦点を当て、予測制御によって発電量を最大化するためにどれだけの予測時間長（予測ホライズン）が必要なのか、翻せば未来の波をどれだけ予測する必要があるのかという問いに対して、予測ホライズンと発電量の関係をつぶさに調査している。一般的に、予測ホライズンを十分に長くすれば発電量は最大化できるが、波の予測精度は低下し計算コストは増大してしまう。一方で、予測ホライズンが短ければ波の予測精度や計算コストの面ではメリットがあるが、発電量を最大化することはできない。本論文では両者の関係性を見つけ出し、妥当な経験式を示している。

本論文は以下の 6 章で構成されている。

本論文の第 1 章では、本論文の背景について述べている。背景では社会的な課題から学術的な課題まで一貫して書かれており、各種の定量的データや先行事例などを基に、エビデンスベースで議論が進められている。さらに本論文の立ち位置と目的が示されている。

第 2 章では本論文で用いるポイント・アブソーバー型波力発電機の問題設定およびモデル化が簡潔に述べられている。2 次元のヒープ単自由度の浮体について、時間領域での運動方程式および、畳み込み積分の近似法について示され

ている。

第3章ではモデル予測制御について示されている。システムを状態空間化し、モデル予測制御の定式化および目的関数として発電量を用いることが説明されている。

第4章では規則波中の解析が述べられている。モデル予測制御との比較のために、周波数領域における最適制御法を導入している。まずは数値計算プログラムの検証のために、この周波数領域における最適制御法に対して、周波数領域と時間領域の両方で計算を行い、両者が一致することを示している。次に、モデル予測制御による時間領域の計算について、円周波数の入力に対して、時間刻み幅とその総数、そして発電効率の関係をコンター図でプロットし、関係性を調査している。その結果として、時間刻み幅が十分小さいときには発電効率は時間刻み幅と総数に対してそれぞれ独立した関係を持つのではなく、あくまで時間刻み幅と総数の積、つまり予測ホライズンに依存することを明らかにしている。そのため以降では時間刻み幅は固定している。その後、各周波数に対して、予測ホライズンごとの発電量とモデル予測制御による最大発電量の比をコンター図としてプロットし、予測ホライズンと周期の比に対して円周波数が線形な関係のときに、効率比が一定になる関係を見出し、妥当な経験式を導出している。

第5章では不規則波中の解析が述べられている。まず初めに実海域を想定して発電機の大きさを定め、スペクトル解析の妥当性を確認している。その後、周波数領域の最適制御に関して、不規則波中の発電量が規則波中の発電量の総和で表されることを実証している。そして、その事実がモデル予測制御時にも成り立つことを示している。このことから、不規則波中のモデル予測制御による最大発電量は、規則波における最大発電量のスペクトルに基づく重み付きの総和で表されることが判明している。そしてその発電量を得るためには、規則波解析で得た経験式の周波数に対してスペクトルのピーク周波数を用いて算出される予測ホライズンを用いればよいことを示している。

最後に第6章では本研究で得られた成果を統括し、本論文のまとめを述べている。

本論文によって、波力発電をモデル予測制御で制御して最大発電量を目指す際の予測ホライズンは円周波数の逆数に比例して大きくとる必要があり、不規則波の場合にはその円周波数としてはピーク周波数を用いればよいことが明らかになっている。また、不規則波中の最適制御は、規則波中の最適制御の重ね合わせにすぎず、規則波解析を包括的に行うことが重要であることが示されている。

以上のように、本論文は波力発電を社会実装するうえで重要となる、波力発電の制御による発電量向上について、これまで言及のほとんどなかったものの、実用上は重要な制約条件となる予測ホライズンの観点から調査を行い、物理的な現象の理解と実用上の示唆を提供する、学術的にも工学的にも基盤となり得る重要な成果であると評価できる。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。