

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 15 日現在

機関番号：17201
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22560795
 研究課題名（和文） 海洋温度差発電プラントのインターネットを用いた遠隔制御システムの開発
 研究課題名（英文） Development of Remote Control System for Ocean Thermal Energy Conversion Plant via Internet
 研究代表者
 後藤 聡 (GOTO SATORU)
 佐賀大学・大学院工学系研究科・教授
 研究者番号：20225650

研究成果の概要（和文）：海洋温度差発電は、海洋の表層の 25～30[°C] の温水と深層の 3～5[°C] の冷水との温度差を利用して発電する。本研究では、インターネット技術を利用して海洋温度差発電プラントを遠隔監視・操作・制御するシステムを開発することを目的とし、海洋温度差発電プラントを遠隔地から制御する遠隔制御システムの開発、および、ロボットアームを利用してプラント制御盤を操作する遠隔操作システムのプロトタイプの作成、さらに、海洋温度差発電プラントの安定運転のための気液分離器の液位制御器の開発を実施した。

研究成果の概要（英文）：Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) generates electricity by using 20-27[°C] temperature difference between the 25-30[°C] warm seawater at surface and the 3-5[°C] cold seawater in depth. The objective of this research is development of remote monitoring, operation and control system for an OTEC plant via Internet. A teleoperation system of robot arms employing the visual servo control based on template matching is developed in order to realize remote operation of switches and buttons of plant control panel. The liquid level control of separator in OTEC plant is also investigated in order to realize stable operation of OTEC plant.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2012 年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：海洋資源・再生可能エネルギー・計算機システム・制御工学・シミュレーション工学・海洋温度差発電・遠隔監視・シミュレータ

1. 研究開始当初の背景

現在、我々が生活を営むにあたって、エネルギーの安定供給は重要な課題である。これまでわが国は、エネルギーの多くを石油や石

炭、天然ガスといった化石エネルギーや原子力エネルギーに依存してきた。これらの化石燃料の燃焼による、二酸化炭素および窒素酸化物排出量の大幅な増加によって、地球温暖

化や大気汚染等の深刻な問題を引き起こす結果となった。また、原子力については、安全性や放射性物質の処理等について問題がある。そこで近年、太陽光発電や、風力発電、地熱発電などの再生可能エネルギーが注目されている。

海洋温度差発電(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC)は、温海水と冷海水の温度差から電気エネルギーを取り出す発電方法である。OTEC では海洋の温度差という自然エネルギーを利用しているため、発電時に二酸化炭素の排出が無く、温室効果の抑制が期待できる。また、環境にやさしく半永久的に利用できる再生可能エネルギーとして期待されている。

2. 研究の目的

海洋温度差発電は、海洋の表層の 25～30[°C]の温水と深層の 3～5[°C]の冷水との温度差を利用して発電する。海洋温度差発電は温海水と冷海水を熱源とするため、必然的に船舶上や 海洋上または水中に設置することとなる。そのため、プラント自体は無人化し、遠隔地から監視・操作・制御を行うことが望まれる。しかしながら、プラントは、遠隔監視・遠隔操作・遠隔制御を考慮して設計されているわけではない。佐賀大学海洋エネルギー研究センターに設置されている海洋温度差発電実験装置も、遠隔操作・遠隔制御を考慮されて設計されていない。

一方、インターネットは、社会的インフラとして整備されており、インターネットを利用することで、遠隔地へも容易にアクセスできる環境が整ってきている。そこで、本研究では、インターネット等の容易に利用可能な既存の技術を利用して、海洋温度差発電プラントを遠隔監視・操作・制御するシステムを開発することを目的とする。

3. 研究の方法

佐賀大学海洋エネルギー研究センターに設置されている海洋温度差発電実験装置を対象とし、遠隔監視・遠隔操作・遠隔制御システムのプロトタイプを作成する。開発する内容は以下の3項目である。

遠隔監視：海洋温度差発電プラントを遠隔地から監視するシステムを構築する。プラントの内部状態(蒸発器や凝縮器等の機器各点における作動流体の圧力、温度、流量や発電量、温海水温度と流量、冷海水温度と流量等)については、プラント側に遠隔監視用サーバを設置し、プラント制御用計算機から内部状態をサーバに送り、インターネット経由でサーバに接続することにより、遠隔地から監視する。

遠隔操作：海洋温度差発電プラントの内部状態(温海水流量や冷海水流量の操作)については、遠隔監視と同様にして、プラントの計算機にインターネット経由で接続することにより、遠隔地から操作する。また、プラント制御盤のスイッチやボタン等の物理的操作については、ロボットハンドを利用した遠隔操作の実現性について検討する。

遠隔制御：海洋温度差発電プラントの内部状態の遠隔監視により得られる状態量から、適切な操作量を求め、内部状態を遠隔操作することにより、遠隔制御を実現する。遠隔制御開発時には、プラントを計算機に置き替えた計算機シミュレータを利用する。

4. 研究成果

海洋温度差発電プラントの内部状態を監視・操作・制御する遠隔システムに関しては、海洋温度差発電実験装置で採用されている OPC(OLE for Process Control) サーバに OPC クライアントを接続させることで、プラントの内部状態を取得し、その情報を、WWW 技術を用いてインターネット経由で遠隔地から取得できるシステムを構築した。また、海洋温度差発電プラントの遠隔操作に関しても、OPC 経由でクライアント側から温海水流量と冷海水流量を変更することを可能とした。さらに、本遠隔制御システムには、実機プラントを模擬したシミュレータ機能を付加させ、監視側からは、実機プラントとシミュレータを同等に取り扱うことを想定して開発を行った。

計算機シミュレータは、http クライアントと http サーバの 2 台の PC から構成され、海洋温度差発電施設に WWW サービスを行うサーバを設置し、遠隔地に設置した http クライアントからインターネットを利用して遠隔操作を行う。http サーバ側は、海洋温度差発電シミュレーションモデルを CGI(Common Gateway Interface)プログラムとして組み込み動作させる。本計算機シミュレータは、海洋温度差発電シミュレーションモデルと海洋温度差発電プラントを切り替えることで、実機プラントにも同様に適用することを想定している。

遠隔制御システムのクライアント側のユーザーインターフェースは、計算機シミュレータを利用して開発した。その際、海洋温度差発電実験装置で用いられている実機プラントのユーザーインターフェースを参考にした。状態表示画面では、プラントの構成図を表示し、その各機器での状態量を表示する。各機器の番号のボタンをクリックすることで、各機器の状態量のグラフ表示を行うこと

ができる。さらに、状態表示画面のメニューバーの「操作量」ボタンをクリックし、操作画面のダイアログを表示させ、そこへ数値を入力することで、操作量を変更することができる。

遠隔システムを構築するにあたり、OPC を利用しない場合を想定して、海洋温度差発電実験装置の制御機器である PLC(programmable logic controller)を OPC 経由ではなく直接にクライアント側から操作できるシステムの開発を行った。海洋温度差発電実験装置の PLC を遠隔地から制御する事前準備として、水槽水位制御実験装置で海洋温度差発電実験装置の水位制御部分を模擬し、遠隔制御実験環境を構築した。水槽水位実験装置の制御 PC と遠隔制御用サーバ間は TCP プロトコルで接続し、制御 PC の情報を遠隔地から観測および操作できるようにした。遠隔制御用サーバと遠隔地にあるクライアントの間は、http 通信で通信を行なえるようにした。開発した遠隔制御実験環境では、クライアント側からリアルタイムで水槽水位実験装置の水位を観測し、また、クライアント側から目標水位を自由に変更することが可能となった。水槽水位遠隔制御実験環境を海洋温度差発電実験装置に適用することで、PLC を遠隔地のクライアントから直接に制御することが可能となる。

OPC サーバを利用する場合と、PLC を直接操作する場合のいずれにおいても、遠隔システムでプラントを監視・操作・制御することができることが明らかになった。

今後は、海洋温度差発電実験装置に対して PLC を直接操作する遠隔システムの開発を行う。また、海洋温度差発電実験装置の遠隔制御を行う際の、計算機シミュレータの利用についても開発する予定である。

海洋温度差発電実験装置のプラント制御盤を物理的に遠隔地から操作する遠隔操作システムに関しては、操作側と作業側にそれぞれロボットアームを設置し、操作側のロボットアームをヒトの手で動かすことで、作業側のロボットアームを動作させるシステムを開発した。このような遠隔操作システムでは、作業側のロボットアームを操作側のロボットアームでヒトが動作させるため、操作者の意思に応じた動作を行うことができるが、作業空間と操作空間との違いや、操作者が作業側のロボットアームを直接目視できないことや、操作側と作業側との通信遅延の問題等により、作業側ロボットアームで細かな作業を行うことは難しい。そこで、作業側ロボットアームの細かな作業は、ビジュアルサーボで自律動作をさせる。すなわち、作業側ロボットアームの大まかな動作は操作側ロボットアームで行うことで柔軟な動作が可能

となり、細かな動作は、ビジュアルサーボを用いることで、作業側ロボットアームが自律的に動作する。

具体的な作業として、ロボットアームの遠隔操作とビジュアルサーボと組み合わせることによって、ネットワーク経由でロボットアームを用いたボタン押し動作を行うことができることを確認した。操作者は、作業側全体を写している 2 台のカメラ画像を参考にして、作業側ロボットアーム先端に取り付けたカメラが目標となるボタンを捉えるように、操作側ロボットアームを動作させる。アーム先端のカメラがボタンを捉えたら、マウスドラッグすることで、作業用ロボットアームが遠隔操作からビジュアルサーボに切り替わり、自律的にボタンを押す動作を行う。ビジュアルサーボでは、マウスドラッグによって切り取られた目標画像と、アーム先端のカメラ画像とを、テンプレートマッチングを用いて比較することで、作業用ロボットアームの目標値を決定する。さらに、作業用ロボットアーム先端に取り付けるカメラを 2 台のステレオカメラとし、作業用ロボットアーム先端からボタンまでの距離を三角測量の原理で測定することで、ロボットアームの周辺環境の変化にも対応でき、より柔軟な動作が実現できるようになった。

今後は、実際のプラント制御盤に対して、開発したロボットアームの遠隔操作システムを適用する予定である。

海洋温度差発電実験装置の制御においては、プラントの安定した運転を行う際に重要となる、気液分離器の液位を一定に保つための制御について検討し、制御器を設計するための、シミュレーションモデルを構築した。

シミュレーションモデルは、質量保存則、エネルギー保存則や熱伝達等の物理則と、作動流体のアンモニアと水の混合流体の状態量の計算にはプロパス(a program package for thermophysical properties of fluids, PROPATH)と呼ばれる物性値解析プログラムを利用した。しかしながら、この物理モデルでは、気液分離器の液位制御を行う際の実機プラントのふるまいを十分に捉えたものとはなっていなかった。そこで、実機プラントの特性測定実験のデータから、液位の時間変化と弁開度との関係を最小二乗法により求めた回帰曲線で表現する簡便なシミュレーションモデルを構築した。

実機プラントの実験結果との比較から、物理モデルのシミュレーション結果では、時間と共に液位が実験結果から大きくずれていくが、実験データに基づくモデルのシミュレーション結果では、実機の振舞いに近い結果となった。

また、海洋温度差発電実験装置の気液分離

器は、熟練者による手動操作で制御されていたが、実験装置の改良を行い、PLCを用いたPI制御器を実装した。PI制御器構築の際には、シミュレーションモデルを用いて、ジグザグニコルスのステップ応答法で制御器のパラメータを決定し、制御シミュレーションで制御結果を確認した。その後、実機実験装置でPI制御実験を行った。その際のPI制御器のパラメータは、改めて実機実験で調整したものを用いている。手動制御結果とPI制御器による自動制御結果とを比較すると、自動制御結果では、液位の目標値付近で安定していることが確認できた。

PI制御器の調整には、物理モデルを用いたシミュレーションを利用したため、実機プラントとのずれにより、パラメータ調整が適切でなかったと思われるため、今後は、より実機の振舞いに近い結果が得られる実験データに基づくモデルのシミュレーションを利用することを考える。さらに、PI制御器を、より高性能の制御結果が得られるポストモダン制御器等に改良することを予定している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Achala Pallegedara, Yoshitaka Matsuda, Naruto Egashira, Takenao Sugi and Satoru Goto: Experimental evaluation of teleoperation system with force-free control and visual servo control by human operator perception, *Artificial Life and Robotics*, 査読有, Vol. 17, No. 3-4, 2013, 388-384
DOI 10.1007/s10015-012-0074-9
- ② Achala Pallegedara, Yoshitaka Matsuda, Takeo Matsumoto, Kenta Tsukamoto, Naruto Egashira and Satoru Goto: Teleoperation of Robot Arms Using Force-free Control and Template Matching, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 査読有, Vol. 8, No. 10(A), 2012, 6869-6884
<http://www.ijicic.org/ijicic-11-07052.pdf>

[学会発表] (計24件)

- ① Satoru Goto, Daichi Iseri, Yoshitaka Matsuda, Takenao Sugi, Takafumi Morisaki and Yasuyuki Ikegami: Simulation Model of Evaporator and

Separator in OTEC Plant Using Uehara Cycle for Liquid Level Control, *Proceedings of SICE Annual Conference 2012*, August 20-23, 2012, Akita University, Akita, Japan, pp.2088-2093 (2012)

- ② Yoshitaka Matsuda, Kenta Tsukamoto, Takeo Matsumoto, Satoru Goto, Takenao Sugi and Naruto Egashira: An Improvement on a Teleoperation System of Robot Arm with Visual Servo Mechanism by Target Selection, *Proceedings of SICE Annual Conference 2012*, August 20-23, 2012, Akita University, Akita, Japan, pp.1579-1584 (2012)
- ③ 永溝喜也, 森崎敬史, 松田吉隆, 杉剛直, 後藤聡, 池上康之: インターネットを利用した海洋温度差発電プラントのシミュレータ, 平成23年度第30回計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集, 平成23年12月3日, 4日, 大分県労働福祉会館ソレイユ, 204A2, pp.239-242, 2011年12月
- ④ Satoru Goto, Yoshiya Nagaimo, Yoshitaka Matsuda, Takenao Sugi, Takafumi Morisaki, Yasuyuki Ikegami and Naruto Egashira: Remote Operation System Including Simulator Function for OTEC Plant, *Proceedings of SICE Annual Conference 2011*, September 13-18, 2011, Waseda University, Tokyo, Japan, pp.1404-1409 (2011)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 聡 (GOTO SATORU)

佐賀大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 20225650

(2) 研究分担者

杉 剛直 (SUGI TAKENAO)

佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・
准教授

研究者番号: 00274580

松田 吉隆 (MATSUDA YOSHITAKA)

佐賀大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号: 00578429

(H23-H24)

池上 康之 (IKEGAMI YASUYUKI)

佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・
准教授

研究者番号: 80232172