

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 23 年 6 月 22 日現在

機関番号：13903
 研究種目：基盤(C)
 研究期間：2009 ～ 2011
 課題番号：21560829
 研究課題名（和文） GPU コンピューティングを用いた船舶のアドバンスト制御に関する研究
 研究課題名（英文） On Advanced Control of Ships Using GPU Computing
 研究代表者
 水野 直樹 (MIZUNO NAOKI)
 名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：30135404

研究成果の概要（和文）：本研究では、非線形モデル予測制御手法を GPU コンピューティングによって並列アルゴリズムで実現する方法を検討し、高精度な制御を可能とする実用的アルゴリズムを開発した。具体的には、モデル予測制御のアルゴリズムを GPU の使用を前提として入力が多段予測を行う手法に拡張し、並列化アルゴリズムによって実装した。その性能はシミュレーションおよび実船実験で評価した。提案した並列化アルゴリズムは、実船実験で有効性を確認できた。

研究成果の概要（英文）：In this research, a parallel simulation based predictive control algorithm for automatic berthing is developed. Application of GPU for control calculation (GPGPU) permits directly use of the nonlinear model of the ship for parallel simulation and makes the control algorithm with highly computational demand feasible.

The experimental results show that the proposed method is successfully applied to the approaching control for automatic berthing.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 2009 年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 2010 年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 2011 年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 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：操船制御，予測制御，デジタル制御，GPGPU

1. 研究開始当初の背景

(1)操船の自動化（インテリジェント化）は長年の課題である。このなかでも、実用化が困難とされている自動着岸操船をある状態からある状態まで最短時間で移動させる問題として変分法の2点境界値問題で定式化し、それを数値的に解くことで、個人差のない操船法が得られることが知られている。

しかし、現在の高速コンピュータを利用し

ても、多くの場合制御時間に比較して非常に長い計算時間を必要とするため、実用化には数値計算上の多くの困難を克服する必要がある。

(2)この問題に対して、予め求めた代表的な最短時間制御解を基にして実際の状況に応じた解をニューラルネットワークを用いて導出する手法をこれまでに提案し、その有効性

を示してきた。さらに、実時間でモデルに基づく複数のシミュレーション（最適化計算）を実施し、制御実施時の外乱や非線形性を持つ船体特性のモデル化誤差の影響を軽減して制御性能を向上可能であることを示してきたが、従来の制御用コンピュータの計算性能の限界に直面した。

(3)これに対して、運行システム全体の高度化としては、運行中の船舶と陸上の支援施設を衛星通信を用いたブロードバンドで結び、情報の相互連絡や、陸上施設からの運行支援が試み始められているが、システムの規模が大きくなるため、導入可能な船舶の種類が限定される。

(4)一方、コンピュータのグラフィックス機能を強化するために開発された専用プロセッサ（GPU）を汎用計算に用いる試み（GPGPU）がはじまり、並列計算可能なくつつかのアルゴリズムで従来のコンピュータをはるかに凌駕する数値計算性能が確認されつつある。

(5)本研究は、上記で述べたように処理能力の向上した GPU を船舶制御に必要な予測計算や最適化計算に応用し、高度な自動化や制御に必要な数値計算（数値最適化）に基づく船舶のアドバンスドコントロールシステムを実現する新しい技術の確立を目指すものである。

2. 研究の目的

本研究は、上記で述べたように処理能力の向上した GPU を船舶制御に必要な予測計算や最適化計算に応用し、高度な自動化や制御に必要な数値計算（数値最適化）に基づく船舶のインテリジェントコントロールシステムを実現する新しい技術の確立を目指すものである。が、研究期間内の具体的目標として、

(1) 現状のコンピュータで実現不可能な最短時間着岸操船解の GPU コンピューティングによる実時間求解アルゴリズムの開発と GPU コンピュータへの実装

(2) 上記アルゴリズムのオンボード（船上）GPU システムへの実装と、GPGPU を用いた非線形モデルベース最適化による外乱補償器を組み合わせた制御系の実現
を取り上げ、オンボード GPU コンピューティングによる船舶のアドバンスド制御系の今後の可能性を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、これまでに行ってきた研究を基

に、最短時間着岸操船制御解の導出を GPU コンピューティングに基づいて実施する計算モジュールを作成し、実時間で最適化計算を行うブロックと、非線形フィードバック構造を持ったニューラルネットワークを併用することを前提に、船体の非線形運動モデルを用いた並列シミュレーションベース予測制御系のグラフィックハードウェアによる実現法（GPGPU）の検討を行う。さらに、これらの結果を基に、船舶の制御用コンピュータにグラフィックボードを実装した船舶のアドバンスドコントロールシステムを構築し、実船実験によってその有効性を評価する。具体的には、研究を「最短時間着岸操船制御解の導出を GPU コンピューティングに基づいて実施する計算モジュールの作成」と「船体の非線形運動モデルを用いた並列シミュレーションベースコントロールシステムのグラフィックハードウェアによる実現」、「グラフィックハードウェアによる並列計算の併用による制御系の高性能化」の3段階に分けて行う。

(1) 研究初年度の平成 21 年度には、これまで通常の CPU を用いていた最短時間着岸操船制御解の導出を GPU コンピューティングに基づいて実施するルーチンの作成を行う。そのため非線形系に対する種々の最適制御解の計算手法を GPU コンピューティング等の分散処理環境で実施する具体的なアルゴリズムを構築し実装し、問題点の洗い出しやアルゴリズムの改善を行った。

(2) 平成 22 年度には、最適制御解の計算手法を船上コンピュータのグラフィックハードウェア上へ実装する際に必要となるアルゴリズムの改良を行なうと共に、実用時の外乱への対処に必要なとなる船体の非線形運動モデルを用いたオンライン数値最適化の手法を開発し、実験によって開発アルゴリズムの評価を行なった。具体的な評価はシミュレーションや GPU ボード内蔵のノートパソコンを用いた実船実験により、特に、数値最適化に要する計算時間（制御周期）と制御性能との関係を定量的に評価した。

(3) 研究最終年度の平成 23 年度には、前年度までに検討したアルゴリズムの総合評価を行なうために、種々の条件下でのシミュレーションや実船実験を行い、特に、数値最適化に要する計算時間（制御周期）と制御性能との関係を定量的に評価した。

実験にはこれまでも協力関係にある東京海洋大学所有の練習船「汐路丸」および汐路丸上の制御システム、GPU 内蔵ノート型コンピュータを使用した。

4. 研究成果

(1) 最短時間着岸操船への GPU コンピューティングの応用に関する成果

最短時間操船は図1に示すように“ある位置において一定方向・速度で航行している船舶を、指定した位置へ、その位置での方向・速度を指定して移動させる操船”と記述できる。

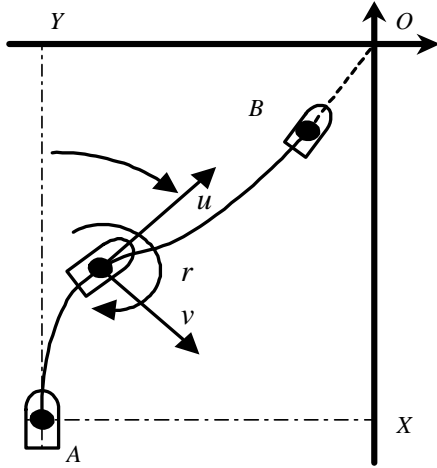


図1 最短時間操船の概要

上記のように船舶をある状態からある状態まで最短時間で移動させる操船法（最短時間操船制御）は2点境界値問題として定式化することで制御解を数値的に解くことができる。しかし、求解に時間を要するため実海域において船舶の状態に応じて計算するのは実用的ではない。そのため、事前に数値解を学習させたニューラルネットワークにより、制御解を補間することで制御を実現し、また外乱の影響を抑制するために船体運動モデルを用いたモデル予測制御により誤差を修正する手法がこれまでに提案されていた。

この手法は、図2に示すように誤差の修正のための指令値の候補となる舵角とCPP角の種々の組合せについて船体運動モデルを用いてシミュレーションを行い、その挙動を予測して最も良い指令値を実際の船舶に対する制御入力とするものである。このときモデルにも観測した風向・風速を適用することで風外乱下の挙動を予測することができる。

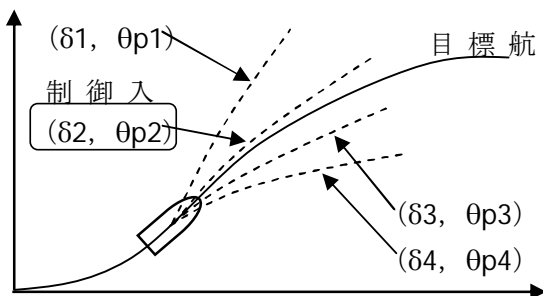


図2 モデル予測による誤差修正

しかし、図2からも分かるように最適な指令値を求めるためには舵角、CPP角の組合せ候補数を増やす必要があるが、組合せの数だけシミュレーションが必要で従来のCPUによる繰り返し計算ではシミュレーション回数に比例して計算時間が增大するため、その回数には限度があった。そのため少ないシミュレーション回数で最適な指令値を求める手法がこれまで試みられてきたが、非線形特性の強い船舶の運動においては局所解に陥るといった問題もあった。

| | | 指令舵角 | | | |
|----------------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | delta 1 | delta 2 | delta 3 | delta 4 |
| 指令 CPP 角 | theta p 1 | スレッド (0,0) | スレッド (1,0) | スレッド (2,0) | スレッド (3,0) |
| | theta p 2 | スレッド (0,1) | スレッド (1,1) | スレッド (2,1) | スレッド (3,1) |
| | theta p 3 | スレッド (0,2) | スレッド (1,2) | スレッド (2,2) | スレッド (3,2) |

図3 スレッドと指令値の対応

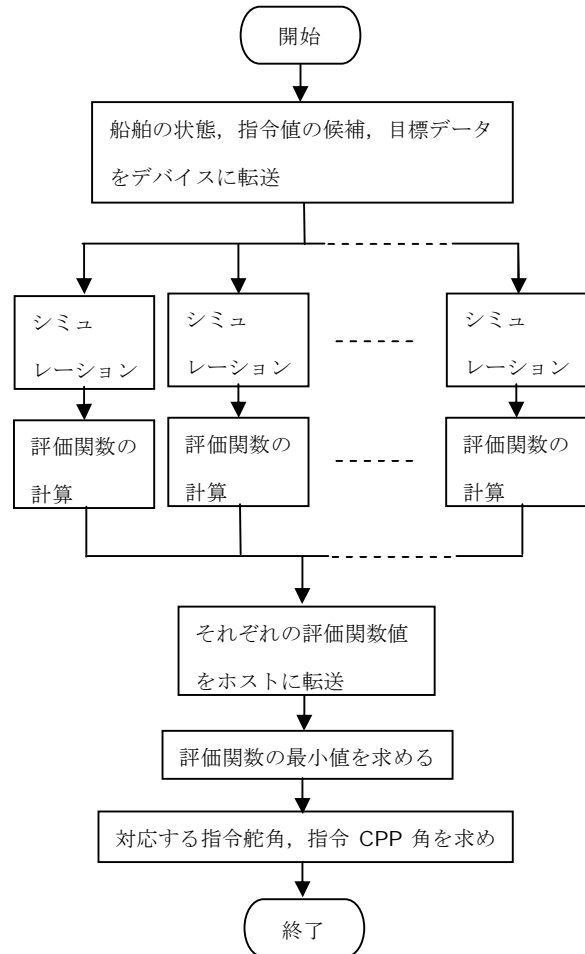


図4 フローチャート

この問題に対して本研究では、モデル予測の実行に GPGPU（グラフィックプロセッサを用いた並列計算）を利用することを検討した。具体的には、種々の条件でのシミュレーションを図3に示すように並列プロセッサのスレッドとして実現し、各スレッドで実行したシミュレーション結果を評価関数にもとづいて評価し、最適入力を決する手法を開発した。

このアルゴリズムを用いるとシミュレーションによる予測部分は並列化され、最適入力決定に要する計算時間を大幅に短縮できる。具体的な計算は図4に示すフローチャートで実施する。

この手順によって計算を行ったとき、従来のCPUを用いたループ計算に比較して表1の計算環境で比較して表2に示すように大幅な計算時間短縮が達成できた。

表1 計算環境の例

| | |
|------------|-----------------------------------|
| OS | Microsoft Windows XP |
| CPU | Intel(R) Atom(TM) N270 @ 1.60 GHz |
| メモリ | 2.00 GB RAM |
| グラフィックカード名 | NVIDIA GeForce 9300M GS |
| グラフィックメモリ | 256 MB |
| マルチプロセッサ数 | 1 |
| マルチプロセッサコア | 8 |

表2 計算時間の短縮例

| 舵角候補数 | CPP角候補数 | 指令値総数 | 計算時間 [ms] | | 比率 CPU/GPU |
|-------|---------|-------|-----------|--------|------------|
| | | | CPU | GPU | |
| 1 | 1 | 1 | 0.25 | 3.04 | 0.08 |
| 8 | 1 | 8 | 1.90 | 3.29 | 0.58 |
| 64 | 1 | 64 | 15.16 | 4.43 | 3.42 |
| 512 | 1 | 512 | 123.26 | 13.83 | 8.92 |
| 4096 | 1 | 4096 | 983.89 | 82.39 | 11.94 |
| 32768 | 1 | 32768 | 7949.73 | 634.35 | 12.53 |

GPUの方が最大で約13倍速い結果となっている。候補数が1, 8通りの場合はCPUの方が早くなっているが、これはGPUではホスト、デバイス間のデータの転送に時間を要しているためである。

GPUを用いた並列モデル予測を用いた着舷操船の制御実験結果例を図5, 6に示す。図5は実船実験に先立って行ったシミュレーション結果、図6は実船実験の結果である。実船実験は東京海洋大学所有の練習船汐路丸において行った。制御実験において指令値の候補は、

- 舵角 100 通り (刻み幅: 約 0.3 度)
 - CPP 角 100 通り (刻み幅: 約 0.1 度)
- のあわせて 10000 通りとした。

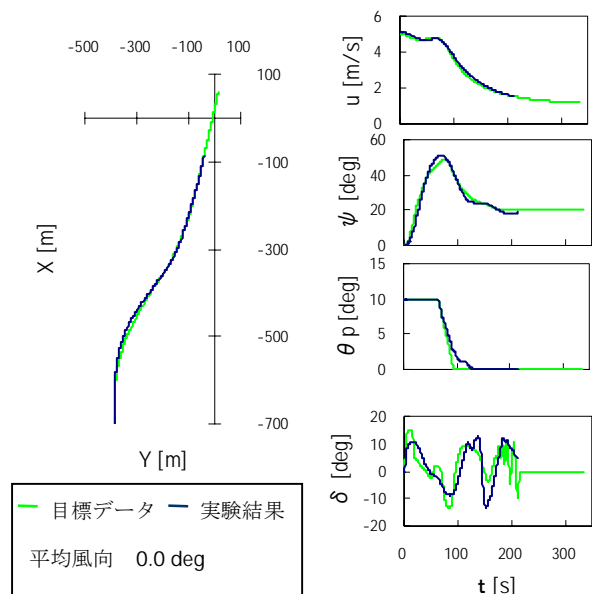


図5 シミュレーション結果

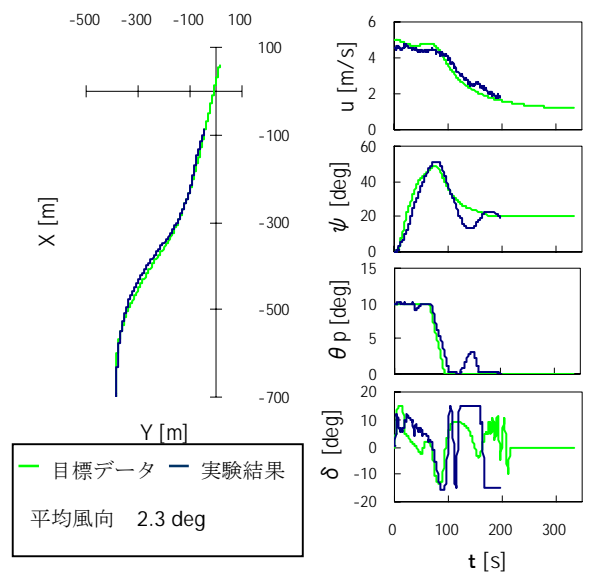


図6 実船実験結果

両結果とも前方から風を受ける状況で制御を行った。シミュレーションに比べ、実船実験では回頭角度の誤差が大きくなっている。これは実船舶とモデルとの誤差や考慮して

いない外乱（波，潮流など）の影響が出ていると考えられる．また評価する要素として位置のみを考えていることも一因となっており，評価方法について更に検討を行う必要がある．位置，速度に関しては良好な結果が得られており，GPU による並列モデル予測制御が有効であることが確認できた．

(2) 船体運動モデルの最適化に関する成果

前項で述べた並列シミュレーションを用いた予測が誤差修正制御に有効であるためには，予測に用いる船体の運動モデルが現実の運動を精密に計算できる必要がある．本研究で用いた船体運動モデルは設計データや水槽試験のデータに基づいてパラメータを決定したものであるが，必ずしも運動を精密に再現することは困難である．そこで本研究では多目的最適化プログラムを用いてモデルパラメータの最適化を行った．実航海実験データとしては，2010 年 7 月 14 日に館山湾沖にて行った自動着棧制御実験の結果を使用した．

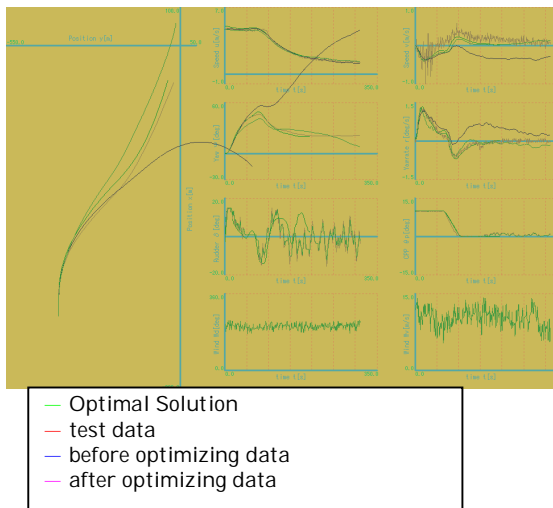


図 7 パラメータ最適化による精度向上

用いた運動モデルは多くのパラメータを持つが，ここでは，船体運動モデルのパラメータの中でも船体運動に大きな影響を与える無次元操縦流体微係数 12 個と船体抵抗係数の計 13 個のパラメータ最適化を行い，図 7 のように当初のパラメータモデルより運動をより精密に予測できるパラメータを得た．

この最適化によって得られたモデルを並列モデル予測制御に用い，その性能を従来のモデルと比較した結果，最適化モデルはあらゆる場合に従来モデルに比較して有効とは言えないが，最適化した条件に近い海象でその有効性が確認できた．

(3) 並列モデル予測制御アルゴリズムの拡張に関する成果

船体運動モデルの精度が良い場合には，運動の予測をより長時間，より複雑な入力パ

ーンに対して実施することが可能となる．この点を考慮した，入力の多段予測アルゴリズムを開発した（図 8）．

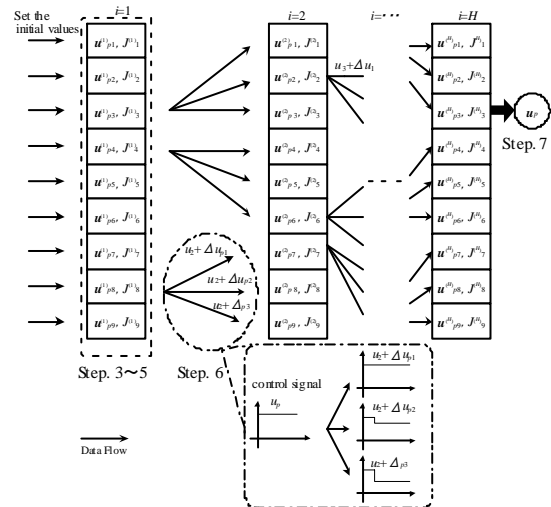


図 8 並列多段入力生成アルゴリズム

この手法では，複数の多段入力による運動予測を並列に行い，最も誤差の小さくなる入力列の最初の入力を実際に加えて制御を行う．

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計 3 件）

- ① 浅尾啓貴，水野直樹：船舶の自動着棧制御に関する研究，- 船体運動モデルの最適化による予測制御性能の向上 - ，日本機械学会東海支部第 60 期総会講演会，豊橋技術科学大学，2011 年 3 月 14 日
- ② 各務 均・水野直樹：着棧操船の自動化に関する研究，機械学会東海支部第 59 期総会講演会，名城大学，2010 年，3 月 9 日
- ③ 各務 均・水野直樹・岡崎忠胤：船舶制御における GPGPU を用いた高速並列処理の活用，第 11 回 DSPS 教育者会議，東京工業大学，2009 年，9 月 11 日

〔その他〕

年度内に学会発表等を行うことはできなかったが，本研究費による研究成果を以下の学会で発表，投稿論文が採択された．

1. 計測自動制御学会第 29 回誘導制御シンポジウム，2012 年 5 月 17 日（発表済）
2. IEEE Multi-Conference on Systems and Control , October 3-5, 2012（採択決定）
3. 9th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, September 19-21, 2012（採択決定）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水野 直樹 (MIZUNO NAOKI)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30135404