

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656291

研究課題名(和文)液体、固体及び地形表面形状の動的計測法開発への挑戦

研究課題名(英文) Development of a dynamic surface shape measurement system for liquid, solid and geographic surfaces

研究代表者

渡部 靖憲 (Watanabe, Yasunori)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20292055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：既に開発済みであるプロジェクタとデジタルカメラを使った3次元表面形状計測法を実践的な実験波浪や流れへの適用に向けて不可欠な機能を導入し、新たな計測システムへと発展させた。プロジェクタの投影周波数とカメラ撮影との同期、動的表面上の投影カラーパターンの追跡アルゴリズムを開発した。自由水面を計測する場合、水中のランベルト多重散乱系がつくる光が水面特定の精度を著しく低下させる問題が判明し、この問題を解消するためのアルゴリズムを開発した。開発したシステムは自由水面流れ計測に応用し、計測結果を使った新たな表面形状解析ツールを開発すると同時に、砕波水面形遷移に関わる新たな知見を取得した。

研究成果の概要(英文)：A novel imaging system to measure three-dimensional surface shapes, based on the projector-camera system, was improved with aim to extend the practical applicability to coastal and hydraulic engineering. The additional algorithms to synchronize the projector and digital camera and to dynamically track the color patterns reflected on the surfaces were developed and introduced to the measurement system. The additional improvement for reducing optical errors associated with Lambert multiple dispersion system formed in liquid was also introduced to the system. The developed measurement system was applied to experimental breaking waves to examine the reliability and capability to measure dynamic deformation of the free-surface. The measured results provided new aspects of the physical evaluation of transient free-surface forms of breaking waves.

研究分野：海岸工学

キーワード：計測工学 画像処理 自由水面 プロジェクタ デジタルカメラ

1. 研究開始当初の背景

波浪の伝達、発達を計測するために通常抵抗式あるいは容量式波高計が使用され、この50年以上に渡って水位点計測の時系列をもってのみ波浪分布を取得可能であった。しかしながら、複雑な海岸構造物が配置された海域での屈折、回折、反射を含む複雑な不規則重合波動場の時空間変動を離散的に配置した波高時系列から評価することは困難である。さらに波浪にตอบสนองして変位する浮体構造物や波力によって変位、変形する透過性堤体や砂浜、浜崖等を時々刻々面的に計測する手法はなく現象の理解が妨げられている。河川工学においても同様に、時空間的に遷移する水面形状、側岸侵食、砂州の動的変形、堤防の崩壊など、流況と同期した地形変化の計測が可能となれば、新たな知見の取得が期待される問題は数多い。

申請者は、PC プロジェクタとデジタルカメラのみを使った高精度かつ操作性の高い新たな非接触3次元表面形状計測法を本申請に先立って開発し、その性能検証を進めてきた。この方法は、5色に配色されたカラーパターンをプロジェクタから投影し、物体上で反射したパターンの分布を撮影した画像からピンホールモデルを基本とした幾何学的関係から表面の数値座標を決定するものである。反射が期待できる静止固体表面に限定された市販の物体形状計測とは異なり、開発した計測法では、液体の染色により投影カラーパターンの散乱光を撮影することで自由水面変位の面的計測も可能となる。申請に先立ち行ってきたシステム検証において判明した工学的応用に要求される性能に対する問題を解決し本研究目的を達成する準備は整ったため、本申請に至った。

2. 研究の目的

時々刻々変化する自由水面、固体あるいは地形表面形状の高速変位のリアルタイム計測並びにモニタリングを可能とする新たな画像計測システムを開発することが本研究目的である。

これら液体、物体の振動、変位について古くからある接触センサ、レーザー等の点計測が依然主流である現在、本研究で開発する国内外で全く例のないプロジェクタとデジタルカメラによる面的表面座標化の高速計測の導入により、海岸工学における面的波浪、動的構造物応答、砂浜形状等、河川工学における水制、堰まわりの複雑水面形、河道及び堤防形状変化、動的土砂崩壊等、現在まで動的な形状変形分布を計測あるいは定量的モニタリングを行う方法が存在しない対象の表面形状を高精度で取得可能となり、新たな知見の獲得から新たな学術的展開へのブレークスルーの誘導が期待できる。さらにこの技術は、学術的利用を超えて、品質、施工管理、生産、選別技術等の幅広い工学分野での応用により顕著な効率化、省力化を生み出す革新

的発明として極めて大きな波及効果があるものと確信する。

3. 研究の方法

本研究は、本申請に先立って既にその基本アルゴリズムが開発済みである3次元表面座標計測技術に実用上不可避である以下の動的画像処理プロセスを導入し、高速変位する液体、固体表面形状の面的計測技術を確立し、海岸工学、水工学における計測技術への応用へ向けたプロトタイプ計測システムを開発するものである。

タスク 1 計測タイミング制御アルゴリズム開発

PC プロジェクタから投影される個々のRGBカラーの固有周波数と高速カメラとのタイミング同期により、動的ミスマッチの低減と固体液体の計測対象の分離を行い、任意の時間間隔で固体液体表面形状のリアルタイム計測を可能とするシグナル処理法を開発する。

タスク 2 マルチレベル空間最適化法によるカラーパターン追跡アルゴリズムの開発

短時間に大変形をもつ水面あるいは物体上に投影されたカラーパターンを追跡し、画像ミスマッチを阻止し、構造物・水面間の多重反射に起因する精度低下を防ぐための新たなアルゴリズムを開発する。

タスク 3 高速変形物体及び自由水面運動に対する計測精度検証

海岸工学、水工学で対象となる典型的な固液混在流れに対する自由水面、構造物あるいは地形の動的形状計測により計測システムの精度と信頼性を検証し、実用化を前提としたプロトタイプを構築する。

4. 研究成果

(1) 計測タイミング制御アルゴリズム開発

本計測システムで使用する市販のPCプロジェクタを使ってプロジェクタ投影固有周期以上で高速撮影を行う場合には、対象物上に単色のみ投影された画像となるためカラー抽出処理が不能となる。この投影照明に起因する障害を解決するため、購入した各色の投影時間間隔、強度、パターンを制御可能なプログラマブル・プロジェクタを導入し、タイミングコントローラを介して高速カメラと完全に同期する本形状計測に特化したシステムを構成した。

(2) マルチレベル空間最適化法によるカラーパターン追跡アルゴリズムの開発

オプティカルフローの解析法の一つである空間最適化法を適用し、連続した画像上において対象表面に投影された同一カラーブロックを追跡し、動的なブロック位置の特定を行うことにより対応ブロック検出の自動化を行った。これは、画像上のカラーブロックの色をRGB分解したうえで、連続する画像上のそれぞれの色要素の輝度が保存されるよ

う移動速度の最適解を変分原理を基に決定するものである。さらに、高解像計測画像において高速でカラーブロック追跡処理を行うため、画像を複数の解像度レベルに分解し、低レベルの最適解から効率的に高レベル解を連動して求めるマルチレベル法を適用するための基本アルゴリズムを開発した。

(3) 水中からの散乱光補正

自由水面を計測する場合、水中のランベルト多重散乱系がつくる光が水面特定の精度を著しく低下させることが新たに判明した。この散乱光による誤差を補正するための基礎アルゴリズムを考案し、システムへの導入を進めた。一方、この散乱光補正は、水中に混入する微粒子間のランベルト多重散乱による影響を多段階の逐次計算により数値的見積もるものであり有意なコストが必要となることが判明し、この問題を解消するため、光学的多重反射系の近似的解を陽的に見積もる最適化法を開発した。

(4) 自由水面流れへの応用と物理解析

上記の計測アルゴリズムを導入した面的水面形状計測法により砕波過程の水面形状を計測し、その定量的な評価を行うための解析ツールを開発し、以下の新たな知見を取得した。

計測水面座標からレベルセット法をベースとした Zhao ら(2000)の方法を用いて水面を再構成することで欠測箇所を合理的に修正できる。再構成した水面形状に基づき砕波後の水面変動スケールを抽出した。%から計算する波峰方向単位幅当たりの水面長さにより概ねの波峰方向の水面変動スケールを見積もることができる。

砕波ジェット着水点からフィンガージェットとともにそれに先行する小規模なジェットが噴出する。重力が支配的となるフィンガージェットのスケールは砕波ジェット規模に依存してその変動傾向が異なる。

砕波ジェットの小さいケースでは2次ジェットの規模が小さくこれにより水面に生じる乱れも小さいが、ポア形成後フロント部で生じた水面変動が波の背面へ移動することで水面の乱れが岸沖方向に広がる。

砕波ジェットの大きいケースではフィンガージェットの規模が大きく砕波ジェット着水直後から水面に強い乱れを生じ、その後ポアを形成するにつれて幅が広く振幅の小さい水面変動へ遷移し、水面に生じる乱れが小さくなる。一方で表面張力が支配的となる小規模ジェットはその長さスケールはほぼ一定であり、ポア形成後もフロントの先端に強い乱れを生じる。

重力に起因するフィンガージェットは合体、再着水、新たなジェットの噴出により波峰方向スケールが大きく変動するが、表面張力に起因する小規模ジェットは波峰方向スケールに大きな変動を示さない。フィンガージェ

ットは水面に強い乱れを生じるがその後幅が広く乱れの弱いポアへと遷移する一方で、先行する小規模ジェットは長さスケールがほとんど変動せず、速度スケールの減少に伴い水面に生じる乱れが減少する。

砕波直前における波峰部の水面曲率は Surf Similarity Parameter (SSP) が低い場合時間に比例し変化のスケールが小さい一方、SSP が増加すると砕波に近づくにつれて急速な増加を示す。水面曲率の変化速度は砕波後のジェット形成速度及び生成されるジェット規模を表し、砕波後の乱流形成に大きく関わるものといえる。また砕波時の波峰部の水面曲率と水面の限界形状の関係を示し、動的な水面の不安定として砕波の特徴を考えることができる。

砕波後の水面曲率の発生確率密度の分散は SSP の異なる波浪の水面形状遷移の特徴を適切に示しており、継続的に繰り返されるスプラッシュに伴う大規模なジェットのフィンガー化や分裂、局所変形を記述するパラメータとして適切なものと考えられる。

計測した水面形についてその波峰方向に渡る平均水位からの変動量をとることで波峰方向の局所的な水面変形を抽出した。局所水面変動と曲率分散の岸沖方向分布を合わせることで SSP の低い場合曲率が低く浅い変形が多数初期段階で発生し、増加とともに大規模な変形が広い間隔で発生することを示した。

一連の検討により、本計測法によって初めて取得可能となった局所水面形状遷移から砕波過程の側面を抽出可能であることが明らかになった。

(4) 高度表面計測法開発への展開

新たなアルゴリズムを導入した本画像計測法は、連続的な大変形を伴う表面形状の追跡を可能とするものであるが、水面の分裂等表面においてプロジェクタの反射光が消失する様な複雑な形状遷移に対する計測においては大きな誤認識が生じることが判明した。このエラーを回避するため2眼視計測により2つの視軸上のカラーブロックを抽出する新たなアルゴリズムを開発した。これは2つのカメラとプロジェクタに対応する3つのピンホールモデル系において位置誤差が最小となるように較正されるのであり、両カメラの視軸上で探索されるカラーブロックのみ真値として取得可能であり、原理的にカラーブロック自体の追跡が不要となり、信頼性が向上する。

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 5件)

渡部靖憲, 大島悠揮, 水面 壁面相对衝突

角に依存する遡上波の物理特性,土木学会論文
文集 B2(海岸工学),査読有,70(2),186-190,
(2014)

渡部靖憲,佐藤駿一,三戸部佑太,横田弘,
壁体崩壊に伴う越流背後の流体運動と力学的
応答,土木学会論文集 B2(海岸工学),査読
有,69(2),76-80(2013)

三戸部佑太・渡部靖憲,碎波による水面変動
スケールの定量化,土木学会論文集 B2(海岸
工学),査読有,68,31-35(2012)

渡部靖憲・佐藤駿一,熱・物質の移流拡散
速度の画像計測法,土木学会論文集 B2(海岸
工学),査読有,68,41-45(2012)

大塚 淳一,渡部 靖憲,林 倫史,移動床碎
波帯の流速場時空間変動と底質輸送に関す
る実験的研究,土木学会論文集 B2(海岸工学),
査読有,68(2) 481-485(2012)

〔学会発表〕(計 5件)

大島悠揮(渡部靖憲),水面 壁面相对衝突
角に依存する遡上波の物理特性,海岸工学講
演会,2014年11月12日,ウインクあいち
(名古屋)

佐藤駿一(渡部靖憲),壁体崩壊に伴う越流
背後の流体運動と力学的応答,海岸工学講演
会,2013年11月13日,九州大学(福岡市)

三戸部佑太(渡部靖憲),碎波による水面変動
スケールの定量化,海岸工学講演会,2012
年11月14日,広島国際会議場(広島市)

佐藤駿一(渡部靖憲),熱・物質の移流拡散速
度の画像計測法,海岸工学講演会,2012年
11月14日,広島国際会議場(広島市)

大塚 淳一(渡部靖憲),移動床碎波帯の流速
場時空間変動と底質輸送に関する実験的研
究,海岸工学講演会,2012年11月14日,
広島国際会議場(広島市)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡部 靖憲 (WATANABE YASUNORI)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号:201292055

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: