

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2015

課題番号：24680018

研究課題名(和文) 適応的高速3次元センシングとその情報再構築に関する研究

研究課題名(英文) Adaptive high-speed 3D sensing and its information reconstruction

研究代表者

渡辺 義浩 (Watanabe, Yoshihiro)

東京大学・情報理工学(系)研究科・講師

研究者番号：80456160

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、対象の変動速度を上回る速度で観測系の構造を制御する適応的3次元センシングの構築と、高速に把握される時空間の情報を統合する理論の体系化を実施した。また、提案技術が切り拓く応用として、予測不能な現象を記録するための知的撮像制御と、運動物体を高精細かつ高速にスキャンする技術への展開を図った。具体的な成果として、複数枚の距離画像からの適応的階層化に基づく高解像度形状復元、適応的照明を用いた高速反射特性計測、3視点拘束に基づくセグメントパターン投影型高速3次元計測、高速動画画像を用いた時系列伝搬による運動物体の逐次的形状復元、3次元運動計測の検証と動的物体の形状統合への応用などを実現した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research project is to develop a new adaptive 3D sensing exceeding the speed of target fluctuation and a method integrating the temporal-spatial information obtained at high speed. Also this project seeks the promising applications for intelligent capture control recording the unpredictable phenomena and high-speed and high-precision scanning of a moving object. The realized technologies include high-resolution surface reconstruction based on multi-level implicit surface from multiple range images, rapid BRDF measurement by algebraic solution based on adaptive illumination, high-speed 3D sensing with three-view geometry using a segmented pattern, sequential 3D reconstruction for a moving object based on time-series propagation using high-speed cameras, 3D motion sensing and its application to 3D shape integration.

研究分野：知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：センシングデバイス・システム 計測システム センシング情報処理 コンピュータビジョン 画像情報処理 3次元センシング 高速ビジョン 能動計測

### 1. 研究開始当初の背景

秒間 1,000 回の速度で撮像から処理までを完了する高速なビジョン技術が実現されつつある。同ビジョンが究極的に求めるのは、時空間の情報精度を極限まで進化させることである。このために要請されるのは、真に高速な 3 次元センシング技術の確立である。しかし、高速な 3 次元センシング技術は未だ十分でない。これまでの 3 次元センシングの主流は静止した石膏製の小型物体や、屋内環境の構造、人間の顔などであり、その多くは高速性を要請していなかった。リアルタイム画像センシングの 2 次元から 3 次元へのパラダイムシフトは、TOF カメラやゲーム用コントローラ等の登場によってその有効性が認知されつつあるが、その速度は低く、試される応用も簡単なヒューマンインターフェースやロボット制御に留まっている。

### 2. 研究の目的

形状を捉えるための従来センシング技術は静的で低速であり、応用展開も限定的であった。本研究では、図 1 の戦略の下、3 次元センシングの超高速化がもたらす新たな知的機能を明らかにする。具体的には、対象の変動速度を上回る速度で観測系の構造を制御する適応的 3 次元センシングの構築と、高速に把握される時空間の情報を統合する理論の体系化を行う。これらは、3 次元センシングの高速化を追求することで、初めて実現される時空間把握能力に挑戦しようとするものである。さらに、提案技術が切り拓く応用として、予測不能な一瞬の現象を完全に記録するための知的撮像制御と、大型の環境をいつでも気軽に、ただし高精細に一瞬でスキャンする技術への展開を図る。

### 3. 研究の方法

本研究計画は、高速 3 次元センシング技術について、その速度を利用したフィードバックタスクの実現、能動センシングの強化による動的環境での適応的な計測機能、瞬時に蓄積される膨大な情報を統合することで情報を再構築する技術の 3 つを軸に、基盤技術の確立と新応用を提案・実証することを目的に立案されたものである。基盤技術の確立は、

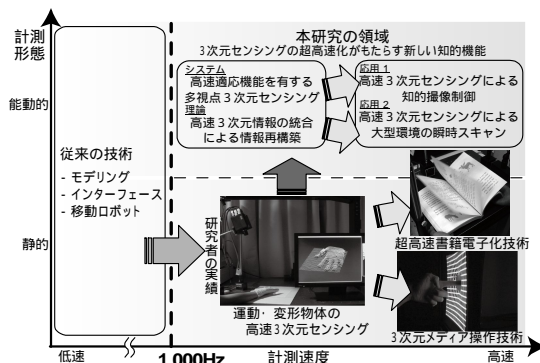


図 1. 本研究の位置づけ

高速適応機能を有する 3 次元センシングと高速 3 次元情報の統合による情報再構築の 2 つのサブテーマから構成されている。基盤技術として、この 2 つの技術を研究開発することで、3 次元が高速な予測不能な変動を含む広範囲の利用環境・使用形態においても、高精度と高速性を両立する機能の究極化を目指すことができる。また、応用ではロボティクス・車載・検査などの従来の典型的かつ専用の高速画像処理応用ではなく、高速 3 次元センシングによる知的撮像制御と大型環境の瞬時スキャンの新たな技術分野を狙う展開を図る。

### 4. 研究成果

平成 24 年度は、サブテーマ「高速適応機能を有する 3 次元センシング」に関して、3 次元センシングの超高速化によって新たに可能となる機能を設計した。その結果、動的なターゲットの 3 次元形状とともに、反射特性も同時に取得できる見込みが高いことが分かった。反射特性は環境や物体の物理特性として重要な情報であり、3 次元形状と同時に取り込むことができれば、システムの応用展開の可能性が大幅に広がることが期待できる。本年度は、ターゲットとしてめくり動作中の書籍に着目し、紙面に印字された書籍画像とともに、その紙の反射特性も同時に取り込めるシステムを構築し、動作を検証した。次に、サブテーマ「高速 3 次元情報の統合による情報再構築」では、連続的に取得された 3 次元形状の情報から高解像度の連続曲面を再構築するための手法を構築した。本手法は、形状表現として適応的な階層構造を有する陰関数表現を用いるとともに、形状特徴を利用した運動推定と、推定された運動による点群の移動量に応じた形状推定によって、運動と形状の単なる交互推定ではなく、より厳密な同時推定を達成することで、高精度化を図るものである。評価実験の結果、図 2 に示すように、低解像度の距離画像からでも、複雑な形状を高い精度で復元できることを実証した。サブテーマ「高速 3 次元センシングによる大型環境の瞬時スキャン」では、小型 3 次元センシングモジュールの開発に向けて、高速画像処理をスタンドアロンで実施できるシステムを開発した。これまでの高速ビジョンシステムは大型であり、可搬性やモジュール化を運用上の設計の焦点としていなかった。そこで、小型・スタンドアロンな高速ビジョンシステムがもたらす応用展開を、本研究課題に留まらず、様々な観点から検討し、その要請を整理した上で、設計と開発を行った。

平成 25 年度は、サブテーマ「高速適応機能を有する 3 次元センシング」に関して、前年度に引き続き、発展版として、動的物体の 3 次元形状と反射特性を同時に取り込むシステムの構築を行った。前年度までは、一様な反射特性を持つ物体を対象として、対象の

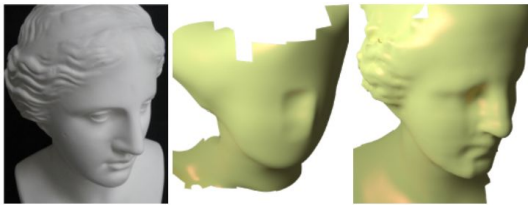


図 2. 複数枚の距離画像からの適応的階層化に基づく高解像度形状復元

運動や変形を利用することで高速に反射特性計測を行った。本年度は新たに、非一様な反射特性を持つ物体を対象とするために、新たな手法とシステムの構築を行った。これは、反射特性を代数的に求める手法を新たに設計するとともに、同計算を成立させるために必要最小限の情報を、対象物体の運動や変形に応じて、適応的に照明環境を制御することで取り込むものである。500Hz の速度で機能するシステムを試作し、本技術の有効性を検証した。図 3 に結果を示す。サブテーマ「高速 3 次元情報の統合による情報再構築」では、前年度までに設計した統合手法の高速化を図った。前年度までは、形状情報のみで、時系列の 3 次元情報から再構築を行っていた。本年度は、新たに物体表面上のテクスチャの情報も利用することで、ロバストかつ高速に再構築を行う手法を提案・検証した。サブテーマ「高速 3 次元センシングによる知的撮像制御」では、動的シーンや動的物体などにおける一瞬の現象を超高精細に取り込むことを目的としている。本年度は、超高速書籍電子化を応用のターゲットとして、応用展開を図った。具体的には、高速 3 次元センシングによるフィードバックによって、複数台の高解像度カメラの撮像タイミングを適応的に制御することを行った。この複数台の高解像度カメラは、書籍の 1 ページを分割して撮像するように配置されている。ページのめくり動作中に、その変形に応じて、最適なタイミングでのみ個別に撮像を行うことで、取り込まれる情報の解像度を最大限上げようとするものである。本年度は、同システムを試作し、その動作を確認した。サブテーマ「高速 3 次元センシングによる大型環境の瞬時スキャン」では、大型環境を瞬時スキャンすることを目指している。ただし、本目標は、スケールの観点から、必ずしも大型である必要はなく、中型の物体形状を高精細に取得する応用にも展開できる。そこで、センシング

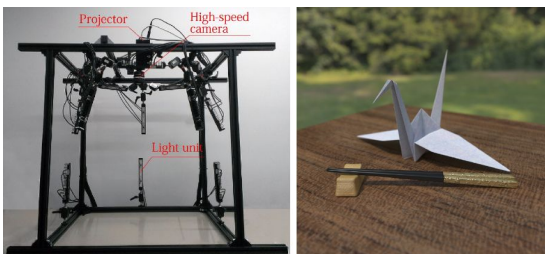


図 3. 適応的照明を用いた高速反射特性計測

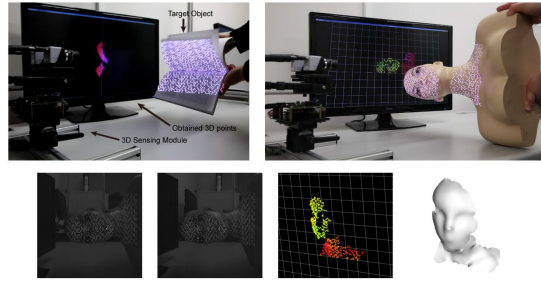


図 4. 3 視点拘束に基づくセグメントパターン投影型高速 3 次元計測

モジュールを設置する、高速かつ自由に移動する物体として、人間の手指に着目し、ウェアラブルな 3 次元スキャンを行う構想を新たに提案した。この構想の下、小型なセンシングモジュールを開発し、サブテーマ「高速 3 次元情報の統合による情報再構築」の手法と組み合わせることで、対象物体の前で手指を振るだけで、形状を取り込むことを目指した。本年度は、そのプロトタイプを試作と、顔や人形などを対象として実験を行った。

平成 26 年度は、サブテーマ「高速適応機能を有する 3 次元センシング」に関して、従来の高速 3 次元センシングが抱えてきた動作範囲の限定や、トラッキング処理による問題を解決する手法を設計した。本手法は、3 視点幾何を組み込むことで、ロバストかつ効率的な演算を可能とし、新たに提案するセグメントパターンは、高速な処理を可能としつつも、解像度向上にも寄与するものとなっている。図 4 に結果を示す。サブテーマ「高速 3 次元情報の統合による情報再構築」では、1 枚の画像のみを用いる能動型 3 次元計測における解像度の問題を解決する手法を設計した。これは、高フレームレートで撮像されたステレオ動画像において、連続するフレーム間における対象の運動が微小であるという仮定の下で、推定形状を時系列伝搬し、最小限の処理で高解像度形状を復元する手法である。図 5 に結果を示す。また、3 次元曲面を展開し、情報を再構築する手法を新たに設計した。これは、可展面構造に一樣分解表現

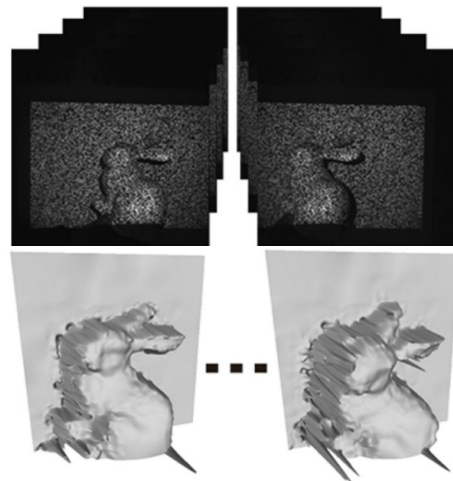


図 5. 高速動画像を用いた時系列伝搬による運動物体の逐次的形状復元

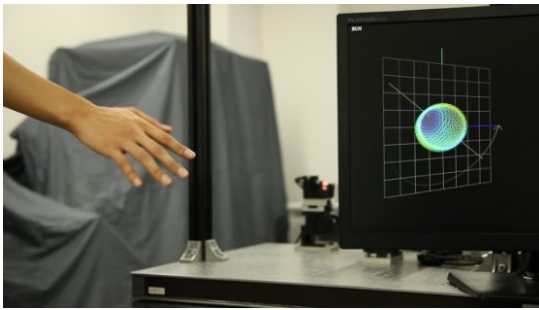


図 6. 3次元運動計測の検証

を導入することによって、任意の3次元曲面と2次元平面の写像を扱うことができる手法である。サブテーマ「高速3次元センシングによる知的撮像制御」では、サブテーマ「高速適応機能を有する3次元センシング」で設計した手法を、開発したウェアラブルセンシングモジュールのプロトタイプに導入し、高フレームレートでリアルタイムに3次元形状を取得可能であることを示した。次に、大型環境の瞬時スキャンに向けて、センサ、または対象物体の運動情報を取得するセンシングシステムの開発に着手した。これは、従来は画像ベースで推定的にしかなかった情報を、計測技術を駆使して環境に依存せず確定的に取得できるシステムの実現を目指すものである。本年度はその構想の設計までを実施した。

平成27年度は、サブテーマ「高速適応機能を有する3次元センシング」に関して、前年度に設計した3視点幾何に基づくセグメントパターン投影型高速3次元計測の高速化及び性能評価を実施した。高速化の結果、1,000fpsのリアルタイム計測が可能であることを確認した。また、性能評価では誤検出数や計測精度を解析し、処理を効率化しつつも、高いロバスト性が確保されていることを確認した。さらに、適応的高速3次元センシングの適用範囲を広げるために、空中像形成技術を用いて、遮蔽に頑健な計測を可能とする技術の検証を行った。サブテーマ「高速3次元情報の統合による情報再構築」では、高速3次元センシングに基づいた適応的照明を用いた高速反射特性取得技術の拡張に着手した。具体的には、新たな反射モデルに対しても、適応的センシングとその情報再構築が可能であることを示した。また、3次元曲面を展開し、情報を再構築する手法の発展版として、事前知識駆動型のアプローチを検証

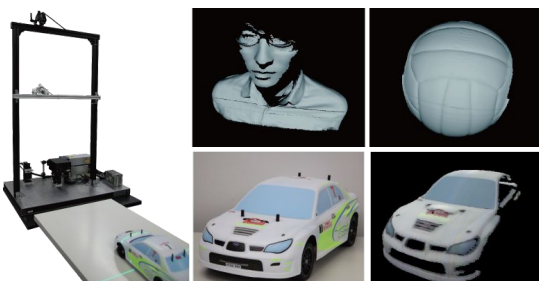


図 7. 3次元運動計測を用いた動的物体の形状と色の高解像度統合

した。サブテーマ「高速3次元センシングによる大型環境の瞬時スキャン」では、サブテーマ「高速適応機能を有する3次元センシング」で設計したセグメントパターン投影型的手法を組み込んだプロトタイプさらなる小型化に着手した。結果として、手指に装着可能なプロトタイプの実現が可能であることを示した。また、多重化されたレーザー計測の情報を用いて、非接触で剛体の3次元運動を取得する新たなセンシングの実現可能性を検証した。さらに、同技術を用いた運動物体の高解像度な3次元形状取得の可能性や、移動体に同システムを搭載することで、移動しながら大型の物体をスキャンできる可能性を検証した。図 6、図 7 に結果を示す。

#### 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 7 件)

- [1] 田畑智志, 野口翔平, 渡辺義浩, 石川正俊: 3視点拘束に基づくセグメントパターン投影型高速3次元計測, 計測自動制御学会論文集, Vol.52, No.3, pp.141-151, 2016.
- [2] Leo Miyashita, Ryota Yonezawa, Yoshihiro Watanabe and Masatoshi Ishikawa: 3D Motion Sensing of any Object without Prior Knowledge, ACM Transactions on Graphics, Vol.34, No.6, 218 (2015)
- [3] Yoshihiro Watanabe, Hiromasa Oku, and Masatoshi Ishikawa: Architectures and Applications of High-Speed Vision, OPTICAL REVIEW, Vol.21, No.6, pp.875-882, 2014.
- [4] 渡辺義浩: 高速3次元センシングとその応用, 日本ロボット学会誌, Vol.32, No.9, pp.778-783, 2014.
- [5] Taku Senoo, Yuji Yamakawa, Yoshihiro Watanabe, Hiromasa Oku and Masatoshi Ishikawa: High-Speed Vision and its Application Systems, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.3, pp.287-301, 2014.
- [6] Shohei Noguchi, Yoshihiro Watanabe, Masatoshi Ishikawa: High-resolution Surface Reconstruction based on Multi-level Implicit Surface from Multiple Range Images, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol.5, pp.143-152, August, 2013.
- [7] 渡辺義浩, 柴山裕樹, 石川正俊: 高速書籍電子化に向けた単眼動画画像からの3次元変形とその展開テクスチャの復元, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J96-D, No.8, pp.1731-1742, 2013.

〔学会発表〕(計 23 件)

- [1] 斎藤謙二郎, 宮下令央, 渡辺義浩, 石川正俊: 高速 BRDF 計測に向けた代数的解法の拡張の提案, 2015 年映像情報メディア学会冬季大会, 講演予稿集, 11C-5.
- [2] 中井啓貴, 米澤亮太, 宮下令央, 渡辺義浩, 石川正俊: 三次元運動センシングを用いた移動体からの三次元形状統合システムの提案, 第 16 回システムインテグレーション部門講演会 (名古屋, 2015.12.14) / 講演会論文集, pp.0377-0380.
- [3] 米澤亮太, 宮下令央, 渡辺義浩, 石川正俊: 3 次元運動計測を用いた動的物体の高解像度 RGB-D 取得, 第 16 回システムインテグレーション部門講演会 (名古屋, 2015.12.14) / 講演会論文集, pp.0381-0386.
- [4] 安井雅彦, 渡辺義浩, 石川正俊: 構造化光空間を用いた遮蔽に頑健な浮遊型入力機構の提案, 第 16 回システムインテグレーション部門講演会, (名古屋, 2015.12.14) / 講演会論文集, pp.0366-0370.
- [5] 伊藤光一郎, 渡辺義浩, 石川正俊: 事例ベース歪み補正のための書籍構造を利用した紙面形状マッチング, ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2015) / 講演論文集, IS1-12.
- [6] Leo Miyashita, Ryota Yonezawa, Yoshihiro Watanabe and Masatoshi Ishikawa: 3D Motion Sensing of any Object without Prior Knowledge, SIGGRAPH Asia 2015.
- [7] Satoshi Tabata, Shohei Noguchi, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa: High-speed 3D Sensing with Three-view Geometry using a Segmented Pattern, 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (Hamburg, 2015.9.30) / Proceedings, pp.3900-3907.
- [8] 宮下令央, 米澤亮太, 渡辺義浩, 石川正俊: 多重化レーザー計測を用いた任意物体の 3 次元運動センシングとその応用, 第 20 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 21D-2.
- [9] 安井雅彦, 渡辺義浩, 石川正俊: 空中像形成技術を用いた構造化光空間による 3 次元計測手法の提案, 第 20 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 21D-3, pp. 249-252.
- [10] 田畑智志, 野口翔平, 渡辺義浩, 石川正俊: 3 視点拘束に基づくセグメントパターン投影型リアルタイム 3 次元センシング, 第 15 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2014) (2014 年 12 月 14 日 ~ 17 日・東京) / 講演会論文集, pp.2261-2265.
- [11] Leo Miyashita, Yoshihiro Watanabe and Masatoshi Ishikawa: Rapid SVBRDF Measurement by Algebraic Solution Based on Adaptive Illumination, International Conference on 3D Vision (3DV 2014) (Tokyo, 2014.12.08-11), pp. 232-239
- [12] Masahiro Hirano, Yoshihiro Watanabe and Masatoshi Ishikawa: 3D Rectification of Distorted Document Image based on Tiled Rectangle Fragments, 2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP2014), (Paris, France, 2014.10.29) / Proceedings, pp. 2604-2608.
- [13] Masahiro Hirano, Yoshihiro Watanabe and Masatoshi Ishikawa: High-Accuracy Rectification of Non-Planar Documents using Isometric Developable Mesh, The 17th Meeting on Image Recognition and Understanding (MIRU2014), (Okayama, 2014.7.30) / Extended Abstracts, OS2-4.
- [14] 橋本順祥, 渡辺義浩, 石川正俊: 高速動画像を用いた時系列伝搬による運動物体の逐次的形状復元, 第 20 回画像センシングシンポジウム (SSII2014) (横浜, 2014.6.12) / 講演論文集, IS2-20.
- [15] 多田圭佑, 渡辺義浩, 石川正俊: 3 次元形状の事前知識を用いた書籍画像展開補正, 第 20 回画像センシングシンポジウム (SSII2014) (横浜, 2014.6.13) / 講演論文集, IS2-31.
- [16] 郷原啓生, 渡辺義浩, 石川正俊: 異なる時刻に撮像された複数視点画像を用いる統合型書籍画像生成とその高品質化, 第 20 回画像センシングシンポジウム (SSII2014) (横浜, 2014.6.13) / 講演論文集, IS2-35.
- [17] 野口翔平, 渡辺義浩, 石川正俊: 小型・高速 3 次元センシングシステムを用いた高解像度形状復元, 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2013) (神戸, 2013.12.19) / 講演会論文集, pp.1067-1070.
- [18] 郷原啓生, 渡辺義浩, 石川正俊: 複数視点型書籍電子化のためのテクスチャ配置と解像度向上を最適化する統合画像生成手法, 2013 年度映像メディア処理シンポジウム (IMPS2013) (湯河原, 2013.11.8) / 講演論文集, I-5-04.
- [19] Shohei Noguchi, Yoshihiro Watanabe, Masatoshi Ishikawa: High-Resolution Surface Reconstruction based on Multi-level Implicit Surface from Multiple Range Images, IEEE International Conference on Image Processing (ICIP2013) (Melbourne, Sep

16, 2013) / Proceedings, pp. 2140-2144.

- [20] 松本康平, 溜井美帆, Carson Reynolds, 渡辺義浩, 石川正俊: スタンドアロン高速ビジョンシステムの試作, 2012 年映像情報メディア学会冬季大会 (東京, 2012.12.19) / 講演予稿集, 11-11.
- [21] 宮下令央, 渡辺義浩, 石川正俊: デジタル応用に向けた変形する紙の高速な反射特性の取得, 2012 年映像情報メディア学会冬季大会 (東京, 2012.12.18) / 講演予稿集, 3-3.
- [22] 宮下令央, 渡辺義浩, 石川正俊: 書籍のデジタルアーカイブに向けためくり動作中の高速反射特性計測, ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2012) (神奈川, 2012.12.7) / 講演論文集, IS2-D1.
- [23] 野口翔平, 渡辺義浩, 石川正俊: 複数枚の距離画像からの適応的階層化に基づく高解像度形状復元, 第 15 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2012) (福岡, 2012.8.08) / 講演論文集, OS12-03.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称: 運動検出装置及びそれを用いた三次元形状測定装置

発明者: 渡辺義浩, 宮下令央, 米澤亮太, 石川正俊

番号: 特願 2015-171785

出願年月日: 2015 年 9 月 1 日

国内外の別: 国内

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/vision/SegmentedPattern/>

[http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/vision/3D\\_Integration/](http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/vision/3D_Integration/)

[http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/vision/3D\\_Motion/](http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/vision/3D_Motion/)

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/vision/algebraicBRDFmeasurement/>

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/vision/Aerial3D/>

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/vision/timepro3D/>

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/vision/HighResolutionShapeMultiLevel/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡辺 義浩 (WATANABE YOSHIHIRO)

東京大学・情報理工学系研究科・講師

研究者番号: 80456160