

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04209

研究課題名（和文）時空間ライトフィールド投影による3次元運動情報の可視化

研究課題名（英文）3D motion visualization by spatio-temporal light field projection

研究代表者

坂上 文彦（Sakaue, Fumihiko）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：00432287

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：この技術では、通常の画像処理技術では一般的に用いられるカメラを用いたシーン情報の取得と計算機による取得情報の解析を一切行わない。その代わりに、複数の制御可能な投光機からなるライトフィールドプロジェクタを用いて対象に特殊な光線パターン（ライトフィールド）を投影することで、シーンの運動情報の解析および解析情報の提示が完結する。このシステムでは、物体表面での光線の重畳や観測者の光線の観測を一種の演算処理とみなし、この演算により運動の解析・提示を実現できる。これにより、カメラによるシーンの撮影、計算機での画像処理など、情報提示までの時間遅延を発生させる要因を排除した即応性の高いシステムを構成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題で提案する方法は、本来観測系と計算機によって構成されるデータ解析を、光の足し合わせによる物理現象によって置き換えるといった点で画期的な方法であるといえる。この方法を利用することで、観測・処理に伴う時間遅延を原理的に0にすることが可能である。そのため、わずかな遅延が致命的な事態を引き起こすシーンにおいては絶大な効果が得られると考えられる。例えば、運転支援の前処理などで使用することで、全体の処理の高速化・安定化などの実現が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This technique does not use a camera to acquire scene information and a computer to analyze the acquired information, which are commonly used in conventional image processing techniques. Instead, a light field projector consisting of multiple controllable projectors is used to project a special pattern of light rays (light field) onto the object to complete the analysis of scene motion information and presentation of the analyzed information. In this system, the superimposition of light rays on the object's surface and the observer's observation of the light rays are regarded as a kind of arithmetic process, and the analysis and presentation of motion can be realized through these operations. The system is highly responsive, eliminating factors that cause delays in the presentation of information, such as the use of a camera to capture the scene and image processing on a computer.

研究分野：コンピューショナルフォトグラフィ，コンピュータビジョン

キーワード：コンピューショナルプロジェクション コンピューショナルフォトグラフィ ライトフィールド処理
ライトフィールドプロジェクション 運動情報の可視化

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

コンピュータを利用した自動化技術は様々なシーンで利用されており、その発展が期待されている。このような自動化技術の代表例として、自動車の自動運転技術やファクトリーオートメーション (FA) などが挙げられる。これらの技術では、カメラなどの様々なセンサから入力される情報をコンピュータで処理することによりシーンの状況を適切に判断し、それに応じた処理を行うことで人の手を介さない自動化技術を実現している。しかし、このような自動化技術においても、人の手を全く介さない完全な自動化を実現することは難しい。これは、システム設計者が想定していないような事態が発生した場合には、人間が状況を判断し、それに応じた適切な処理を行う必要があるためである。この問題は自動運転技術のような周囲の状況が大きく変動するシーンにおいては特に重大であり、これに対応するための方策が必要とされている。

このような状況においてユーザ (人間) が適切な判断を行うためには、ユーザ自身の視覚や聴覚などで取得する映像情報・音声情報だけでなく、種々のセンサから得られる様々な情報を人間にわかりやすい形で提示することで、その判断を補助することが重要となる。特に、人間の視覚系では奥行きに関する計測精度が低いことが知られているため、奥行きに関する形状情報や速度情報を分かりやすい形で提示することができれば、状況判断のための大きな助けになると考えられる。しかし、このような情報提示を行うためには、(1)センサによりシーン情報を計測し (情報の計測)、(2)コンピュータを用いて人間の理解しやすい形への情報の加工を行い (情報の加工)、最後に(3)ユーザへと提示を実施する (情報の提示) といった一連のプロセスが必要となる。これらの処理には一定の処理コスト・処理時間が発生するため、最終的に提示される情報は必ず入力シーンから遅延したものになってしまう。このような遅延は非常時などの即応性が重要となるシーンにおいては致命的な問題であるが、従来のシステムでは上記のプロセスが避けられない以上、この遅延を完全に排除とすることは原理的に非常に難しいという問題があった。

2. 研究の目的

そこで本課題においては、このような情報の計測、情報の加工、情報の提示という3つのプロセスを順にたどるのではなく、ただ一つの統合的な処理によりこの3つの処理を同時に実現する新しいシステムを提案する。特に、動的なシーンの理解において重要となるシーンの3次元運動情報を、色や映像といった直感的な視覚情報へと変換し、遅延なく提示するシステムを提案する。提案システムと従来のシステムのそれぞれの処理の流れを図1に示す。このシステムでは、プロジェクタ等の制御可能な投光器を複数台用いて、様々な方向から時間的に変動する特殊な光 (時空間ライトフィールド、以下、時空間 LF) を投影する。このときプロジェクタから投影される時空間 LF は、投影された対象の状態に応じて観測結果が変化する特殊なパターンとなっており、対象シーンの運動状態に応じて対象上で観測される映像が大きく変化する。つまり、運動情報の視覚情報への変換を特殊パターンの投影された運動の観測という1つのプロセスのみで完結させることができる。

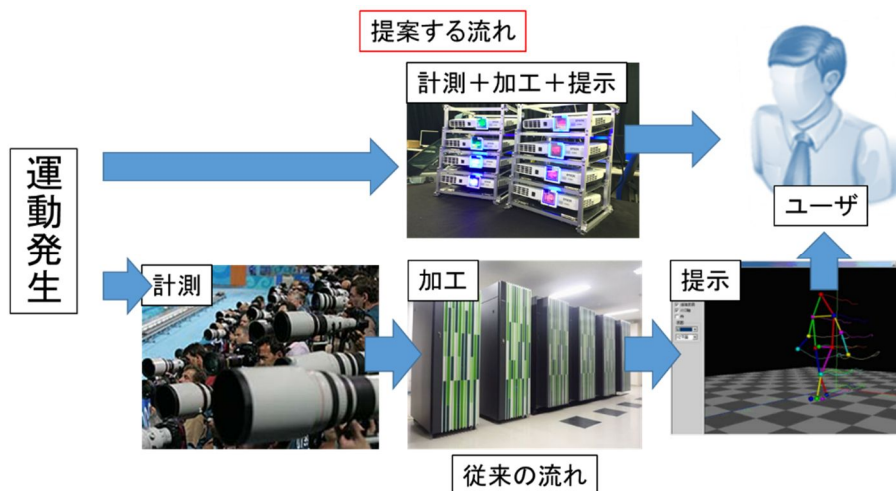


図1：従来システムと提案システムの処理の流れの違い

このシステムでは、光の投影を行うことができれば、コンピュータ等の処理系だけでなく、カメラ等のセンサも一切使用することなくシーンの情報を解析・提示することが可能となる。そのため、非常に単純な構成によりシステムを構成することができる。また、処理系・センサ系に起因する情報の遅延についても一切発生させることなく情報の提示が可能である。加えて、センサからの情報

報を処理する際に発生する処理誤りについても一切考慮する必要がないため、非常に安価かつ頑健なシステムを構成することが可能となる。以上のように、本課題で提案するシステムは以下の点において従来の計測・提示システムより優れた画期的なシステムであるといえる。

- シーン情報の取得・処理を行わないことによる、情報遅延の完全な排除
- 同理由による非常に単純かつ安価なシステム構成
- センサ系のノイズ等に起因する計測誤りの排除

これらの特性により、即応性が要求されるようなシーンにおいても十分な性能を発揮することができる視覚補助システムを構成することが可能になる。これにより、図2に示すような工場内でのライン補助、車載システムにおける運転支援など、様々なシーンへの活用が期待できる。さらに、本課題で提案するシステムは、シーン中の運動を遅延なく直接的に提示可能なシステムであるため、先に述べた視覚補助だけでなく、拡張現実・仮想現実といったシーン環境やユーザの状態に応じて提示情報を変化させる必要があるシステムにも利用可能と考えられる。

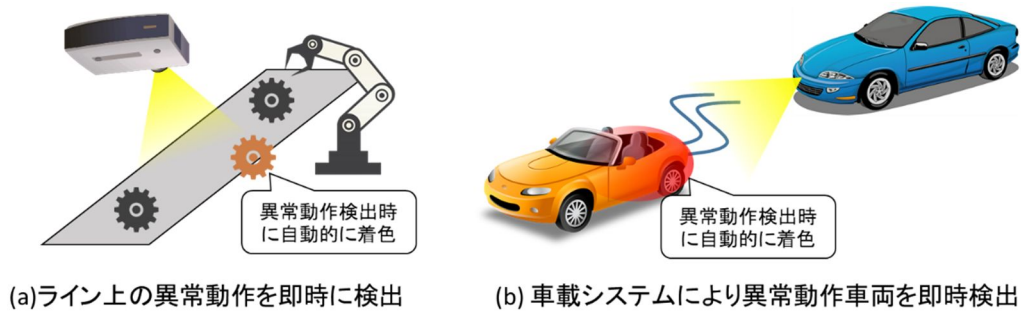


図2：提案システムの応用例

3. 研究の方法

まず、本課題で提案する技術の基本原則について述べる。いま、図3に示すようにカメラとプロジェクタが配置されており、その前面に前後に移動する平板が配置されているシーンを考える。このとき、配置されたプロジェクタからは、図中に示されるような時間的に高速に変化するパターンが投影されているものとする。このようなシーンにおいて、平板の移動に応じてカメラでの観測がどのように変化するかを考える。

まず、平板が静止している場合を考えると、プロジェクタとカメラの関係は変化しないため、平板上にはプロジェクタから照射された通りの画像が投影されることになる。ただし、プロジェクタから投影される画像がカメラの露光時間と比較して十分に高速に変動しているとすると、観測される値は一定の露光時間中に受光した光を積分することにより決定される。したがって、この場合の観測値は図中の(a)で示される範囲を積分したものと表すことができる。

次に、平板が前方向に移動した場合を考えると、プロジェクタと板の相対的な位置関係が変化することで、常に同一の位置を観測し続けた場合でも図3に示すように投影画像中の観測位置が左側に移動していくことになる。つまり、観測される値は図中(b)で示される範囲を積分したものとなる。同様に平板が後方に移動した場合は(c)に示す範囲が観測結果となる。以上のことは、時間的に変化するライトフィールドを投影することで、観測者が同一点を観測し続けた場合でも、シーンの運動状態によって観測結果が変化する、すなわち運動情報が視覚情報に変換可能であることを示している。よって、画像の投影速度が観測時間に比べて十分に高速である場合には、投影ライトフィールドを適切に設計することで、静止時と運動時に異なる映像を提示するなど、運動に応じた様々な視覚情報を提示することができる。

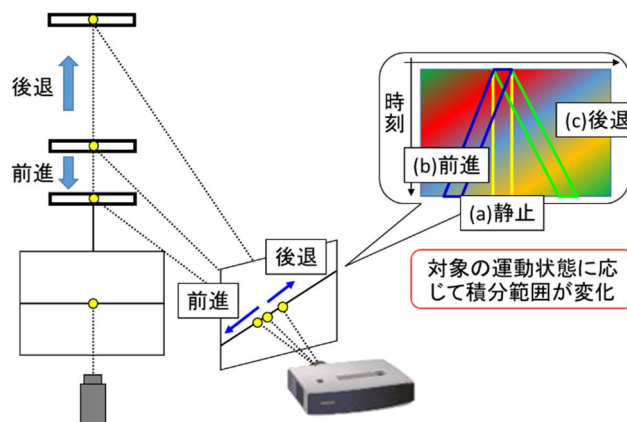


図3：運動情報可視化の基本原則

また、人間に対して情報提示を行うこと考慮し、人間の視覚特性を考慮した方法について検討を行う。これまでに述べてきた視覚化法では、観測結果が LF の一部分を積分したものと一致すると仮定している。このような仮定はカメラなどにおいては十分に妥当であるといえる。しかし、人間の視覚系においては残像（残効）と呼ばれる効果が確認されており、一瞬の光を観測した場合でもその効果が非線形に徐々に減少しながら一定時間持続することが知られている。このような場合、単純な積分のモデルではその観測を正確に記述することはできない。したがって、実際に人間に対して情報提示を行う場合には、観測者の視覚特性関数を考慮して投影 LF を決定する必要がある。このテーマではこのような人間の特性を考慮した投影 LF の決定方法について検討することで、提案システムを人間に対して直接的に適用可能とする方法について検討する。

4. 研究成果

(1) 運動情報可視化の基本原理解確立

まず、運動情報を可視化するための投影パターンの導出方法を確認するための検討を行った。この検討においては、投影パターンの導出にあたり人間の目ではなく、カメラなどの単純な特性を持つ観測系を対象として基礎検討を行った。その結果、カメラなどの単純な受光特性を持つデバイスに対しては適切に運動情報を可視化可能なパターンを導出することが可能であることを確認した。実際に、提案法を用いて投影パターンを導出し、運動情報の可視化を行った例を図 4、5 に示す。この結果は、図 4 (a) に示した 3 種類の画像を静止・前進・後進のそれぞれの場合に観測させることを目指して投影画像を導出している。図 5 の観測結果を見ると、運動の種類に応じて異なる映像が観測されていることを確認できる。しかし、このパターンを適切に利用するためには、カメラとプロジェクタの同期が重要であることが確認されたため、これについて検討を実施することにした。この詳細については(3)に記載する。また、このような投影を実施するためには当初の予定どおり通常のプロジェクタの投影速度よりも十分に高速なプロジェクタが必要とされることが明らかとなった。しかし、このような高速プロジェクタは現状では非常に高価であるため実用性の観点からこれらの使用を前提とすることは難しい。そのため、現在のプロジェクタで広く利用されている DLP に着目し、これを利用した方法について検討を行うこととした。これについての詳細は(2)で述べる。以上、当初の計画どおり、運動情報可視化のための基本技術が確立できた。

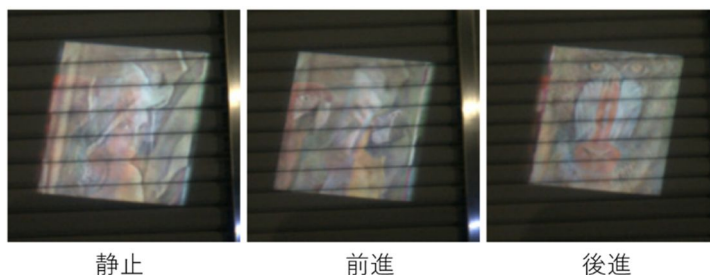


(a) 目標画像



(a) 導出された投影画像

図 4：目標画像と導出された投影画像



静止

前進

後進

図 5：投影画像の観測結果

(2) 2値情報投影による高速な投影による運動情報可視化技術の確立

先に示した成果により、適切な投影を行うことで、運動ごとに異なる画像を観測させることが可能であることを確認した。しかし、特に人間が肉眼で観測を行った際に適切に可視化を行うためには十分に高速な投影が必要であることが確認された。そのため高速投影を実現可能な DLP プロジェクタを用いた方法について検討を行った。この DLP プロジェクタは DLP と呼ばれる光の投影の ON/OFF を高速に制御可能なチップを用いて構成されており、様々なプロジェクタで利用されている。通常はこれを光の強さの制御に用いているが、これを提案法に利用することで、一般的なプロジェクタでも運動の可視化が可能になると考えられる。そのため、投影画像を 0, 1 のみで表現される 2 値画像とした場合の投影画像生成方法について検討した。その結果、十分に高速な画像投影を行える場合であれば、2 値画像を投影することでも、運動の可視化を実現可能であることを確認できた。2 値画像を用いた場合の投影結果を図 6 に示す。

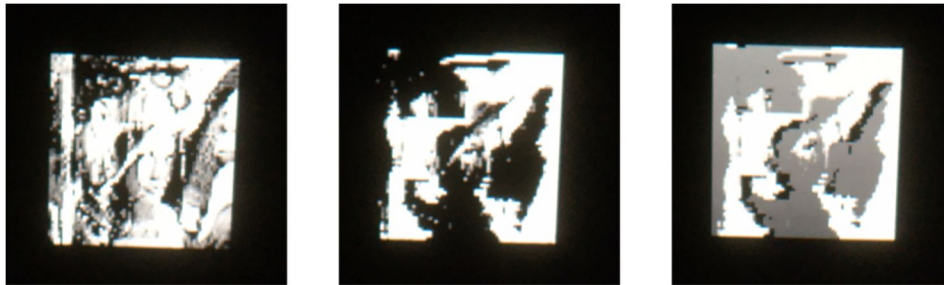


図 6 : 2 値化された投影画像の例

(3) 人間の視覚特性計測に関する検討の実施

上記の検討結果と並行して、人間の視覚系に対して適用を行う場合の問題点及び解決策について検討を実施した。上記のモデルは非常に単純な観測モデルに基づいて構成されており、人間を模擬した観測モデルとしては不十分である。そのため、人間の観測モデルに関する検討を実施した。視覚特性を考慮したパターン生成法については、これまでの研究で確認されている残効、明るさに対する非線形応答などの視覚特性を、パラメトリックに計測する方法について検討した。また、これらの計測された特性が、運動の可視化にどのような影響を与えるかについて確認した。その結果、これらのパラメタの推定を行いそれに基づくモデルを利用することで、単純な観測モデルを用いない場合についても観測結果を適切に予測可能であることを確認した。

(4) 非同期撮像系を考慮した画像投影の検討

これまでに述べてきた方法は全て観測系と表示系が同期していることを前提としている。しかし、人間が観測する場合を考慮すると投影系と観測系の同期を仮定することは難しい。そのため、非同期の投影・観測系についても情報提示可能な方法を検討した。その結果、画像の周期性を利用する方法と、全ての非同期パターンを考慮する方法の 2 通りの方法を検討・検証し、これらが有効であることを確認した。

(5) 実機を利用したデモ展示の試作

以上の研究結果を利用し、実際に図 7 に示す高速プロジェクタを用いて人間に観測するデモ系を構築した。このデモ系を用いて感性評価を実施し、運動を人間に見える形で可視化可能であることを確認した。以上により、提案法によって導出したパターンを対象に投影することで、人間を対象とした場合でも運動情報を可視化可能であることを確認した。



図 7 : デモ系に利用した高速プロジェクタ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 N. Takahashi, F. Sakaue and J. Sato
2. 発表標題 Modelling Reflections on Complex Microstructures for Multiplex Image Projection
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Image Technology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Akatsuka, F. Sakaue and J. Sato
2. 発表標題 Adaptive Image Projection onto Scattering Medium
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2022) (2022.1) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 J. Umetsu, F. Sakaue, J. Sato
2. 発表標題 Image Encoding Display and Decoding Observation based on Coded Aperture Considering Semantic Image Distance
3. 学会等名 International Joint Conference on Computer Vision, Theory and Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川口 真, 坂上文彦, 佐藤 淳
2. 発表標題 視覚の時間積分特性および時間応答特性に基づく多重画像提示
3. 学会等名 情報処理学会 第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F. Sakaue, J. Sato
2. 発表標題 Active 3D Motion Visualization Based on Spatiotemporal Light-Ray Integration
3. 学会等名 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Watarai, F. Sakaue, J. Sato
2. 発表標題 Distance Measurement in Fog using Polarized ToF Camera
3. 学会等名 International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Suzuki, F. Sakaue, J. Sato
2. 発表標題 Depth Recovery from Non-uniform Haze Image
3. 学会等名 International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梅津潤也, 坂上文彦, 佐藤淳
2. 発表標題 時空間符号化画像提示と復号観測
3. 学会等名 第23回 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2020)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	佐藤 淳 (Sato Jun) (20303688)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (13903)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------