

論文内容の要旨

博士論文題目

重力場での光線追跡に基づくブラックホール時空の可視化に関する研究

氏名 佐藤 哲

(論文内容の要旨)

通常環境では目に見えない、あるいは理解が難しい物理現象をコンピュータグラフィックス技術により視覚的に提示する技術分野に科学的可視化がある。本研究は、ブラックホールが存在する時空を対象として、重力場により歪んだ空間の様子を直感的に分かりやすく表現するための新しい画像生成手法を提案している。現実の物理現象をコンピュータグラフィックスによって可視化する場合には光線追跡法が使用されることが多いが、ブラックホール時空では光線が直進するとは限らないため、直線の方程式を用いる通常の光線追跡法は適用できない。そこで、本論文では、曲進する光線の記述に基づく新たな光線追跡法を提案し、いくつかの典型的なブラックホール時空の可視化によってその有効性を示している。本論文は以下の5章から構成されている。

第1章では、科学的可視化研究を概観し、相対論的世界の可視化における問題を明らかにするとともに、本研究の背景と目的及び具体的なアプローチについて述べている。

第2章では、従来の光線追跡法を曲進する光線にも対応可能となるように自然に拡張した重力場光線追跡法について考察している。光線の軌跡を測地線の微分方程式で表現する重力場光線追跡法は、自然界の光線に限らずあらゆる曲線に応じたコンピュータグラフィックスを作成可能であるが、計算量の多さと計算誤差の蓄積が問題であることを指摘している。

第3章では、重力場光線追跡法をブラックホール時空に特化させたシンプレクティック・レイトレーシング法を提案している。提案手法は、光線を測地線の微分方程式で表される曲線ではなく、ハミルトニアンに支配される力学系として扱うため、重力場光線追跡法に比べ、計算量や結果の正確さの面で優れている。シンプレクティック・レイトレーシング法はハミルトニアンが存在しない時空には適用不可能であり、重力場光線追跡法と完全に同等の手法ではないが、本研究で可視化対象とするブラックホールに対してはハミルトニアンが存在することを示している。

第4章では、可視化対象を球対称なブラックホール時空に限定することによって、高速な光線追跡を可能とする陽的シンプレクティック・レイトレーシング法を提案している。前章で提案した汎用的なシンプレクティック・レイトレーシング法は1ステップの光線追跡のために非線型連立方程式を解かなければならないが、陽的シンプレクティック・レイトレーシング法ではその必要がないため、高速描画が可能である。様々な可視化結果を示すことで、提案手法が、重力レンズ効果等のブラックホールの典型的な現象の理解に役立つことを確認している。

最後に第5章では、本研究の総括として、得られた成果に対する考察と今後の展望について述べている。

氏名	佐藤 哲
----	------

(論文審査結果の要旨)

本論文は、科学的可視化の分野において、理論的な取扱いの難しさから研究事例の少なかつたブラックホール時空の可視化法について述べている。ブラックホール時空を描画するために、従来から、曲進する光線の軌跡を測地線の微分方程式で表現する重力場光線追跡法が考えられていたが、計算量の多さと長時間に渡る光線の追跡における計算誤差の蓄積が問題であった。この問題を解決するために、本研究では、光線の軌道計算にハミルトンの正準方程式を用いる、新たな光線追跡法を開発している。本論文の成果は以下の3点に要約される。

1. ブラックホール時空での曲進する光線の軌道計算にハミルトンの正準方程式を用いることによって、数値的な局所誤差の蓄積を抑えるシンプレクティック数値解析の手法を用いることができることを利用して、シンプレクティック・レイトレーシング法を提案している。本手法ではハミルトニアンが存在が前提となるが、本研究で対象とするブラックホールに関してはハミルトニアンが存在することが示されている。

2. シンプレクティック・レイトレーシングは光線の軌道計算における誤差の蓄積を抑えることができるが、陰的な数値解法を用いているために計算量の問題は解決できていない。そこで、次に、陽的な解法を導出することによって、より高速な描画が可能な、陽的シンプレクティック・レイトレーシング法を開発し、比較実験によって有効性を検証している。ただし、現状では、陽的シンプレクティック・レイトレーシングを適用できるのは球対称ブラックホールに限定されている。

3. 本研究で開発した光線追跡法を用いてブラックホール時空を描画することによって、重力レンズ効果、赤方偏位現象、入れ子宇宙現象等の典型的な現象を実際に可視化し、ブラックホール時空の理解に新たな方法論を提供している。

以上述べたように、本論文では、相対論に支配されるブラックホール時空の可視化のために新たな光線追跡法を提案し、その有効性を実験的に検証している。本研究は、科学的可視化の中で、ブラックホールを対象とした先駆的な研究として評価でき、学術、実用の両面での貢献を認めることができる。なお、本論文の主要部分に相当する内容は、学会論文誌、査読付国際会議等で公表されている。また、本論文内容の一部の発表に対して情報処理学会全国大会奨励賞を授与されている。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。