

超高速イメージングゲート

安井 武史, 美濃島 薫*

大阪大学大学院 基礎工学研究科 (〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町1-3)

*産業技術総合研究所 計測標準研究部門 (〒305-8563 茨城県つくば市梅園1-1-1)

Ultrafast Time-Resolved Imaging Gate

Takeshi YASUI and Kaoru MINOSHIMA*

Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531

*National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8563

(Received April 30, 2003)

Ultrafast time-resolved imaging gate provides interesting tools for observation of ultrafast phenomena, three-dimensional shape measurements, and biomedical imaging. In this paper, various time-resolved gating techniques based on electronic methods, coherence of light, or optical nonlinear effects are reviewed with regard to potential of time-resolved imaging. As a highly functional time-resolved imaging gate with femtosecond gating time and light amplification, we present here a femtosecond amplifying optical Kerr gate, which is realized by the optical Kerr effect in an excited state with light amplification and two perpendicularly polarized pump pulses with time delay. Furthermore, to evaluate its potential of practical application, we demonstrate three-dimensional shape measurements of a colored transparent object and a diffusing object with use of the femtosecond amplifying optical Kerr gate.

Key Words: Time-resolved gate, Time-resolved imaging, Femtosecond laser, Optical nonlinear effect, Optical Kerr gate

1. はじめに

時々刻々と変化する過渡現象をコマ撮り写真のようにイメージング測定することを時間分解イメージングという。例えば身近な例として、プロ野球選手のバット・スイングのコマ撮り写真があるが、この場合の時間分解能はカメラのシャッター速度に依存し、たかだかサブミリ秒オーダーである。もしこのような時間分解イメージング技術をピコ秒～フェムト秒の超高速時間領域まで拡大できると、様々な分野への応用が期待できる。このような超高速性に対応するためには、超高速光技術あるいは電気技術の助けが必要となる。特に、近年、超短パルスレーザー光源に代表される超高速光技術の著しい進歩により、超高速時間分解イメージング技術は重要な計測ツールとして強く求められている。時間分解ゲート法は時間分解測定を実現するための1つの手段であるが、それらの中で超高速時間分解イメージング計測への応用を意図したものを特に超高速イメージングゲートと言う。超高速イメージングゲートには、時間ゲート特性とイメージング特性はもちろんのこと、(信号取得の)高いエネルギー効率、多次元性、実時間性、広帯域性といった機能性も用途に応じて求められるため、多種多様な超高速イ

メージングゲート技術がこれまでに報告されている。

超高速イメージングゲートの応用面に目を向けると、最も直接的な応用例が超高速現象の観測である。例えば、レーザープラズマ発生過程¹⁾や光パルス伝搬²⁾等の超高速過渡現象が『ピコ秒のコマ撮り写真』で撮影されている。

光の伝搬速度(光速)が高精度に決定されていることに注目すると、光速を介して空間軸情報を時間軸上に展開することが可能となる。すなわち、超短パルス光の飛行時間からその伝搬距離を測定できる(飛行時間法)。このような飛行時間法を超高速2次元イメージングゲートで実現することにより、物体の3次元形状測定が可能となる。これまでに、光透過物体³⁾や粗面物体⁴⁾の3次元形状測定が報告されている。また、周波数チャープ光を用いることにより時間軸走査も省略した、3次元形状瞬時測定法も提案されている⁵⁾。

一方、生体光計測も超高速イメージングゲートの重要な応用分野の1つである。光計測は、人間に対する侵襲性が高いX線診断と異なり、低侵襲で高空間分解・高速な測定が可能であることから、X線に代わる生体診断手段として期待されてきた。しかし、実際の生体は光に対して強い散乱媒質であるため、光が生体組織内で激しい散乱の影響を受ける。したがって、生体光計測では生体組織

内を伝搬する光の大部分を占める散乱光の取り扱いが問題となる。散乱光に対するアプローチとしては、散乱光を積極的に利用する手法(光トポグラフィー⁶⁾、レーザードップラー血流計⁷⁾他)と多重散乱光を除去して微弱な前方直進光や前方散乱光を抽出する手法(光コヒーレンストモグラフィー⁸⁾、光マンモグラフィー^{9, 10)}他)に大別できる。後者のいわゆる多重散乱光除去型生体イメージングを実現する1つの有力な手法が、超高速イメージングゲートである(原理は後述)。以下で紹介する時間分解ゲート技術の多くは、この多重散乱光除去型生体イメージングへの応用を意図したものである。

このように、超高速イメージングゲート法は超高速光技術を様々な応用計測分野で利用する場合に有力な手段を提供する。本解説では、様々な時間分解ゲート技術を超高速イメージングゲートという視点から概観した後、我々が開発したフェムト秒増幅光カーゲートを用いた3次元形状計測への応用について紹介する。

2. 時間分解ゲート法

最初に、多重散乱光除去を例にとって時間分解ゲート法の原理を簡単に説明する¹¹⁾。散乱体内部にある光学的な情報を計測する場合、情報が多重散乱によって積分され埋もれてしまい、そのままでは取り出せない。しかし、超短パルス光を散乱体に入射した場合、Fig. 1に示すように、多重散乱光は前方直進光やスネーク光(前方散乱光)に比べて実効的な光路長が長くなるため到達時間が遅れる。その結果、散乱体を通過した後の時間波形は、前方直進光、スネーク光、多重散乱光が時間的に分離されて分布することになる。したがって、生体組織の直接的な光学情報を有している前方直進光やスネーク光を時間的に切り出して測定することにより、多重散乱光の影響を除去し散乱体中の光学的情報を回復することができる。このような手法を時間分解ゲート法と呼ぶ。

2.1 電気ゲート法

超高速光信号を電気信号に変換した後に電気的処理によって時間的な切り出しを行う。

2.1.1 時間相関単一光子計数法¹²⁾

時間相関単一光子計数法に基づき、光信号を高感度・高時間分解能で電気信号に変換した後、電気的に時間

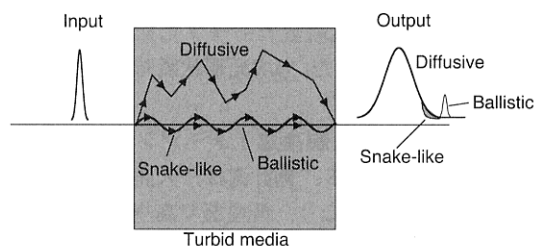


Fig. 1 Schematic of ballistic, snake-like, and diffusive signals of ultrashort pulse light propagating through a turbid medium.¹¹⁾

ゲートかける。光子レベルの微弱光信号が検出可能という特徴を有するが、電気的信号処理に起因するゲート時間の制限(数10ピコ秒オーダー)、点計測、長い測定時間といった問題点がある。

2.1.2 ストリークカメラ¹³⁾

入射光を電子に変換した後、ストリーク管で高速掃引することにより、光信号の時間変化を空間に展開して検出する。サブピコ秒からピコ秒のゲート時間が高繰り返しで可能な上に、検出器の2次元性を利用すると、時間軸以外の1次元を利用して1次元イメージング測定や分光測定¹⁴⁾を複合化できる。原理的には1ショット測定も可能であるが、実際には測定感度の制限から積算が必要である。2次元イメージ測定のためには1軸または2軸の走査が必要である。

2.2 コヒーレンスゲート法

上述の多重散乱光除去において、光のコヒーレンス性(時間的コヒーレンス、空間的コヒーレンス)に注目すると、前方直進光やスネーク光は入射光のコヒーレンスを維持しているが、多重散乱光は散乱によりコヒーレンスを失う。したがって、このコヒーレンスの有無を利用して時間分解ゲート法を実現することができる。このような手法をコヒーレンスゲートと言う。

2.2.1 空間フィルタリング¹⁵⁾

光が多重散乱により空間的コヒーレンスを失うことを利用する。散乱体を伝搬したレーザー光をレンズで集光した場合、前方直進光は点に絞れるが多重散乱光は散乱の度合いに応じて焦点面(フーリエ面)内に拡がって分布するので、焦点で空間フィルタリングすることにより多重散乱光を除去できる。レンズと絞りのみの単純な光学配置で実現可能であるが、時間情報を利用できないため、他の時間分解ゲート法(例えば、低コヒーレンス干渉や光カーゲート)と組み合わせて使われることもある。なお、空間フィルタリングは超高速イメージングゲートの範疇には入らないが、光のコヒーレンスにより多重散乱光を除去可能であることと、他の時間分解ゲート法との複合が可能であることから、ここで紹介した。

2.2.2 低コヒーレンス干渉⁸⁾

低コヒーレンス光源を用いたマイケルソン干渉計において、干渉による空間的コヒーレンスゲートが多重散乱光を除去すると同時に、低コヒーレンス光による時間的コヒーレンスゲートが計測に時間選択性を持たせている(例えば、50フェムト秒の時間ゲートが15 μm の距離分解能に相当)。ゲート幅は光源のコヒーレンス長によって決定される。高感度や優れた深さ分解能が特色である。またファイバー光学系(空間フィルタリングの効果もある)との整合性がよく、実用的拡張性に優れている。点計測であるため複数軸の走査機構が必要となり実時間性が問題とされてきたが、最近では高速走査機構の開発¹⁶⁾や2次元イメージングデバイスを用いた2次元測定化¹⁷⁾により、そ

のような制限が緩和されつつある。また、分光計測¹⁸⁾、偏光計測¹⁹⁾、血流計測²⁰⁾等を複合させた多機能化への試みも活発に行われている。

2.2.3 パルス・ホログラフィー²¹⁾

低コヒーレンス干渉と同様な原理であるが、ホログラム記録により2次元イメージング性を実現している。無走査で2次元的な画像情報の時間分解ゲート(2次元イメージングゲート)としての使用が可能であり、高い空間分解能(μm オーダー)を有する。時間ゲート幅はパルス幅(ピコ秒からサブピコ秒)によって決定される。ホログラム記録、露光処理、読み出し処理のための手間が必要である。記録媒体としてCCDカメラを用いた電子ホログラフィー²²⁾では、空間分解能は劣るものの、上記の処理をコンピュータで行うことによりその手間を省略できるだけでなく、検出感度の向上、積算によるSN比向上、生体スペックル除去といった機能を付加できる。

2.3 非線形ゲート法

非線形光学効果を用いることにより、光領域で時間的な切り出しを行う。光のコヒーレンス性を利用しないため、インコヒーレンスゲートと呼ばれることもある。特徴は非線形光学効果によって実現される多次元性と多機能性にある。非線形光学効果を効率的に起こすための超短パルスレーザーやレーザー増幅器が必要であるが、最近では安定かつ汎用的な光源が市販されている。

2.3.1 高調波発生²³⁾

非線形ゲートの中で最も基本的かつ汎用的な時間ゲートであり、超短パルス光のパルス幅測定に用いられる自己相関測定技術を応用する。ゲート時間はパルス幅に依存し、無走査の2次元イメージングゲートとしての使用も可能である²⁴⁾。また、バックグラウンドフリーのため高感度化が容易である。高調波発生では位相整合が必要であり、その角度依存性は異なった波数ベクトルを持つ多重散乱光を除去する空間的ゲートとして機能する一方で、空間分解能も制限する。また、位相整合条件の波長依存性が波長帯域を制限する。

2.3.2 誘導ラマン増幅^{25, 26)}

誘導ラマン増幅を利用した時間ゲートで、ポンプパルス光によって瞬時的にストークス光をラマン増幅することにより、ピコ秒時間ゲートと同時に光増幅(ゲイン $\sim 10^6$)を実現する²⁵⁾。2次元イメージ測定も可能であるが、細長い水素気体セル(長さ1m)にストークス光とポンプ光を入射して誘導ラマン増幅を行うため、空間分解能やイメージエリアが制限される²⁶⁾。

2.3.3 光パラメトリック増幅^{27, 28)}

非共直線型光パラメトリック増幅を用いた光増幅型時間ゲートで、ゲート時間はパルス幅に依存しピコ秒²⁷⁾からフェムト秒²⁸⁾が可能である。非共直線型位相整合によって実現されるため、2次元イメージングや広帯域化に対する

制限が緩やかであり、ピコ秒時間分解分光イメージング²⁷⁾も報告されている。

2.3.4 光カーゲート¹¹⁾

光カー効果を用いた光カーゲート(OKG)は、バックグラウンドフリーであるため高感度化が可能であると同時に、位相整合条件を必要としないため広帯域化や2次元イメージングゲートの高空間分解能化が可能である。時間ゲート幅は利用する光カー効果に依存し、配向分極を用いたピコ秒ゲート、電子分極を用いたフェムト秒ゲートが可能である。OKGでは低いエネルギー効率の問題とされてきたが、光増幅の機能を複合したピコ秒増幅OKG^{29, 30)}やフェムト秒増幅OKG³¹⁾も報告されている。

3. フェムト秒増幅OKG

上述したように、位相整合が不要なOKGは超高速イメージングゲートとして魅力的な性質を有している一方で、低いエネルギー効率が応用計測に対する制限となっていた。OKGをはじめとした非線形ゲートにおいては、非線形光学デバイス一般の抱える、高速性と高効率性の両立が困難という問題点がある。このトレードオフの関係を解消するために様々な取り組みが行われているが、OKGに関しては、ピコ秒においてボルドー大学のグループが行った試みが発展性の観点から興味深い^{29, 30)}。すなわち、レーザー色素を光カー媒質として用いて光増幅を得たうえで、励起光に2つの直交偏光パルスを用いて長寿命成分を差し引くというものである。このようなOKG技術をフェムト秒領域まで拡大することが強く望まれるが、フェムト秒領域で利用可能な非線形光学効果の制限から高速性と高効率性の両立に対する制限はさらに厳しくなる。また、2次元イメージングゲートとしての応用も興味深いが、現在までにそのような観点からの取り組みはなされていない。

筆者らは、上記手法をフェムト秒領域まで拡張したフェムト秒増幅OKGをボルドー大学と共同で開発し³¹⁾、超高速イメージングゲートとしての応用に関する研究を行ってきた^{3, 4, 32)}。ここでは、フェムト秒増幅OKGの原理、基本特性、及び3次元形状計測への応用について紹介する。

3.1 原理

ここでは、従来のOKGとの違いに注目しながら、フェムト秒増幅OKGの動作原理を説明する。Fig. 2はOKGの典型的な実験配置図を示しており、クロスニコル配置された偏光子・検光子ペア及びレンズペアの間に光カー媒質が配置されている。物体からのプローブ光は偏光子で直線偏光にされた後、レンズでカー媒質に集光される。一方、OKGを開くゲートパルス光もレンズで集光され、カー媒質内でプローブ光と空間的に重ね合わせられる。等方性の光カー媒質が直交する偏光子と検光子に挟まれているため、定常状態ではプローブ光はOKGを通過しない。しかしゲートパルス光によって光カー媒質内に光

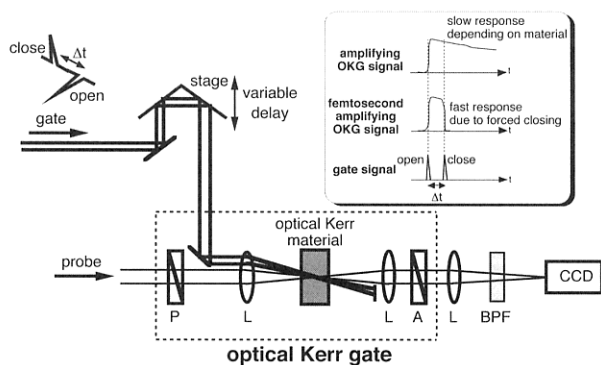


Fig. 2 Experimental setup of femtosecond amplifying OKG for ultrafast time-resolved two-dimensional imaging. P: polarizer, L: lens, A: analyzer, BPF: bandpass filter, CCD: charge-coupled device camera. Inset shows temporal behavior of femtosecond amplifying OKG signal and gate signal.

カー効果が誘起されると、光カー媒質は一時的に異方性を生じる。その結果、プローブ光は瞬時的に検光子を通過することができ、時間分解ゲートが実現できる。このような従来OKGのゲート時間は光カー効果の持続時間(緩和時間)によって決まり、電子分極の場合フェムト秒オーダー、配向分極の場合ピコ秒オーダーの時間ゲートが可能である。一方、エネルギー効率はカー媒質の非共鳴実部の $\chi^{(3)}$ (三次の非線形感受率)に依存するため、一般的にかなり小さい。

そこでエネルギー効率を向上させるため、フェムト秒増幅OKGでは光増幅と光カー効果を併せ持つ物質を光カー媒質(ここではピリジン系レーザー色素のアセトニトリル溶液)として用いる。ここで、ゲートパルス光として色素に吸収のある波長の増幅フェムト秒パルスレーザー光(フェムト秒チタン・サファイアレーザー再生増幅器の第2高調波発生光, 中心波長395 nm, パルス幅100 fs, パルスエネルギー15 μ J, 繰返し100 Hz)を照射すると、ゲートパルス光の偏光方向に選択的に色素分子が励起され、誘起された異方性がOKGを開くと共に誘導放出による光増幅が得られる。この場合には最大で6000 %という大きな増幅率が得られたが、ゲートパルス光パワーの増大に伴い飽和傾向を示した。しかしそのままでは、異方性の解消には励起状態の緩和と色素分子の再配向緩和を待つしかないため、プローブ光もナノ秒程度の時間連続して出力し続けることになり、フェムト秒の時間ゲート機能は得られない(Fig. 2の挿入図上段)。

比較的遅い応答を示すレーザー色素でフェムト秒ゲートを実現するためには、直交偏光しかつ時間遅延($\Delta t = 220$ fs)を有するダブルパルス光をゲートパルス光として用いる。これを共にレーザー色素に照射すると、第1のパルスによってレーザー色素に異方性と増幅が与えられ、プローブ光は増幅されると共にOKGが開かれる。そこに直交する第2のパルスが到達すると、レーザー色素に直交する異方性が与えられ、総和として異方性がキャンセルされる。その結果、ゲートが強制的に閉じられる(Fig. 2の挿入図中段)。すなわち、第1パルスをオープニングパルス

ス、第2パルスをクロージングパルスとして用いることにより(Fig. 2の挿入図下段)、光カー媒質の緩和時間に依存しない高速なゲートを実現することが出来る。

プローブ光には、水の自己位相変調によって発生した白色コンティニューム光($\lambda = 350 \sim 900$ nm)を用いる。サンプルを透過(あるいは反射)したプローブ光は結像光学系を経てOKGに導かれ、光カー媒質内で結像される。ゲートパルス光(スポット径 = 200 μ m)をプローブ光の結像面で空間的に重ね合わせるにより、2次元イメージングゲートを構成する。光増幅かつ時間的に切り出されたプローブ光イメージは、バンドパスフィルターを経て、最終的にCCDカメラ上に結像される。ゲートパルス光の時間遅延を調節することにより、様々なタイミングでの時間分解2次元イメージを測定することが出来る。また、バンドパスフィルターの波長選択により、任意の分光イメージを得ることが可能である。

3.2 基本特性

3.2.1 時間特性及びスペクトル特性

Fig. 3はフェムト秒増幅OKGの時間特性を示している。10回の繰返し測定に対し、ゲート時間は 459 ± 28 fs(平均値 $\pm$ 標準偏差)で、透過率ピークの統計的変動は28 fs(標準偏差)が得られた。一方、ピーク透過率は185 %で、ピコ秒領域の代表的な光カー媒質である二硫化炭素でさえ同条件で透過率7 %であり、フェムト秒ゲートを与える光カー媒質ではさらに透過率が低下することを考えると非常に高い効率であると言える。またゲート・クロージングが5 %以下と非常に優れていることも本手法の特徴であり、イメージングゲートとして使用した場合には切れの鋭い時間分解イメージを得ることが出来る。

遷移スペクトル特性に関しては、色素溶液の増幅帯に相当したスペクトル帯域幅(50 nm)が全ての遅延時間において得られている。このような特性は、時間分解分光イメージングに有効である。

3.2.2 イメージング特性

非線形光学効果を用いた時間分解ゲートを2次元イメージングゲートとして利用する場合、複数の非線形光学効果の競合、飽和効果、ゲートパルス光の空間的形状や不均一性がイメージング性能の劣化につながる可能性がある。そこで、テストターゲットを用いて、本システムの

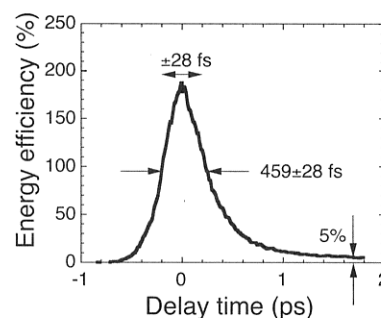


Fig. 3 Temporal behavior of femtosecond amplifying OKG signal.

横分解能の評価を行った。Fig. 4は、時間分解イメージングにおける空間周波数(空間分解能)とイメージコントラストの関係を示している。比較のため、OKGのない参照イメージのコントラスト特性も併せて示している。サンプルからのプローブ光にマクロ光学系を導入した場合、空間分解能 $70\mu\text{m}$ まで時間分解イメージと参照イメージのコントラストカーブに有為な相違は見られなかった。次に、顕微対物レンズ(20倍, $\text{NA}=0.4$)を用いたミクロ光学系で同様の実験を行ったところ、テストターゲットの最小パターンである空間分解能 $5.5\mu\text{m}$ においても時間分解イメージの有為な劣化は認められず、十分に高いコントラスト($=0.72$)が得られた。そこで、本システムの横分解能の限界を評価するため、さらに高い空間周波数パターンを有するロンキールーリング(空間周波数 $=600\text{ line/mm}$, 空間分解能 $=1.7\mu\text{m}$)の時間分解イメージング測定を行った。ここでは、60倍($\text{NA}=0.85$)の顕微対物レンズを用いた。ロンキールーリングの参照イメージと時間分解イメージをFig. 5に示す。時間分解イメージの画質(コントラスト $=0.13$)は参照イメージ(コントラスト $=0.48$)に比べると劣っているが、 $1.7\mu\text{m}$ のパターンが確認できる。時間分解イメージにおけるわずかなパターンの歪曲と明るさの不均一性は、ゲートパルス光の空間モード分布に依存した不均一な非線形光学効果(光カー効果, 光増幅)によるものであると考えられる。このように、フェムト秒増幅OKGが、フェムト秒の時間分解能、および光増幅の機能を持ちながら、 μm レベルの高分解能な画像計測に適用可能な超高速2次元イメージングゲートであることが確認

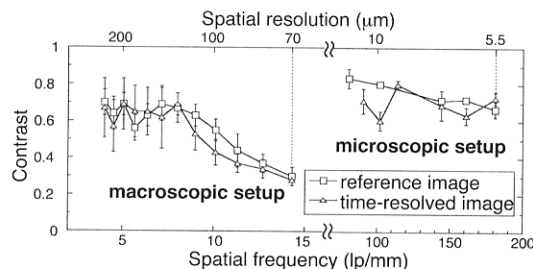


Fig. 4 Transverse imaging resolution of the proposed system. Contrast curve of the time-resolved image is compared with that of the reference image without OKG with regard to spatial frequency. Line is a guide for the eye.

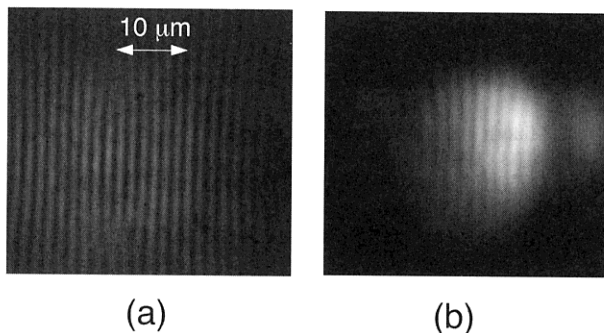


Fig. 5 (a) Reference image without OKG and (b) time-resolved images of the Ronchi ruling (600 line/mm). Interval between the patterns is 1.7 mm.

できた。

このような2次元イメージングゲートを飛行時間法による3次元形状計測に適用した場合、奥行き空間特性(位置決め精度, 奥行き分解能)はゲートの時間特性によって決定される。例えば、プローブ光をサンプルに対して 45° 入射角で照射し、その反射光を測定するようなプローブ光学系の場合、時間空間変換は空間情報 $=$ 時間情報 $\times$ 光速 $\times \cos 45^\circ$ で与えられる。したがって位置決め精度は、Fig. 3における透過率ピークの統計的変動(28 fs)より、 $5.9\mu\text{m}$ である。一方、奥行き分解能は、多層構造の場合や、処理することなく一枚のイメージの中で奥行きの異なる部分を完全に分解できる限界であり、ゲート時間(459 fs)より $97\mu\text{m}$ である。異なる時間における時間分解イメージの単純な差引などの画像処理を用いれば奥行き分解能以上の情報が得られ、最終的には位置決め精度が限界となる。

3.3 3次元形状測定への応用

3.3.1 光透過物体(時間分解分光イメージング)

光学的生体イメージングを実現する有力な手段が、超高速イメージングゲートであることは既に述べた。一方、生体組織の分光特性は付加価値の高い情報を与えることから、生体イメージングに分光計測を複合できると、さらに有用な情報を得ることができる。そのような生体分光イメージングを実現するためには、広帯域スペクトル特性を有する超高速イメージングゲートによる時間分解分光イメージングが有効であると考えられる。ここでは、フェムト秒増幅OKGを用いた時間分解分光イメージングの応用例として、分光特性の異なる光透過物体の3次元形状測定を紹介する。

Fig. 6(a)は測定サンプルを示しており、2つのテストパターン(7.63 lp/mm, 10.1 lp/mm)に分光特性の異なる赤外光透過フィルター($>695\text{ nm}$, 3 mm厚)と赤外光遮断フィルター($<700\text{ nm}$, 1.1 mm厚)がそれぞれ取り付けられている。Fig. 6(b)は時間分解イメージを示しており、左列と右列はそれぞれ725 nmと670 nmのバンドパスフィルター(バンド幅はいずれも10 nm)で分光された後、CCDカメラで測定されている。また、最上段はOKGが無い場合の参照イメージである。時間遅延の原点は、725 nm時間分解イメージでの最大信号強度に設定している。IRカットフィルターの時間分解イメージ(右列, 670 nm)がIRパスフィルター(左列, 725 nm)に対して3.2 psだけ時間遅延していることが分かる。この値は、フィルター厚さと白色プローブ光のチャープの影響を考慮した値(3.14 ps)とよく一致している。このように、フェムト秒増幅OKGの広帯域特性を利用することにより、時間情報と分光情報を分離したイメージング測定が可能になる。

3.3.2 粗面物体

工業計測を始めとした実用計測においては、実際の測定対象が必ずしも光計測にとって理想的な条件(例えば、鏡面性や透過性)を有しているとは限らない。むしろ、不透明で光を拡散反射するような物体が一般的である。そこで、ここでは実用計測において重要と考えられる不透

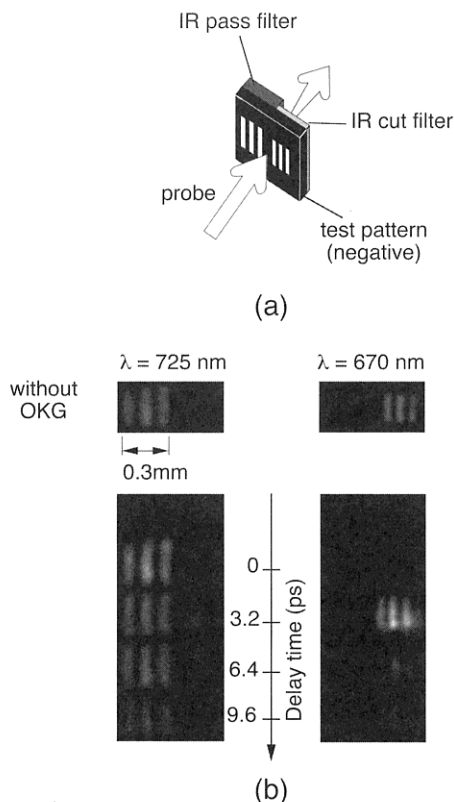


Fig. 6 Time-resolved spectroscopic imaging of colored transparent object. (a) Schematic view of sample and (b) temporal evolution of the two images obtained with the femtosecond amplifying OKG at 725 and 670 nm.

明な粗面物体の3次元形状測定を紹介する。

サンプルは、Fig. 7(a)に示すようなハート型の曲面形状を有する粗面物体である。プローブ光(ビーム径1mm)は、45度の入射角で、ハート型粗面物体の根元部分に照射される。粗面曲面による拡散反射とプローブ結像光学系の低NAにより、光カー媒質に到達するプローブ光は入射光の0.01%まで減少しているため、高感度検出が要求される。ここでは、時間遅延を0.67 ps毎に変化させながら、連続して5枚の時間分解イメージを測定した。連続した2枚の時間分解イメージの差分を取った後、2値化したバイナリイメージをFig. 7(b)に示す。サンプルの3次元の曲面形状に対応して、連続的にイメージが変化している様子が分かる。これらのイメージに基づいて粗面曲面サンプルの3次元形状を再構成したものがFig. 7(c)である。今回は時間遅延の走査が粗いため十分な深さ分解能は得られていないが、さらに細かい時間遅延ステップで測定を行うことにより高精度な3次元形状測定が可能になる。このように、フェムト秒増幅OKGの超短ゲート時間と高感度性を利用することにより、曲面形状を有する粗面物体の3次元形状測定も可能である。

4. まとめ

近年、超短パルスレーザー光源の安定化及び汎用化が進み、超高速光技術の裾野が研究レベルから実用応用レ

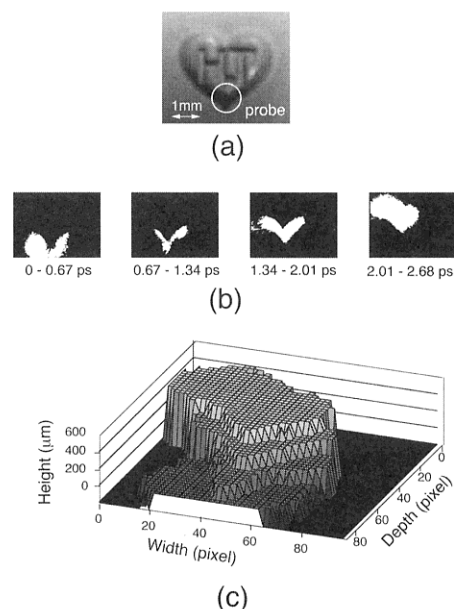


Fig. 7 (a) Sample with spherical diffusing surface, (b) successive differences of the time-resolved images at every delay times of 0.67 ps and (c) 3D shape of spherical diffusing surface. The probe beam of 1 mm diameter is incident at base of the heart-shaped object.

ベルへと急速に拡がりつつある。ここで紹介した超高速イメージングゲートは、超高速現象の観測、3次元形状測定、生体イメージングをはじめとした実用計測を超高速光技術によって実現するための重要な計測ツールである。これまでに電氣的及び光学的手法による様々な時間分解ゲート法が提案されているが、特に非線形光学効果を用いた超高速イメージングゲートは、多次元性と多機能性という点で魅力的な特性を有しており興味深い。また、超高速イメージングゲートの実用計測への応用例として、我々が開発したフェムト秒増幅OKGを用いた3次元形状測定を紹介し、実用計測への可能性を示した。今後、超高速イメージングゲート技術のさらなる発展と共に、積極的な実用計測への応用が期待される。

参考文献

- 1) D. T. Attwood, L. W. Coleman, and D. W. Sweeney: Appl. Phys. Lett. **26** (1975) 616.
- 2) M. A. Duguay and A. T. Mattick: Appl. Opt. **10** (1971) 2162.
- 3) K. Minoshima, T. Yasui, E. Abraham, H. Matsumoto, G. Jonusauskas, and C. Rullière: Opt. Eng. **38** (1999) 1758.
- 4) T. Yasui, K. Minoshima, and H. Matsumoto: Appl. Opt. **39** (2000) 65.
- 5) K. Minoshima, H. Matsumoto, Z. Zhang, and T. Yagi: Jpn. J. Appl. Phys. **33** (1994) L1348.
- 6) A. Maki, Y. Yamashita, Y. Ito, E. Watanabe, and H. Koizumi: Med. Phys. **22** (1995) 1997.
- 7) C. Riva, B. Ross, and G. B. Benedek: Invest. Ophthalmol. **11** (1972) 936.
- 8) D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito, and J. G. Fujimoto: Science **254** (1991) 1178.
- 9) G. Mitic, J. Kölzer, J. Otto, E. Plies, G. Sölkner, and W. Zinth: Appl. Opt. **33** (1994) 6699.
- 10) B. B. Das, K. M. Yoo, and R. R. Alfano: Opt. Lett. **18** (1993) 1092.

- 11) L. Wang, P. P. Ho, C. Liu, G. Zhang, and R. R. Alfano: *Science* **253** (1991) 769.
- 12) S. Anderson-Engels, R. Berg, S. Svanberg, and O. Jarlman: *Opt. Lett.* **15** (1990) 1179.
- 13) J. C. Hebden, R. A. Kruger, and K. S. Wong: *Appl. Opt.* **30** (1991) 788.
- 14) S. Andersson-Engels, R. Berg, A. Persson, and S. Svanberg: *Opt. Lett.* **18** (1993) 1697.
- 15) B. C. Wilson, T. J. Farrell, and M. S. Patterson: *SPIE Inst. Ser.* **IS-6** (1990) 219.
- 16) G. J. Tearney, B. E. Bouma, S. A. Boppart, B. Golubovic, E. A. Swanson, and J. G. Fujimoto: *Opt. Lett.* **21** (1996) 1408.
- 17) S. Bourquin, P. Seitz, and R. P. Salathé: *Opt. Lett.* **26** (2001) 512.
- 18) U. Morgner, W. Drexler, F. X. Krtner, X. D. Li, C. Pitris, E. P. Ippen, and J. G. Fujimoto: *Opt. Lett.* **25** (2000) 111.
- 19) J. F. de Boer, T. E. Milner, M. J. C. van Gemert, and J. S. Nelson: *Opt. Lett.* **22** (1997) 934.
- 20) X. J. Wang, T. E. Milner, and J. S. Nelson: *Opt. Lett.* **20** (1995) 1337.
- 21) N. Abramson: *Opt. Lett.* **3** (1978) 121.
- 22) H. Chen, Y. Chen, D. Dilworth, E. Leith, J. Lopez, and J. Valdmann: *Opt. Lett.* **16** (1991) 487.
- 23) J. G. Fujimoto, S. De Silvestri, E. P. Ippen, C. A. Puliafito, R. Margolis, and A. Oseroff: *Opt. Lett.* **11** (1986) 150.
- 24) C. Yan and J. C. Diels: *Appl. Opt.* **31** (1992) 6869.
- 25) M. D. Duncan, R. Mahon, L. L. Tankersley, and J. Reintjes: *Opt. Lett.* **16** (1991) 1868.
- 26) J. A. Moon, R. Mahon, M. D. Duncan, and J. Reintjes: *Opt. Lett.* **19** (1994) 1234.
- 27) F. Devaux and E. Lantz: *J. Opt. Soc. Am. B* **12** (1995) 2245.
- 28) C. Doulé, T. Lépine, P. Georges, A. Brun: *Opt. Lett.* **25** (2000) 353.
- 29) G. Jonusauskas, R. Gadonas, and C. Rullière: *Opt. Commun.* **112** (1994) 80.
- 30) G. Jonusauskas, J. Oberl, E. Abraham, and C. Rullière: *Opt. Commun.* **137** (1999) 199.
- 31) K. Minoshima, G. Jonusauskas, T. Yasui, E. Abraham, C. Rullière, and H. Matsumoto: *Abstracts of Fifth International Workshop on Femtosecond Technology*. Tsukuba, February, 1998, p.120.
- 32) T. Yasui, K. Minoshima, E. Abraham, and H. Matsumoto: *Appl. Opt.* **41** (2002) 5191.

レーザーワード

時間分解ゲート (time-resolved gate)

時々刻々と変化する高速過渡現象を時間分解測定するための手段。利用する手段により、超高速電気技術を用いた電気ゲート法、光のコヒーレンスを用いたコヒーレンスゲート法、非線形光学効果を用いた非線形ゲート法に大別できる。現在までに、最短でフェムト秒オーダー

のゲート時間幅が可能である。このような時間分解ゲートは、超高速現象のコマ撮り写真だけでなく、3次元形状測定や生体イメージングといった実用計測分野への応用も活発に試みられている。

(安井 武史)