

# ナノ秒パルスレーザーの3次元情報記録技術への応用

Nano-second pulsed laser application  
for 3-dimensional information recording technique

時田 大作 指導教員 渡辺 一弘 教授

## ABSTRACT

This paper describes a 3-dimensional information recording techniques using visible nano-second Nd:YAG laser. It is newly developed that personal identification method uses laser induced micro-crack which are created into transparent resin material as identification key. This method has remarkably high tolerance for counterfeiting, because of unreproducible ID key from complex and unique crack shapes. ID key is successfully identified by matching speckle pattern that is obtained by irradiating reference light to the crack. Feasible identification test module has been designed with relatively-small configuration, and its performance has been investigated from the aspect of positioning accuracy of ID key and pattern matching time. Additionally, identification accuracy is statistically evaluated with the same way of general biometric identifications. In this evaluation, false rejection rate (FRR) and false acceptance rate (FAR) have been discussed for 600 ID keys. Feasible performance of this method was shown by the key location accuracy of  $\pm 10 \mu\text{m}$ , the pattern matching time  $\leq 0.62$  second, and the high identification accuracy with  $\text{FRR} \leq 1\%$  and  $\text{FAR} \leq 0.0067\%$ . 3-dimensional memory has been approached for recording binary information by using micro-void array. In this method, information has been spatially recorded with layered void array in transparent resin material. Array of  $3 \sim 10 \mu\text{m}$  void is successfully created into polypropylene material as a result of processing experiment for various resin materials. From these results, novel nano-pulse laser application of information recording is indicated.

**Keywords:** Nano-second Nd:YAG laser, Micro crack, Void, Personal identification, 3-dimensional memory

## 1 序論

固体レーザーは最も歴史の古いレーザーであり、現在までに用途に応じた多種多様なレーザーが開発されてきた。それらの中でも特に、Nd:YAG レーザーは安定的に高出力が得られ、多様な形式の発振が可能であることから<sup>1)</sup>、溶接<sup>2)</sup>や切断<sup>3)</sup>、穴あけ<sup>4)</sup>などの工業用途や歯科治療などの医療分野<sup>5)</sup>において盛んな応用がなされている。また、ナノ秒パルス発振を用いることで透明部材内部に3次元構造を生成する内部加工技術が確立されているが、この技術は、ガラスなどへの内部マーキング<sup>6)</sup>や彫刻<sup>7)</sup>などの視覚効果を利用した応用にとどまっている。

本研究ではナノ秒パルスレーザーである Nd:YAG レーザーによる内部加工の新たな応用分野として、3次元情報記録技術への応用を試みた。本論文では、ランダムな形状を有する光学的損傷により識別情報を記録する個人認証手法<sup>8,9)</sup>と、均一な微小空泡によりバイナリ情報を記録する3次元光メモリ<sup>10)</sup>の開発を行った。透明部材内部に3次元構造を生成することで表面からの2次元的なコピーにより全ての情報を読み取ることは不可能であり、情報を3次元的に記録することで記録密度を向上させることが可能となる。

提案している個人認証手法は、透明アクリル部材内部に複製不可能なクラックと呼ばれる光学的損傷により、3次元ランダム位相物体を生成することで識別情報を記録する。このクラックに対して参照光照射した際に得られるスペックルパターンを照合することで認証キーの識別を行う。本認証手法は、3次元ランダム位相物体を簡便に生成することが可能という利点を有しており、それを認証の対象とすることで、従来の認証手法の共通の問題であった偽造に対して高い耐性を持った認証を実現した点である。

本認証手法の実現可能性を検討するために、種々の配列でクラックを生成した認証キーを用いて実際にパターン照合による認証を試みた。実験より、適切な認証閾値を定めることで、実験に用いた認証キーは正しく識別された。また、本認証手法の実用化の上で必要な条件を検討するために認証装置を作成し、その性能を評価した。製作した認証装置は実用性を考慮した小型化可能な構成を有している。認証装置の評価には、認証キーの設置位置精度並びにパターン照合に必要な時間を検討することで行った。ま

た、この種の認証手法では、認証精度によってそのセキュリティレベルや利用するサービスが決定されている。そのため本認証手法においても認証精度は重要な意味を持っており、実用性を評価するために生体情報による認証と同様の評価を行った。評価実験から、比較的に実用的な設置位置精度 $\pm 10 \mu\text{m}$ 、照合時間 0.62 秒以下という条件において認証が可能であり、本人拒否率 $\leq 1\%$ 、他人受容率 $\leq 0.0067\%$ という高い認証精度が達成され、実用化の指標が示された。

3次元光メモリでは、透明樹脂材料内部にボイドと呼ばれる微小空泡の配列を生成し、それをビット配列と見立てることでバイナリ情報を記録する。本研究では、ナノ秒レーザーを用いて透明樹脂材料に対してボイドの生成を試み、その結果から、ボイドの生成に至る条件について検討した。

## 2 透明部材内部3次元加工システム

Fig. 1に透明部材内部3次元加工システムの概要を示す。本システムは、レーザー制御系、集光光学系、加工制御系より構成される。レーザー光源には、Nd:YAG レーザー第二高調波（波長 532nm、パルス幅 8ns、繰り返し周波数 500Hz、）を用いた。照射フルエンス、パルス数は、電源ユニットを介してパーソナルコンピュータ（PC）により制御される。この光源の波長は可視光領域にあり、一般的な透明部材の透過波長帯にある。集光光学系は光学系では開口数の大きい

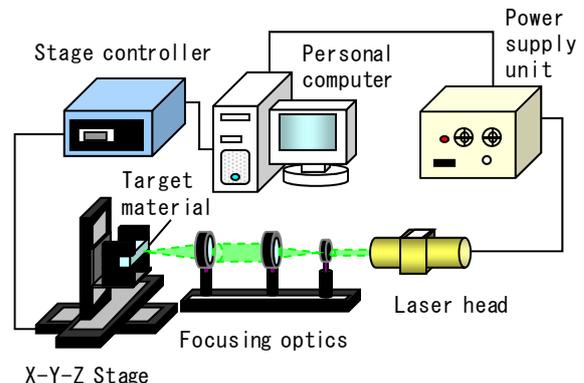


Fig. 1 Configuration of 3-dimensional processing system inside transparent resin material.

集光レンズを用いた。レーザービームは、スポットサイズ  $1.1\ \mu\text{m}$  まで絞りこんで透明部材内部に集光照射される。加工制御系は、X-Y-Z ステージと固定台からなる。加工対象となる透明部材は、X-Y-Z ステージ上に設置された固定台に固定され、X-Y-Z ステージの移動によりレーザーの照射位置を制御している。照射位置は  $\mu\text{m}$  オーダーで制御することが可能であり、これにより透明部材内部に任意の3次元構造体を形成することが可能となる。

### 3 個人認証手法

#### 3.1 個人認証手法の構築

個人証手法は、内部にクラックを誘起した透明アクリル部材を認証の対象である認証キーとしている。アクリルは、高い透明度と耐衝撃性を有する非結晶性の高分子材料である。このアクリル部材の内部に高出力の短パルスレーザーを集光照射した場合、光強度が高まることで多光子吸収が発生し、表面を傷つけることなく集光点近傍のみが選択的に加工される。このとき発生するクラックはアクリル部材の局所的な結合力の差により、同一の照射条件で加工を行っても、同一の形状となることはない。そのため、認証キーの意図的な複製は、事実上不可能である。この認証キーから得られるスペックルパターンとあらかじめ取得しておいたパターンとを照合することで個人を識別する。

スペックルパターンは、レーザーのようなコヒーレント光を粗面等に照射した際の反射光や透過光中に現われるランダムな粒状模様であり、簡便な光学系で取得することが可能である。認証キー中のクラックを粗面と見立てて参照光レーザーを照射すると、クラックにより複雑に屈折、散乱することでスペックルパターンを形成する。形成されるスペックルパターンは、クラックの形状に依存してそれぞれに異なるパターンとなる。また、ランダムな干渉現象であるスペックルパターンからは、クラックの形状を推測することは困難であり、スペックルパターンを入手したとしても、認証キーの偽造は不可能である。以上により、認証対象物の偽造に対して非常に高い耐性を有するセキュリティレベルの高い個人認証手法を実現している。

本認証手法の実現可能性を検討するために種々の配列でクラックを生成した認証キーを作成し、それらのキーから得られたスペックルパターンの照合による認証を行った。認証キーは  $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 30\text{mm}$  のアクリル部材内部に照射フルエンス  $50\text{kJ}/\text{cm}^2$  一箇所の生成につき一回のレーザー照射でクラック生成したものを用いた。スペックルパターンの取得の際には、認証キーを固定台に固定し、参照光として He-Ne レーザを照射し CCD カメラにより撮像した。また、実際の認証の場面を想定して、撮像ごとに認証キーは固定台から取り外し再び固定した後に撮像を行い認証キーごとに6枚のパターン画像を取得した。Fig. 2 に実験結果を示す。生成したクラックの配列は Fig. 2 (a) である。この図中の、破線の円は参照光の照射位置を示している。複数の位置でクラックを生成した場合には、クラック同士が不規則に絡み合った形状から、複雑なスペックルパターンが得られることが予想される。実際に生成したクラックの形状は Fig. 2 (b) であり、それぞれ1~10個のクラックを生成した結果である。生成されたクラックはそれぞれのクラックが異なる形状となっていることが分かる。また、生成数が6箇所までは全てのスポットとその周囲に発生したクラックが確認されたが、7箇所以上生成した場合はクラックとスポットの位置が重なり、全てのスポットを確認することはできなかった。Fig. 2 (c) が計測されたスペックルパターンであり、中心輝度の高いという共通点はあるものの、それぞれに異なるパターンが得られた。

これらのスペックルパターンを照合により識別を試みた。照合には正規化相関係数によるテンプレートマッチング法を用いた。認証キーごとに取得したパターンの一枚の

一部を切り取りテンプレートパターンとした。テンプレートパターンを識別パターンよりも小さくし、識別パターン上を移動させながら照合を行うことで、参照光の照射位置のずれによるスペックルパターンの出現位置の移動に対して許容性を持たせる。Fig. 2 (d) に照合の結果を示す。縦軸は正規化相関係数であり、1に近いほど2パターン間の類似度が高いことを示している。横軸は認証キーのサンプル番号である。グラフには、同一認証キーから得られたテンプレートとの照合結果と、他の認証キーから得られた残りの9枚のテンプレートとの照合結果の平均、最大、最小値、をプロットしている。例えば、Sample 1 のデータは、Sample 1 のテンプレートとの照合と、Sample 2~Sample 10 のテンプレート画像との照合結果がプロットされている。これを見ると、同一認証キーから得られたテンプレートとの照合において高い相関が見られ、異なる認証キーから得

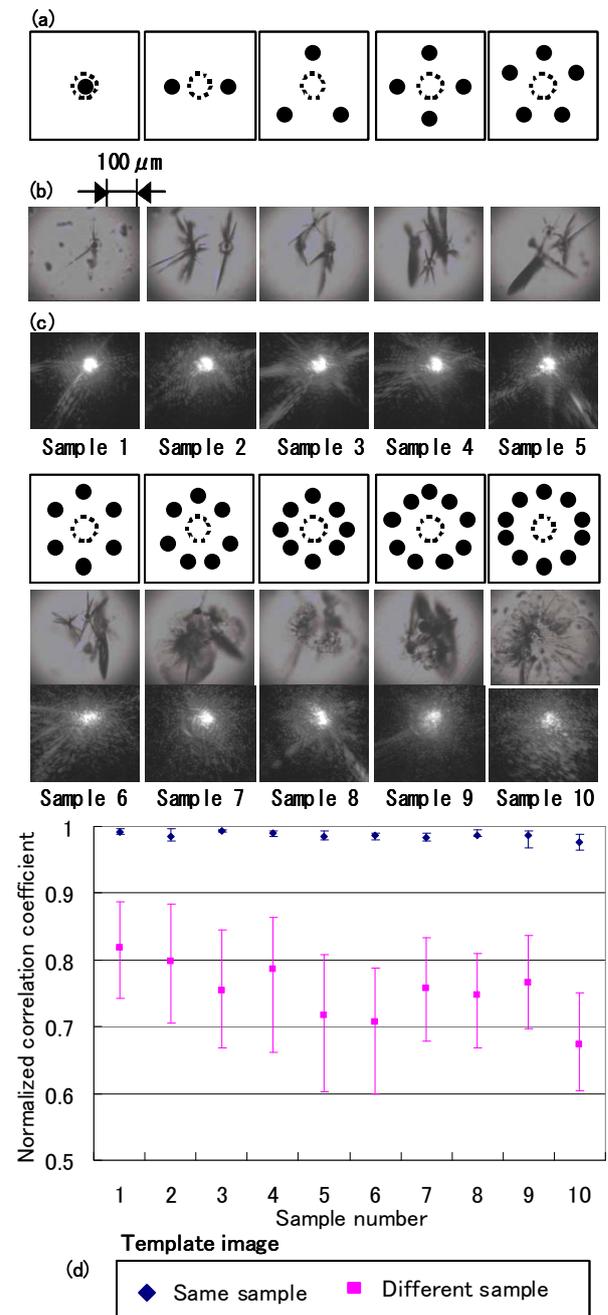


Fig. 2 Experimental results (a) pattern diagram of crack arrangement (b) shapes of created crack (c) speckle pattern obtained from each crack (d) result of template matching.

られたテンプレートとの照合の結果の最大値との間に認証閾値を設けることで誤りなく認証キーを識別することが可能であった。

### 3.2 認証装置の作成及び性能評価

本認証手法の実用性を示すためにスペックルパターンを取得しパターンを照合する認証装置を作成しその性能評価を行った。Fig. 3 に作成した認証装置の外観を示す。参照光には実用面を考慮し、小型の半導体レーザー（波長632nm, 出力1mW）を用いた。出力光は集光光学系によりスポットサイズ16 $\mu\text{m}$ で集光されクラックに照射される。これにより表面状態の影響を可能な限り除去している。認証キーは常に同一の位置に参照光が照射されるように固定台上に固定される。照射された参照光はクラックで複雑に屈折、散乱され後方の半透過スクリーン上でスペックルパターンを形成する。このパターンはスクリーン背面より CCD カメラ（640 × 480[pixel]）で撮像される。撮像されたパターンは PC に転送され、パターン照合処理を行うことによりパターンの取得から照合、判定までの一連の認証過程を自動で行うことが可能になる。また作成した認証装置のサイズは 450w（幅）×200h（高さ）×200d（奥行）mm 程度の比較的小型の装置となった。

照合に用いたテンプレートはFig. 4のような640 × 480 [pixel]の画像の一部を 500 × 400[pixel]に切り取ったものを用いている。また、中心部分は輝度が非常に高くなるのがわかっており、この部分により類似度が高くなるのが予想されるため、高輝度の中心部分を除去した。このテンプレートを使用し、テンプレートが移動可能な全領域において照合を行った場合、照合には 72 秒の時間を必要とした。そこで、照合を行う範囲をこれまでの照合においてピークが検出された範囲に限定して照合を行ったところ、認証精度を落とすことなく照合時間を 0.62 秒という十分に現実的な時間で認証が可能となった。

まず、認証キーの固定位置精度を検討する。認証キーを光軸方向（ $\pm z$  方向）、並びに光軸に対して垂直な方向（ $\pm y$  方向）移動させながら照合を行った。その結果を Fig. 5 に示す。このグラフは+y 方向に移動させた場合の結果であり、縦軸に正規化相関係数を示し、横軸に移動距離を示している。結果より相関係数は、y 方向の移動に対しては急激な減少を示した。それに対して z 方向への移動においては、y 方向の移動に比べて緩やかな減少を示した。認証閾値を 0.93 とした場合、z 方向はレイリー距離程度の $\pm 300 \mu\text{m}$ 、y 方向はスポットサイズの半分程度、 $\pm 10 \mu\text{m}$ の移動で認証が不可能になることから、認証リーダーにはこの程度の設置精度が必要であることが確認できた。

本手法の実用性を示すために認証精度の評価を行う。認証精度の評価は、実際に複数の認証キーを作成し、生体情報による認証と同様に、本人拒否率（FRR）と他人受容率（FAR）により行う。本評価実験では、現在一般的に用い

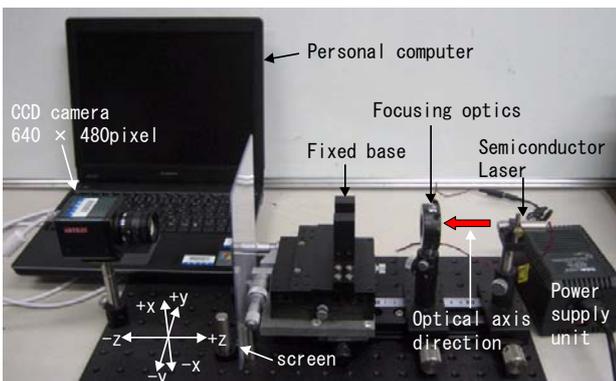


Fig. 3 Overview of identification module.

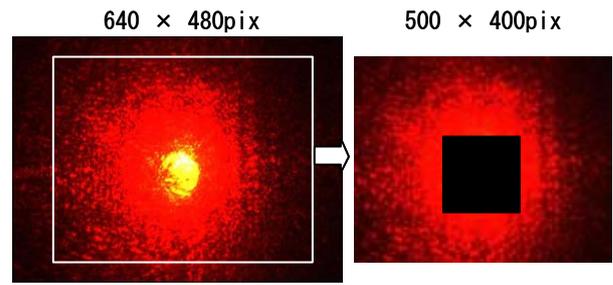


Fig. 4 A sample of template pattern.

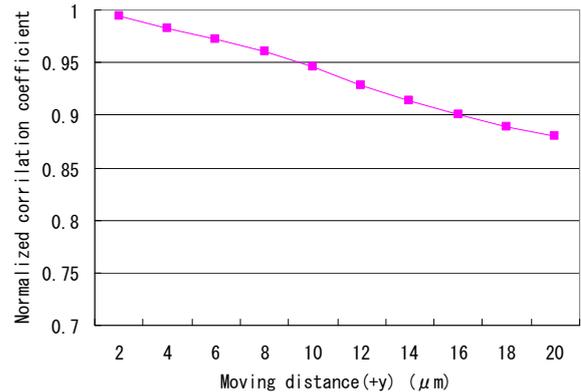


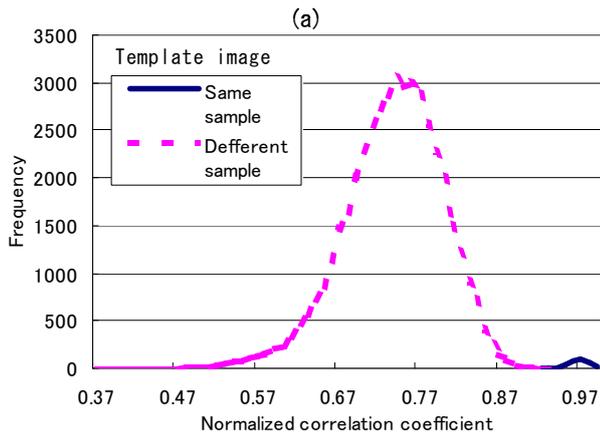
Fig. 5 Results of moving experiment in the opposite optical axial direction (+y).

られている指紋や静脈による認証と同程度の FRR=1%, FAR=0.01%を目標とする<sup>11)</sup>。認証精度評価においては、用いるサンプル数によって評価限界値が決まっており、実験の結果がこの値を下回った場合、実験結果に信頼性は与えられないが、評価限界値以下の精度を持つことが保証される。そのため適切なサンプル数を確保する必要がある。サンプル数を 300 とした場合の評価限界値はそれぞれ、FRR=1%, FAR=0.0067%となることから<sup>12)</sup>、本研究では認証キーを 300 サンプル生成し評価を行う。認証キーの作成に当たっては、3.1 章の実験と同様のパラメータを用いてクラックを生成し、生成数、生成配列はランダムに決定した。

照合の結果を、Fig. 6(a)に示す。縦軸は度数を示し、横軸は正規化相関係数を示している。破線のプロットは拒否されるべき、異なる認証キーから得られたパターン同士の照合の結果であり、実線のプロットが認証されるべき同一の認証キーから得られたパターン同士の照合の結果である。このグラフから同一の認証キーから得られたサンプル同士の照合結果は 0.92~0.99 の範囲に局在している。一方で、異なる認証キー同士から得られた照合は 0.37~0.93 という広い範囲に分布していることが分かる。また、これらの二つの分布は互いに重なり合う部分を持つために、認証閾値を設定した場合に本人拒否や他人受容が起きることとなる。本実験の結果からは認証閾値を 0.92~0.94 に設定することが可能であることが分かる。この範囲に閾値を設定した場合の FRR と FAR を Fig. 6(b)に示す。この表から、全ての閾値において概ね目標とした FRR=1%と FAR=0.01%を達成していることが確認できた。また、閾値 0.93 において FRR, FAR とともに評価限界値を下回ったことから、本手法は評価限界値以下の精度を持ったセキュリティレベルの高い認証手法であることが確認された。

## 4 3次元光メモリ

透明部材内部に再現性の高い微小空泡のボイドを作成し、それらをビット配列と見立てることでバイナリ情報を記録する 3次元光メモリの開発を行う。ボイドとは、多光子吸収によるプラズマが拡散する際に発生する圧力波と



(b)

| Threshold | 0.92  | 0.93  | 0.94 |
|-----------|-------|-------|------|
| FRR       | 0     | 0.33  | 1    |
| FAR       | 0.016 | 0.002 | 0    |

Fig. 6 Results for matching experiment (a) Distribution of normalized correlation coefficient (b) FRR and FAR for each threshold.

部材の圧縮応力の釣り合いによって集光点近傍に生じる空洞であり、現在までのところ、熱影響が極端に少ないフェムト秒レーザーでの実現が報告されている。このメモリでは、ボイド配列を生成し、それを積層することで3次元的に情報を記録する。ナノ秒レーザーを用いていることから熱の影響を無視できず、フェムト秒レーザーを用いた場合に比べて大型のボイドとなることが予想され記録密度は低下するが、ボイドを積層することから、表面コピーに強く、従来の光ディスクとは異なる形状の新たなメモリを実現できる。本研究では Nd:YAG レーザを用いて透明樹脂材料であるポリプロピレン部材内部にボイドの生成を試みた。

ボイド生成実験は、照射フルエンス 0.2, 0.4, 0.6 kJ/cm<sup>2</sup> において、照射回数 1 回として行った。生成したボイドは光学顕微鏡を用いて観察した。Fig. 7 照射フルエンス 0.4 kJ/cm<sup>2</sup> で生成したボイドを示す。Fig. 7(a) は生成の際に照射したレーザーの光軸方向から観察した結果であり、Fig. 7(b) は光軸に対して垂直な方向から観察した結果である。観察の方向によらず円形の加工跡が確認されたことから、形成されたボイドは球形の形状を有していることが推測できる。また生成されたボイドは 3~10 μm 程度の直径であることが分かった。Fig. 7(c) はボイド配列を生成した結果である。生成された配列において、ボイドは大きさのばらつきに加えて、生成位置に光軸方向のばらつきが見られた。また、ボイドが生成されない箇所やクラックが発生した部分も確認された。これらは、ポリプロピレン材料の結晶化度の影響を受けたものである。実験では、結晶化度 60% のポリプロピレンを用いており、結合力に差のある非晶質の存在がボイドの生成に影響を与えたものと考えている。以上より、ナノ秒レーザーによるボイド生成の可能性を示した。

## 5 結論

本研究ではナノ秒パルスレーザーである Nd:YAG レーザの 3 次元情報記録技術への応用としてクラックによる個人認証手法とボイドを用いた 3 次元光メモリの開発を行った。個人認証手法では、種々の配列でクラックを作成した認証キーを用いて認証を行い、適切に認証閾値を設定することで認証キーが誤りなく識別されたことからその実現可能性を示した。また、実用化の指標を示すために認証装置を作成し性能評価を行った。作成した認証装置は、450w (幅)

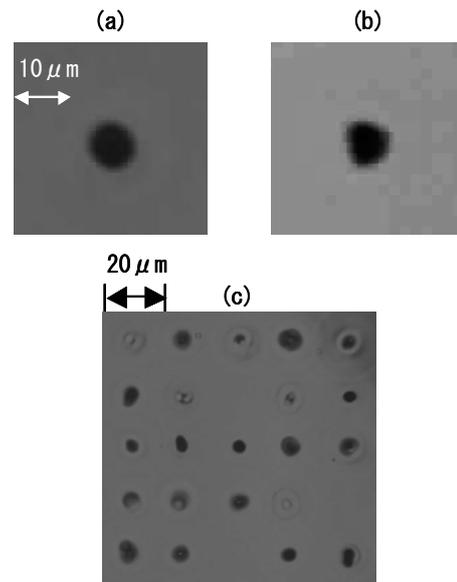


Fig. 7 observation results of void creating experiment (a) single void observed from optical axial direction (b) single void observed from opposite optical axial direction (c) void array.

×200h (高さ) ×200d (奥行) mm 程度の比較的小型な構成となった。性能評価においては、認証キーの設置位置精度 ±10 μm 程度までの許容性を持つことが確認され、機械的固定機構の設計指針を示した。照合時間は照合領域を限定することで、認証精度を維持しつつ実用に供しうる程度の 0.62 秒での照合が達成された。また、認証精度評価実験により FRR ≤ 1%, FAR ≤ 0.0067% の精度を持つ認証手法であることが確認され、本手法の実用性を示すことができた。3 次元光メモリの開発では、ナノ秒レーザーにより透明樹脂材料であるポリプロピレン内部に 3~10 μm のボイドが得られた。この結果は、ナノ秒レーザーを用いることでもボイドの生成が可能であることを実験的に示している。本研究により、ナノ秒レーザーの新たな応用分野として、3 次元情報記録技術への応用が可能となった。これらの技術を組み合わせることにより偽造に強い高信頼性の記憶媒体が実現できると考えている。

## 参考文献

- 1) レーザー学会: レーザーハンドブック第 2 版 (2005) p. 37
- 2) 石出孝, 坪田秀峰, 名山 利介, 下楠 善昭, 福本清治: レーザー研究 Vol. 28 (2000) pp. 750-754
- 3) レーザ協会: レーザ応用術ハンドブック (1984) p. 108
- 4) 池野順一, 真杉豊, 堀内宰, 河西敏雄, 小林昭: 精密加工学会誌
- 5) 小林一行, 山口博康, 熊井麻子, 田中麻起, 櫻庭栄一, 野村典生, 中村治郎, 新井高: 日本歯周病学会会誌 (1999) pp. 180-187
- 6) 林健一: レーザー研究 Vol. 28 (2000) pp. 40-44
- 7) 林健一: 第 57 回応用物理学学会学術講演会予稿集 (2008) p. 881
- 8) 時田大作, 齋藤隆洋, 櫻田典世, 石井良夫, 渡辺一弘: レーザー研究, Vol. 35 (2007) pp. 259-264
- 9) 時田大作, 渡辺一弘: 計測自動制御学会産業論文集, Vol. 8, No. 3 (2009) pp. 17-24
- 10) 佐々木正孝, 時田大作, 渡辺一弘: 第 68 回応用物理学学会学術講演会予稿集 (2008) p. 1006
- 11) 社団法人日本自動認識システム協会: よくわかるバイオメトリクス基礎 (2005) pp. 2-16
- 12) A. J. Masnsfield and J. L. Wayman: NPL Report CMSC 14/02 (2002) p. 1-32