

レーザー学会誌

# レーザー研究

The Review of Laser Engineering

## レーザー3D形状計測手法による医療応用

若山 俊隆<sup>1</sup>, 吉澤 徹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>埼玉医科大学 保健医療学部(〒350-1241 埼玉県日高市山根1397-1)

<sup>2</sup>特定非営利活動法人 三次元工学会(〒230-0078 神奈川県横浜市鶴見区岸谷4-13-18 リック岸谷1F)

Medical Application for 3D Shape Measurement Method Based on Laser System

Toshitaka WAKAYAMA<sup>1</sup> and Toru YOSHIZAWA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Health and Medical Care, Saitama Medical University, 1397-1 Yamane, Hidaka, Saitama 350-1241

<sup>2</sup>NPO 3D Associates, Rick 1F, 4-13-18 Kishiya, Tsurumi, Yokohama, Kanagawa 230-0078

The Review of Laser Engineering, Vol. 44, No. 5, May 2016, pp. 301-305.

©2016 The Laser Society of Japan.

[レーザー研究, Vol. 44, No. 5(2016)別刷]

# レーザー3D形状計測手法による医療応用

若山 俊隆<sup>1</sup>, 吉澤 徹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>埼玉医科大学 保健医療学部(〒350-1241 埼玉県日高市山根1397-1)

<sup>2</sup>特定非営利活動法人 三次元工学会(〒230-0078 神奈川県横浜市鶴見区岸谷4-13-18 リック岸谷1F)

## Medical Application for 3D Shape Measurement Method Based on Laser System

Toshitaka WAKAYAMA<sup>1</sup> and Toru YOSHIZAWA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Health and Medical Care, Saitama Medical University, 1397-1 Yamane, Hidaka, Saitama 350-1241

<sup>2</sup>NPO 3D Associates, Rick 1F, 4-13-18 Kishiya, Tsurumi, Yokohama, Kanagawa 230-0078

(Received February 16, 2016)

Three-dimensional (3D) shape measuring technology based on laser system has been utilized for many industrial applications. The 3D shape measurement is essential for the inspection and evaluation of the industrial products due to promise the product safety. To date, the importance of compactness, mobility, and high speed measurement on 3D shape measuring technology have been gradually increased. For 3D shape measurement, we have developed the inner profile measuring technology by use of a ring beam device which is consisted of a laser diode and a conical mirror, and high speed phase shifting technique which is based on fringe projection of spatio-temporal conversion. The 3D shape measurement technology has been available to industrial applications such as automobile, energy plant and heavy industry. This report is focused on medical applications for 3D shape measuring technology based on laser systems, such as total hip arthroplasty, prosthetic socket evaluation, and 3D position registration in radio treatment system.

**Key Words:** Three-dimensional shape measurement, Inner profile measurement, High speed phase shifting technique

### 1. はじめに

レーザー光をはじめとする光を応用した技術によって人体あるいは各部位の形状をとらえることに関しては我が国の研究者が果たしてきた役割は大きい<sup>1,2)</sup>。とくに(光学的な形状測定法といえば)せいぜい光切断法か(人体に光を当てて得られる影や輪郭を利用した)シルエット法が使われていた頃に、高崎によって発表されたモアレトポグラフィ法は非接触で瞬時に全視野計測(Full-field measurement)を可能とする画期的な生体形状測定法として世界の注目を浴びた<sup>3)</sup>。とくに当時の医療におけるトピックスであった脊柱側弯症の検診に適する手法としてもてはやされて、多くの成果が発表された。モアレ法は、さらには歯科、被服関連にも普及した。我が国におけるモアレ応用計測の成果は研究会記念誌にまとめられている<sup>4)</sup>。ただし、モアレ法の当時の問題点は1枚の画像からのみでは形状の凹凸の判定ができないことであったが、その後にパターン投影法<sup>5-7)</sup>、さらには位相シフト方式<sup>8,9)</sup>などの画像解析手段の発展により各種の工業分野における光計測の応用へと連なっている。また光切断法は外面部の計測から、本稿でも述べられていく

内面形状計測にも応用展開されている<sup>10)</sup>。画像処理技術の進展によって、モアレ法の基本であるというべきステレオ計測方式もデジタルフォトグラメトリへと進展して、大型構造物などの計測に適した手法へと広がりを見せている<sup>11)</sup>。

本稿では、我々のグループが研究開発を進めてきた内容を中心にレーザーを用いた三次元形状計測技術の一つであるリングビーム素子による特殊光切断方式の内面形状計測技術と共に時空間変換方式の高速位相シフト法による小型三次元カメラの開発を概説する。それら計測技術の医学応用として人工股関節置換術の三次元誘導システム、義足ソケットの適合評価と共に、高速位相シフトパターン投影法による放射線治療装置における三次元位置決めの応用事例を述べる。

### 2. 内面形状計測技術の医学応用

#### 2.1 内面形状計測技術

我々の身の回りには様々な孔がそれこそ無数に存在する。なかには極めて重要な孔があって、少しでも異常が生じると重大な事故を引き起こす恐れがある。近年の大

震災などの影響からこれらを未然に防ぐために産業分野では内面形状計測技術の重要性が急速に高まっている。このような背景からFig. 1に示した内面形状計測用の三次元プローブカメラが開発されている<sup>10)</sup>。Fig. 1(a)はプローブの光学系である。半導体レーザーから出力された点状のビームは円錐ミラーによってディスク状に広がる。このビームが測定対象の内面に照射される。その散乱光をCCDカメラで撮像すると形状をとらえることができる。Fig. 1(b)は作製されたシステムであり、一軸のリニアステージにプローブが搭載されている。作製されたプローブはFig. 1(c)に示されているように円錐ミラーの頂点からディスク状のビームが出射される。簡単にイメージできるように測定試料としてFig. 1(d)のような型を用意し、プローブを挿入しながら一軸ステージをz方向に走査した。これにより撮像した位置それぞれではFig. 1(e)に示した光切断面が形成される。三角測量に基づいたアルゴリズムで解析すればそれぞれの点群を精密に計測可能となる。レーザーを用いた三次元形状計測技術は多数登場しているが、このような特殊な計測法はほとんど提案されてこなかった。この内面形状計測技術を医学・保健医療学分野に適用した例を以下に示していく。

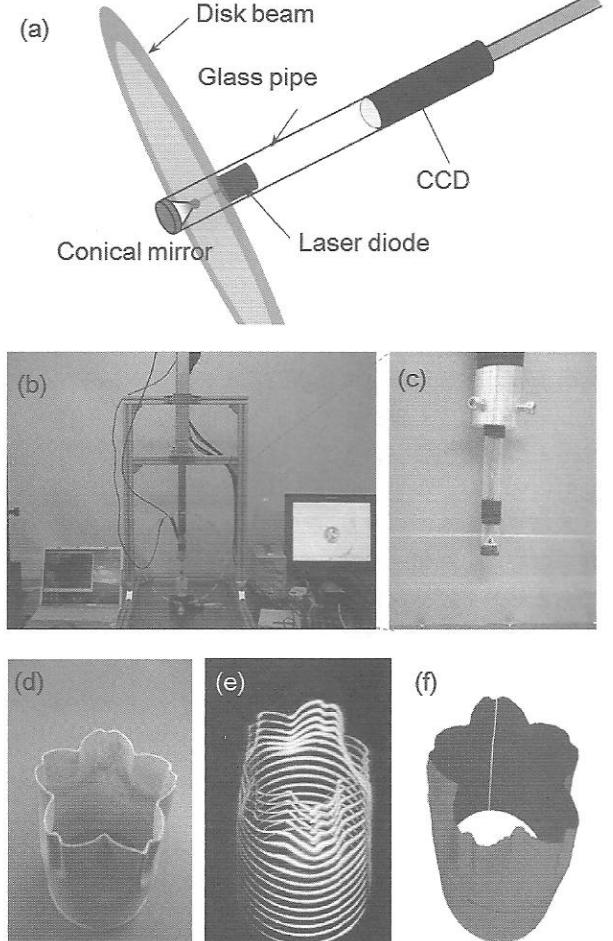


Fig. 1 (a) Design, (b) system with linear stage, and (c) probe for inner profile measurement. (d) Sample, (e) optical sectioning profile and (f) 3D data.

## 2.2 人工股関節置換術支援への応用

人体における内面形状計測技術というとすぐに思い当たるのは内視鏡であるが、内視鏡で観察されるのは主に二次元画像であるため、その形状は一般的にとらえることはできない。最近では、光コヒーレンストモグラフィー(OCT)なども登場しているが、本稿で紹介する的是整形外科学における人工股関節置換術への応用である<sup>12)</sup>。我が国ではお年を召してくると股関節痛に悩まれる方が多いことが知られている。重篤になってくると人工関節に置換する手術が行われる。これが人工股関節置換術である<sup>13)</sup>。日本国内で年間7万症例が実施されており、年々増加傾向にある。手術前に医師による術前計画が行われ、レントゲン写真や近年ではCTによる三次元像から人工関節であるカップの設置角度と位置が決定される。術前計画は高度化されて、人体力学的な計算を踏まえて、術後の患者の脚の可動域などもシミュレーションされている。医師の術前計画に合った位置と角度にカップを設置できれば、術後のQOL (Quality of Life)は高くなり、再手術や脱臼の恐れが低減する。このように精密な三次元術前計画が練られているにもかかわらず、術中の位置決めは医師の経験にゆだねられているのが現状である。この課題を解決するために工学技術を駆使してナビゲーションするのが三次元誘導システムである。現在は、赤外線マーカーと赤外線カメラを導入した方法が利用されているが、この方法は股関節と異なる位置(骨)にマーカーピンを打設する必要がある。術前計画に沿ったカップ設置ができることが報告されているが、その侵襲性も高く、準備時間も含めると手術時間は20~30分延長するので感染などのリスクも高まってしまう。このような点を解決するために、Fig. 1に示された内面形状計測技術を手術に適用したプローブが開発されている<sup>12)</sup>。この手法を用いれば、股関節臼蓋骨を術中に短時間のうちに三次元測定できる。得られた点群データをCTの術前計画とマッチングさせると、現在の手術機械の位置を把握できる。姿勢センサーを用いて術前計画に沿った角度に手術器械を簡単に誘導することも可能となる。Fig. 2は検証実験の結果である。実際の患者の股関節をCTで撮像し、Fig. 2(a)に示したSTLデータから3DプリンタによってFig. 2(b)に示した股関節模型を造形した。この模型を光三次元測定し、点群(Fig. 2(c))をメッシュデータ(Fig. 2(d))に変換した。その後、STLデータとマッチングさせて、両者を比較した。両者の差は最大でも1.5 mm以内に収まっている(Fig. 2(e))。このマッチングによって現在の手術器械の姿勢を把握できる。従来式の赤外線姿勢センサーで指摘された手術時間の超過や侵襲性の課題をこの手法で解決することができる。内面形状計測技術による三次元スキヤナに関していえば、前臨床評価は完了し、術中の股関節臼蓋骨の三次元像を4秒の間に測定している。(公財)日産厚生会玉川病院股関節センターにおける最小侵襲手術中の股関節臼蓋の三次元撮像も成功しており、今後はトータル三次元誘導の臨床評価も試みられる予定である。

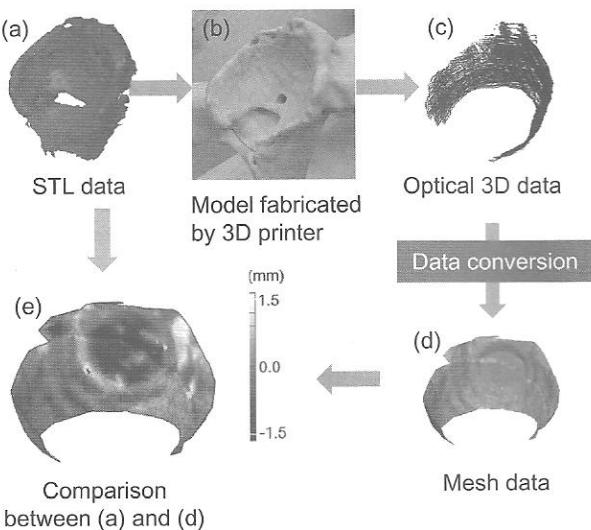


Fig. 2 (a) STL data is obtained from CT. (b) phantom model is fabricated by 3D printer. (c) 3D data is measured by optical 3D method. (d) Mesh data is converted from 3D data. (e) Comparison between (a) and (d).

### 2.3 義肢装具の適合評価への応用

事故や病気などから四肢を切断された方が利用される義肢ソケットは、人体と装具をつなげるために必要不可欠な部材である。Fig. 3(a)は、義足ソケットと装具の関係を示している<sup>14)</sup>。ソケットとの適合性は日常生活を送る上で極めて重要であるため、医療従事者である義肢装具士が患者との会話の中からそれらが適合するように調整している。しかし、これもまた義肢装具士の経験に強く依存しており、適合性を評価する方法は義肢装具学の中で極めて重要とされている。そのためにはソケット自体の内面測定が必須であるが、機械的な方法だと測定に数時間を有するため実用的でなかった。このような背景から義肢ソケット内面形状を定量的に素早く測定したいという要求が生じている。Fig. 3(b)と3(c)は、国立障害者リハビリテーションセンターで作製された義足ソケットとその内面形状測定された後のメッシュデータである。測定時間はわずか6秒間足らずで取得された点群データは5万点となった。次に修正前後の義足ソケットを測定し、修正箇所を定量的に評価できるかを確認した。Fig. 3(d)と(e)はソケットを異なる方向から見た三次元像である。修正前後の形状の差をグレースケールで表している。修正箇所は濃色で示されており、修正された領域とその深さが定量的に求まっている。修正された容積も算出可能であり、今回の修正部の容積は7 mlであった。今回は義足ソケットの内面形状測定結果のみを示したが、人体の軟部組織の撮像法はすでに構築されているので、ソケット内面と軟部組織外面の形状から適合性の評価を行う準備が整ったと言える。また、本実験の有効性は、熟練義肢装具士の経験に裏付けられた装具の調整がデジタル化できるということも示されており、若手義肢装具士の教育や新たな義肢装具の開発にも貢献できると期待される。

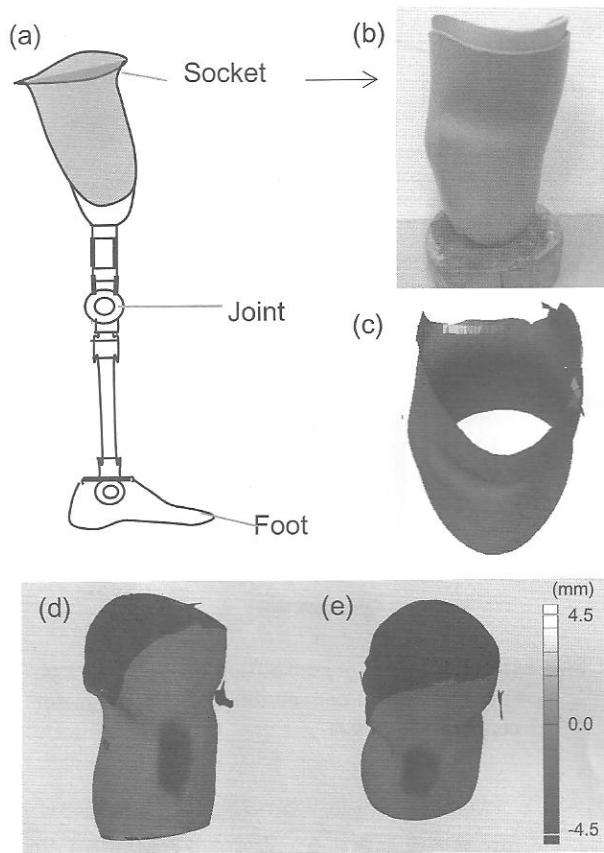


Fig. 3 (a) Socket design, (b) picture, and (c) mesh data of prosthetic socket evaluation. 3D data before and after the correction are compared in (d) and (e) shown at the different view angles.

## 3. 高速位相シフト型形状計測技術の医学応用

### 3.1 時空間変換方式の高速位相シフト技術

格子パターン投影法を用いた三次元形状計測技術は、その汎用性の高さから産業界でも広く利用されている。形状計測を実現するためには、格子パターン状の構造光を投影し、それを三角測量に基づいて画像解析する必要がある。計測精度を担保するために、格子パターンの光強度縞の位相を変えながら複数枚の画像を取得する。近年、格子パターンの位相シフトはプロジェクターの普及によって容易に行うことができるようになった。プロジェクター技術の普及に伴って三次元形状計測の実用化は飛躍的に向上したと言える。しかしながら、プロジェクターの切替速度に関しては市販されたものでは30 fpsから60 fpsであり、動的三次元形状計測には対応できなかつたり、レンズ系が必要となることから装置がどうしても大きくなってしまった。この課題を解決するために、1枚のMEMSミラーと半導体レーザーによる小型パターン投影技術が開発された<sup>8)</sup>。Fig. 4(a)は時空間変換方式高速位相シフト型パターン投影法の概略図である。光源には半導体レーザーを用い、半導体レーザーから出力された緑色のレーザービームはシリンドリカルレンズによって点状から線状に変換されて、MEMSミラーに投

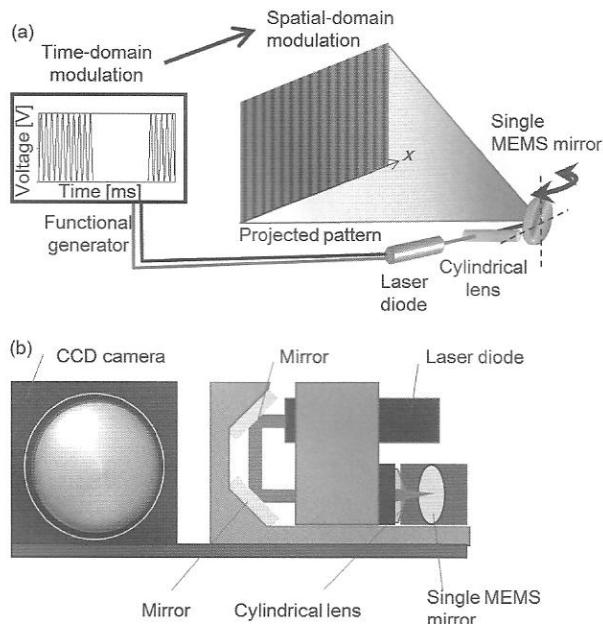


Fig. 4 (a) High speed phase shifting method based on spatio-temporal conversion and (b) design for compact 3D camera.

影される。MEMSミラーは共振させていて、線状のビームは2次元に拡大投影される。このとき、MEMSミラーの共振に同期させて、半導体レーザーの出力パワーをアナログ変調すると、この変調に対応した光強度パターンを物体に投影することができる。つまり、Fig. 4(a)に示したように時間的な電気信号を空間的な光強度縞に変換させることができる。光源に半導体レーザーを用いてレンズなどの影響によるボケは発生しにくい。そのため、大型な建造物等にも適応することが可能である。さらに、印可電圧信号の初期位相を制御すれば、光強度縞を高速に位相シフトできる。Fig. 4(b)はコンパクト3Dカメラの内部光学系を示している。この技術は光三次元測定機をコンパクトにすることを実現し、自動車内部のフットペダルなどの検査にも使用されている<sup>15)</sup>。

### 3.2 放射線治療装置の位置決めへの応用

近年、外科的手術を用いずに脳腫瘍を治療する方法として放射線治療が注目されている。これは放射線を患部に照射して癌細胞を死滅もしくは縮小させる治療法である。ターゲットである腫瘍部のみを放射線で治療するため、この方法で重要なのは腫瘍部位の三次元位置決めと言われている。現在までに赤外線マーカーステレオ法から患者の術中の状態を測定し、頭内部の腫瘍の位置を推定している。この方法は高速性に優れているが、体内に隠れた位置を正確に位置決めするのには、まだ情報量が不足している。そのため、術中にX線ステレオ法から腫瘍部の絶対位置が測定されて、赤外線ステレオ法の測定を補間している。しかし、これも患者への被爆が懸念されるために、放射線治療の現場において、光三次元形状計測による位置決めが期待されている。Fig. 4に示した手法を用いれば、術中の患者の顔面を高速かつ高精度に

三次元計測できる<sup>16)</sup>。得られた光三次元像と術前のCTデータをマッチングすれば、頭部内の腫瘍の位置を非侵襲に決定することが可能となる。このような背景から光三次元形状計測を用いた放射線治療装置の3次元位置決めに関する研究を進めている。

Fig. 5(a)と5(b)は放射線治療装置に光三次元計測装置を適用している一例である。三次元カメラと治療用ベットおよびファントム模型の関係が示されており、この写真からもわかるように三次元カメラの大きさは放射線治療装置や治療ベッドに支障がない。治療用ベットはその位置と角度に任意に制御できるのでその撮像実験を行った。ファントム模型に格子パターンを投影して、Fig. 4(b)に示したCCDカメラで撮像した画像をFig. 5(c)–5(f)に示す。破線の位置を中心にして縞パターンが $\lambda/4$ ずつ変化している。Fig. 5(g)と5(h)に示すように位相シフト法のアルゴリズムからファントム模型の表面形状が測定された。今回は得られたデータとCT像をマッチングまでは行われていないが、マッチングができれば頭部内にある腫瘍部の位置を算出できると予想している。これにより既存の赤外線およびX線ステレオ法を用いた方法

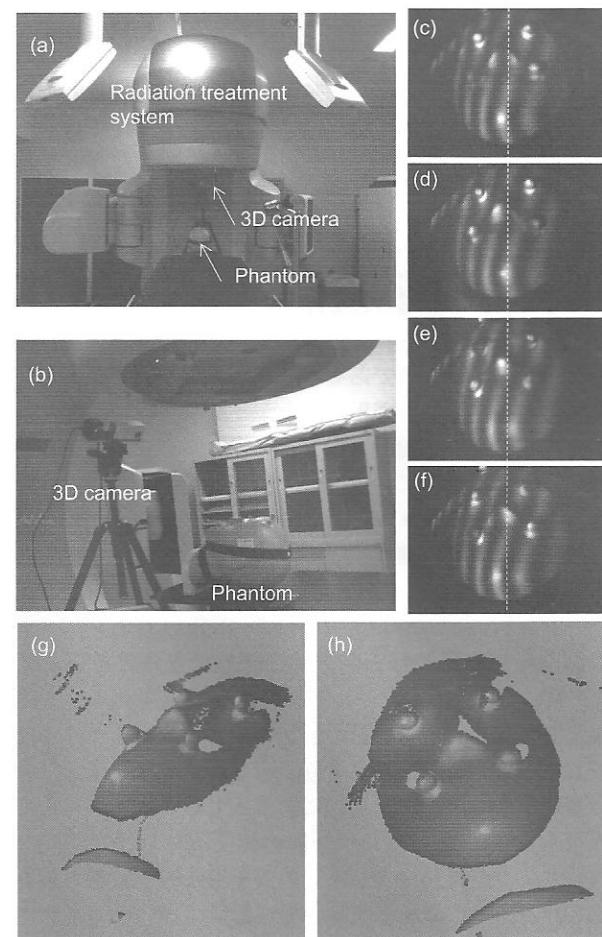


Fig. 5 (a) 3D position registration for Radio treatment system and (b) relationship between 3D camera and phantom model. (c)–(f) Original images of phantom model are illuminated by phase shifted fringe patterns. (g) and (h) show 3D data at different view angles.

よりも計測精度と被爆の課題を改善できると期待している。

#### 4. まとめ

本稿では内面形状計測技術と時空間変換方式の高速位相シフト技術を概説し、人工股関節置換術のための三次元誘導システムや義足ソケットの適合性評価、そして、放射線治療装置における三次元位置決めに関する応用例を述べた。基本的原理はすでに既知のものではあるけれども、工夫によって新しいデバイスを生み出し、新しい計測法が生まれることにつながっている。これにより今まで測りたくても測れないものが測定できるようになつたし、それらの計測技術が産業分野を超えて医療分野での新たな治療支援システムへと進展されている。今はまだ実験室レベルのデータではあるが、今後は実験室レベルを超えて前臨床評価を経て臨床評価から実用を目指した研究開発が進められていくと期待している。

#### 謝 辞

本研究のそれぞれの課題は、他機関および企業の多くの研究者と埼玉医科大学の学生および卒業生との共同研究として進めさせていただいたものを紹介させていただきました。ご協力いただいた関係各位には深く感謝申し上げます。また、本研究の一部は、日本医療研究開発機構(AMED)および科学技術振興機構(JST)の研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)ハイリスク挑戦タイプ

および、科学研究費助成金挑戦的萌芽研究Vol. 26670563(研究代表者浜松医科大学医学部放射線腫瘍学講座中村和正教授)、また、埼玉医科大学保健医療学部プロジェクト研究15-007の支援を受けて行われましたので、ここに深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 吉澤 徹編：三次元工学1光三次元計測(新技術コミュニケーションズ、1993)。
- 2) 吉澤 徹編：三次元工学2光三次元・産業への応用(新技術コミュニケーションズ、2008)。
- 3) H. Takasaki: *Appl. Opt.* **9** (1970) 1467.
- 4) モアレ三次元計測研究会編：モアレ三次元計測研究会20周年記念誌(モアレ・三次元計測研究会、1995)。
- 5) J. Geng: *Advan. in Opt. and Photon.* **3** (2011) 128.
- 6) PS. Haung and S. Zhang: *Appl. Opt.* **45** (2006) 5086.
- 7) W. Lohry and S. Zhang: *Opt. Express* **22** (2014) 26752.
- 8) T. Wakayama and T. Yoshizawa: *Opt. Eng.* **51** (2012) 013601.
- 9) M. Fujigaki, Y. Oura, D. Asai, and Y. Murata: *Opt. Express* **21** (2013) 23169.
- 10) T. Yoshizawa, M. Yamamoto, and T. Wakayama: *Proc. SPIE* **6382** (2006) 63820D.
- 11) 高地 伸夫：最新光三次元計測(朝倉書店、2006) 98.
- 12) 若山 俊隆, 廣瀬 雄一, 半田 隆志, 鎌倉 吉寿, 長島 剛宏, 鬼頭 縁, 清徳 則雄, 吉澤 徹：映像情報medical **45** (2013) 274.
- 13) 岩本 幸英編著：人工股関節置換術 MISから再置換まで応用できる手技のコツ(メジカルビュー社、2009)。
- 14) 宮里 慧, 鈴木 翔太, 若山 俊隆, 中村 隆, 星野 元訓, 山崎 伸也, 米村 元喜, 吉澤 徹：精密工学会学術講演会論文集(2014) Q48.
- 15) H. Aoki : *Proc. SPIE* **9110** (2014) 91100Q.
- 16) T. Wakayama, S. Hiratsuka, Y. Kamakura, K. Nakamura, and T. Yoshizawa: *Proc. SPIE* **9276** (2014) 92760G.