

#### 4. 議論

結果から、力において実測値と推定値の誤差は大きくなったものの、力・トルク全体の傾向が一致したことから提案手法による大腿骨位置姿勢推定の可能性が示された。誤差の原因として、ファントムに取り付けた靭帯ゴムが構造上接着部のずれが生じてしまうことが考えられる。また、提案手法では生体組織は各付着部同士を直線で繋いでいる。しかし実際のファントムでは骨の形状によって靭帯、筋肉ゴムが骨に沿う形で屈曲している可能性があるため、推定した生体組織長さの違いが誤差に影響している可能性がある。よって今後、骨形状に沿う形でモデルを構築する必要がある。

#### 5. おわりに

以上より、医学的知識に基づいた下肢の各関節の構造及び、生体物性を考慮した筋骨格モデルの構築を行った。その結果、提案手法による大腿骨位置姿勢推定の可能性が示され、骨折整復手術への適応可能性が示された。

#### 参考文献

1. Y. Nakajima, et al., "Computer-assisted fracture reduction of proximal femur using preoperative CT data and intraoperative fluoroscopic images," CARS 2004, Chicago, USA, 2004
2. Nihat Ozkaya, Margareta Nordin, "バイオメカニクス～生体力学の原理と応用," NTS, 2001, pp. 250-252
3. N. Yamazaki, "Measurement and estimation of knee instability," Society of Biomechanisms Japan, Biomechanisms, No. 9, pp. 115-125, 1988

# 経皮的穿刺のためのレーザによる位置・姿勢呈示

○林 成煥<sup>a</sup>, 道家 健仁<sup>a</sup>, 小野木 真哉<sup>b</sup>, 中島 義和<sup>a,b</sup>, 光石 衛<sup>a</sup>, 佐久間 一郎<sup>a</sup>, 別所 雅彦<sup>c</sup>, 大西 五三男<sup>c</sup>, 中村 耕三<sup>c</sup>

<sup>a</sup> 東京大学工学系研究科, <sup>b</sup> 東京大学 IML, <sup>c</sup> 東京大学医学系研究科

## Surgical Tool Guidance Using Laser Beams for Percutaneous Puncture

S. Lim<sup>a</sup>, T. Douke<sup>a</sup>, S. Onogi<sup>b</sup>, Y. Nakajima<sup>a,b</sup>, M. Mitsuishi<sup>a</sup>, I. Sakuma<sup>a</sup>, M. Bessho<sup>c</sup>, I. Ohnishi<sup>c</sup>, K. Nakamura<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Graduate School of Engineering, the University of Tokyo, Tokyo, Japan

<sup>b</sup> Intelligent Modeling Laboratory, the University of Tokyo, Tokyo, Japan

<sup>c</sup> Graduate School of Medicine, the University of Tokyo, Tokyo, Japan

**Abstract:** Percutaneous puncture is important in minimally invasive orthopedic surgery. But, it is difficult to puncture by using a X-ray fluoroscope. We expect it is possible by using the laser navigation. So, we confirmed the possibility of the percutaneous puncture in the laser navigation. We experimented as follows. 1. Evaluation of influence that estimated error on laser projection plane gives to positioning accuracy. 2. Guidance accuracy evaluation in the percutaneous puncture. 3. Evaluation of the percutaneous puncture accuracy by using a femur phantom. It was confirmed that the influence of depth was small in the proposed method with one laser emitter compared with the previous method with two laser emitter. In the evaluation of positioning accuracy in the proposed method, it was confirmed to guide by the accuracy of 1 mm level in 20 mm depth. As a result of the percutaneous puncture accuracy evaluation using a femur phantom, it was confirmed that the percutaneous puncture was possible by the accuracy of about 4 mm, 2 deg. To achieve a more highly accurate percutaneous puncture, we are necessary to examine the jig such as sleeves to improve the puncture accuracy. As a result, the possibility of the percutaneous puncture was confirmed in the laser navigation.

**Keywords:** Minimally invasive surgery, Surgical navigation system, Femoral fracture reduction

### 1. はじめに

低侵襲手術 (MIS; Minimally Invasive Surgery) は従来よりも侵襲の少ない手術の通称であり, その利点から近年幅広く行われている。整形外科におけるMISとして, 皮膚などの経皮的穿刺があるが, X線透視撮影装置下で行われており, 安全性および精度について課題がある。中島らは2つの平面レーザ光を術野に照射し刺入点 (位置) と刺入姿勢を誘導する手法を提案している [1]。この手法は術具の刺入位置と刺入姿勢を呈示するため, 骨表面上に設定された手術計画に対して経皮的穿刺を行う場合においても有効であるとされる。そこで, 本研究ではレーザナビゲーションにおける経皮的穿刺の可能性を確認することを目的とする。具体的には, 1) レーザ呈示面の推定誤差が位置誘導精度に与える影響の評価, 2) 経皮的穿刺における誘導精度評価, 3) 模擬骨を用いた大腿骨への経皮的穿刺精度評価を行った。

### 2. 提案手法

Fig. 1(a)にレーザポインタを使った刺入点呈示法(従来手法), (b)にレーザ光2平面の交線描画による刺入点呈示法(提案手法)を示す。S0は手術対象骨表面などの手術計画面, S1はレーザが呈示される皮膚表面などのレーザ呈示面を示し, P0, P1はそれぞれ目標刺入点及び対象刺入点を示す。提案手法は2つのレーザ直線の交点による刺入点呈示を行うとともに, 術具姿勢を, 術具側面の2つのレーザ直線が平行かつ術具の基線と

一致する状態として呈示することができる (Fig. 2)。Fig. 1においてレーザ光照射平面が高さ方向に $\Delta d$ ずれるとレーザ光による刺入点呈示位置P0からP1に変わる。従来手法では実刺入点P0'と目標刺入点P0の間には誤差が生じるのに対して提案手法では誤差は生じない。

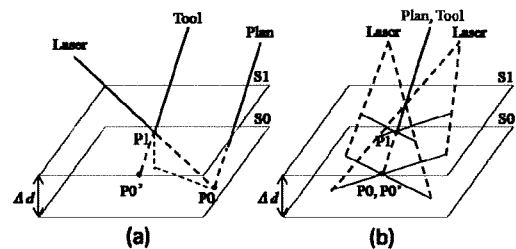


Fig. 1 Principle of the entry point guidance; (a) previous method and (b) proposed method

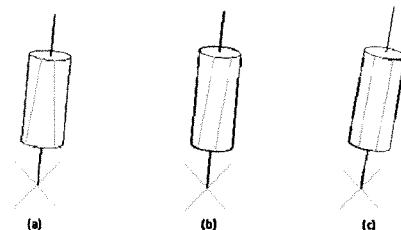


Fig. 2 Procedure of the tool alignment

### 3. 実験装置・方法

#### 3.1 実験装置

レーザナビゲーションシステムは2台のレーザス

キャナ, 光学式位置計測装置(Polaris, Northern Digital Inc., Canada), およびこれらを統合したワークステーションで構成される。レーザスキャナはそれぞれ内部に2つのガルバノミラーを持ち, 任意の位置にレーザを照射することが可能である。レーザ座標系と光学式位置計測装置座標系の関係を校正することにより, 位置計測装置座標系上の任意の位置にレーザを照射することができる。それぞれのレーザスキャナから, 目標とする術具の位置姿勢を含む平面上にレーザを照射することで, Fig. 1(b)に示す様な呈示が可能となる。

### 3.2 実験方法

1) レーザ呈示面の推定誤差が位置誘導精度に与える影響の評価

テーブル上に任意の計画を立て, テーブルの垂直下方向に1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 mmの高さ変形誤差を与えた時の従来手法と提案手法の位置誘導誤差の評価を行った。呈示された位置に赤外線マーカを取り付けたφ3 mmのK-wireの先端を合わせ, 三次元位置姿勢計測装置で条件ごとに50回の測定を行った。評価において姿勢誘導誤差がないものとした。

2) 提案手法における体内深部計画に対する刺入位置誘導精度評価

1)と同様の条件で提案手法による位置姿勢誘導精度評価を行った。

3) 大腿骨モデルに対する経皮的穿刺精度評価

樹脂製大腿骨モデル(1302-65, Sawbones, USA)を用い, 大腿骨骨幹部を切断し, 骨盤と大腿骨に筋肉を模擬した板ゴムおよび軟部組織を模擬した厚さ35mmのスポンジ状の樹脂をとりつけたファントムを用いた。ファントムのCT画像から作成したサーフェスモデル上で近位骨片, 遠位骨片に2本ずつハーフピンを設置する手術計画を整形外科医の指導下で設定した。手術計画をレーザナビゲーションで呈示し, 4名の整形外科医により1本ずつ穿刺を行った。

## 4. 結果及び考察

4.1 レーザ呈示面の推定誤差が位置誘導精度に与える影響の評価

従来手法では高さ変形誤差の増加に伴い位置誘導精度が低下することが確認された(Fig. 3)。一方, 提案手法において位置誘導誤差は高さ変形誤差の影響がないことが確認された。

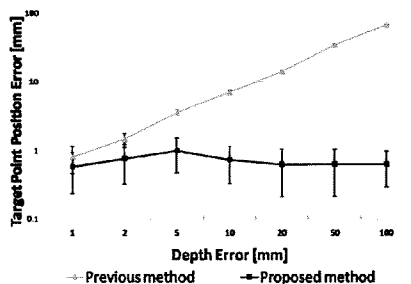


Fig. 3 Positioning accuracy without orientation errors

4.2 提案手法における体内深部計画に対する刺入位置誘導精度評価

結果を Fig. 4 に示す。結果よりレーザ照射平面の高さ変形誤差が大きくなると目標刺入点平面上の位置誤差が大きくなることが確認できた。これはレーザ照射平面の高さ変形誤差が大きくなるほど姿勢誤差の影響が大きくなるからと考えられる。また, 高さ変形誤差20mm以下でRMSEが1mm以下となることが確認された。

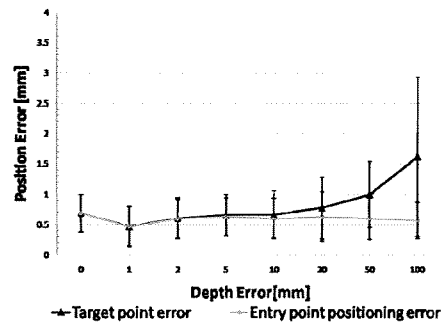


Fig. 4 Result of the positioning accuracy evaluation

4.3 大腿骨モデルに対する経皮的穿刺精度評価

結果を Table 1 に示す。結果より, 位置誤差は最大4.07 mm, 姿勢誤差が最大1.78 degreeであった。原因としては穿刺時の振動やモデルの動き, そして骨モデル表面における針の滑りなどが考えられる。

Table 1 Result of the puncture accuracy evaluation

手術計画	位置誤差 [mm]	角度誤差 [degree]
Plan 1	1.96	0.01
Plan 2	4.07	1.27
Plan 3	3.01	1.78
Plan 4	2.30	1.71

## 5. まとめ

2つのレーザ平面によるレーザナビゲーションにおける経皮的穿刺の可能性について検討を行った。1つのレーザポイントによる従来の手法に比べ提案手法では体内深部における計画において深さの影響が小さいことが確認された。また, 提案手法における体内深部計画に対する位置誘導精度は深さ20mm以下において1mm以下の誤差であることが確認された。大腿骨モデルに対する経皮的穿刺精度評価より, 4 mm, 2 deg程度の精度で経皮的穿刺が可能であることが確認された。

以上より, 2つのレーザ平面によるレーザナビゲーションを用いた経皮的穿刺の可能性が確認された。

## 6. 参考文献

- [1] 中島義和, 菅野伸彦, 他, "レーザガイダンスの特性解析と3次元位置センサ・一体型システムの開発," 日本コンピュータ外科学会誌, vol. 7, no. 1, (2005) pp.15-23.

# レーザを用いた創外固定器の設置支援に関する検討

○林 成煥<sup>a</sup>, 道家 健仁<sup>a</sup>, 小野木 真哉<sup>b</sup>, 中島 義和<sup>a,b</sup>, 光石 衛<sup>a</sup>, 佐久間 一郎<sup>a</sup>, 別所 雅彦<sup>c</sup>, 大西 五三男<sup>c</sup>, 中村 耕三<sup>c</sup>

<sup>a</sup> 東京大学工学系研究科, <sup>b</sup> 東京大学 IML, <sup>c</sup> 東京大学医学系研究科

## External Fixator Placement Using Laser Navigation System

S. Lim<sup>a</sup>, T. Douke<sup>a</sup>, S. Onogi<sup>b</sup>, Y. Nakajima<sup>a,b</sup>, M. Mitsuishi<sup>a</sup>, I. Sakuma<sup>a</sup>, M. Bessho<sup>c</sup>, I. Ohnishi<sup>c</sup>, K. Nakamura<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Graduate School of Engineering, the University of Tokyo, Tokyo, Japan

<sup>b</sup> Intelligent Modeling Laboratory, the University of Tokyo, Tokyo, Japan

<sup>c</sup> Graduate School of Medicine, the University of Tokyo, Tokyo, Japan

**Abstract:** In minimally invasive orthopedic surgery, the external fixation is one of the effective therapy for femoral fracture reduction. But, it is difficult to place the external fixator by using a X-ray fluoroscope. So, we examined the placement accuracy of the laser navigation in fracture reduction with an external fixator. First, we set up it as the surgical plan lines up in parallel on a plane. As planned, we puncture half-pins to the femur phantom model. And, we fixed with an external fixator after the reduction by using punctured half-pin. It was executed by previous method with a two-joint external fixator and proposed method with a jointless external fixator. The above-mentioned experiment was conducted by orthopedist. As a result of fixation with a jointless external fixator, it was possible by the accuracy of 0.5 degrees level to the standard of external fixation. And, the operation time was shortened compared with using a two-joint external fixator. We successfully fixed with a jointless external fixator after the reduction by using a punctured half-pin. The error after the reduction ends was 2.12 mm, and 1.52 deg. As a result, the utility of the laser navigation was confirmed in fracture reduction with an external fixator.

**Keywords:** Minimally invasive surgery, Laser-guided surgical navigation system, Femoral fracture reduction

## 1. はじめに

整形外科における代表的な低侵襲手術の中の一つとして大腿骨骨幹部骨折に対して行う手術である創外固定術がある。この手術で用いる創外固定器は骨折部をスクリューおよびピンによって固定するものであり、低侵襲かつ早期リハビリが可能である。しかし、創外固定器を用いた術式は術中 X 線画像を元に創外固定器の微調整を行うことで骨折整復を行うため、手術時間の短縮およびそれに伴う X 線被曝の減少が望まれている。

簡易に創外固定器による骨折整復を実現するための手法として、整復完了時に創外固定用のスクリューやピンが一直線上に並ぶような術前計画を設定する方法が考えられる。しかし、2次元 X 線画像誘導下で経皮的穿刺を精確に行うためには高度な技術を要する。

一方、設定された手術計画に基づいた穿刺を支援するためのシステムとして、二つの平面レーザ光を術野に照射することによって術野に術具の位置・姿勢誘導情報を直接呈示するレーザナビゲーションシステムが提案されている[1]。レーザナビゲーションは計画に対して 1mm, 1deg 以下の誤差で穿刺を行うことができることが報告されているが、複数のハーフピンの穿刺によって行われる創外固定器の固定において有用であるか明らかではない。そこで、本研究では創外固定器による骨折整復術におけるレーザナビゲーションの有用性について検討した。

## 2. 実験装置・方法

### 2.1 実験装置

レーザナビゲーションシステムは2台のレーザスキャナ、光学式位置計測装置(Polaris, Northern Digital Inc., Canada), およびこれらを統合したワークステーションで構成される。レーザスキャナはそれぞれ内部に2つのガルバノミラーを持ち、任意の位置にレーザを照射することが可能である。レーザスキャナと光学式位置計測装置は一体化されており、レーザ座標系と光学式位置計測装置座標系の関係をキャリブレーションすることにより、光学式位置計測装置座標系上の任意の位置にレーザを照射することが可能である。

手術計画は刺入点を位置、姿勢を Z 軸方向ベクトルとするマトリックスとしてワークステーションよりレーザ制御装置に送信される。それぞれのレーザスキャナから、目標とする術具の位置姿勢を含む平面上にレーザを照射することで術具の位置・姿勢を呈示することが可能となる。

### 2.2 実験方法

樹脂製大腿骨モデル(1302-65, Sawbones, USA)を用い、大腿骨骨幹部を切断し、骨盤と大腿骨に筋肉を模擬した板ゴムを貼り付けたファントムを用いた。大腿骨に軟部組織を模擬したスポンジ状の樹脂をとりつけた。その様子を Fig. 1 に示す。このファントムの CT 撮影を行い、サーフェスモデルを作成し、サーフェスモデル上に開発した手術計画ソフトウェアを用いて 4

本の手術計画を自動的に設定した。4本の手術計画は以下の条件を満たすように設定された。

- 1) 整復完了時、一本のパイプで固定するために4本の計画が一つの平面に含まれつつ、平行である事
- 2) 手術計画が骨軸を通る事
- 3) 手術計画が骨軸と垂直である事
- 4) 近位・遠位各々の計画は一定な間隔を保つ事

なお、手術計画結果については整形外科医による確認を得た。

穿刺実験では、サーフェスモデルとファントムのレジストレーションを行い、手術計画をレーザナビゲーションで呈示した。穿刺は4名の整形外科医により1本ずつ行った。

最後に、整形外科医により刺入された4本のハーフピンを用いて骨折整復を行った後、創外固定器を用いて創外固定を行った。創外固定は2関節創外固定器を用いた従来手法と関節なし創外固定器を用いた提案手法で行った。

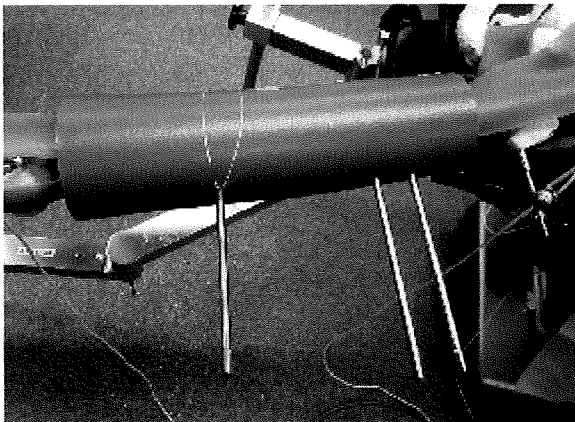


Fig. 1 Result of the half-pin puncture

### 3. 結果

開発したソフトウェアを用いて設定した手術計画は面上に平行に並んでいることが確認できた。また、刺入されたハーフピン両端の3次元位置を光学式3次元位置計測装置(Optotrak, Northern Digital Inc., Canada)を用いて測定しレジストレーション情報を用いてサーフェスモデル上に表した。穿刺結果が平面上からどれくらい外れているかを評価するために4本のハーフピンの両端、8か所の座標を用いて平面近似を行った。その結果を Fig. 2 に示す。一つの平面に含まれていることを評価するために骨軸を回転軸とした時の角度誤差を、穿刺結果が平行であることを評価するために平面の法線を回転軸とした時の角度誤差を求めた。その結果を Table 1 に示す。

Table 1 Orientation errors of the half-pin puncture [deg]

回転軸	Plan1	Plan2	Plan3	Plan4
骨軸	0.39	0.53	0.06	0.20
平面の法線	0.77	1.07	0.11	0.39

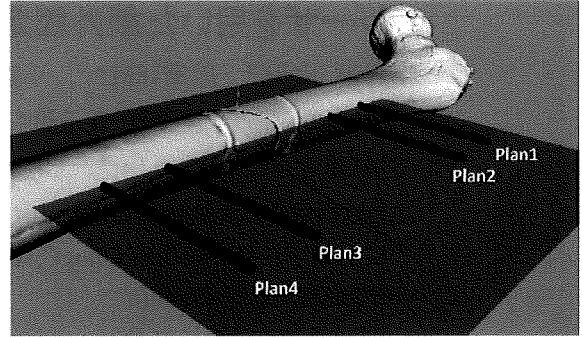


Fig. 2 Result of the half-pin puncture

結果より、骨軸を回転軸としたときの角度誤差は平均  $0.30 \pm 0.16$  deg, 平面の法線を回転軸としたときの角度誤差は平均  $0.59 \pm 0.33$  deg であった。また、2関節創外固定器を用いて創外固定を行った場合の整復時間は269秒であったのに対して関節なし創外固定器を用いて創外固定を行った場合の整復時間は152秒であった。

大腿骨骨幹部骨折を模擬したファントムの整復完了後の誤差は2.12 mm, 1.52 deg であった。整復完了時の様子を Fig. 3 に示す。

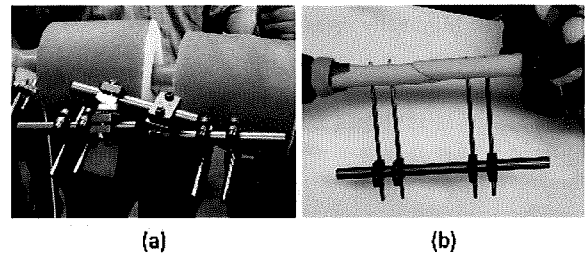


Fig. 3 Result of the reduction;  
(a) two-joint external fixator, (b) jointless external fixator

### 4. まとめ

大腿骨骨幹部整復手術においてレーザナビゲーションを用いて術具の誘導を行った場合、関節なし創外固定器での創外固定規格に対する誤差0.44 deg程度の精度で穿刺することが可能であった。また、穿刺されたハーフピンを用いて整復し、関節なし創外固定器を用いて創外固定を成功的に行った。以上より、創外固定器による骨折整復術におけるレーザナビゲーションの有用性が確認できた。

### 5. 参考文献

- [1] 中島義和, 菅野伸彦, 他, "レーザガイダンスの特性解析と3次元位置センサ・一体型システムの開発," 日本コンピュータ外科学会誌, vol. 7, no. 1, (2005) pp.15-23.

## レーザーナビゲーションによる経皮的創外固定ピン刺入誘導の検討

### Assessment for the Feasibility of External-fixation Pin Guidance Using Laser Navigation

#### Abstract

In these days, external fixation is widely used for femoral fractures because of less-invasiveness of surgical exposure. It requires surgical staff their X-ray exposure by fluoroscopy for aligning bone fragments and fixing the bones by a multi-joint external fixator. A surgical navigation system is often employed to reduce the amount of X-ray exposure by indicating intuitive information for surgical tool guidance. Additionally, it can lead high accuracy and time saving for surgeries. Nakajima et al.<sup>4)</sup> have been proposed a laser navigation method for guiding surgical tool position and orientation. Two laser-beam planes are directly emitted into the surgical field, and the entry point is appeared as the cross-sectional point of two laser-beam lines on the patient's skin and the orientation is shown as two parallel laser-beam lines on the side face of the surgical tool. The accuracy was 1 mm for translation and 1 degree for rotation. The feasibility to apply it to percutaneous surgeries has been predicted in his paper, however it have not been evaluated. Therefore, we evaluate the accuracy of the laser guidance method for percutaneous surgeries in our preliminary experiments and validate the feasibility to apply it to the percutaneous insertion of a surgical pin which uses for external fixation of fractured bones in our phantom tests. We also validate the feasibility of the template surgeries by using a joint-less external fixator for bones. The results show the tool guiding accuracy of 1.39 mm and 1.03 degrees in the condition of percutaneous surgeries and the accuracy of 2.74 mm and 3.28 degrees for bone alignment in the template fracture reduction surgeries.

#### Key words

Minimally invasive orthopedic surgery, Laser-guided surgical navigation, External fixation, Percutaneous puncture, Femoral fracture reduction

## 1. はじめに

急速に進む高齢化に伴い低侵襲手術の需要が高まっている。特に整形外科領域では早期リハビリの開始が重要であるため、人工関節置換術や骨折整復術、関節手術などにおいて低侵襲手術が適用されつつある。低侵襲整形外科を代表とする手術として創外固定器を用いた大腿骨骨幹部骨折整復手術がある。大腿骨骨幹部骨折整復手術は1)皮膚などの軟部組織を切開せず皮膚の上から直接ピンを刺入する経皮的穿刺を行う、2)刺入されたピンに多関節創外固定器を設置する、3)ピンを持って整復し多関節創外固定器を固定するといった手順で行われる。<sup>1),2)</sup>

現行の創外固定器による大腿骨骨幹部骨折整復手術では、術中 X 線画像を基に多関節創外固定器の微調整を行うため、患者および医療従事者の X 線被曝が課題である。骨折整復術に要する X 線被曝を低減する方法として、手術ナビゲーションシステムの利用が考えられる。手術ナビゲーションシステムの導入により、X 線照射を行うことなく術具位置姿勢の確認ができるため、X 線量低減が期待でき、さらには刺入精度向上および手術時間短縮も期待できる。しかしながら、現存する手術ナビゲーションシステムの精度は 2 mm, 2° 程度<sup>3)</sup>であり、より高精度化が望まれている。

従来のナビゲーションシステムにおける誘導誤差の原因のひとつに、術野とナビゲーションディスプレイの間における術者の視線移動が考えられる。それに対して、術具の誘導情報を向上させるアプローチのひとつとして、レーザー光などにより術野に直接、術具位置・姿勢に関する情報を提示する手法が提案されている。N. Glossop<sup>4)</sup>は、1つのレーザーデバイスを用いて刺入点位置を提示する手法を提案した。一方、中島<sup>5)</sup>は刺入位置および刺入姿勢を誘導するため、2つの平面レーザー光を術野に照射する手法を手案した。目標とする手術位置姿勢は術野に描かれる2つのレーザー光平面の交線として提示される。この時、刺入点は術野において2つのレーザー光直線の交点として現れ、刺入姿勢は術具側面において2本の平行なレーザー光直線として現れる。この手法では、術具の刺入位置に加えて刺入姿勢も誘導でき、Glossopらの手法に比べて骨表面上に設定された手術計画に対する経皮的穿刺などにおいても有効である。しかしながら、中島らは本手法が経皮的穿刺術に対しても有効であることについて言及しながらも、その可能性に関する具体的検証を行っていない。

そこで、我々は経皮的穿刺術に対する本手法の基礎的な性能検証を行うとともに、その臨床応用として骨折骨固定のための創外固定ピン刺入への適用可能性について検討する。また、骨に対するピン刺入の高精度化を生かした手術法として、レーザナビゲーションシステムと無関節創外固定器を用いたプレート骨折整復・創外固定法を提案する。

## 2. 方法

### 2. 1 レーザナビゲーション

#### 1) 誘導原理

2 台のレーザスキャナから目標とする術具の位置・姿勢を含む平面上にレーザー光を照射することで、Fig. 1 に示すような呈示が可能となる。刺入点は術野に描かれる2つのレーザー光直線の交点として呈示され、刺入姿勢は術野に描かれる2つのレーザー光平面の交線として呈示される。ここで、術具において刺入位置姿勢の基準となる直線  $l_t$  を術具の基線と呼ぶ。術具の先端を交点に合わせて位置合わせを、スリーブの側面上のレーザー光直線を平行にし、且つ術具基線と一致させることで姿勢合わせを行う。術具の位置・姿勢合わせ手順の詳細については以下に述べる(Fig. 2)。

(a) 術具の先端を 2 つのレーザー光直線の交点に合わせる。(刺入点位置合わせ)

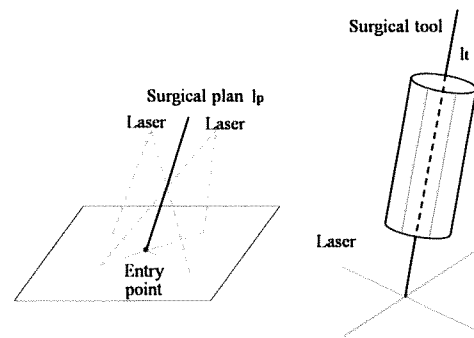


Fig. 1 Principle of the laser navigation system

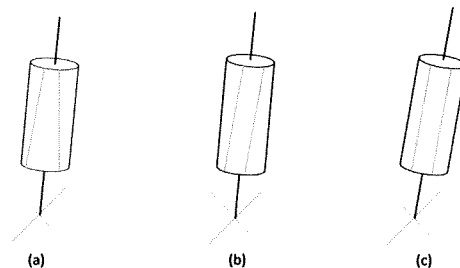


Fig. 2 Procedure of the tool alignment

- (b) 術具を前後に傾けることで2つのレーザー光直線を平行にさせる。(刺入姿勢合わせ)
- (c) 術具を左右に傾けることでレーザー光直線をスリーブの基線に合わせる。(刺入姿勢合わせ)

## 2) 経皮的穿刺における特性

Fig. 3(a) は1つのレーザーデバイスを使った“点”描画による刺入点呈示法の説明図, Fig. 3(b) は2つのレーザーデバイスを使ったレーザー光2平面の“交線”描画による刺入点呈示法の説明図である. 図において, S0は手術対象骨表面などの手術計画面, S1はレーザーが呈示される皮膚表面などのレーザー呈示面を示し, P0, P1はそれぞれ目標刺入点および対象刺入点,  $l_p$ は手術計画直線,  $l_t$ は術具基線を示す. レーザ呈示面 S1 において, 1つのレーザーデバイスを使う手法では点による刺入点呈示を行うが, 術具の刺入姿勢は呈示されない. 対して, 2つのレーザーデバイスを使う手法では2つのレーザー光直線の交点による刺入点呈示を行うとともに, 2つのレーザー光平面の交線による刺入姿勢呈示も行う. 一般的に整形外科手術支援のための手術ナビゲーションは, 対象骨位置・姿勢は正確に計測・トラッキングするが, 皮膚や関節など軟部組織の変形については補償しない. Fig. 3 においてレーザー光照射平面が高さ方向に $\Delta d$ ずれるとレーザー光による刺入点位置はP0からP1に変わる. もし, 呈示された刺入点P1に従い術具の穿刺を行った場合, 1つのレーザーデバイスを使う手法では実刺入点P0'と目標刺入点P0間には誤差が生じ経皮的穿刺術に適用が困難であるのに対して2つのレーザーデバイスを使う手法では两点間に誤差は生じない.

## 3) システム構成および動作

レーザーナビゲーションシステムは2台のレーザーキャナ, 光学式位置計測装置(Polaris, Northern Digital Inc., Canada), およびこれらを統合したワークステーションで構成される. レーザキャナはそれぞれ内部に2つ

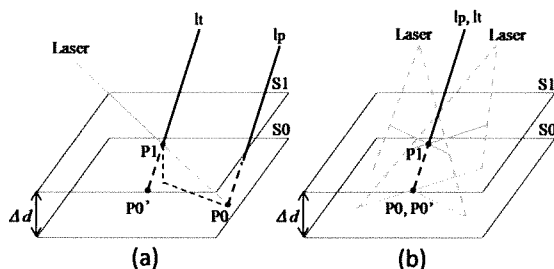


Fig. 3 Characteristic on percutaneous puncture  
(a) single laser method, (b) dual laser method

のガルバノミラーを持ち, 任意の位置にレーザー光を照射することが可能である. Fig. 4 にシステム全体の構成図を示す. 図において, 光学式位置計測装置, レーザキャナ 1, レーザキャナ 2, CT, トラッカ 1, トラッカ 2, および手術計画の座標系をそれぞれ Localizer-CS, Laser1-CS, Laser2-CS, CT-CS, Tracker1-CS, Tracker2-CS, および Plan-CS と示す. また, 光学式位置計測装置とレーザーキャナ 1, レーザキャナ 2, CT, トラッカ 1, およびトラッカ 2 間の座標変換行列をそれぞれ  $T_{Laser1}$ ,  $T_{Laser2}$ ,  $T_{CT}$ ,  $T_{Tracker1}$ , および  $T_{Tracker2}$ , そして CT と手術計画間の座標変換行列を  $T_{Plan}$  と示す. レーザキャナと光学式位置計測装置は一体化されており, レーザ座標系と光学式位置計測座標系の関係をキャリブレーションすることにより, 光学式位置計測装置座標系上の任意の位置にレーザー光を照射することが可能である. また, 手術対象である大腿骨にはトラッカを固定する. このトラッカ上に任意に設置された複数の赤外線 LED の位置を光学式位置計測装置によって検出することで, トラッカの位置・姿勢を測定する. また CT 座標系と光学式位置計測装置座標系の関係は, CT モデルを手術空間上にマッピングするレジストレーション作業を行うことによって計算する. これらの情報を基に, CT 座標系から刺入点を位置, 姿勢を Z 軸方向ベクトルとするマトリックスとして設定された手術計画直線のレーザー照射デバイスに対する位置姿勢を計算し, レーザ光を照射する.

## 2. 2 術前計画

無関節創外固定器を用いた創外固定のため, 手術計

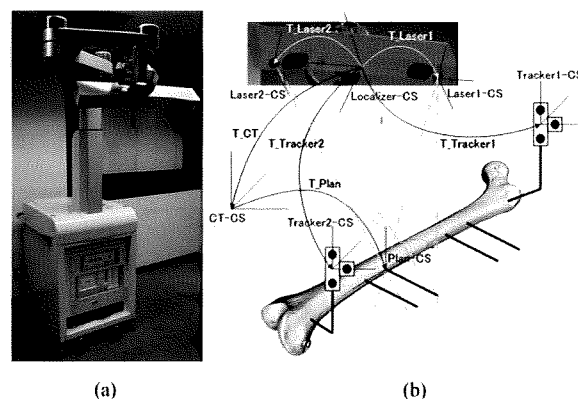


Fig. 4 Overview of laser navigation system;  
(a) appearance, (b) coordinate transform



画を作成する。手術計画作成時の拘束条件を以下に示す。

- 4本の手術計画直線が一つの平面に含まれている。
- 4本の手術計画直線がお互いに全て平行である。

大腿骨骨幹部骨折整復手術における手術計画の条件を満たしながら大腿骨の幾何学的最適化条件を満たすように手術計画を設定する。以下に幾何学的最適化条件を具体的に述べる。

- 手術計画が骨軸を通る。
- 手術計画が骨軸と垂直である。
- 近位・遠位各々の計画は一定な間隔を保つ。

上記の拘束条件に基づき、手術計画を最適化するアルゴリズムを以下に示す。

#### Phase 1：初期条件の入力

初期条件として骨折部から近位骨片上の一番近い計画までの距離、骨折部から遠位骨片上の一番近い計画までの距離、骨軸を回転軸としたときの手術計画の刺入角、そして近位・遠位各々の計画間隔を設定する。

#### Phase 2：円筒近似による骨軸の推定

初期条件として設定された骨折部から近位骨片上の一番近い計画までの距離および骨折部から遠位骨片上の一番近い計画までの距離を基準として大腿骨 3D サーフェスマodelを一定の間隔で近位・遠位骨片ともに切断する。そして、切断された二つの 3D サーフェスマodelを各々円筒近似することによって近位・遠位骨片の骨軸を推定する。近位・遠位骨片の骨軸が推定できたら二つの骨軸を直線近似し、一本の大腿骨軸を推定する。

#### Phase 3：手術計画の計算

推定された一本の大腿骨軸を垂直かつ一定の間隔を保ちながら大腿骨軸を通るような4本の手術計画の位置および姿勢を計算し、出力する。

以上のアルゴリズムを実装した大腿骨骨幹部骨折整復手術の術前計画ソフトウェアを開発した。

### 2. 3 骨折整復および創外固定

手術計画直線が平面上に平行に並ぶような拘束条件を満たすように設定された術前計画 (Fig. 5 (a)) に従い、レーザナビゲーションシステムを用いて術具を誘導し、計画された位置に創外固定ピンを刺入する (Fig. 5 (b))。刺入された創外固定ピンが平面上に平行に並ぶように整復を行い、創外固定ピンを無関節創外固定器で固定する (Fig. 5 (c))。

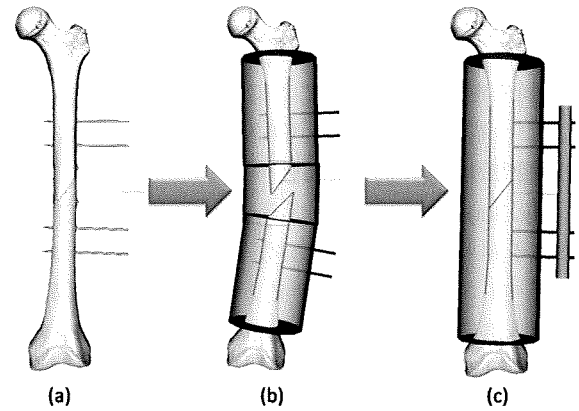


Fig. 5 Proposed method; (a) surgical plan, (b) percutaneous puncture using laser navigation system, (c) fracture reduction using joint-less external fixator

## 3. 実験

### 3. 1 レーザナビゲーションの特性検証

#### 1) レーザ呈示面のオフセットに対する刺入点位置誘導精度の評価

1つのレーザデバイスを用いた手法と2つのレーザデバイスを用いた手法の比較・検証を行った。赤外線トラックを取り付けたφ3 mmのK-wireの先端および姿勢を3次元位置姿勢計測装置を用いて測定した。実験方法はテーブル上に任意の計画を立て、その計画に1つのレーザデバイスを用いた手法と2つのレーザデバイスを用いた手法の2つの手法でレーザ光を照射し刺入点誘導を行った。照射された刺入点とK-wire先端の位置合わせを行いK-wire先端の位置を測定した。次に、計画をテーブルの垂直下方向にずらすことによって目標刺入点平面からレーザ照射平面までの深さ方向のオフセットを与えた。オフセットは1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 mmの7種類とした。以上の測定は条件ごとに50回繰り返し行った。K-wire先端位置から計画の姿勢で目標刺入点平面まで伸ばしたときの交点と目標刺入点との距離を位置誤差として算出した。その結果を Fig. 6に示す。

結果より、1つのレーザデバイスを用いた手法ではオフセットの増加に対して、位置誘導精度が低下することを確認した。一方、2つのレーザデバイスを用いた手法において位置誘導誤差はオフセットに対して有意差がないことを確認した。

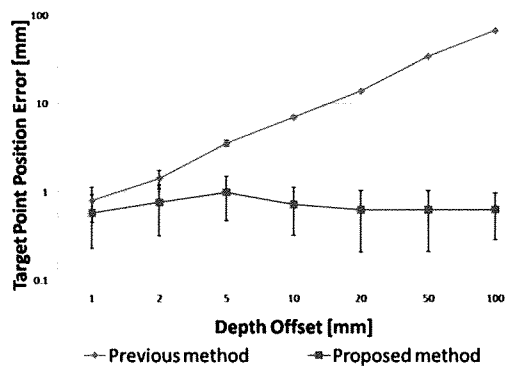


Fig. 6 Result of the experiment for comparing single laser method and dual laser method

## 2) レーザ呈示面オフセットに対する計画目標点における位置姿勢誘導精度の評価

テーブル上に位置姿勢がランダムな計画を設定した後、設定された計画にレーザナビゲーションを用いて刺入点位置姿勢の誘導を行った。その後、K-wire の位置姿勢合わせを行い、K-wire の位置姿勢を測定した。それ以外の実験方法は実験 1)と同様に行った。測定された K-wire 先端位置を測定された K-wire 姿勢方向に目標刺入点平面まで伸ばしたときの交点と目標刺入点との距離を位置誤差として算出した。その結果を Fig. 7 に示す。

結果より、レーザ照射平面の深さ方向のオフセットが大きくなると目標刺入点平面上の位置誤差が大きくなることを確認した。また、オフセット 20 mm で二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square 誤差。以下、RMS 誤差と表す) が 0.92 mm であり、オフセット 50 mm で RMS 誤差が 1.13 mm であった。

## 3. 2 骨折骨固定のための創外固定ピン刺入実験

樹脂製大腿骨モデル(1100, Sawbones, USA)を用い、大腿骨骨幹部を切断し、骨盤と大腿骨に筋肉を模擬した板ゴムおよび皮膚などの軟部組織を模擬したスポンジ状の樹脂(厚さ 30 mm)を取り付けたファントムを製作した。その様子を Fig. 8(a)に示す。大腿骨ファントムは合計 7 体製作した。製作したファントムの CT 撮影を行い、サーフェスモデルを作成し、サーフェスモデル上に開発した手術計画ソフトウェアを用いて 4 本の手術計画を設定した。設定された手術計画は整形外科医による確認を得た。

実験では、サーフェスモデルとファントムのレジス

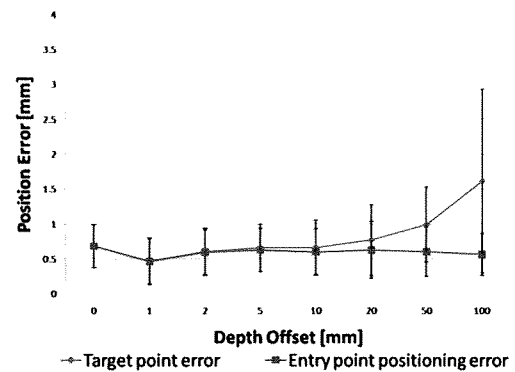


Fig. 7 Accuracy of tool guidance on depth error

トレーションを行い、手術計画をレーザナビゲーションで呈示した。レジストレーション方法としては点対応レジストレーションを行った後、サーフェスレジストレーションを行うハイブリッドレジストレーション方法を用いた。また、穿刺は 4 名の整形外科医により行われた。1 体の大腿骨ファントムに対して、近位・遠位各々 2 本、合計 4 本のハーフピンを刺入した。穿刺実験で用いた術具を Fig. 8(b)に示す。刺入手順の詳細を以下に述べる。

- ① レーザナビゲーションの誘導に従い、K-wire 用のスリーブを用いて K-wire( $\phi 2$  mm)を刺入する。
- ② K-wire が刺入された状態で皮膚を切開する。
- ③ 3 段スリーブを刺入された K-wire に沿って皮膚の中に挿し込む。
- ④ 3 段スリーブの 1 段を抜く。
- ⑤ 中空ドリルバイト( $\phi 4.8$  mm)を用いて下穴を開け

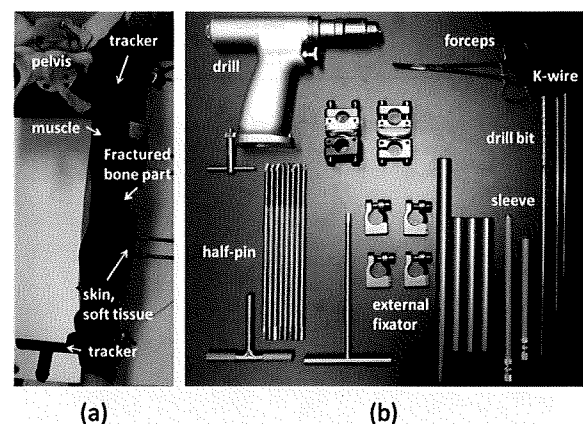


Fig. 8 Experimental tools; (a) Femur phantom, (b) Surgical tools

- る。(刺入された K-wire を通す.)
- ⑥ スリーブを保持したまま 3 段スリーブの 2 段を抜いてハーフピン(φ 6 mm)を刺入する。

レーザナビゲーションにおける経皮的穿刺精度の評価を行った。評価方法としてサーフェスモデル上の手術計画ベクトルと刺入されたハーフピンのベクトルを比較した。評価項目は、設定された手術計画を基準として刺入されたハーフピンの位置誤差および姿勢誤差とした。3 次元位置計測誤差が 0.15mm である光学式 3 次元位置計測装置(Optotrak, Northern Digital Inc., Canada)を用いて刺入されたハーフピン両端の位置を測定し、近位骨片および遠位骨片各々のレジストレーション情報を用いて測定された 3 次元座標を光学式 3 次元位置計測装置座標系から CT 座標系に変換することで、刺入されたハーフピンのベクトルをサーフェスモデル上に表した。

以上の評価を 7 体の大腿骨ファントムモデルに刺入された合計 28 本のハーフピンに対して行った。結果とその一例をそれぞれ Table. 1 と Fig. 9 に示す。位置誤差の平均誤差および標準偏差は  $0.12 \pm 1.38$  mm であり、姿勢誤差の平均誤差および標準偏差は  $0.34 \pm 0.97$  °であった。また、各々の RMS 誤差は 1.39 mm, 1.03 °であった。最大位置誤差は 2.86 mm, 最小位置誤差は 0.55 mm, 最大姿勢誤差は 1.91 °, 最小姿勢誤差は

Table 1 Accuracy of the percutaneous puncture

	Position (mm)	Orientation (degrees)
Mean ± SD	0.12 ± 1.38	0.34 ± 0.97
RMSE	1.39	1.03
Max	2.86	1.91
Min	0.55	0.18

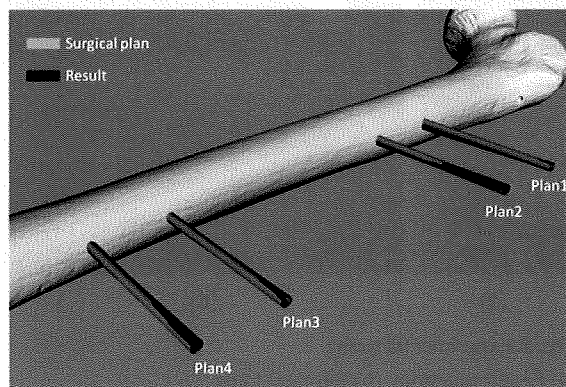


Fig. 9 Accuracy evaluation of percutaneous punctures

0.18 ° であった。以上より、レーザナビゲーションによる経皮的穿刺が有効であることを確認した。

### 3. 3 テンプレート骨折整復・創外固定の評価

実験環境および条件は 3.2 章と同様にし、さらにハーフピンが刺入されたファントムモデルの骨折部を布で被せて見えないようにした。整形外科医により大腿骨骨折整復ナビゲーションおよび刺入された 4 本のハーフピンを用いて骨折整復を行った後、創外固定器を用いて創外固定を行った。創外固定は二関節創外固定器を用いた従来手法と無関節創外固定器を用いた提案手法を試行した。実験は 4 名の整形外科医が 7 体のファントムモデルに対して行い、整復開始から整復完了までの時間を測定した。

#### 1) 無関節創外固定器の適用可能性評価

レーザナビゲーションの誘導によって刺入された 4 本のハーフピンを用いる無関節創外固定器の設置可能性について、無関節創外固定器の適用可能性を評価した。光学式 3 次元位置計測装置を用いて刺入されたハーフピン両端の位置を測定し、レジストレーション情報を用いてサーフェスモデル上に刺入されたハーフピンを表した。ピンの穿刺結果が創外固定器設置平面に対して外れている距離を評価するために 8 か所 (4 本のハーフピンの両端) の座標を用いて平面近似を行った。結果の一例を Fig. 10 に示す。穿刺結果が一つの平面に含まれていることを評価するために、近似した平面と刺入されたハーフピンの角度誤差を求めた。また、穿刺結果が平行であることを評価するために平面の法線を回転軸としたときの角度誤差を求めた。以上の評価を 7 体の大腿骨ファントムに対して行った。

結果より、近似した平面との角度誤差については平均誤差および標準偏差が  $0.18 \pm 0.50$  ° であり、RMS 誤差は 0.52 ° であった。また、平面の法線を回転軸としたときの角度誤差については標準偏差が 0.59 ° で

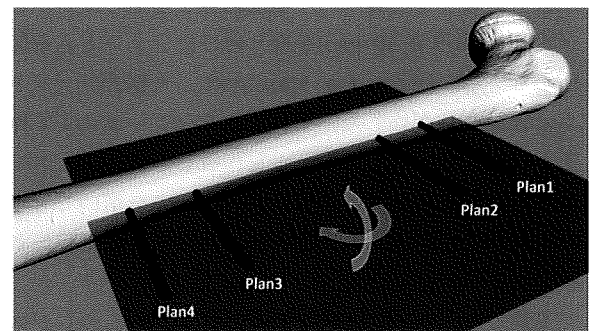


Fig. 10 Feasibility evaluation of joint-less external fixation

あった。以上より、レーザナビゲーションの誘導によって刺入された4本のハーフピンを用いることで無関節創外固定器を設置することが可能であることを確かめた。

## 2) 骨折整復精度評価

大腿骨骨幹部骨折整復におけるレーザナビゲーションを用いた無関節創外固定法の有効性を調べるために、骨折整復精度を評価した。評価方法として、二関節創外固定器を用いた創外固定による骨折整復の場合と無関節創外固定器を用いた創外固定による骨折整復の場合の骨折整復精度と整復時間を比較した。評価項目は、整復完了時の近位骨片と遠位骨片の角度誤差および骨折部の位置誤差とした。角度誤差に関しては内旋方向および腹側方向、内側方向を正とした。結果を **Table 2** と **Table 3** に示し、整復完了状態の一例を **Fig. 11** に示す。

結果より、二関節創外固定器を用いた従来手法での整復精度は、位置誤差の平均誤差および標準偏差が  $4.25 \pm 1.19$  mm, RMS 誤差が 4.37 mm, 内旋方向の角度誤差の平均誤差および標準偏差が  $-1.53 \pm 2.33$  °, RMS 誤差が 2.53 °, 前屈方向の角度誤差の平均誤差および標準偏差が  $-0.87 \pm 2.50$  °, RMS 誤差が 2.33 °, 内反方向の角度誤差の平均誤差および標準偏差が  $2.50 \pm 2.94$  °, RMS 誤差が 4.37 °であった。また、無関節創外固定器を用いた提案手法での整復精度は、位置誤差の平均誤差および標準偏差が  $2.49 \pm 1.22$  mm, RMS 誤差が 2.74 mm, 内旋方向の角度誤差の平均誤差および標準偏差が  $0.04 \pm 0.67$  °, RMS 誤差が 0.58 °, 前屈方向の角度誤差の平均誤差および標準偏差が  $-1.14 \pm 2.32$  °, RMS 誤差が 2.31 °, 内反方向の角度誤差の平均誤差および標準偏差が  $2.87 \pm 2.21$  °, RMS 誤差が 3.45 °であった。整復時間に関しては二関節創外固定器を用いて整復を行った場合、平均 917 秒だったのに対して無関節創外固定器を用いて整復を行った場合、平均 402 秒であった。以上より、大腿骨骨幹部骨折整復においてレーザナビゲーションを用いた無関節創外固定法が有効であることを確かめた。

## 4. 考察・結論

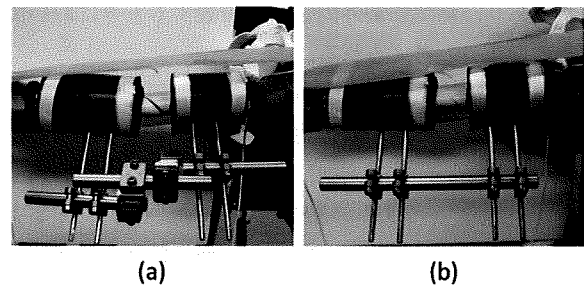
本研究ではレーザナビゲーションを用いた無関節創外固定器の設置法を提案し、その精度評価を行った。具体的には経皮的穿刺におけるレーザナビゲーションの特性を検証するための特性検証実験、そしてレーザ

**Table 2** Accuracy of the fracture reduction with two-joint external fixator

Parameter	Mean $\pm$ SD	RMSE
Internal (axial) rotation (degrees)	$-1.53 \pm 2.33$	2.53
Antecurvature (front/back) rotation (degrees)	$-0.87 \pm 2.50$	2.33
Varus rotation (degrees)	$2.50 \pm 2.94$	3.57
Displacement (mm)	$4.25 \pm 1.19$	4.37

**Table 3** Accuracy of the fracture reduction with joint-less external fixator

Parameter	Mean $\pm$ SD	RMSE
Internal (axial) rotation (degrees)	$0.04 \pm 0.67$	0.58
Antecurvature (front/back) rotation (degrees)	$-1.14 \pm 2.32$	2.31
Varus rotation (degrees)	$2.87 \pm 2.21$	3.45
Displacement (mm)	$2.49 \pm 1.22$	2.74



**Fig. 11** Result of the femoral fracture reduction; (a) two-joint external fixator, (b) joint-less external fixator

ナビゲーションの誘導による経皮的穿刺精度評価およびそれによる無関節創外固定器設置精度評価のためのファントム実験を行った。

レーザナビゲーションの特性検証実験の結果から 2 つのレーザデバイスを用いた手法では姿勢誘導誤差がない条件下では深部における位置誘導精度は深さ方向のオフセットに依存せず、経皮的穿刺の誘導が可能であることを確認した。

また、姿勢誘導誤差がある条件では深さ方向のオフセットが大きくなるほど深部における位置誘導誤差も大きくなった。これは深部における刺入点誘導誤差は姿勢合わせ誤差およびオフセットに比例して大きくなるためと考えられる。実験結果より厚み 20 mm で

RMS 誤差が 0.92 mm であり、厚み 50 mm で RMS 誤差が 1.13 mm であることから厚み 50 mm 程度までの経皮的穿刺においてレーザナビゲーションは有効であると考えられる。

ファントム実験におけるレーザナビゲーションによる経皮的穿刺精度評価の結果、厚さ 30 mm の軟部組織を有する大腿骨ファントムに対して RMS 誤差 1.39 mm, 1.03° でハーフピンの穿刺が可能であった。テーブル上で行ったレーザナビゲーションの特性検証実験結果より誤差が大きくなった原因としては穿刺時の振動やモデルの動き、そして骨モデル表面における針の滑りなどが考えられる。一方、手術ナビゲーションシステムを用いて穿刺を行う場合において 2 mm, 2° 程度の誤差が生じると報告されていることから、本システムによって高精度な経皮的穿刺のナビゲーションが可能であると言える。

ファントム実験による無関節創外固定器の適用可能性評価の結果、7 体のファントムに対して刺入されたハーフピンは RMS 誤差 0.52° で平面上に並び、RMS 誤差 0.59° で平行に並んでいた。両方とも 1° 未満の値であり、無関節創外固定器を設置するときにおいて有効であると考えられる。

ファントムを用いた骨折修復精度評価の結果、従来手法である多関節創外固定器による修復精度は位置誤差が 4.37 mm, 内旋方向, 前屈方向, 内反方向の角度誤差が 2.53°, 2.33°, 3.57° であった。また、提案手法である無関節創外固定器による修復精度は位置誤差が 2.74 mm, 内旋方向, 前屈方向, 内反方向の角度誤差が 0.58°, 2.31°, 3.45° であり、提案手法を用いた修復でも従来手法を用いた手法と同程度の精度で修復が可能であることを確認した。特に、大腿骨骨幹部骨折手術においてもっとも重要な内旋, 外旋に関しては高い精度であった。また、提案手法による修復の場合、従来手法による修復に比べて修復時間が短縮されていた。自由度が高く微調整が困難である二関節創外固定器の代わりに微調整が容易な無関節創外固定器を用いたことが原因として考えられる。結果より、術者の負担低減及び手術時間の短縮が期待される。

一方、今回の実験で用いた樹脂製のファントムモデルは骨の重さや軟部組織の性質など、実際の大腿骨とは違うものであり、今後臨床への適用に向けて動物実験など、より臨床に近い場面を模擬した検証実験を行う必要がある。また、レーザナビゲーションによる経

皮的穿刺は大腿骨骨折治療のほか脊椎治療など整形外科領域において経皮的穿刺を要する手術への応用も可能であると考えられる。

以上より、レーザナビゲーションを用いることで高精度な穿刺が可能であり、無関節創外固定器による低侵襲な骨折修復の可能性が示唆された。

## 謝辞

本研究の一部は厚生労働科学研究費、医療機器開発推進研究事業（ナノメディシン研究）による。

## 文献

- 1) Shyam Kishan, Sanjeev Sabharwal, et al., External Fixation of the Femur: Basic Concepts. *Techniques in Orthopedics*. 2002;17(2):239-244
- 2) T.K.K. Koo, E.Y.S. Chao, A.F.T. Mak., Development and validation of a new approach for computer-aided long bone fracture reduction using unilateral external fixator. *Biomechanics* 2006;39:2104-2112
- 3) E. Kraats, T. Walsum, J. Verlaan, et al. Three- Dimensional Rotational X-Ray Navigation for Needle Guidance in Percutaneous Vertebroplasty: An Accuracy Study. *SPINE* 2006;31(12):1359-1364
- 4) 中島義和, 菅野伸彦, 桃井康行ほか. レーザガイダンスの特性解析と三次元位置センサ・一体型システムの開発. *日本コンピュータ外科学科誌* 2005;7(1):15-23
- 5) N. Glossop, C. Wedlake, J. Moore, et al., Laser Projection Augmented Reality system for Computer Assisted Surgery. *MICCAI* 2003;239-246
- 6) T. Sasama, N. Sugano, Y. Sato, et al., A Novel Laser Guidance System for Alignment of Linear Surgical Tools: Its Principles and Performance Evaluation as a Man-Machine System. *MICCAI* 2002;125-132
- 7) Y. Nakajima, H. Yamamoto, Y. Sato, et al., Available Range Analysis of Laser Guidance System and its Application to Monolithic Integration with Optical Tracker. *CARS* 2004;06:449-454
- 8) I. Ohnishi, T. Matsumoto, J. Matsuyama, et al., Multi-plane deformity correction using a unilateral external fixator with a universal bar link system. *JBJS* 2009;91-B:138
- 9) J. Marmurek, C. Wedlake, U. Pardasani, et al., Imate- Guided Laser Projection for Port Placement in Minimally Invasive Surgery. *Studies in health technology and informatics*. 2006;119:367-372
- 10) A. Takeda, K. Sakai, T. Mitsui, et al., Management of large cystic adnexal tumor by gasless laparoscopic- assisted surgery with wound retractor. *Journal of Minimally Invasive Gynecology*. 2007;14:644-650

