

腹部投影方式による腹腔鏡下手術支援システム：

鉗子挿入支援機能の開発

牛木 卓^{*1} 小石 毅^{*1} 中口 俊哉^{*2}

林 秀樹^{*3} 津村 徳道^{*2} 三宅 洋一^{*3}

要旨

腹腔鏡下手術において、鉗子挿入の際に手術対象外の臓器に鉗子が誤って接触し損傷させる事例が数多く報告されている。この原因として、腹腔内の腹腔鏡の位置・向きの直感的な把握が困難なことが挙げられる。そこで本研究では、立体視プロジェクターを用いた患者腹部への画像の重畳表示によって、鉗子の挿入支援を行うシステムを構築することを目的とした。重畳表示には、腹腔内の腹腔鏡とその撮影範囲の立体的な画像を用いる。本システムでは、腹部形状を取得することによって、投影による画像の歪みを補正した。さらに、術者の視点位置をリアルタイムで取得することによって、投影画像を術者の視点移動に対応させた。また、通常の手術方式との比較実験により本提案システムに基づく鉗子挿入操作の有効性を確認した。

キーワード：腹腔鏡下手術, Augmented Reality, プロジェクター投影, 鉗子挿入支援

1. はじめに

腹腔鏡下手術は、腹部に開けた小さな操作孔から腹腔鏡(CCD カメラ)や鉗子等の器具を体内に挿入し、モニタを観察しながら行う手術である。傷口が小さく術後の回復が早いことから、低侵襲手術として注目を集めている。しかしながら、腹腔鏡下手術は、視野が腹腔鏡画像に限定されることや特殊な手術器具を用いることなどから医師の負担が大きく、また手術過誤も数多く報告されている。そこで、

医師の負担を低減するために、Kitasaka らの仮想腹腔鏡による術前計画支援 [1] や、佐藤らのモニタへの術前情報の重畳表示による術中支援 [2]、ヘッドマウントディスプレイを用いた腹腔内の 3 次元情報の表示 [3]、腹腔鏡下手術の技術習得を行うシステム(Mentice 社 Procedicus MIST)など、様々なシステムが研究・開発されている。腹腔鏡下手術が通常の開腹手術と大きく異なる点は、術者の視野の違いである。通常の開腹手術では、医師は患者の手術部位を直接見ることができのに対して、腹腔鏡下手術ではモニタ越しに手術部位を見ることになる。このため、腹腔鏡下手術では、術者の鉗子操作とモニタ上の鉗子の動きは大きく異なる。術者はこれらの対応(hand-eye coordination)を頭の中で行う必要があり大きな負担となっている。腹腔鏡下手術において、開腹手術と同様に、患者の腹壁が

*1 千葉大学大学院自然科学研究科 [〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33]

e-mail: uhiki@graduate.chiba-u.jp

*2 千葉大学工学部情報画像工学科

*3 千葉大学フロンティアメディカル工学研究開発センター

投稿受付：2006 年 5 月 19 日



Fig .1 The simple projector system

透けて手術部位を直接見ながら手技を行うことが出来れば、両者の視野の違いはなくなり、対応付けの負担は低減される。

本研究では、腹腔鏡下手術の視野を通常の開腹手術の視野に近づけることによって、術者の負担を低減させることを最終的な目標とし、プロジェクターを用いた患者腹部への画像の投影による手術支援方式を提案する。しかし、腹腔鏡下手術の視野を通常の開腹手術の視野と一致させることは、腹腔内の3次元形状を実時間で取得する必要がある、現在の技術では実現が困難である。そこで、まず腹腔鏡下手術の視野を通常の開腹手術の視野に近づける最初のステップとして、我々は腹腔鏡画像を単純に患者の腹部に投影する方式(単純な投影方式)を提案した[4]。すなわち、腹腔鏡画像を腹部に投影することによって、患部、鉗子把持部を同時に視野に入れることが可能となりその有効性を確認した。

そこで本研究では、従来の単純な投影方式を発展させた腹腔鏡画像の撮影範囲を術者に立体的に提示する方式(挿入支援方式)を提案する。本方式によって、術者は腹腔鏡画像の撮影範囲への鉗子の挿入が容易になり、挿入時の事故の危険が減少すると考えられる。また、単純に画像を投影する従来の手法では投影面である腹部の形状により画像に歪みが生じる。さらに、その歪みは術者の視点位置によって変化する。そこで、本研究では、患者

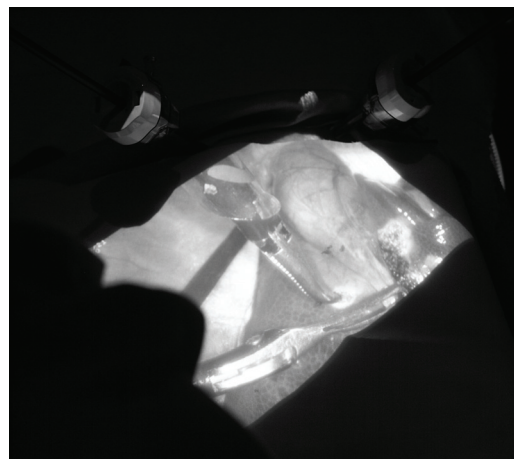


Fig .2 The laparoscopic image projected on abdomen

の腹部形状を事前を取得し、術者の視点位置をリアルタイムで取得することによって、腹部の形状と視点移動に応じた歪み補正も行った。この手術手法と通常手術方式による鉗子挿入の経路を追跡する評価実験により、本システムの有効性を確認した。

2. 従来の投影方式

我々はこれまでの研究において、腹腔鏡下手術に熟練した医師の協力のもとで、腹腔鏡画像の腹部投影が術者の支援となり得るかを実験により検討した。これまでの実験の内容と結果を簡単に示す。

1) 実験の構成と内容

これまでに提案した投影方式の実験の様子を **Fig.1**, **Fig.2** に示す。患者上部に設置したプロジェクターにより患者腹部へ腹腔鏡画像を投影する。モニターで腹腔鏡映像を見ながら手技を行う通常の方法と、プロジェクターにより患者腹部に投影された腹腔鏡画像を見ながら手技を行う投影方式との間で比較を行った。実験は無菌豚による動物実験を2度実施し、腹腔鏡下手術の基本的な手技である胆嚢摘出を行った。アンケートによる主観評価実験により投影方式の有効性を検討した。また、2度目の実験では、タスクを設けることで鉗子の操作性を定量的に評価した。

2) 実験結果

タスクによる操作性の評価では、投影方式は鉗子挿入をスムーズに行える場合が見られたことから、鉗子の挿入操作に対して有効となる可能性が示された。アンケートによる主観評価では、操作への集中、肉体的ストレスの点で、投影方式は通常のモニタ方式より優位である可能性が示唆された。一方で、投影された画像の画質はモニタに比較し劣化していると判断された。これは投影面である腹部の形状と色により投影された画像の形・色が歪むためであると考えられる。

そこで、以下の投影方式で手技を実施し、最適な投影方式について検討した。(1)単純に腹部に画像を投影する方式、(2)白い布を腹部に被せて投影する方式、(3)患者腹部の上部に設置した白色スクリーンに画像を投影する方式。Fig.1 は、方式(3)のスクリーンを設置したときの様子である。一方、スクリーンを用いた方式では、画像の歪みや色の変化が減少し画質が向上した。しかし、設置したスクリーンが鉗子操作の妨げになることが問題となった。以上の結果を踏まえ、今後のシステムでは、白い布を用いる方式(2)を適用し、投影画像の歪み補正を行うことが必要であると結論した。

3. 提案する投影方式

以上述べたように、腹腔鏡画像の腹部投影は、鉗子の挿入操作に対して有効となる可能性が示された。本研究では、この結果に基づき、腹腔鏡下手術の鉗子挿入時における事故について考察する。またその考察から鉗子の挿入操作を支援するシステムを構築する。

1) 鉗子挿入時における事故

腹腔鏡下手術における鉗子挿入の際に、鉗子の先端が誤って手術対象外の臓器に接触し、臓器を損傷させる事例が報告されている。そこで、この鉗子挿入時における誤接触の危険度を状況別に考える。腹腔鏡の撮影範囲の中に鉗子の先端がある場合には、腹腔鏡画像内に鉗子が映し出されるため、術者は誤接触を

しないように慎重に鉗子を操作することが出来る。そのため、撮影範囲の中では誤接触の危険度は低い。一方、撮影範囲の外に鉗子の先端がある場合には、術者は鉗子と危険な臓器との位置関係を画像から判断することが出来ない。そのため、撮影範囲の外では誤接触の危険度が高い。

鉗子の操作は誤接触の危険度の低い腹腔鏡の撮影範囲で行うことが望ましい。このような操作を行うためには、腹腔内の腹腔鏡と鉗子の姿勢を把握しなければならない。通常のモニタを用いる手術方式では、術者は腹腔鏡画像に映し出される臓器・体外の腹腔鏡の向き・操作した鉗子などの情報から、腹腔内の様子を把握しなければならない。特に、鉗子の挿入時においては、腹腔鏡画像に映し出される臓器・体外の腹腔鏡の向きのみに情報が限定されることから、撮影範囲を把握することはさらに困難になる。

2) 撮影範囲表示による鉗子挿入支援

従来の腹腔鏡下手術では、腹腔鏡の撮影範囲を経験的に把握していた。そこで本研究では、腹腔鏡の撮影範囲を術者に立体的に提示することによって、腹腔鏡の撮影範囲の直感的な把握を実現するシステムを構築する。腹腔鏡の撮影範囲の直感的な把握によって、誤接触の危険度の低い鉗子挿入が可能になると考えられる。

本システムでは、プロジェクターを用いた患者腹部へ画像の重畳表示によって、腹腔鏡の撮影範囲を術者に提示する。また、立体プロジェクター(StereoGraphics 社製 DepthQ)とステレオメガネ(StereoGraphics 社製 CrystalEyes)を用いることで立体表示を実現する。提案するシステムの構成を Fig.3 に示す。

患者への画像の重畳表示にはプロジェクターを用いる手法 [5]、ハーフミラーを用いる手法 [6]、ヘッドマウントディスプレイを用いる手法 [7] などがある。本システムでは空間的制約が少なく、医師への負担が軽いプロ

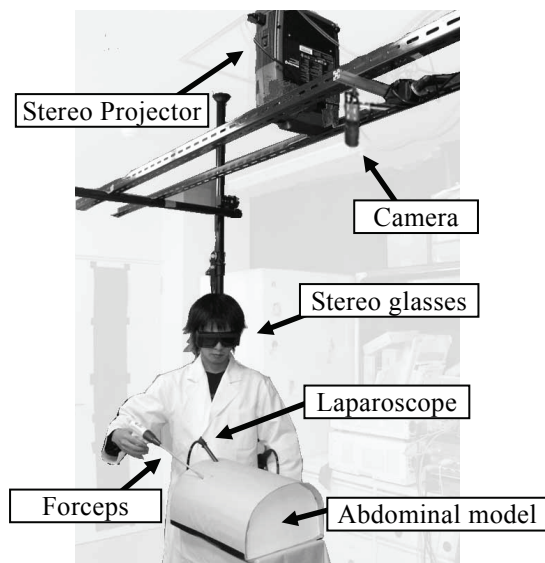


Fig.3 The system's configuration

ジェクターを用いる。

プロジェクターを用いた患者腹部への画像の重畳表示では、投影面である腹部が平面ではないため、投影された画像に歪みが生じる。またその歪みは視点の移動によって変化する。そこで、本システムは投影面である腹部の形状を取得し、また術者の視点位置をリアルタイムに取得することによって、腹部の形状・視点移動に応じた、画像の歪み補正を行う。歪み補正の流れを Fig.4 に示す。

3) 視点位置、投影面形状の取得

視点位置の取得に磁気位置センサー (Polhemus 社製 LIBERTY) を用いる。磁気位置センサーをステレオメガネに取り付けることによって術者の視点位置を取得する。

腹部の形状は、患者上部に設置されたプロジェクターとカメラを用いて、物体までの距離を計測する手法として広く用いられている空間コード化法 [8] により取得する。空間コード化法の基本的な原理は、(1)プロジェクターでパターン光を投影することによって、物体にコードを割り当てる。(2)コードを割り当てられた物体をカメラで撮影することによってプロジェクターの画素とカメラの画素の対応をとる。(3)それらの対応関係から三角測量

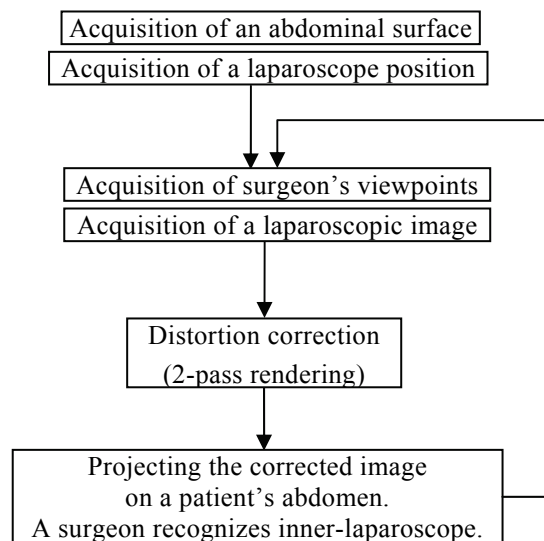


Fig.4 The flow chart of our system

によって物体のある一点までの距離を算出する。以上の流れで物体までの距離を計測する。また本システムでは、投影パターンに隣接画素間のコードのハミング距離が 1 となり、ノイズにロバストなグレイコードパターン [9] を用いた。

4) 投影画像の歪み補正

取得した腹部の形状・視点位置を考慮して投影画像の歪み補正を行った。Raskar らは計算機上で投影による歪みを逆計算した画像を生成し、生成した画像を実空間上で投影することによって投影による歪みを補正した [10]。本システムは Raskar らのレンダリング法を適用し投影による歪みを補正した。Raskar らのレンダリング法を適用することで、投影面の形状、視点の変位に対応した歪み補正を行うことが出来る。また本システムでは、立体プロジェクターとステレオシャッターメガネを用いた両眼立体視差方式により立体表示を行う。磁気位置センサーで取得した両眼の位置を用いて Raskar らのレンダリング法で右目用・左目用の画像を別々に生成し、立体プロジェクターによってそれらの画像を交互に投影する。プロジェクターとステレオシャッターメガネは同期しており、左右の目に別々

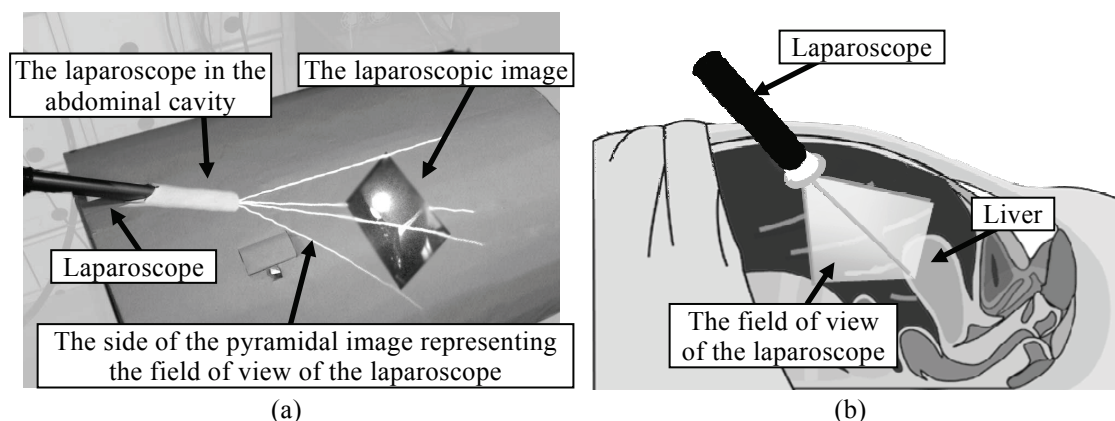


Fig.5 The left and right images are the result and the conceptual diagram of the superimposed field of view (FOV) of laparoscope. The right image is a cross section diagram of laparoscopic cholecystectomy. The laparoscope and the FOV of the laparoscope in the abdominal cavity are shown in the left image.

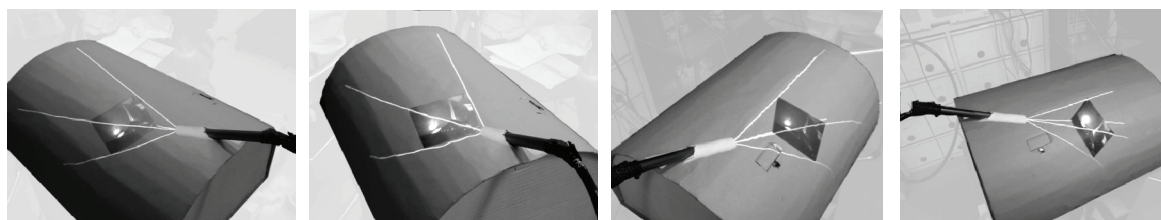


Fig.6 The result images from various view positions.

の像を提示することによって、立体的な像を知覚させる。

5) 腹腔鏡の撮影範囲の表示結果

腹腔鏡の撮影範囲の表示結果とその模式図を **Fig.5** に示す。 **Fig.5(b)**は、胆嚢摘出手術を想定した際の、腹腔内の腹腔鏡とその撮影範囲を示す。 **Fig.5(a)**の直線の内側が腹腔鏡の撮影範囲にあたる。本システムでは、臓器を立体的に表示するのではなく、腹腔鏡の撮影範囲を立体的に提示することによって、鉗子の挿入操作を支援する。また、腹腔鏡画像を腹腔鏡と垂直な面に表示している。腹腔鏡画像を単純に投影しているため腹腔内の臓器の立体表示は行っていない。投影された腹腔鏡画像については、立体表示された臓器を目安に鉗子を挿入するといった AR/MR 的な使用は想定しておらず、単純に挿入の成功・失敗を判断するための補助画像として使用する。本システムでは、投影された撮影範囲に向かって鉗子を挿入することで、補助画像内に鉗子

が映し出される。また、投影された腹腔鏡画像の奥行き情報の欠如による新たな事故も考えられるが、このようなシステムの仕様を術者が理解することによって、新たな事故は生じないと考えられる。モニタ表示された画像と比較して、投影された腹腔鏡画像は解像度の低下や色の変化など画質が低下する。そこで、鉗子挿入後はモニタ画像を利用することが考えられる。このように、本システムでは、状況に応じて両者を併用することでその欠点を除くことが可能となる。 **Fig.6** は投影画像が視点移動に対応している様子を示す。

構築した実験環境では、投影先を円筒ボックスとしているが、今後は投影先を患者腹部に被せた投影用のドレープに変更し、投影画像の色の変化を低減させる。歪み補正に使用した 2-pass レンダリング法は、投影面の形状が既知であるならば、投影先を形状が複雑なドレープに置き換えても、同様に歪みを補正することが可能である。

4. 挿入支援方式の有効性の検討

構築した腹腔鏡の撮影範囲を提示する鉗子挿入支援システムの有効性を評価する。通常のモニタを用いた手術方式(モニタ方式)と、挿入支援システムを用いる方式(挿入支援方式)の比較実験を行った。鉗子挿入のタスクを設けることで、鉗子を患者の体内に挿入してから、鉗子の先端が手術対象の臓器に到達するまでの鉗子操作を定量的に評価する。実験の被験者は腹腔鏡下手術の知識を与えた非外科医 11 名である。

本実験では人体腹部を模した実験用ボックスを用いる。実験用ボックスの上面は円筒状の曲面になっており、大きさはおよそ縦 50cm×横 30cm×高さ 20cm である。実験用ボックスは鉗子の挿入口として、計 8 ヶ所の穴が開いている。胆嚢摘出手術を想定し、実験用ボックス内部の胆嚢に当たる位置に、鉗子挿入の目標点を設置する。

1) 実験のタスク

鉗子挿入のタスクの詳細を以下に示す。

Table .1 The total path length of tip of forceps for 16 insertions and their difference.

Non-surgical subjects	Total length of monitor syst.(mm)	Total length of support syst.(mm)	Difference monitor syst. minus support syst.(mm)
A	5635	5130	506
B	5870	5559	311
C	7396	6578	818
D	5613	5243	370
E	5055	4748	307
F	4868	4719	149
G	5296	5530	-233
H	5629	4875	754
I	5320	4901	419
J	5183	5088	96
K	5167	5260	-93
avg.	5549	5239	309

- ・被験者は、模型内に設置された目標点に向かって鉗子を挿入する。
- ・8 ヶ所の穴から順に鉗子を挿入する。これを 2 回繰り返すことによって、合計 16 回の鉗子挿入を行う。
- ・鉗子先端の移動経路を磁気位置センサーによって記録する。
- ・鉗子をポートに挿入した時点を記録の開始とする。
- ・鉗子をポートに挿入した後、鉗子先端と目標点の距離が、正常な胆嚢の短径である 40mm 以下になった時点を記録の終了とする。
- ・鉗子先端の移動経路をモニタ方式・挿入支援方式で比較することにより本システムの有効性を評価する。
- ・比較実験の順番はモニタ方式、挿入支援方式の順で行う。
- ・鉗子挿入のタスクを行う前に十分な練習を行うことで、実験順による影響を取り除く。

また、磁気位置センサーで取得する鉗子先端位置の精度は、本実験環境において最大誤差 2mm であった。

2) 実験結果、考察

Table.1 にモニタ方式・挿入支援方式における 11 名の被験者の経路長を示す。経路長は、16 回の鉗子挿入の総和である。Table.1 から平均で 309mm 経路長が減少し、経路長が減少する傾向が確認できる。対応あり t 検定の結果、 $p=0.01$ となり統計的優位差が認められた。

経路長が減少した原因の 1 つに、鉗子を見失う頻度の減少が考えられる。鉗子を見失った場合には、手繰るように鉗子进行操作するため経路長が増加する。挿入支援方式では、撮影範囲の立体表示によって鉗子を見失う頻度が減少するため、経路長が減少したと考えられる。

以上のことから、提案する挿入支援方式は直線的な鉗子挿入の補助機能として有効であることが確認された。すなわち、直線的な鉗

子挿入の実現によって、撮影範囲の外での誤接触の危険性が大幅に低減されることが考えられる。

5. まとめ

本研究では、腹腔鏡下手術の視野を開腹手術の視野に近づけることによって、術者の負担を低減させることを最終的な目標とし、従来の単純な投影方式を発展させた、腹腔鏡の撮影範囲を術者に立体的に提示する挿入支援方式を提案した。評価実験により、通常のモニタを用いる手術方式と比較して挿入支援方式では鉗子の挿入操作が容易になることが確認された。

今後は、腹腔鏡下手術の視野をより開腹手術に近づけるため、腹腔内の鉗子・臓器の立体表示を行うことを予定している。また、システムの精度評価として、磁気位置センサーで取得した視点位置の誤差、空間コード化法で取得した形状の誤差が術者の視野に及ぼす影響の評価を行うことが必要である。

本研究の一部は、文部科学省科学研究費(基盤 A 16200037, 代表：三宅洋一)によった。

文 献

- [1] T. Kitasaka, K. Mori, Y. Hayashi et al: Virtual Pneumoperitoneum for Generating Virtual Laparoscopic Views Based on Volumetric Deformation, Proceedings MICCAI. Volume 3217 of Lecture Notes in Computer Science, Springer, 2004, pp559-567
- [2] 佐藤嘉伸, 中本将彦, 中島義和 他: 手術支援のための画像および空間情報統合システム, Medical Imaging Technology **22**(2): 79-84, 2004
- [3] H. Fuchs, M. A. Livingston, R. Raskar et al: Augmented Reality Visualization for Laparoscopic Surgery, Proceedings MICCAI. Volume 1496 of Lecture Notes In Computer Science; Springer, 1998, pp934-943
- [4] 小石毅, 牛木卓, 中口俊哉 他: 腹部投影による腹腔鏡下手術支援システムの実装と評価, 生体医工学シンポジウム 2005, pp466-475
- [5] J. P. Tardif, S. Roy, and J. Meunier: Projector-based Augmented Reality in Surgery without Calibration. Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE: Engineering

in Medicine and Biology Society **1**: 548-551, 2003

- [6] G. Fichtinger, A. Deguet¹, K. Masamune et al: Image Overlay Guidance for Needle Insertion in CT Scanner, IEEE Transactions on Biomedical Engineering **52**(8), 1415-1424, 2005
- [7] W. Birkfellner, M. Figl, K. Huber et al: A Head-Mounted Operating Binocular for Augmented Reality Visualization in Medicine - Design and Initial Evaluation, IEEE Transactions on Medical Imaging: **21**(8), 991-997, 2002
- [8] 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂, 東京, 1990
- [9] R. J. Valkenburg, A. M. McIvor: Accurate 3d measurement using a structured light system, Image and Vision Computing **16**(2): 99-110, 1998
- [10] R. Raskar, M. Cutts, G. Welch et al: Efficient Image Generation for Multiprojector and Multi-surface Displays. Proceedings of the 9th Eurographics Workshop on Rendering Techniques: 139-144, 1998

Support System for Laparoscopic Surgery Based on the Image Projection on the Abdomen: Development of Support Function for Forceps Insertion

Suguru USHIKI^{*1}, Takeshi KOISHI^{*1}, Toshiya NAKAGUCHI^{*2},
Hideki HAYASHI^{*3}, Norimichi TSUMURA^{*2}, Yoichi MIYAKE^{*3}

**1 Graduate School of Science and Technology, Chiba University*

**2 Department of Information and Image Sciences, Chiba University*

**3 Research Center for Frontier Medical Engineering, Chiba University*

Laparoscopic surgery has been widely used as minimally invasive surgery. However, many accidents are reported for the difficulty of this operation. It is considered that these accidents are mainly caused by the difficulty to perceive the position of tissue at the forceps-insertion for the limited field of view in laparoscopes. In order to solve the problems, we propose a new laparoscopic surgery method by projection of laparoscopic image on the abdominal region. In this system, the distortion of projected image caused by the shape of abdominal surface and viewing position are corrected by acquiring the surface information of the projection and the position of head. We confirmed that the proposed method is significant for laparoscopic surgery by the in vitro experiment.

Key words: Laparoscopic Surgery, Augmented Reality, Stereo Projector., Supporting forceps-insertion



牛木卓 (うしき すぐる)

2006 年千葉大学工学部情報画像工学科卒業。同年千葉大学大学院自然科学研究科博士前期課程入学，現在に至る。手術支援システム，手術シミュレーションの研究に従事。



小石毅 (こいし たけし)

2006 年千葉大学大学院博士前期課程修了，同年千葉大学大学院博士後期課程入学，現在に至る。手術支援システム，手術シミュレーションの研究に従事。



中口俊哉 (なかぐち としや)

2003 年上智大学大学院博士後期課程修了。博士（工学）。現在，千葉大学工学部情報画像工学科 助手。2001-2003 年日本学術振興会特別研究員。画像解析，画質評価，医用画像処理，組合せ最適化に関する研究に従事。IEEE，電子情報通信学会，IS&T，日本写真学会，各会員。



林秀樹 (はやし ひでき)

昭和 60 年千葉大学医学部卒業，平成 4 年千葉大学大学院医学研究科博士課程終了。平成 5 年マサチューセッツ総合病院外科研究員。平成 10 年千葉大学医学部助手。平成 15 年千葉大学フロンティアメディカル工学研究開発センター助教授，平成 17 年同教授。日本外科学会指導医，日本消化器外科学会専門医，日本胃癌学会評議員，日本内視鏡外科学会技術認定取得。腹腔鏡手術とセンチネルリンパ節理論を応用した低侵襲胃癌治療を専門とする。



津村徳道 (つむら のりみち)

1995 年大阪大学大学院博士後期課程修了。博士（工学）。現在，千葉大学工学部情報画像工学科 助教授。医用画像工学，計測画像工学，色再現工学，質感再現工学の研究に従事。IS&T，日本光学会，日本写真学会，日本医用画像光学会，電子情報通信学会，各会員。



三宅洋一 (みやけ よういち)

昭 43 年千葉大院修士了，昭 53 年工博（東工大），京都工繊大助手，助教授，スイス連邦工科大研究員，千葉大助教授を経て平成元年教授，平 15 年より千葉大フロンティアメディカル工学研究開発センター長。ロチェスター大光学研究所客員教授，東工大教授（併任），日本写真学会会長，日本鑑識科学技術学会（現日本法科学技術学会）理事長，IS&T 副会長などを歴任。IS&T フェロー，名誉会員，Charles E Ives Award など多数受賞，著書：デジタルカラー画像の解析評価（東大出版会），編著：分光画像処理入門（東大出版会）など多数