

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

博士論文審査報告書

論 文 題 目

Research on the Estimation and Visualization of the shape of colonoscope in the colon

申 請 者

| | |
|-----|--------|
| 李 | 宰雨 |
| Lee | Jaewoo |

生命理工学専攻 バイオ・ロボティクス研究

2013 年 2 月

大腸をはじめとする消化器系がんの早期発見，早期治療には内視鏡検査が有用である．消化管内視鏡検査は，イメージセンサー（CCD）や光ファイバーと柔軟な構造をもったチューブ状の軟性内視鏡を口腔または肛門から消化器内に挿入することで行われる．軟性内視鏡の歴史は長く，20世紀前半に開発されて以来，さまざまな改良がおこなわれ，今日ではもっとも重要な医療用検査器具の一つになっている．消化器内視鏡検査の中で，大腸内視鏡検査はもっとも困難な手技とされている．大腸に限らず消化器の形状は，体外から直視することができない．大腸内視鏡検査において術者は，大腸の正確な形状に関する情報が得られない状況下で，軟性内視鏡を肛門から挿入し，虫垂まで押し進めることが求められる．その際の合併症のリスク，患者のうける苦痛の程度，検査に要する時間は，術者の技量に大きく依存する．

そこで医療の現場では，誰でも簡便にあつかえる軟性内視鏡の開発が求められている．このようなニーズを受けて，ロボット工学や医用工学の分野では，自律的に腸内を移動するロボット型内視鏡に関する研究が多数行われている．大腸内視鏡検査において高い技術が求められる理由は，腸管の特性や配置に起因する．腸管は弾性と粘性のある組織で構成されており，軟性内視鏡から力が作用することで伸展や屈曲が生じる．また腹腔内において腸管は，折りたたまれたように配置されている．一方術者は，内視鏡の先端部の姿勢と体外に残された軟性内視鏡の操作によって，腸内で内視鏡を進めることが求められる．例えば先端を曲げた状態で，軟性内視鏡を押し込むことで湾曲部を前進したり，内視鏡をひねることで3次元的な湾曲部を乗り越えたりさせる．これらの手技を状況に応じて適切に切り替えることで，内視鏡を肛門から虫垂へ進める．この際，術者が気付かないうちに体内で軟性内視鏡および腸管がループを形成してしまう場合がある．このようなループが発生すると，肛門から内視鏡を押し込んでも内視鏡先端は前進せず，ループの径が増大する事態に陥ってしまう．これは腸壁穿孔につながる非常に危険な事態である．一方，ループが発生してもそれを解除する内視鏡の操作を行うことで，容易にループを直線化することが可能である．そこでループが発生した際，術者がそれを適切に知覚することができれば，前述の腸壁穿孔のリスクを大きく低減することができる．このような考えから，大腸内での内視鏡の形状を計測し，それを術者に提示するシステムが求められている．

本博士論文研究は，大腸内での内視鏡の形状を可視化し，術者に提示する手法の開発を目的としている．本研究では可視化の手法として，超小型の姿勢センサノードを内視鏡に多数装着し，それらによって得られる情報から内視鏡の形状を推定する方法を提案している．各姿勢センサノードは，MEMS（Micro Electro Mechanical System）技術によって作成された3軸加速度センサ，3軸ジャイロ，3軸地磁気センサからなる．本博士論文では，これらのセンサノードのハードウェアおよびセンサの計測値から内視鏡の姿勢を

推定する手法が述べられている。

本研究は大きく分けて 4 つの要素から構成される。第 1 の要素は、センサノードの構成およびデータ処理である。各センサノードは、3 軸加速度センサ、ジャイロ、地磁気センサからなり、3 種類のセンサの情報を融合させることで、センサノードの *pitch*, *roll*, *yaw* の 3 軸の姿勢角を推定し、出力する。大腸内視鏡検査における術者の内視鏡に対する操作は、ゆっくりとしたものが多く、内視鏡に生じる加速度は静的であると仮定してあつかうことが可能である。温度などによるドリフトなどのノイズについては、フィルタリング処理によって除去している。複数のセンサから得られる時系列データに対して、カルマンフィルタを適用することで、高精度な姿勢角推定を実現している。

第 2 および第 3 の要素は、内視鏡のモデリングとモデルにもとづく内視鏡の形状推定である。本研究では内視鏡を直列接続された剛体リンクとしてみている。内視鏡の形状を推定する際は、各リンクの姿勢角、およびその変化が非常に重要であり、深く検討されている。工学では剛体の回転をオイラー角の変化として表現し、数学的に扱う手法が一般的である。オイラー角による回転表現の短所の 1 つは特異点問題にある。本研究では、特異点を回避するために、四元数が用いられている。四元数は剛体の回転やその補完に有用なため、アニメーションや CG の分野でよく用いられている。Shoemake らの調査を参考に、本研究ではベジェ曲線のための *de Casteljau* アルゴリズムを用いて、3 次元スプライン補完を単位四元数に適用している。

これに加えて、ユークリッド空間におけるセンサノード間の距離についても検討を行っている。センサノード間の距離は既知であり、ユークリッド空間内で表現可能である。これにもとづいて、軟性内視鏡の幾何学モデルを構築している。その後、2 つの視点からその幾何学モデルの順運動学的解法について検討が行われている。1 つは古典的な *D-H* 表記法についての記述である。次は、アニメーションや CG に関する研究で用いられているスクリー理論を用いた解法についての記述である。スクリー理論では、一般に二重四元数を用いて表現される。二重四元数はクリフォード代数に基づいているため、クリフォード代数についても述べられている。本研究ではクリフォード代数を用いることで、統一解的枠組みの中での姿勢の補完および剛体リンクに関する諸問題の解を得ている。

第 4 の要素は、構築した手法の妥当性の実験的検証である。本研究では 2 つの実験が行われている。第 1 の実験では、センサノードの数と推定される内視鏡の形状の精度に関する検討が行われている。実験の結果にもとづき、姿勢補完が必要な理由についても検討が行われている。第 2 の実験では、推定された内視鏡の形状と実際の内視鏡の形状の比較が行われている。加えて、

推定された形状の描画方法についてもここで述べられている。ここでは、これらの実験にもとづき、提案する手法の有用性と問題点に関する検討が行われている。

提案する手法を臨床で使用可能な機材に実装するためには、センサノードの小型化が必要不可欠である。これについては、MEMS 技術の進歩により、数年のうちに実現可能であると見込まれる。そうなれば、本研究で提案されている手法の実用化が大いに見込まれる。さらに本研究で提案している手法は、3次元マウスなどの新たなマン・マシン・インターフェースにも応用可能である。デザインやアニメーションなどの分野において、3次元マウスの登場が切望されており、本研究で提案する手法は3次元的な曲線を作成する新しいインターフェースに応用可能である。また本研究で提案する手法は、機械の大規模変形の計測にも応用可能である。大型の工業機械や航空機、大型望遠鏡などの光学機器のたわみや歪みの計測にも応用が可能である。

以上のように、本論文は、直視が不可能な大腸内の軟性内視鏡の形状を推定し、可視化する手法について書かれている。内視鏡の可視化技術は臨床医学において強く求められている技術であり、本研究の成果の社会的意義は大きい。また、柔軟体の変形に関する検討は機械工学における重要な問題領域の1つと認識されており、本研究は機械工学のみならず計測工学の発展にも貢献するものである。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2013年2月

| | | | |
|------|------------|------------------|------|
| (主査) | 早稲田大学教授 | 工学博士 (早稲田大学) | 高西淳夫 |
| | 早稲田大学教授 | 工学博士 (早稲田大学) | 梅津光生 |
| | | 医学博士 (東京女子医科大学) | |
| | 早稲田大学教授 | 工学博士 (早稲田大学) | 藤江正克 |
| | 早稲田大学教授 | 医学博士 (東京慈恵会医科大学) | 藤本哲男 |
| | 東京女子医科大学教授 | 医学博士 (東京女子医科大学) | 伊関洋 |
| | 早稲田大学客員教授 | | |