

空気圧の医用への利用

東京医科歯科大学

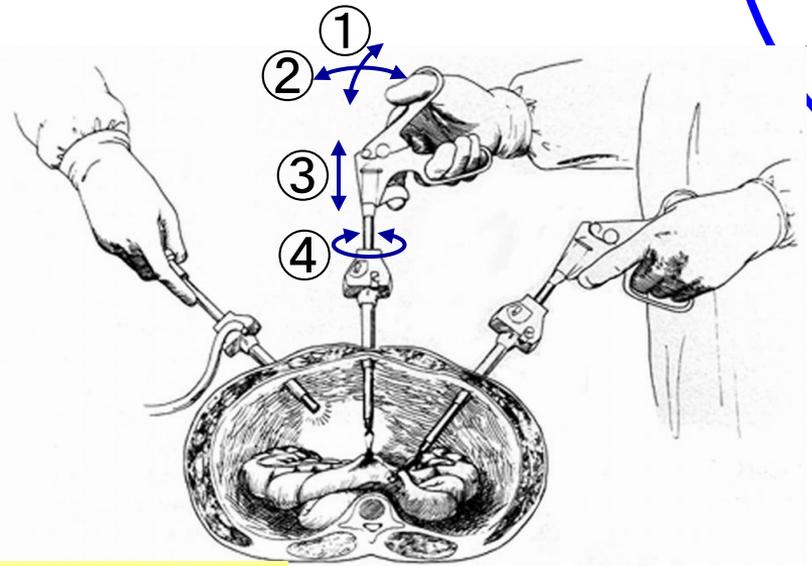
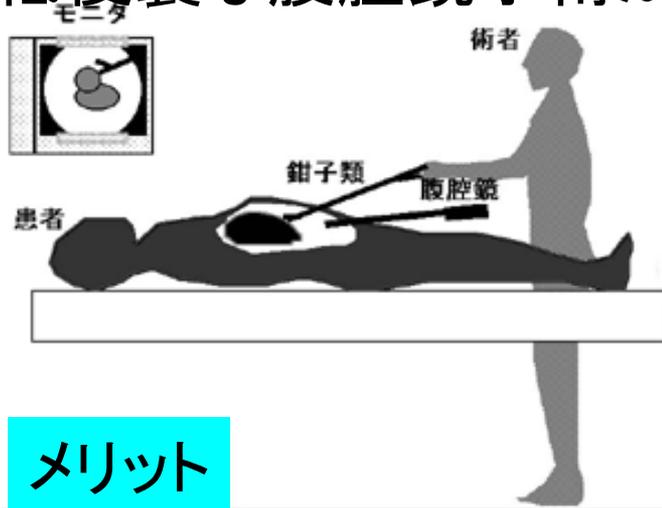
生体材料工学研究所

川嶋 健嗣

2014年9月18日

腹腔鏡手術

従来の開腹手術に代わり、
低侵襲な腹腔鏡手術が普及



メリット

- ・痛みの低減
- ・入院期間の短縮
- ・傷跡の縮小

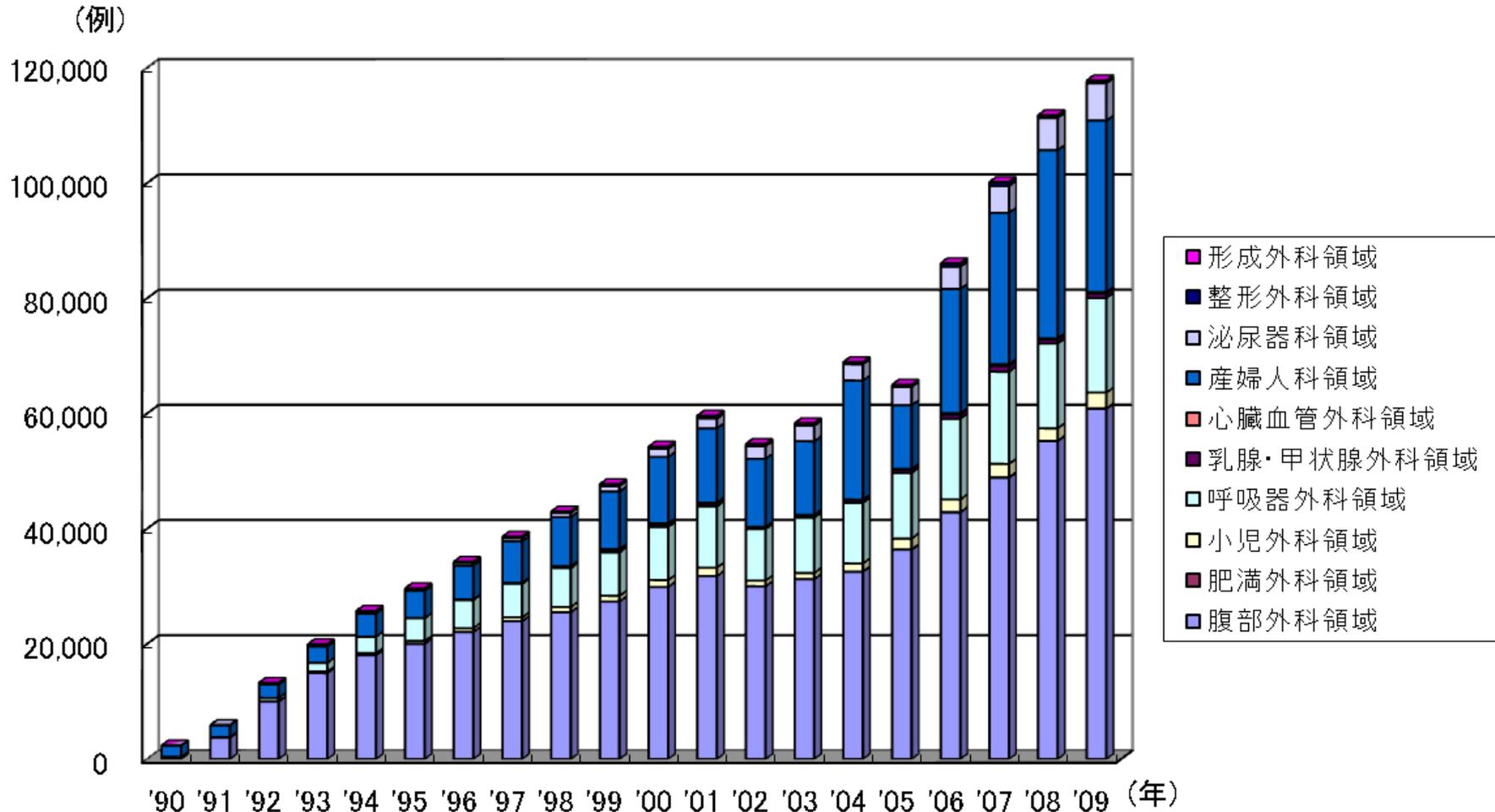
患者のQOLを向上

デメリット

- ・鉗子器具の拘束
- ・鉗子器具の自由度不足
- ・狭く立体感のない視界

新たな手術用ツールの開発要求

内視鏡外科手術の推移



日本内視鏡外科学会雑誌 Vol.15, No.5 (2010) より

年々増加傾向

腹腔鏡手術用ロボットの開発動向

Hand-held type



Terumo KYMERAX

Compact systems

Master-slave systems



DaVinci
Intuitive Surgical



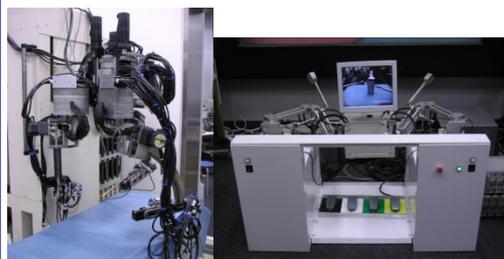
Titan medical



Nakamura et al.
- The University of Tokyo



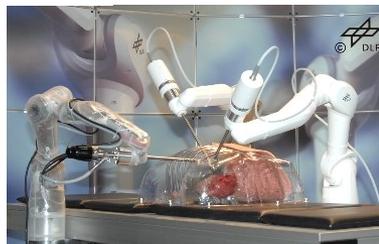
Univ. of California
Sastry et al.



Mitsubishi et al.
- The University of Tokyo



Univ. of Washington
Hannaford et al.



DLR MIRO

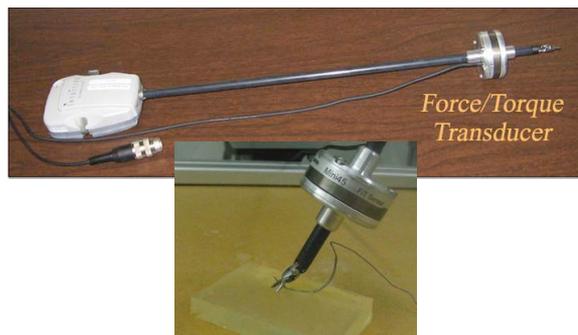
Intuitive operations



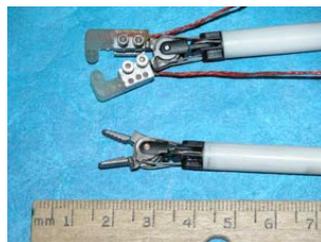
Force feedback sensations to
the operator become desirable

鉗子マニピュレータにおける力計測

鉗子部近傍での計測



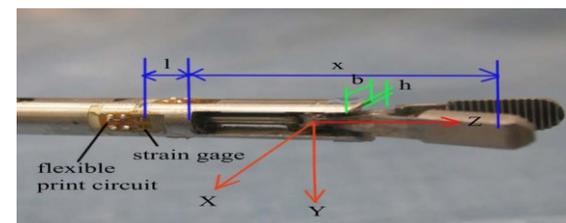
Saha, et al.
(2006)



Wagner & Howe
(2005)

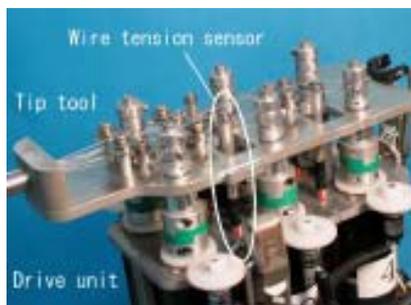


神野ら

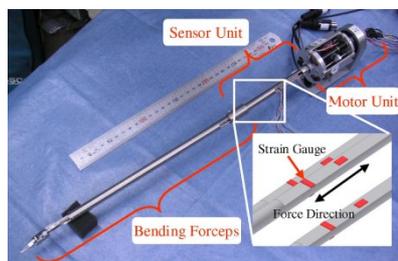


光石ら

動力伝達部での計測

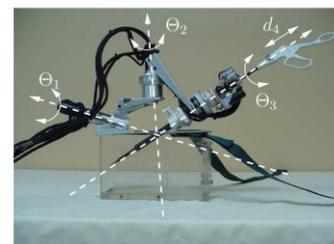


生田ら



光石ら

トロカール部での計測



Morel et al.



箱崎ら

滅菌性, 洗浄, 小型化, 校正, ノイズなどを考慮すると
力センサの搭載は望ましくない



開発中の遠隔手術対応型 マスタ・スレーブロボットシステム



スレーブ側 IBIS と命名

研究目的

直感的操作性,遠隔治療が可能であることから
マスタースレーブ方式による操縦が有効

↳ 医師への力覚提示が望まれる

滅菌,洗浄,MRI対応と考慮すると
鉗子先端への力センサの配置は避けたい

目的

空気圧シリンダを駆動系に用い,
力センサなしで力覚提示機能を有する
多自由度鉗子マスタースレーブシステムの開発

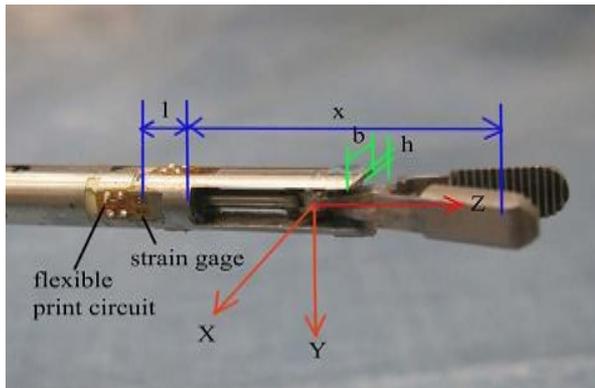
手術ロボットにおける力計測技術

術者(操作者)への力覚提示: 作業の正確性・安全性を向上

先端に力センサを組み込んだマニピュレータ



Seibold et al., 2005

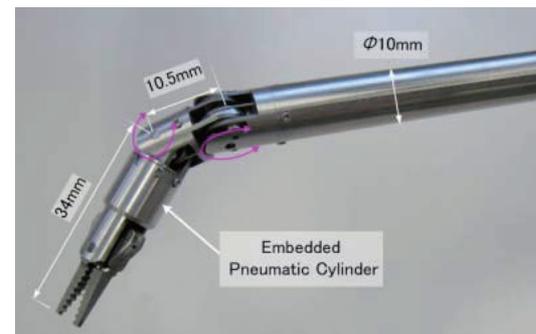
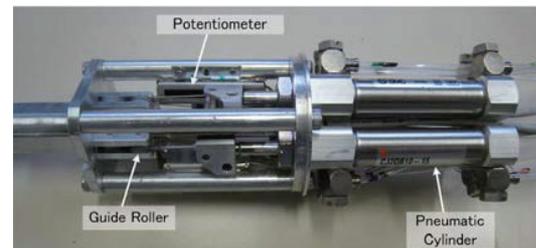


Pitakwatchara et al., 2006

- 精密な計測が可能
- 小型化, 滅菌・洗浄に対応困難



空気圧駆動を用いた外力推定



"IBIS IV" (Our research group 2009)

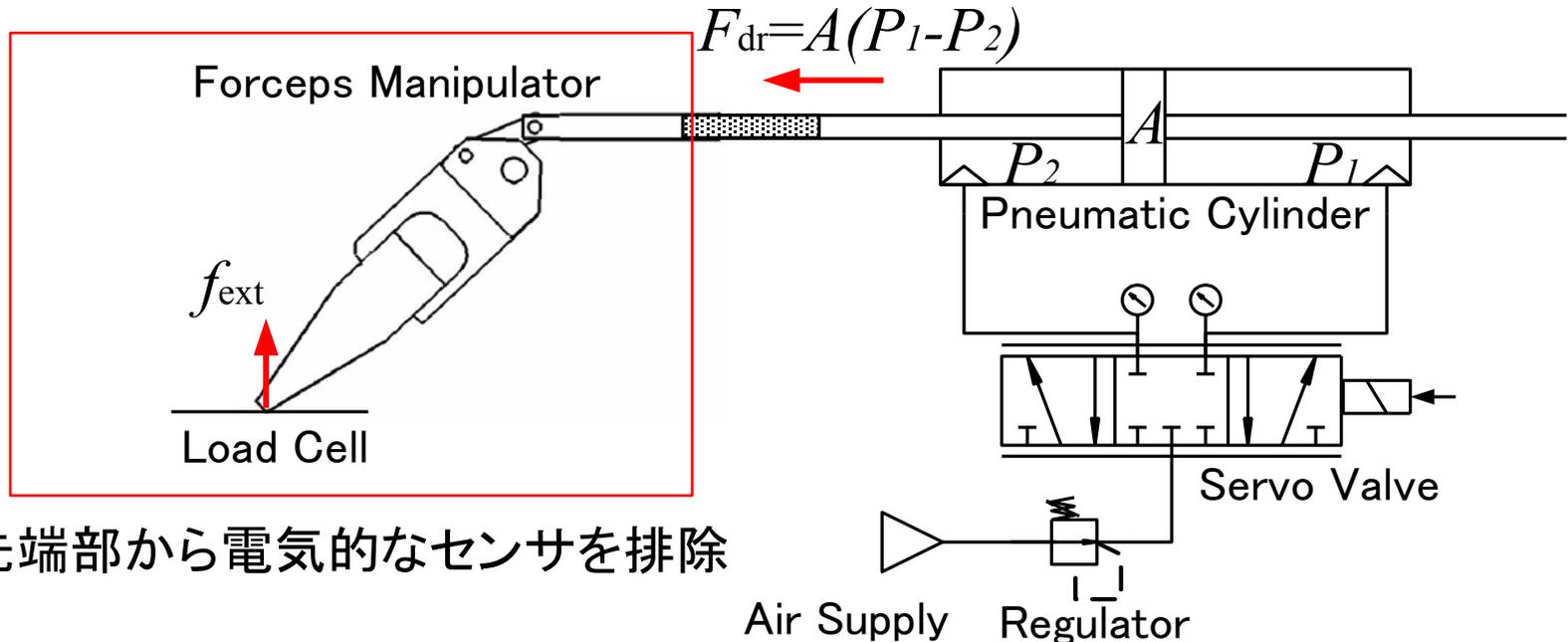
- マニピュレータに力センサが無く, 滅菌・洗浄および小型化に有利

空気圧アクチュエータの特徴

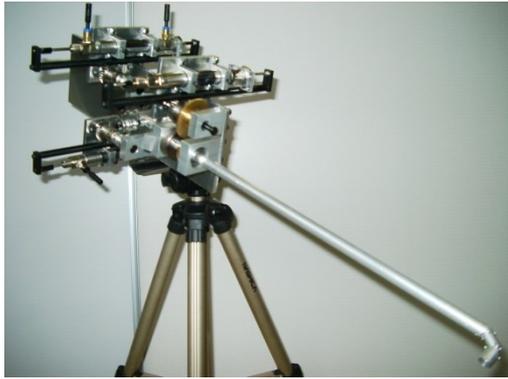
- ◆ 空気の圧縮性によるパッシブな柔らかさ → 人間親和性
- ◆ 重量対出力比が高く減速機なしに用いることができる
 - ↳ 高いバックドライバビリティ

✗ 摩擦などの影響を受けやすい

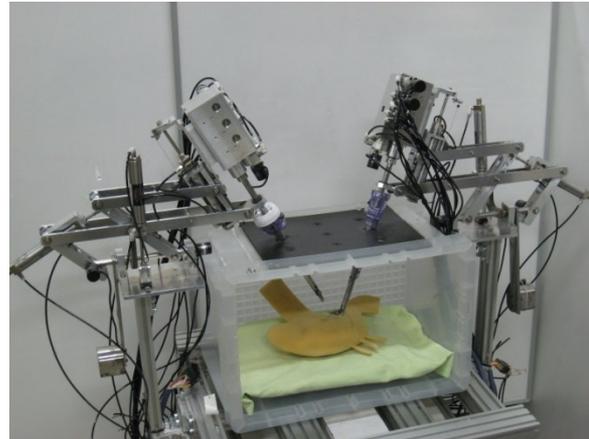
○ 圧力による外力検出



鉗子先端部から電氣的なセンサを排除



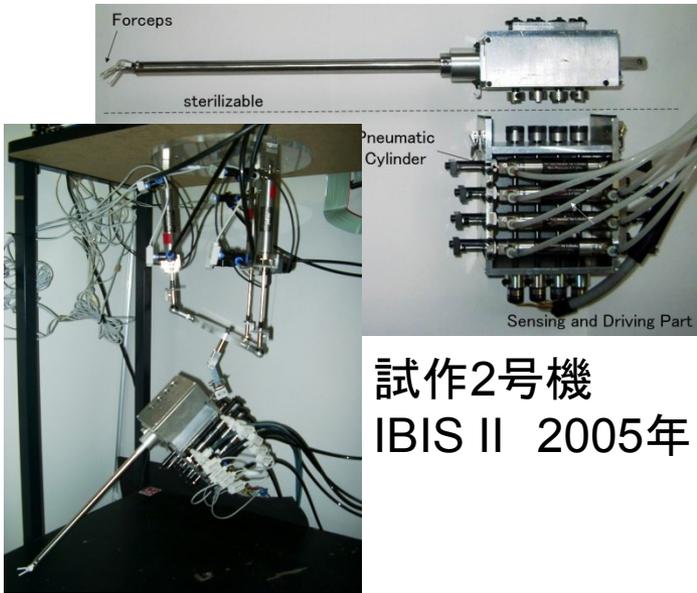
試作1号機 IBIS I 2004年



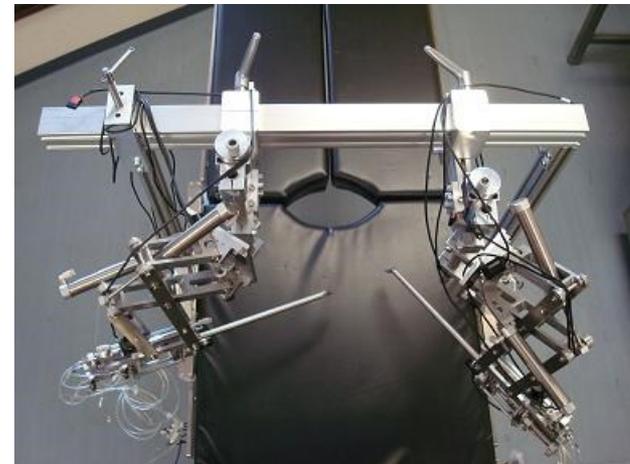
試作3号機 IBIS III 2007年



試作5号機 IBIS V
2010年



試作2号機
IBIS II 2005年



試作4号機 IBIS IV 2009年

2004

2008

2012

開発した鉗子マニピュレータ

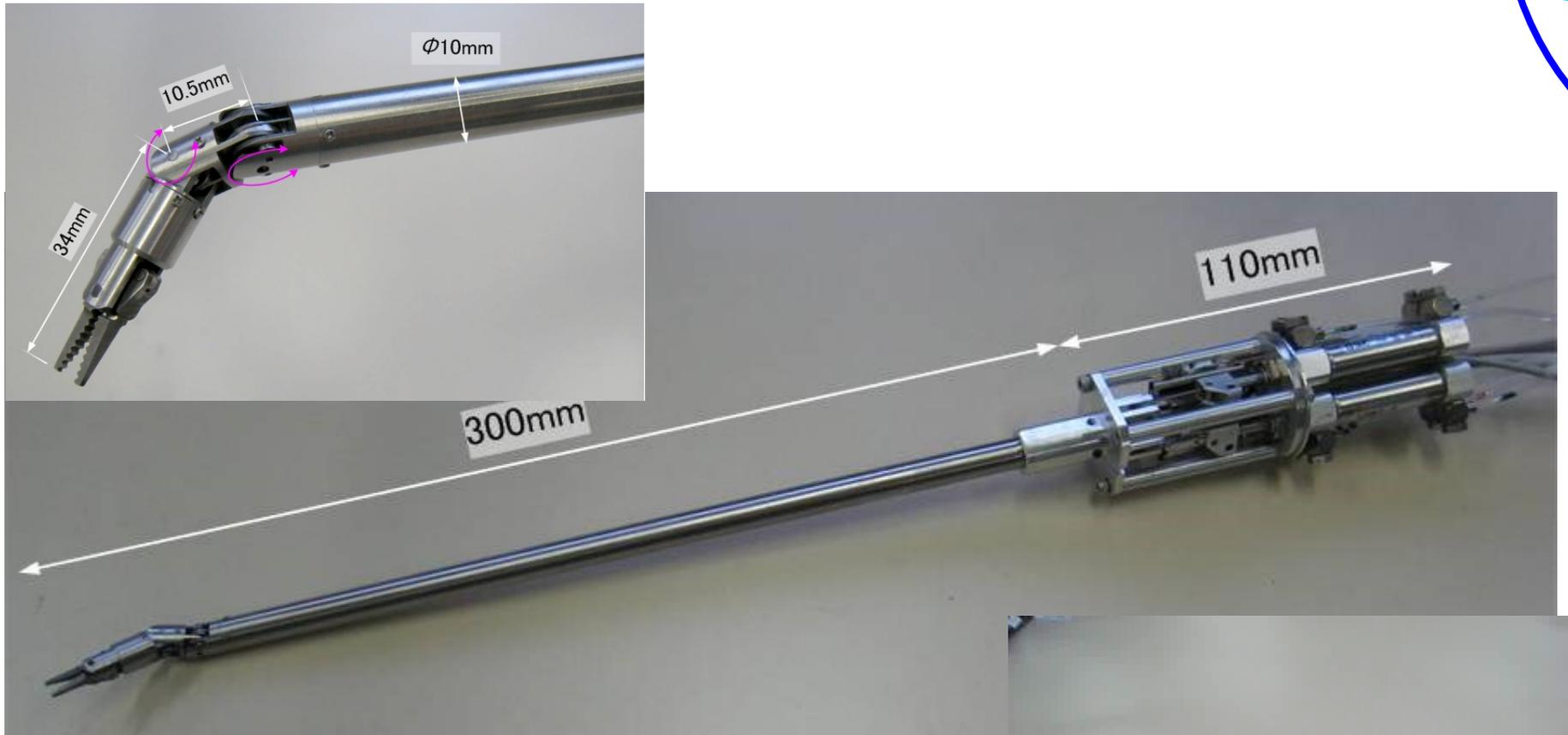


Fig. Developed forceps manipulator

- 先端屈曲2自由度
- ワイヤ駆動



駆動部

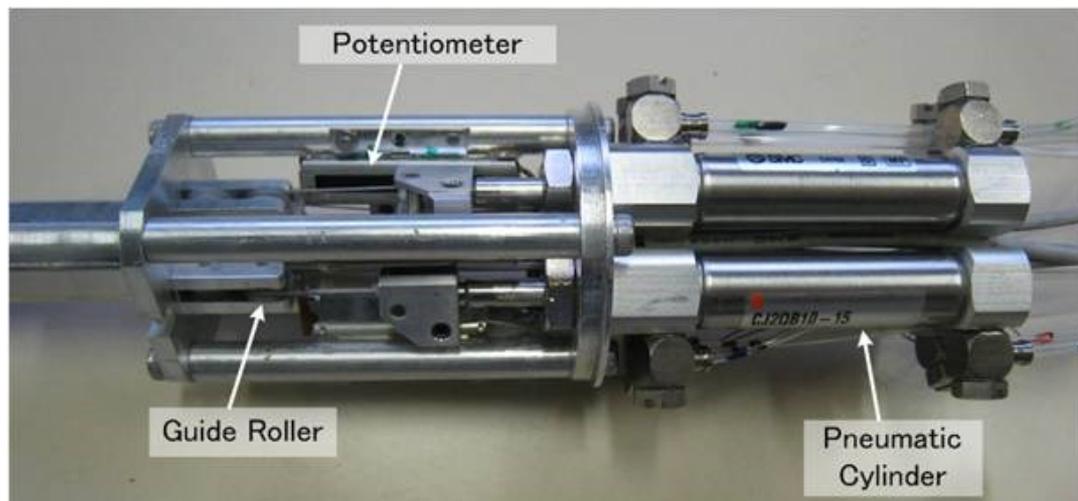


Fig. Driving part

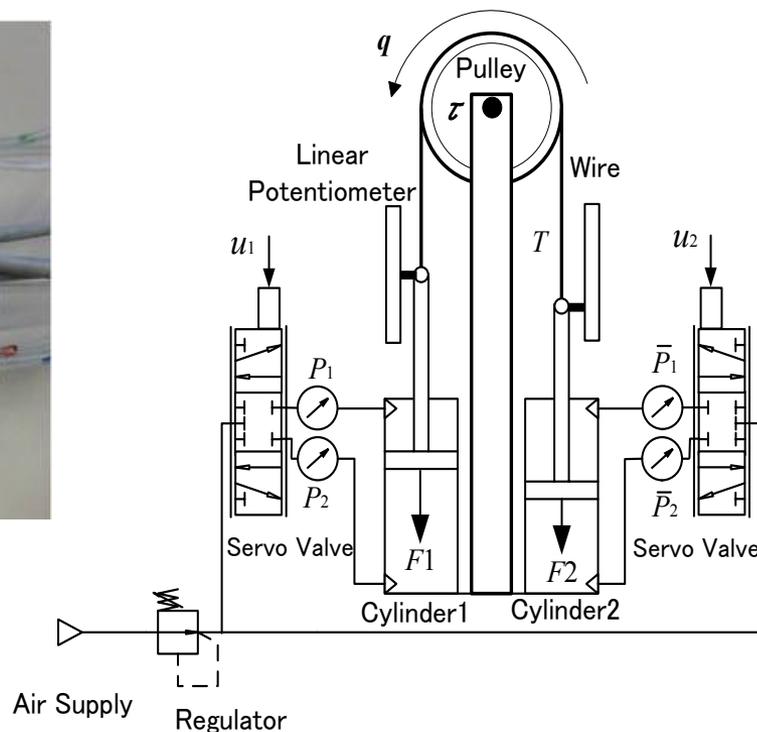


Fig. Schematic of tendon drive

- 空気圧シリンダを用いた拮抗駆動
- 4つの空気圧シリンダで2自由度を実現
- 重量200[g]

駆動力制御系

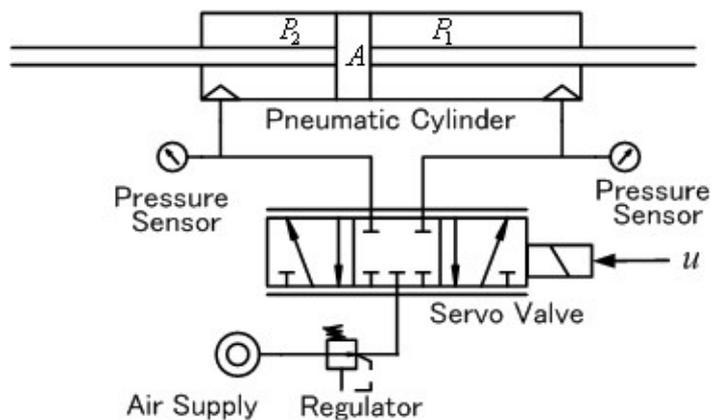


Fig. Pneumatic Circuit

シリンダの駆動力 $F_{dr} = A(P_1 - P_2)$

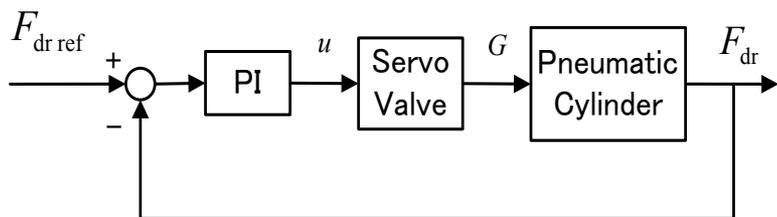


Fig. Block Diagram of Control for Driving Force

駆動力(差圧)のPIループ



DCモータの電流制御ループに相当

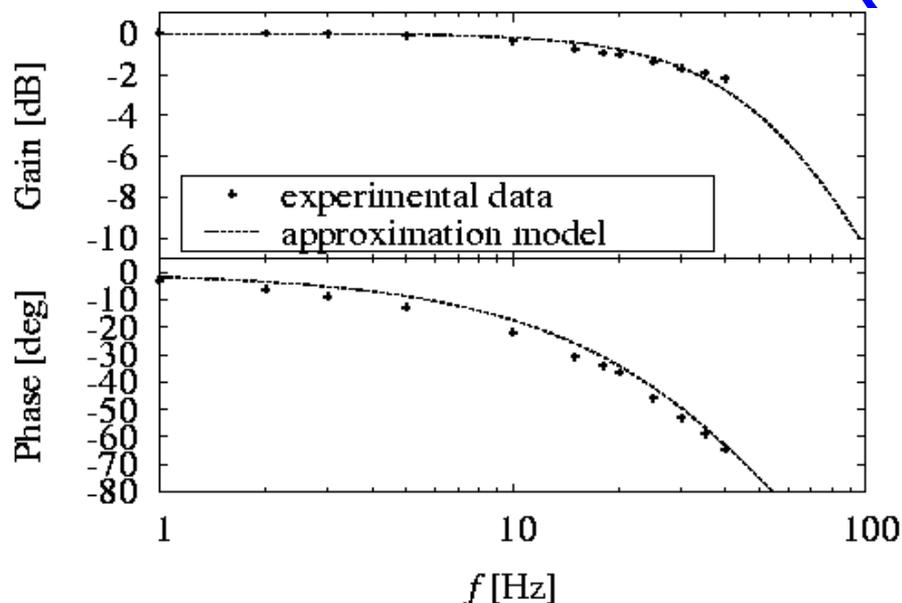


Fig. Bode Diagram

閉ループの動特性

$$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\omega_n = 60[\text{Hz}], \quad \zeta = 0.9$$

帯域を広くするには
より高速なバルブが必要

マニピュレータの屈曲機構 研究

腹腔鏡手術を支援する小型・多自由度マニピュレータ



Ikuta et al.,
2002



Yamashita et al., 2006

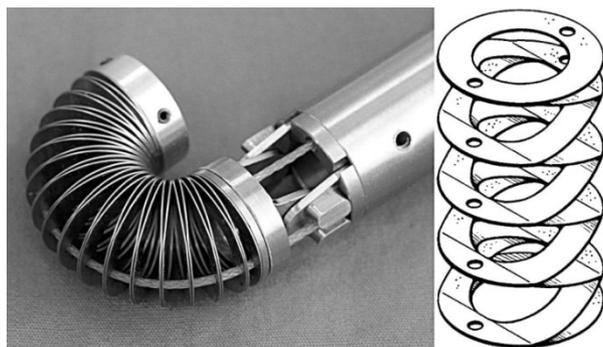
剛体リンク関節

- 構造が複雑, 部品数多い



整備性の悪化
生産コスト増大

内視鏡の屈曲機構



Breedveld et al.,
2001



Arata et al.,
2010

柔軟関節

- 構造がシンプル



実用的, 小型化に最適

力検出技術

術者(操作者)への力覚提示: 作業の正確性・安全性を向上

カセンサを搭載した鉗子マニピュレータ



Seibold et al., 2005



Takahashi et al.,
2006

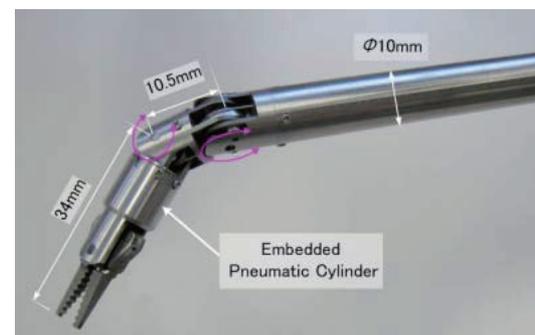
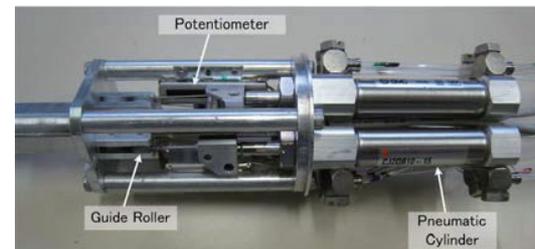
- 高精度検出が可能
- 小型化困難, 滅菌・洗浄の問題

機構の簡略化・小型化に適する



柔軟関節における外力推定に適用

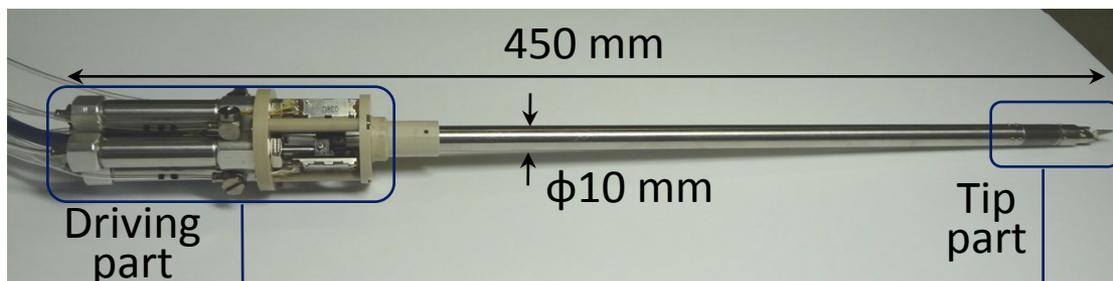
空気圧駆動を用いた外力推定



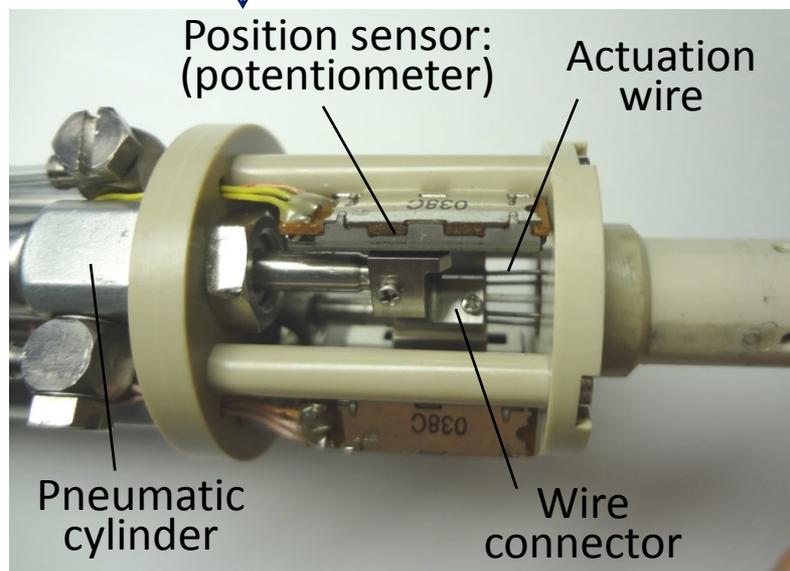
"IBIS IV" (Tadano et al.,
2009)

- 先端部がセンサレス

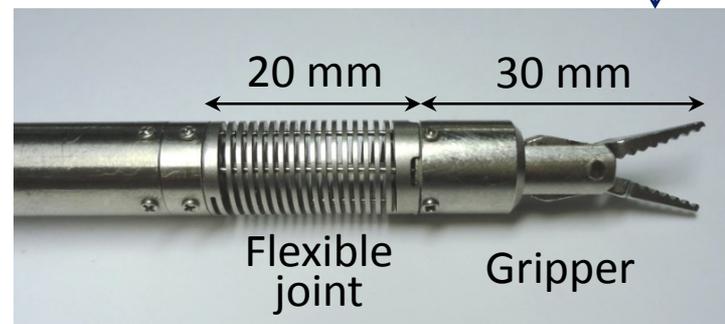
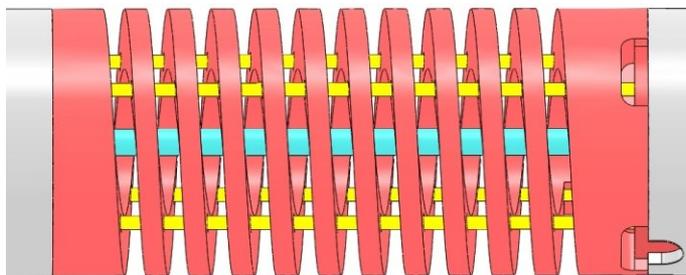
鉗子マニピュレータの設計1



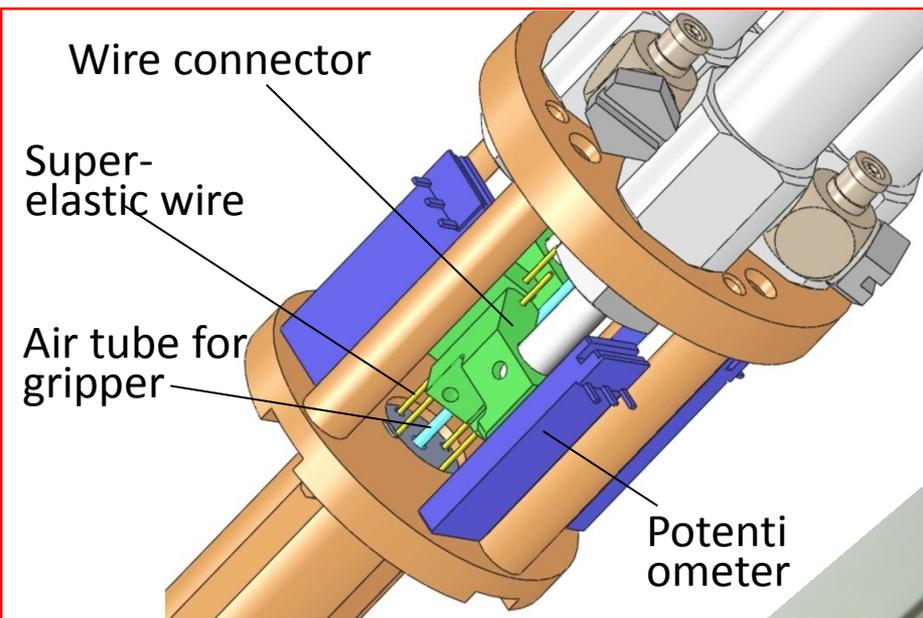
4本の空気圧シリンダをそれぞれ駆動ワイヤに連結し、プッシュプル駆動によって柔軟関節の屈曲2自由度を実現



プッシュプル駆動型柔軟関節

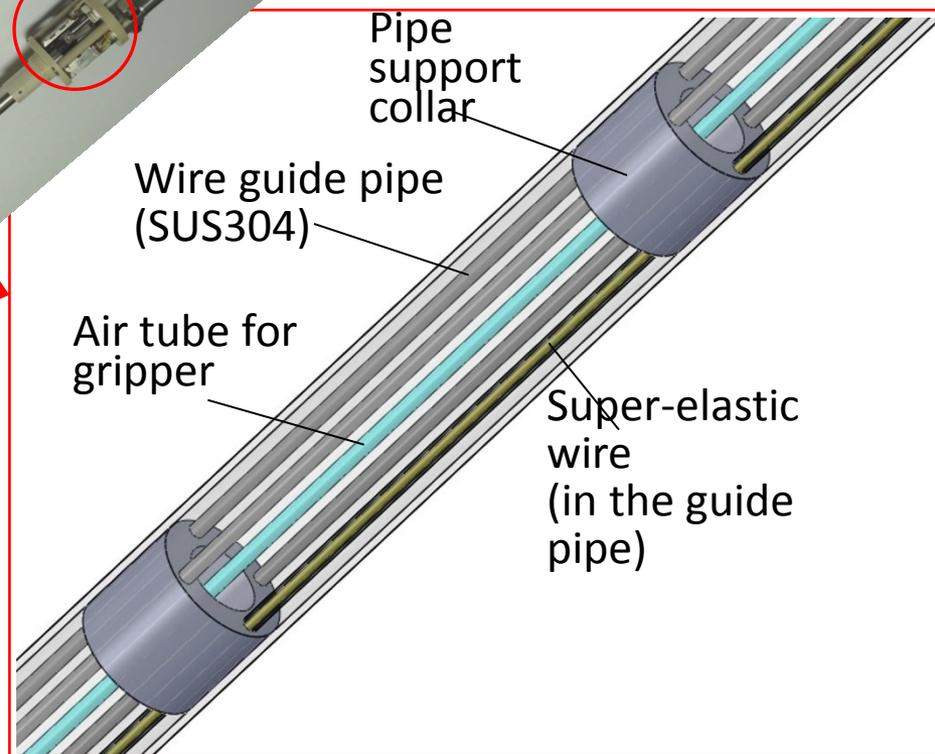
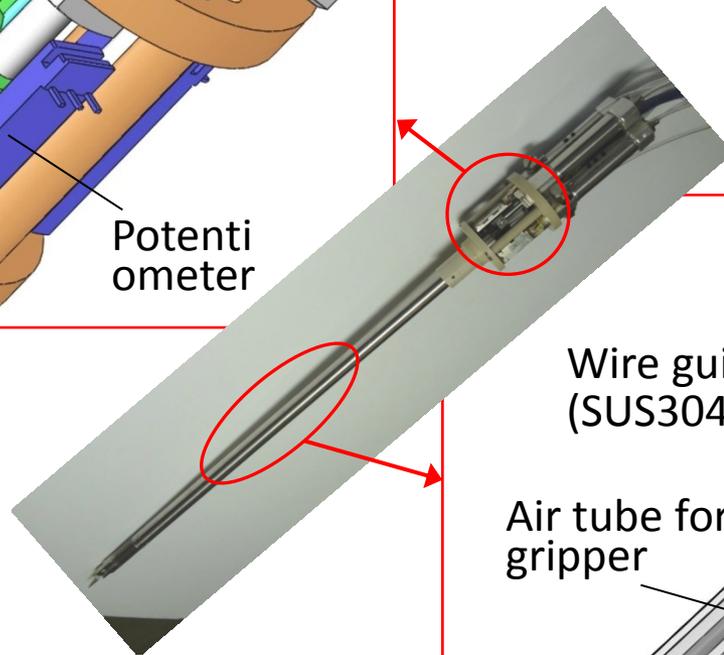


鉗子マニピュレータの設計2



<駆動部の設計>

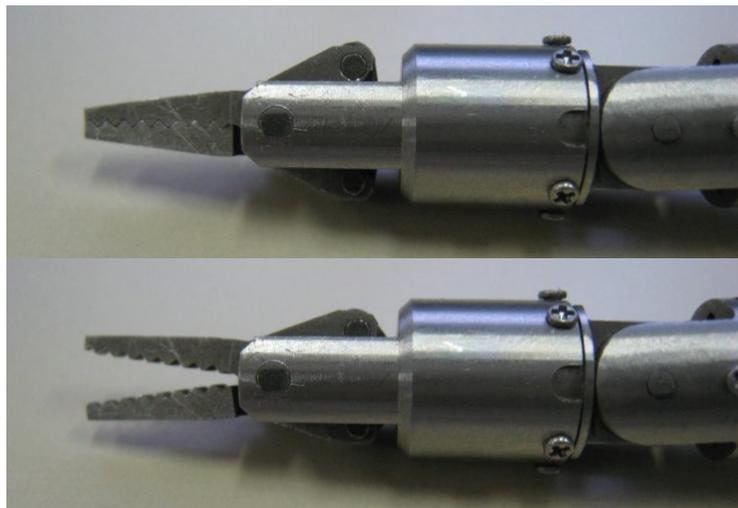
- 機構の摩擦低減のため直線的にワイヤを接続
- ワイヤ露出部分の長さを最小に (0~12 mm)



<アームパイプ部の設計>

- ディスクで固定したSUSパイプの内部にワイヤを通すことで経路を確保, 座屈を防止

空気圧シリンダ内蔵型グリッパ



- スライダクランク機構により空気圧シリンダの直動を開閉動作へ変換
- ワイヤを用いないため、他の屈曲関節との干渉がない
- 特異姿勢近傍を用いて強力な把持力を発生

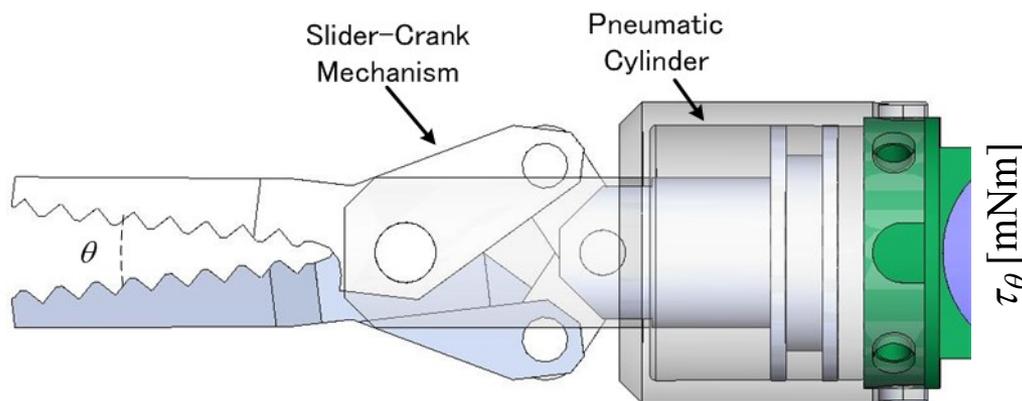


Fig. Gripping Mechanism

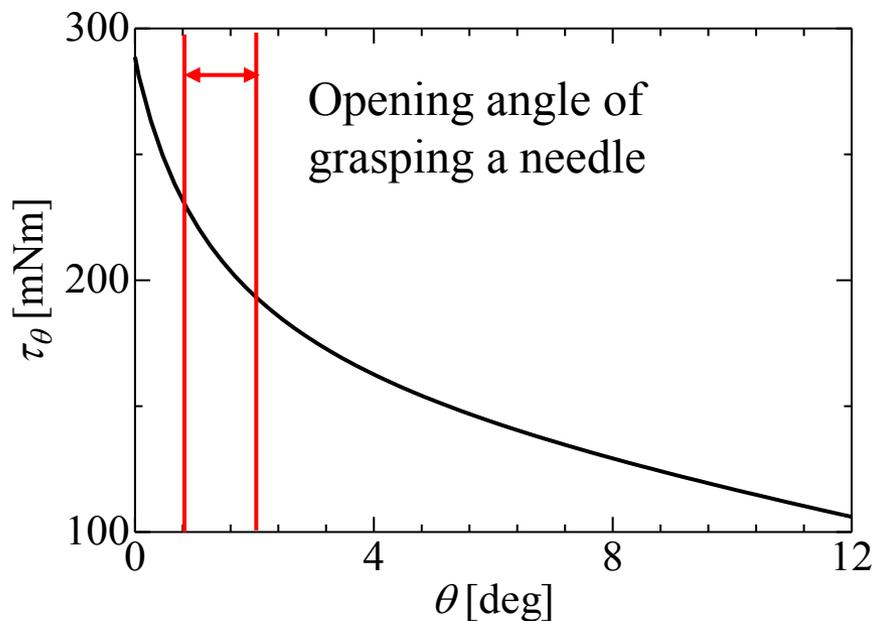


Fig. Gripping torque vs. angle (0.6MPa)

マニピュレータの動力学モデル

⇒ 4自由度シリンダ駆動力 F で記述

$$F = C\dot{X} + D\text{sgn}(\dot{X})e^{2\mu\theta} + K_b\phi + K_a l$$

粘性
摺動摩擦
弾性力 (屈曲)
弾性力 (伸縮)

制御実験によりモデルの各係数を試行錯誤的に決定

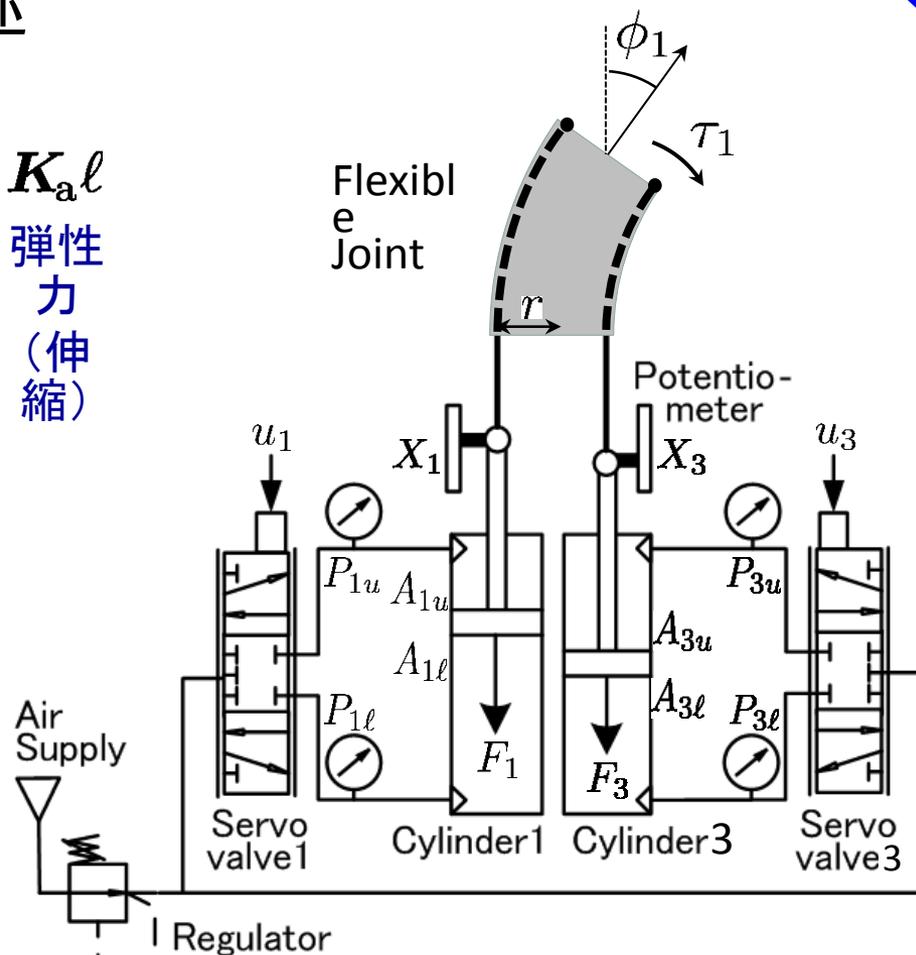


Fig. Schematic of the joint driving system

プッシュプル駆動型マニピュレータの位置制御

- 4自由度シリンダ変位 X のPD制御
- 動力学のフィードフォワード補償
- シリンダ駆動力 F の制御ループを内包するカスケード制御系

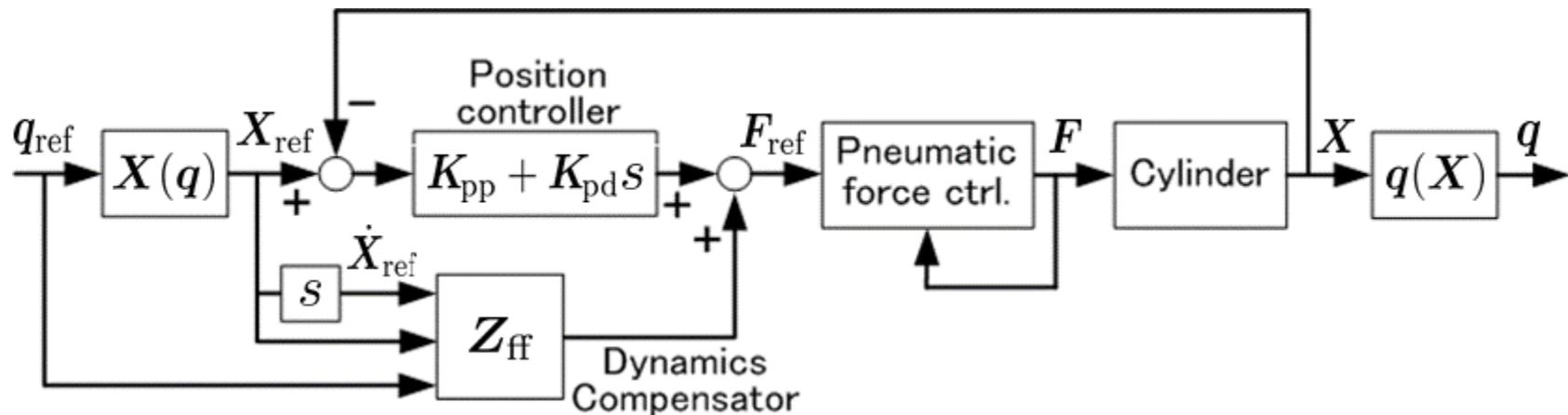


Fig. Block diagram of position control system for the push-pull drive

1自由度屈曲動作：プッシュプル駆動型

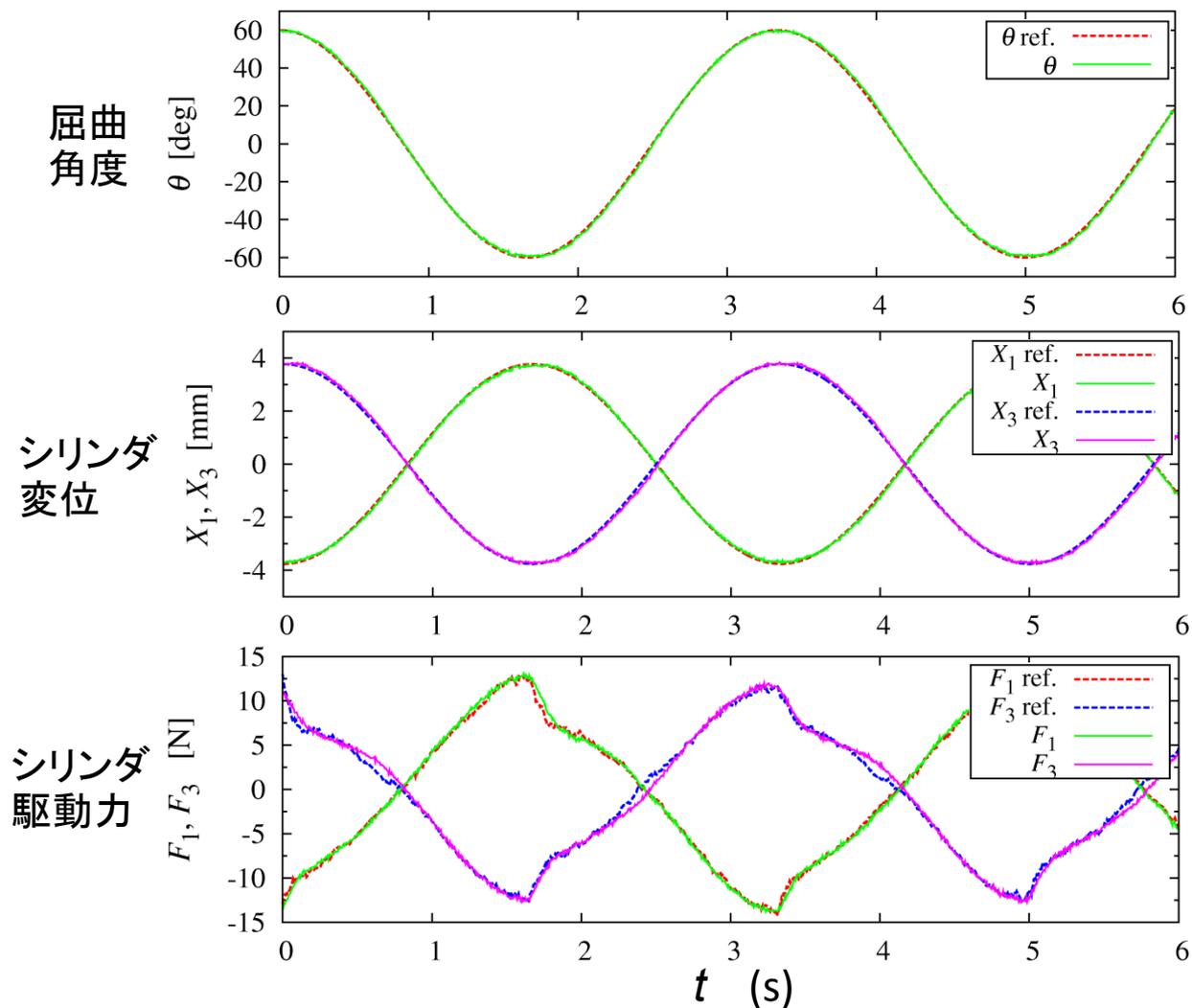
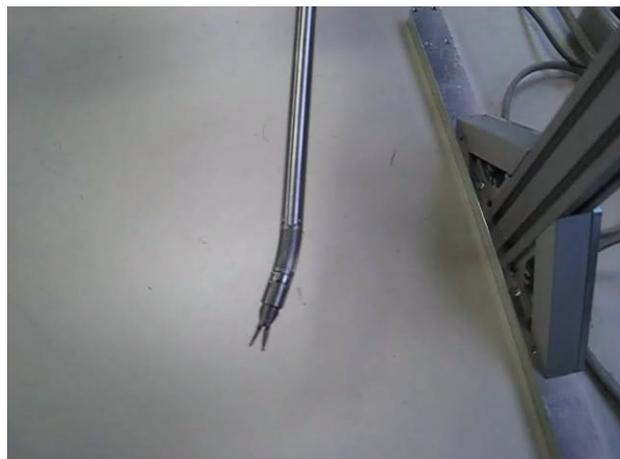


Fig. Transient response of control parameters during 1dof bending motion

柔軟関節を利用した外力推定法

外力推定の原理:

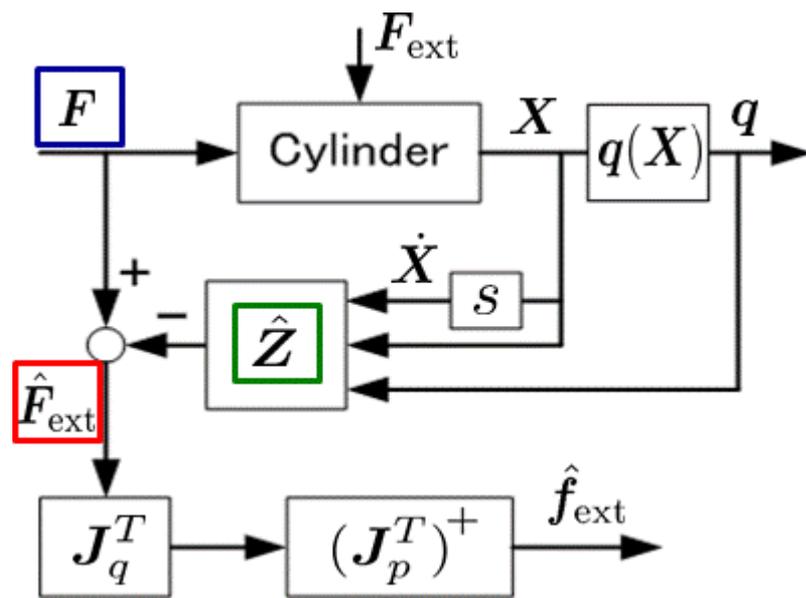
駆動力

−

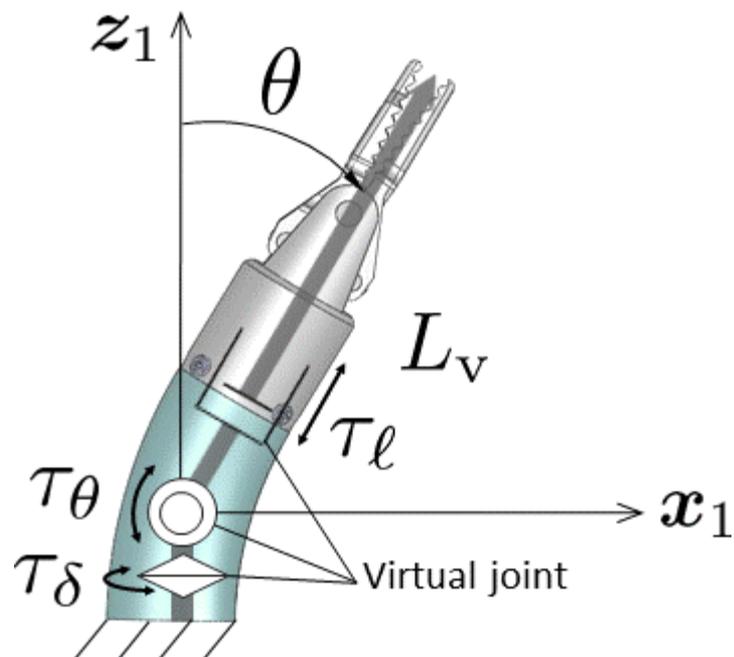
機構の動力学

=

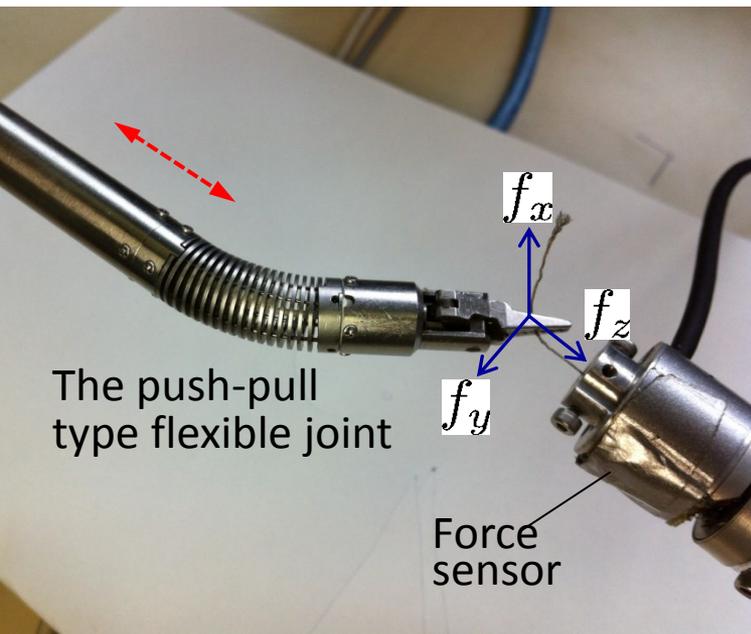
外力成分



リンク近似モデル



外力推定実験結果



⇒ 全ての並進方向の外力を検出可能

⇒ ただし関節の伸縮方向は屈曲方向に比べて外力の検出感度は低い

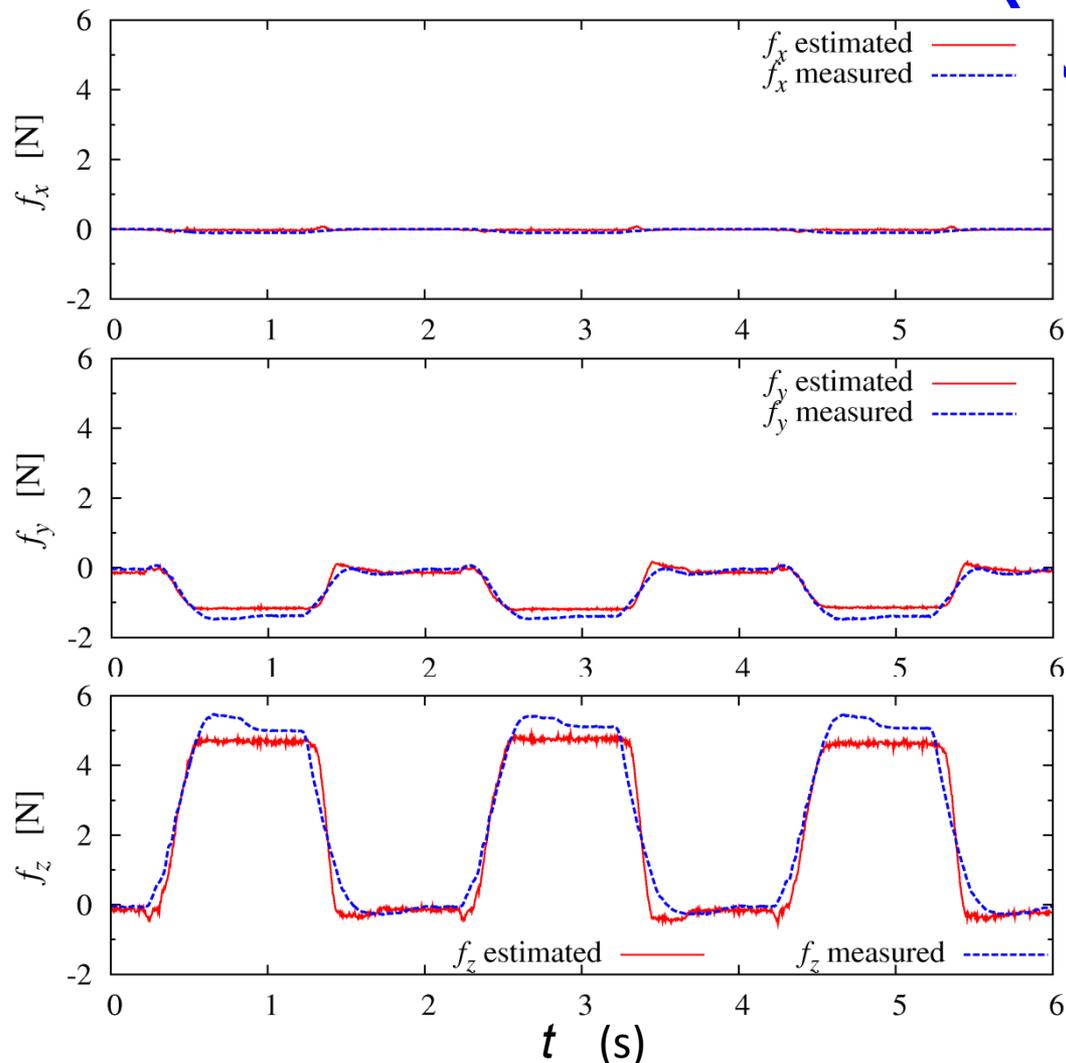


Fig. Transient response of external forces using 3-dof model of the flexible joint

鉗子保持マニピュレータ

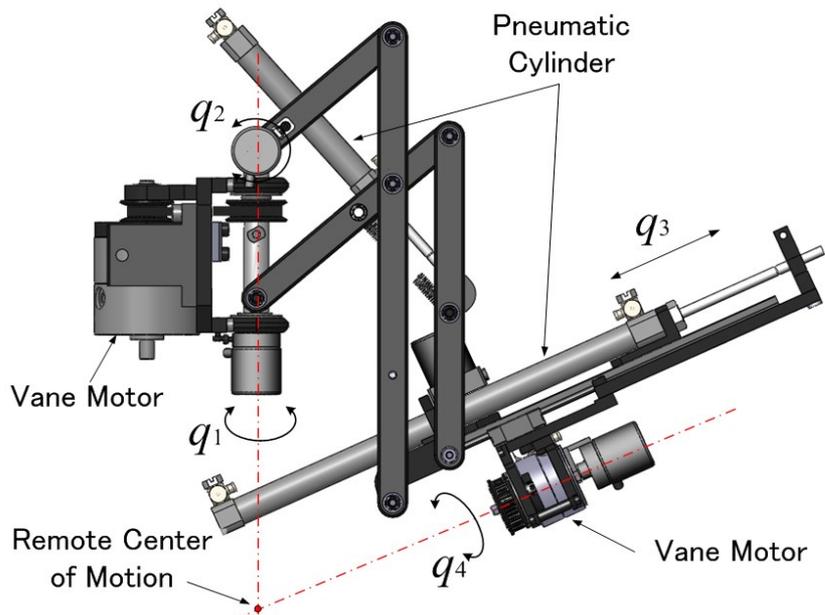
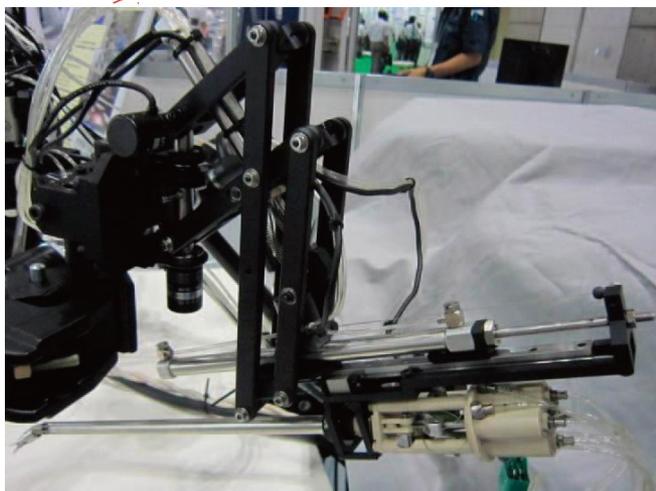


Table Working range and maximum force/torque

	ϕ	ψ	ρ	θ
working range	$\pm 52^\circ$	$\pm 50^\circ$	$\pm 50\text{mm}$	$\pm 120^\circ$
force / torque	3.6Nm	5.5Nm	39N	0.14Nm



- 4自由度
- 平行リンク機構とジンバル機構の組み合わせ
- 挿入点が機構的に不動 (Remote Center of Motion)
- 減圧弁により最大発生力を容易かつ確実に調整可能

Fig. Developed manipulator for supporting forceps

開発中の手術ロボットシステム

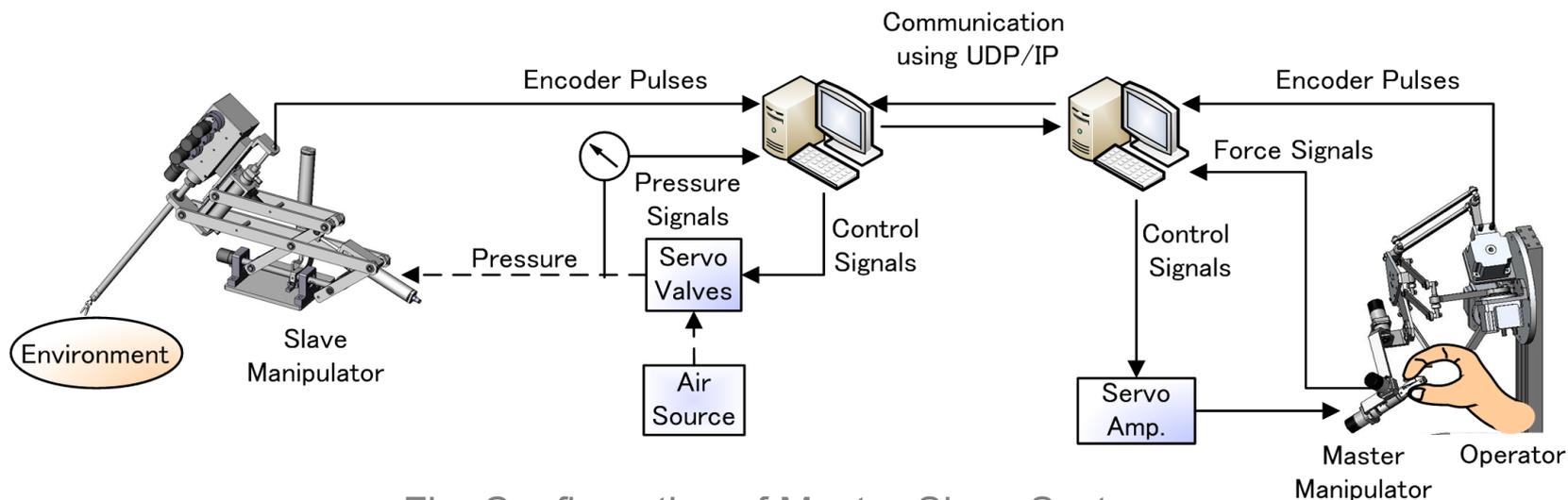


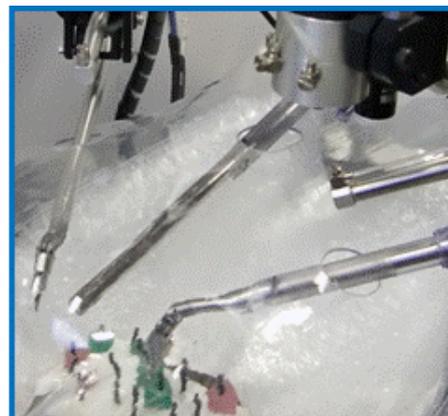
Fig. Configuration of Master-Slave System



医師が操作する
マスタデバイス
電動駆動

位置情報

力情報



体内で動作する
スレーブ側ロボット鉗子
空気圧駆動

実装したバイラテラル制御系

マスタ装置とスレーブ装置の間で姿勢と力の状態を一致させるように制御すること

- 理想応答の実現
- スレーブ側を直接操作しているような感覚, 高い臨場感
 - 作業の安全性は完全に術者の技術に依存する

インピーダンス制御により安全性の向上を図る

- スレーブ: 空気の柔らかさを活かし, コンプライアンスを持たせる
- マスタ: 安定な操作のため適度の粘性効果を持たせる

↳ 過剰な速度, 力の発生を抑える

設定インピーダンス

$$\text{Slave: } -\mathbf{f}_s = M_s \mathbf{r}_s + B_s (\dot{\mathbf{r}}_s - \dot{\mathbf{r}}_m) + K_s (\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_m)$$

$$\text{Master: } \mathbf{f}_m - \mathbf{f}_s = M_m \ddot{\mathbf{r}}_m + B_m \dot{\mathbf{r}}_m$$

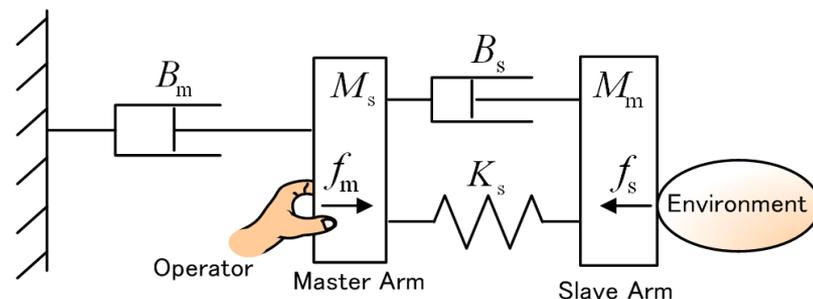
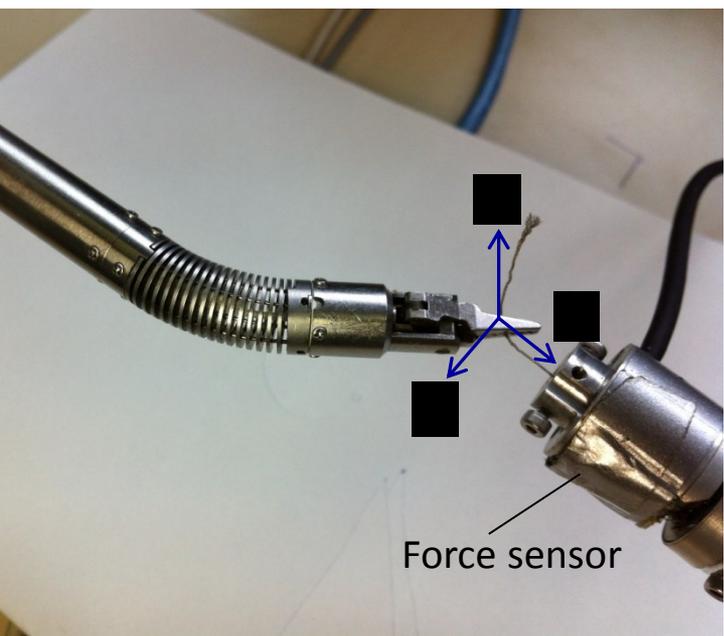


Fig. Equivalent model of the impedance-controlled master-slave system

外力作用時の推定外力／マスタ提示力



鉗子先端をワイヤで拘束
※プッシュプル駆動型鉗子
マニピュレータを使用

➤ 操作者への直観的な外力
提示を確認

➤ ただし0.3N未満の外力は
誤差として提示されない

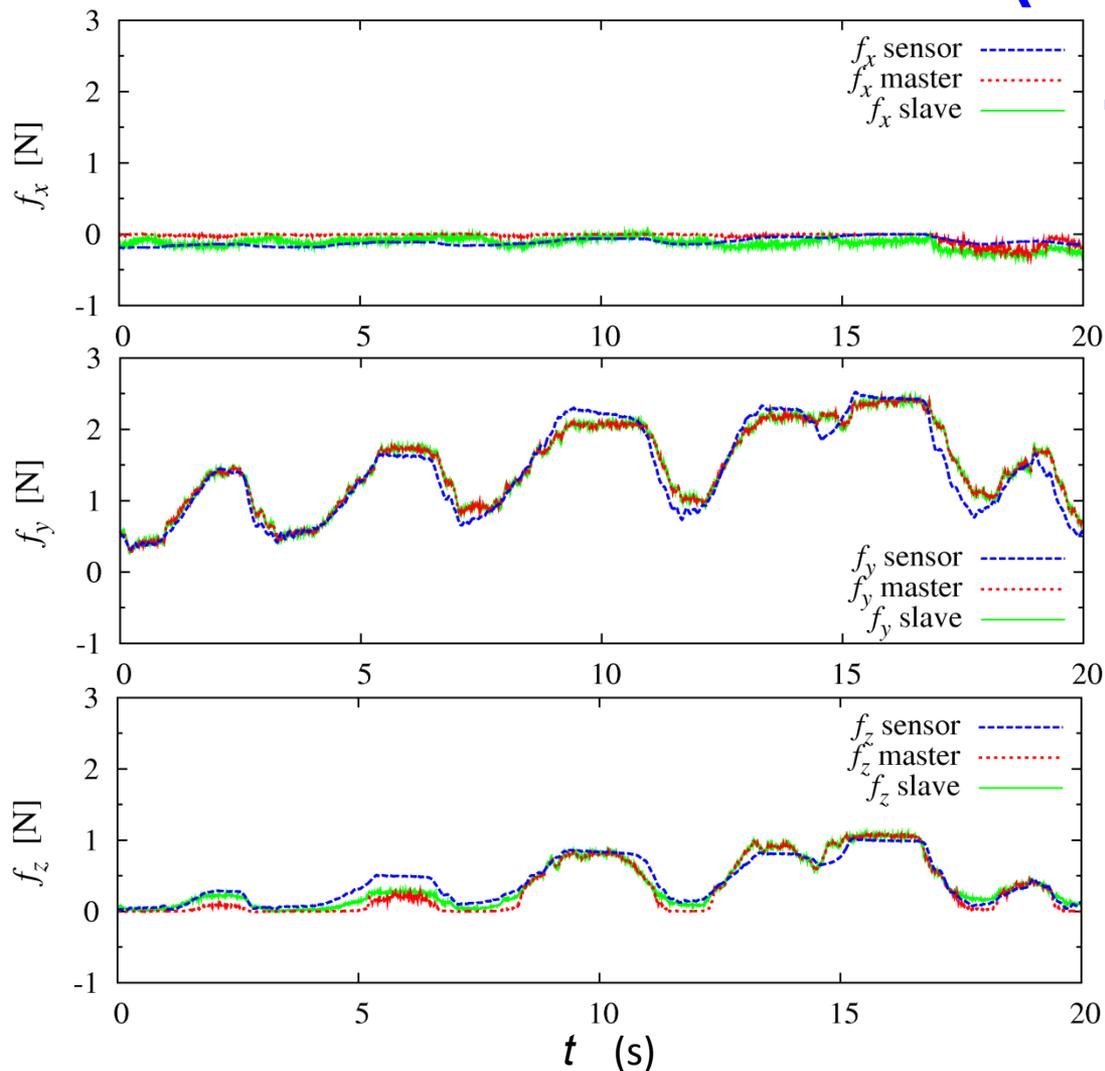
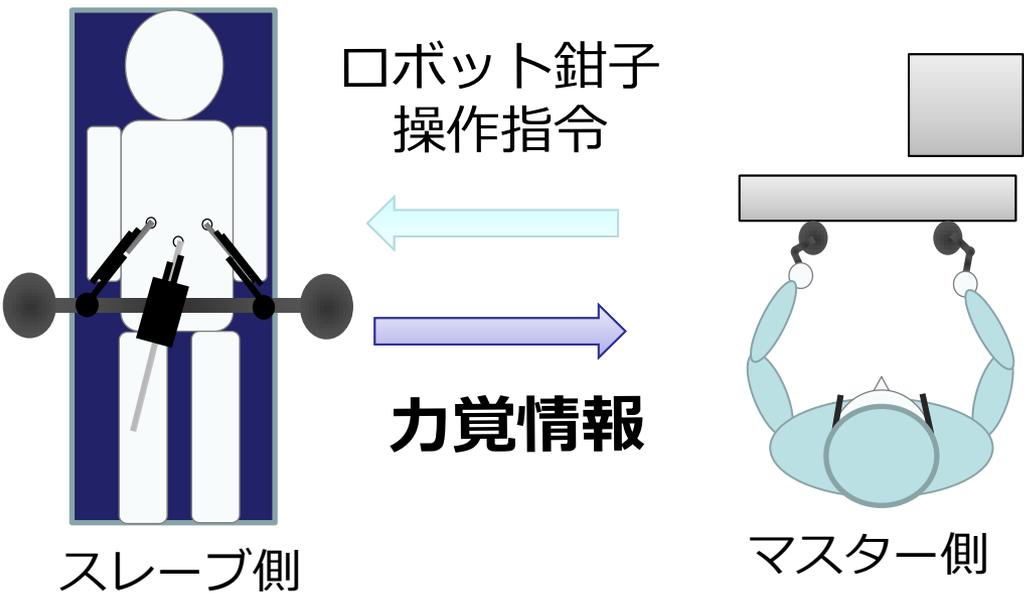


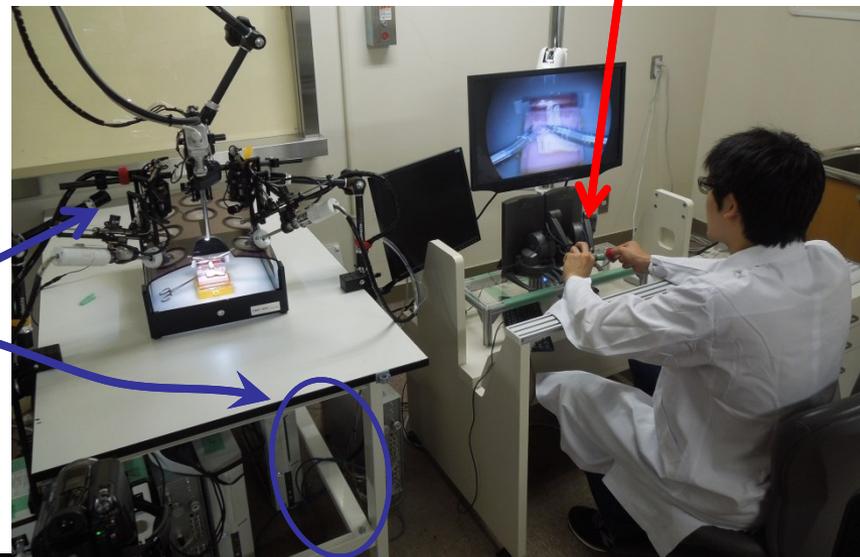
Fig. Transient response of estimated/presented/measured forces in the loaded condition

システム概要



鉗子に加わった外力
が操作スティックに
反映される

制御装置・鉗子本体と
もにコンパクト

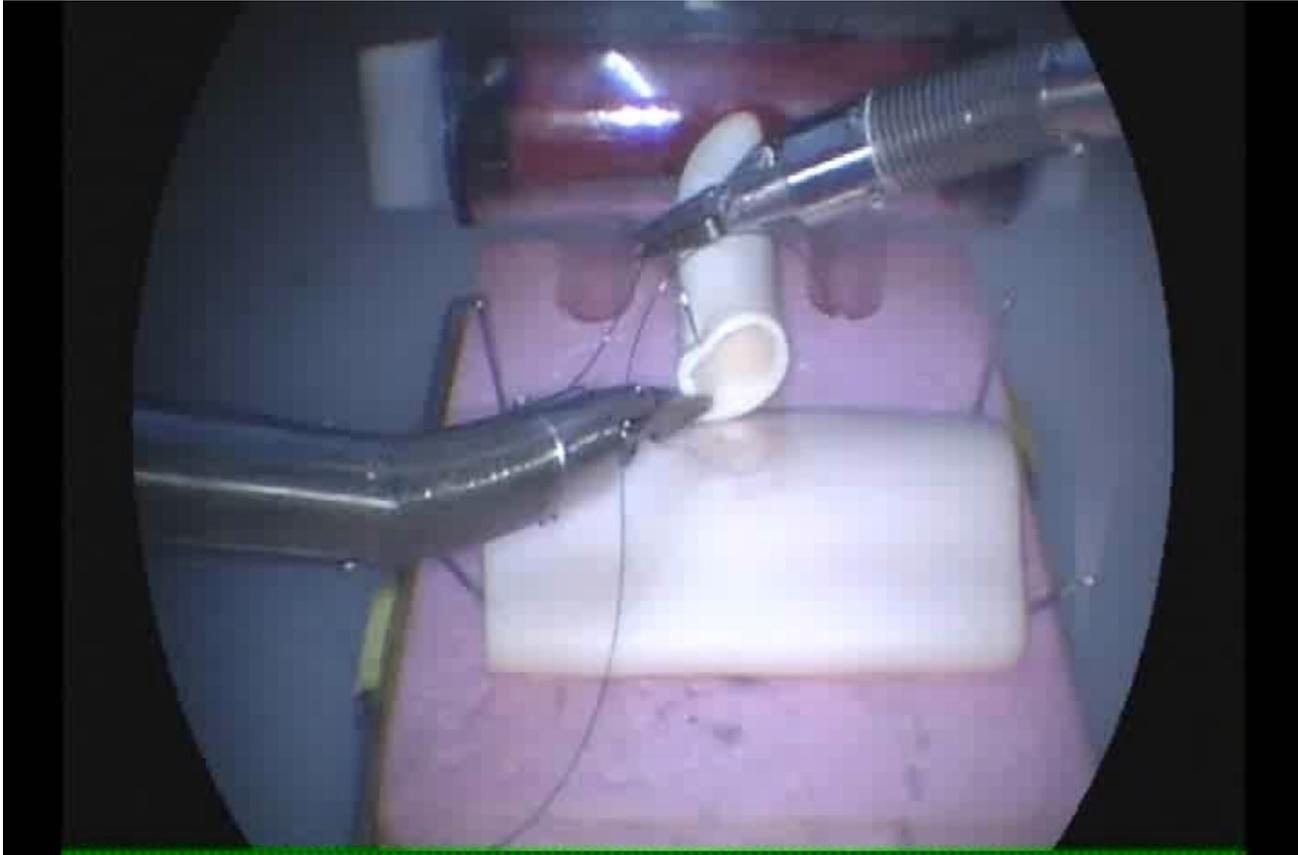


方法

外科経験5年の医師に、ドライボックス下で胆管空腸吻合モデル（WetLab社製）を用いて、通常鉗子とロボットによる胆管空腸吻合を行い検討した。

3次元腹腔鏡下（新興光器製作所製）で、胆管空腸吻合は後壁、前壁連続縫合8針、結紮は最初と最後に3回行った。

ビデオ



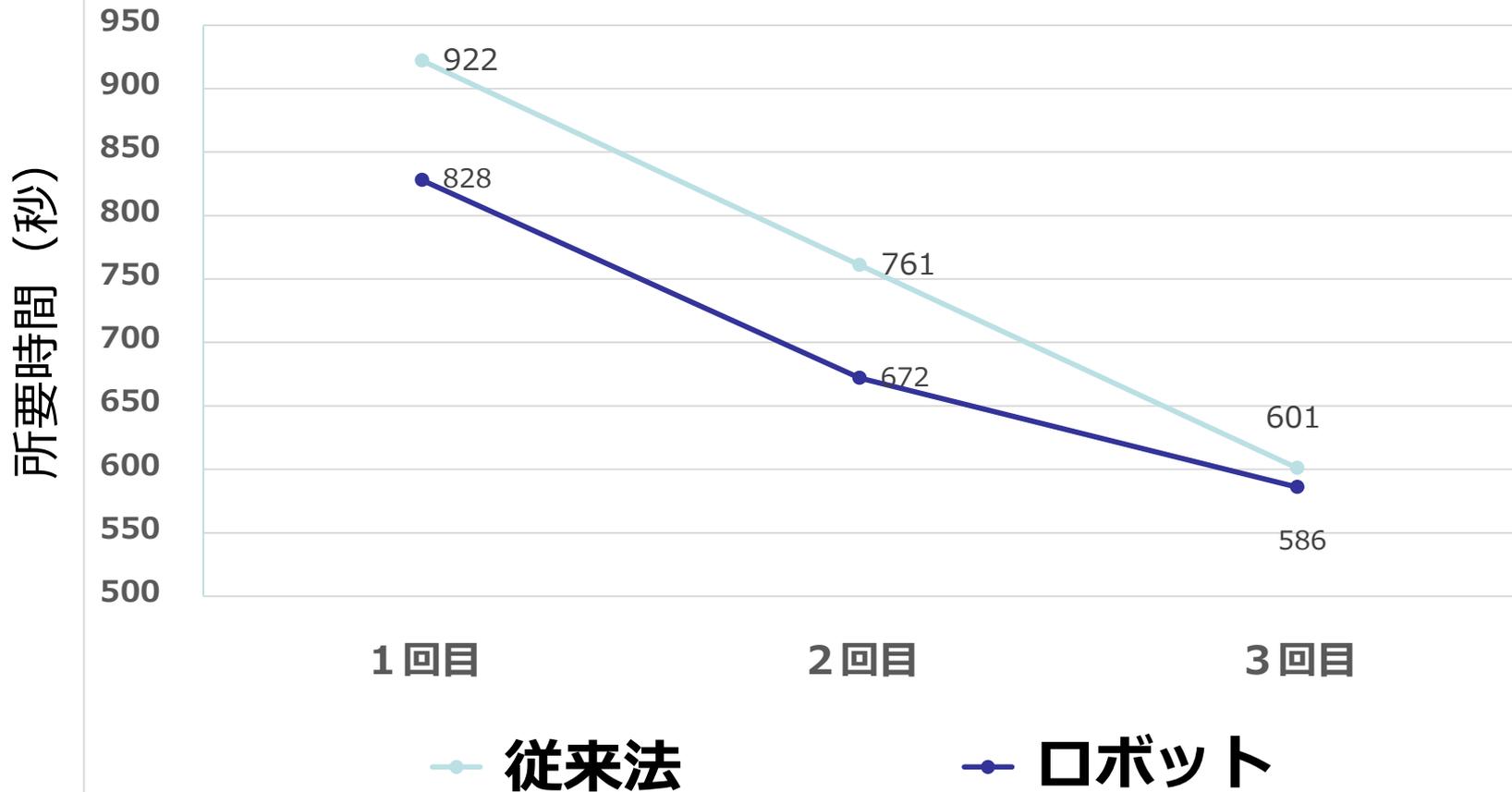
現段階では針の把持力、操作性に課題は残る。

ロボットならではの基本的な運針操作は実現できている。

空気圧制御のため動きが柔らかい。関節が柔軟→組織優しく、安全。

結果

胆管空腸吻合モデル所要時間比較



空気圧制御ロボット鉗子の利点

コンパクト

- 鉗子駆動部分
- 制御部分



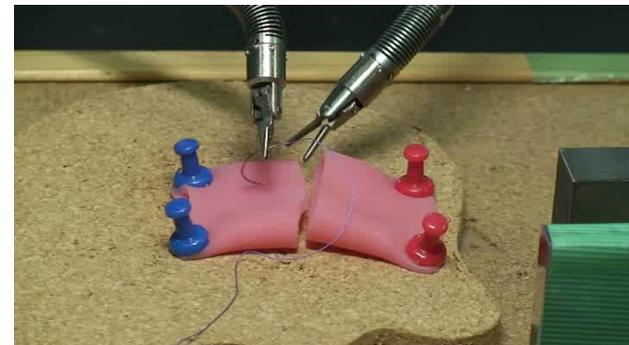
低コスト

- 構造がシンプル



柔軟関節

- 安全性が高い
- 細い糸でも切れない



力覚の呈示

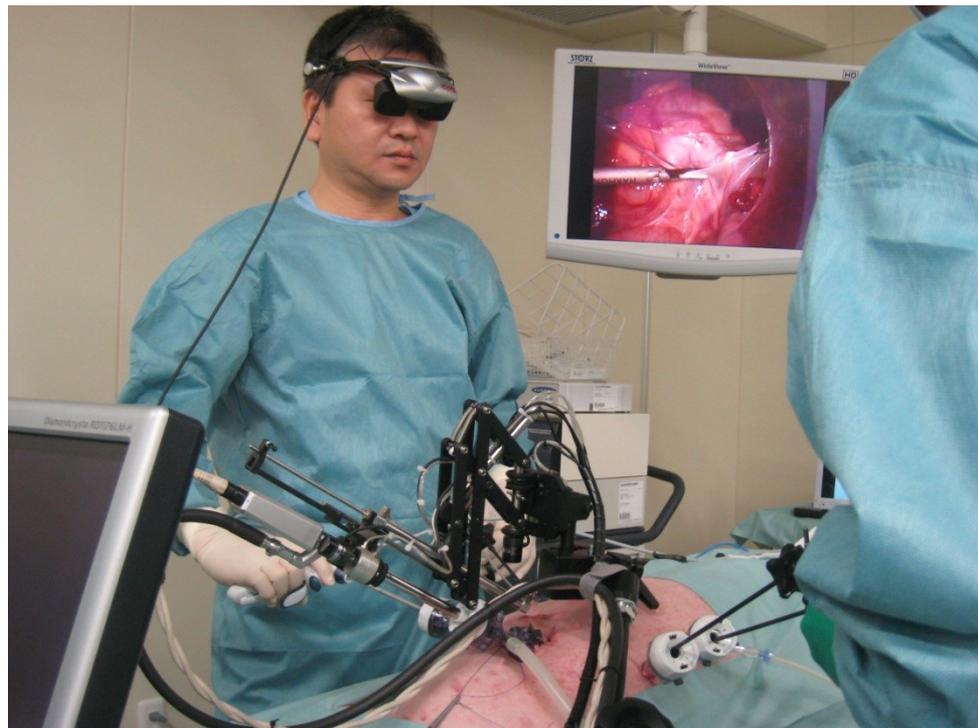
- 鉗子の力覚を術者に Feedback できる。

医療機器の分類

医療機器は、その機器の人体等に及ぼす危険度に応じ、国際基準GHTF ルールに基づき国際的なクラス分類
日本ではこのクラス分類に基づいて、厚生労働省告示により既存の医療機器が分類されている。

- クラスI(一般医療機器)
不具合が生じた場合でも、人体へのリスクが極めて低いと考えられるもの
- クラスII(管理医療機器)
不具合が生じた場合でも、人体へのリスクが比較的低いと考えられるもの
- クラスIII(高度管理医療機器)
不具合が生じた場合、人体へのリスクが比較的高いと考えられるもの
- クラスIV(高度管理医療機器)
患者への侵襲度が高く、不具合が生じた場合、生命の危険に直結するおそれがあるもの

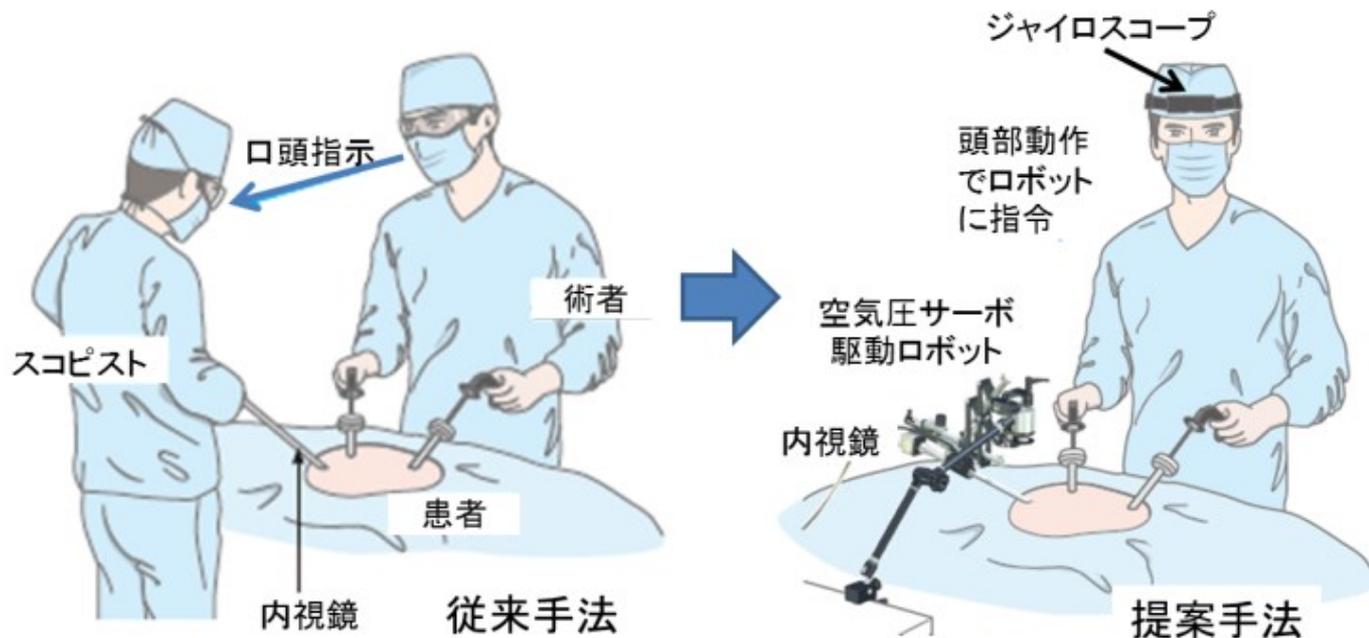
内視鏡操作システム



研究目的と開発コンセプト

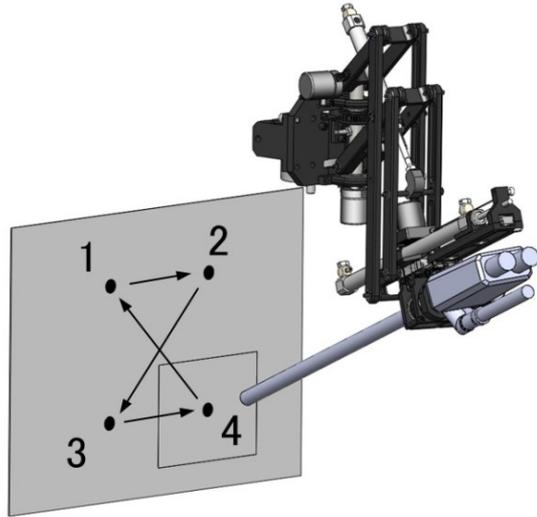
目的

術者が意図した通りの安定した視野を提供する
立体内視鏡操作システムの開発

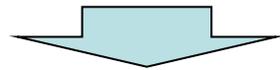


- ロボットアームによる内視鏡の保持
- ヘッドトラッキング(頭部運動計測)による視野コントロール

アーム追従性の評価



- 内視鏡先端からおおよそ100mmの位置に4つの点が描かれたA4用紙を設置
- 上図の順に各点が視野の中央に位置するように内視鏡を操作



ジャイロスコープの角速度から計算した内視鏡先端の目標速度と実際の速度を比較

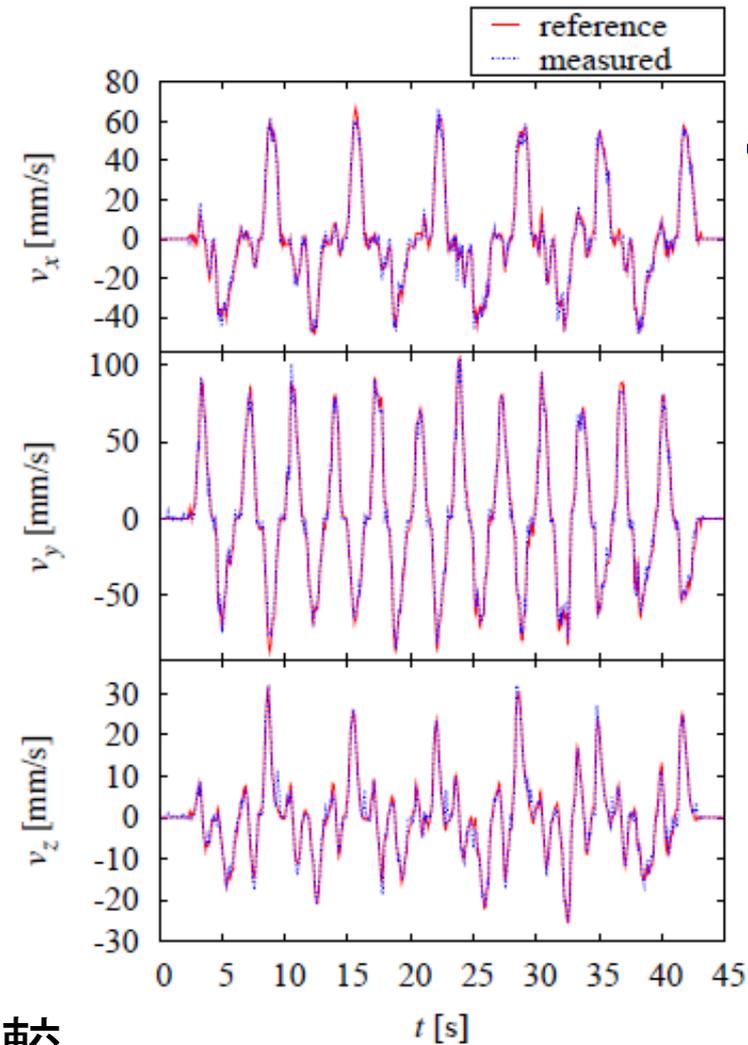
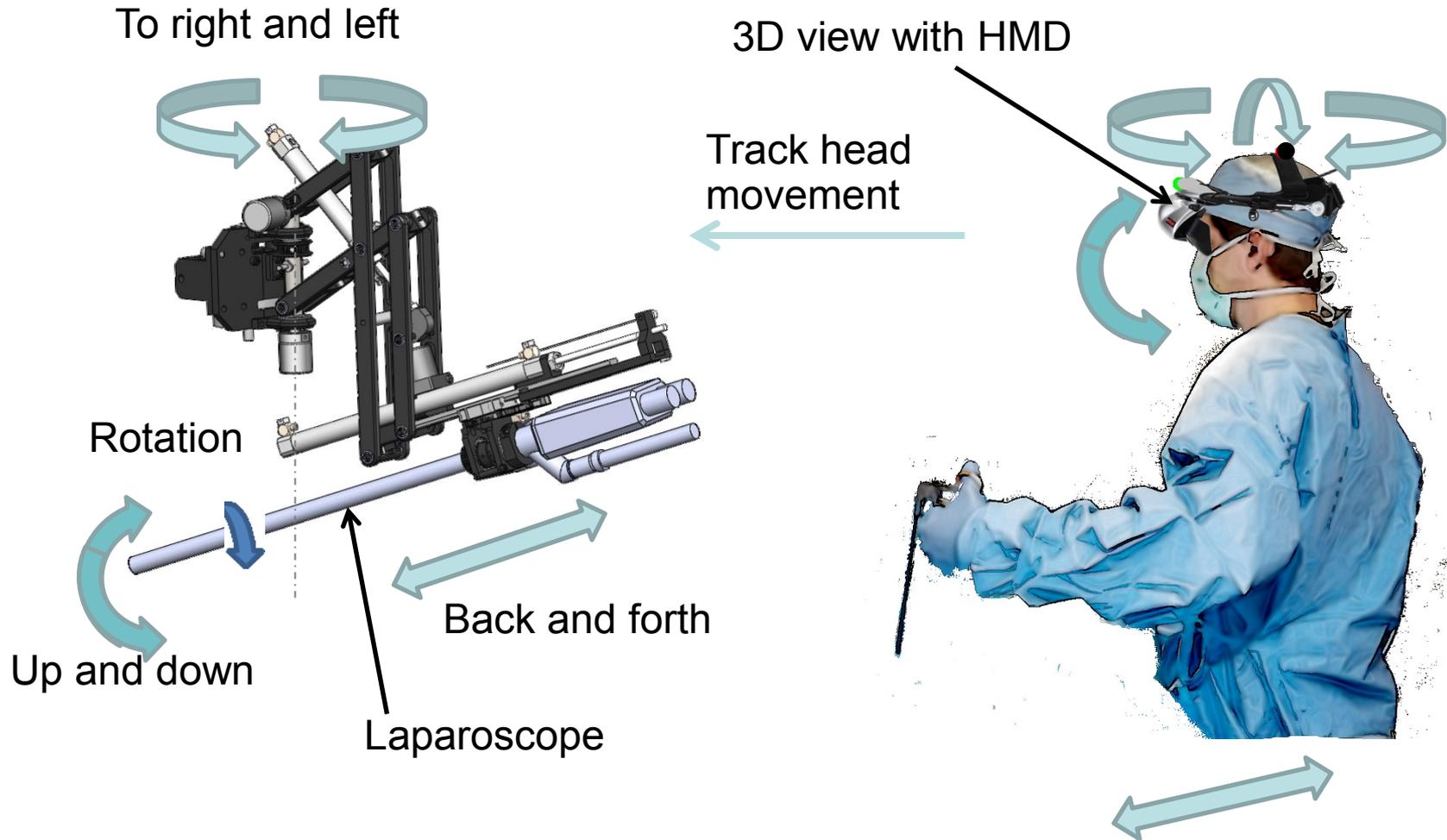


Fig. Experimental results

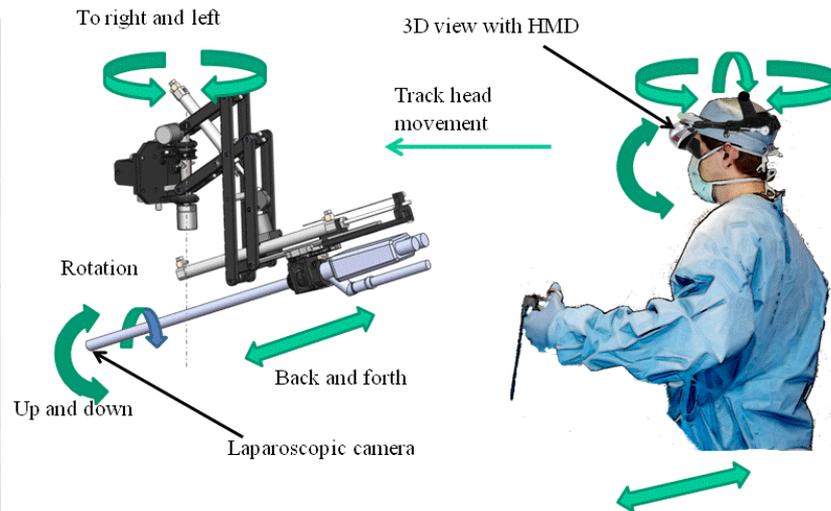
頭部運動による指令によく追従していることを確認

頭部運動による保持アームの操作



3自由度の運動を操作可能

立体内視鏡操作システム(エアロビジョン)



一般的名称: 内視鏡ホルダ
 名称: エアロビジョン
 許可番号: 13B1X10085

特長	メリット
HMD(ヘッドマウントディスプレイ)による術者への3D画像の提示	術者の負担軽減
術者の意図通りにカメラアングルを操作(HMD搭載のセンサで術者の動きを検出し、保持マニピュレータが追従)	<ul style="list-style-type: none"> ・手術の高効率化 ・カメラ助手への依頼が不必要
空気圧駆動内視鏡保持マニピュレータによる柔らかさを実現	臓器への接触の際の安全性確保

臨床実験の様子



術者の要求通りの視野を提示

まとめ

- 試作した空気圧駆動をスレーブ側に用いた力覚提示機能を有する遠隔操作対応型手術支援ロボットシステムを紹介
- 開発した手術支援システムの評価実験を実施
- 手術支援ロボットシステムの開発から派生した立体内視鏡操作システムを紹介
- 医療機器開発で重要なこと
滅菌，洗浄など運用をはじめから認識して開発を行う必要がある