



Title	身体との物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアの構成手法とその実装
Author(s)	谷口, 和弘
Citation	大阪大学, 2008, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1231
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

身体との物理的な接触を前提とする
インタラクティブメディアの構成手法とその実装

平成20年9月

谷口 和弘

身体との物理的な接触を前提とする
インタラクティブメディアの構成手法とその実装

博士（工学）論文提出先
大阪大学基礎工学研究科

平成20年9月

谷口 和弘

論文要旨

インタラクティブメディアとは、双方向で情報伝送を行う機能を有する対話型のメディアである。身体との物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアは、人と技術の関わりを重視して構成すると、人からの情報を受信するシステム A と人へ情報を発信するシステム B で構成することができ、「人 → システム A → システム B → 人」のループ、いわゆる人とシステムのインタラクションが成り立つ。この構成では、はじめに人がシステム A に働きかけ、次にシステム A が人からの意図を受信しシステム B へ制御信号を出力する、結果システム B が適切に制御され、人へ新たな情報を発信するものである。人はこのシステムを仲介することで、「能力の拡大」を図ることができる。今後、インタラクティブメディアは、人々の精神的・物理的に非常に近いところで利用されながら人々の日常生活に浸透していき、急速な普及と発展を遂げることが予想されている。

本論文では、インタラクティブメディアを構成する基本要素のうち、身体と物理的に接触するシステム（システム A, B）について、「人と技術との関わり」に注目して構成手法を提案し、その構成手法を基にしたシステムを実装し、検討を行った内容について述べた。システム A としては、ウェアラブルコンピュータ用の入力装置を取り上げた。具体的には、ユーザが機器操作を目的として意図的に行うこめかみ付近の表皮の動きを光学式距離センサでセンシングし、その値をシングルチップマイクロコンピュータで処理して機器制御用の信号を生成するウェアラブル型入力装置（愛称、こめかみスイッチ）の構成方法と実装例について考察した。このこめかみスイッチの特長は、使用者が常時利用でき、日常の生活に支障をきたすことなく、ハンズフリーで使用でき、小型・軽量・安価で製造可能であり、機器制御を意図した動き以外の会話や食事などの日常的な動作には反応しないことである。また、システム B としては、患者の体内に挿入した手術器具を操るメディカルロボットを取り上げる。本研究のメディカルロボットは、低侵襲治療で一般的となった内視鏡外科手術に注目し、その手術を支援するための内視鏡を把持位置決めする内視鏡ロボットである。本ロボットは、安価に製造できるため、内視鏡ロボットをディスプレイ医療機器として扱うことが可能である。また小さなワークスペースの中で視野展開が可能でかつ内視鏡の操作のために大きなメカニズムを必要としないため、術者の作業を妨げないなどの特長を持つ。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	2
1.2 身体との物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアの基本モデル	4
1.3 ウェアラブルコンピュータ	7
1.4 メディカルロボット	8
1.5 本論文の目的と構成	11
第2章 ウェアラブルコンピュータ	13
2.1 緒言	14
2.2 ウェアラブル型入力装置の構成方法	18
2.3 実施例1：噛締め動作を機器操作に利用したウェアラブル型入力装置 —こめかみスイッチ—	19
2.4 実施例2：瞬き動作を機器操作に利用したウェアラブル型入力装置 —アフォーダンスを考慮したこめかみスイッチの構成例—	42
2.5 まとめ	70
第3章 メディカルロボット	71
3.1 緒言	72
3.2 内視鏡ロボットの構成方法	78
3.3 実装例1：ディスプレイ型内視鏡ロボット（初号機）	83
3.4 実施例2：ディスプレイ型内視鏡ロボット（2号機）	108

3.5 ディスポーザブル型内視鏡ロボットに関する医師への調査結果・・・131

3.6 まとめ・・・132

第4章 結論 —————135

4.1 研究成果・・・136

4.2 課題と展望・・・138

謝辞 —————141

参考文献 —————149

研究業績 —————157

目次

- 1.1 Social spread of interactive media . . . 4
- 1.2 Schematic diagram of a general communication system . . . 5
- 1.3 Schematic diagram of a general interactive media . . . 5
- 1.4 Schematic diagram of a interactive media . . . 6
- 1.5 Wearable computer in interactive media . . . 8
- 1.6 Surgical robot in interactive media . . . 10

- 2.1 Interaction loop of wearable computer . . . 15
- 2.2 Mechanism for movement of temple . . . 20
- 2.3 KOMEKAMI sensor . . . 21
- 2.4 Circuit diagram of KOMEKAMI sensor (Right – hand side) . . . 22
- 2.5 Biocommand . . . 24
- 2.6 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of gum chewing (for one cycle) . . . 24
- 2.7 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of unconscious blinking (for one cycle) . . . 25
- 2.8 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of intentional blinking (for one cycle) . . . 25
- 2.9 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of looking upward (for one cycle) . . . 26
- 2.10 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of looking downward (for one cycle) . . . 26
- 2.11 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of looking in right direction (for one cycle) . . . 27
- 2.12 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of looking in left direction (for one cycle) . . . 27
- 2.13 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of nodding (for one cycle) . . . 28
- 2.14 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of shaking head from side to side (for one cycle) . . . 28

2.15 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of vocalization	• • • 29
2.16 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of walking	• • • 29
2.17 Sketch of KOMEKAMI switch	• • • 31
2.18 Block diagram of KOMEKAMI switch	• • • 31
2.19 Biocommand Phases	• • • 33
2.20 Relations between measurement value and each step of algorithm	• • • 33
2.21 Sketch of demonstrative experiment device	• • • 37
2.22 Block diagram of demonstrative experiment device	• • • 37
2.23 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of running	• • • 41
2.24 KOMEKAMI sensor on the bone conduction headphone	• • • 45
2.25 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of intentional blinking (for one cycle)	• • • 47
2.26 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of unconscious blinking (for one cycle)	• • • 47
2.27 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of gum chewing (for one cycle)	• • • 48
2.28 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of looking upward (for one cycle)	• • • 48
2.29 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of looking downward (for one cycle)	• • • 49
2.30 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of looking in right direction (for one cycle)	• • • 49
2.31 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of looking in left direction (for one cycle)	• • • 50
2.32 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of vocalization	• • • 50
2.33 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of walking	• • • 51
2.34 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of running	• • • 51
2.35 Actions for biocommand	• • • 52
2.36 Character for guidance icon	• • • 54

- 2.37 Icon for play/pause · · · 54
- 2.38 Icon for fast-forward · · · 55
- 2.39 Icon for fast-rewind · · · 55
- 2.40 Guidance system · · · 56
- 2.41 Schematic eyes of big pupil size · · · 56
- 2.42 Schematic eyes of small pupil size · · · 57
- 2.43 Sketch of demonstrative experiment device (Second Prototype) · · · 58
- 2.44 Block diagram of demonstrative experiment device (Second prototype) · · · 58
- 2.45 Installation image of the KOMEKAMI switch · · · 59
- 2.46 Relationship of shake of cable to shake of sensor · · · 64
- 2.47 Graphic symbol for question 3 · · · 66
- 2.48 Graphic symbol for question 4 · · · 66
- 2.49 Graphic symbol for question 5 · · · 66
- 2.50 Instruction manual for KOMEKAMI switch · · · 67

- 3.1 An example of robotic surgery. A robot manipulator, instead of the camera assistant, holds and positions the laparoscope · · · 73
- 3.2 Traditional surgical robot (AESOP) · · · 74
- 3.3 Interaction loop of Laparoscope robot · · · 75
- 3.4. Investigation results of the laparoscope manipulators · · · 77
- 3.5 Four-DOF motions in general laparoscopic instruments · · · 79
- 3.6 System configuration of first prototype · · · 85
- 3.7 Disposable part of first prototype · · · 86
- 3.8 Endoscope installation part · · · 86
- 3.9 Joystick interface of first prototype · · · 88
- 3.10 Hydraulic linear actuator of first prototype · · · 88
- 3.11 Mechanism of controller for the hydraulic linear actuator · · · 90
- 3.12 Controller for the manipulator of first prototype · · · 90
- 3.13 Water leaking system · · · 91
- 3.14 Shock absorber · · · 93
- 3.15 Overview of *in-vitro* experiment for first prototype · · · 96

3.16 Setup of <i>in-vitro</i> experiment for first prototype	96
3.17 Laparoscopic image of the bile duct	97
3.18 Laparoscopic image of the body of gallbladder.	97
3.19 Laparoscopic image of the fundus of gallbladder.	97
3.20 Overview of first <i>in-vivo</i> experiment for first prototype	99
3.21 Setup of first <i>in-vivo</i> experiment for the first prototype	99
3.22 Laparoscopic image of the bile duct in first experiment for the first prototype	100
3.23 Laparoscopic image of the body of gallbladder in first experiment for the first prototype	100
3.24 Laparoscopic image of the fundus of gallbladder in first experiment for the first prototype	101
3.25 Laparoscopic image of an experiment that stopped bile leakage from the gallbladder	101
3.26 Overview of second <i>in-vivo</i> experiment for first prototype	102
3.27 Setup of second <i>in-vivo</i> experiment for the first prototype	103
3.28 Laparoscopic image of the bile duct in second t experiment for the first prototype	104
3.29 Laparoscopic image of the body of gallbladder in second experiment for the first prototype	104
3.30 Laparoscopic image of the fundus of gallbladder in second experiment for the first prototype	105
3.31 Laparoscopic image of an experiment that stopped bile leakage from the gallbladder	105
3.32 System configuration of second prototype	109
3.33 Disposable part of second prototype	109
3.34 Joystick interface of second prototype	110
3.35 Computer Simulation	110
3.36 Hydraulic linear actuator of Second Prototype	111
3.37 Mechanism of hydraulic linear actuators	112
3.38 Controller for the manipulator of second prototype	113
3.39 Push-button type	116
3.40 Foot-pedal type	116

- 3.41 Overview of *in-vitro* experiment for second prototype . . . 119
- 3.42 Setup of *in-vitro* experiment for second prototype . . . 119
- 3.43 Laparoscopic image of the neck of gallbladder. . . . 121
- 3.44 Laparoscopic image of the body of gallbladder. . . . 121
- 3.45 Laparoscopic image of the fundus of gallbladder. . . . 121
- 3.46 Overview of *in-vivo* experiment for second prototype . . . 126
- 3.47 Setup of *in-vivo* experiment for second prototype . . . 126
- 3.48 Laparoscopic image of the bile duct in an experiment for the second prototype . . . 127
- 3.49 Laparoscopic image of the body of gallbladder in an experiment for the second
prototype . . . 127
- 3.50 Laparoscopic image of the fundus of gallbladder in an experiment for the second
prototype . . . 127
- 3.51 Laparoscopic image of laparoscopic distal Assisted gastrectomy (LADG) . . . 128
- 3.52 Laparoscopic image of Laparoscopic low anterior resection . . . 129

表目次

2.1 Classification of wearable-type interfaces . . .	17
2.2 Demonstrative experiment results . . .	39
2.3 Effects of each action on biocommand . . .	39
2.4 Demonstrative experiment results . . .	63
2.5 Demonstrative experiment results of each prototype . . .	63
2.6 Correct answer ratio . . .	69
3.1 Spec of actuators . . .	114
3.2 Role of each subject in the <i>in-vitro</i> experiment . . .	118
3.3 Operation beginning time and Time to complete the <i>in-vitro</i> task . . .	120
3.4 Measurements of stress marker . . .	124

第1章

序論

Charles Robert Darwin [1]によれば、生物は環境に適応して、自らの能力を変化させてきた。進化である。しかし、人は道具を製作し、それらを使いこなして、進化よりも効率よく自らの能力の拡大を急速に図っている。科学技術の進歩である。

自然界ではオランウータンが棒切れを拾って、高い木の上のバナナを叩き落して食べるのが知られており、単純な道具であれば、人ほど高度な知能がなくとも容易に取り扱うことができる。しかし、我々の身近で使う道具の中にはコンピュータ科学やメカトロニクスを応用し構成した高機能・高性能な道具が増え、人はそれらの道具とのインタラクションが適切に行えず、それらの道具を使いこなせないことがしばしばある。

では、道具（人工物）をどのように構成すればよいのだろうか？

本論文では、人の身体との物理的な接触を前提とする人工物に焦点を当て、その構成手法と実装について考察する。

1.1 研究背景

服を着るように身に付けた小型のコンピュータシステムが自分の作業を常時支援し、人としての能力を拡大してくれる。また少子高齢化の進む社会では、患者を早く、安全に、負担をかけることなく健康な状態で社会復帰させることが重要であるため、ロボットマニピュレータが手術器具を把持・位置決めすることで手術を支援し、外科医の人としての能力を拡大させて、より高度な医療を実現してくれる。前者がウェアラブルコンピュータ、後者がメディカルロボットである。このように人は多種多様な人工物を製作し、それらとの適切なインタラクションを図ることにより、自らの能力の拡大を図っている。言い換えれば、人工物を用いた人の能力拡大には、人工物との適切なインタラクションが重要である。例えばかつてコンピュータは、人とのインタラクションが十分に検討されておらず、一部の限られた人が専門知識を駆使して操作していた時代がある。しかし、今は子供から年寄りまで、健常者も身障者も関係なく多くの人々が特別な専門知識を必要としなくても、気軽に、趣味、仕事、学習、人同士のコミュニケーション、そして情報収集などにコンピュータを活用している。これはインタラクションの研究成果の賜物である。このように科学技術の進歩に伴って、人と人工物とのインタラクションを研究する分野、つまり人と人工物との間の相互的な交流作法（相互作用）を研究する分野はますます重要性を増す。

人とインタラクションできるメディアはインタラクティブメディアと呼ばれている。インタラクティブメディアは、人が人工物に指示（情報）を与え、人工物が指示（情報）に従って仕事を行い、その結果（情報）を人にフィードバックするものである。インタラクティブメディアには、コンピュータ、ゲーム機、音楽プレーヤー、ロボット、そして飛び出す絵本など様々な形態があり、我々の身体と近い位置で使用されながら、生活と強く結びついている。

図 1.1 に代表的なインタラクティブメディアについて、社会的な普及の割合と身体との物理的な距離を軸として分類した図を示す。ここで、社会的な普及の割合では、市販されており日常的に使用されているものを高い位置（右側）とした。また、身体との物理的な距離は、「体内・常時着用」、「密接距離・固体距離」の2つのカテゴリに分けた。体内に分類されるものは、使用時に人の体内へインタラクティブメディアの一部もしくは全体を挿入して使用するものである。例えばメディカルロボットなどがある。常時着用には、インタラクティブメディアを常時着用して使用するものが該当する。例えば、

ウェアラブルコンピュータやロボットスーツなどである。密接距離と固体距離とは、文化人類学者の Edward Twitchell Hall [12] による、人同士でコミュニケーションを図る場合の相手との親密度を基準として分類した距離である。コミュニケーションとは、人同士の意思の疎通を目的とした情報のやり取りであるのに対し、インタラクションは、人と人工物、あるいは人同士の情報のやり取りをさす [13]。インタラクションには意思の疎通という概念は入っていないが、Hall の提案した密接距離と固体距離の考え方は、人と人工物とのインタラクションを考えるうえでも、情報のやり取りという点で適用可能であると考えられる。密接距離は夫婦や恋人同士に見られる距離であり、約 0cm から 45cm である。密接距離には、45cm 以内で使用可能でかつ体内・常時着用に分類されたもの以外のインタラクティブメディアで、携帯可能なものや人が望めば密度の高い接触が可能なものが該当する。例えば、パーソナルコンピュータ、モバイルコンピュータ、飛び出す絵本、ゲーム機、携帯電話機、そして携帯型音楽プレーヤーなどである。固体距離は友達同士に多く見られる距離で、手を伸ばせば触ることのできる距離（約 45cm から 120cm）である。よって、固体距離には、約 45cm から 120cm で使用し視覚的に捕え、手を伸ばせば比較的簡単に接触できるインタラクティブメディアが該当する。例えば、テレビ電話機、玩具ロボット、家庭用ロボットなどである。図 1 に示すとおりインタラクティブメディアは、常時着用して使用するウェアラブルコンピュータや構造の一部もしくは全体を人の体内で使用するメディカルロボットなど体内・常時着用に分類される身体と物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアの社会的な普及が遅れている。よって我々は人の心理や身体能力に強く関係する人の身体との物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアの基本的なシステム構成（基本モデル）を研究することが、人が能力拡大を目指して将来必要となる新しい人工物を開発するうえで重要な意味を持つと考えている。

本論文では、身体との物理的な接触を前提としたインタラクティブメディアを題材に取り上げて、その具体例を示し、社会的普及を目指した構成手法とその実装について論じる。本論文では身体との物理的な接触を前提としたインタラクティブメディアの具体例としてウェアラブルコンピュータとメディカルロボットを扱う。両者とも、社会的に普及することで多くのメリットを生むものである。

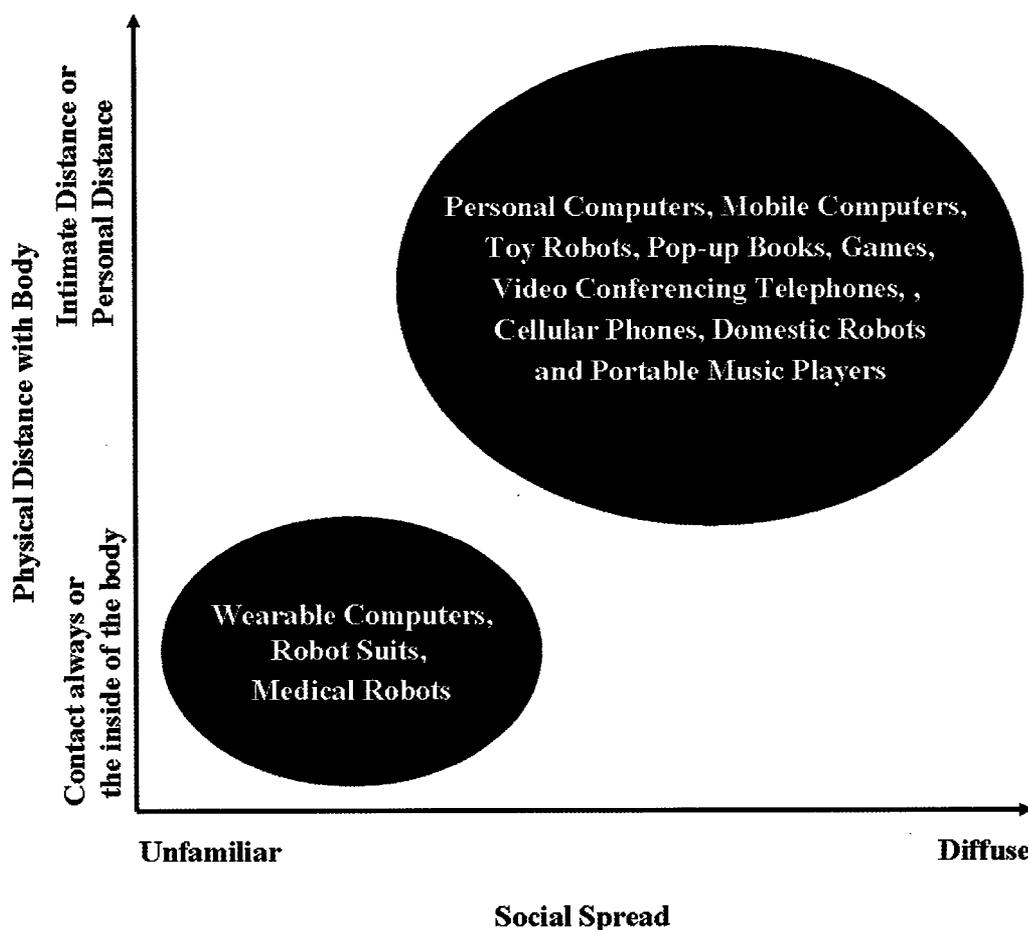


Fig.1.1 Social spread of interactive media

1.2 身体との物理的な接触を前提とする

インタラクティブメディアの基本モデル

インタラクションはコミュニケーションと「情報のやり取り」という点で同じであるので、インタラクティブメディアを人と人工物との間でのインタラクションを特徴とする情報伝送系として扱うことが一般的であると考えられる。よって、インタラクティブメディアをモデル化する場合、図 1.2 に示す Claude Elwood Shannon [14] の情報伝送系モデルの枠組みでインタラクティブメディアを捕らえた、図 1.3 のモデルが適当である。図 1.2 は、情報源からの情報を、符号器が通信路に適した信号へと変換し、通信路はノイズの影響を受けつつ受信者へ情報伝送を行い、受信者は復号器を介して、通信路から情報源が発信した形式に変換された情報を受け取る。図 1.3 に示したインタラクテ

ィブメディアも同様に、情報の流れに注目し各機能ブロックが配置されており、各機能ブロックは、図 1.2 における情報源と受信者が人、符号器と復号器がヒューマンインタフェース、通信路をコンピュータなどの処理装置、ノイズ源を環境として考えられる。インタラクティブメディアにおいて、人と技術との仲立ちをする部分は、ヒューマンインタフェースと呼ばれる。ヒューマンインタフェースの研究は、人と技術との間の界面に注目し発展を遂げている。一方インタラクティブメディアの研究は、人と技術の双方向での関わりに重きを置いて研究が進められている。つまり、人がいて、技術が存在して、その間にヒューマンインタフェースがあり、それらすべてを含めた「人と技術との関わり」を行う系そのものを研究の対象とすることが必要である。

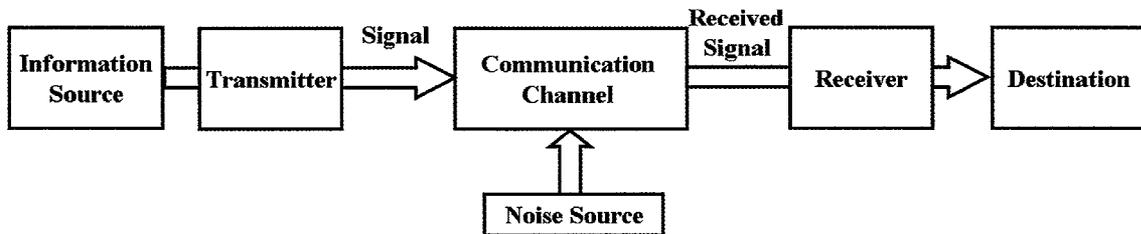


Fig 1.2 Schematic diagram of a general communication system

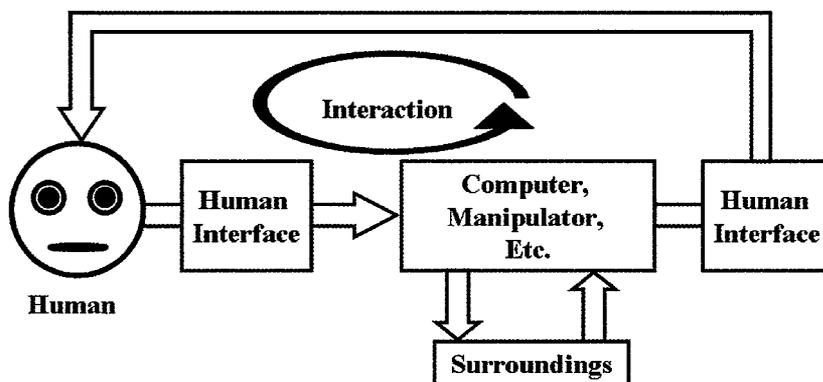


Fig 1.3 Schematic diagram of a general interactive media

本論文では、情報の流れではなく、人と技術との関わりに重きを置く。そのため本論文におけるインタラクティブメディアのモデルとして、図 1.3 に示すモデルは適当ではない。人と技術との関わりに視点を移して、インタラクティブメディアのモデルを考えた場合、人から人工物への関わりと技術から人への関わりに注目する必要がある。この人から人工物への関わりと技術から人への関わりに注目して構成したインタラクティブメディアモデル（基本モデル）を図 1.4 に示す。この基本モデルは、人からの情報（意図）を受信するシステム A と人へ情報を発信するシステム B で構成されており、「人 → システム A → システム B → 人」のループ、いわゆるインタラクションが成り立っている。このモデルは、人がシステム A に働きかける（意図）、システム A は人からの意図を受信しシステム B へ制御信号（意図）を出力する、結果システム B が適切に制御され、人へ新たな情報を発信するものである。人はこのシステムを仲介することで、「能力の拡大」を図ることができる。ここで、意図とは、受信物に影響を与えるための情報とする。我々は、人が能力拡大のために行う、人とシステム間での相互の情報の流れをインタラクションループと呼ぶ。

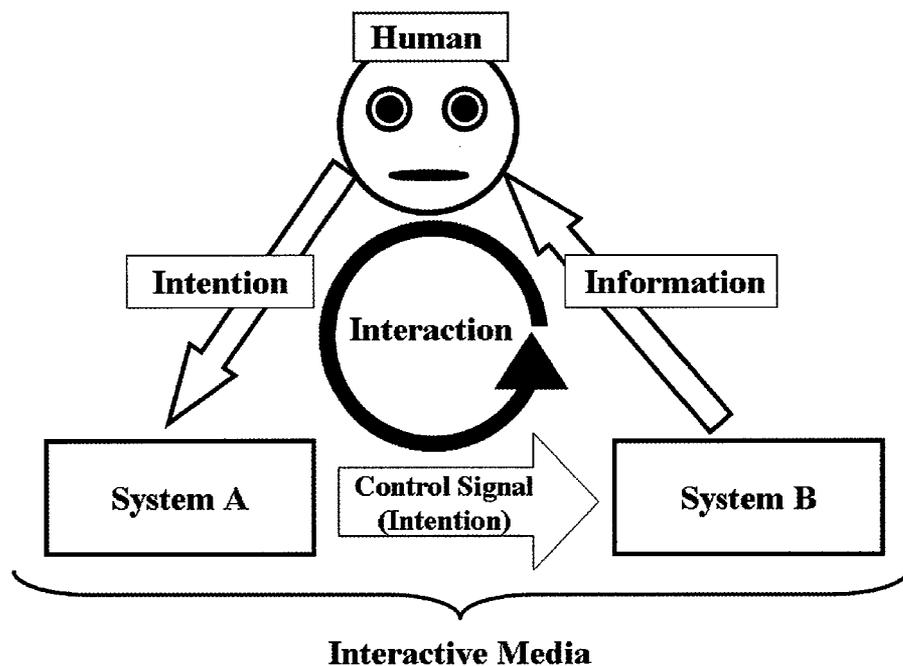


Fig. 1.4 Schematic diagram of interactive media

1.3 ウェアラブルコンピュータ

ウェアラブルコンピュータとは、衣服を着るかのように常時身に付けて使用するコンピュータのことであり、いつでもどこでも情報を受発信できることを目指している。ウェアラブルコンピュータが、ノート型パソコンなどのモバイルコンピュータと違う点は、ユーザにコンピュータを使わせるのではなく、何か他の作業を支援することだという点である。つまり、ウェアラブルコンピュータは、その作業に対する人の能力の拡大を図るために用いられる。

かつてウェアラブルコンピュータは、身に着けられるスタンドアローンで起動可能なコンピュータシステムとして捉えられていたが、現在はネットワーク技術の発展により、計算能力や記憶能力はネットワーク側に持たせればよくなったためウェアラブルコンピュータは、人の意図をネットワークに伝え、得られた情報を人に提示するウェアラブル型インタラクティブメディアとして捉えることができる。人と技術との関わりを重視してウェアラブルコンピュータを図示すると図 1.5 となる。システム A は人の意図に従ってシステム B を操り、システム B はシステム A の指示に従ってネットワークと情報の送受信を行い、人に受信した情報を提示する。システム A は、入力装置と制御装置、システム B はネットワークと出力装置で構成される。ここでシステム B に計算能力や記憶能力を持たしてもよい。システム A における人から意図を受信するパート（入力装置）は、トラックボールとボタンのみがついた小型デバイス [I 5] や米 Handkey 社の Twiddler などの片手用キーボード [I 6] などを、片手に持つか、あるいはユーザの腰につけて手を使って使用するものが多くみられ、ウェアラブルコンピュータの特長である、ハンズフリーを実現できていないものが多い。一方、システム B における情報を人に提示するパート（出力装置）には、三菱電機株式会社の SCOPO [I 7] などの片眼用でしかもその眼の視野の一部だけに映像を表示するタイプのヘッドマウントディスプレイやゴールデンダンス社の AUDIO BONE MGD-01 [I 8] などの耳（鼓膜）で音を聞くのではなく頭骸骨を介して聴覚神経に音を伝えるため耳を塞ぐことがないので周りの音も同時に聞くことができる骨伝導ヘッドフォンなど、常時装着した状態で、日常生活に必要な視覚や聴覚に支障を与えることなく十分な情報提示が可能なものがあり、それらはすでに開発され社会に普及している。このように、ウェアラブルコンピュータはシステム A の研究開発が遅れている。本論文では、ウェアラブルコンピュータに適したシステム A を強化・新規開発することでウェアラブルコンピュータの研究の発展を促す。

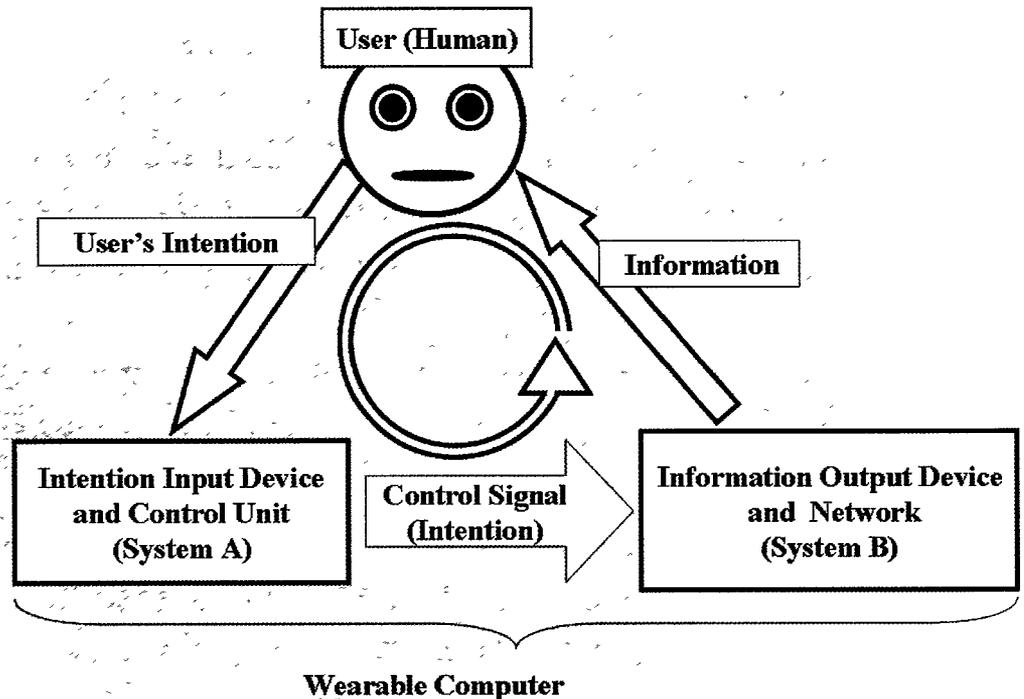


Fig 1.5 Wearable computer in interactive media

1.4 メディカルロボット

メディカルロボティクスとは、外科医の人としての能力を超えた「新しい目と手」をもたらすロボットの学問体系をさす。メディカルロボットとのインタラクションを通して、新しい目と手を与えられた外科医は、より正確で確実な手術が遂行できるようになるばかりではなく、これまで手術の対象とすらならなかった疾患も治癒できるようなる。

メディカルロボットは、大きく分けて、surgical CAD/CAM systems と surgical assistant systems の 2 種類に分類される [I 9]。Surgical CAD/CAM systems は、手術前に撮影された CT や MRI などの医用画像を基にして綿密な手術計画を立てて、それを忠実かつ精確に実行するロボットシステムである。この surgical CAD/CAM systems は高精度な骨切りや腫瘍へ向けて手術器具を迅速かつ正確に導入することで手術の低侵襲化を目指している。一方、surgical assistant systems は、手術中に外科医の補佐

的な役割を担い、外科医とロボットの間でのインタラクションを通して、外科医が手術器具のごとく自在に扱うロボットである。Surgical assistant systems は、この十数年で心臓外科領域や胸部・腹部外科領域における内視鏡を把持・位置決めするロボット（内視鏡ロボット）の分野で発展した。

メディカルロボットを人と技術との関わりを重視して図示すると図 1.6 となる。Surgical CAD/CAM systems では、システム A を用いて外科医が術前に手術計画を行い、システム B のロボットが手術計画により手術器具を操る。外科医は、システム B が患者に施す処置を常に監視し、問題があればシステム A に新たな手術計画を与える。Surgical assistant systems は、術中に外科医の指示をシステム A で受け、システム B のロボットがシステム A からの指令に従って、手術器具を操る。Surgical CAD/CAM systems におけるシステム A は、患者と接することなく、術前に時間をかけて綿密に手術計画を立てるときに使用するため、通常のコンピュータシステムを用いることができる。また、surgical assistant systems のシステム A は、音声認識や画像処理技術により多彩で有用なシステムがすでに多く開発されている [I 10]。一方 surgical CAD/CAM systems 及び surgical assistant systems のシステム B は、医療現場で患者に接した状態で用いられるということとその目的の特異性から、その構成手法に検討が必要であり、その構成手法の難しさから開発が遅れている。ここで、メディカルロボットの歴史と現状について、簡単に触れておく。世界で最初にロボットを手術器具に応用したのは、1985 年の Yik San Kwoh ら [I 11] の研究グループである。このロボットは、外科医の代わりに手術器具を操ることで脳外科手術を行う surgical CAD/CAM systems である。しかしその構成手法に誤りがあったため、この研究グループは 1 症例のみで研究の継続を断念している。その誤りとは、手術へ産業用ロボットアーム PUMA200 の安易な転用をしたため、人とのインタラクションの重要性、手術環境への適応性、そして患者の安全を考慮しなかったという点である。現在市販されているメディカルロボットには、人工股関節を埋め込むために骨切除を行う surgical CAD/CAM systems として Integrated Surgical Systems 社の ROBODOC [I 12] などがある。従来の骨切除は、ノミを用いた手作業の不正確な切除方法を用いていたため、人工股関節を正しくはめ込むことができなかった。ROBODOC によりそうした不都合が解消できたため、メディカルロボットとしては比較的広く普及した。しかしながら ROBODOC は大型であるため一般的な狭い手術室では使用しにくい。またロボット自体が清潔ではないため術場で使用する前に清潔な布（滅菌ドレープ）でロボット全体を覆う必要があり、術前のセッティングが煩雑でなる

などの問題も抱えている。Surgical assistant systems の代表的なロボットには内視鏡ロボットがあり、旧 Computer Motion 社の AESOP [13] などが市販されている。内視鏡ロボットの導入により、安定した内視鏡映像が外科医に提供され、より安全な医療の実現が可能である。内視鏡ロボットの研究は、欧米とアジアを中心に研究がなされているが、安全性、清潔性、使い易さの面で研究課題を抱えており、ほとんど普及していない。

このように、メディカルロボティクスの分野ではシステム B の研究開発、特に surgical assistant systems におけるシステム B (マニピュレータ) の研究開発が遅れている。本論文では、システム B を強化・新規開発をすることでメディカルロボティクスの発展を促す。

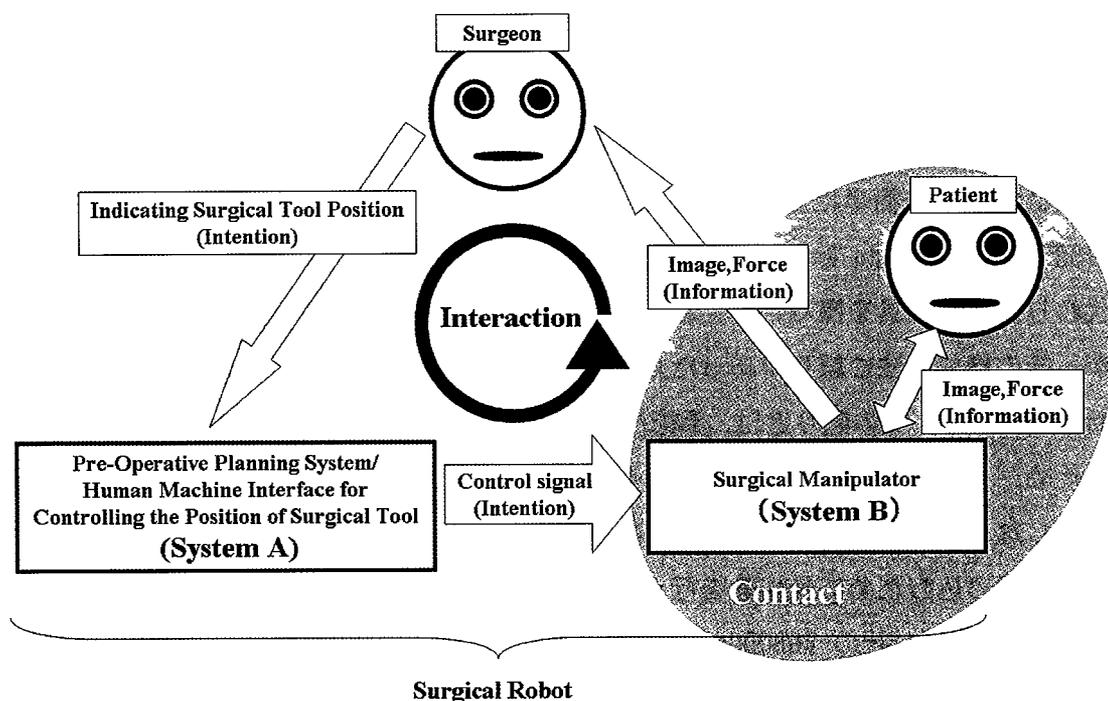


Fig. 1.6 Surgical robot in interactive media

1.5 本論文の目的と構成

人の心理や身体能力に強く関係する「人の身体との物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアの構成手法」の研究は、人が能力拡大を目指して将来必要となる新しい人工物を開発するうえで重要な意味を持つ。また現在でも人の身体と物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアとして代表的なウェアラブルコンピュータやメディカルロボットの社会普及が望まれているが、それらの身体と物理的に接触する基本要素（システム A, B）の構成手法が確立されていないため、これらの技術はまだ広く我々の生活に生かされていない。

本論文では、ウェアラブルコンピュータとメディカルロボットのうち身体と物理的に接触する基本要素（システム A, B）について、社会普及を目指してユーザのニーズをふまえてその構成方法を議論し、基本コンセプトを構築し、そのコンセプトを実現するシステムを実際開発し評価することで、インタラクティブメディア研究の発展を促すことを目標とする。

本論文では、具体的に以下の2点を研究目的とする。

- ウェアラブルコンピュータ用入力装置開発：システム A の強化・新規開発
- 内視鏡ロボット（マニピュレータ）の開発：システム B の強化・新規開発

ウェアラブルコンピュータ用入力装置開発では、ウェアラブルコンピュータにおいて入力装置であるシステム A の開発が遅れている現状をふまえ、ウェアラブルコンピュータに適したシステム A の強化・新規開発を行う。システム A として、常時着用可能なウェアラブル型入力装置を扱う。具体的には、ウェアラブル型入力装置の構成手法を提案し、その提案を基に使用者が常時利用でき、日常生活に支障をきたすことなく、ハンズフリーで使用でき、小型・軽量・安価で製造可能であり、機器制御を意図した操作以外の会話や食事などの日常的な動作には反応しない装置の開発を行う。また、メディカルロボットは、マニピュレータに相当するシステム B の開発が遅れており、特に surgical assistant systems のシステム B の研究開発が遅れている。本論文では、surgical assistant systems として、低侵襲治療で一般的になった内視鏡外科手術に注目し、その手術を支援するための内視鏡ロボットを扱う。はじめに医療現場のニーズをふまえて従来の研究を整理し、その結果から医療機器として安全性や清潔性などの要求を盛り込んだ設計手法を提案する。具体的には、その設計手法を基に安全、清潔、小さなワークスペースの中で視野展開が可能、内視鏡の操作のために大きなメカニズムを必要としな

い（術者の作業を妨げない）などの特長を有する内視鏡ロボットの開発を行う。

最後に本論文の構成を示す。本論文は全4章で構成されており、身体との物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアとして、ウェアラブルコンピュータとメディカルロボットを取り上げ、それらの構成手法とその実装例を示す。

第1章では、序論として身体との物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアの基本モデル、ウェアラブルコンピュータとメディカルロボットのインタラクティブメディアとしての問題点、そして本論文の目的を示した。

第2章では、ウェアラブルコンピュータの研究分野において開発が遅れているウェアラブル型入力装置の研究背景、構成手法、そして実装例を示す。まず基本的な構成手法を基に実装した実装例1を示した後、実施例1の構成手法にアフォーダンスの概念を導入することにより改良した構成手法とその実装例2を示し考察する。

第3章では、メディカルロボットの研究分野において開発が遅れている内視鏡ロボットのマニピュレータについて研究背景を述べ、外科医のニーズをふまえて従来研究を整理した結果からその構成手法を示す。この構成手法を基に、実装例1と2の2種類の実装例を示す。実装例1では、内視鏡ロボットによる腹腔鏡下胆嚢摘出手術の支援を目指して、1度の *in-vitro* 実験、2度の *in-vivo* 実験を行い、実装例の有用性を評価検討する。実施例2では、腹腔鏡下胆嚢摘出手術よりもアドバンスドな手術の支援を目指し、2度の *in-vitro* 実験、腹腔鏡下胆嚢摘出手術と腹腔鏡補助下幽門側胃切除術、そして腹腔鏡下低位前方切除術の *in-vivo* 実験を行い、実装例の有用性を評価検討する。

最後に第4章では、本論文で得られた研究成果のまとめを行うとともに、今後の課題と展望について述べる。

第2章

ウェアラブルコンピュータ

本章では、身体との物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアの基本構成「人 → システムA → システムB → 人」における「システムA」の構成手法とその実装について述べる。システムAとしては、ウェアラブルコンピュータ用の入力装置を取り上げる。具体的には、ユーザが機器操作を目的として意図的に行うこめかみの動きを光学式距離センサでセンシングし、その値をシングルチップマイクロコンピュータで処理して機器制御用の信号を生成するウェアラブル型入力装置（愛称、こめかみスイッチ）の構成手法と実装について考察する。

こめかみスイッチの特長は、ユーザが常時利用でき、思考を遮ることなく、ハンズフリーで使用でき、小型・軽量・安価で製造可能であり、機器制御を意図した動き以外の会話や食事などの日常的な動作には反応しないことである。

2.1 緒言

2.1.1 研究背景 [1.3 節]

コンピュータをいつでもどこでも使うユビキタスコンピューティング時代の主役は、コンピュータを身につけるウェアラブルコンピュータである。携帯電話やハンディ型コンピュータなどの機器の普及とモバイルマルチメディア通信技術の発達の影響により、ウェアラブルコンピュータは、計算能力や記憶能力をネットワーク側に持たせればよくなった。ウェアラブルコンピュータで求められる能力は、人間の意図をネットワークに伝え、ネットワークから得られた情報を人間に提示するウェアラブル型のインタラクティブメディアである [II 1]。フェイスマウントディスプレイや骨伝導スピーカなど、ウェアラブルコンピュータに適した出力装置（ウェアラブル型出力装置）が発達する中、ウェアラブルコンピュータに適した入力装置（ウェアラブル型入力装置）の開発が遅れている。特に、我々の日常的な生活や現場作業の中で常時利用でき、ハンズフリーで別の作業などが行えるというウェアラブルコンピューティングの持つ特長を生かすことができる、常時装着していても日常生活を妨げない、ユーザが他の作業に専念していてもその作業にかかわる思考の流れを妨げず、簡単かつ即座に使用することができるウェアラブル型入力装置が必要とされている。

2.1.2 ウェアラブル型入力装置を含むシステムのインタラクションループ

ウェアラブル型入力装置を含むシステムのインタラクションループを図 2.1 に示す。ウェアラブル型入力装置は、人からの情報（意図）を受信するシステム A に相当し、ユーザの身体と物理的に接触している。インタラクションループは、ユーザがウェアラブル型入力装置などの機器をどのように操作したいかという意図を伝え、その意図から制御装置が適切な機器制御コマンドを生成し対象機器（システム B）を制御する。その結果、対象機器が仕事を行いユーザに情報を提供する。ユーザは、このインタラクションループにより、常時コンピュータシステムが作業を支援し、その作業に対する人の能力拡大を図ることができる。

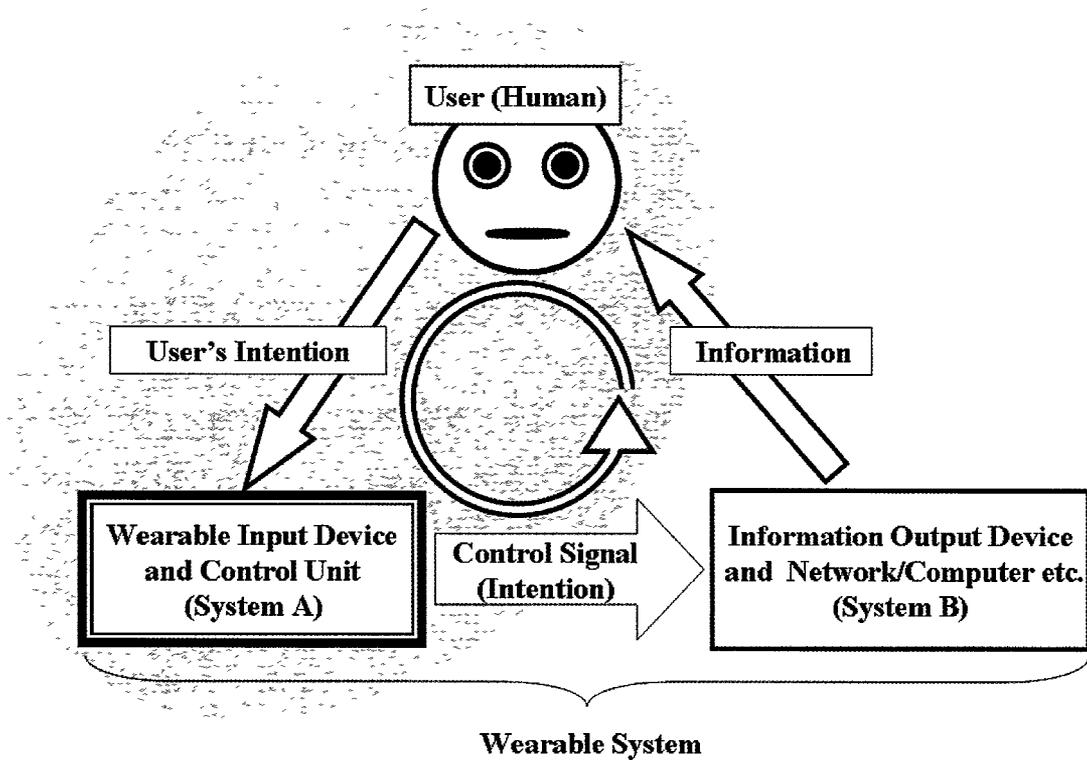


Fig. 2.1 Interaction loop of wearable system

2.1.3 ウェアラブル型入出力装置に関する考察

ウェアラブル型入出力装置には、仮想現実 (VR) やゲーム機のために開発されたインタフェース、従来のインタフェースをただ小型化しただけのモバイルコンピューティング用のインタフェース、そしてウェアラブルコンピューティング用のインタフェースがある。モバイルコンピューティングとウェアラブルコンピューティングとはまったく異なる。前者は、意識的にコンピュータそのものを利用するのに対し、後者は常時稼動しておりユーザの状況に即して情報支援を能動的に行う情報パートナーとしてコンピュータを利用する。また、ウェアラブルコンピュータについて、Steve Mann は以下のように恒常性 (Constancy)、増幅性 (Augmentation)、介在性 (Mediation) を持つと定義している [II 2]。

- 1) 恒常性：システムが常に駆動しており、いつでもユーザと対話可能であること。
- 2) 増幅性：ユーザの仕事に対する能力を増幅することができる。日常生活の邪魔にならない。
- 3) 介在性：ユーザを情報的に包み、ユーザ自身の情報と外界の情報との介在をすすめる。そのため、システムとユーザとが密接に共働（Synergy）できなければならない。

本節では、このウェアラブルコンピュータ用のヒューマンマシンインタフェースに焦点を当てて考察を述べる。

ウェアラブル型入力装置は、ユーザが入力装置を身に着けた状態で、ユーザの意思を機器に入力する装置である。ウェアラブル型入力装置は、キーボード[II 3]、トラックボール、そしてタッチパネルなどデスクトップ型パーソナルコンピュータ用に開発された従来の入力装置を、機能の削減や部品の小型化を行うことで実現したモバイル型のものが普及しているが、それらの操作性は良くない。また VR 用やゲーム機用に開発された入力装置には、グローブ型入力装置[II 4, II 5]や wii リモコン[II 6]などがあり、ウェアラブルコンピューティングのために開発された入力装置には、FingerRing [II 7]、Hand-menu system [II 8]、UbiButton [II 9]などがある。これらは、操作性や装着性は良くとも有用なものであるが、いずれも手で操作するため、ウェアラブルコンピューティングの特長であるハンズフリー操作（増幅性）を実現できない。さらにこれらは手に装置を装着するため、食事や手で荷物を持つなどの手を使用する作業が制限され、日常生活において邪魔になる。ハンズフリーな入力装置には、脳波や眼球運動[II 10]を利用したものがあるが、これらは大掛かりな装置を使用するため、ウェアラブルコンピューティングには適さない。

ウェアラブル型出力装置は、ユーザが出力装置を身に着けた状態で、機器からの出力情報をユーザに伝える装置である。ウェアラブル型出力装置は、ヘッドフォンとフェイスマウントディスプレイが最も普及している。ヘッドフォンは、骨伝導ヘッドフォンが、耳をふさがないため、ウェアラブルコンピューティング用の出力装置に適したものである。また、フェイスマウントディスプレイは、片眼用やシースルータイプのものが有望である。さらに、携帯電話のバイブレーション機能のように振動を使った表示装置も広く社会的に普及している。

表 2.1 は、情報の流れる方向（入力装置、出力装置）と取り扱う情報量の 2 つの要素で一般的なウェアラブル型インタフェースを分類したものである。ここで、情報の流れ

る方向とは、人から装置に情報が流れる（入力装置）のか、装置から人に情報が流れる（出力装置）のかを表す。情報量は、人と装置との間の情報のやり取りの量である。情報量は、ウェアラブル型インタフェースを設計する上で非常に重要な要素である。ウェアラブル型入力装置を設計する場合、入力操作に使用する人間の部位と情報量が密接に関係している。取り扱う情報量が多い場合は、入力装置への情報入力、手、足、眼球運動などユーザが自由に位置決めできる部位によって行われる。情報量が少ない場合は、ユーザが自由に情報量をコントロールできる部位のみならず、瞬き、筋電、脳波など、ユーザが入力装置に与える情報量をコントロールしにくい生体情報でも使用することができる。また、ウェアラブル型出力装置を設計する場合も同様に、情報の出力先（人間が情報を受けとる部位）と情報量が密接に関係している。装置から人へ出力する情報量が多い場合、人の視覚や聴覚を利用した装置が優位である。一方、情報量が少ない場合は、触覚、痛覚、温覚などを利用してよい。

我々は、以上に述べた現状から、ウェアラブル型インタフェースにおいて、ハンズフリーで情報入力可能で、情報量の少ないウェアラブル型入力装置の開発が遅れていると考えている。また、現在のウェアラブル型入力装置は、ウェアラブル型出力装置との物理的な調和がまだまだ取れていないと考えている。

Table 2.1 Classification of wearable-type interfaces

		Traffic	
		Light	Heavy
Flow Direction of Information	from Humans to Machine (Input Device)	On/Off Switch	Keyboard, Track Ball
	from Machine to Humans (Output Device)	Vibration Function of Mobile Phone	Head-Mounted Display

2.2 ウェアラブル型入力装置の構成手法

ウェアラブルコンピューティングの特長を生かすため、ウェアラブル型入力装置の構成手法として以下の要求項を提案する。

- 1) ユーザの日常生活に支障をきたさないものとするため、ウェアラブル型入力装置は使用時に、ユーザの本来持っている基本的な情報収集能力（視覚，聴覚，触運動覚，嗅覚，味覚）を損なわすことがない。またハンズフリーで使用できること。さらに、使用時に思考を遮ることがない。
- 2) 既存のウェアラブル型出力装置と統合しやすいこと。これは、入力装置，出力装置，中央処理装置，外部記憶装置，ネットワークを組み合わせ、1つのシステムを構築した場合でのウェアラブル性を重視したものである。
- 3) 日常生活で最も使用頻度の高い機器制御信号は、スイッチのON/OFFなどの比較的情報量の少ないものである。よって入力に利用するユーザの体の部位や生体情報は、入力情報の多さよりも入力のしやすさを重視して選定する。
- 4) ウェアラブルコンピュータが、公共の場（他人の前）で使用する機会があることを考慮して、ユーザ以外の人からわからない程度の小さな動作で情報の入力が可能（使用が可能）であること。
- 5) 将来的な普及の面から、小型・軽量・低価格で実現可能であること。また入力装置のデザイン性（外観の美しさ）の向上が見込めること。

2.3 実装例1:

噛締め動作を機器操作に利用したウェアラブル型入力装置

— こめかみスイッチ —

本節では、構成手法で挙げた5つの要求項をもとにウェアラブル型入力装置に適した入力情報（生体情報）の選定とその測定方法、ユーザが機器操作を目的として意図的に行う動作（生体コマンド）の検討、そしてウェアラブル型入力装置のハードウェアとソフトウェアの設計を行う。最後に試作機を製作し、実証実験により評価検討を行う。

2.3.1 ウェアラブル型入力装置に適した生体情報の選択と測定方法

人の生体情報の中で機器操作に利用可能と考えられるものには、手足の動き、口の動き、音声、瞬き、首の動き、脳波 (EEG)、眼電図 (EOG)、筋電図 (EMG)、心電図 (ECG)、血圧、呼吸運動、骨伝導音、そして脳血流などが挙げられる。我々は、前節の要求項を満たす生体信号として、奥歯を噛締めることで動くこめかみの動きに注目した。図 2.2 に示すように、奥歯を噛締めることにより下顎を動かすと、咀嚼筋の一つである側頭筋が収縮する。こめかみ付近の表皮は、側頭筋の収縮により隆起する。

奥歯の噛締めは、ユーザの情報収集能力を妨げず（要求項1）、ユーザ以外の他人に気づかれないほどの小さな動きであり（要求項4）、多くの人が簡単に行うことができる（要求項3）。また、こめかみは、一般的なウェアラブル型出力装置であるヘッドフォンやフェイスマウントディスプレイから近い位置にあるため、こめかみからの情報を利用する入力装置とウェアラブル型出力装置を結合したシステムの構築が容易である（要求項2）。また、こめかみからの情報を利用する入力装置は、小型・軽量・低価格なシステム構成で実現可能であり、従来のウェアラブル型出力装置とも統合しやすいことからデザイン性の向上も期待できる（要求項5）。

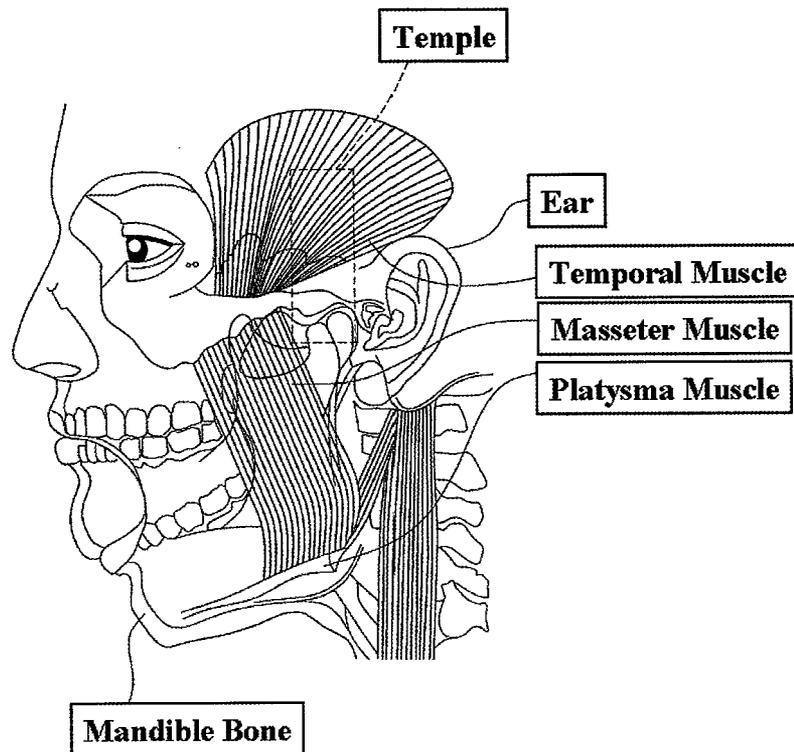


Fig. 2.2 Mechanism for movement of temple

こめかみの動きは、筋電位 [II 11]，圧電センサ [II 12] そして機械的なセンサ [II 13] などの接触型センサと超音波式距離センサや光学式距離センサ [II 14] などの非接触センサで測定可能である。しかし接触型センサは、センサ位置が少しでもずれると測定値が不安定になる。特に圧電センサや機械的なセンサは、表皮の動きが大きく、センサを作動させるために十分な力が発生できる箇所に正確にセンサを固定する必要があるため、センサ位置のズレに対して弱いという欠点を持っている。また筋電位でこめかみの動きを測定するものは、電極をこめかみに貼り付けて筋電位を測定するため、表皮の動きによりセンサが外れた場合や汗が電極と表皮との間に入った場合に測定不能に陥ることがある。以上の理由により接触型センサを用いた装置は、日常の生活での使用が難しく、ベッドに寝たきりの患者などあまり身動きしないユーザに向いている。我々は、日常生活でも使用可能で、かつコストパフォーマンスに優れた、こめかみの動きの測定方法として、光学式距離センサを用いた方法を採用した。光学式距離センサを用いたこめかみの動きセンサ（こめかみセンサ）の外観図を図 2.3 に、回路図を図 2.4 に示す。光学式距離センサには赤外線 LED とフォトトランジスタで構成されるフォトリフレク

タ (ROHM 製 RPR-220 [II 15]) を用いた。フォトリフレクタの特性は、抵抗器で調整した。抵抗器の部品定数は R_1 が 60Ω 、 R_2 が $100k\Omega$ である。このフォトリフレクタをユーザの左右のこめかみ付近にU字形の専用の固定用器具を用いて一つずつ固定した。このこめかみセンサは、非接触であるため、接触型の機械的なセンサや圧力センサに比べて、センサ位置が使用中に少々ずれても使用可能であるうえ、筋電位を使用するものと比べて、汗、髪、そして髭などの皮膚状態による影響が少ない。また、超音波式距離センサを用いても光学式距離センサを用いたときと同様にこめかみ付近の皮膚とセンサ間の距離の変化を測定することでこめかみの動きを非接触に計測できるが、光学式距離センサを用いたほうが、超音波式距離センサを用いた場合に比べ低コストかつ小型・軽量の装置で測定できる。

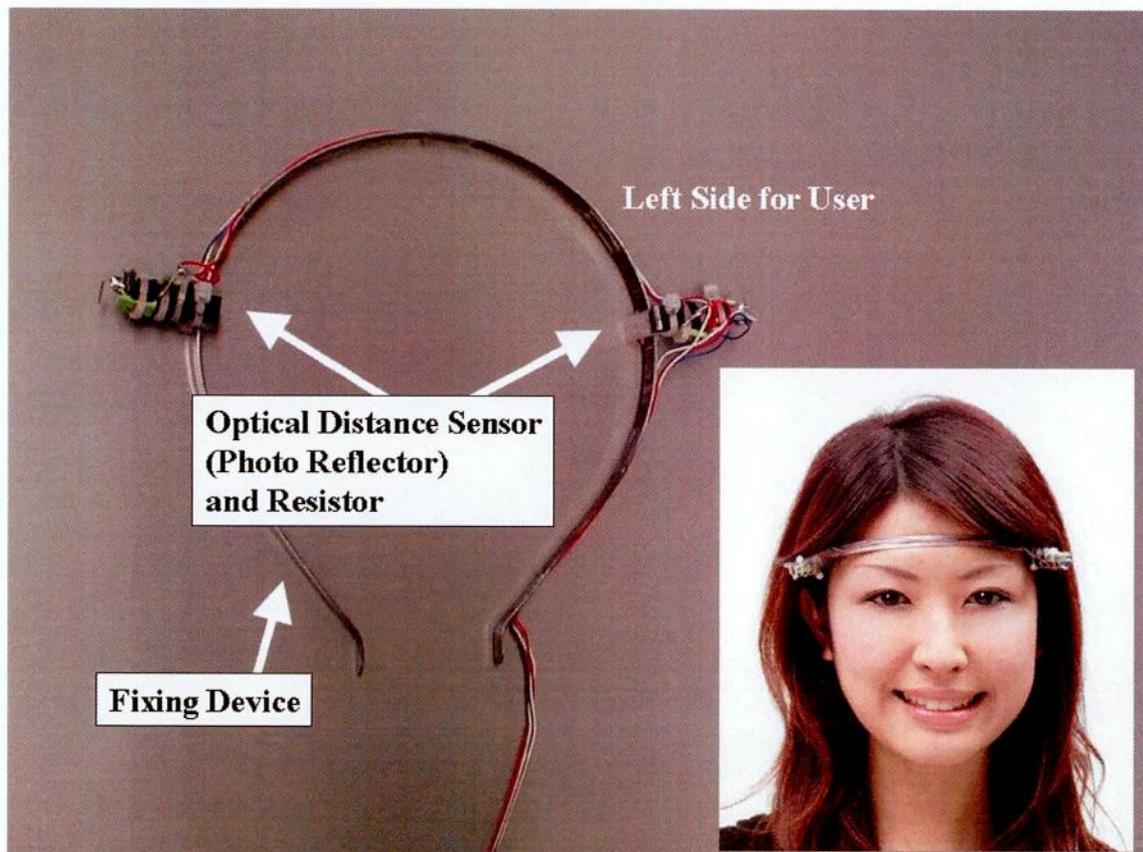


Fig. 2.3 KOMEKAMI sensor

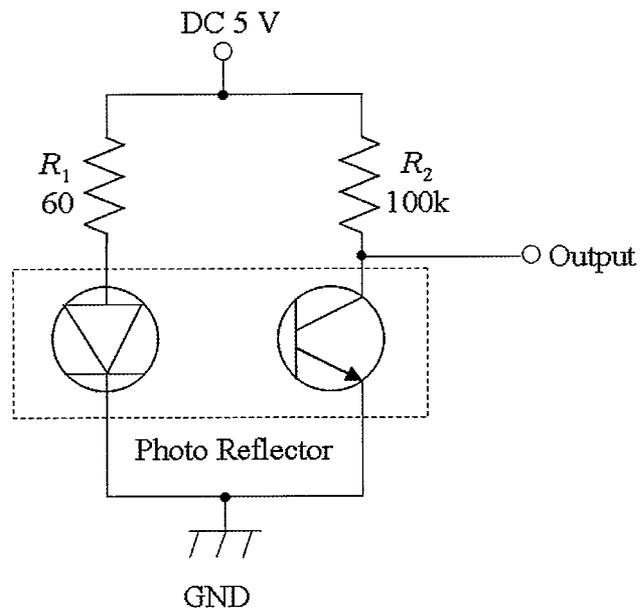


Fig. 2.4 Circuit diagram of KOMEKAMI sensor (Right – hand side)

2.3.2 生体コマンド

ユーザが機器操作を目的として意図的に行うこめかみの動き（生体コマンド）について述べる。

こめかみの表皮は、食事、会話、瞬き、そして眼球運動などの動作で動く。また我々の提案したこめかみセンサは、ユーザが頭を揺らす動作や歩行などの動作によりこめかみセンサが揺れてこめかみの動きが測定不能になる可能性がある。

我々は、様々なこめかみの動きの測定結果を検討することで、日常生活におけるこめかみの動きとは、まったく異なるこめかみの動きで、迅速・簡単・意図的に行えるこめかみの動きを生体コマンドとして採用した。今回採用した生体コマンドは「1秒程度奥歯を嚙締める」動作である。この生体コマンドをこめかみセンサのユーザからみて右側の光学式距離センサで測定した波形を図2.5に示す。

奥歯を嚙締めている間は、ユーザの発話が制限される。しかし、奥歯を嚙締める時間が1秒と短いため、人と人とのコミュニケーション(情報発信機能)に支障を与えない。

日常生活で頻発するこめかみの動きの代表データとして、ガム噛み、瞬き、眼球運動、頷き、首振り、会話、そして歩行時のこめかみの動きをこめかみセンサのユーザからみて右側の光学式距離センサで測定した結果を図2.6から図2.16に示す。なお図の電圧軸の幅は図2.5に合わせて250mVとした。図2.6から図2.14の時間軸の幅も図2.5に合わせて1.7secとした。図2.15と図2.16の波形には、規則性が無かったため、他の波形に比べ時間軸を大きくとり5secとした。図2.6は、ゆっくりと右奥歯でガムを1回噛んだときの結果である。図2.7は、無意識に行う瞬き1回分を測定した結果である。図2.8は自発的に目に力を入れて行った瞬きの測定結果である。図2.9から図2.12は、上下左右に眼球を動かしたときの測定結果である。図2.13は、頷いたときの測定結果である。図2.14は、左右に首振りをした時の測定結果である。図2.15は、日本語で会話しているときの測定結果である。図2.16は、1m/sec程度の速度で舗装された平地を歩行したときの測定結果である。図2.5と図2.6から図2.16を比較して分かるとおり、生体コマンドは他の波形とは大きく形状が異なっているうえ、振幅が大きいため扱いやすい。

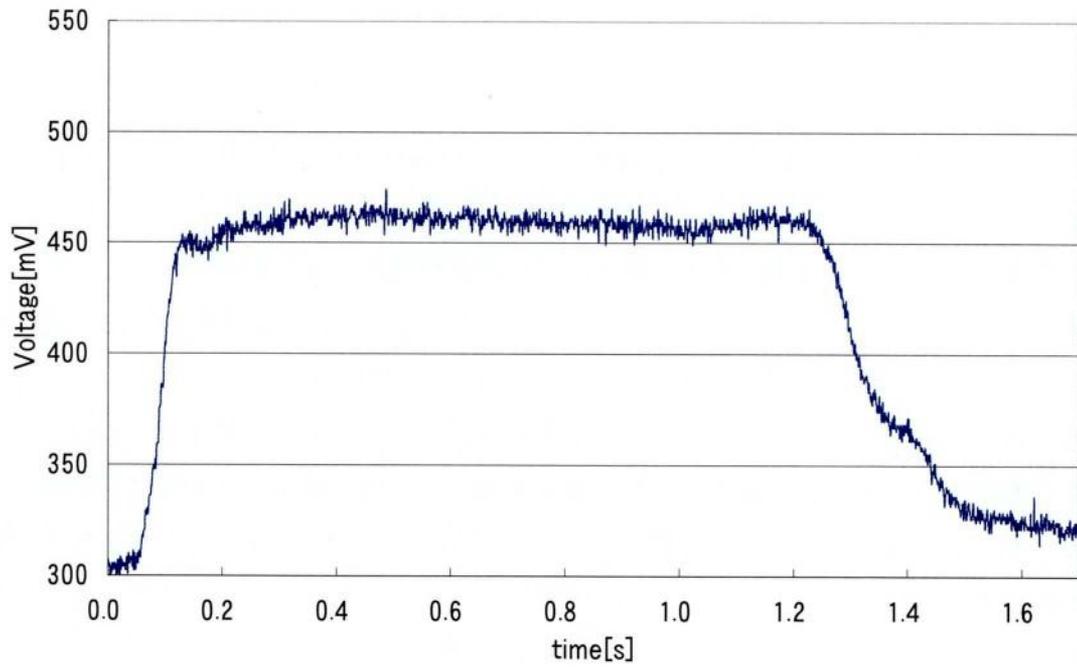


Fig. 2.5 Biocommand

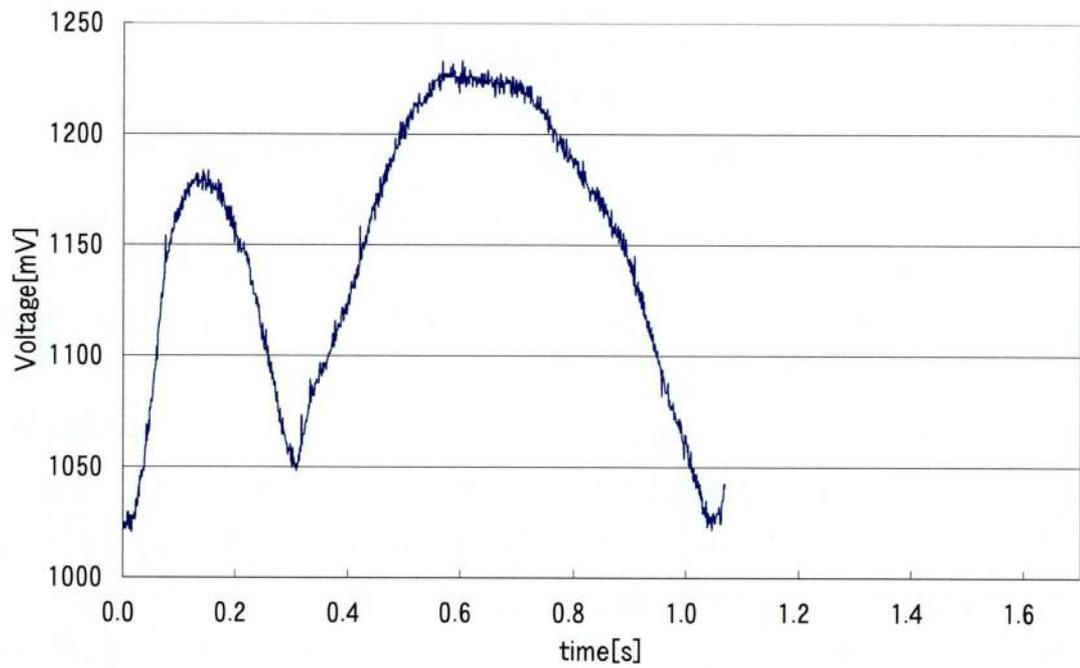


Fig.2.6 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of gum chewing (for one cycle)

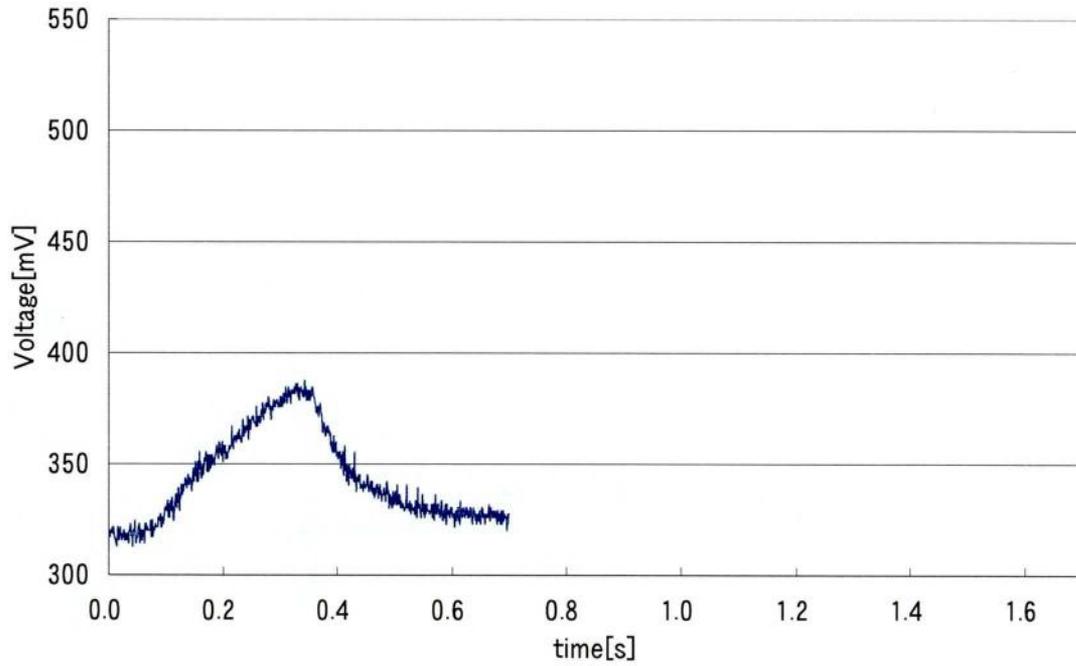


Fig.2.7 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of unconscious blinking (for one cycle)

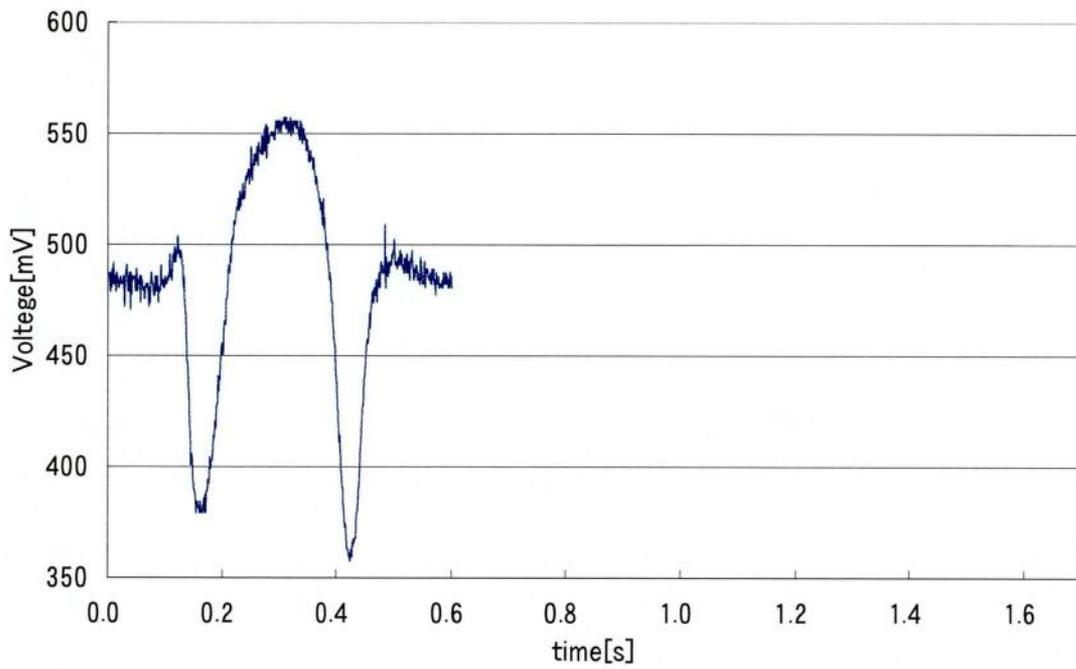


Fig.2.8 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of intentional blinking (for one cycle)

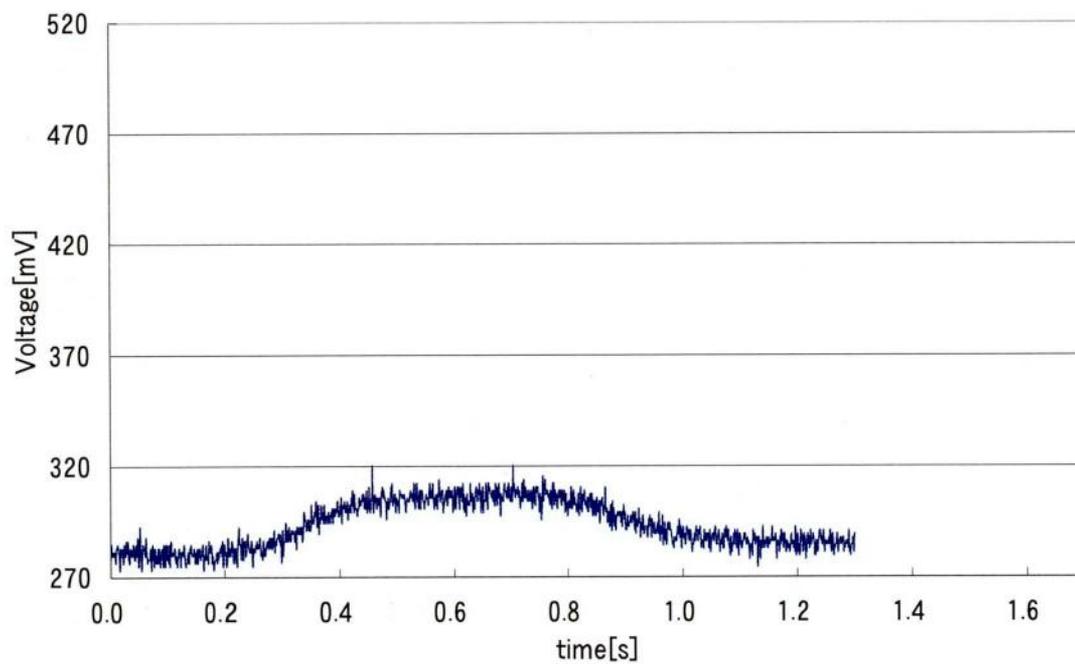


Fig.2.9 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of looking upward (for one cycle)

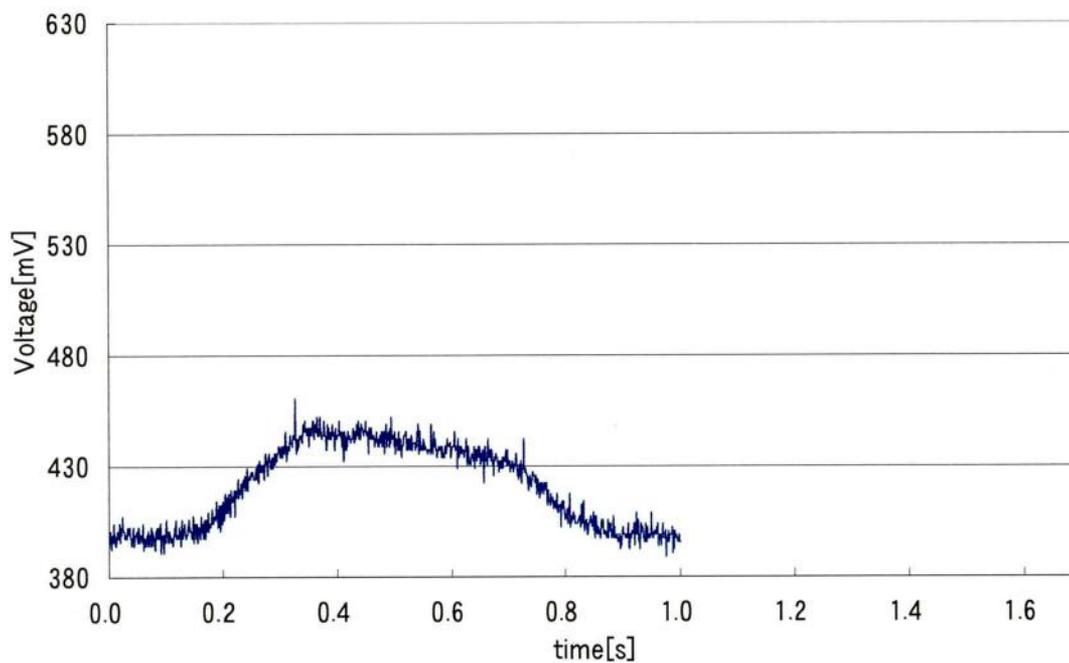


Fig.2.10 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of looking downward (for one cycle)

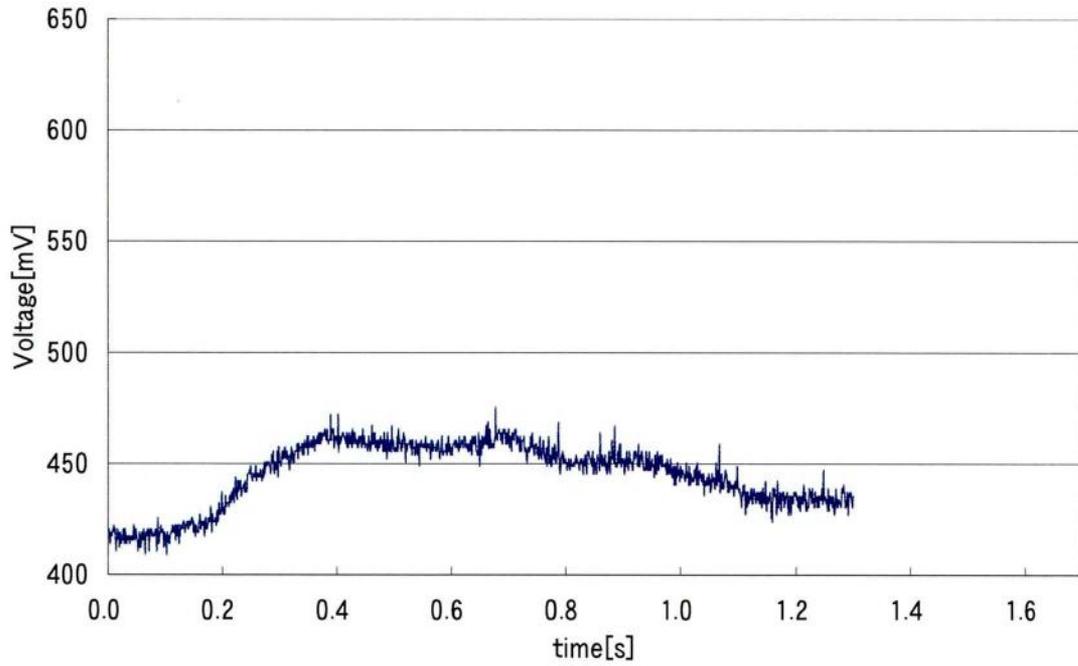


Fig.2.11 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of looking in right direction (for one cycle)

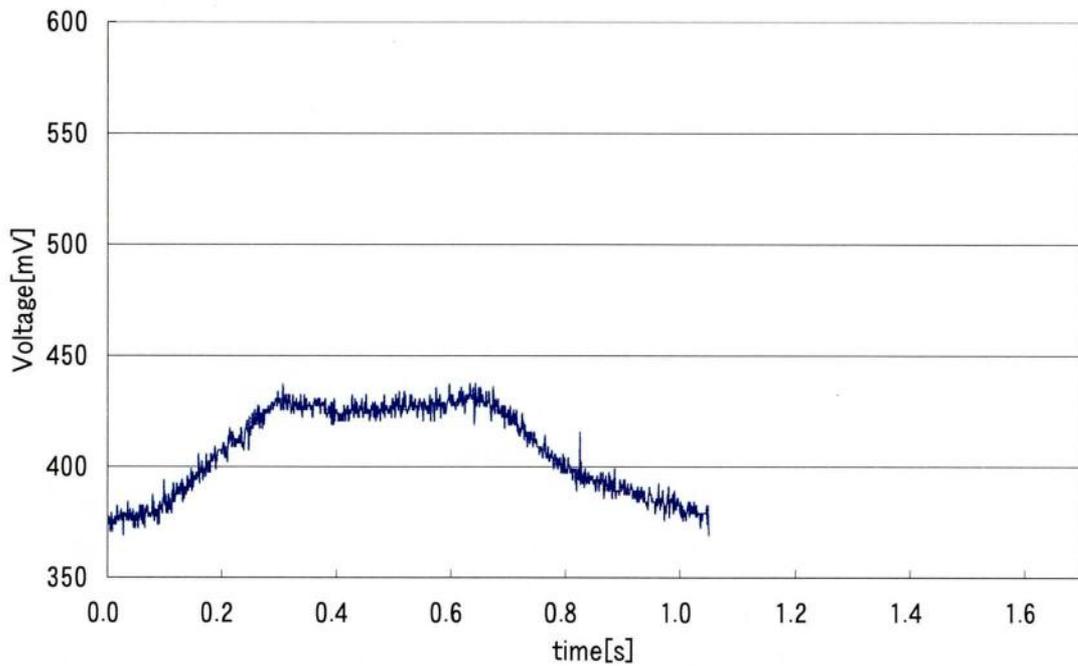


Fig.2.12 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of looking in left direction (for one cycle)

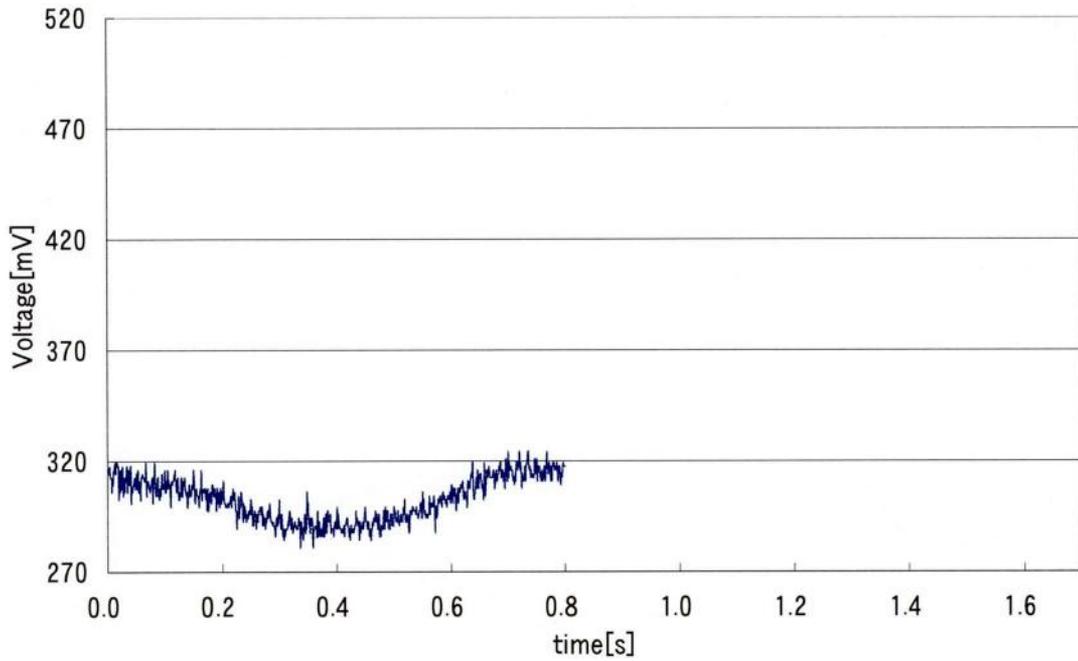


Fig.2.13 Sensing data of right – hand optical distance sensor on the occasion of nodding (for one cycle)

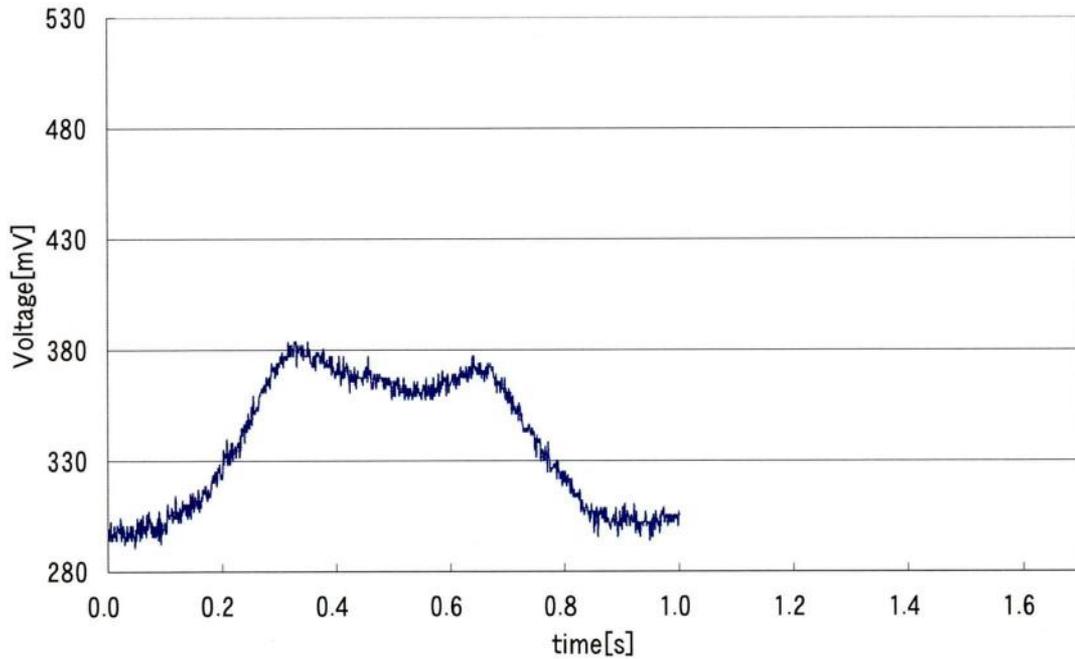


Fig.2.14 Sensing data of right – hand optical distance sensor on the occasion of shaking head from side to side (for one cycle)

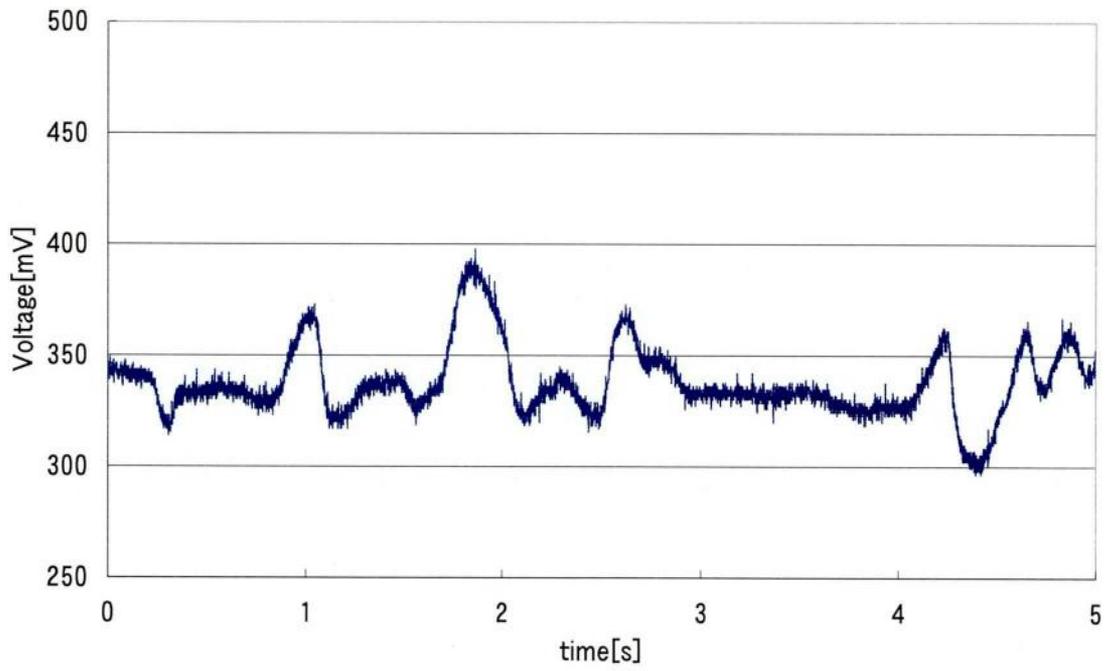


Fig.2.15 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of vocalization

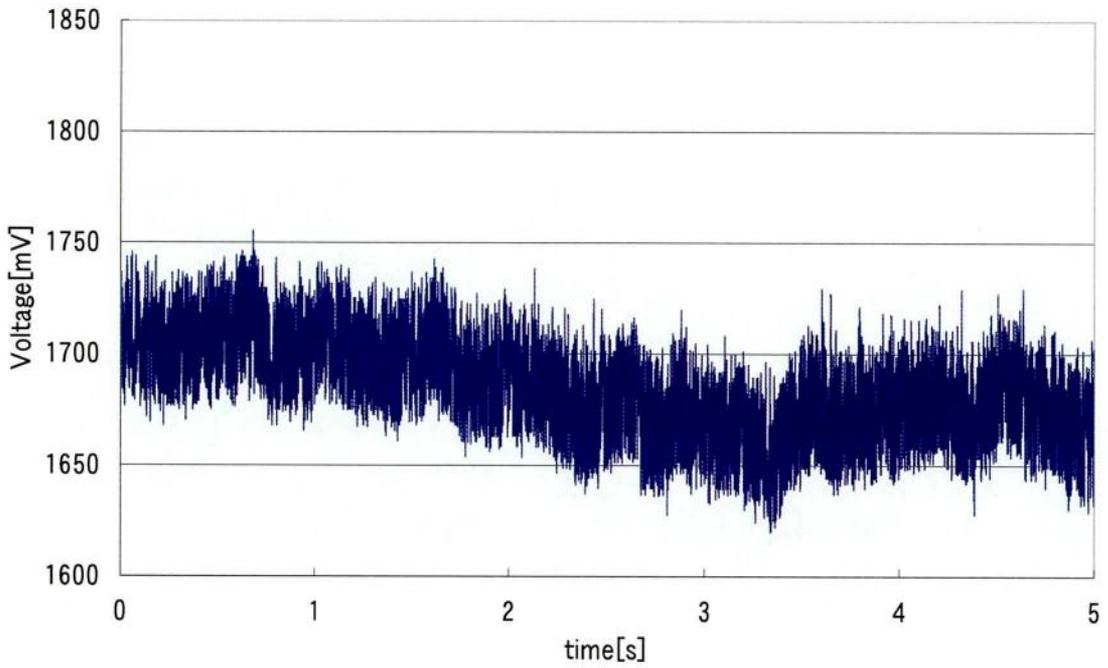


Fig.2.16 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of walking

2. 3. 3システム構成

本ウェアラブル型入力装置（こめかみスイッチ）の設計コンセプトを以下にまとめる。

- 奥歯を嚙締めることより意図的に動かすことが可能なこめかみ付近の皮膚の動きを機器操作情報に利用したウェアラブル型入力装置。
- 機器制御を目的としたこめかみの動きは、多くの人が簡単かつ迅速にできて、さらに日常生活では行わない、意図的にできる特殊な動作に伴って起きるものとする。
- こめかみの動きの計測には、こめかみ付近に固定した光学式距離センサを用いる。

こめかみスイッチのハードウェアの外観図を図 2. 17 に、ブロック図を図 2. 18 に示す。こめかみスイッチは、こめかみの動きをこめかみセンサ（2. 3. 1 節）によりセンシングし、そのセンシング信号を光学式距離センサの横に設置したシングルチップマイクロコンピュータ（MicrochipTechnology 製 PIC12F683 [II 16]）で信号処理を行うことで、生体コマンド（2. 3. 2 節）に応じた、機器制御のための制御信号を生成する。生成された制御信号は、アンプ回路等により対象機器の電気特性に合わせた信号に変換される。なお、このシングルチップマイクロコンピュータはサンプリング周波数 1MHz、10bits の A/D コンバータの機能を持つ。こめかみスイッチのための駆動電源（DC5V）は制御対象機器から供給されるものとする。また、こめかみセンサは、こめかみの表皮から光学式距離センサまでの距離に応じて 0V から 5V までの電圧をシングルチップマイクロコンピュータに出力する。

こめかみスイッチは、0、1 の 2 種類（1bit）の制御信号を出力する。本アルゴリズムは、生体コマンドを認識すると、制御信号として 1 を 300msec 間出力し、その後 0 を出力する。また、生体コマンド以外のこめかみの動きに対しては、出力を変化させない。イニシャル時の制御信号は 0 が出力されている。生体コマンドの認識は、ソフトウェアにより行う。

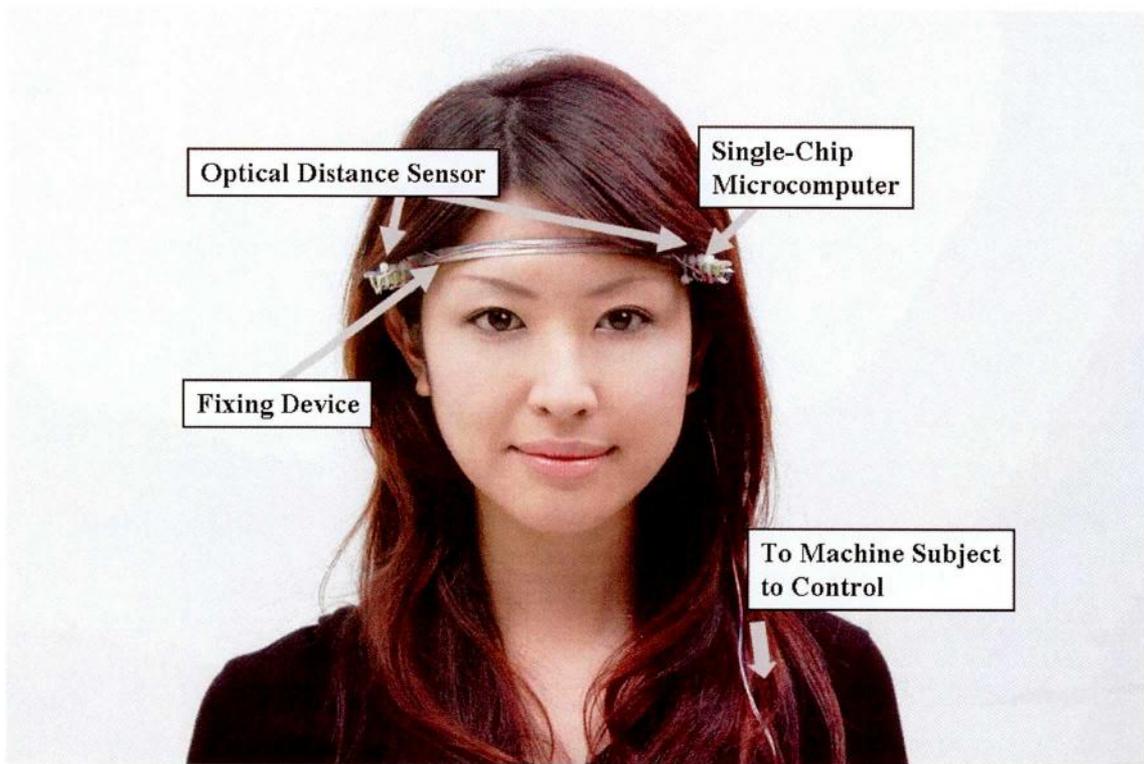


Fig.2.17 Sketch of KOMEKAMI switch

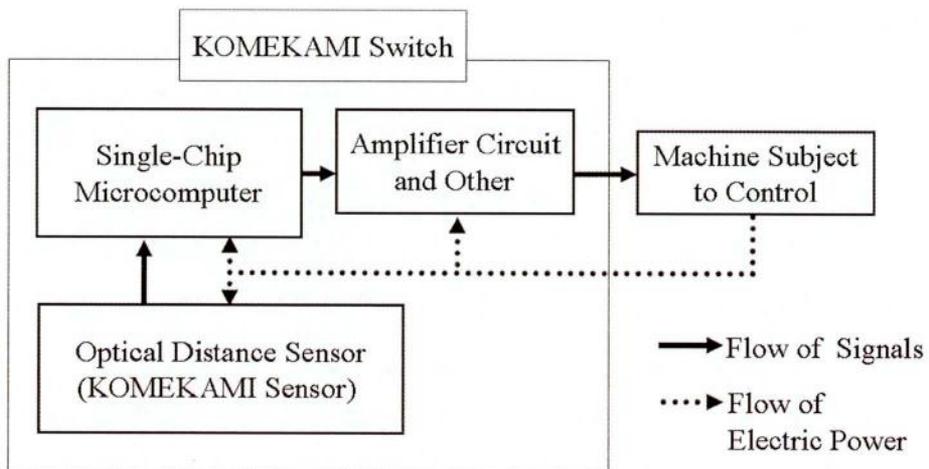


Fig.2.18 Block diagram of KOMEKAMI switch

生体コマンド認識ソフトウェアは以下の考えに基づいて開発した。

- 低スペック（安価で小型）なハードウェアでも処理できるようにシンプルな認識アルゴリズムとする。つまり、データベースや周波数解析などの多くのメモリを必要とする方法は使用せず、さらに複雑な演算処理を行う方法も使用せず、条件判断（if 文）と繰り返し処理（while 文）をベースとしたシンプルなアルゴリズムとする。
- 生体コマンドは、図 2.19 に示すとおり、台形型の信号パターンをしており、こめかみセンサから入力した信号レベルの変化量を条件判断（if 文）することにより増加、安定、減少の3つのフェーズに分割することができる。
- 増加とは、300msec の間にこめかみセンサからの信号が 73mV から 220mV までの範囲で増加した状態とする。
- 安定とは、増加後 600msec 待ち、その後の 300msec 間のこめかみセンサからの信号の変化が 48mV 以内である状態とする。ただし、人間は、正確な時間の間、奥歯を噛締め続けることができないため、時間に関して柔軟性を持たせるために、次の場合も安定とする。上記の安定後 300msec 間の信号の変化が 48mV 以内である状態が続いた場合も安定とする。この後、更に 300msec 間の信号の変化が 48mV 以内である状態が続いた場合も安定とする。
- 減少とは、300msec の間にこめかみセンサからの信号が 48mV から 220mV までの範囲で減少した状態とする。
- 条件判断は、こめかみと光学式距離センサとの距離の絶対値ではなく距離の変化量を用いて行う。変化量を判断に用いることで、こめかみセンサ装着時にこめかみと光学式距離センサとの距離（位置）を厳密に調整する必要がない。
- こめかみセンサとシングルチップマイクロコンピュータ間にノイズ除去フィルタを入れる代わりに、こめかみセンサからの信号は、ソフトウェアにより平均化処理を行う。これにより、ハードウェアをシンプルにすることができる。
- ユーザが生体コマンドを行っていないにもかかわらず機器制御信号が出ること防止するため、左右のこめかみの動きの条件判断結果の論理積をとり、状態遷移条件を厳しくする。

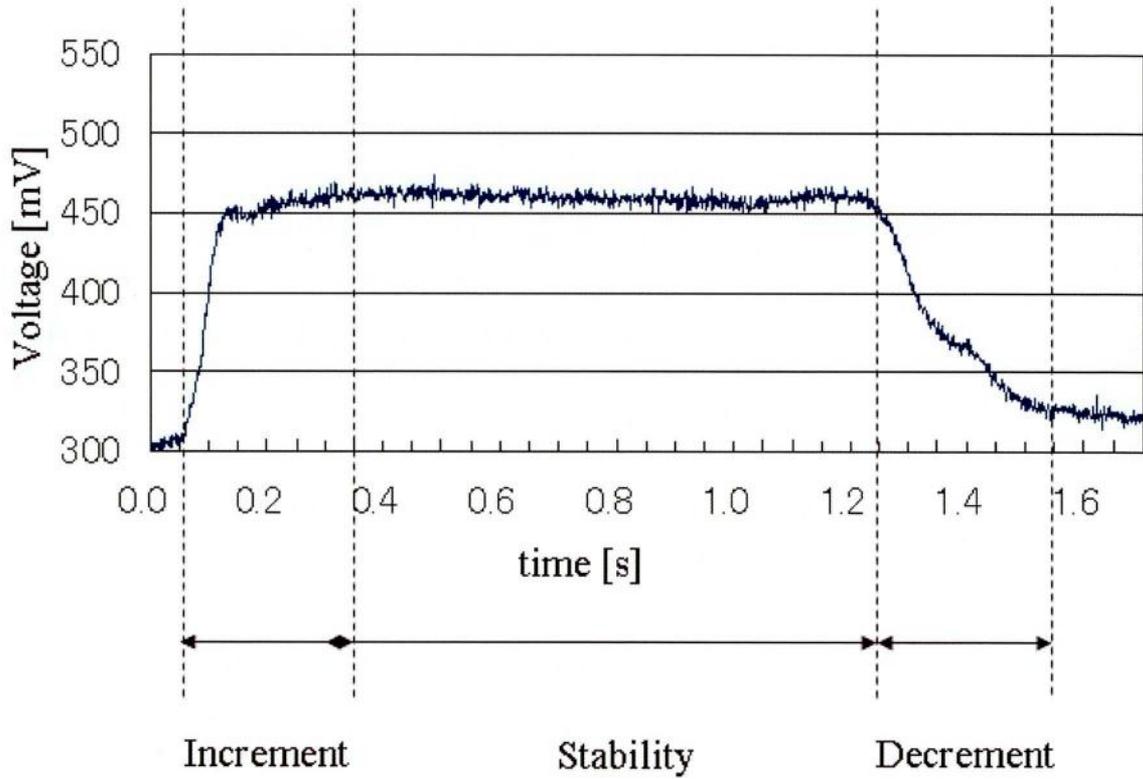


Fig.2.19 Biocommand Phases

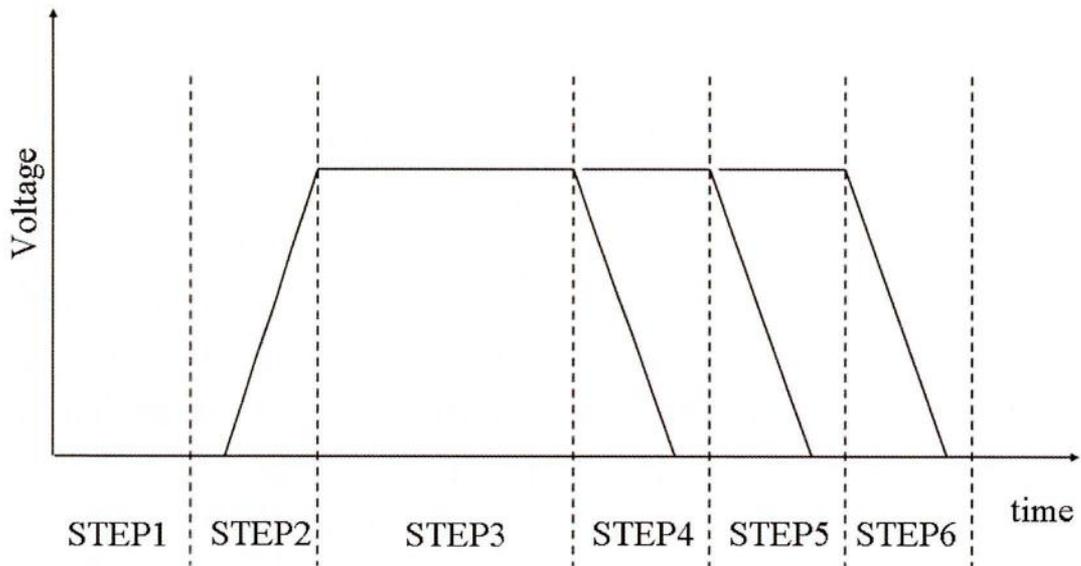


Fig.2.20 Relations between measurement value and each step of algorithm

生体コマンドを認識するためのアルゴリズムを以下に示す。図 2.20 に生体コマンドと認識アルゴリズムとの対応を示す。ここで、こめかみセンサにおいて、ユーザの左側のこめかみの動きを測定する光学式距離センサを“左の光学式距離センサ”と呼び、ユーザの右側のこめかみの動きを測定する光学式距離センサを“右の光学式距離センサ”と呼ぶ。

STEP1 制御信号として 0 を出力する。STEP2 に進む。

STEP2 左の光学式距離センサの測定値を S_{L1} 、右の光学式距離センサの測定値を S_{R1} とする。 t_1 間待ち、左の光学式距離センサの測定値を S_{L2} 、右の光学式距離センサの測定値を S_{R2} とする。以下の条件 1 を満たした場合は STEP3 に進む。それ以外は STEP2 を繰り返す。

<条件 1>

$$(A_1 \leq S_{L2} - S_{L1} \leq A_2) \text{ かつ } (A_1 \leq S_{R2} - S_{R1} \leq A_2)$$

STEP3 t_2 sec 間待つ。STEP4 に進む。

STEP4 左の光学式距離センサの測定値を S_{L1} 、右の光学式距離センサの測定値を S_{R1} とする。 t_1 間待ち、左の光学式距離センサの測定値を S_{L2} 、右の光学式距離センサの測定値を S_{R2} とする。以下の条件 2 を満たした場合は STEP5 に進む。

<条件 2>

$$(|S_{L2} - S_{L1}| \leq B) \text{ かつ } (|S_{R2} - S_{R1}| \leq B)$$

また、条件 2 を満たさず、以下の条件 3 を満たした場合は制御信号 1 を出力し 300msec 後に STEP1 に戻る。

<条件 3>

$$(C_1 \leq S_{L1} - S_{L2} \leq C_2) \text{ かつ } (C_1 \leq S_{R1} - S_{R2} \leq C_2)$$

条件 2 もしくは条件 3 を満たさない場合は STEP2 に戻る。

STEP5 左の光学式距離センサの測定値を S_{L1} 、右の光学式距離センサの測定値を S_{R1} とする。 t_1 間待ち、左の光学式距離センサの測定値を S_{L2} 、右の光学式距離センサの測定値を S_{R2} とする。条件 2 を満たした場合は STEP6 に進む。また、条件 2 を満たさず、条件 3 を満たした場合は制御信号 1 を出力し 300msec 後に STEP1 に戻る。条件 2 もしくは条件 3 を満たさない場合は STEP2 に戻る。

STEP6 左右の光学式距離センサで現在測定した測定値と t_1 後に測定値を比較し、条件 3 を満たした場合は制御信号 1 を出力し 300msec 後に STEP1 に戻る。条件 3 を満たさない場合は STEP2 に戻る。

ここで、測定値は 25msec 間に行った 250 回のサンプリングデータの平均値、 t_1 は 275msec、 t_2 は 600msec、基準電圧 5V で 10bits の AD コンバータを使用しているので、 A_1 は $15/1024$ ($73\text{mV} = 15 \div 1024 \times 5\text{V}$)、 A_2 は $45/1024$ (220mV)、 B は $10/1024$ (48mV)、 C_1 は $10/1024$ (48mV)、 C_2 は $45/1024$ (220mV)である。

最後に、こめかみスイッチの特長を以下にまとめる。

- 1) 使用時に、ユーザの基本的な情報収集能力や情報発信能力を妨げることなく、また思考を遮ることがない。
- 2) 小型・軽量であり、フェイスマウントディスプレイやヘッドフォンなど普及しているウェアラブル型出力装置と距離が近いため、入出力装置を統合したシステムを構築しやすい。
- 3) ユーザは、こめかみスイッチを簡単な操作で、ハンズフリーで使用できる。
- 4) ユーザが操作に用いる奥歯を噛締める動作は、小さな動作であるため、機器を操作していることを他人に気づかれにくい。
- 5) シンプルなハードウェア構成であるため、小型・軽量化・低価格化が可能であり、さらにデザイン（外観の美しさ）の向上も見込める。

以上のように、こめかみスイッチは 2.2 節で挙げた要求項をすべて満足している。

2.3.4 実証実験

こめかみスイッチを携帯型CDプレーヤーの操作装置に応用し、実証実験を行った。本装置は、ユーザが生体コマンドを行うことでCDプレーヤーの再生と停止動作を行うものである。実証実験用装置の外観を図2.21に、ブロック図を図2.22に示す。なお、CDプレーヤーには、SONY製D-E01を用いた。本装置の動作は、ユーザが生体コマンドを発したとき、もしCDプレーヤーが停止モードであれば、リモートコントローラの再生ボタンに取り付けたリレー回路により再生ボタンを電子制御でONにしCDを再生する、もし再生モードならば、同様に停止ボタンをONにすることで、CDの再生を停止する。

本装置を用いてこめかみスイッチの有用性を確認するため以下のシチュエーションで実証実験を行った。被験者は20歳代の男性1名である。なお括弧内は、ユーザが生体コマンドを行った頻度・回数を表す。

- 友達との会話（30秒おきに1回・189回）
- ガム噛み（10回おきに1回・439回）
- 唐揚げ弁当とインスタントラーメンを食べる（一口食べて口のもの少なくなったときに1回・110回）
- 歩行（ランダムに1回・213回）
- ランニング（ランダムに1回・205回）
- 安静時に生体コマンドのみ行う（ランダムに1回・428回）

これらの実験結果は、実際の生活の中で本装置を使用して得たものである。実験では、実験風景をビデオカメラで撮影し、装置の各部の電圧をTEAC製カードレコーダDR-C2を用いて記録した。記録した電圧は、左右の光学式距離センサからシングルチップマイクロコンピュータへの入力電圧とシングルチップマイクロコンピュータから出力される制御信号の3種類である。ビデオカメラの映像とカードレコーダに記憶された電圧データを解析した結果を表2.2に示す。表2.2の成功率は、ユーザが意図して行った生体コマンド回数に対して何回機器制御が成功したかを示す。誤動作回数は、実験中にユーザが生体コマンドを行っていないにもかかわらず、生体コマンドがあったものとして機器動作が行われた回数を示す。表2.2に示すとおり、すべての実験においての誤動作回数は、会話時の1回のみであり全体的に良好な結果が得られたといえる。しかし、成功率は24%から70%と低い値を得た。

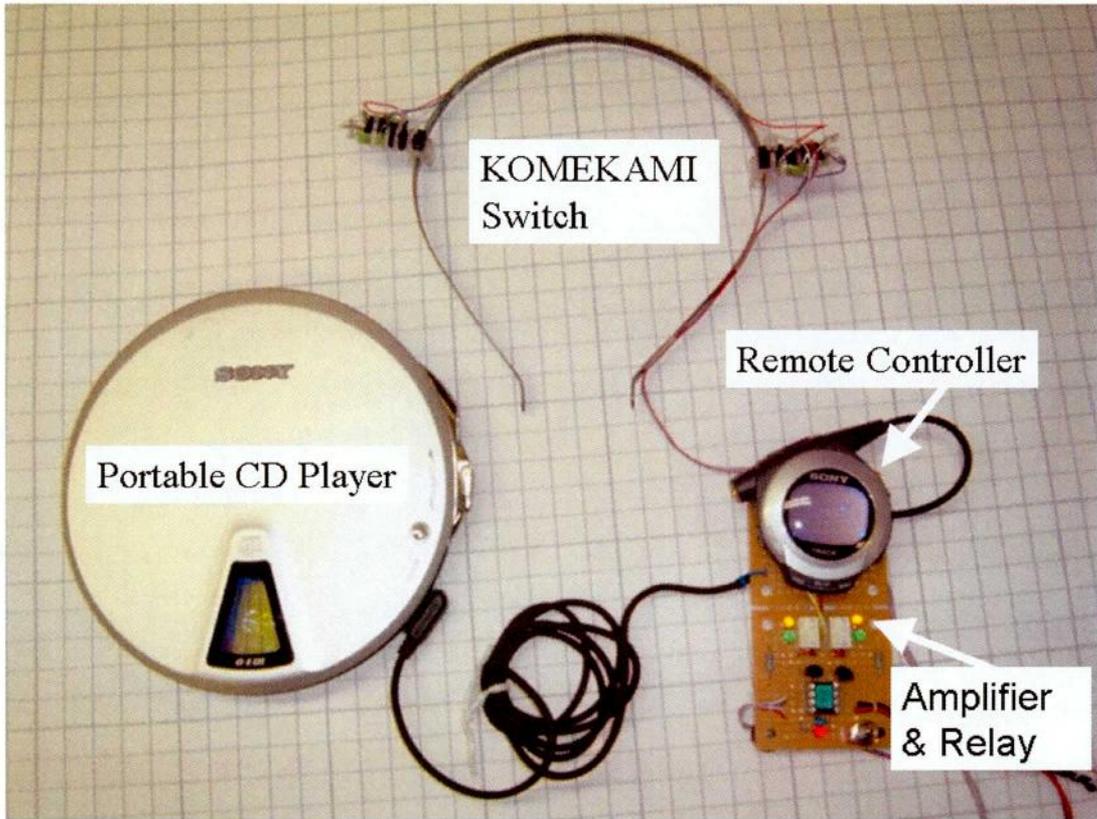


Fig.2.21 Sketch of demonstrative experiment device

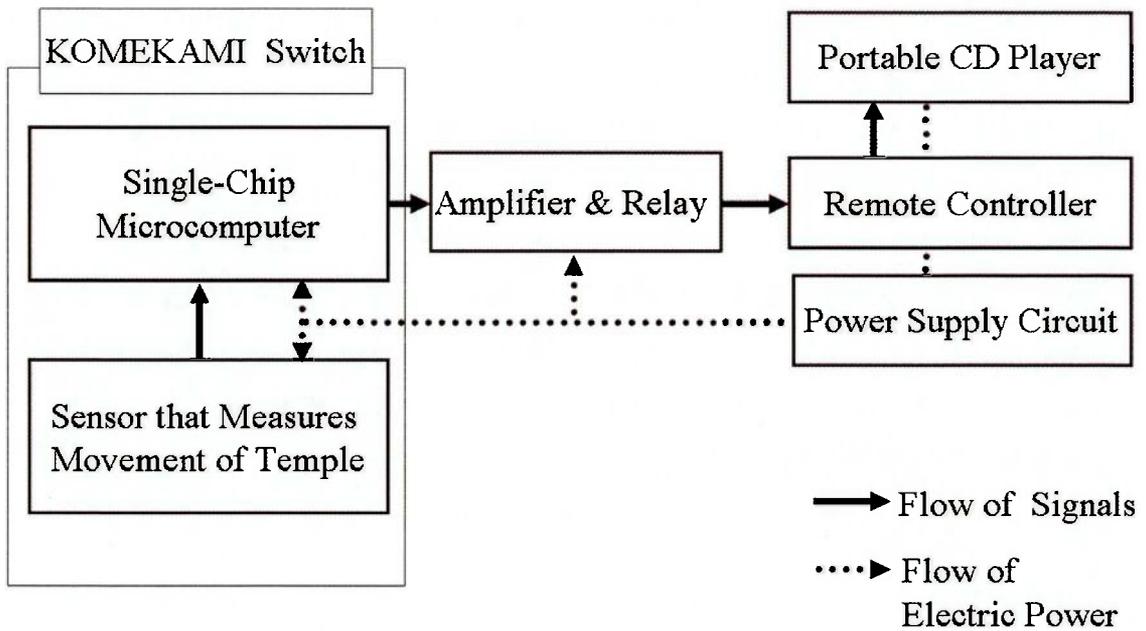


Fig.2.22 Block diagram of demonstrative experiment device

会話時の誤動作は、話題のリアクション動作としてユーザが行った「舌出し」動作のときに発生した。また、ランニング時に成功率が特に低かった原因は、フォトリフレクタを頭部に固定する固定用器具そのものがランニングにより揺れてしまい、こめかみの動きを正しくセンシングできなかつたためである。舌出しは機器使用時に頻繁行う動作ではないため誤動作回数は0回と考えてもよい。

生体コマンド認識アルゴリズムは、特定のユーザを対象に「こめかみセンサの位置を厳密に位置決めしなくても使用できる」と「誤動作しない」ことに焦点を当てて開発された。2.3.3節で述べたとおり本アルゴリズムは、25msec間に測定した250回のこめかみセンサからのセンシングデータの平均値を用い、その値の所定時間内での変化量を判断基準として状態遷移を行っているため、絶対値を判断基準とした場合に比べ光学式距離センサとこめかみとの距離が厳密に位置決めされなくても使用可能である。また、誤動作を防ぐために、生体コマンドには日常生活で行うことがない特殊な動作（奥歯を約1秒間噛締める動作）を採用し、さらに左右両方のセンサ値が所定の変化を遂げたときのみ機器制御信号（300msec間、制御信号1）を出力する方式を採用した。しかしこれらの誤動作対策は、状態遷移条件を厳しくするため、成功率の低下にもつながっている。表2.2からも分かるとおり、安静時に生体コマンドを行った場合の成功率は70%と低いものであった。

次に「会話」「ガム噛み」「食事」「歩行」「ランニング」の各動作時の成功率について考察する。ここでは安静時の成功率を基準として各動作の成功率を検討するために、安静時の成功率を100%と置き、各動作の成功率を換算した表2.3を用いる。この表2.3に示す換算後の成功率を換算成功率と呼ぶ。はじめに、歩行時の成功率について考察する。表2.3に示すとおり歩行時の換算成功率は100%であった。これは、本アルゴリズムでは、歩行動作が成功率に影響を及ぼさないことを示している。歩行時には、図2.15に示すとおりこめかみセンサのセンシング値に高周波ノイズが観測される。この高周波ノイズは地面に足の裏が接地したときに足の裏から頭部へ伝播する衝撃波であると推測される。本アルゴリズムでは、25msec間に測定した250回の光学式距離センサからのセンシングデータの平均値を使用しているため、歩行時に観測される高周波ノイズによる影響を除外することができる。また、歩行時に観測される低周波成分は、生体コマンドに比べ振幅が小さく、周期が長いため、歩行動作が成功率に影響を与えることはない。

Table2.2 Demonstrative experiment results

Success Raito: Indicates the number of time the user's intentional movements of temple that have succeeded in manipulation of the machine.

Number of Times of Malfunctioning: Indicates the number of time the machine that has been manipulated whereas in fact the user has never manipulated it.

	Success Raito	Number of Times of Malfunctioning
Conversation	63%	1
Gum Chewing	68%	0
Diet	55%	0
Walling	70%	0
Running	24%	0
While At Rest	70%	0

Table 2.3 Effects of each action on biocommand

Converted Success Rate: Indicates success ratio of each action, which has been converted from the success ratio (100%) of which at rest

	Converted Success Raito
Conversation	90%
Gum Chewing	97%
Diet	78%
Walling	100%
Running	34%
While At Rest	100%

次に会話時の成功率についての考察を述べる。会話時の換算成功率は90%である。ここでの10%の失敗は、心理的な原因によるものであると考えられる。検証実験では、会話の流れを考慮せず、30秒おきに会話を中断して生体コマンド（1秒間奥歯を嚙締める）動作を行った。会話を急に中断し1秒黙る（生体コマンドをする）ことはとても不自然なことであり、ユーザは中断した会話を早く復帰したいと思う気持ちの焦りから、正しい生体コマンドを行うことができなかった。次にガム噛み時と食事時の生体コマンドの成功率について考察する。それぞれの換算成功率は、ガム噛み97%、食事90%である。ガム噛み時の3%、食事時の10%の失敗の原因は、ガム噛み及び食事の嚙締め量と嚙締めのテンポが生体コマンドのそれとは大きく異なるためである。比較的規則正しい嚙締めを繰り返すガム噛みや口の中の食べ物の量、味、硬さに応じて嚙締めを行う食事を行っているときに、日常生活では行わない約1秒間の嚙締め動作を正確に行うことは困難である。特に食事の嚙締めは、口の中の食べ物に気を配った動作であり、生体コマンドとの差は大きい。最後に、ランニング時の換算成功率（34%）が、他に比べ特に低かった原因を考察する。図2.23は、ランニング時のこめかみセンサのセンシングデータである。ランニング時には非常に大きな振幅が観測されている。この振幅は、こめかみセンサがランニングにより揺れたため生じたものである。ランニング時は、こめかみセンサが大きく揺れ、こめかみの動きを正しくセンシングできなかったため成功率が低くなったのである。今後の課題としてこめかみセンサの取り付け方法の検討も必要である。さらに、こめかみセンサの固定用器具は人の頭に直接取り付けるものであるので、人間工学に基づき装着のしやすいものを研究開発する必要もある。

こめかみスイッチの外見は、U字形の専用の固定用器具に光学式距離センサが左右1つずつ配置され、片方の光学式距離センサの横には小型のシングルチップマイクロコンピュータが配置されている。ユーザは、この外見からこめかみスイッチの用途や使用方法を推測することができない。そのため、こめかみスイッチを使用するユーザは、常にこめかみスイッチの使用方法や用途を覚えておく必要がある。このことは、ユーザにとって負担となる。こめかみスイッチ自身が使用方法や用途をユーザに働きかける仕組みを持つ必要がある。

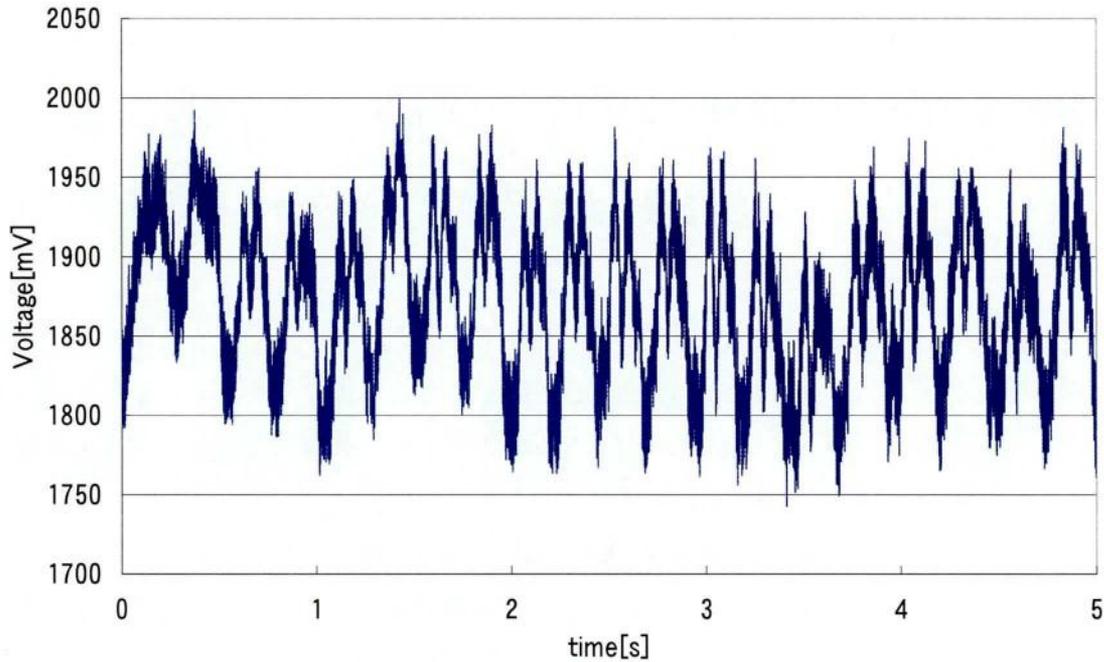


Fig. 2.23 Sensing data of right – hand optical distance sensor on the occasion of running

2.3.5 実装例1のまとめ

実装例1では、光学式距離センサを用いて非接触でセンシングしたこめかみの表皮の動きを機器制御情報に利用するウェアラブル型入力装置（こめかみスイッチ）を開発した。こめかみスイッチは、ユーザが機器の操作を目的として意識的に行う奥歯の噛締め（生体コマンド）のみに反応して機器制御を行う。また生体コマンド以外の日常的な動作では反応しない（誤動作しない）。

しかし、実装例1は以下の問題点がある。

- 生体コマンドの成功率（認識率）が低い
- ランニング時にこめかみの動きを測定するセンサ（こめかみセンサ）が揺れてしまい、こめかみの動きを測定する能力が低下する
- こめかみスイッチの外見（U字型の固定用器具）から使用方法や用途が推測できないため、ユーザは使用方法や用途を常に記憶にとどめておく必要がある。

2.4 実装例 2 :

瞬き動作を機器操作に利用したウェアラブル型入力装置

— アフォーダンスを考慮したこめかみスイッチの構成手法 —

実装例 2 では、実装例 1 で述べた携帯型音楽プレーヤーを操作するこめかみスイッチを題材にして、アフォーダンスを考慮して設計する方法を提案する。アフォーダンス考慮することによりユーザビリティの向上と、実装例 1 の問題点の解決を目指す。本節で述べる実装例 2 の目標は次のとおりである。

- 生体コマンドの成功率(認識率)を改善する(実装例 1 の問題点)。
- 固定用器具を改良し、ランニング時でも使用できる(揺れない)ようにする。また、頭に装着しやすい固定用器具を用いる。(実装例 1 の問題点)
- こめかみスイッチの外見から使用方法や用途が推測できるようにする(実装例 1 の問題点)。
- 生体コマンドの数を 3 種類に増やして、再生/一時停止、曲飛ばし、曲戻しができるようにする(ユーザビリティの向上)。
- 入力装置の消費電力を抑える(ウェアラブル性の向上)。

2.4.1 アフォーダンス

アフォーダンス(Affordances)とは、外界の環境や物事が生体の活動に供するべくもった情報、言い換えれば、物体の持つ色や形などの属性が物体自体をどのように扱ったらいのかについてユーザにあたえる情報のことである。このアフォーダンスは、米国の生態心理学者 James Jerome Gibson がアフォード(afford)から作った造語である。Donald A Norman は、アフォーダンスがインフェースの設計のあり方に重要な指針を与えることを示した。Donald A Norman によれば、対象そのものが持っている自然な制約が、その適切な行為のきっかけとして重要なものであり、また対象物の持つアフォーダンスが、対象物がどのように使え、行為でき、機能しうるかに関するメッセージを伝える。詳しくは、文献[II17, II18]を参照されたい。

2.4.2アフォーダンスを考慮したウェアラブル型入力装置の構成手法

2.2節で述べたウェアラブル型入力装置の構成手法（要求項）についてアフォーダンスを考慮して再検討したものを以下に示す。1), 3), 4), 5) は2.2節の内容と変更ない。2) を修正し、6) を新たに加えた。

- 1) ユーザの日常生活に支障をきたさないものとするため、ウェアラブル型入力装置は使用時に、ユーザの本来持っている基本的な情報収集能力（視覚、聴覚、触運動覚、嗅覚、味覚）を損なわすことがない。またハンズフリーで使用できること。さらに使用時に思考を遮ることがない。
- 2) 既存のウェアラブル型出力装置と統合しやすいこと。ここで、以下の3点に注意が必要である。
 - 2-1) 入力装置、出力装置、中央処理装置、外部記憶装置、ネットワークを組み合わせ、1つのシステムを構築した場合でのウェアラブル性を重視する。
 - 2-2) 入力装置から入った情報が処理され、どのような出力形態で出力されるのかユーザがイメージしやすいように、入力装置を出力装置に組み込む。
 - 2-3) フェイスメントディスプレイやヘッドフォンなどユーザが見ただけでその装着方法が分かる出力装置に入力装置を組み込む。
- 3) 日常生活で最も使用頻度の高い機器制御信号は、スイッチのON/OFFなどの比較的情報量の少ないものである。よって入力に利用するユーザの体の部位や生体情報は、入力情報の多さよりも入力のしやすさを重視して選定する。
- 4) ウェアラブルコンピュータが、公共の場（他人の前）で使用する機会があることを考慮して、ユーザ以外の人がわからない程度の小さな動作で情報の入力が可能（使用が可能）であること。
- 5) 将来的な普及の面から、小型・軽量・低価格で実現可能であること。また入力装置のデザイン性（外観の美しさ）の向上が見込めること。
- 6) 機器の操作説明が必要な場合は、自分の記憶に頼らなくてもいいよう、システムに操作説明のアイコンをつける。アイコンは、国籍、使用言語、性別による影響を受けにくいものを用いる。目に障害のある人には、立体的なアイコンが有効である。

2.4.3 生体コマンドとアイコン

実装例1で使用した生体コマンドは、「1秒程度奥歯を嚙締める」動作である。入れ歯を含む自らの歯で食べ物を咀嚼できるすべての人が使用可能であるため、実装例1の使用可能者は極めて多い。しかしながら、奥歯を1秒間嚙締める動作は、日常的な動作でなく、アフォーダンスをふまえて検討すると、奥歯を1秒嚙締めることで機器操作が可能であることをユーザに直感的に伝えることが困難であるといえる。本節では、奥歯を嚙締める以外の生体コマンドを検討する。

こめかみは、2.3.2節に示したとおり、奥歯を嚙締める以外の動作でも動く。例えば、瞬きや発声である。中でも、瞬きは、老若男女、誰でも自由に行うことができ、使用言語による差がない。しかし、自発的に強く瞬きを行った場合のこめかみの動きは、図2.8に示すとおり、奥歯を嚙締めたときに比べて、波形が複雑で、時間も短いため、瞬きは生体コマンドとして利用しにくい面を持っている。この問題を解決するため、こめかみの動きの測定箇所を目じりと耳の間に変更した。目じりと耳の間は、瞬きにより最も大きく皮膚表面が動くところの1つである。我々は、瞬き時の表皮の動きをセンシングするために骨伝導ヘッドフォン型こめかみセンサを製作した(図2.24)。骨伝導ヘッドフォンはゴールデンダンス社のAUDIO BONE MGD-01 [II 19]を使用した。この骨伝導ヘッドフォンは、人間工学に基づいてしっかり頭にフィットする構造をしており、さらに重量が60gと軽量である。我々は、この骨伝導ヘッドフォンの装着具にスポンジ製のパッドと取り付け、歩行やランニングなどによる固定用器具のズレを防いだ。実装例1のこめかみセンサの抵抗器の部品定数は R_1 が 60Ω 、 R_2 が $100k\Omega$ であるのに対し、実装例2の骨伝導ヘッドフォン型こめかみセンサでは R_1 が 390Ω 、 R_2 が $51k\Omega$ とした。この部品定数の違いは、光学式距離センサと皮膚との距離が実装例1と実装例2では違うことと、実装例1では瞬きに伴う皮膚の動きのみ測定しているが、実装例2では、もみ上げの髪の毛と皮膚の両方の動きを測定していることによる違いである。また、ウェアラブルコンピュータ用入力装置として、低消費電力であることが求められるため、本入力装置において最も電力消費が大きいLEDの電力を R_1 の値を 60Ω から 390Ω に増やすことにより抑えた。今後は、パルス変調することでLEDの消費電力をさらに半分に改善できる見込みである。

骨伝導ヘッドホン型こめかみセンサは 2.4.2 節で挙げた以下の要求項を満たす。

- 骨伝導ヘッドホンは、直接耳を覆うことがないので通常のヘッドホンに比べ聴覚を利用した情報収集能力を損なわない、ユーザの日常生活に支障を与えない。(要求項1)
- こめかみセンサを構成する電子部品は小型で軽量であるため、既存の骨伝導ヘッドホンに統合しやすく、またウェアラブル性やデザイン性も良い。(要求項2-1と5)
- 制御対象が携帯型音楽プレーヤーであるので、音を出力する骨伝導ヘッドホンにこめかみスイッチを搭載することで、ユーザが用途をイメージしやすい。(要求項2-2)
- 骨伝導ヘッドホンの装着方法がそのまま、こめかみセンサの装着方法となる。(要求項2-3)

また、低消費電力化も実現できた。

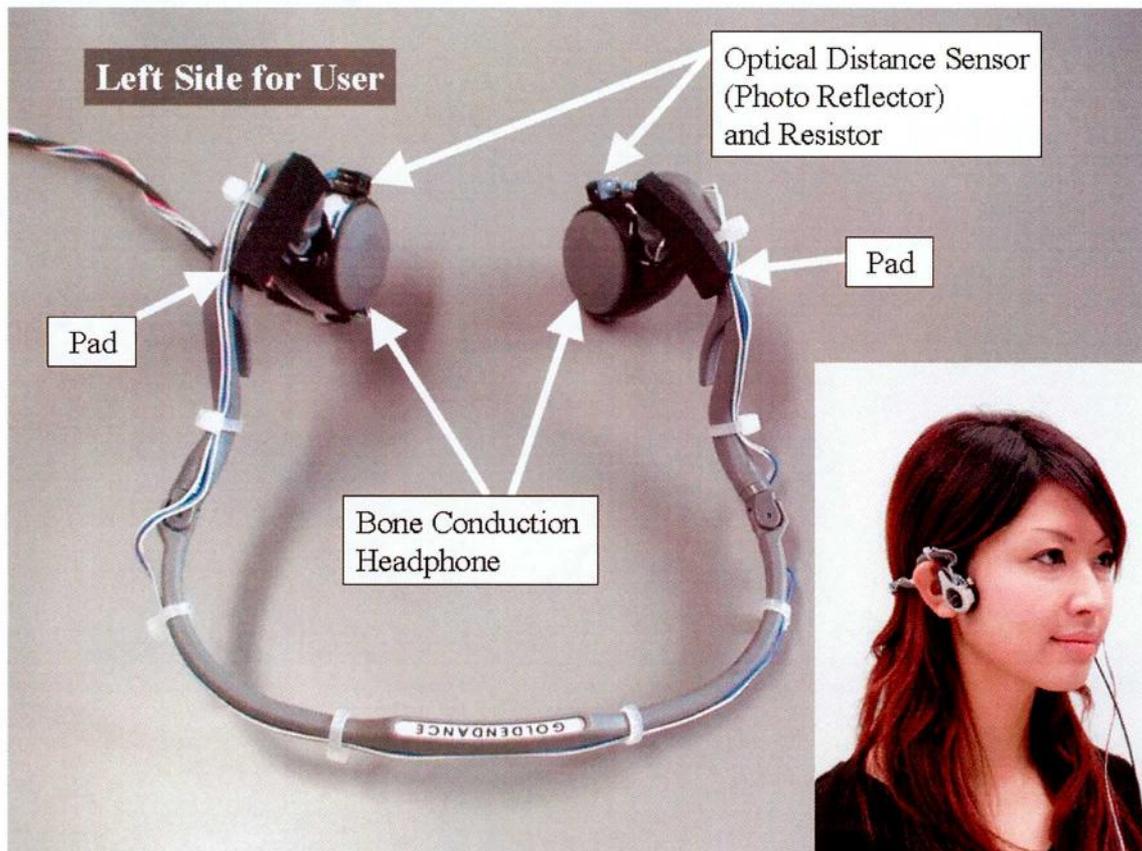


Fig.2.24 KOMEKAMI sensor on the bone conduction headphone

図 2. 25 に意識的な瞬きを行った（右目を約 0. 5 秒間閉じた）時の目じりと耳の間の皮膚の動きを瞬きセンサの使用者からみて右側の光学式距離センサで測定した結果を示す。また、生理的な瞬き、ガム噛み、眼球運動、歩行、会話、ジョギング時のこめかみセンサのユーザからみて右側の光学式距離センサで測定した結果を図 2. 26 から図 2. 34 に示す。なお図の電圧軸の幅は図 2. 5 に合わせて 250mV とした。図 2. 25 から図 2. 32 の時間軸の幅も図 2. 5 に合わせて 1. 7sec とした。図 2. 35 と図 2. 36 の波形には、規則性が無かったため、図 2. 15 と図 2. 16 と同様に他の波形に比べ時間軸を大きくとり 5sec とした。図 2. 26 は、無意識に行う瞬き 1 回分を測定した結果である。図 2. 27 は、ゆっくりと右奥歯でガムを 1 回噛んだときの結果である。図 2. 28 から図 2. 31 は、上下左右に眼球を動かしたときの測定結果である。図 2. 32 は、発話時の測定結果である。図 2. 33 は、1 m/sec 程度の速度で舗装された平地を歩行したときの測定結果である。図 2. 34 は、舗装された平地をジョギングしたときの測定結果である。測定結果から、意識的にを行った瞬きは他のものと比べて電圧レベルが大きいため、他の動作とはっきり区別できることが分かる。以上の測定結果から、意識的にを行った瞬きは、生体コマンドとして十分に利用可能である。ここで、長時間閉じる動作は、情報収集能力の低下につながるため、生体コマンドとしては不向きであるため、生体コマンドとして瞬きを用いる場合、短時間、意識的に「ギョッ」と目を閉じる動作がよい。

本ウェアラブル入力装置の生体コマンドとしては、携帯型音楽プレーヤーの操作ボタンが、ユーザから見て右に曲飛ばし、中央に再生／一時停止、左に曲戻しと並んでいることから、ボタンを押す動作と瞬きとを関連付けて、右目を強く瞬きをしたときに曲飛ばし、左目のときに曲戻し、両目のとき再生／一時停止とした（図 2. 35）。この動作は、簡単で短時間にできる。しかし、片目を閉じる動作は「ウインク」といい、広辞苑では「片目で瞬きをして目配せすること」とある。また、ウインクには男女間で好意を寄せる、誘惑するという文化的な意味がある。ところがこの文化的な意味は、各国で異なる。例えば、イギリスでは挨拶の延長ぐらいの扱いである。日本では異性を誘惑する意味合いがあるが、気のある相手にウインクをしている人を見ることはめったになく日常的な動作ではない。誘惑を意図するアイコンタクトの後にウインクしなければ誘惑の意味にはならない。さらに、新しい技術から新しい文化やゼスチャーの意味が生まれることもある。以上の理由から、我々は、ウインクの文化的な意味については問題視せず、生体コマンドとして採用した。ここで、瞬きと携帯型音楽プレーヤーの操作が直感的に結びつかないため、この両者を結びつける方法として、アイコンを用いて使用者に操作

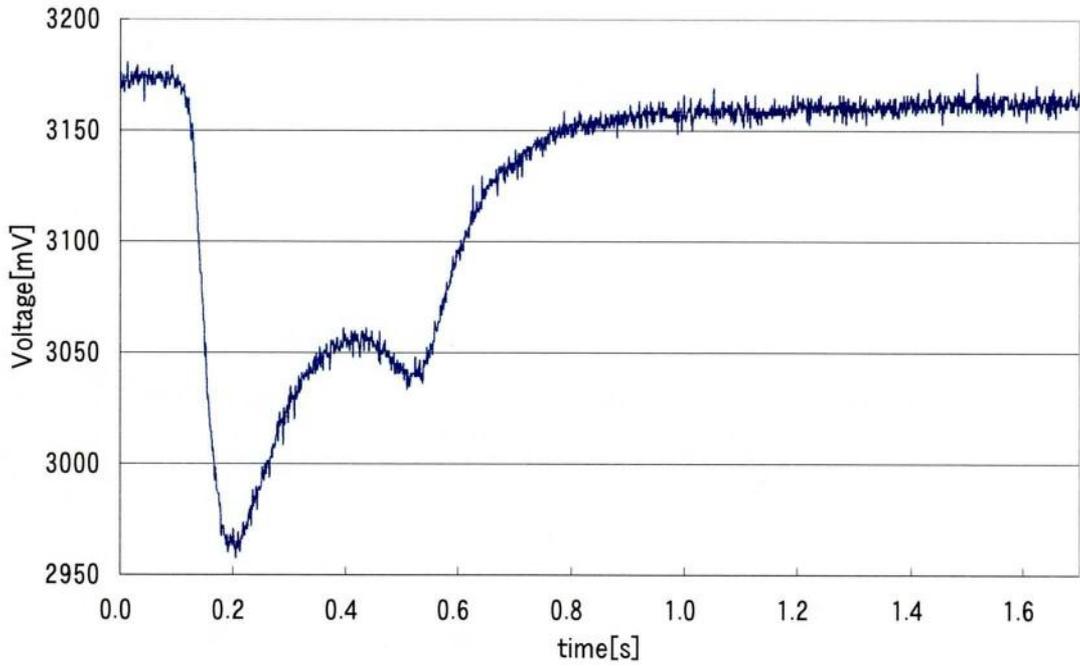


Fig.2.25 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of intentional blinking (for one cycle)

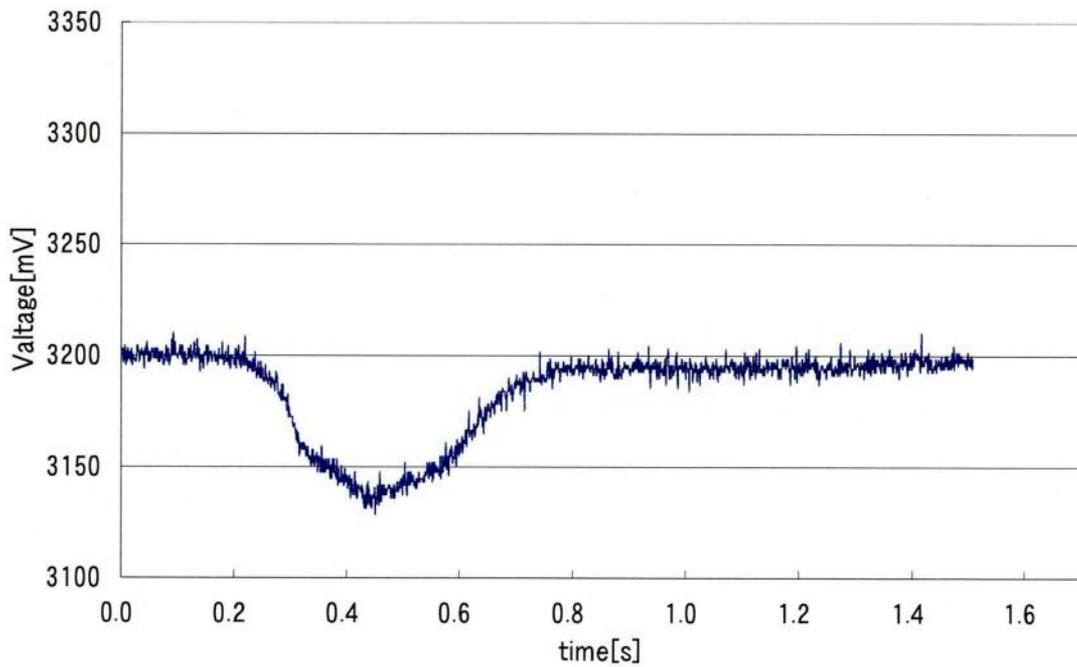


Fig.2.26 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of unconscious blinking (for one cycle)

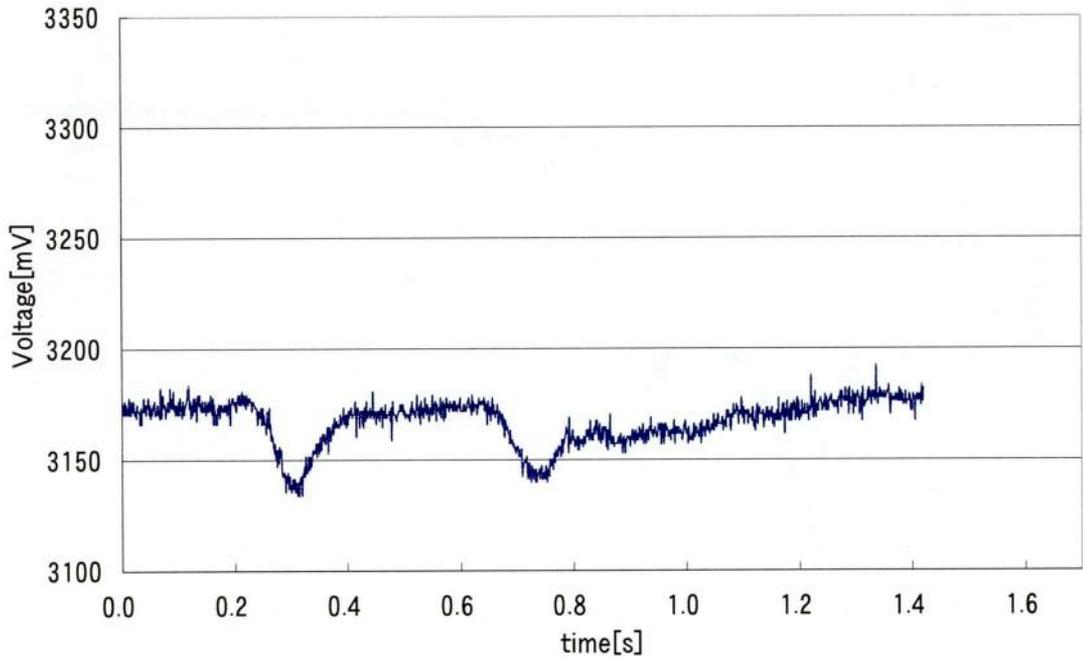


Fig.2.27 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of gum chewing (for one cycle)

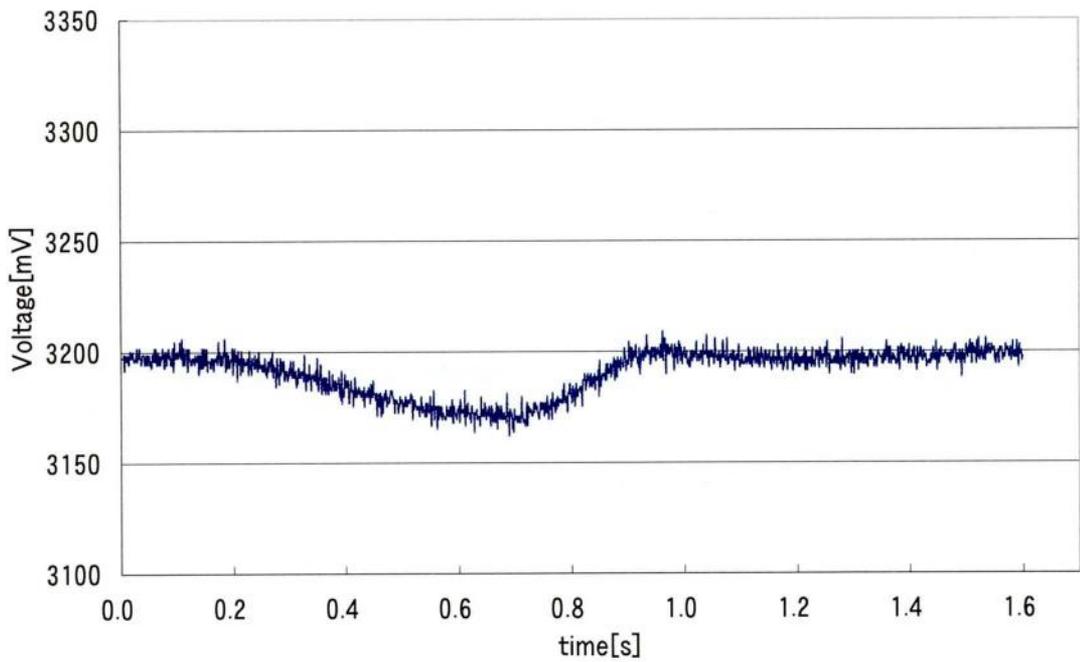


Fig.2.28 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of looking upward (for one cycle)

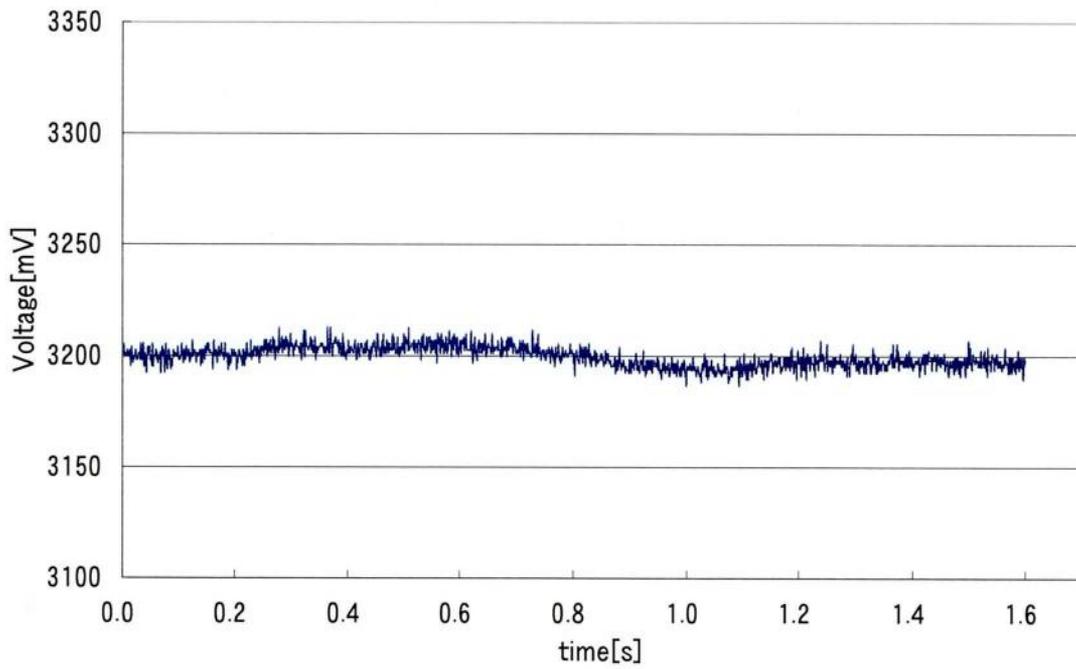


Fig.2.29 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of looking downward (for one cycle)

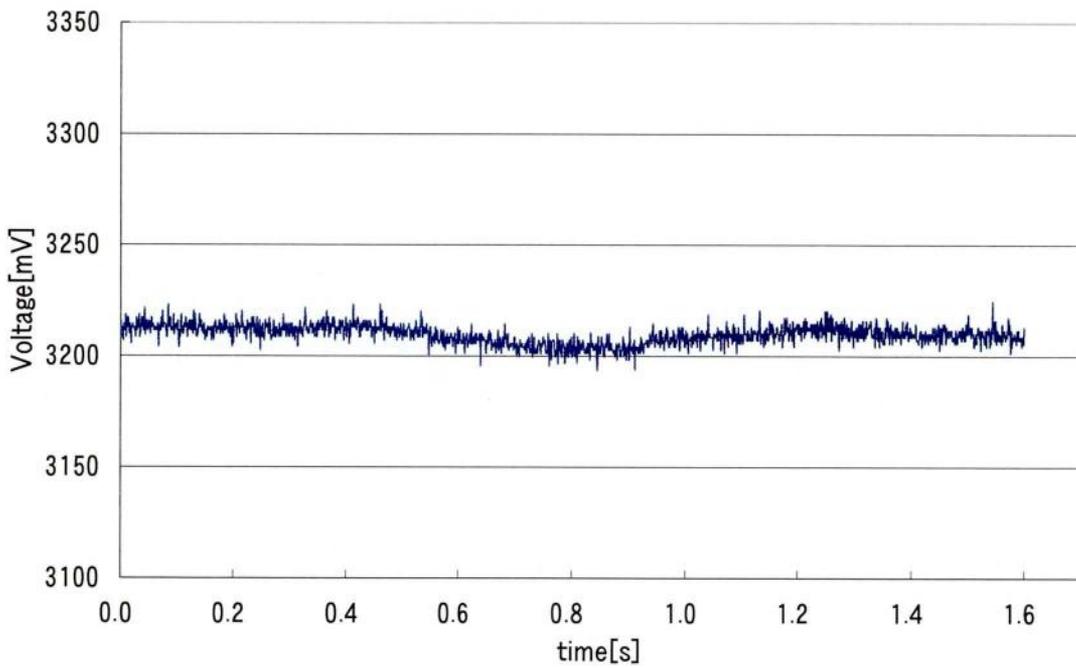


Fig.2.30 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of looking in right direction (for one cycle)

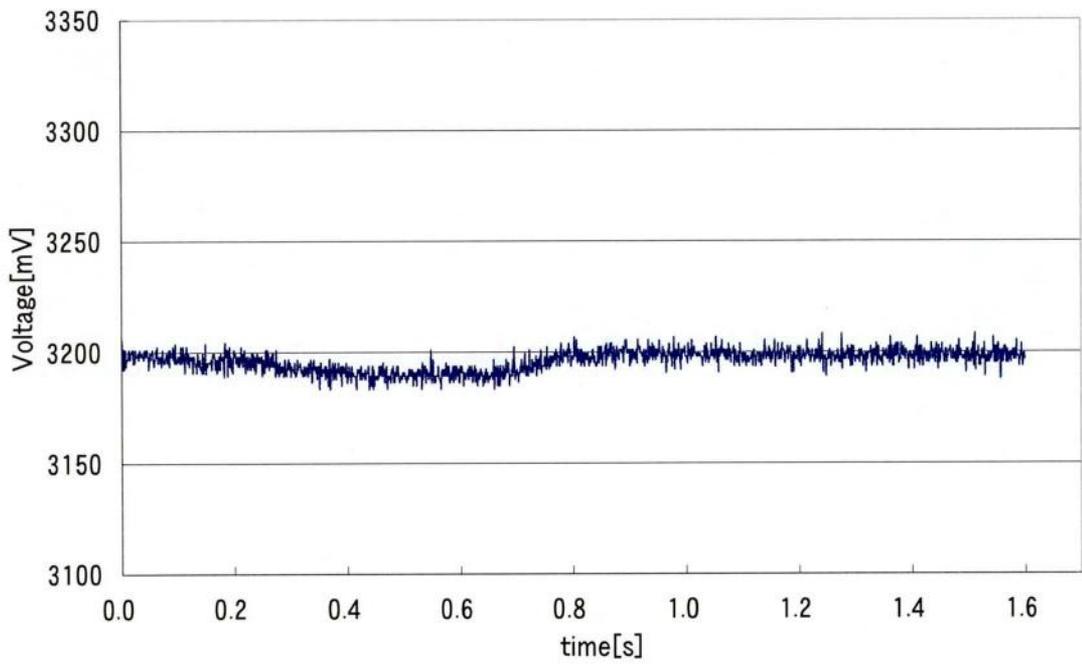


Fig.2.31 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of looking in left direction (for one cycle)

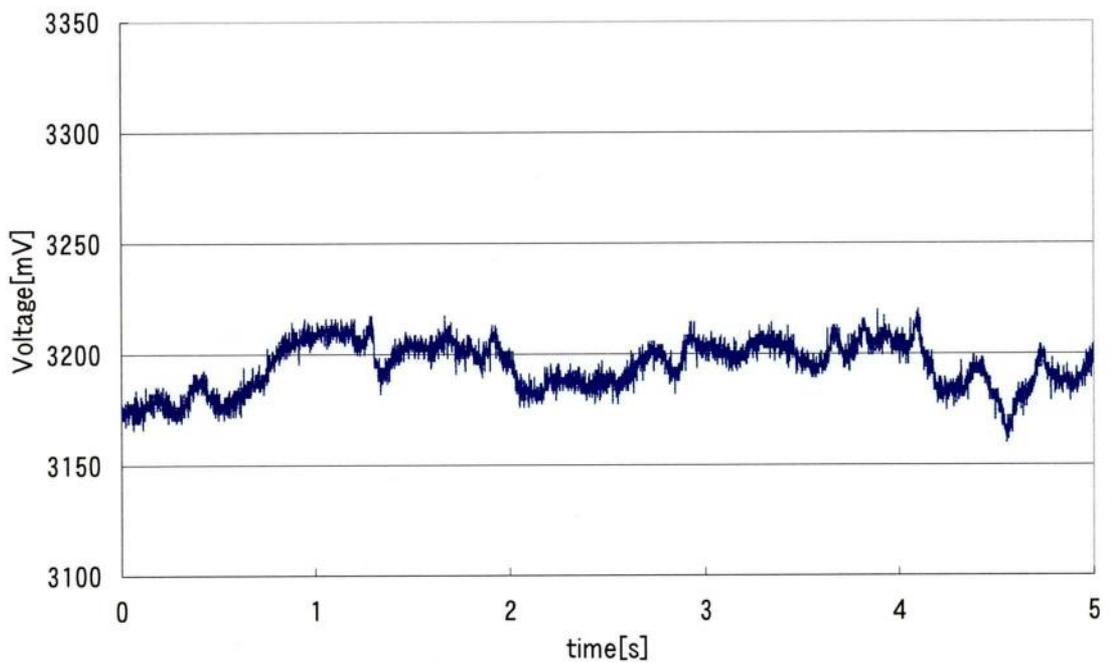


Fig.2.32 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of vocalization

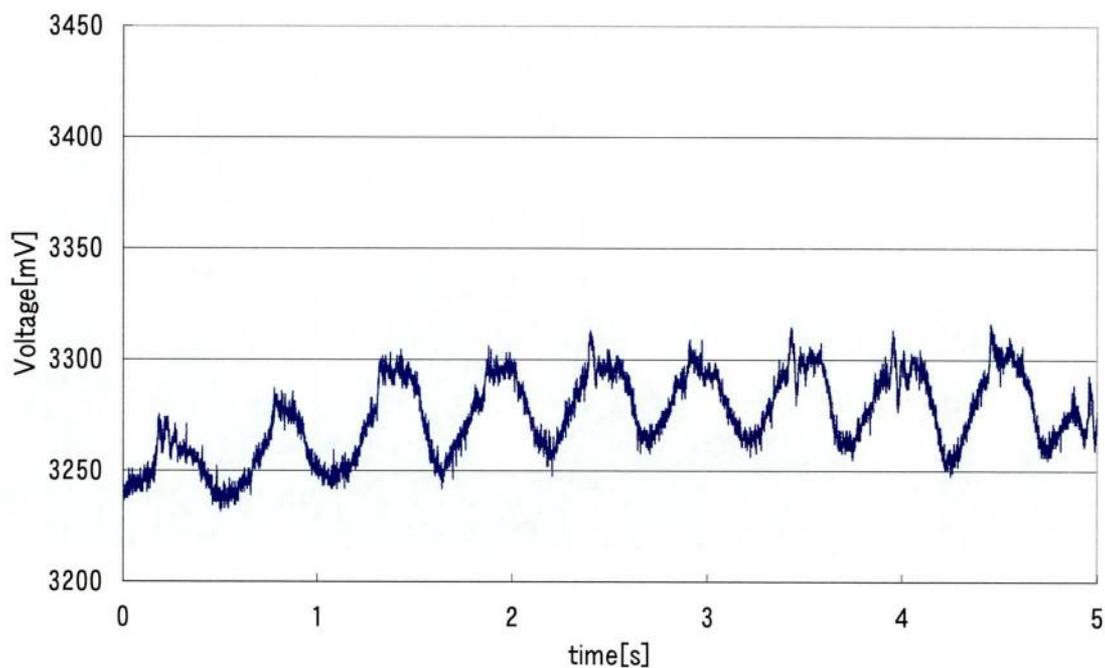


Fig.2.33 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of walking

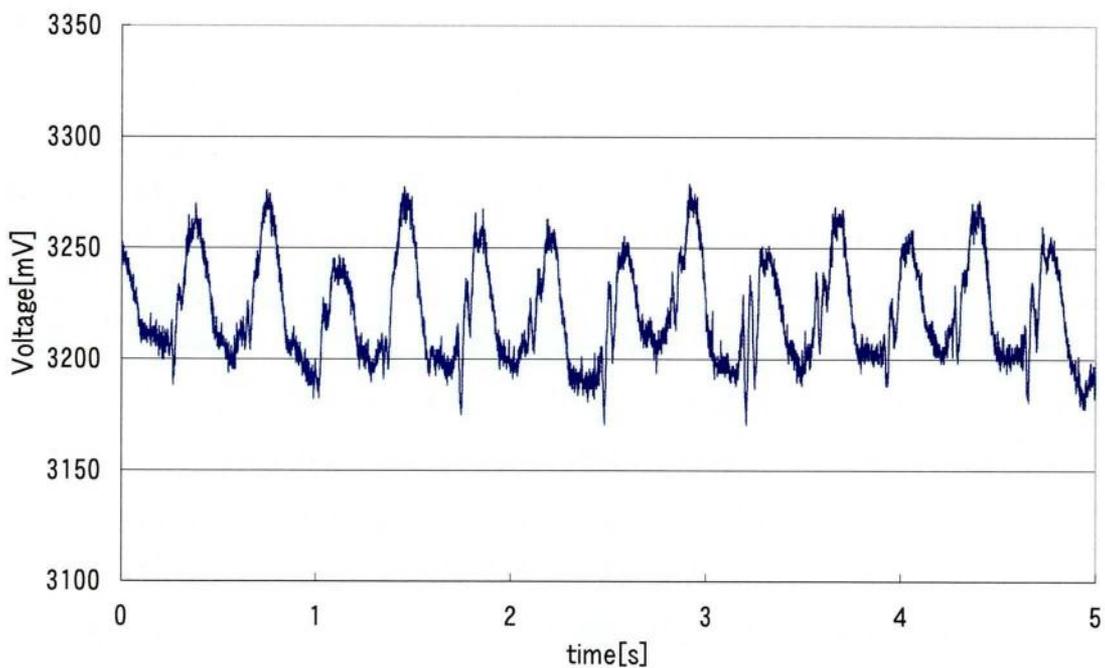


Fig. 2.34 Sensing date of right – hand optical distance sensor on the occasion of running

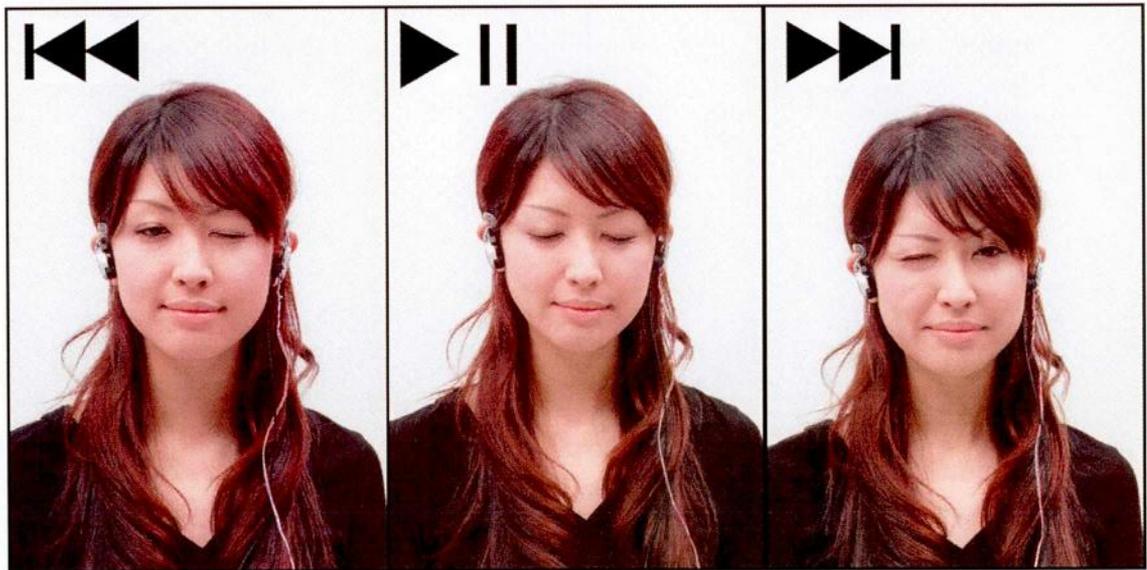


Fig. 2.35 Actions for biocommand

方法を示した（要求項6）。

我々は、アイコン用に図 2.36 に示すキャラクターを作成した。キャラクターは、背景が明るい色用（左）と暗い色用（右）の2種類作成した。このキャラクターと操作を示す図形を組み合わせる操作説明用アイコンを作成する。ただし、このアイコンは、携帯型音楽プレーヤーに標準的に示されている、再生／一時停止、曲飛ばし、曲戻しを示す記号の意味が分かるユーザへメッセージを発信するものとする。我々が作ったアイコンは、図 2.37 が再生／一時停止を示すアイコン、図 2.38 が曲飛ばしを示すアイコン、図 2.39 が曲戻しを示すアイコンである。これらのアイコンは、携帯型音楽プレーヤーの前面部分に表示し、ユーザに使用方法を提示する。ユーザが携帯型音楽プレーヤーに貼り付けられたアイコンを見て操作した場合、右目、左目の操作を誤ることが想定されるが1度間違えれば、次は間違えにくくなる。また、我々は図 2.40 に示すガイダンスディスプレイを開発した。構造は、携帯型音楽プレーヤーの前面部分にアイコンを印刷した紙を貼り付け、その上にシースルー機能を有する鏡が貼り付けられている。ガイダンスディスプレイは、ユーザが目の焦点を変えることで、鏡の役割をしてユーザ自身の顔を映し（図 2.40 の左）たり、鏡の奥のアイコンを見ることが出来る（図 2.40 の右）。鏡に自分の顔が映るとそこに注意が向くという心理を利用して、アイコンをみたユーザが鏡を見ながら、自分の操作（瞬き）とアイコンとが同じ動作であるか否かを無意識に比べさせることができる。この比べる動作を無意識にさせることで、操作間違いの減少を期待している。アイコンは、鏡に映し出されたユーザの顔と一致するよう、本来の操

作とは逆の目を閉じた図とした。

さてキャラクターのデザインは、ユーザにアイコンの「目」に注目をむけてもらえるよう以下の事実を応用してデザインした。これらの事実は、国籍、使用言語、性別による影響を受けない。

- 人の脳には「顔」を認識するための部位があり、「顔らしきもの」が見えれば「顔」と認識する [II 19]。顔文字などがいい例である。顔文字とは (^_^) , (^_-) として ^o^ などであり、記号の集まりが確かに人の顔に見える。
- 人の顔を見るとき一般的な視点移動、停留のパターンを解析すると目に視点が繰り返り固定される [II 20]。
- 図 2.41 と図 2.42 に示す簡単な図形的な目であっても人はそれが人の目であると生得的に判断でき、図の瞳孔の大きさが見た人の心理に影響する。16 歳以上の人は図 2.42 よりも図 2.41 の瞳孔の大きい図形の方が高い好感度を示す [II 21] 。

アイコンは、目、口、輪郭を示す簡単な図形で構成し「顔らしきもの」をしており、とくに目を意味する 2 つの円形の図形が、アイコンが顔であることを我々に理解させる。アイコンの目は、瞳孔を大きくし、ユーザに好印象を与えるよう配慮した。

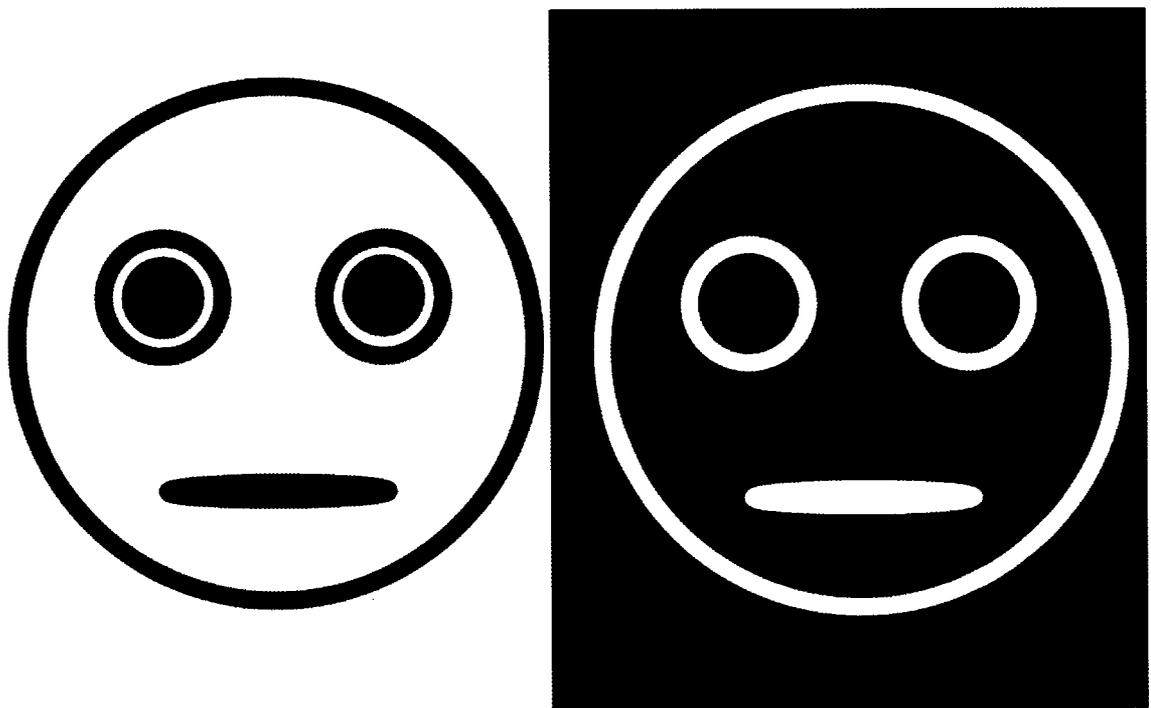


Fig.2.36 Character for guidance icon

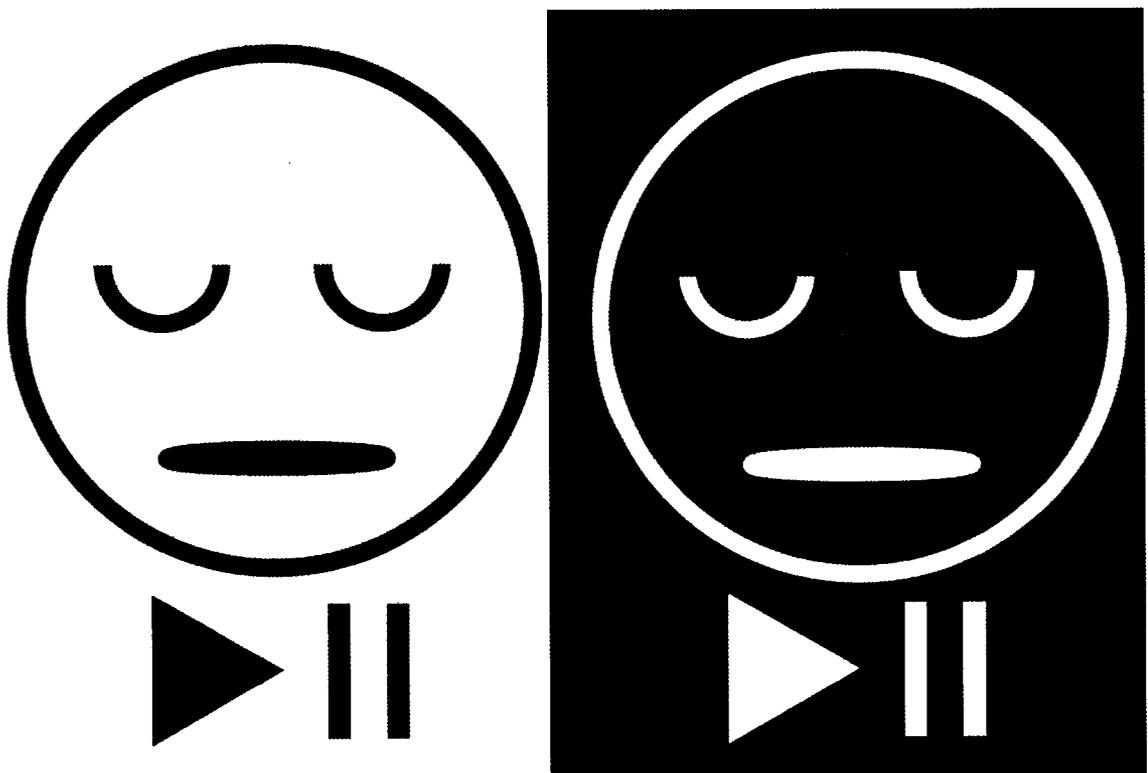


Fig.2.37 Icon for play/pause

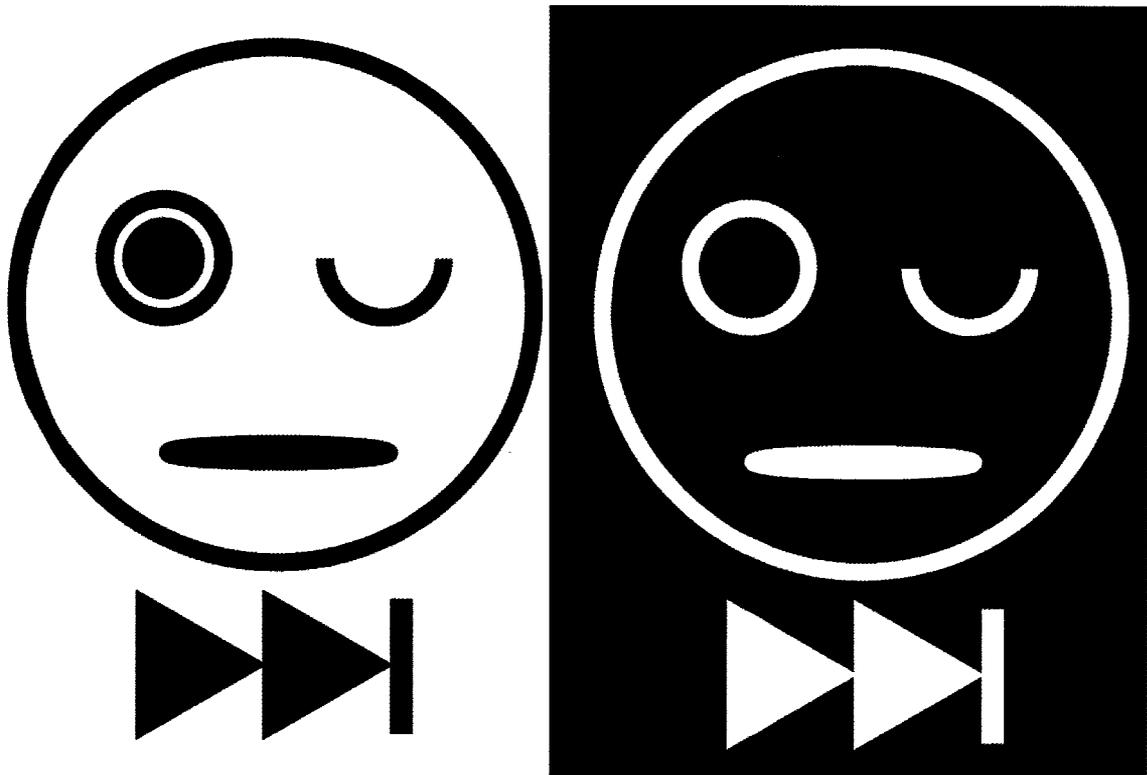


Fig.2.38 Icon for fast-forward

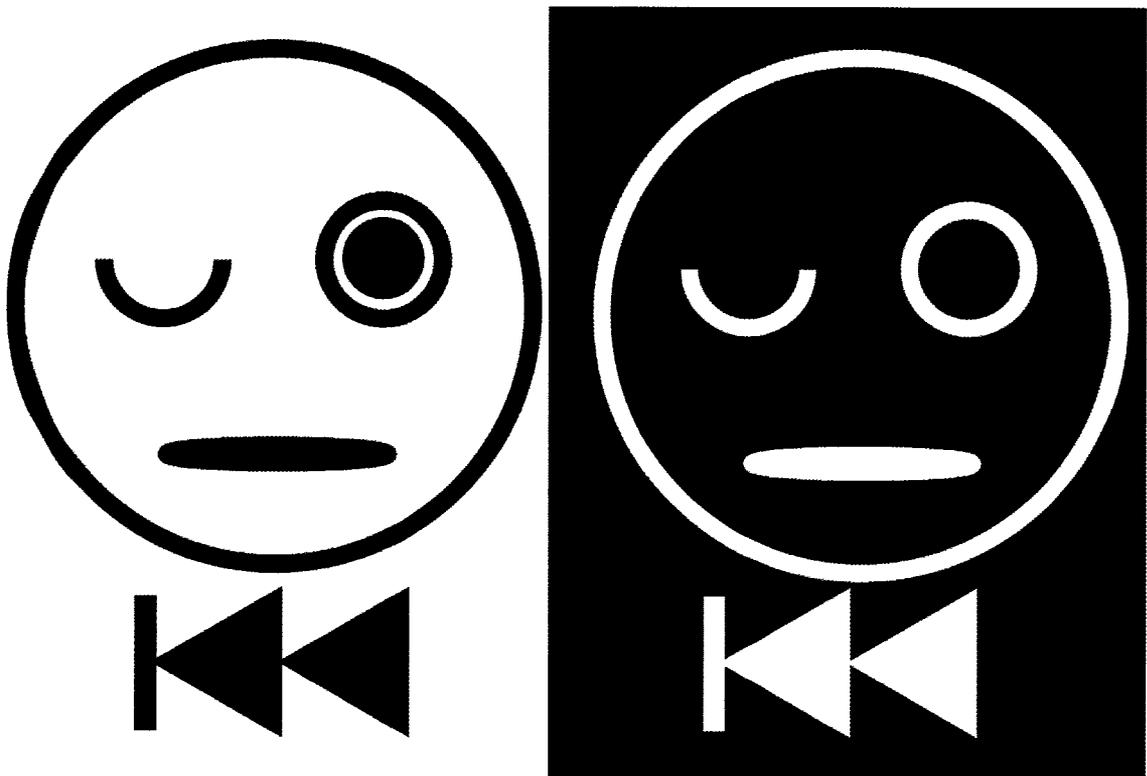


Fig.2.39 Icon for fast-rewind

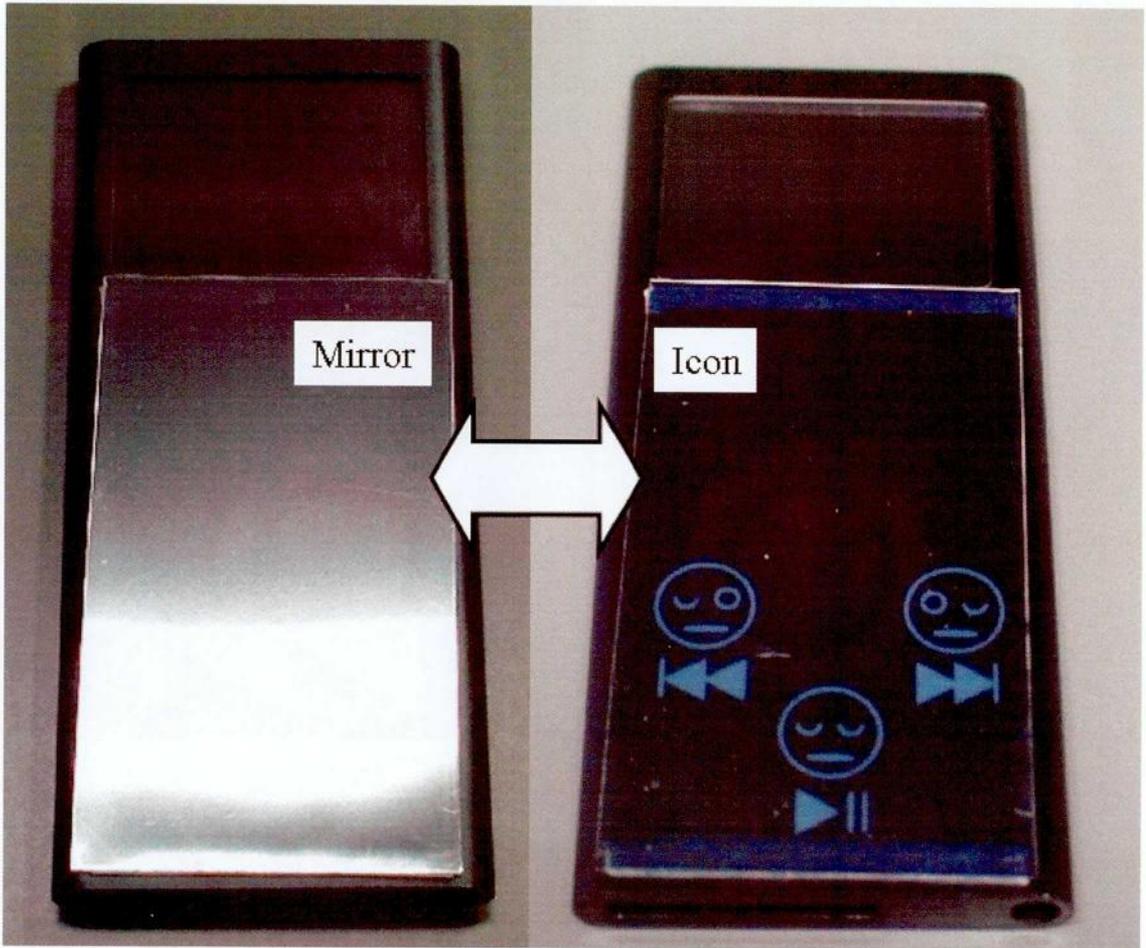


Fig.2.40 Guidance system



Fig. 2.41 Schematic eyes of big pupil size

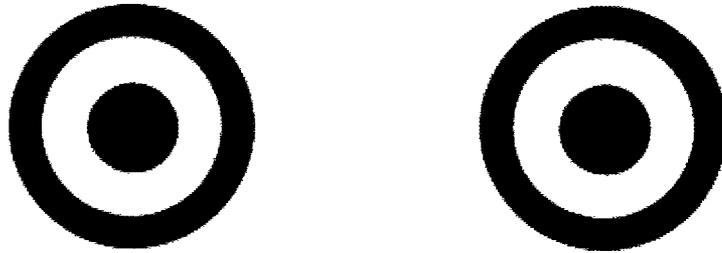


Fig. 2.42 Schematic eyes of small pupil size

2.4.4 システム構成

ハードウェアの外観図を図 2.43, ブロック図を図 2.44, そして装着図を図 2.45 に示す. 実装例 2 では, 瞬きを行ったときの耳との表皮の動きをこめかみセンサ (2.4.3 節) によりセンシングし, そのセンシング信号を光学式距離センサの横に設置したシングルチップマイクロコンピュータ (MicrochipTechnology 製 PIC12F683) で信号処理を行うことで, 生体コマンド (3.4.3 節) に応じた, 機器制御のための制御信号を生成する. 制御信号は, 再生/一時停止, 曲飛ばし, そして曲戻し用のものがあり, それぞれシングルチップマイクロコンピュータの出力ポート GP4, GP5, GP2 から出力される. 出力された制御信号はアンプ回路等により対象機器の電気特性に合わせた信号に変換される. なお, このシングルチップマイクロコンピュータはサンプリング周波数 1MHz, 10bit の A/D コンバータの機能を持つ. こめかみスイッチのための駆動電源 (DC5V) は電源装置から供給されるものとする. また, こめかみセンサは, こめかみの表皮から光学式距離センサまでの距離に応じて 0V から 5V までの電圧をシングルチップマイクロコンピュータに出力する.

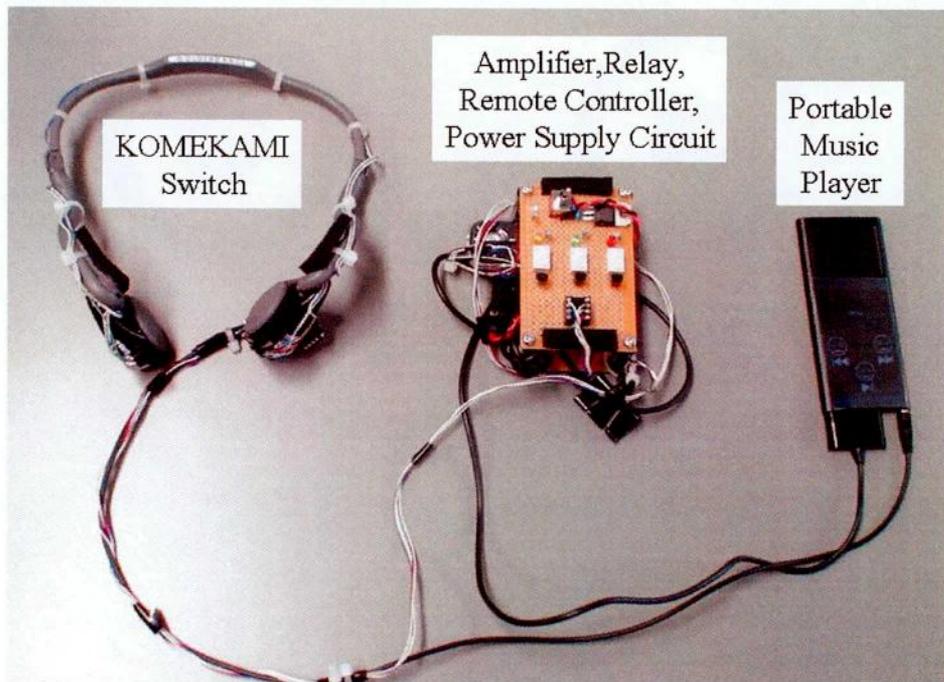


Fig.2.43 Sketch of demonstrative experiment device (Second Prototype)

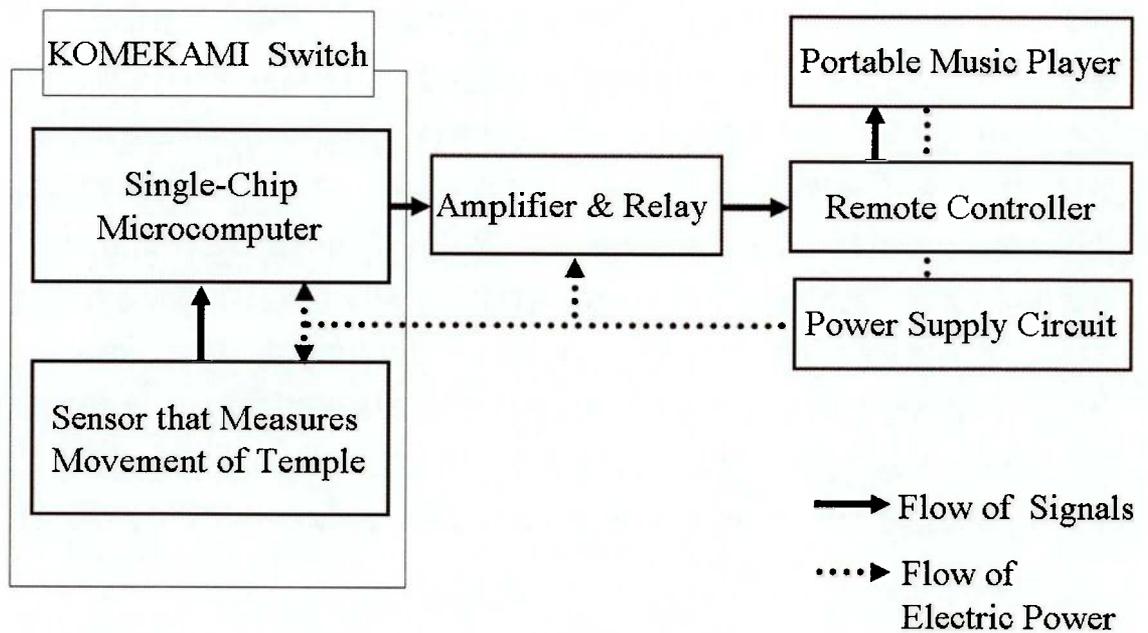


Fig.2.44 Block diagram of demonstrative experiment device (Second prototype)



Fig. 2.45 Installation image of the KOMEKAMI switch

生体コマンドを認識するためのアルゴリズムは、低スペック（安価で小型）なハードウェアでも処理できるシンプルなアルゴリズムの構築を目指し、各動作におけるこめかみセンサの出力を分析した結果、次の特徴を見つけた。意識的に瞬きをすると、図 2.25 から分かるとおり、50msec 間にセンサからの出力が 190mV 程度変化する。一方、生理的な瞬きは 40mV 程度、ガム噛み 40mV 程度、発話 40mV 程度、歩行 50mV 程度、ランニング 50mV 程度であり、意識的な瞬きとは大きく異なる。よって、生体コマンドの特徴は、50msec 間のセンサからの値の変化が 73mV から 244mV 以内であることである。この特徴を利用したアルゴリズムを以下に示す。ここで、こめかみセンサにおいて、ユーザの左側のこめかみの動きを測定する光学式距離センサを“左の光学式距離センサ”と呼び、ユーザの右側のこめかみの動きを測定する光学式距離センサを“右の光学式距離センサ”と呼ぶ。

STEP1 機器のイニシャライズを行う。制御信号として 0 を出力し 1sec 待つ。STEP2 に進む。

STEP2 左の光学式距離センサの測定値を S_{L1} 、右の光学式距離センサの測定値を S_{R1} とする。 t_1 間待ち、左の光学式距離センサの測定値を S_{L2} 、右の光学式距離センサ

の測定値を S_{R2} とする。以下の条件 1 と条件 2 を両方満した場合 STEP3 に進む。
条件 1 のみ満たした場合 STEP4 に進む。条件 2 のみ満たした場合 STEP5 に進む。
それ以外は STEP2 を繰り返す。

<条件 1>

$$A_1 \leq S_{R2} - S_{R1} \leq A_2$$

<条件 2>

$$A_1 \leq S_{L2} - S_{L1} \leq A_2$$

STEP3 <再生／一時停止を行う>出力ポート GP4 から制御信号 1 を t_2 間出力して次に
制御信号 0 を t_3 間出力する。STEP2 に戻る。

STEP4 <曲飛ばし>出力ポート GP5 から制御信号 1 を t_2 間出力して次に制御信号 0 を
 t_3 間出力する。STEP2 に戻る。

STEP5 <曲戻し>出力ポート GP4 から制御信号 1 を t_4 間出力して次に制御信号 0 を t_4
間出力する。その後同様に出力ポート GP4 から制御信号 1 を t_4 間出力して次に制
御信号 0 を t_4 間出力する。STEP2 に戻る。(はじめの制御信号の 1, 0 の変化で曲
の頭だし, 次の制御信号の 1, 0 で曲戻しを行っている。これは, 制御対象の仕
様である。)

ここで, 測定値は 5msec 間に行った 50 回のサンプリングデータの平均値, t_1 は 50msec,
 t_2 は 300msec, t_3 は 700msec, t_4 は 200msec, 基準電圧 5V で 10bit の AD コンバータを使用
しているため, A_1 は $15/1024$ ($73\text{mV} = 15 \div 1024 \times 5\text{V}$), A_2 は $50/1024$ (244mV) である。

2. 4. 5 実証実験結果

実装例 2 は, 実装例 1 の問題点の解決とアフォーダンスを考慮することによるユーザ
ビリティの向上を目標に開発された。この目標が達成されているかを確認するため以下の
評価実験を行った。

- 生体コマンドの成功率・誤動作回数の評価実験: この実験では, 安静, ガム噛み,
食事, 会話, 歩行そしてランニング時の生体コマンドの成功率 (認識率) と誤動
作回数を測定し, 実装例 1 に比べ成功率の改善が見られるか, ランニング時の固
定用器具の揺れによる不具合が解消されているか, 誤動作しないか, 生体コマン
ド数を 3 種類に増やしたことにより新たな問題が生じていないかなどを評価する。

- アフォーダンスの評価実験：実装例2の外見から、その用途、装着方法、そして操作方法が分かるか否か評価する。

はじめに、生体コマンドの成功率・誤動作回数の評価実験結果を示す。本実験は以下のシチュエーションで行った。なお括弧内は、ユーザが生体コマンドを行った頻度・回数を表す。ここで1回とは、再生/停止・曲飛ばし・曲戻しを1回ずつ行ったことを示す。被験者は、30歳代の男性1名である。

- 友達との会話（30秒おきに話しながら1回・106回）
- ガム噛み（10回おきに1回・147回）
- スパゲティ、サラダ、そしてティラミスを食べる（口に食べ物を含んですぐに噛みながら1回・100回）
- 歩行（ランダムに1回・114回）
- ランニング（ランダムに1回・121回）
- 安静時に生体コマンドのみ行う（ランダムに1回・125回）

結果を表2.4に示す。表2.4の成功率は、ユーザが意図して行った生体コマンド回数に対して何回機器制御が成功したかを示す。誤動作回数は、実験中にユーザが生体コマンドを行っていないにもかかわらず、生体コマンドがあったものとして機器動作が行われた回数を示す。ガム噛み、歩行、食事時の成功率は100%、会話時は94.2%と良好な結果がでた。また、ランニング時も、左右それぞれの瞬き（生体コマンド）の成功率は、左の瞬きが92.6%、右の瞬きが83.5%と、ランニングによる振動による影響を小さく抑えている。しかし、ランニング時の両目で瞬きをする生体コマンドでは、成功率が43.5%と落ち込んだ。これは、ランニング時の左右両方の光学式距離センサ値が所定の変化を遂げたときのみ認識する生体コマンドであるため、片方ずつに比べ振動による影響がでたものである。さらに、両目をランニング中に強く閉じる動作にユーザが抵抗を感じたことも影響している。ランニング時は、両目で瞬きをする生体コマンドのうち、34%が右目の瞬き、21%が左目の瞬きの生体コマンドと誤認識し、1%がまったく認識できなかった。また、右目の瞬きの生体コマンドでは、14%が両目の生体コマンドと誤認識し、2%がまったく認識できなかった。左目の瞬きの生体コマンドでは、3%が両目の生体コマンドと誤認識し、1%が右目の瞬き、3%がまったく認識できなかった。表2.5に実装例1と実装例2の成功率の比較を行う。この表の実装例2の成功率は、両目で瞬きをする生体コマンドのものである。この生体コマンドは、実装例1の生体コマンド同様、右と左の両方の光学式距離センサの値が一定の変化が必要であるため、比較対

象としては妥当である。表 2.5 の通り、すべての実験において、実装例 1 にくらべ実施例 2 の成功率は大幅に改善された。

次に誤動作について述べる。実装例 2 では、会話時のあくびにより、左右それぞれの瞬きの生体コマンドとして誤動作が 1 回ずつ、会話時の笑いにより左の瞬きの生体コマンドとして誤動作 1 回、食事の時の口をナプキンで拭く動作により右の瞬きの生体コマンドとして誤動作 1 回、ランニングにケーブルの揺れ（図 2.46）により光学式距離センサが揺れてしまい左の瞬きの生体コマンドとして誤動作 1 回発生しており、誤動作回数が実装例 1 よりも多くなっている。これは、実装例 1 では、生体コマンドに光学式距離センサの値の増加、安定、減少のパターンを採用しているのに対し、実装例 2 では、光学式距離センサの値の絶対値の増加のみを採用しており、表皮の動きや光学式距離センサの揺れがたまたま生体コマンドの条件を満たす可能性が実装例 1 に比べて高いからである。

Table 2.4 Demonstrative experiment results

Success Raito: Indicates the number of time the user's intentional movements of temple that have succeeded in manipulation of the machine.

Number of Times of Malfunctioning: Indicates the number of time the machine that has been manipulated whereas in fact the user has never manipulated it.

	Biocommand	Success Raito	Number of Times of Malfunctioning
Conversation	Both eyes	94.2%	0
	Right eye	100%	3
	Light eye	100%	1
Gum Chewing	Both eyes	100%	0
	Right eye	100%	0
	Light eye	100%	0
Diet	Both eyes	100%	0
	Right eye	100%	1
	Light eye	100%	0
Walling	Both eyes	100%	0
	Right eye	100%	0
	Light eye	100%	0
Running	Both eyes	43.5%	0
	Right eye	83.5%	0
	Light eye	92.6%	0
While At Rest	Both eyes	100%	0
	Right eye	100%	0
	Light eye	100%	0

Table 2.5 Demonstrative experiment results of each prototype

Success Raito: Indicates the number of time the user's intentional movements of temple that have succeeded in manipulation of the machine.

	First prototype	Second prototype
Conversation	63%	94%
Gum Chewing	68%	100%
Diet	55%	100%
Walling	70%	100%
Running	24%	43%
While At Rest	70%	100%

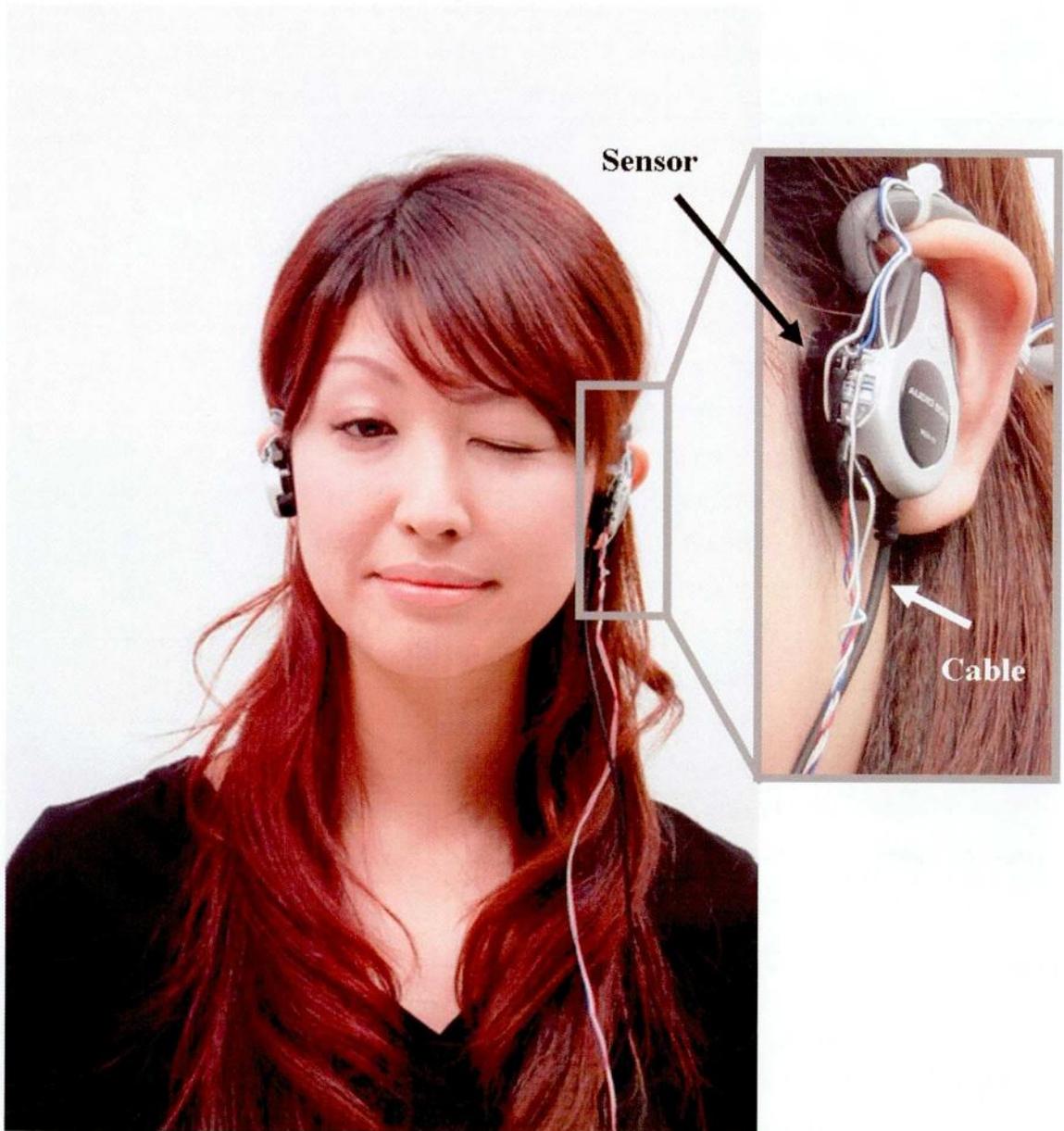


Fig. 2.46 Relationship of shake of cable to shake of sensor

次に、実装例2についてアフォーダンスの評価実験を行った。本実験では、以下のよう
に被験者をA群とB群の2グループに分けて行った。

- 被験者A群：実装例2についてまったく予備知識がない被験者。
- 被験者B群：実装例2について、図2.50に示す取扱説明書を1ヶ月以上前に1度見せたことがある。ただし、このとき被験者には、後日本評価実験を行うことを伝えていない。

各被験者のグループの性別、年代、人数は以下の通りである。この被験者の中には実装例2の開発機関に属する人（本大学関係者）は含まれていない。

- 被験者A群：20代男性2名、30代の男性1名、30代の女性1名、40代の女性1名の5名の男女。
- 被験者B群：30代の男性3名、30代の女性1名、40代の男性1名の5名の男女。

評価実験は、各被験者と1対1の状態、被験者に実装例2（図2.43）の実物を手渡して、装着方法、用途、操作方法について質問した。質問内容は以下の（質問1）から（質問5）である。

<前置き>被験者に装置を触ってもらいながらよく見てもらう。

（質問1）これは何をやるものですか？

（質問2）装着してみてください。（被験者には実際に装置を装着してもらう）

（質問3）再生／一時停止を意味する一般的な記号（図2.47）を見せて、記号の意味が分かるかたずねる。意味が分かることを確認した後、図2.47の再生／一時停止を意味する一般的な記号を見せながら、その操作をする場合、どのように操作すればいいか、実際にしてもらう。ここで、質問者は、「再生／一時停止」といった操作の名称を口にしていない。

（質問4）曲飛ばし（図2.48）についても同様に質問する。

（質問5）曲戻し（図2.49）についても同様に質問する。

※質問3から5の正解者には、なぜ操作の方法が分かったのか質問する。さらに被験者B群には、以前見たことのある取扱説明書に示されていた操作方法を正確に覚えていたのか質問する。

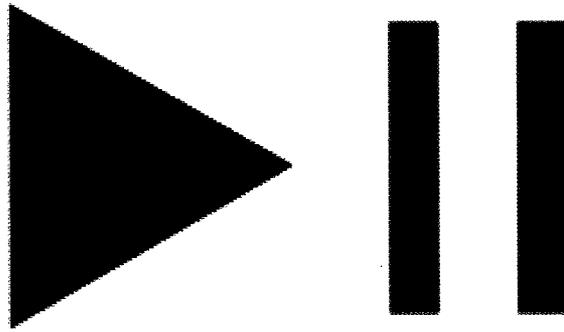


Fig. 2.47 Graphic symbol for question 3

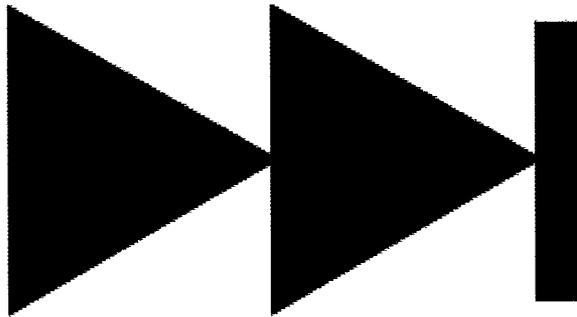


Fig. 2.48 Graphic symbol for question 4

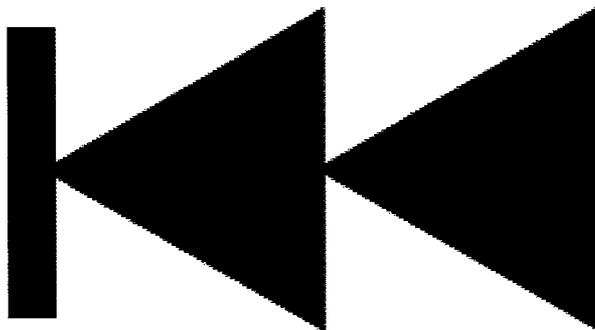


Fig. 2.49 Graphic symbol for question 5

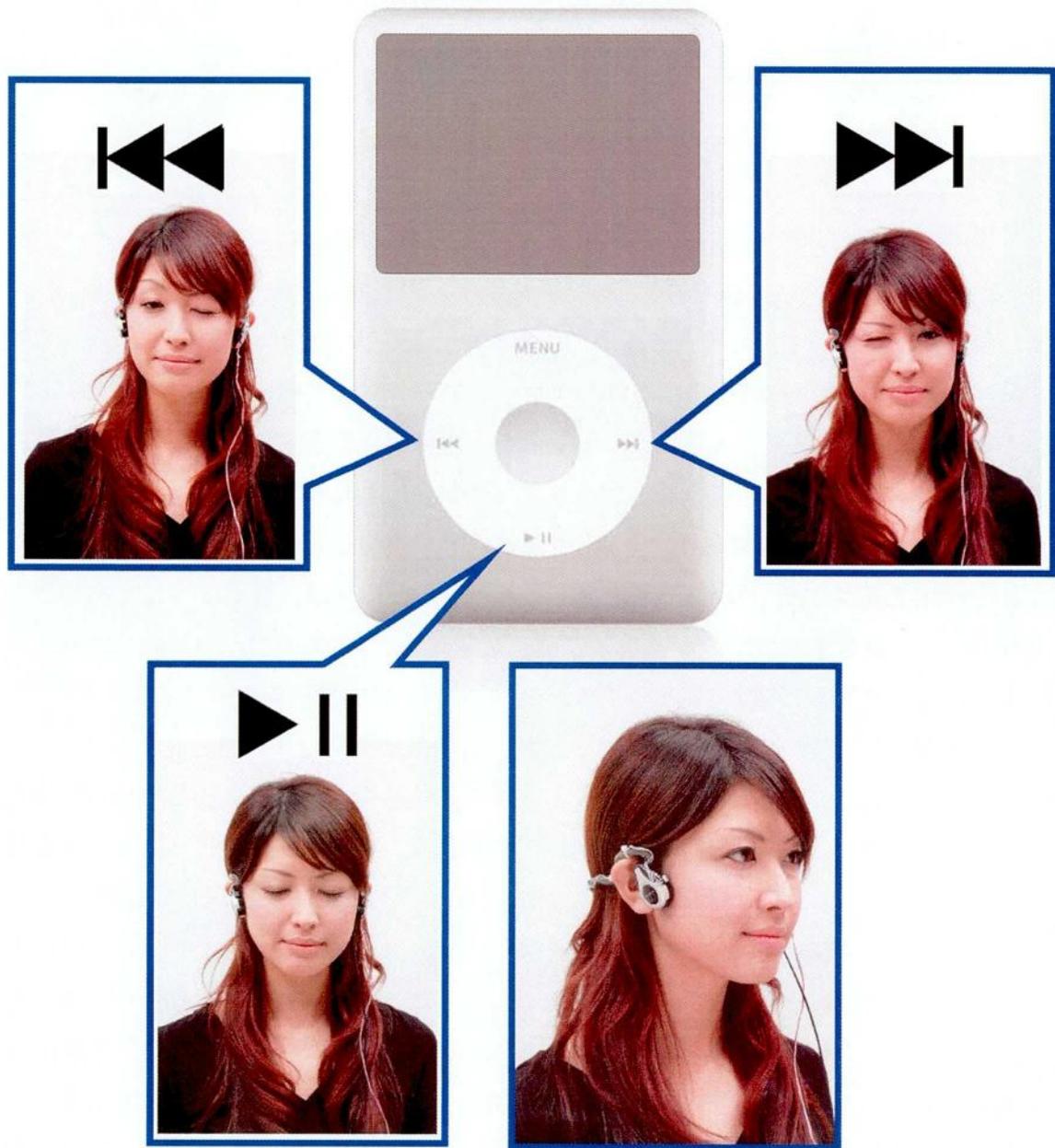


Fig.2.50 Instruction manual for KOMAKAMI switch

各質問の模範解答は以下の通りである。

(質問 1 の解答) 音楽を聴くための装置。

(質問 2 の解答) 図 2. 45 のように頭に装着する。

(質問 3 の解答) 図 2. 35 中央の図のように両目を閉じる

(質問 4 の解答) 図 2. 35 右の図のように右目を閉じるまたは右目のウイंकをする。

(質問 5 の解答) 図 2. 35 左の図のように左目を閉じるまたは左目のウイंकをする。

アフォーダンスの評価実験結果を表 2. 6 に示す。表 2. 6 に示すとおり用途 (質問 1) 及び装着方法 (質問 2) に関する質問の正解率は、被験者 A 群及び被験者 B 群ともに 100%であった。使用方法に関する質問 3 から 5 の正解率は、被験者 A 群が 20% (5 人中 1 人だけ正解)、被験者 B 群が 100%であった。質問 3 から 5 における被験者 A 群の正解者は、同一人物で 20 代の女性であり、アイコンにより操作方法を理解している。質問 3 から 5 における被験者 A 群の不正解者はみな携帯型音楽プレーヤーの上のアイコンを押して操作した。つまり、不正解をした A 群の被験者は、質問 3 では、携帯型音楽プレーヤーに表示されている再生/停止を意味する図 2. 37 のアイコンを、質問 4 では曲飛ばしを意味する図 2. 38 のアイコンを、質問 5 では曲戻しを意味する図 2. 39 のアイコンを押した。操作方法を間違えなかった B 群の被験者は全員、実装例 2 の操作方法を正確に記憶していたわけではなく、アイコンを見て操作方法を思い出して操作していた。以上のアフォーダンスの評価実験結果から、新しい操作方法を従来の機器に導入する場合、その機器にアイコンによるガイダンス機能をつけていたとしても、その機器に対する操作方法を事前に説明し、ユーザに操作方法が従来のものと違うことを意識させなければ、操作方法を間違える場合が多いことが分かった。また、ユーザに事前に操作方法について説明をしておけば、その操作方法を正確に記憶していなくても、アイコンを頼りに間違いなく操作ができることが分かった。本実験では、いかなる操作をしても音楽プレーヤーが動作しないように設定していた。これは、質問に対して被験者が行う操作を通して被験者が使用方法を習得することを防ぐためである。今後は、ユーザの操作に対応し動作するように設定した音楽プレーヤーを用いて、ユーザがアイコンをもとに試行錯誤することで機器の正しい操作方法を習得する可能性も評価したい。

Table 2.6 Correct answer ratio

	Group A	Group B
Question 1	100%	100%
Question 2	100%	100%
Question 3	20%	100%
Question 4	20%	100%
Question 5	20%	100%

2.4.6 実装例2のまとめ

実装例2として、実装例1の問題点をふまえ、アフォーダンスを考慮したウェアラブル型入力装置の構成手法を提案し、それを実装した。実装例2は、骨伝導ヘッドフォンに入力装置に組み込み、さらに携帯型音楽プレーヤーに操作方法を示すアイコン表示した。これにより装置の用途と装着方法をユーザに外見から理解させることができた。しかし、操作方法については、ユーザに事前の簡単な説明しておかなければ、アイコンにより操作方法を表示したとしても間違えてしまうことが分かった。また、事前に操作方法について説明をしておけば、その操作方法を正確に記憶していなくても、アイコンを頼りに操作できることが分かった。さらに、装着用器具の改良と生体コマンドの適切な選択により、誤動作回数は若干増えたものの、会話や食事、そしてランニング中の生体コマンドの成功率の大幅な改善を図ることができた。最後に実装例2は、ユーザビリティの向上や低消費電力化を図ることができた。

今後の課題として、ユーザが試行錯誤により操作方法を理解する過程を実験し、アイコンによる操作指示の有用性も評価したい。また、ユニバーサルデザインの観点から、目の悪い人への配慮が必要である。特に音楽プレーヤーのように聴覚を使う装置にこめかみスイッチを応用する場合、立体的なアイコンなどを用いた触覚による操作指示や音声ガイダンスを用いた音声による操作指示の検討が必要である。

2.5 まとめ

本章では、身体との物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアの基本構成「人 → システム A → システム B → 人」における「システム A」の構成手法とその実装について述べた。システム A としては、ウェアラブル型入力装置（愛称、こめかみスイッチ）を取り上げた。本章での研究成果を以下にまとめる。

- ウェアラブル型入出力装置について考察した。
- ウェアラブル型入力装置の構成手法を提案し、構成手法に沿って、嚙締め動作を機器操作に利用したウェアラブル型入力装置（実装例 1）を開発した。本装置はユーザが機器操作を目的として意図的に行う嚙締め動作（生体コマンド）によるこめかみの動きを光学式距離センサでセンシングし、その値をシングルチップマイクロコンピュータで処理して機器制御用の信号を生成する。この装置の特長は、ユーザが常時利用でき、日常の生活に支障をきたすことなく、ハンズフリーで使用でき、小型・軽量・安価で製造可能であり、機器制御を意図した動き以外の歩行や食事などの日常的な動作には反応しないことである。
- アフォーダンスを考慮したウェアラブル型入力装置の構成手法を提案し、その構成手法に沿って、瞬き動作を機器操作に利用したウェアラブル型入力装置（実装例 2）を開発した。本装置の生体コマンドは、両目で瞬きをする、右目のみ瞬きをする、左目のみ瞬きをすることである。アフォーダンスを考慮することで、ユーザは装置を見るだけで、用途と装着方法を理解できた。また、事前に操作方法について説明をしておけば、その操作方法を正確に記憶していなくても、アイコンを頼りに操作できることが分かった。さらに、実装例 2 は実装例 1 に比べ、会話、食事、歩行、ランニング時の生体コマンドの成功率（認識率）の改善も図れた。

第3章

メディカルロボット

本章では、身体との物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアの基本構成「人 → システムA → システムB → 人」における「システムB」の構成手法とその実装について述べる。システムBとしては、患者の体内に挿入した手術器具を操るメディカルロボットを取り上げる。本研究のメディカルロボットは、低侵襲治療で一般的な内視鏡外科手術に注目し、その手術を支援するための「内視鏡を把持・位置決めするロボット：内視鏡ロボット」を扱う。我々の開発した内視鏡ロボットは、医療用に開発した水圧駆動リニアアクチュエータを用いた6自由度パラレルメカニズムで構成されており、安価に製造できるため、内視鏡ロボットをディスプレイ医療機器として扱うことが可能である。また小さなワークスペースの中で稼動が可能でかつ内視鏡の操作のために大きなメカニズムを必要としないため、術者の作業を妨げないなどの特長を持つ。

3. 1 緒言

3. 1. 1 研究背景

内視鏡手術は、患者の腹部や胸部に開けられた数個の小さな穴からカメラ（内視鏡）と手術器具を挿入して外科的処置を行うものであり、開腹・開胸手術に比べ、痛みが少なく美容面や経済面でも優位なため、急速に普及している。内視鏡手術などの低侵襲型手術への期待は、CT や MRI をはじめとした画像診断技術の飛躍的な進歩もあり年々増加している。

内視鏡手術は、手術野の観察を肉眼ではなく内視鏡を通してモニタに映し出された画像を見て行うことに最も大きな特徴があり、内視鏡がいかに手術操作に適した視野を描出するかが手術を安全かつ円滑に行えるかを左右する重要な要素となる。通常、内視鏡の操作はカメラ助手が行う。内視鏡の操作は、単に手術に必要な部位に内視鏡を向けるだけではなく、手術操作に応じた最適な視野角度、遠近などを細かく調整する必要がある。カメラ助手は、術者の指示によって内視鏡を操作することもあるが、刻一刻と進む手術操作に合わせて内視鏡を動かすにはどうしてもカメラ助手自身が術者の意図をくみ取って自己の判断で内視鏡を操作する必要がある。そのためには内視鏡操作を行うカメラ助手にも、術者同様の内視鏡手術に対する熟練が求められる。ところが、実際には特殊技術である内視鏡手術に熟練した外科医は多くない。実際、カメラ助手が不慣れで的確な視野を確保できず手術の進行に支障をきたすことはまれではない。特に近年大腸癌や胃癌の手術などにも内視鏡手術が適応されるようになってきたが、こういった高度な内視鏡手術に熟練した外科医は非常に少ない。多くの外科医を教育し内視鏡手術に熟達させることが内視鏡手術を安全に行うための本来の解決策であることはもちろんであるが、手技が高度になるほど習熟に多くの経験が必要となる。例えば大腸癌に対する内視鏡手術の習熟には、約 40 例を指導医の下に経験することが必要とされる。

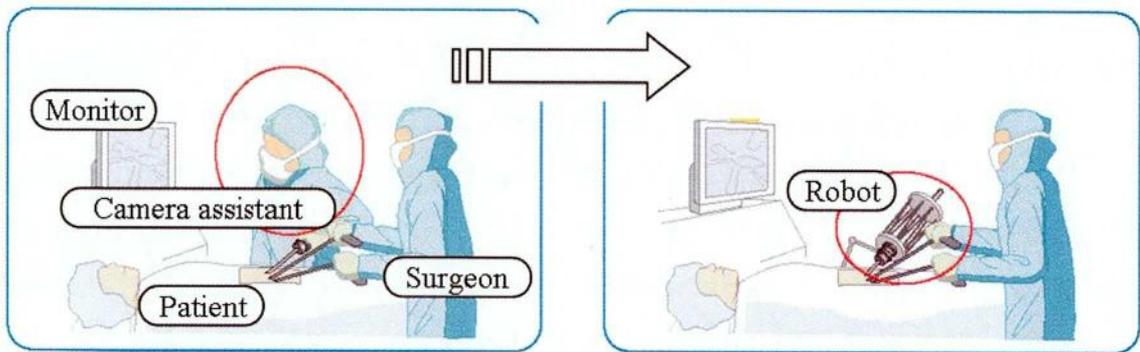


Fig.3.1 An example of robotic surgery. A robot manipulator, instead of the camera assistant, holds and positions the laparoscope

しかし、国内のほとんどの施設では内視鏡手術の適応となる大腸癌は多くない。1人の外科医を育てるために数年を要するのが現状である。そういった問題への解決策として、「人間のカメラ助手の代わりに内視鏡を把持・位置決めするロボット：内視鏡ロボット」（図3.1）の開発への要求がある。

内視鏡ロボットには、術者が自分の意図通りに内視鏡を自ら操作することで、快適かつ円滑に内視鏡手術を行うことが期待されている。また、地方病院や小規模病院においては医師不足を補うための手段としても期待されている。これまで報告されている内視鏡ロボットのうち、米国の旧 Computer Motion 社製 AESOP [III1] や英国の Prosurgeics 社製 EndoAssist [III2] などがすでに商品化されている。ところがこれらの既存の内視鏡ロボットには大きな問題点が二つある。一つは内視鏡ロボットを操作するヒューマンマシンインタフェース（術者インタフェース）の問題である。多くの場合、内視鏡ロボットの操縦にはフットスイッチやボイスコントロールが用いられるがこれらは円滑で細かな位置調整が難しく、また内視鏡ロボット操作が煩雑でロボットを操作する作業そのものが術者に負担となり疲労をまねくという問題が現場の臨床医から指摘されている。もう一つの問題は、内視鏡を直接動かすマニピュレータ部分の問題である。従来のものは、メンテナンスや清潔性の確保が煩雑であり、かつ大型なものや特殊な内視鏡を使用するなど一般の病院で受け入れられにくい面も持っている。特に大型のマニピュレータは、医療現場では敬遠される。最近では内視鏡手術は、癌手術や肥満に対するバイパス手術など高度な手技にも急激に広がっている。こういった複雑な手術ほど多くのポートから多数の鉗子を挿入して手術を行う必要がある。ところが大型の内視鏡ロボットを用いる

とその大きなマニピュレータが患者の上に覆い被さるように置かれる（図 3.2）ため自由に鉗子を挿入できなくなってしまう。以上のような問題点から、これらの内視鏡ロボットは腹腔鏡下胆嚢摘出術や腹腔鏡下卵巣嚢腫摘出術などの単純で簡単な手術には利用されているものの、腹腔鏡補助下幽門側胃切除術や腹腔鏡下低位前方切除術などの高度で時間のかかる手術にはほとんど用いられていない。こういった現状に対して、我々は術者への負担の少ない、細かな内視鏡の操作が可能な新しい術者インタフェース FFaceMOUSE [Ⅲ3, Ⅲ4] を開発した。FFaceMOUSE はビデオカメラで術者の顔の動きをとらえ、顔の動きから術者の内視鏡操作の意図を理解し、内視鏡を操作する。現在最も普及している AESOP と比べ微細な内視鏡の方向修正が可能であり、さらに AESOP のボイスコントロール機能による内視鏡の移動方向は上下左右と抜差ししかなかったが、本システムでは自由な角度に移動可能とした。このシステムによって、術者は従来のシステムと比べ疲労のない精密な内視鏡の操作が可能となった。ブタを用いた腹腔鏡下胆嚢摘出術（*in-vivo* 実験）において短時間に手術が完遂できることを証明するまで開発が進んでいる。我々は、次の研究フェーズとして一般的な内視鏡が使用可能で、小型・軽量・安価・高い清潔性・高い安全性を兼ね備えたマニピュレータの開発に取り掛かっている [Ⅲ5, Ⅲ6]。

本章では、我々が研究を進めている内視鏡ロボットのマニピュレータ部分の開発を実装例として、身体と物理的に接触を前提とするインタラクティブメディアの構成法について論じる。ここで内視鏡ロボットの術者インタフェースには、マニピュレータの評価を行いやすいジョイスティックインタフェースを用い、人間の助手が操作する。

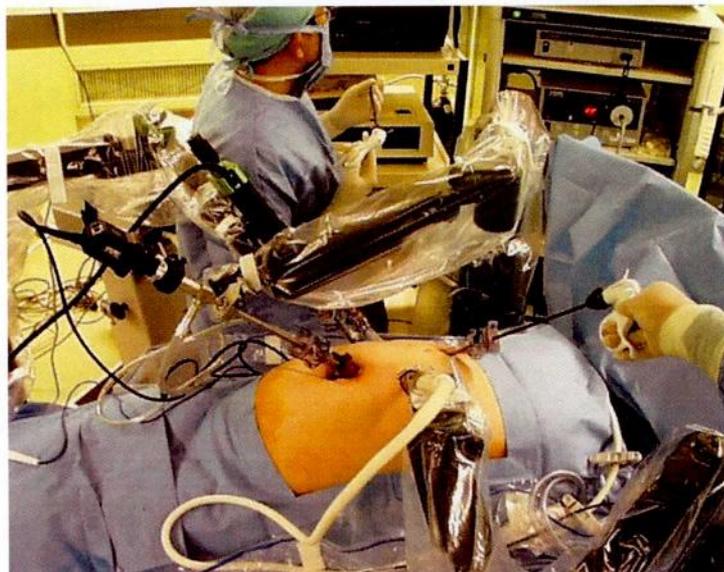


Fig.3.2 Traditional surgical robot (AESOP)

3.1.2 内視鏡ロボットのインタラクションループ

内視鏡ロボットのインタラクションループを図3.3に示す。内視鏡ロボットにおいて、マニピュレータ部が術者へ情報を発信するシステムBに相当し、患者の身体と内視鏡を介して物理的に接触している。またカメラ助手や術者インタフェースがシステムAに相当している。内視鏡ロボットのインタラクションループは、術者がカメラ助手や術者インタフェースに内視鏡の位置を指示し、その指示を受けて、カメラ助手や術者インタフェースによりマニピュレータが適切に制御され、患者の体内を映した内視鏡映像が術者に提供される。術者は、その映像をもとに、患者に必要な処置を施していく。術者は、このインタラクションループにより、人間の能力を超えた新しい目もしくは手を得ることができる。

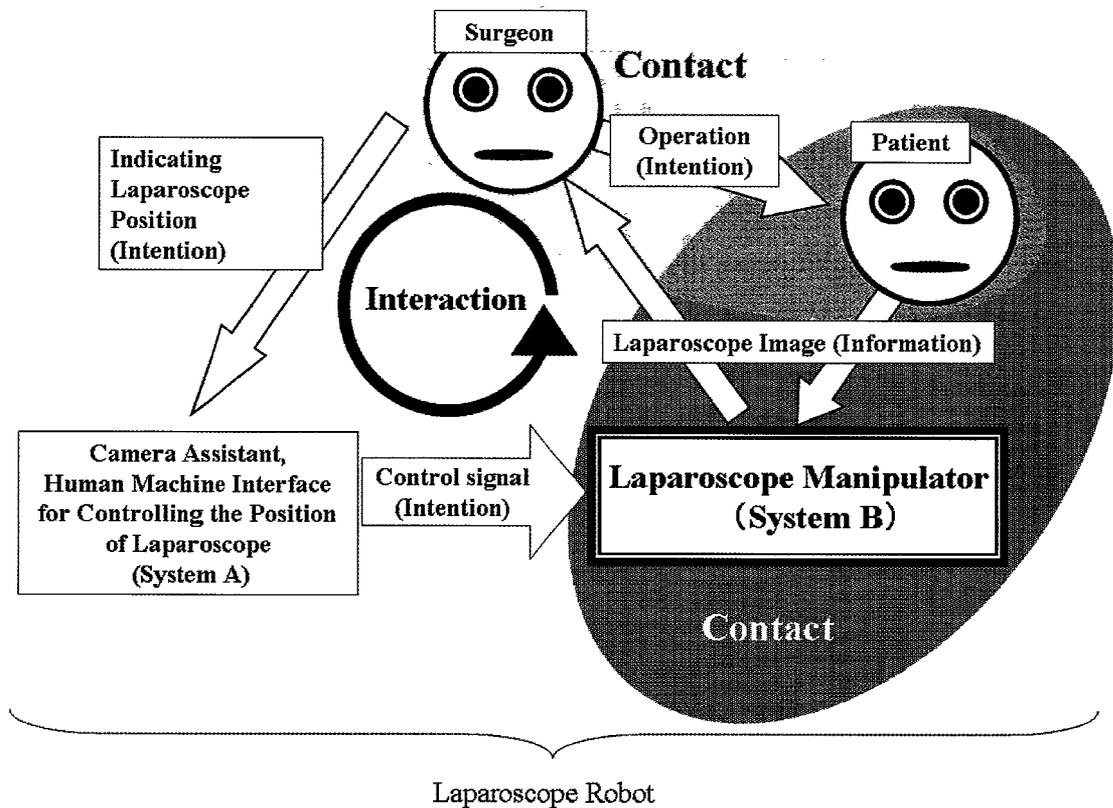


Fig.3.3 Interaction loop of Laparoscope robot

3. 1. 3 内視鏡ロボットの分類

医療現場は、「安全」「清潔」「使いやすい：使い慣れた一般的な内視鏡が使用可能、小型・軽量」な内視鏡ロボットを求めている。

市販や研究されている 19 種類の内視鏡ロボット: a) A460 CRS Plus [III7], b) AESOP [III1], c) LARS [III8], d) EndoAssist (Endosista) [III2], e) Staubli Rx60 [III9], f) ERM [III10], g) LapMan [III11], h) RES [III12], i) Naviot [III13], j) PASEO [III3], k) HISAR [III14], l) LER [III15], m) KaLAR [III16], n) FIPS [III17] o) Imag Trac [III18], p) Wide-Angle View Endoscope [III19], q) Dual-View Endoscopic System [III20], r) Automatic Tracking and Zooming System [III21], s) COVER [III5, III6] について調査検討を行った。「安全」はメディカルロボットとしてそれぞれ検討されているので、それ以外の「小型・軽量」「清潔」「使い慣れた一般的な内視鏡が使用可能」の項目に注目し各内視鏡ロボットを分類した結果を図 3.4 に示す。ここで、清潔とは、内視鏡ロボットのうち清潔野で使用するパートが滅菌洗浄可能であることとする。図 3.4 から分かるように現段階ですべての項目を満たす (GOAL に位置する) 内視鏡ロボットは存在しない。GOAL に近い内視鏡ロボットには、o)Imag Trac, p)Wide-Angle View Endoscope, q)Dual-View Endoscopic System, r) Automatic Tracking and Zooming System, l) LER, s)COVER がある。o)Imag Trac, p)Wide-Angle View Endoscope, q)Dual-View Endoscopic System は特殊な内視鏡を使用し, r) Automatic Tracking and Zooming System は 100 万画素 (一般的な画素が 40 万画素程度) もの高解像度 CCD カメラを使用するため、それぞれの基本設計を変更しなければ GOAL に達しない。よってもっとも GOAL に近い内視鏡ロボットは、l) LER と s)COVER である。ここで、l)LER は、マニピュレータを患者の内視鏡挿入孔付近にマウントし、かつ手術台に専用のベルトで固定するものである。内視鏡重量を含まない本体重量は、625 g と軽量である。しかしマニピュレータ動作に必要な占有空間が広いいため手術の邪魔になりやすい、また患部付近を広くロボット固定のための fixed base ring で覆うため鉗子の挿入を妨げる。一方 s) COVER は、手術現場でよく使用される斜視タイプの内視鏡 (斜視鏡) に対応した小型で軽量なマニピュレータである。内視鏡重量を含まない本体重量が 860g と軽量であり、かつ斜視鏡の光学特性を利用することでマニピュレータの動作による占有空間を小さくしている。しかし清潔について検討が必要である。次節にて以上の調査結果もふまえて医療現場のニーズを満たす内視鏡ロボットの構成手法について述べる。

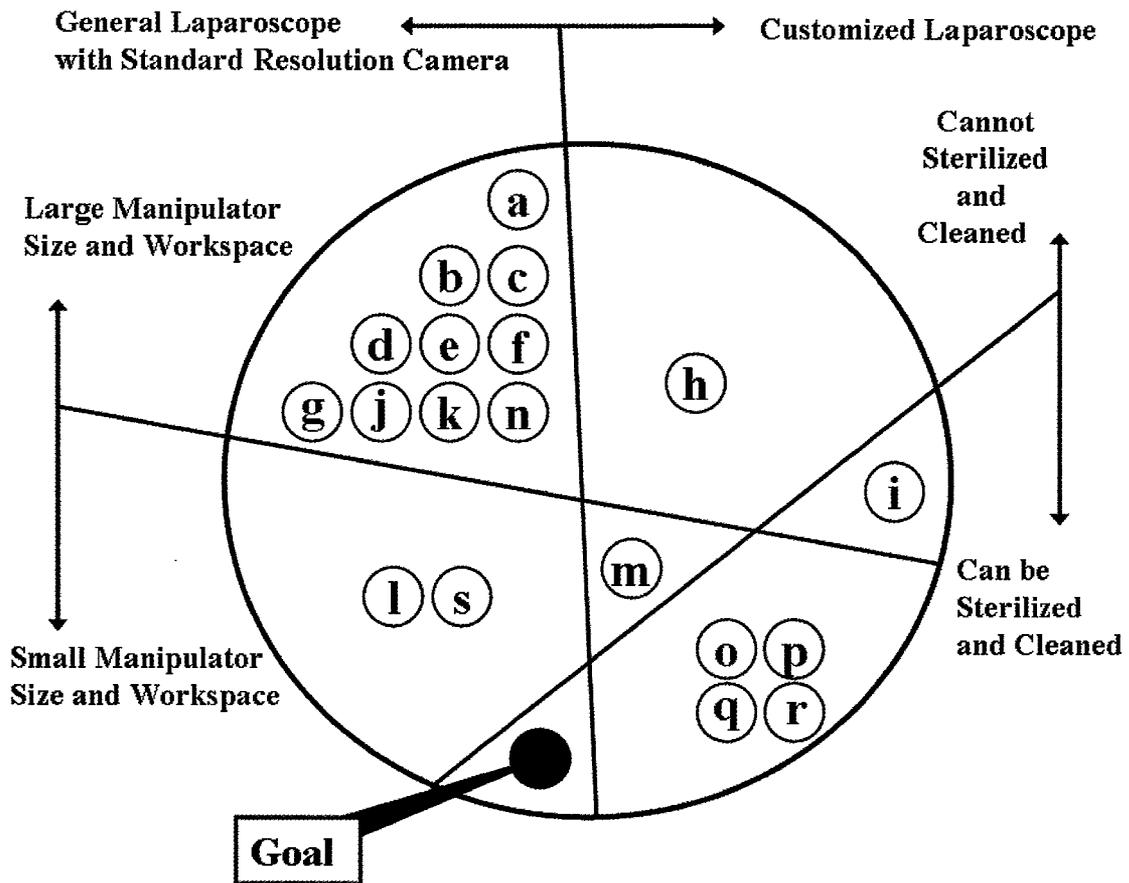


Fig.3.4 Investigation results of the laparoscope manipulators: a)A460 CRS Plus, b)AESOP, c)LARS, d)EndoAssist(Endosista), e)Staubli Rx60, f)ERM, g)LapMan, h)RES, i)Naviot, j)PASEO, k)HISAR, l)LER,m)5-DOFs Laparoscopic Assistant Robot(KaLAR), n)FIPS, o)Imag Trac, p)Wide-Angle View Endoscope, q)Dual-View Endoscopic System, r) Automatic Tracking and Zooming System, and s)COVER.

3.2 内視鏡ロボットの構成手法

内視鏡ロボットと産業用ロボットの要求仕様は大きく異なる。産業用ロボットは「高出力」、「高速」、「高精度」が重要視されるが、内視鏡ロボットは、人と物理的に接触するため「安全」と「清潔」が特に重要視されている。

本節では、内視鏡ロボットの構成を考えるうえで必要な要素を「必須項目」、「基盤項目」、そして「強化項目」に整理して提案する。ここで、必須項目とは、内視鏡ロボットであるための必要条件に当たり、基盤項目は内視鏡ロボットの基本コンセプトそのものであり、強化項目は内視鏡ロボットに付加的な機能を与える項目である。

3.2.1 必須項目

必須項目は、内視鏡操作に必要な自由度と医療機器としての安全性である。必須項目を満たさなければ内視鏡ロボットとはいえない。初めに自由度について述べる。術中の内視鏡操作は図 3.5 に示すとおり、抜き差しと内視鏡の挿入方向に対するロール、そして挿入孔を中心とするピッチとヨーであるので、内視鏡ロボットに必要な自由度は 4 自由度である。ここでロールは直視タイプの内視鏡（直視鏡）では画像の天地補正に用い、斜視タイプの内視鏡（斜視鏡）では臓器の裏などを回り込むように観察するとき用いる。しかしロールは、胆嚢摘出手術などの狭い術野を対象にした手術では必ずしも必要ではない。そのため、小型・軽量化を目指して開発されているロボットのなかには、手術対象部位を限定する条件のもと、ロールを除いた、ピッチ、ヨー、そして抜き差しの 3 自由度のロボット [III14] も開発されている。

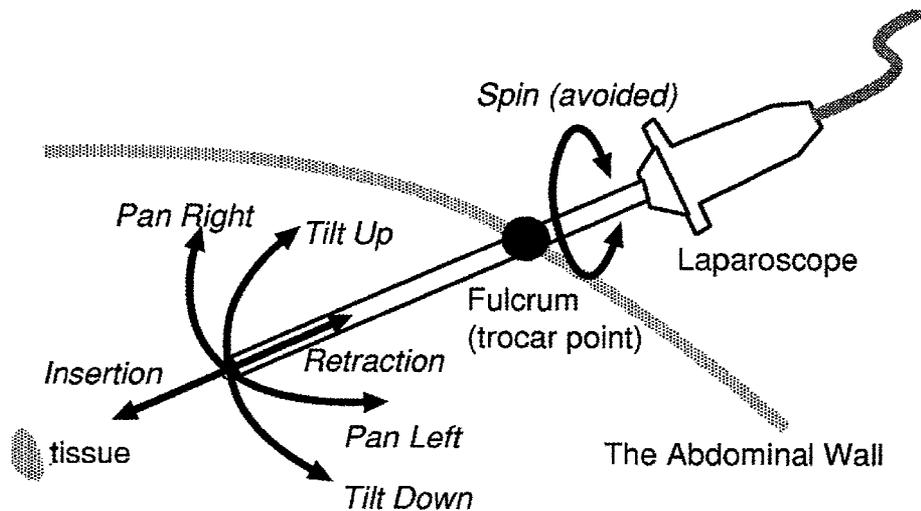


Fig.3.5 Four-DOF motions in general laparoscopic instruments

次に安全性について述べる。医療用ロボットの安全に関する提案としては、Levesonら [Ⅲ22] の「Therac-25 放射線事故」を教訓とした提案や Taylor による提案 [Ⅲ23]，そして、鎮西 [Ⅲ24] による解説などがある。また、佐久間ら [Ⅲ25] は「リスクアセスメントに基づく設計」の必要性を提案しており、我々はこれらも参考にしつつ、内視鏡ロボットの安全性の確保について以下の主張を持っている。

- 機構的な安全性を確保した上で、制御（ソフトウェア）による安全性を確保する。
- 安全装置は複数の独立したものをを用いる。
- 開発時のドキュメント作成・管理，テストの実施・検討・結果の管理を徹底する。製品においては、品質管理も徹底する。
- 緊急停止機能を複数備える。緊急停止装置の配置は、術者，ナースなどが迅速に緊急停止できる配置にする。
- 医療従事者が使用する環境を考慮してリスクアセスメントの検討を臨床医，医療従事者，医療機器メーカー，そしてエンジニアで連携して行う。関係学会の意見を重要に扱う。
- 内視鏡ロボットの故障による停止や暴走，地震をはじめとする自然災害などの環境の急激な変化に対し，術者が対応しやすいシステムとする。

研究フェーズが進み内視鏡ロボットの実用化を目指す場合，安全性に関する ISO，IEC などの国際規格および JIS，欧州，米国規格にも注目が必要である。

さて，現在研究開発されている内視鏡ロボットの安全性確保の方法にはどのようなものがあるのか以下に簡単にまとめておく。90年代に市販され，世界中で実績のある AESOP

は「ローリミット設定」と「コントロールディセイブル機能」の2種類の制御的な安全確保方法を採用している。ローリミット設定とは、ロボットアームが患者の体を押しつぶしてしまわないように、術前にあらかじめどこまでアームをさげてもよいのかアームの最低下降位置を設定しておき、術中はその位置よりもアームが下がらないよう、ソフトウェア的に制御することで安全性を確保する機能である。コントロールディセイブル機能は、患者の体が動いたとき、アームの動きにストレスが加わったとき、内視鏡の先端に何か当たったりアームの内視鏡取り付け部にせん断応力が加わり、内視鏡取り付け用のマグネット部がずれたり外れたりしたとき、アームの動きを止める制御をするものである。AESOPは、制御プログラムにより管理された安全性であり、機構的な安全性が確保されていないため、我々は十分に安全性が確保されているとは判断していない。次に国産初の製品化された内視鏡手術支援システム Naviot™ (日立製作所) [III13]の安全性の確保方法について述べる。機構的な安全性の確保として、「光学ズーム機構」、「5節リンク機構」「自由度の限定」を導入している。光学ズーム機構により、内視鏡の腹腔内深部方向へ直動動作がないため、臓器干渉のおそれがない。5節リンク機構は、駆動範囲が機構的に制限され、誤動作、誤操作時にも装置が大きく駆動することがなく、腹腔上部空間も確保され、術野の妨げにならない。自由度を限定し機構を単純化することにより、誤動作を起こしにくく、故障しにくい。制御的な安全性確保には「ステータスマニタ(状況監視)機能」を備えている。この機能は、術前の機能確認機能、術中に過負荷(患者および医療スタッフとロボットとの干渉など)を観測したときの緊急停止機能などを有している。さらに Naviot™は電気的な絶縁対策や緊急停止スイッチを一つ備えており、総合的に見て、安全性の高いロボットシステムであるといえる。他にも多くの内視鏡ロボットが研究開発されているが、圧力センサなどの値をソフトウェアで処理し制御的な安全性のみを確保しているもの、挿入孔周りの自由度のみを機構的に実現しているだけで安全性を確保していないものなど安全性の確保に不備のあるものもある。

3. 2. 2 基盤項目

基盤項目には、内視鏡ロボットのサイズ、清潔性の確保の方法、設置方法、使用する内視鏡の種類項目がある。これらの項目を決定することが内視鏡ロボットのコンセプトの決定につながる。基盤項目を変更することは、内視鏡ロボットの基本構造の変更につながる場合が多い。初めに、内視鏡ロボットのサイズについて述べる。日本では小型・軽量のロボットの開発が盛んである。小型・軽量な内視鏡ロボットには、設置がしやすい、清潔性が確保しやすい、手術の邪魔になりにくいなどのメリットがあるため、多忙で、煩雑な日本の医療現場では特にニーズが高い。欧米では、工業用ロボットを医療用に転用した大型ロボットが普及しているが、小型・軽量なものにもニーズがあると考えられている。次に、内視鏡ロボットの設置場所について述べる。設置場所には、手術台付近の手術室床、手術台付近の手術天井から吊り下げる、手術台、そして患者の腹部の4箇所がある。手術室床設置タイプと手術台設置タイプに関する研究が多い。患者腹部着用タイプの有用性も近年研究されはじめている。清潔性の確保の方法について述べる。内視鏡ロボットの清潔性確保の方法には、滅菌ドレープで内視鏡ロボットを覆う方法と内視鏡ロボットの清潔野内で使用する機構のみを滅菌する方法がある。欧米で研究開発されている内視鏡ロボットは前者、日本は後者が多い。最後に、使用する内視鏡の種類について述べる。内視鏡ロボットに使用されている内視鏡には、一般に市販されている内視鏡とその内視鏡ロボット専用開発された内視鏡とがある。我々は、前者が望ましいと考えている。それは、内視鏡メーカーが開発した経済的で高画質な医療現場に適した内視鏡をそのまま内視鏡ロボットに使用できるということは、清潔性、安全性、経済性、そして視野の安定確保の面から総合的に評価した場合、内視鏡ロボット専用開発したものに比べ優位だと考えられるからである。

3. 2. 3 強化項目

強化項目には、内視鏡ロボットの設置/再設置/撤去が容易にできる、可用性が高い、操作が簡単、内視鏡が術中に簡単に取り外せるなどがある。内視鏡ロボットの設置/再設置/撤去が容易であることは、安全性の向上にもつながる。なぜならば非常時には迅速に内視鏡ロボットを術野から撤去し、従来の開腹手術に移行できることが求められるからである。また、一般的に大型でかつ滅菌ドレープを必要とする内視鏡ロボットは、設置に時間を多く必要とする傾向があるため、内視鏡ロボットのサイズや清潔性の確保の方法も内視鏡ロボットの設置/再設置/撤去の容易性に影響を与える。内視鏡の先端のレンズは、出血やミスト、そして曇りにより術中に何度も洗浄する必要がある。内視鏡がロボットから術中に簡単に取り外せる機能は、視野の安定確保の面から重要なことである。内視鏡ロボットの操作性は、術者インタフェースにより左右される。術者が直接ロボットに指示を与える術者インタフェースは、直感的に操作でき、大掛かりな装置を用いることなく自由自在に内視鏡ロボットを操作できるものがよい。術者インタフェースについては、現在様々なものが研究開発されている。詳細は、術者インタフェース全般を解説した記事 [Ⅲ26] を参照されたい。

3.3 実装例1：

ディスポーザブル型内視鏡ロボット（初号機）

本節では、3.2節で述べた内視鏡ロボットの構成手法をもとに開発した内視鏡ロボットの設計コンセプトとその構造、そして評価実験結果について述べる。

3.3.1 設計コンセプト

我々は、内視鏡ロボットの構成手法の中でも特に「安全」、「清潔」、「使いやすさ」の3点に重点を置き内視鏡ロボットの開発を進めた。安全については、内視鏡ロボットが接している患者や医師に対し、内視鏡ロボットが危害を与える恐れのある力を加えようとした場合、機構的にその力を逃がす仕組みを備えることとした。また、基盤項目に相当する清潔と使いやすさについては、次の内容に定めた。

- 清潔野内で稼動する部分は、ディスポーザブル（使い捨て）とする。ディスポーザブルにすることで、「確実な清潔性」と「内視鏡ロボットの品質（安全）の保証」がなされる。（清潔）（安全）
- 内視鏡ロボットは、小型かつ軽量とする。（使いやすさ）
- 内視鏡ロボットの設置場所は、手術台とする。手術対象に応じて、手術台上で自在に内視鏡ロボットの位置を変更可能な機構を設ける。（使いやすさ）
- 一般的に市販されている内視鏡（直視鏡と斜視鏡）を操作することができる。（使いやすさ）

ここで、内視鏡ロボットのディスポーザブル化で最も重要な点は、内視鏡ロボットの経済性である。すなわち、ディスポーザブル内視鏡ロボットとは、低価格で製造可能な内視鏡ロボットを意味する。我々は、低価格な内視鏡ロボットの実現方法として、「内視鏡ロボットの制御装置については繰り返し使用し、清潔野で使用するマニピュレータ部を手術のたびに使い捨てる方式」を提案した。

3.3.2 ロボットの機構

我々の開発した内視鏡ロボットを図 3.6 に示す。このロボットはジョイスティックによる術者インタフェース部、コントローラ部（制御装置）、そしてディスポーザブルなマニピュレータ部で構成されている。ディスポーザブルパートは、図 3.7 のマニピュレータ部とアクチュエータに水や圧縮ガスを送るチューブそしてシリンダである。

我々は、基盤項目を実現する具体的な方法として、Stewart-Gough Platform (6 自由度パラレルメカニズム) [Ⅲ27, Ⅲ28] でマニピュレータ部を構成し、アクチュエータには、我々が特別に開発した滅菌可能なりニアアクチュエータ [Ⅲ29] を用いた。さて、我々の内視鏡ロボットでは、6 自由度の冗長自由度を採用しているが、これまで安全性の観点から最低限の自由度のほうがよいとの考えもあった。これは今までに開発された多くの内視鏡ロボットがシリアルメカニズムや平行リンクメカニズムを採用していたため、制御部の暴走がマニピュレータの思いもよらない運動につながると考えられていたからである。しかしながら、パラレルメカニズムは、万が一アクチュエータの一つが暴走した場合でも他のアクチュエータによりその動きを抑制することができるため、冗長自由度にすることはむしろ安全につながる。さらに、Stewart-Gough Platform は、多く研究者により工学的に様々な観点で研究がなされており、信頼性の高い機構である。我々は、安全性を重視して 6 自由度のパラレルメカニズム (Stewart-Gough Platform) を選択した。また、パラレルメカニズムは、人の腹部などの限られた狭い空間でツール（内視鏡など）を操作する場合、シリアルメカニズムに比べ、動作による占有空間が小さいうえ、機構も小型・軽量・シンプルにでき、低コスト化が図れる。

マニピュレータ部の各パラメータを以下に示す。これらのパラメータは、腹腔鏡下胆嚢摘出術の実施を目指して設定したものである。

- サイズ：ベースプレート半径 40.0 mm, エンドプレート半径 55.0 mm, 全アクチュエータ収縮時の高さ 207 mm
- 重量：約 350 g (この重量には内視鏡とカメラの重量は含まれていない)
- 内視鏡の動き：拔差し 70.0 mm, 傾き 20 deg
- アクチュエータの動作速度：最大 5.6 mm/sec

内視鏡の固定方法として、内視鏡を永久磁石でマニピュレータに固定する方式をとることによって、内視鏡の取り付け・取り外しがワンタッチで簡単に行え、術中に内視鏡のレンズ洗浄が迅速に行えるようにし、視野の安定確保の向上を図った (図 3.8)。

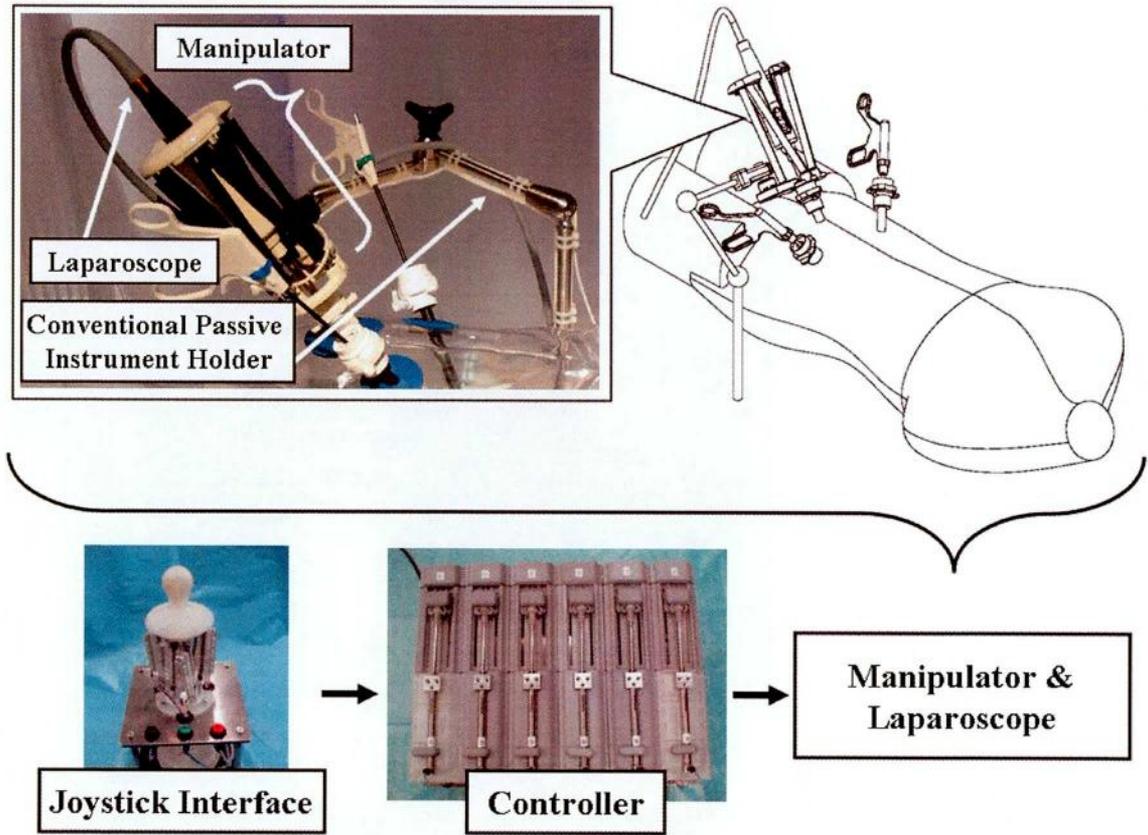


Fig.3.6 System configuration of first prototype

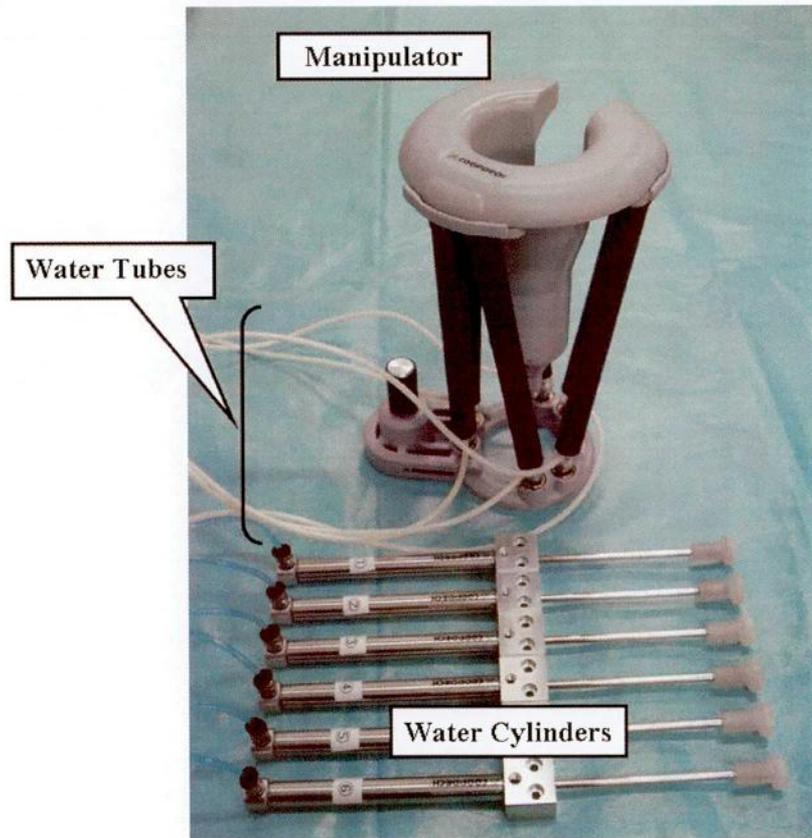


Fig.3.7 Disposable part of first prototype

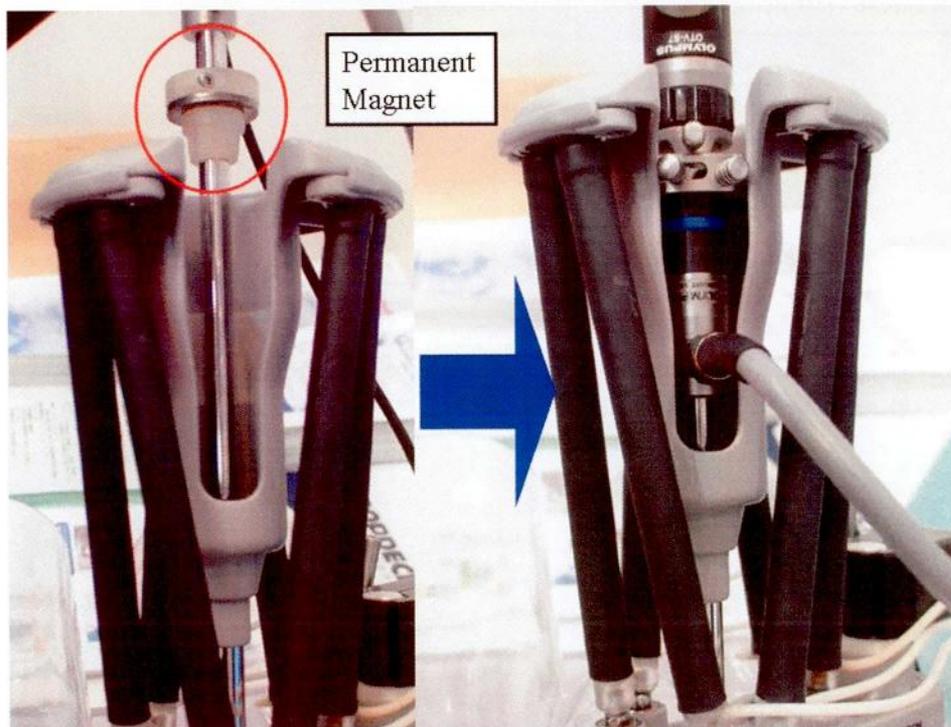


Fig.3.8 Endoscope installation part

本ロボットの術者インタフェースは、ジョイスティックインタフェースとした(図 3. 9)。全自動で内視鏡の位置決めをする自律型の術者インタフェース [Ⅲ30] や術者がロボットに指示を与え内視鏡の位置決めを行う非自律型インタフェース [Ⅲ3] と統合したシステムでは、システムの評価結果からマニピュレータ (システム B) のみを評価することが困難である。そのためマニピュレータの評価が最も行いやすい術者インタフェースとして、カメラ助手がロボットを操作するジョイスティックインタフェースを用いた。ジョイスティックインタフェースは、術者の観点からマニピュレータそのものの評価が行いやすいだけでなく、カメラ助手が清潔野から離れたところで操作可能であるため、カメラ助手の清潔性を確保する必要がないという利点もあるため、我々はジョイスティックインタフェースも有力な術者インタフェースの一つになりうると考えており、積極的に研究を進めている。ジョイスティックインタフェースは、パラレルメカニズムで構成されており、マニピュレータ部と幾何学的に同じ形状をしており、6本のリンクでパラレルメカニズムを構成している。ジョイスティックの各リンクにはスライダ式の抵抗器が備え付けられており、関節の長さを電気的な抵抗値 (電圧値) として観測することが可能である。コントローラは、ジョイスティックの各関節長さを電圧信号として受け、マニピュレータに備え付けられたアクチュエータの長さをマスタスレーブ方式で制御している。本ジョイスティックは、操作部の下に取り付けられたダイヤルを回すことでマニピュレータと内視鏡挿入孔との距離を入力することができ、マニピュレータが挿入孔に負荷を与えることのないピボット運動を実現する機能を有する。また、ジョイスティックは、操作部の左側に備え付けられた、ボタン1を押しているときのみ操作可能である。ボタン2は、マニピュレータを初期化するためのものである。各ボタンには、LED が内蔵されており、初期化処理や動作可能などのメッセージを使用者に表示する。

次に、我々が内視鏡ロボットのために開発した医療用水圧駆動リニアアクチュエータについて述べる。本アクチュエータは、ディスポーザブルであるため、医療現場で滅菌洗浄などの前処置をしなくてもそのまま清潔野内で使用可能である。また本アクチュエータは、チューブを通じて清潔野外に設置したシリンダやポンプから送られる水量によって駆動量を制御する方式をとるため、清潔野での漏電の可能性がなく安全である。我々の開発した水圧駆動リニアアクチュエータの外観を図 3. 10 に示す

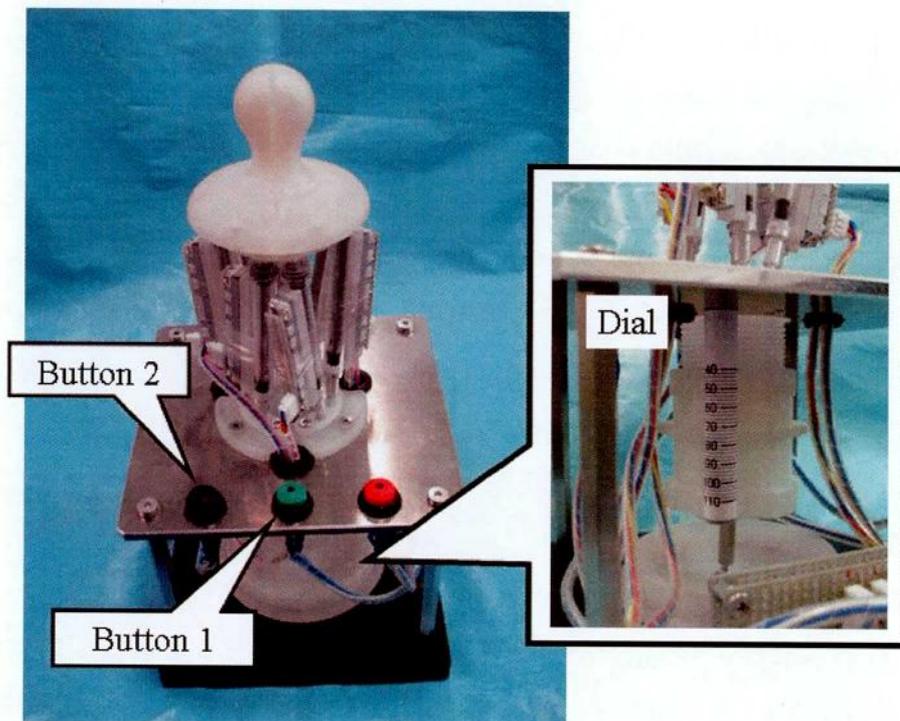


Fig.3.9 Joystick interface of first prototype

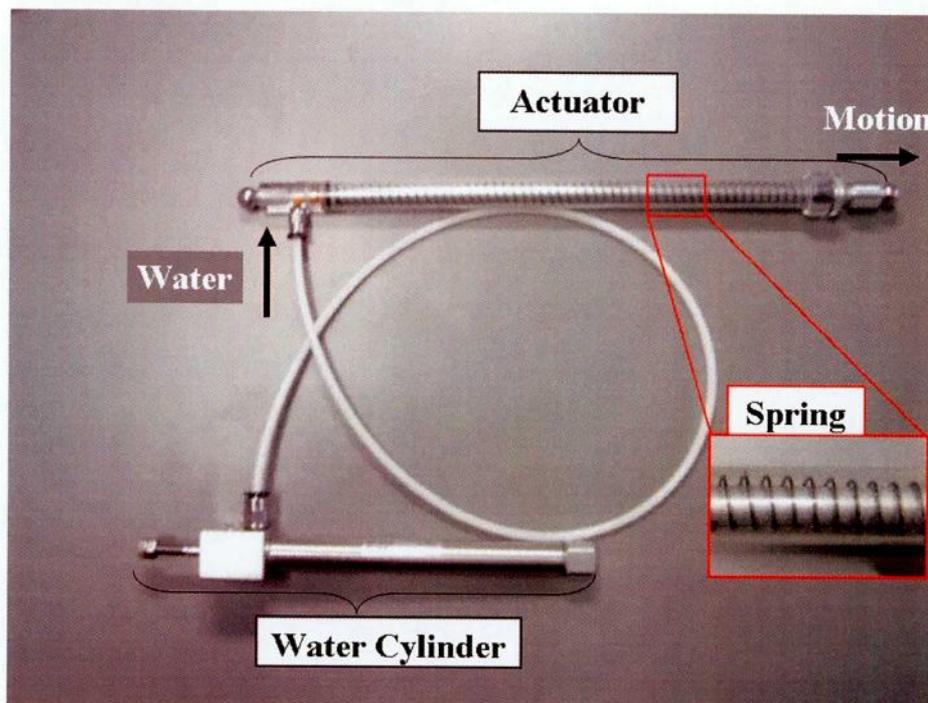


Fig.3.10 Hydraulic linear actuator of first prototype

アクチュエータの材料は、主にポリカーボネートを使用した。この材料は軽量・耐衝撃性・耐熱性・不燃性・通電性・透明度の高さといった点において、他の合成樹脂よりも優れている。水供給のためのチューブ用継手には、株式会社コガネイ社製クイック継手ミニタイプTS3-M3Mを用いた。本アクチュエータの材料は、すべてエチレンガス滅菌可能である。本アクチュエータは、数円程度の材料費で製作可能であるため、コスト面でもディスプレイ化が可能である。本アクチュエータの機構は、注射器の構造と似ているが、注射器の構造とは異なり、内蔵されたバネ（図3.10）により、アクチュエータを縮める方向に（注射器を押し込む方向）に力が常にかけている。このアクチュエータ内部は水で満たされており、伸長時の長さはアクチュエータ内の水量と水に含まれるガス量、そして外部からアクチュエータに加わる外力によって決まる。ここでアクチュエータ内のガスの体積が外力によって変化することに注意が必要である。アクチュエータ内のガス量が少ない場合、アクチュエータ長はその内部の水量によって決定できるため、製作時にアクチュエータ内のガス抜きを入念に行う必要がある。次にアクチュエータの動作方法について説明する。本アクチュエータは、水をアクチュエータ外部（金属製のウォータシリンダ）から内部に入れることで伸び方向に動く。また、縮み方向の動きには、アクチュエータ内部の水量を減らすとともにバネの反発力も利用して行う。バネの反発力を利用する理由は、アクチュエータ内部の水量を減らすと、アクチュエータの内部が負圧になり、そこに含まれるガスの体積が増えるため、アクチュエータの動きが鈍くなるからである。図3.11にアクチュエータ制御ユニットの概略図を、図3.12にアクチュエータ制御ユニットを6つ組み込んだマニピュレータのコントローラの外観を示す。アクチュエータ内部へ送り込む水量は、ステッピングモータを動力源とするネジ送り機構でウォータシリンダを制御して調整される。制御量は、ポテンシオメータを用いて観測している。

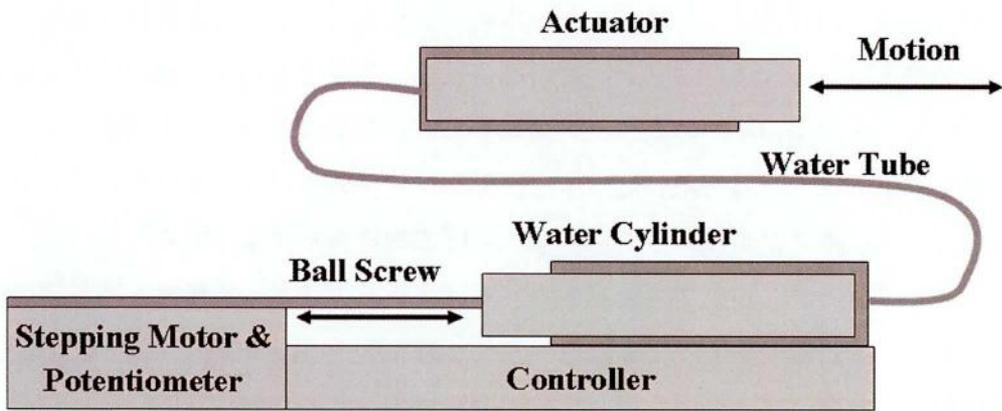


Fig.3.11 Mechanism of controller for the hydraulic linear actuator

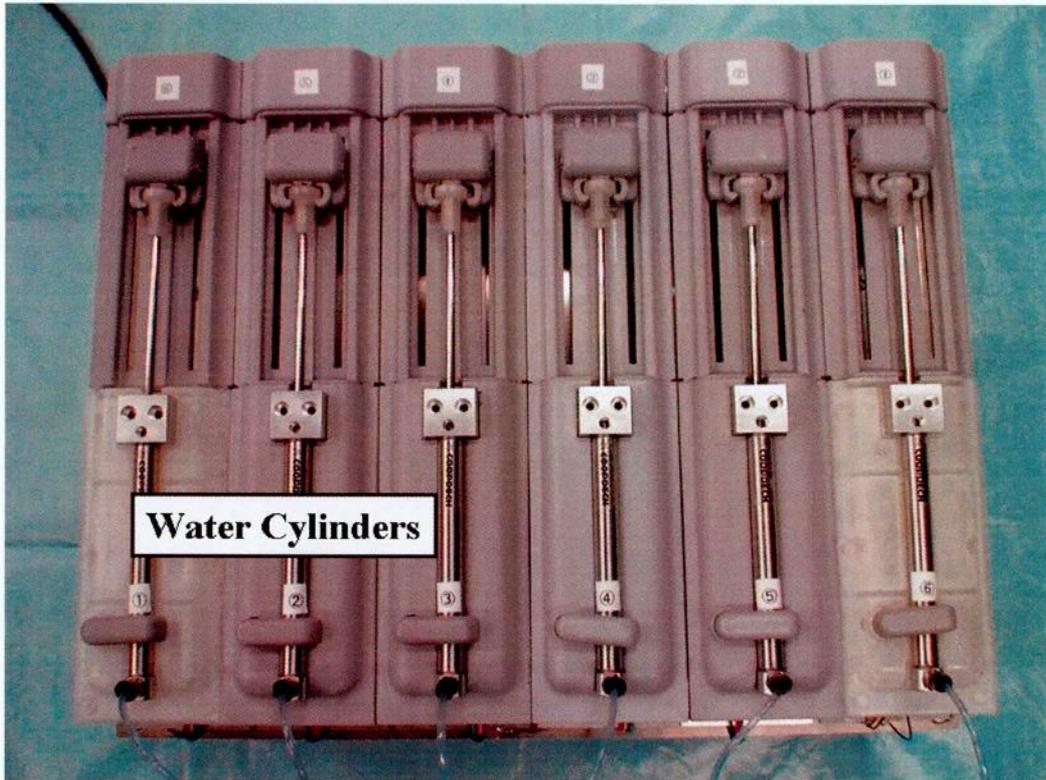


Fig.3.12 Controller for the manipulator of first prototype

本アクチュエータは、清潔性と安全性の観点から、破壊モードも設計に入れられている。ここで破壊モードとは、アクチュエータに過負荷がかかった場合に、どのようにアクチュエータが破壊するかである。破壊モードは次の順で進む。

1. パッキン（図 3.13）から少量ずつ水が漏れ出る。漏れてた水は、アクチュエータ内部にたまる。
2. 清潔野外のチューブ継手（図 3.10 のエアシリンダ側）からチューブが外れ、外部に水が漏れる。

以上の破壊モードはいずれも、アクチュエータから水が漏れ出ることによって内圧を減らし、アクチュエータの物理的な破壊を防いでいる。

3. アクチュエータに外力が加わり物理的な破損（アクチュエータ表面が割れるなどの破壊）を起こしたときに生じる水漏れや部品の飛び散りを防ぐ対策として、アクチュエータ表面に薄く柔軟な膜をコーティングした。

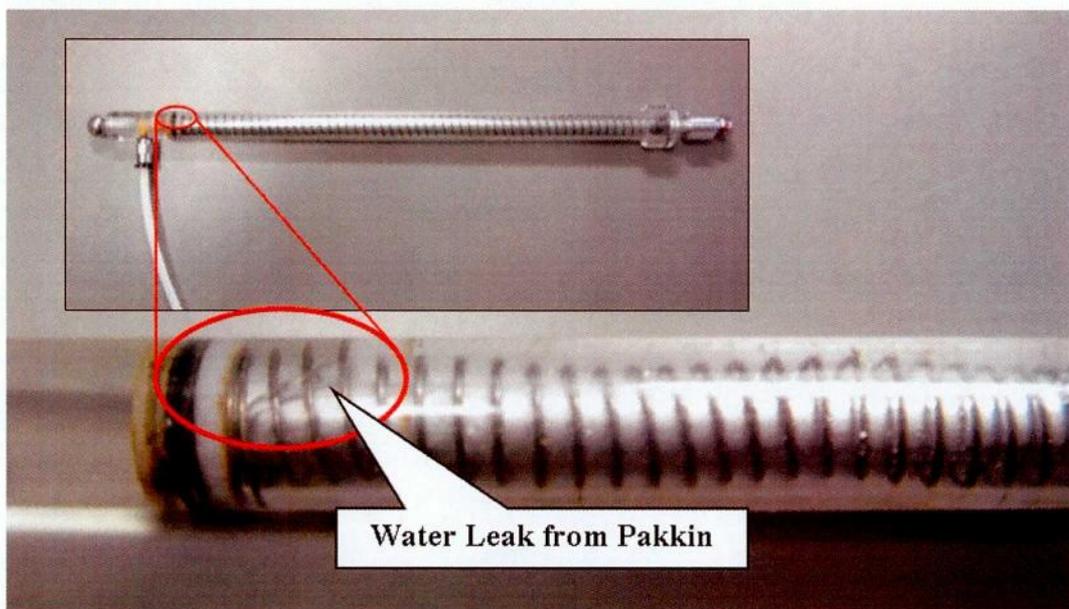


Fig. 3.13 Water leaking system

3. 3. 3 内視鏡ロボットの特長

本ロボットの特長は、安全性、清潔性、使いやすさである。3.3.2 節で述べたとおり、パラレルメカニズムは非常に安全性の高い機構である。また、前節で述べたとおりアクチュエータは清潔でかつ感電の問題もなく安全である。我々はさらに内視鏡ロボットの安全性を高める方法として、「ショックアブソーバ」を設けた。ショックアブソーバとして、マニピュレータのエンドプレートと各アクチュエータとの接続に永久磁石製の球面軸受けを用いた。これにより、内視鏡と臓器が干渉した場合やマニピュレータと医師が強く接触した場合に、エンドプレートからアクチュエータが外れ、それらのショックを吸収する（図 3.14）。マニピュレータは、6 自由度の冗長自由度を持つため、アクチュエータが最大 2 本外れたとしても、制御性は低下するが内視鏡操作に必要な 4 自由度を実現できる。ショックにより外れたアクチュエータは、永久磁石製の球面軸受けによりワンタッチで簡単にもとの位置に取り付けることが可能である。

我々は、内視鏡ロボットの清潔性確保の方法として、清潔野で使用するマニピュレータ部を中心としたディスポーザブルパート（図 3.7）を医療機器メーカーが滅菌処理した後、パッケージし出荷する方式を想定している。医療現場では清潔な環境下でディスポーザブルパートを開封して使用する。ディスポーザブルパートの滅菌処理は、アクチュエータの水を抜いた状態でエチレンオキサイドガス滅菌処理を行った後、清潔環境下でアクチュエータに清潔な水を封入する。しかし、滅菌処理後の清潔環境下での水の封入は煩雑になるため、現在は、アクチュエータに水を封入した状態でディスポーザブルパート全体を電子線滅菌する方法を検討している。

本マニピュレータは、重量約 350 g と非常に軽量で、さらに小型である。また、滅菌済みのディスポーザブルであるので、滅菌処理が術前に必要ない。以上の内容は、マニピュレータのセッティングを容易にするものでもある。本ロボットはさらにセッティングの容易性を高めるため設置方法として、内視鏡ロボット専用の設置台などを使用せず、外科医が使い慣れている一般的な腹腔鏡把持アームを用いて手術台に取り付ける方式とした。この方式は、内視鏡ロボットの設置/再設置がしやすいというメリットだけでなく、コスト面でも優位である。

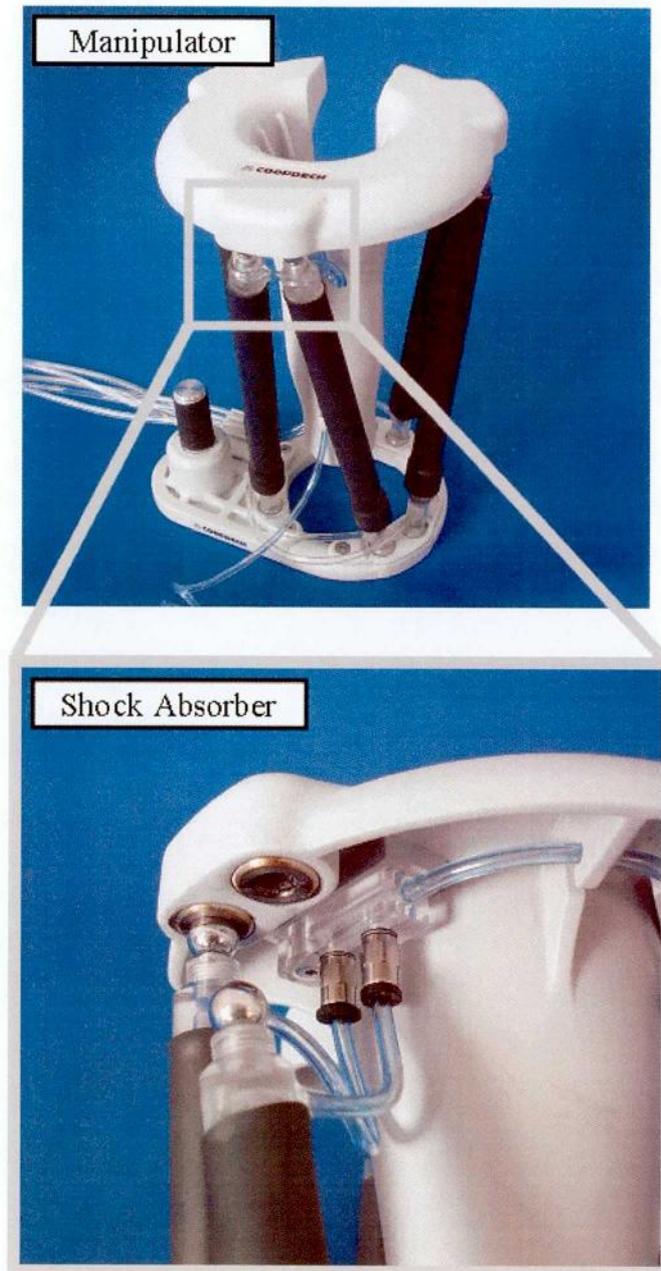


Fig. 3.14 Shock absorber

3. 3. 4 評価実験の結果と考察

内視鏡ロボットの開発は、欧米、イスラエル、韓国、そして日本で盛んに行われており、その評価実験には、ブタの腹腔鏡下胆嚢摘出術が一般的に行われている。この手技は、1時間程度の手術であり、内視鏡手術で最も手術件数の多い基本的な手技である。初号機では、ブタの臓器を使用した腹腔鏡下胆嚢摘出術シミュレーション (*in-vitro* 実験) を1回、ブタの腹腔鏡下胆嚢摘出術 (*in-vivo* 実験) を2回行いマニピュレータの有用性を評価した。

初めにブタの臓器を使用した腹腔鏡下胆嚢摘出術シミュレーションの結果を述べる。この実験は、ブタの臓器が人体の臓器と解剖学的に比較的類似した構造を持つため、ブタの臓器を用いて擬似的に *in-vivo* 環境を再現し、その環境下で肝臓から胆嚢を切除する腹腔鏡下胆嚢摘出手術を模擬した *in-vitro* 実験である。内視鏡の操作をカメラ助手が直接行った場合 (従来手法) と本ロボットを用いた場合 (提案手法) の2つのケースについて実験を行った。ここで提案手法では、従来手法でカメラ助手を担当した外科医がジョイスティックを用いてロボットを操作した。また、被験者はこのロボットを一度も使用したことがなかった2人の熟練外科医である。このシミュレーションは人の腹部を模擬したボックス内にブタの肝臓を配置して行った。実験の様子図 3.15 に、機器配置を図 3.16 に示す。この実験の目的は、内視鏡ロボットの視野範囲 (可動範囲)、占有空間の大きさを評価することである。具体的な評価内容を以下に挙げる。

- 従来手法と提案手法の実験中の内視鏡画像を比較し、提案手法の内視鏡画像が従来手法と同等の視野を提供できているか否かを評価する。提案手法では、従来手法の内視鏡画像と差異がないことを目指している。
- マニピュレータの占有空間が手術の邪魔にならないか否かを評価する。術者は内視鏡画像が映し出されるテレビモニタに注目して手術を行うため、万が一マニピュレータが大きく動き術者の手元と干渉する場合、術者が事前にそれを避けることが困難である。本実験では実験中のマニピュレータと術者の手元をビデオカメラで撮影し、干渉がないか確認する。また、実験後に術者へ、マニピュレータが邪魔にならなかったかをアンケートにより調査する。
- 従来手法と提案手法の手術時間を比較し、提案手法が従来手法に対して劣っていないかを評価する。またここでは手術の完成度も評価する。

初めに、従来手法と提案手法の実験中の内視鏡画像を比較する。胆嚢摘出手術は、胆

管処理, 胆嚢体部の剥離, 胆底処理の三つのフェーズに大きく分けることができるため, 図 3. 17 から図 3. 18 にそれぞれのフェーズにおける各実験中の内視鏡画像を示す. 左側が従来手法で右側が提案手法のものである. 図 3. 17 から図 3. 19 の内視鏡画像の比較から両者の内視鏡視野範囲に差がないことが確認できた.

術中にマニピュレータと術者の手元をカメラで撮影した結果と, 術後の術者へのアンケートから, マニピュレータが術中に術者の作業を妨げることがなかったことが確認できた.

提案手法による手術時間は 21 分 2 秒, 従来手法の時間は 22 分 69 秒であり, 両実験の手術時間に差異はなかった. また両実験とも問題なく安全に胆嚢を摘出することができ, 同等の完成度であった.

最後に, 手術の後にロボットに関して被験者 (術者とカメラ助手) へインタビューを行った結果, 人間のカメラ助手と比較してロボットが邪魔にならなかったこと, ロボットの性能が胆嚢摘出シミュレーションを行うにあたり十分であったことが分かった.

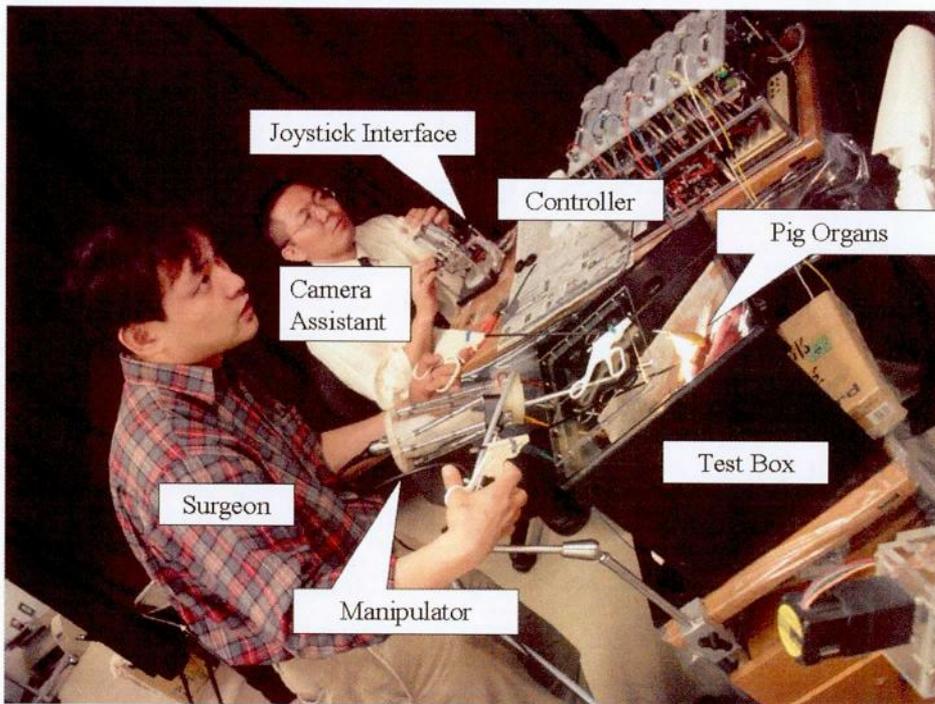


Fig.3.15 Overview of *in-vitro* experiment for first prototype

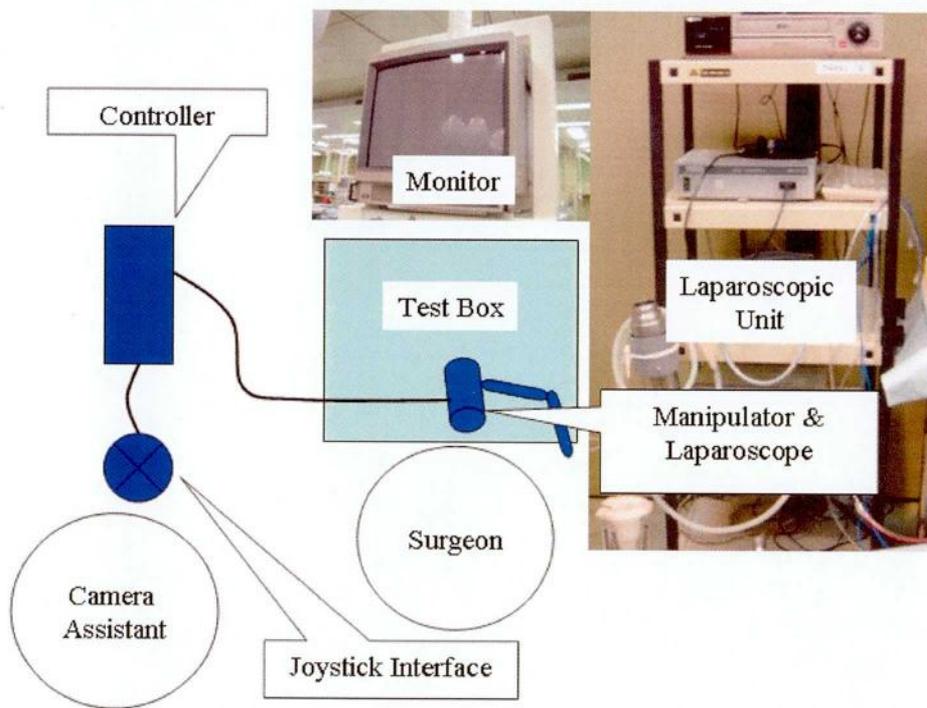


Fig.3.16 Setup of *in-vitro* experiment for first prototype



Fig.3.17 Laparoscopic image of the bile duct: The left picture is for a normal operation (the human camera assistant operates the laparoscope), and the right picture is for a robotic operation (the current prototype manipulator operates the laparoscope).

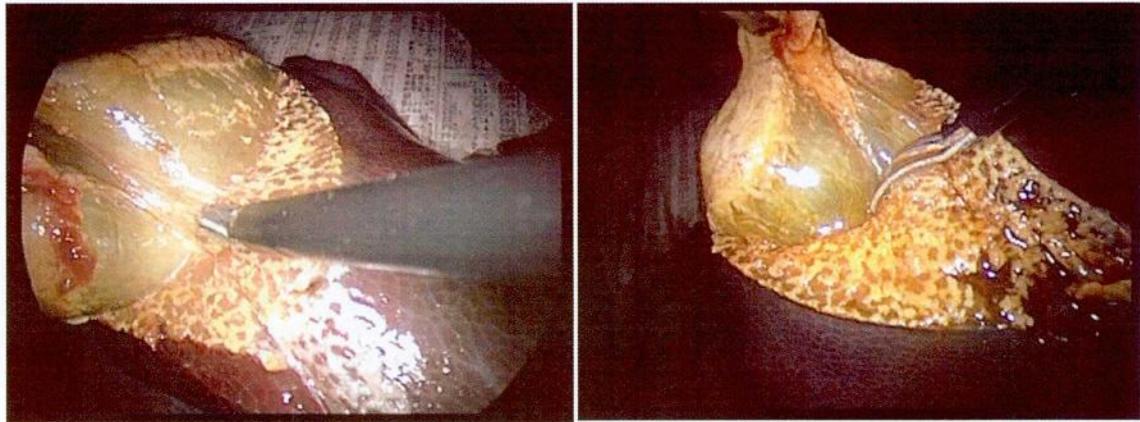


Fig.3.18 Laparoscopic image of the body of gallbladder. The left picture: normal operation, the right picture: robotic operation .

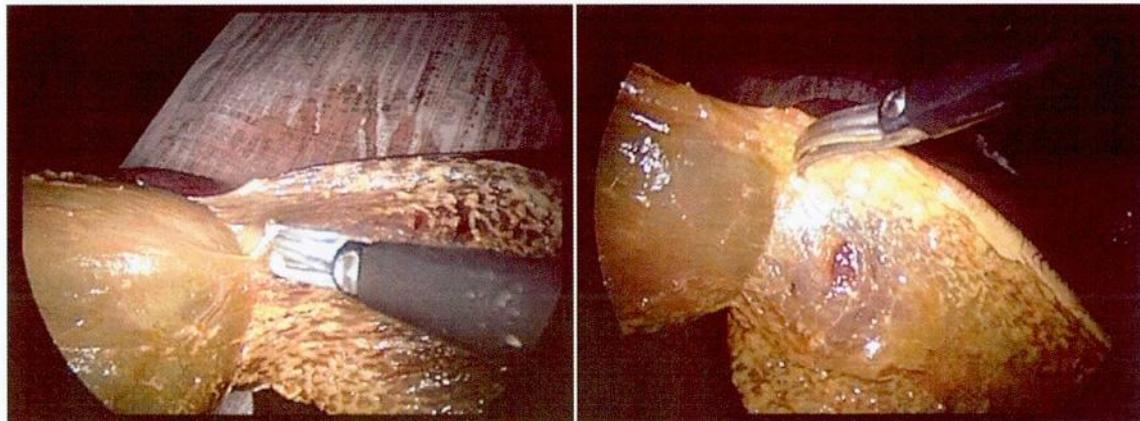


Fig.3.19 Laparoscopic image of the fundus of gallbladder. The left picture: normal operation, the right picture: robotic operation.

次に我々は、ブタを用いた腹腔鏡下胆嚢摘出術を2回行い、呼吸による揺れや出血などの生体特有の問題をふまえマニピュレータの有用性を評価した。1回目の実験は、タイコヘルステアジャパン株式会社の協力のもと、同社の動物実験倫理指針に則って、同社の保有する動物実験施設（静岡県富士宮市）にて適切な方法で行った。実験の様子を図3.20に、機器の配置を図3.21に示す。実験は麻酔をかけられたブタにトロッカをセットするところから開始し、胆嚢摘出、挿入孔の縫合までを行った。本システムを用いた術中のプロセスは、内視鏡の挿入から、視野範囲の調整、視野展開と胆嚢の摘出までである。手術は、術者1名、助手1名、そしてカメラ助手1名の3名で行った。鉗子を腹腔内に挿入した状態で作業を開始してから胆嚢を腹腔外に摘出するまで37分22秒要し、手術は無事に完遂した。*In-vivo*実験中の内視鏡画像を図3.22から図3.24に示す。図3.22は胆管切除、図3.23は胆嚢体部の剥離、図3.24は胆嚢底部を剥離しているときの内視鏡画像である。図3.22より胆管切除に必要な倍率と角度、そして視野範囲が提供されている。図3.23と図3.24により胆嚢剥離に必要な高倍率の画像が提供できていることがわかる。本実験では、胆嚢摘出術を行うために必要な視野範囲と拡大率が得られた。また本実験では、途中胆汁漏れを止める実験も行い、図3.25に示すとおり、処置に必要な視野を確保することができ、実験は成功した。

2回目の実験は、ジョンソンエンドジョンソン株式会社エチコン事業部の協力のもと、同社の動物実験倫理指針に則って、同社の保有する動物実験施設（福島県須賀川市）にて適切な方法で行った。実験の様子を図3.26に、機器の配置を図3.27に示す。実験の条件と流れは、1回目の実験と同様である。本手術は、鉗子を腹腔内に挿入した状態で作業を開始してから胆嚢を腹腔外に摘出するまで39分41秒要し、手術は無事に完遂した。*In-vivo*実験中の内視鏡画像を図3.28から図3.30に示す。2回目の手術も1回目と同様に胆嚢摘出術を行うために必要な視野範囲と拡大率を得ることができた。また本実験は、縫合作業も実験した。普通、胆嚢摘出手術では縫合を行うことがあまりないが、今回は胆汁漏れを止める方法として縫合を実験した。図3.31に示すとおり、処置に必要な視野を確保することができ、実験が成功した。2度の*In-vivo*実験はともに、生体を対象にしても問題が生じることなく、かつ術中にマニピュレータの再配置を行うことなく胆嚢摘出手術に必要な視野を得ることができた。また、動脈からの出血などの危険な合併症は発生しなかった。

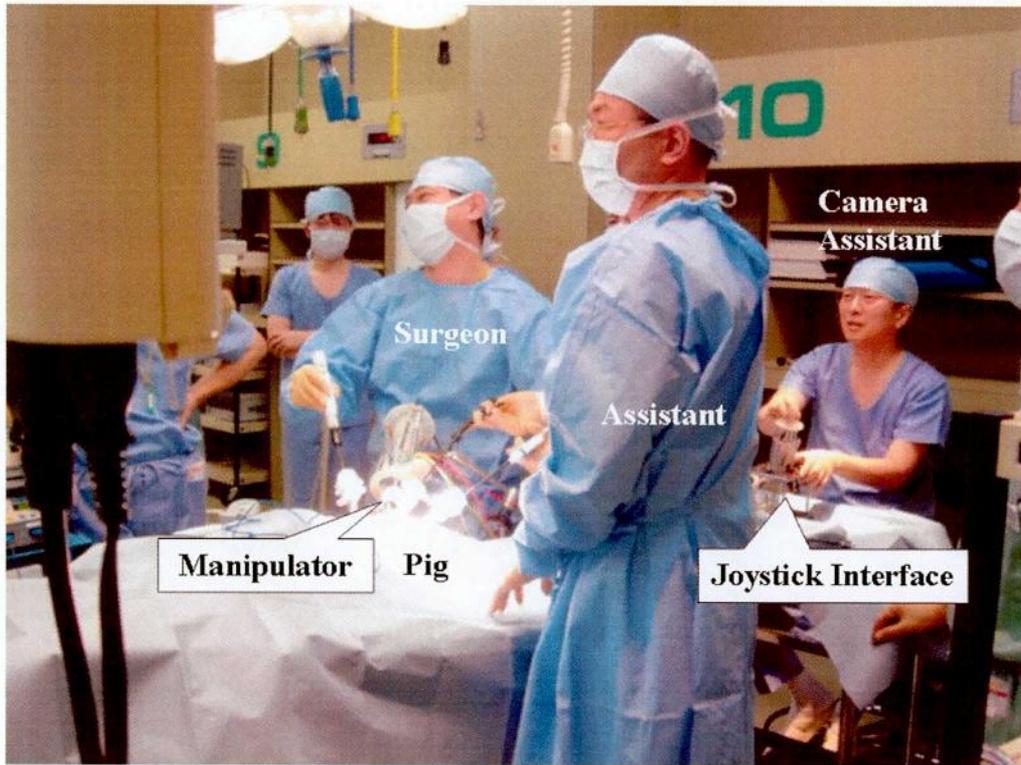


Fig.3.20 Overview of first *in-vivo* experiment for first prototype

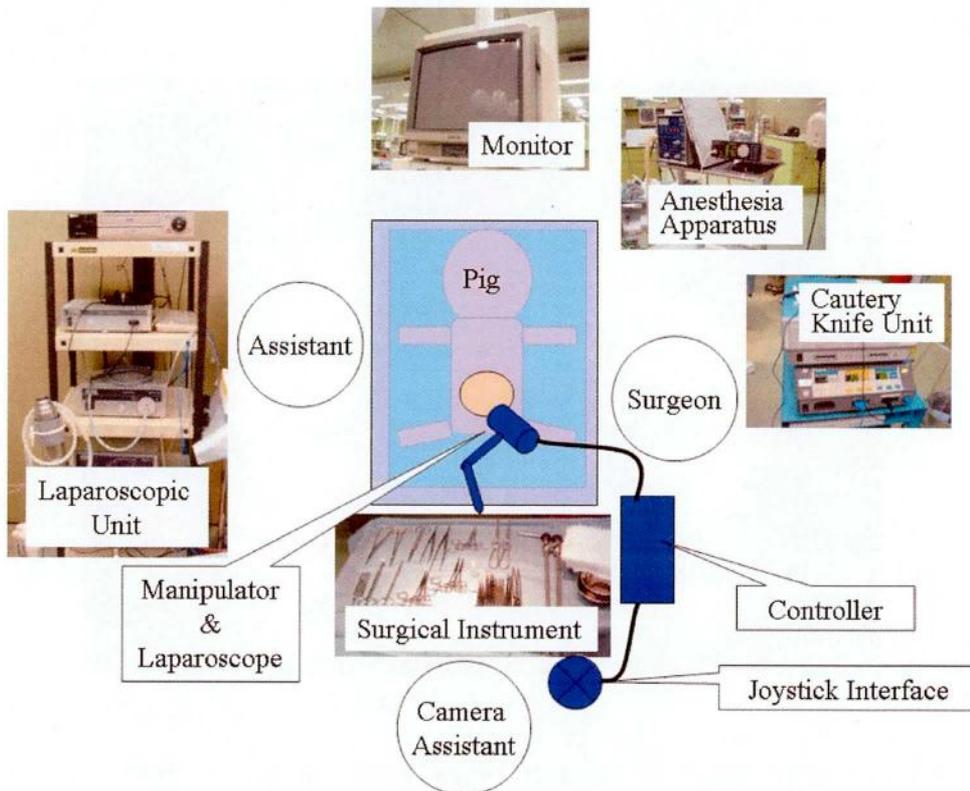


Fig.3.21 Setup of first *in-vivo* experiment for the first prototype

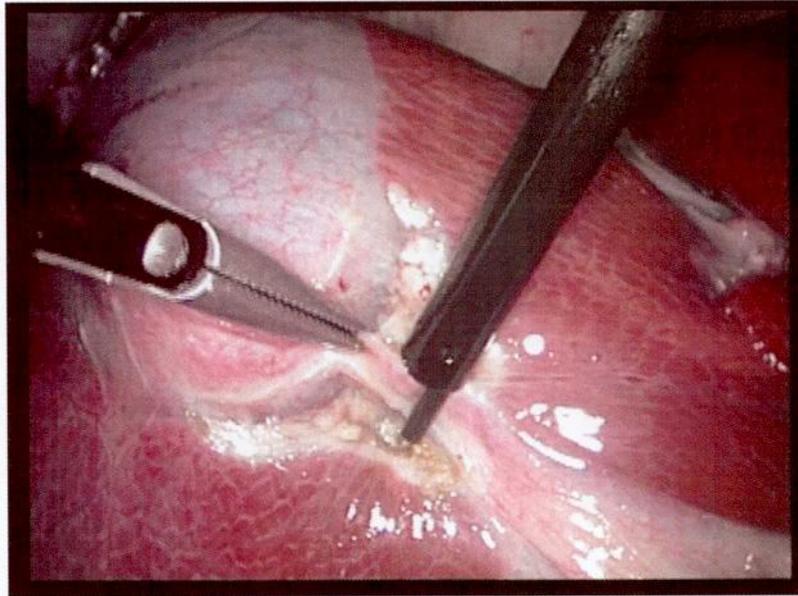


Fig.3.22 Laparoscopic image of the bile duct in first experiment for the first prototype

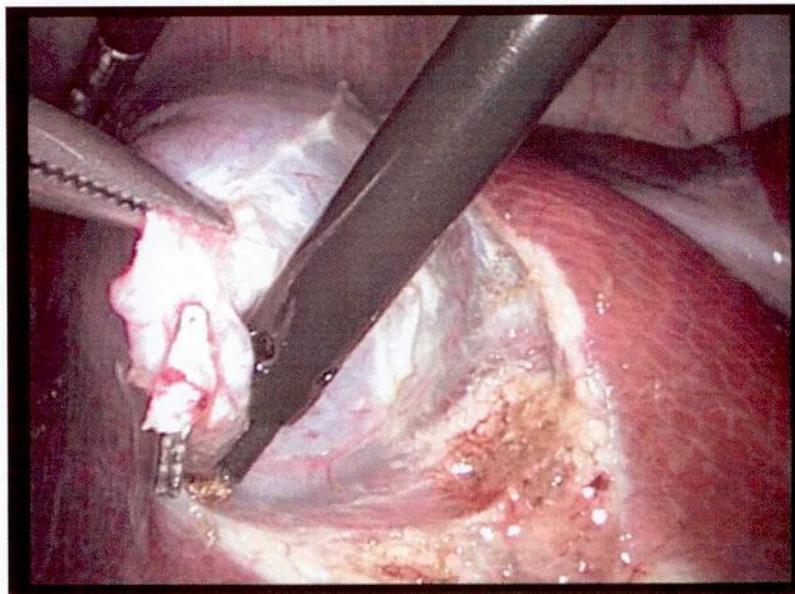


Fig.3.23 Laparoscopic image of the body of gallbladder in first experiment for the first prototype

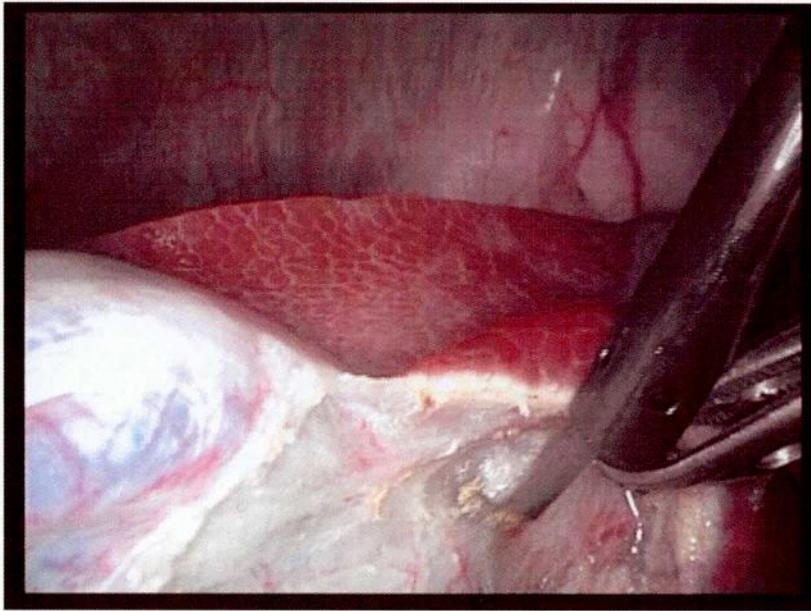


Fig.3.24 Laparoscopic image of the fundus of gallbladder in first experiment for the first prototype

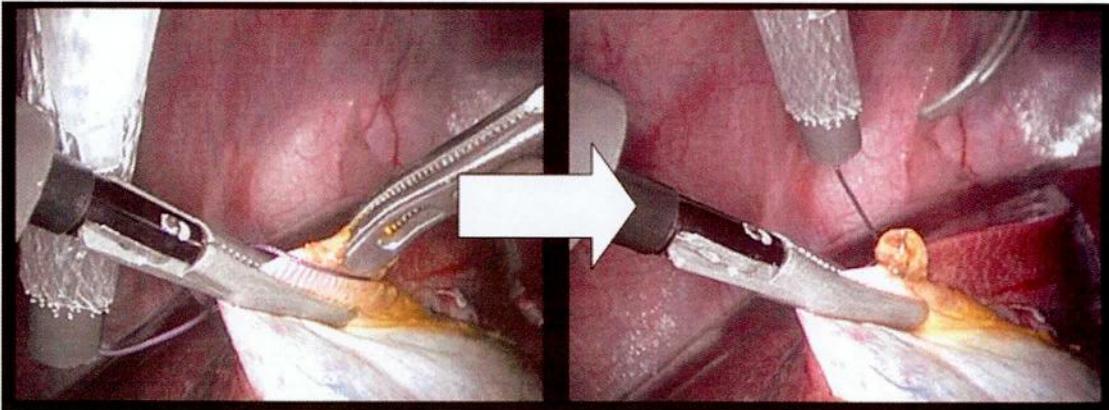


Fig.3.25 Laparoscopic image of an experiment that stopped bile leakage from the gallbladder

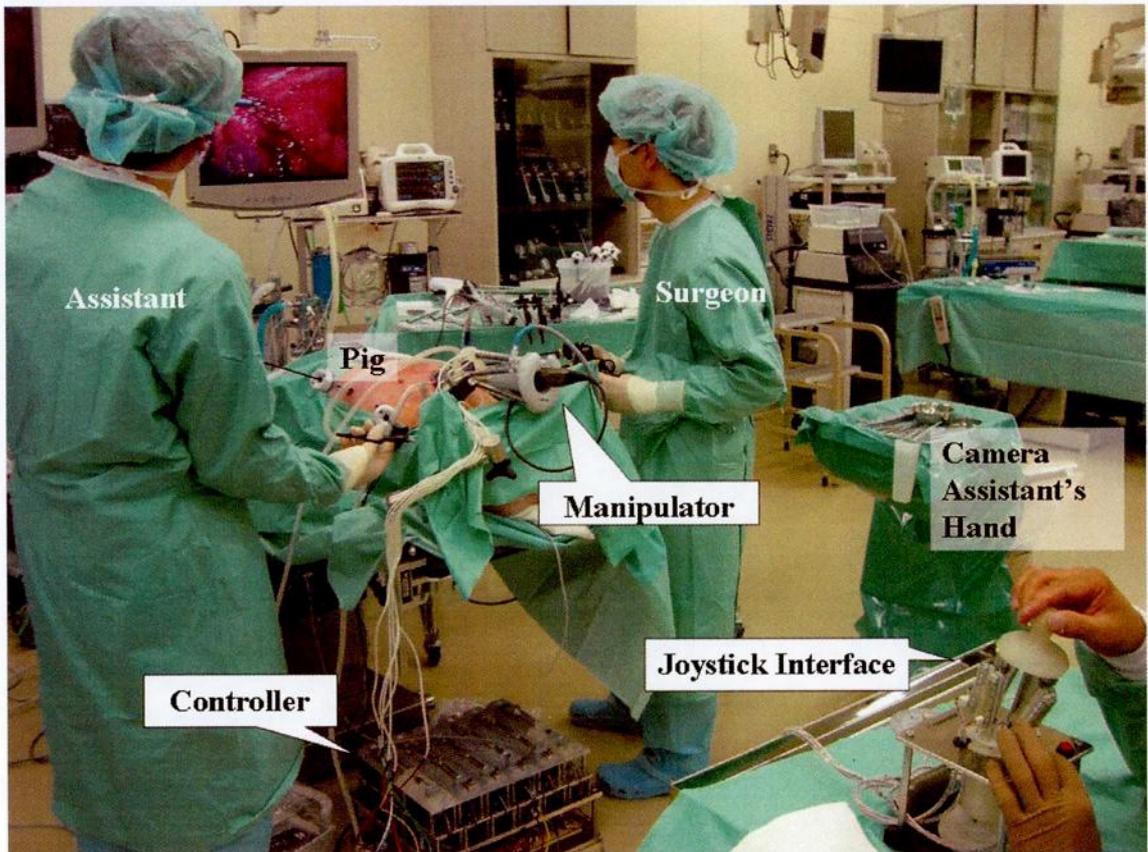


Fig.3.26 Overview of second *in-vivo* experiment for first prototype

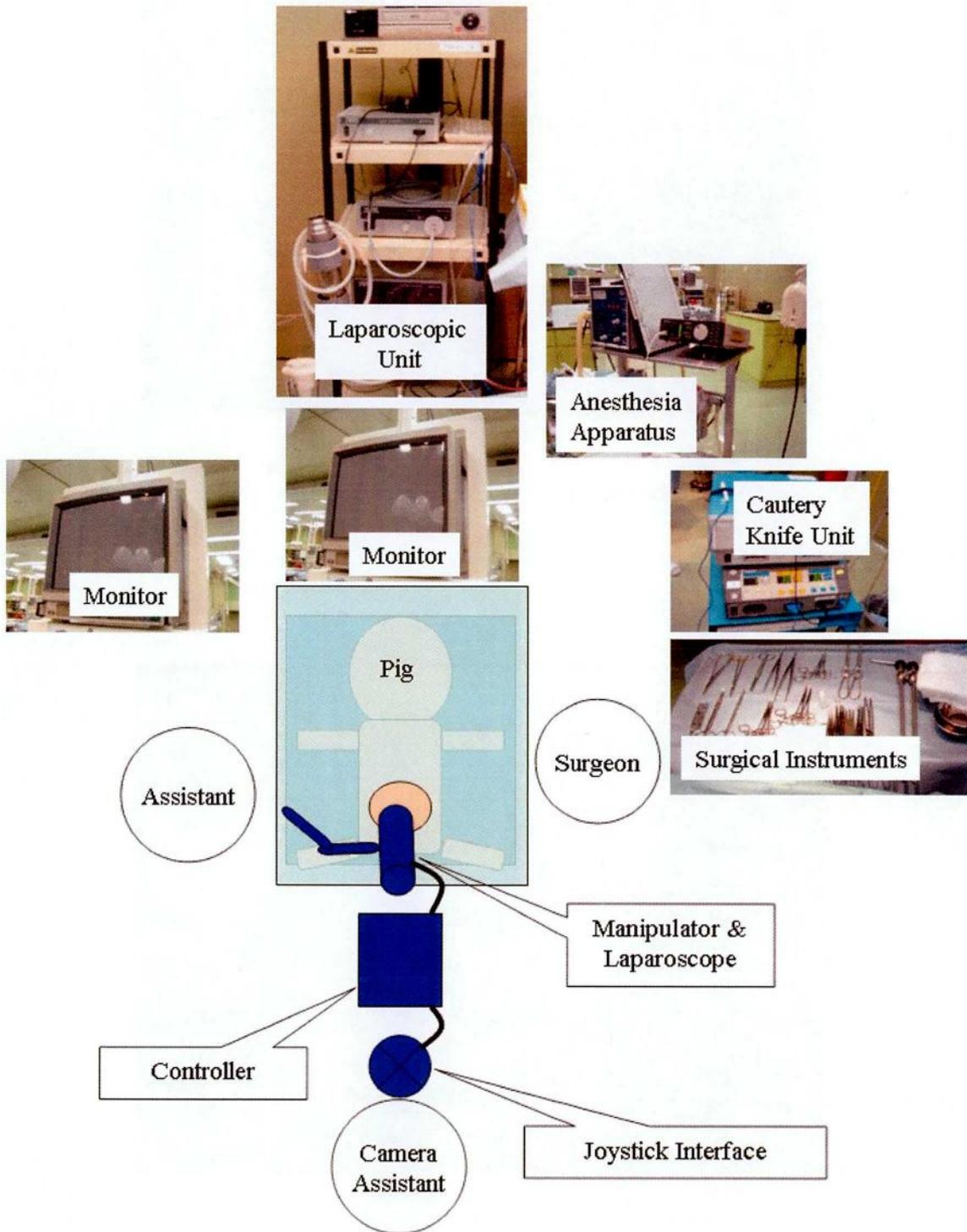


Fig.3.27 Setup of second *in-vivo* experiment for the first prototype

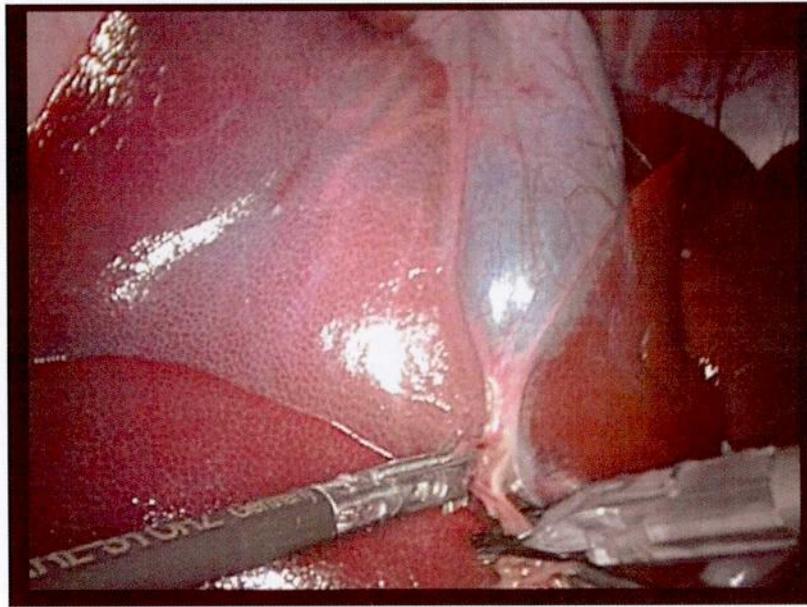


Fig.3.28 Laparoscopic image of the bile duct in second experiment for the first prototype

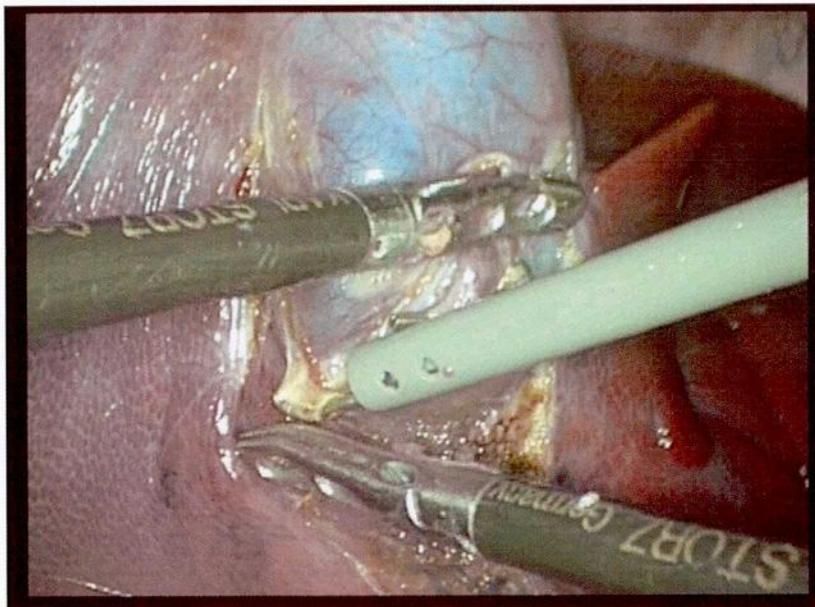


Fig.3.29 Laparoscopic image of the body of gallbladder in second experiment for the first prototype

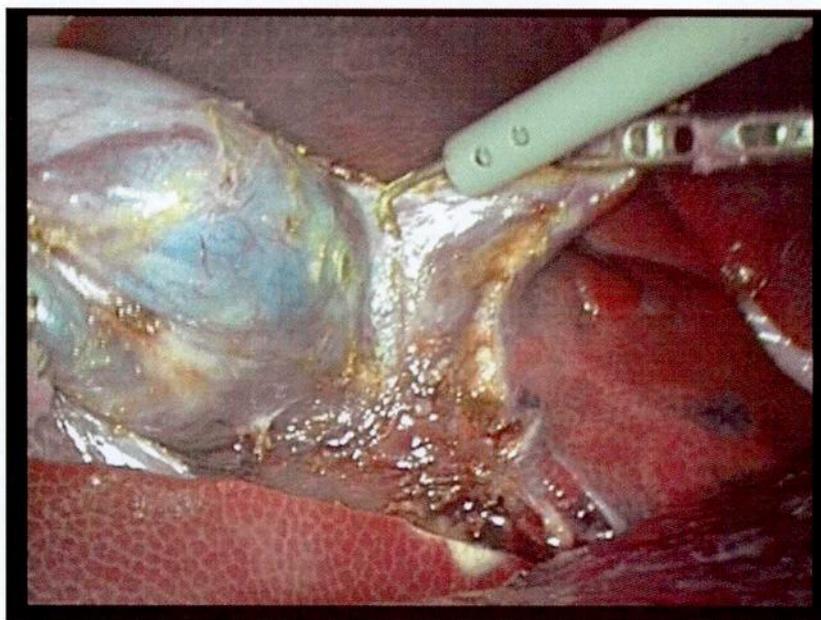


Fig.3.30 Laparoscopic image of the fundus of gallbladder in second experiment for the first prototype

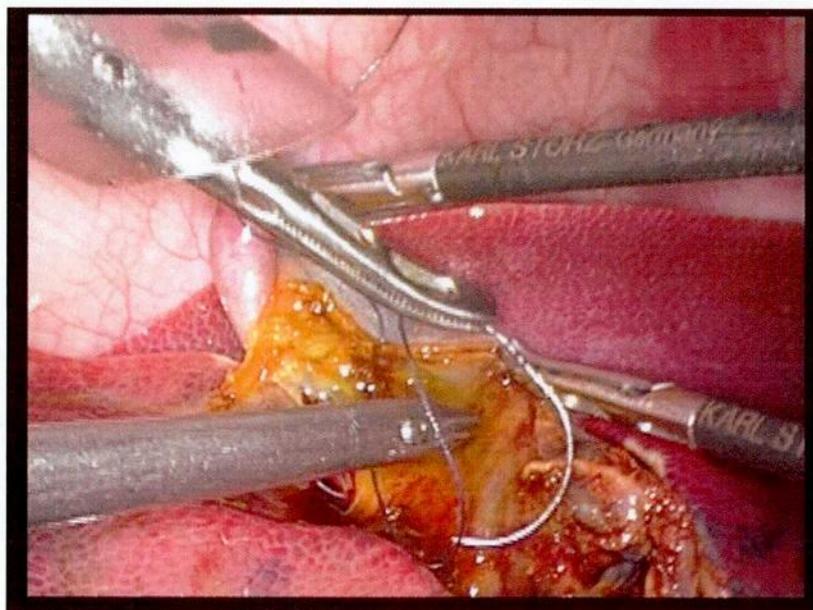


Fig.3.31 Laparoscopic image of an experiment that stopped bile leakage from the gallbladder

最後に、本ロボットの耐久性を検討するため、8時間連続運転試験を3回行った。連続運転試験では、ロボットに内視鏡、カメラヘッド、光ファイバーケーブルを装着し、内視鏡を人体模型に取り付けたトロッカールに挿入し、人体模型をを置いたテーブルにロボットを一般的な内視鏡把持アームを通して固定することで、実際の手術での使用環境を模擬した。ロボットの動作は、速度と可動範囲を様々に変化させた4自由度の動きを連続運転試験用に開発した制御プログラムにより行った。ここでは、ジョイスティックインタフェースは使用していない。長時間運転試験において、マニピュレータの破損、アクチュエータからの水漏れなどのロボットの破損は確認されなかった。本ロボットは、ディスプレイ化を目指しており、3回の8時間連続運転（計24時間）でマニピュレータに破損が見られなかったことから、十分な耐久性が実現できているといえる。

3.3.5 ディスポーザブル内視鏡ロボットの優位性の考察

手術に内視鏡ロボットを使用することは、多くのメリットがある。しかし多くの内視鏡ロボットは、滅菌ドレープにより清潔性を確保する必要があるため、手術前の準備や手術後の片付けが煩雑になり、医療スタッフへの身体的・精神的な負担が増した。また、ロボットのメンテナンスを頻繁に行う必要があるなどのデメリットもあった。我々は、内視鏡ロボットをディスプレイ化することにより、医療機器メーカーが安全性と清潔性を一括管理するため、手術前後の医療スタッフの負担や日常的なメンテナンスの負担などのデメリットを軽減できる。

将来的には、使用後の内視鏡ロボットを製造メーカーが回収して、新しい内視鏡ロボットへとリサイクルする社会的な仕組みができればよい。

3.3.6 実装例1のまとめ

我々は、内視鏡ロボットの構成手法に従い、医療用に開発した水圧駆動リニアアクチュエータを用いた6自由度パラレルメカニズムで構成する内視鏡マニピュレータ（初号機）を開発した。本マニピュレータは、安価に製造できるため、内視鏡ロボットをディスプレイ医療機器として扱うことが可能である。また小さなワークスペースの中で

視野展開が可能でかつ内視鏡の操作のために大きなメカニズムを必要としないため、術者の作業を妨げないなどの特長を持つ。本ロボットは、ブタの肝臓を用いた腹腔鏡下胆嚢摘出術を模擬した実験 (*in-vitro* 実験) を1回、ブタの腹腔鏡下胆嚢摘出術手術を2回行った結果、胆嚢摘出に必要な視野を安定に提示することができた。また本ロボットの動きが術者の妨げとならないことも確認できた。

さらに、3回の8時間連続運転(計24時間)でマニピュレータに破損が見られなかったことから、ディスポーザブル機器として十分な耐久性が確認できた。

今後は、マニピュレータの稼動範囲を増やし、ブタの腹腔鏡下胆嚢摘出術よりも、広い視野が必要な腹腔鏡補助下幽門側胃切除術や腹腔鏡下低位前方切除術への使用を試みたい。

3.4 実装例 2 :

ディスポーザブル型内視鏡ロボット (2号機)

本章では、初号機(実装例1)の評価検討をふまえた上で、3.2節の内視鏡ロボットの構成手法に従って新たに試作した内視鏡ロボット(2号機)について述べる。2号機での改良点は以下の通りである。

- 稼動範囲の向上：稼動範囲を向上させる新型アクチュエータの開発 (構成手法：基盤項目)
- 安全性の強化：緊急停止装置の開発(構成手法：必須項目)

3.4.1 ロボットの構造

図 3.32 に 2 号機のロボットの構成を示す。基本構成は初号機と同じであり、ジョイスティックによる術者インタフェース部、コントローラ部、そしてディスポーザブルなマニピュレータ部で構成されている。ディスポーザブルパートは、図 3.33 のマニピュレータ部とアクチュエータに水や圧縮ガスを送るチューブそしてシリンダである。ディスポーザブルパートは、試作 1 号機のものとはベウォータシリンダを金属成型品から樹脂成型品に換えることでコストダウンを図っている。また、ジョイスティックインタフェースは、図 3.34 に示すとおり、ユーザビリティの向上を目指して、ボタンとダイヤルの配置を変更した。ジョイスティックインタフェースの操作方法は、初号機のもと同じである。マニピュレータの各パラメータを以下の通りである。

- サイズ：ベースプレート半径 48.5 mm, エンドプレート半径 63.75 mm,
全アクチュエータ収縮時の高さ 207 mm
- 重量：約 580 g (この重量には内視鏡とカメラの重量は含まれていない)
- 内視鏡の動き：拔差し 112.5 mm, 傾き 26 deg
- アクチュエータの動作速度：最大 6.7 mm/sec

ここで、可動範囲は、図 3.35 に示すとおり内視鏡取り付け部とアクチュエータが干渉した場合 21.6 deg に低下する。

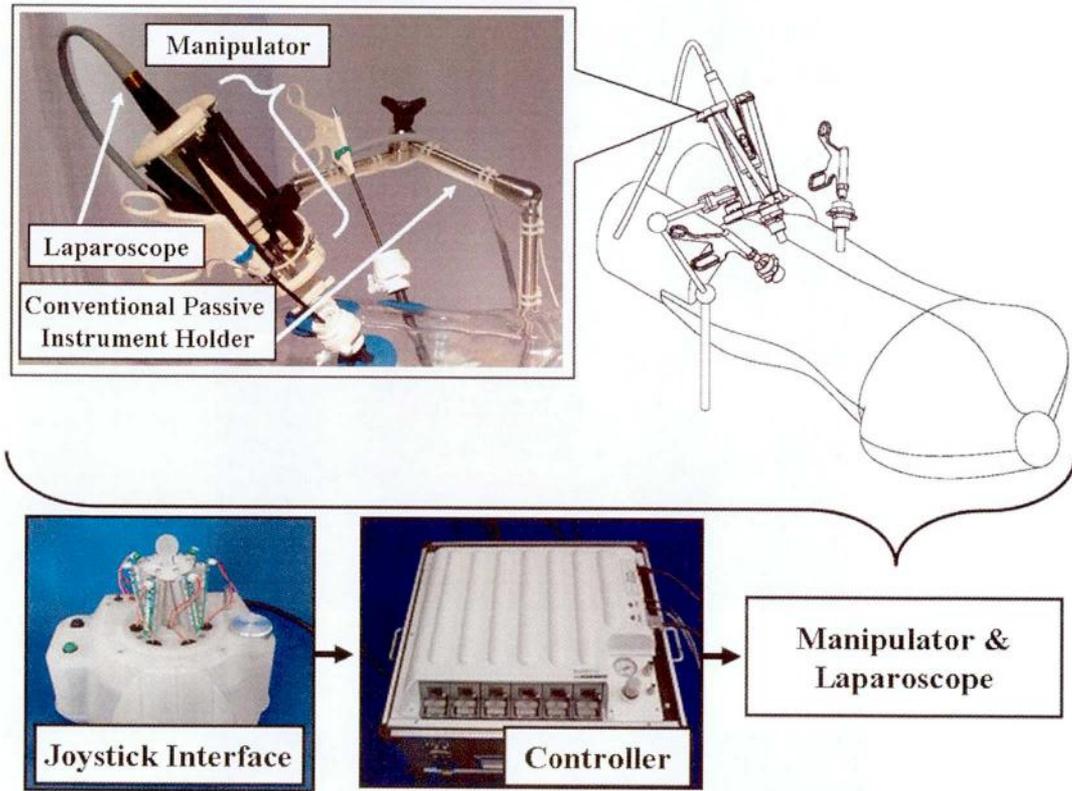


Fig.3.32 System configuration of second prototype

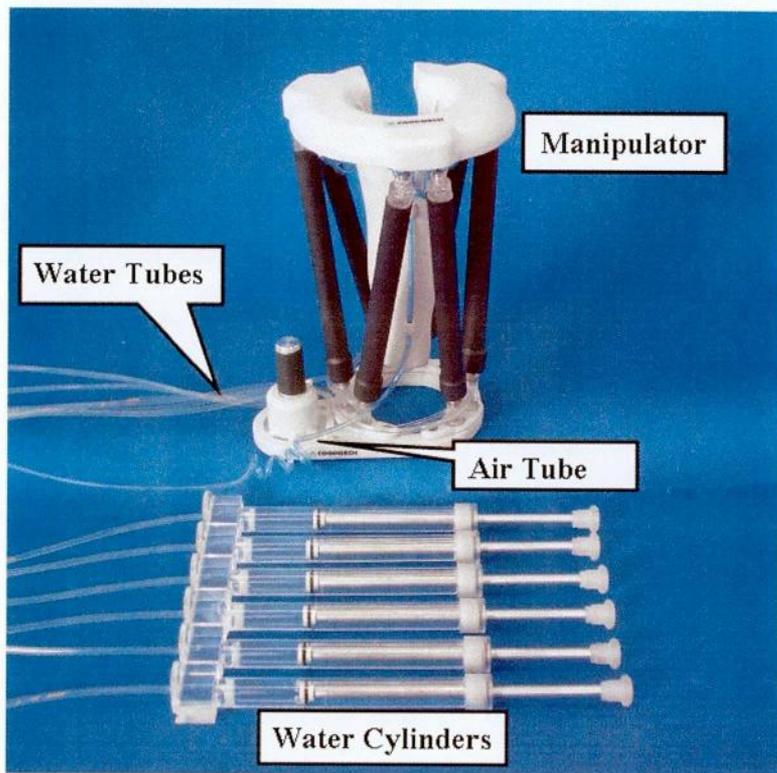


Fig.3.33 Disposable part of second prototype

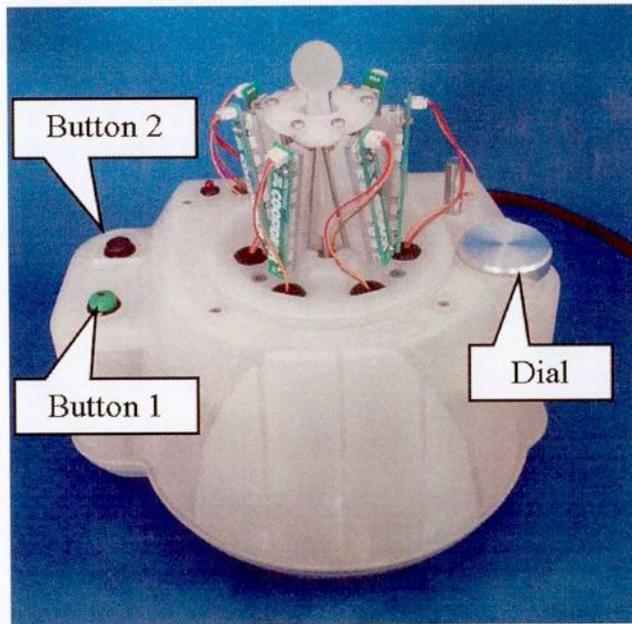


Fig.3.34 Joystick interface of second prototype

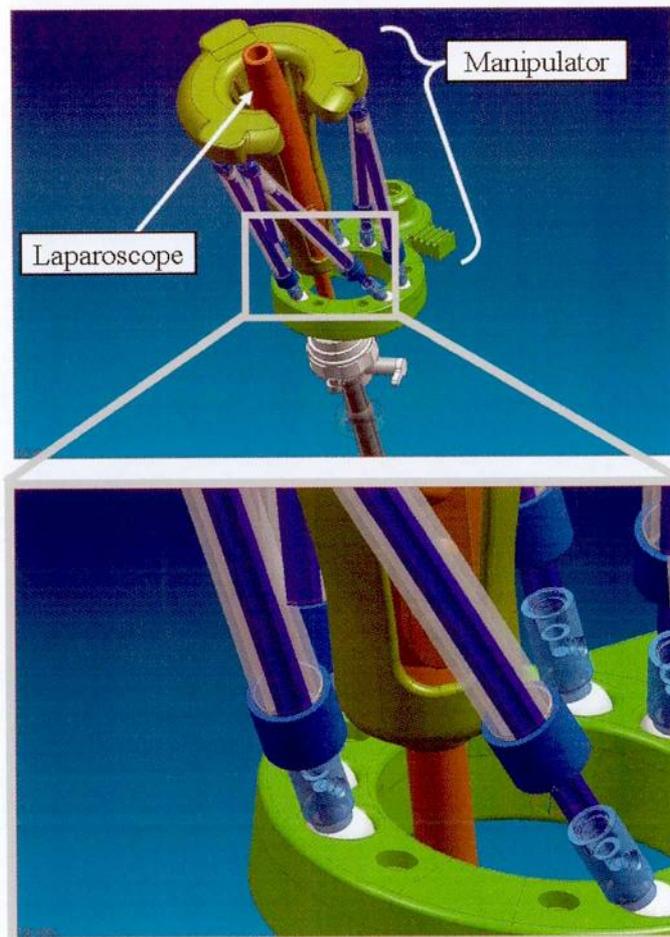


Fig.3.35 Computer Simulation

3.4.2 空気圧を用いた医療用水圧駆動アクチュエータ

初号機のために開発された水圧駆動リニアアクチュエータは、全長 185.0 mm に対して伸長量は 70 mm であった。この伸長量は、腹腔鏡下胆嚢摘出術を行うためには十分であるが、他の術式の手術に内視鏡ロボットを応用するためには不足みである。しかし、アクチュエータの伸長量を増やすとアクチュエータの全長も増えるため、結果的にマニピュレータの可動範囲を増やすためには、マニピュレータのサイズを大きくする必要があった。我々は、マニピュレータのサイズを維持しつつマニピュレータの可動範囲を増やすために、新たに水圧駆動リニアアクチュエータを開発した (図 3.36)。初号機用のアクチュエータとの大きな相違点は、金属のバネを用いていないことである。初号機用のアクチュエータは、金属製のバネが内蔵されており、収縮時のバネの長さ L (図 3.37) がアクチュエータの全長を長くする要因となっていた。新型のアクチュエータは、金属製のバネの代わりに、空気圧を用いることでその要因を取り除いた。その結果、新型アクチュエータは、全長 185.0 mm に対して伸長量が 112.5 mm となった。

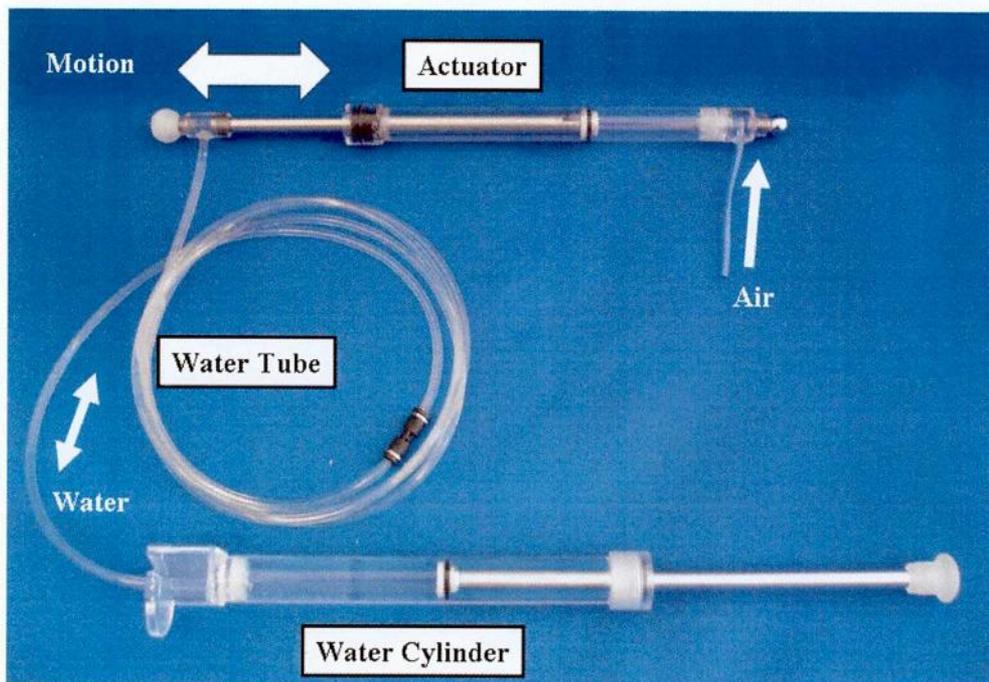


Fig.3.36 Hydraulic linear actuator of Second Prototype

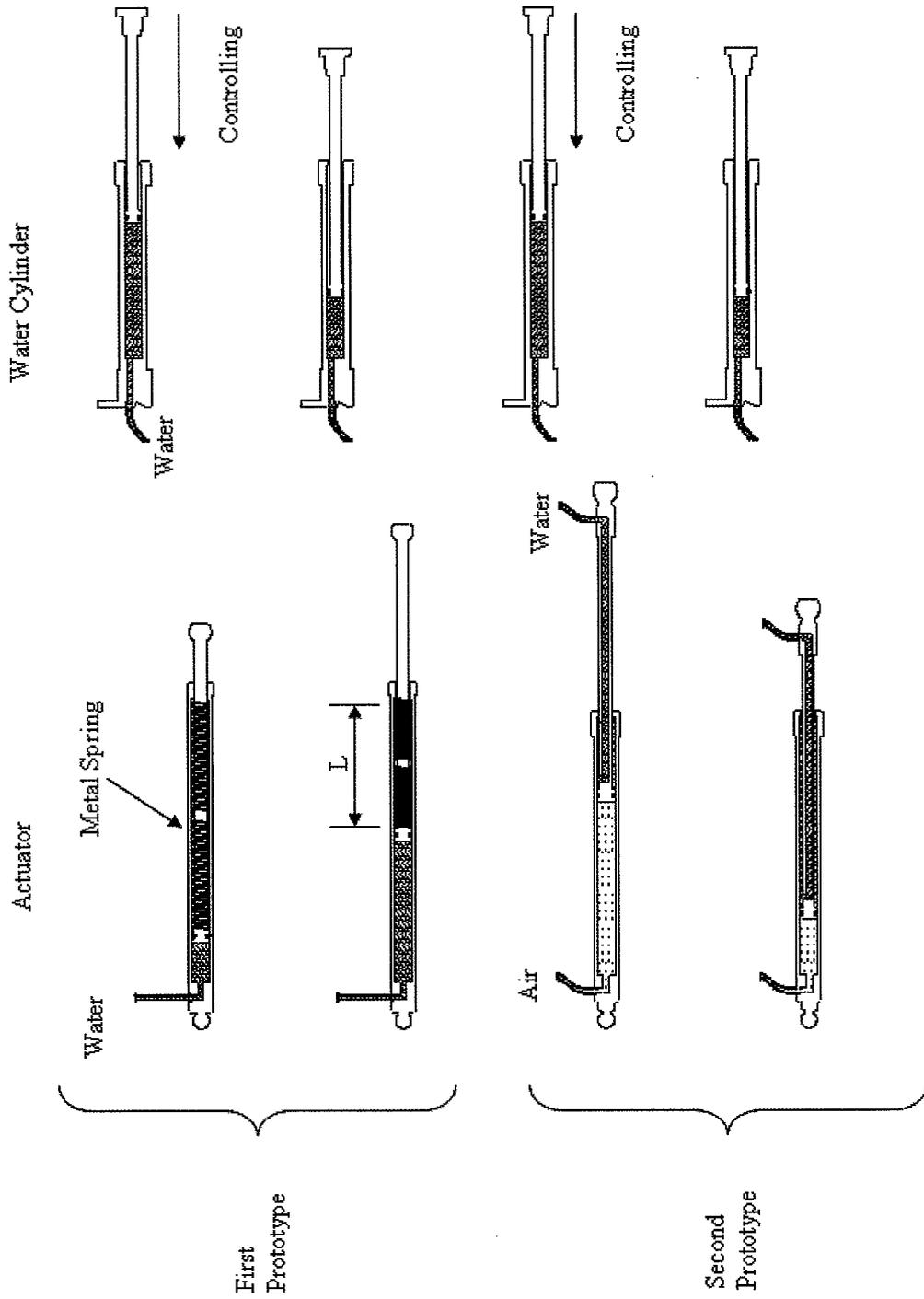


Fig.3.37 Mechanism of hydraulic linear actuators

2号機用のアクチュエータは0.4 MPaの空気圧が常にアクチュエータを伸ばす方向にかけられている。空気圧は手術室の医療ガス配管設備の圧縮空気を使用する。実験室など手術室以外でロボットを使用する場合は、コンプレッサから供給する。アクチュエータは、水をアクチュエータ外部から内部に入れることで縮み方向に動く。また、伸び方向の動きには、アクチュエータ内部の水量を減らすとともに空気圧も利用して行う。空気圧は常にアクチュエータを伸ばす方向に力がかけておられ、水量を制御する（減らす）ことでアクチュエータの伸び量を制御する。ここで空気圧を利用する理由は、アクチュエータ内部の水量を減らすと、アクチュエータの内部が負圧になり、水に含まれるガスの体積が増えるため、アクチュエータの動きが鈍くなるからである。アクチュエータへの水量の制御と空気圧（一定値）の調整は、コントローラにより行う（図3.38）。

コントローラの初期状態では、アクチュエータの安定動作をはかるため、アクチュエータに力を加えた（アクチュエータの長さが約5mm縮んだ）状態でアクチュエータ内部の圧力を上げている。

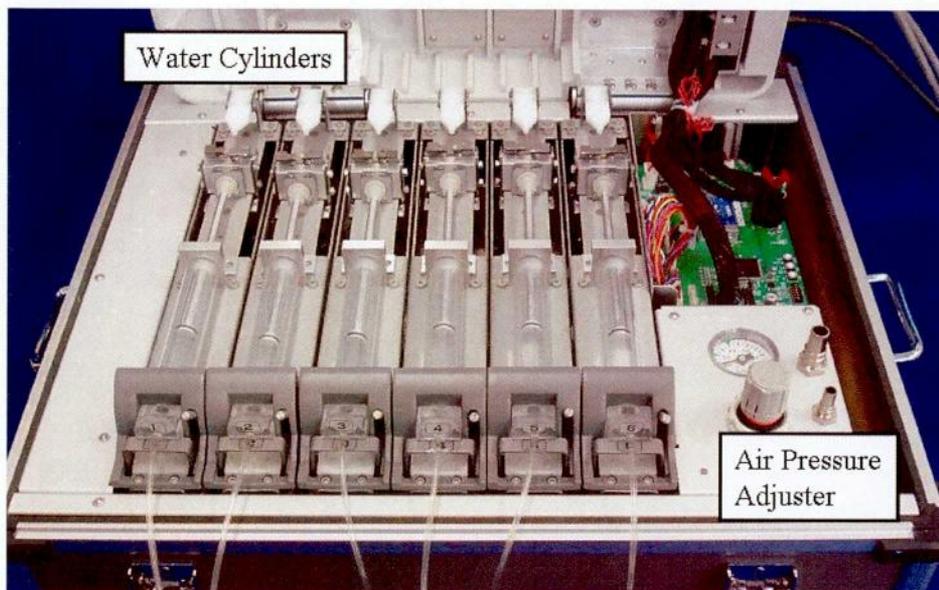


Fig.3.38 Controller for the manipulator of second prototype

本アクチュエータは、初号機用アクチュエータの改良として、伸縮時の水の流れを逆にし、さらに常にアクチュエータが伸びる方向に空気圧をかけた。このことは以下の利点を生む。本アクチュエータはシリンダ（図 3. 37）に制御を加えないとき伸びた状態になる。つまりマニピュレータにアクチュエータを組み込んだとき、アクチュエータのシリンダに力を加えていない状態（デフォルト状態）では、内視鏡をいっぱい引いた状態になる。実際の手術において内視鏡のポートを患者の体にかけて、そこに内視鏡を挿入し、最も広い視野で体内を見渡してから処置を始めるため、デフォルトとして広い視野が提供されることでセッティングが容易で効率的になる。また、内臓から内視鏡を遠ざける方向に常に力がかけられているため安全性の向上も図れる。

アクチュエータの寸法は太さ半径 6. 0 mm，縮小時の長さ 185. 0 mm である。

本アクチュエータを用いた結果、2 号機の稼働性能が表 3. 1 に示すとおり、稼働能力、稼働速度がそれぞれ、約 62%，約 20% 向上した。

Table 3.1 Spec of actuators

	Second Prototype	First Prototype
The total length	185mm	185mm
Motion range	112.5mm	70mm
Actuator speed	6.7mm/sec	5.6mm/sec

3.4.3 安全性の強化

初号機では、冗長自由度とショックアブソーバ、そして水圧駆動リニアアクチュエータ（感電対策）により安全性を確保してきた。2号機ではより安全性を高める方法として「内視鏡を内臓から遠ざける方向に力が常に加えられたアクチュエータ（3.4.2節）」を開発し、さらに「3個の緊急停止スイッチ」を設けた。

緊急停止装置は、独立した別系統のものを三つ装備可能である。今回は緊急停止装置を2種類用意した。一つはジョイスティック付近に一つ配置し、カメラ助手が主に緊急停止操作を行うためのプッシュボタン型の緊急停止装置（図3.39）である。もう一つは、フットペダル型の緊急停止装置（図3.40）で、術者と助手の足元に配置し使用する。それぞれが個々に緊急停止操作を行うことができる。緊急停止装置は、ロボットの制御プログラムに干渉を受けていないそれぞれ独立したハードウェアで構成されているため、万が一ロボットの制御プログラムに不具合が発生したとしても影響を受けることなく作動することができる。緊急停止装置の作動時、マニピュレータは現状の姿勢で停止する。非常時にマニピュレータを清潔野から撤去する場合、まず内視鏡をマニピュレータから引き抜き、腹腔鏡把持アームを片手で操作しながら、もう一方の空いている手でマニピュレータを持って撤去する。本内視鏡ロボットは、一人で短時間かつ簡単に清潔野からマニピュレータを撤去することが可能である。

また、非常時の対応方法の1つとしてアクチュエータに水を送るチューブをすべて切断する方法も考えられる。チューブを切断することで、すべてのアクチュエータが伸び、内視鏡を患者から最も引き抜いた状態を実現できる。また、空気を送るチューブも同時に切断した場合、マニピュレータは、手動で自由な姿勢に変えることができる。しかし、内視鏡などの重さでもマニピュレータの姿勢が変わるため、マニピュレータの挙動については注意が必要である。チューブを切断する方法を採用する場合、アフォーダンスも考慮した安全装置としての作りこみが必要である。

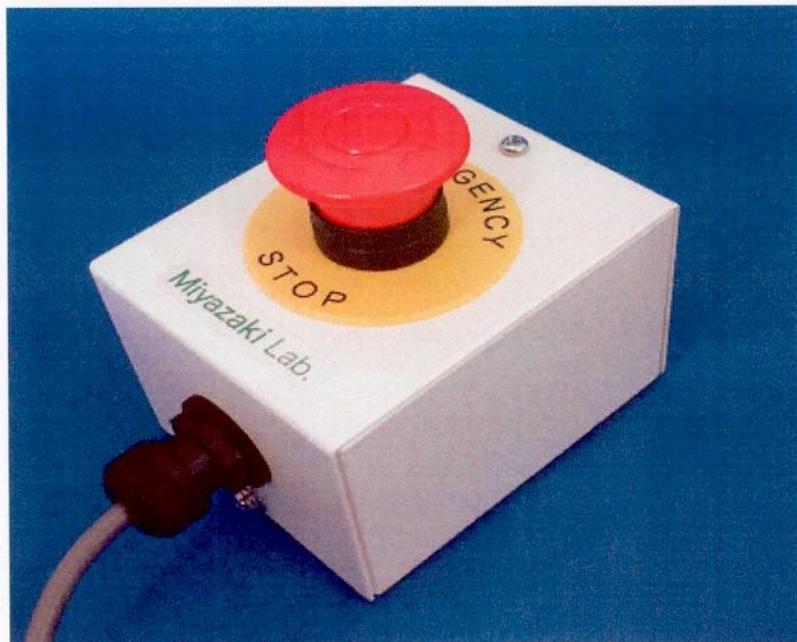


Fig.3.39 Push-button type



Fig.3.40 Foot-pedal type

3.4.4 評価実験の結果と考察

試作初号機と同様に、2号機でもブタの臓器を使用した腹腔鏡下胆嚢摘出術シミュレーション (*in-vitro* 実験) を2回、ブタの腹腔鏡下胆嚢摘出術 (*in-vivo* 実験) を1回行い、マニピュレータの稼動範囲と占有範囲を評価した。更に、新型アクチュエータにより稼動範囲の拡大を図った2号機では、ブタを使い腹腔鏡下胆嚢摘出術よりも広い視野が必要な腹腔鏡補助下幽門側胃切除術や腹腔鏡下低位前方切除術への使用を試みた。

まず、ブタの臓器を使用した腹腔鏡下胆嚢摘出術シミュレーション結果について述べる。内視鏡の操作をカメラ助手が直接行った場合 (従来手法:N) と本ロボットを用いた場合 (提案手法:R) の2つのケースについて実験を行った。ここで提案手法では、従来手法でカメラ助手を担当した外科医がジョイスティックを用いてロボットを操作した。また、実験の被験者はこのロボットを一度も使用したことがない3人の熟練外科医A,B,そしてCである。外科医AとBは術者を担当し、従来手法と提案手法をそれぞれ1回ずつ行った。外科医Cはすべての手術においてカメラ助手およびロボットの操作を担当した。実験内容とその担当を表3.2にまとめる。本実験で使用したブタの肝臓は合計4個である。この肝臓は、10個の肝臓の中から形状が同じで、かつ手術の難易度が同等と思われるものを4個選び使用した。ブタの肝臓は腹腔内を模擬した手術トレーニング用の箱に入れ *in-vivo* 環境を再現した。実験の様子を図3.41に、機器配置を図3.42に示す。この実験の目的は、初号機で評価を行った、内視鏡ロボットの視野範囲 (可動範囲)、占有空間の大きさに加え、インタフェースの使いやすさ、ロボットのセットアップの容やすさも評価することである。具体的な評価内容を以下に挙げる。

- 従来手法と提案手法の実験中の内視鏡画像を比較し、提案手法の内視鏡画像が従来手法と同等の視野を提供できているか否かを評価した。提案手法では、従来手法の内視鏡画像と差異がないことを目指している。(初号機でも同様の評価を行った)
- マニピュレータの占有空間が手術の邪魔にならないか否か。術者は内視鏡画像が映し出されるテレビモニタに注目して手術を行うため、万が一マニピュレータが大きく動き術者の手元と干渉する場合、術者が事前にそれを避けることが困難である。本実験では実験中のマニピュレータと術者の手元をビデオカメラで撮影し、干渉がないか確認する。また、実験後に術者へ、マニピュレータが邪魔にならなかったかをアンケートにより調査する。(初号機でも同様の評価を行った)

- 従来手法と提案手法の手術時間を比較し、提案手法が従来手法に対して劣っていないかを評価する。またここでは手術の完成度も評価する。(初号機でも同様の評価を行った)
- ロボットのセットアップのしやすさを評価するため、セットアップ時間を計測する。
- ロボットを操作したカメラ助手に対してジョイスティックインタフェースを使った感想を聞く。
- 従来手法と提案手法の実験中の術者の精神的なストレスを測定し、手術にロボットを使用することによる心理的な不快(ストレス)がなかったかを評価する。ストレスの測定は、術者の唾液成分と加速度脈波を測定することにより行う。

初めに、従来手法と提案手法の手術時間の比較と手術の完成度について述べる。すべての実験において問題なく安全に胆嚢を摘出することができた。しかし、被験者Bの従来手法による手術では、胆汁漏れが起きたが、適切な対応により手術を完遂した。各実験における手術時間は表3.3のとおりである。表3.3に示すとおり提案手法と従来手法の両者の手術時間に差異はなかった。ここで、各術者において手技の速度差が見られたが、マニピュレータに起因するものではない。

Table 3.2 Role of each subject in the *in-vitro* experiment

Exp.No.	Task	Surgeon	Camera assistant
N1	Normal Operation	A	C
R1	Robotic Operation	A	C
N2	Normal Operation	B	C
R2	Robotic Operation	B	C

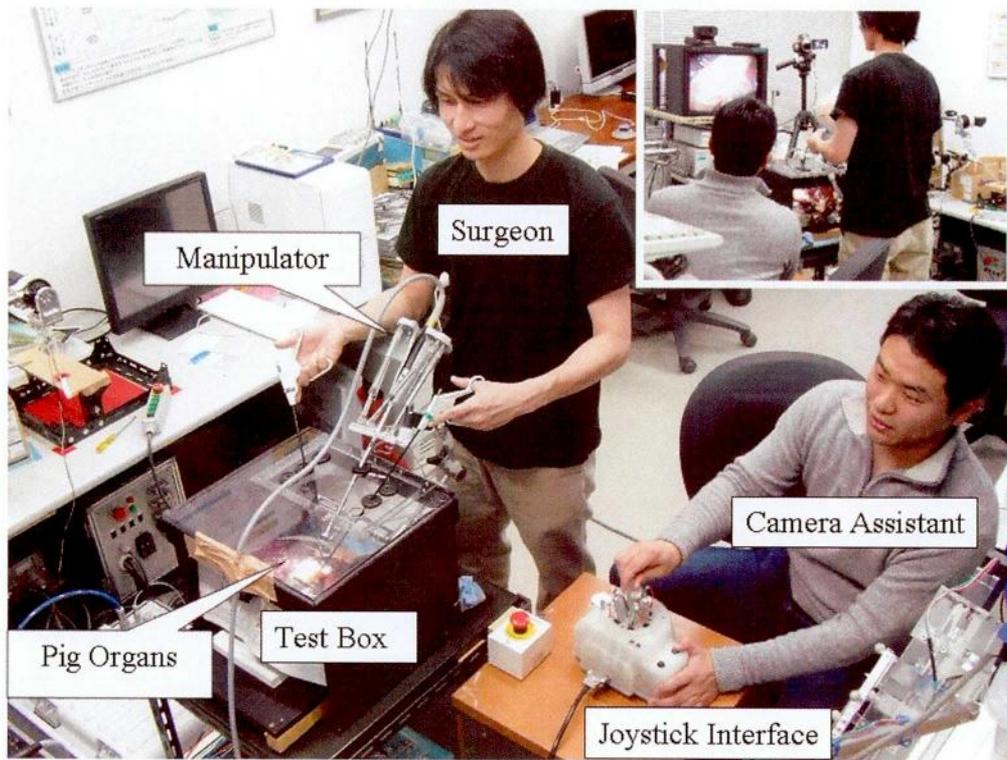


Fig.3.41 Overview of *in-vitro* experiment for second prototype

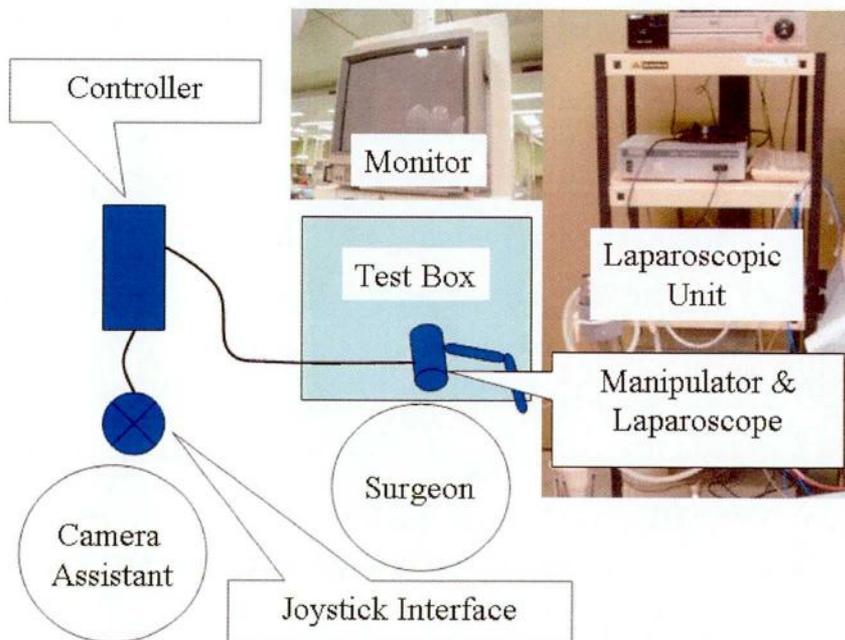


Fig. 3.42 Setup of *in-vitro* experiment for second prototype

Table 3.3 Operation beginning time and
Time to complete the *in-vitro* task

No.	Operation beginning time	Time to complete the task
N1	10:20 AM	394sec
R1	10:50 AM	436sec
N2	0:20 PM	1489sec
R2	1:20 PM	1276sec

次に、従来手法と提案手法の実験中の内視鏡画像を比較する。本実験も初号機のとおり同様に胆嚢摘出手術は、胆管処理、胆嚢（体部）の剥離、胆底処理の三つのフェーズに大きく分けることができるため、図 3.43 から図 3.45 にそれぞれのフェーズにおける各実験中の内視鏡画像を示す。各図中の左図は被験者 A の従来手法の内視鏡画像である。中央図は被験者 A の提案手法の内視鏡画像である。右図は被験者 B の提案手法の内視鏡画像である。ここで、被験者 B の従来手法の内視鏡画像は、カメラ助手が被験者 A の従来手法の実験と同じであり、被験者 A と B の両者の従来手法の内視鏡画像は同等であると考えることができるため、被験者 B の従来手法の内視鏡画像は割愛した。図 3.43 から図 3.45 の実験中の内視鏡画像から、拡大率、視野範囲、そして視野角度において外科手術的に本質的な差がなく、提案手法の内視鏡画像が提案手法と同等の視野であることが確認できた。また、手術後に内視鏡ロボットに関して外科医へインタビューを行った結果、内視鏡ロボットの性能が腹腔鏡下胆嚢摘出術を模擬した本実験を行うにあたり十分であったことが分かった。次に、マニピュレータの占有空間についての結果を示す。術中にマニピュレータと術者の手元をビデオカメラで撮影した結果から、術者の手元とマニピュレータとの干渉は見られなかった。また術後に行った術者へのアンケート結果からもマニピュレータが邪魔になったとの意見はなかった。マニピュレータは外科医の作業を妨げることなく、十分な可動範囲と内視鏡画像を提供できたといえる。

実験において、本内視鏡ロボットのセットアップについても問題なく行うことができた。セットアップ時間は外科医 A の提案手法 (R1) では 5 分 44 秒、外科医 B の提案手法 (R2) では 6 分 56 秒であり、迅速にセットアップができることが確認できた。

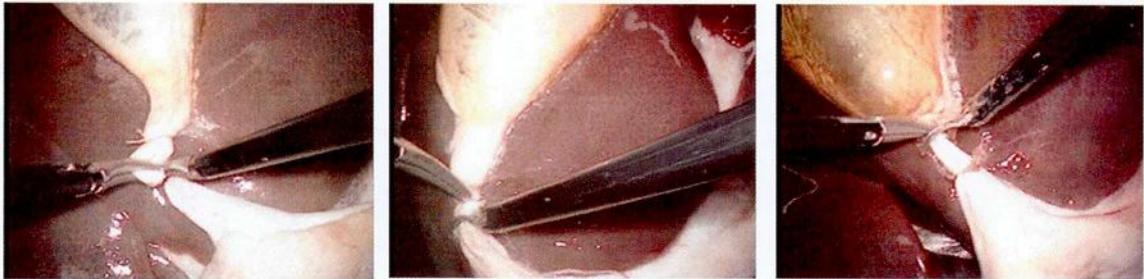


Fig.3.43 Laparoscopic image of the neck of gallbladder. The left picture: normal operation (the human camera assistant C operates the laparoscope), the midmost picture: Surgeon A's robotic operation, (the current prototype manipulator operates the laparoscope) ,the right picture: Surgeon B's robotic operation.

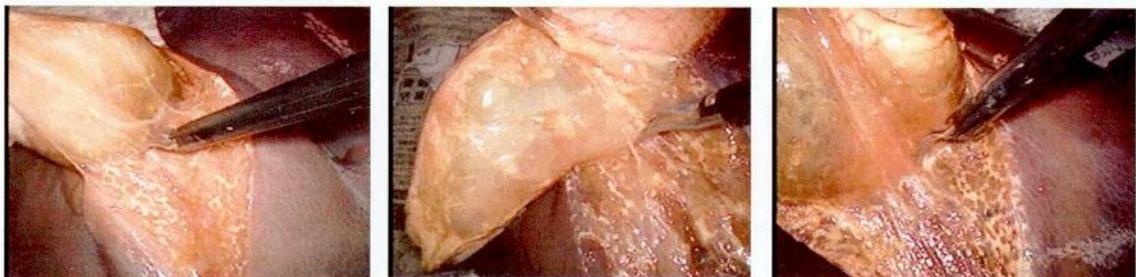


Fig.3.44 Laparoscopic image of the body of gallbladder. The left picture: normal operation, the midmost picture: Surgeon A's robotic operation, the right picture: Surgeon B's robotic operation.



Fig.3.45 Laparoscopic image of the fundus of gallbladder. The left picture: normal operation, the midmost picture: Surgeon A's robotic operation, the right picture: Surgeon B's robotic operation.

本内視鏡ロボットの動作については、外科医 A の提案手法 (R1) 時にジョイスティックインタフェースの故障により 20 sec, 手術が中断した。そのほかの実験では問題なく本ロボットは動作した。故障内容は、ジョイスティックの部品の取り付け不良によるリンクの外れである。この故障は、実験中に迅速に修理することができた。今後は、実験前の確認を更にしっかり行う必要がある。

カメラ助手に行ったジョイスティックインタフェースの使いやすさに関するアンケートの結果として、「初めての操作でも手術を十分行うことができるが、1 回目より 2 回目のほうがうまく操作できた。練習するとより正確な操作ができると思う。特にロール動作は、慣れが必要である」とのご意見をいただいた。

最後に、術者が手術に内視鏡ロボットを使用することにより心理的な不快(ストレス)がなかったかを評価するため、手術の前後で術者の唾液採取と加速度脈波を測定し、それらを解析し評価した。唾液成分は、唾液コルチゾールと唾液 α アミラーゼを測定した。唾液コルチゾールは、Salimetrics 社の試薬を用いて酵素免疫測定法 (ELISA : Enzyme Linked Immuno-Sorbent Assay) により測定した。唾液 α アミラーゼは和光純薬工業社製の試薬を用いて Caraway 法により測定した。加速度脈波の測定にはユメディカ社製の加速度脈波計アルテット C を使用した。加速度脈波の測定結果から a-a 間隔変動係数と脈波周波数解析 (LF/HF) を算出した。ここで、唾液コルチゾールは、ストレス刺激を受けてから 20 min から 30 min 程度で分泌のピークをむかえる。安静にしていれば 1 時間程度で復帰する。また、唾液 α アミラーゼは、ストレス刺激を受けてから 10 min 程度で上昇(活性化)し、また安静にしていれば 20 min 程度で復帰する。a-a 間隔変動係数および LF/HF は、ストレス刺激を受けてすぐに反応する。安静にしていれば、すぐに復帰する。a-a 間隔変動係数は、主に副交感神経活動を反映し、副交感神経活動抑制で低下する。LF/HF は LF が交感神経活動、HF が主に副交感神経活動を反映する。一般的に急性ストレスが負荷された場合、交感神経優位となることが知られている。これらを総合的に分析することで、術者の術中のストレスを客観的に評価することができる [III 31-III 33]。各測定結果を表 3.4 に示す。また、手術開始時刻を表 3.3 に示す。ストレスマーカは一般的に日内変動があるが、生活が不規則な外科医においては、日内変動よりも生活因子の方に大きく影響を受けると考えられるため、同一試験日にすべての実験を行った。外科医 A の従来手法 (N1) および提案手法 (R1) 実施時の唾液コルチゾールデータは、外科医 A の手術時間が短かったため、唾液コルチゾールの変化がとらえられなかった可能性はある。外科医 B の従来手法 (N2) 実施時の唾液コルチゾール上昇は、時間

経過的には術前のストレスも反映されているが、術前のアミラーゼ、加速度脈波から自律神経系の変化が見られていないことから、手術開始後のストレスをとらえたものであると考えられる。現に、実験後、外科医 B は、従来手法 (N2) 実施中に胆汁漏れの対応のため、ストレスを感じたと証言している。また外科医 B の唾液コルチゾールのデータを見ると、従来手法 (N2) による手術で数値が上昇した後、提案手法 (R2) による手術開始前でも低下していない。これは、唾液コルチゾール (内分泌系) のほうが自律神経系 (唾液アミラーゼ、加速度脈波) より反応に時間が掛かるため、従来手法 (N2) 実施時の影響が残っているものといえる。外科医 A の提案手法 (N1) 実施時の LF/HF の上昇は、手術の途中に発生したジョイスティックインタフェースの故障によるストレスであると思われる。外科医 A の提案手法 (N1) 実施時の LF/HF と a-a 間隔変動係数ともに上昇している。これは副交感神経活動の亢進はみられるが、それを上回る交感神経活動の亢進が起きていると考えられ、急性ストレスを示す結果となっている。今回の結果をまとめると、提案手法が従来手法よりもストレスを与えるという結果は少なくとも出ていないことがいえる。今後、実験条件を検討することにより、さらに正確にストレスを測定できれば提案手法が従来手法よりもストレスを軽減する可能性も期待できる結果である。

Table 3.4 Measurements of stress marker

Item	Task	Timing	Surgeon A	Surgeon B
Cortisol mg/dl	Normal	Before	0.071	0.053
	Operation	After	0.068	0.125
		Robotic	Before	0.043
	Operation	After	0.035	0.130
Amylase KU/L	Normal	Before	50	88
	Operation	After	61	112
		Robotic	Before	61
	Operation	After	52	139
Coefficient of variance of the a-a interval %	Normal	Before	5.69	4.25
	Operation	After	6.13	3.62
		Robotic	Before	5.73
	Operation	After	7.11	5.41
LF/HF-MEM	Normal	Before	2.896	1.685
	Operation	After	2.479	2.464
		Robotic	Before	2.595
	Operation	After	4.157	2.367

次に我々は、ブタを用いた腹腔鏡下胆嚢摘出術を1回行い、患者の呼吸による揺れや出血などの生体特有の問題をふまえ本マニピュレータの有用性を評価した結果について述べる。また、広い視野範囲が必要なアドバンド手術として腹腔鏡補助下幽門側胃切除術、腹腔鏡下前方切除術にも内視鏡ロボットの使用を試みた。これらの手技は、広い稼動範囲が必要であり、また小型のロボットでなければ手術の邪魔になるため、一般的にロボットを用いることがなかった手技である。これらの実験は、ジョンソンエンドジョンソン株式会社エチコン事業部の協力のもと、ジョンソンエンドジョンソン株式会社の動物実験倫理指針に則って、ジョンソンエンドジョンソン株式会社の保有する動物実験施設（福島県須賀川市）にて適切な方法で行った。腹腔鏡下胆嚢摘出術の実験の様子を図3.46に、機器の配置を図3.47に示す。腹腔鏡下胆嚢摘出術は麻酔をかけられたブタにトロッカをセットするところから開始し、胆嚢摘出、挿入孔の縫合までを行った。本システムを用いた術中のプロセスは、内視鏡の挿入から、視野範囲の調整、視野展開と胆嚢の摘出までである。手術は、術者1名とカメラ助手のみで作業を行い、通常手術助手が行う肝臓の把持は固定式の支持アームで代替した。鉗子を腹腔内に挿入した状態で作業を開始してから胆嚢を腹腔外に摘出するまで32分23秒（ロボットセットアップ66秒含む）要し、手術は無事に完遂した。図3.48から図3.50は、それぞれ胆管処理、胆嚢体部の剥離、胆底剥離の内視鏡画像である。それぞれ胆嚢摘出手術に必要な拡大率、視野角度、視野範囲を実現できている。

また、アドバンド手術として行った腹腔鏡補助下幽門側胃切除術は、107分8秒（ロボットセットアップ104秒含む）で完遂し図3.51に示すとおり適切な内視鏡映像を提供することができた。さらに、腹腔鏡下前方切除術についても71分52秒（ロボットセットアップ93秒含む）で完遂し図3.53に示すとおり適切な内視鏡映像を提供することができた。なお図3.51と図3.52の1から9の番号は、手技の工程の進みを示している。腹腔鏡下胆嚢摘出術、腹腔鏡補助下幽門側胃切除術、そして腹腔鏡下前方切除術において、生体を対象にしても問題が生じることなく、また、動脈からの出血などの危険な合併症は発生しなかった。

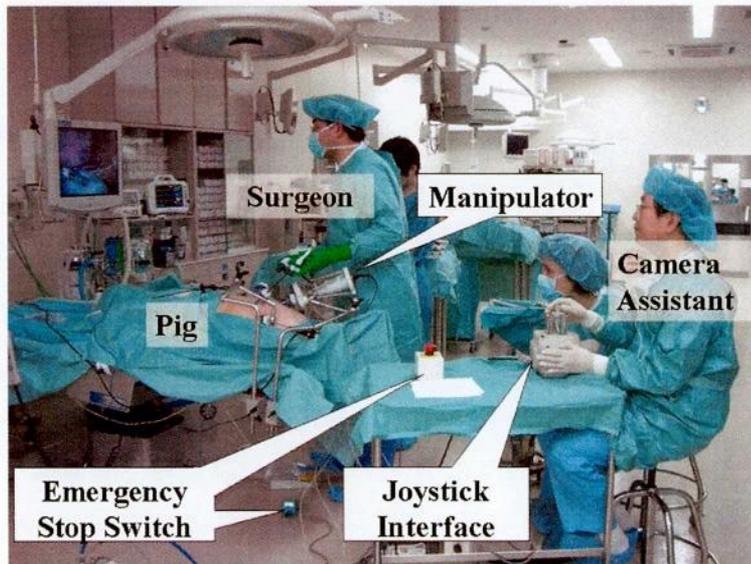


Fig.3.46 Overview of *in-vivo* experiment for second prototype

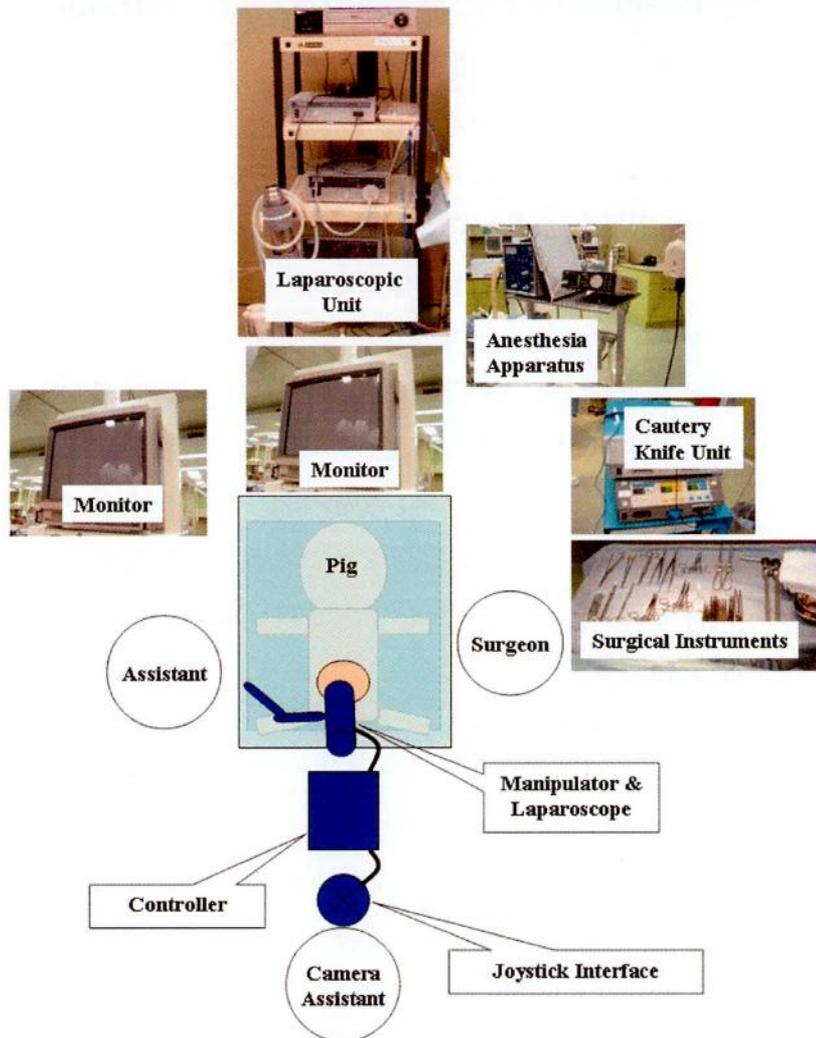


Fig.3.47 Setup of *in-vivo* experiment for second prototype



Fig.3.48 Laparoscopic image of the bile duct in an experiment for the second prototype



Fig.3.49 Laparoscopic image of the body of gallbladder in an experiment for the second prototype

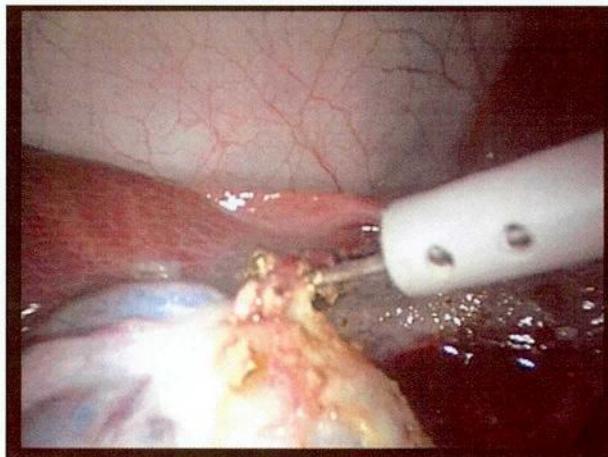


Fig.3.50 Laparoscopic image of the fundus of gallbladder in an experiment for the second prototype

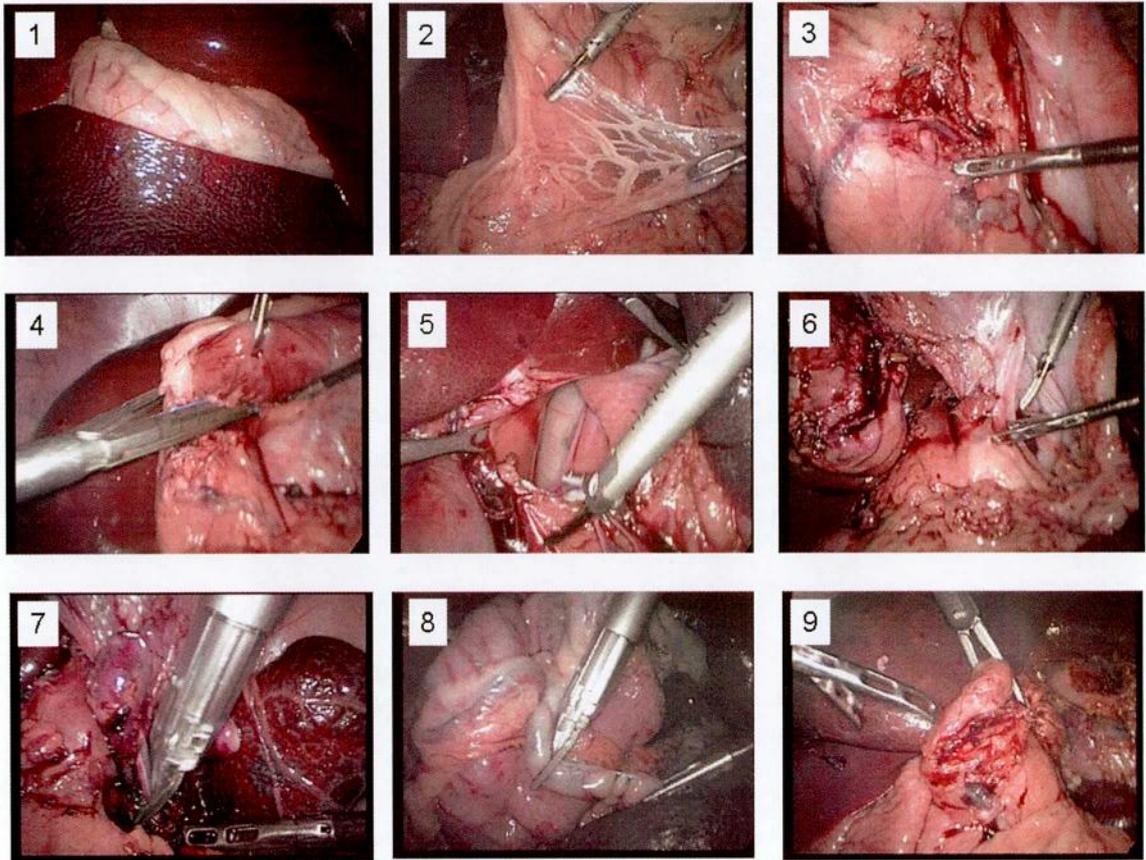


Fig.3.51 Laparoscopic image of laparoscopic distal Assisted gastrectomy (LADG)

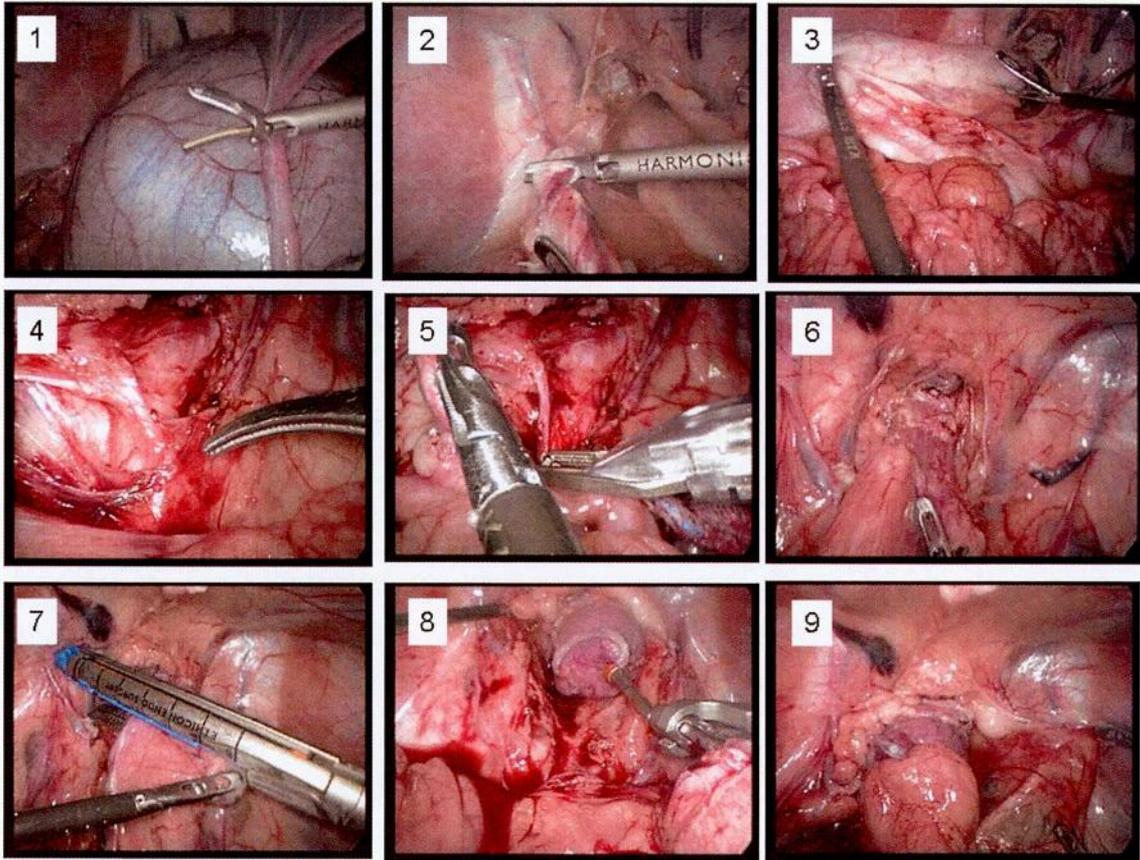


Fig.3.52 Laparoscopic image of laparoscopic low anterior resection

本 *in-vivo* 実験では、ロボットのセッティング実験、ロボットの故障などの緊急時を想定した内視鏡のロボット操作から手動操作への切り替え実験、内視鏡レンズ洗浄実験もあわせて行った。以下に各実験結果をまとめる。なお、これらの実験を行った外科医は、事前に練習を行っていない。

- ロボットのセッティング実験：術者がマニピュレータ部を手術台に取り付け、マニピュレータ部に内視鏡を装着し、ブタの体内に内視鏡を挿入し、そして内視鏡の位置決めが終わるまでの時間を測定した。実験は4回行い以下の結果を得た。

- 1回目：88秒
- 2回目：94秒
- 3回目：79秒
- 4回目：66秒

容易に短時間でセッティングが行え、さらに操作に慣れるに従い時間を短縮することができた。

- 内視鏡のロボット操作から手動操作への切り替え実験：内視鏡ロボットの故障などの非常（トラブル）時の対応を想定して行ったもので、緊急停止スイッチを押し内視鏡ロボットを停止させ、内視鏡把持アームを操作して、手術の邪魔にならないところにマニピュレータ部を撤去させた後、人間のカメラ助手が内視鏡を把持位置決めする従来の手術に移行するまでの時間を測定した。実験は2度行い、以下の結果を得た。

- 1回目：24秒（カメラ助手がプッシュスイッチを押して実験を開始した）
- 2回目：17秒（術者がフットペダルを踏んで実験を開始した）

安全かつ迅速に従来の手術への切り替えが行えた。また、この結果は、開腹手術などへの移行の際も不必要な時間がかからないことを示している。

- 内視鏡レンズ洗浄実験：内視鏡ロボットから内視鏡を取り外し、内視鏡レンズを洗浄し、内視鏡ロボットに内視鏡を装着し、内視鏡で視野を確保するまでの時間。実験は2回行い以下の結果を得た。

- 1回目：19秒
- 2回目：14秒

短時間かつ簡単に内視鏡レンズの洗浄を行うことができた。

以上のように運用面の評価実験を実際の医療現場にある手術設備を用いてかつ生体により行った結果、良好な結果を得ることができた。

3.4.5 試作2号機のまとめ

試作2号機では、空気圧を利用した水圧駆動リニアアクチュエータと緊急停止装置を開発しマニピュレータの稼動範囲の拡大と多重の安全性を確保した。試作2号機はブタの肝臓を用いた腹腔鏡下胆嚢摘出術を模擬した実験 (*in-vitro* 実験) を2度行い、術者にストレスを与えることなく、胆嚢摘出に必要な視野範囲と拡大率を提示できることが示された。さらに、ブタの腹腔鏡下胆嚢摘出術、腹腔鏡補助下幽門側胃切除術、そして腹腔鏡下低位前方切除術 (*in-vivo* 実験) を行った結果、それぞれの手術に必要な視野を安定に提示することができたうえ、それぞれの手技に対して術者の作業を妨げないことも確認できた。

ロボットのセッティング実験、ロボットの故障などの緊急時を想定した内視鏡のロボット操作から手動操作への切り替え実験、緊急停止スイッチ (3系統) の動作実験、そして内視鏡レンズ洗浄実験を行った結果、すべてに実験において、ロボットの使用が初体験の外科医でも迅速に対応できることが確認できた。

3.5 ディスポーザブル型内視鏡ロボットに関する医師への調査結果と考察

42名の北海道から沖縄までの全国の外科医に本ロボットを実際に見ていただいた上で、本ロボットに関するアンケート調査を行った。アンケート結果を以下に示す。

【問1】本ロボットに関心があるか

- 大いに関心がある, 関心がある 37名 (88.1%)
- 関心がない 1名 (2.4%)
- 無回答 4名 (9.5%)

【問2】本ロボットは誰が操作するのが適切か (複数回答可)

- 執刀外科医 14名 (33.3%)
- 助手外科医 16名 (38.1%)
- カメラ助手外科医 19名 (45.2%)
- 研修医 6名 (14.3%)
- 看護師 9名 (21.4%)
- 臨床工学技士 3名 (7.1%)
- 自動操縦 3名 (7.1%)
- 無回答 2名 (4.8%)

【問3】どのような症例に使用したいか

腹腔鏡下胆嚢摘出術, 内視鏡手術全般, 胃癌に対する手術, 長時間の手術全般, 胸腔鏡手術全般, 虫垂切除, 胃食道逆流症, 腹腔鏡下ニッセン噴門形成術

【問4】本ロボットを試用したいか

- 試用したい・試用を検討する 29名 (69.0%)
- 今は分からない 8名 (19.0%)
- 試用しない 1名 (2.4%)
- 無回答 4名 (9.5%)

以上のアンケート結果から、大多数の外科医が本ロボットに関心を持ち、実際に試用してみたいと思っっていることが分かった。本ロボットの操作方法としては、自動操縦ではなく、外科医が直接行うほうがよいと考える外科医が多いことが分かった。本ロボットの適応可能症例として、様々な症例が挙げられている。

3.6 まとめ

本章では、身体と物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアの基本構成「人 → システム A → システム B → 人」における「システム B」の構成手法とその実装について述べた。システム B としては、内視鏡ロボットを取り上げた。以下本章の研究成果をまとめる。

- 内視鏡ロボットの構成手法を提案した。
- 内視鏡ロボットの構成手法に従って、医療用に開発した水圧駆動リニアアクチュエータを用いた 6 自由度パラレルメカニズムで構成する内視鏡ロボット (実装例 1) を開発した。本ロボットは、パラレルメカニズム、冗長自由度、ショックアブソーバなどの機構的な安全が確保されている。また本ロボットは、安価に製造できるため、内視鏡ロボットをディスポーザブル医療機器として扱うことが可能である。また小さなワークスペースの中で視野展開が可能でかつ内視鏡の操作に大きなメカニズムを必要としないため、術者の作業を妨げないなどの特長を持つ。本ロボットは、ブタの肝臓を用いた腹腔鏡下胆嚢摘出術を模擬した実験 (*in-vitro* 実験) を 1 回行った結果とブタの腹腔鏡下胆嚢摘出術を 2 回行った結果から、腹腔鏡下胆嚢摘出術に必要な視野を提示できることが確認できた。また本ロボットの動きが術者の妨げとならないことも確認できた。
- 実装例 2 として、腹腔鏡補助下幽門側胃切除術や腹腔鏡下低位前方切除術などへ内視鏡ロボットの適応を目指し、空気圧を利用した水圧駆動リニアアクチュエータを新たに開発し、マニピュレータの稼動範囲の拡大を図った。また、実装例 1 の機構的な安全に加え、緊急停止装置や安全性を向上させたアクチュエータの開発により、多重の安全を確保することができた。ブタの肝臓を用いた腹腔鏡下胆嚢摘出術を模擬した実験を 2 回、また、ブタの腹腔鏡下胆嚢摘出術と腹腔鏡補助下幽門側胃切除術、そして腹腔鏡下低位前方切除術 (*in-vivo* 実験) を行い、これらの手技においても必要な視野を提示できることが確認できた。また本ロボットの動きが術者の妨げとならないことも確認できた。

第4章

結 論

本論文では、身体との物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアの構成手法と実装についての研究成果をまとめた。身体との物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアは、「人から意図を受信するシステムA」と「システムAからの指示に従い仕事を行いその結果を人へ発信するシステムB」の2つの基本システムで構成でき、この構成において「人 → システムA → システムB → 人」のインラクションループが成り立ち、人がシステムとインタラククションすることにより能力の拡大を図ることができる。本論文では、システムAとしてウェアラブル型入力装置とシステムBとして内視鏡ロボットの構成手法と実装を検討した。

本章では、本論文で得られた研究成果のまとめを行うとともに、今後の課題と展望について述べる。

4.1 研究成果

本論文では、身体との物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアの構成手法とその実装について論じ、以下の研究成果が得られた。

- インタラクティブメディアのモデル化と身体と物理的に距離が近いインタラクティブメディアの社会的な普及の遅れの指摘（第1章）
 - ▶ 「人と技術との関わり」に注目してインタラクティブメディアのモデル化を行い、インタラクティブメディアが「人からの意図を受け取り機器の制御を行うシステム A」と「システム A からの制御信号に従い仕事を行いその結果を人に伝えるシステム B」で構成できることを示した。
 - ▶ インタラクティブメディアを「社会的な普及の割合」と「身体との物理的な距離」を軸として分類し、その結果から身体と物理的に距離が近いインタラクティブメディアの社会普及が遅れていることを示した。
 - ▶ 身体との物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアとして、ウェアラブルコンピュータとメディカルロボットを取り上げ、ウェアラブルコンピュータではシステム A、メディカルロボットではシステム B の研究開発の遅れを示した。
- システム A の構成手法と実装（第2章）
 - ▶ ウェアラブルコンピュータ用のウェアラブル型入力装置を題材に、システム A の構成手法を検討し、その構成手法をもとにウェアラブルコンピュータに適した入力装置（愛称、こめかみスイッチ：実装例1）を開発し評価を行った。本装置は、使用者が機器操作を目的として意図的に行う奥歯の噛締めに伴って動くこめかみ付近の表皮の動きを光学式距離センサでセンシングし、その値をシングルチップマイクロコンピュータで処理して機器制御用の信号を生成するものである。この入力装置の特長は、使用者が常時利用でき、日常生活に支障をきたすことなく、ハンズフリーで使用でき、小型・軽量・安価で製造可能であり、機器制御を意図した動き以外の会話や食事などの日常的な動作には反応しないことである。
 - ▶ 携帯型音楽プレーヤーを操作するための入力装置を題材にし、アフォーダンスを考慮したシステム A の構成手法を提案し、この構成手法をもとに新たにこめかみスイッチ（実装例2）を開発し評価を行った。このこめかみスイッ

チは、ユーザが両目で瞬きをすることで再生／一時停止、右目のみ瞬きをすることで曲飛ばし、左目のみ瞬きをすることで曲戻しができる。アフォーダンスを考慮し設計した結果、ユーザはこのこめかみスイッチを見るだけで、その用途と装着方法を理解することができた。また、事前に操作方法について説明をしておけば、その操作方法を正確に記憶していなくても、アイコンを頼りに操作できることが分かった。さらに、実装例2は実装例1に比べ、会話、食事、歩行、ランニング時の生体コマンドの成功率(認識率)の改善も図れた。

● システムBの構成手法と実装(第3章)

- ▶ 内視鏡ロボットを題材にして、システムBの構成手法を検討し、その構成手法をもとにディスポーザブル型内視鏡ロボット(実装例1)を開発し評価を行った。本ロボットは、医療用に開発した水圧駆動リニアアクチュエータを用いた6自由度平行メカニズムで構成した。本ロボットは、安価に製造できるため、内視鏡ロボットをディスポーザブル医療機器として扱うことが可能である。また、平行メカニズム、冗長自由度、ショックアブソーバなどによる機構的な安全が確保されているうえ、小さなワークスペースの中で視野展開が可能でかつ内視鏡の操作のために大きなメカニズムを必要としないため、術者の作業を妨げないなどの特長を持つ。本ロボットは、ブタの肝臓を用いた腹腔鏡下胆嚢摘出術を模擬した実験(*in-vitro*実験)を1回行った結果とブタの腹腔鏡下胆嚢摘出術(*in-vivo*実験)を2回行った結果から、胆嚢摘出に必要な視野を提示できることが確認できた。また、本ロボットの動きが術者の妨げとならないことも確認できた。
- ▶ 実装例2として、腹腔鏡補助下幽門側胃切除術や腹腔鏡下低位前方切除術などのアドバンスドな手術への内視鏡ロボットの適応を目指し、空気圧を利用した水圧駆動リニアアクチュエータを新たに開発し、ロボットのサイズを変更することなく稼動範囲の拡大を図った。また、実装例1の機構的な安全に加え、緊急停止装置や安全性を向上させたアクチュエータの開発により、多重の安全を確保することができた。ロボットのセッティング実験、ロボットの故障などの緊急時を想定した内視鏡のロボット操作から手動操作への切り替え実験、緊急停止スイッチの動作実験、そして内視鏡レンズ洗浄実験を行った結果、すべての実験において本ロボットの使用が初体験の外科医でも術中に迅速に対応できることが確認できた。

4.2 課題と展望

以下に各章で得られた研究結果について、今後の課題および展望を述べる。

- インタラクティブメディアのモデル化と身体と物理的に距離が近いインタラクティブメディアの社会的な普及の遅れの指摘（第1章）
 - ▶ 本論文では、インタラクティブメディアを「社会的な普及の割合」と「身体との物理的な距離」を軸として分類し評価したが、今後は政治的な背景や産業の発展などをふまえた広い観点で評価検討を行いたい。
 - ▶ ウェアラブルコンピュータとメディカルロボット以外のインタラクティブメディアについても基本モデルを用いて広く検討を行うことで、インタラクティブメディアの学問体系全体の考察を進めていきたい。
 - ▶ 本論文で提案したインタラクティブメディアの基本モデルにおいて人と技術の関わりや情報の流れについて考察を深めることで、基本モデルを人間的なぬくもりや感動などの人間らしさも扱えるモデルへと拡張していきたい。
- システムAの構成手法と実装（第2章）

こめかみスイッチについて、以下の課題と展望がある。

 - ▶ こめかみスイッチに一般性を持たせるために、老若男女、文化の違い、身体障害の有無など様々な被験者を対象に実証実験を行い検討する必要がある。
 - ▶ こめかみスイッチについてウェアラブルコンピュータ以外の応用分野の検討も行い、こめかみスイッチの広い分野での普及を目指す。
 - ▶ こめかみスイッチとキーボードとをネットワーク上で併用して、ホストコンピュータへ情報入力する方式など、次世代入力装置のあり方も検討していきたい。
 - ▶ アフォーダンスを考慮した構成手法をさらにブラッシュアップしていくとともに、ユニバーサルデザイン概念も導入していき、文化・言語の違い、老若男女といった差異、障がい・能力の如何を問わずに日常生活で常時簡単に使用できるシステムの構築を図りたい。
 - ▶ こめかみスイッチは、リアルタイムに表皮の微小な動きを認識することができる。これは、光学式距離センサー数を増やすことで、人の表情の認識が可能であることを示している。今後は、人の表情により、機器を操作する新しい

ヒューマンインタフェースの開発を行う。

- システム B の構成手法と実装 (第3章)

内視鏡ロボットについて、以下の課題と展望がある。

- ▶ Solo surgery も念頭に入れた様々な術者インタフェースの導入を検討し、システム A (術者インタフェース) とシステム B (マニピュレータ) を統合させたシステム全体の評価検討を進めたい。
- ▶ 人間の熟練したカメラ助手と同様に手術中の状況変化に柔軟に適応するアルゴリズムを構築し自動位置決めの実現を目指す。
- ▶ 本内視鏡ロボットのマニピュレータ部は、鉄などの強磁性体を使用しなくても製作できるため、MRI 下での使用が可能である。本ロボットを用いて MRI 下でのロボット手術の可能性も検討したい。
- ▶ 動物実験により本内視鏡ロボットの有用性が示せた。今後は臨床応用を目指した取り組みを行う。

- こめかみスイッチと内視鏡ロボットの統合 (第2章, 第3章)

本論文では、システム A とシステム B をそれぞれ分けて実装例を述べてきた。システム A の実装例として挙げたこめかみスイッチは、術者インタフェースとしても応用可能である。今後は、こめかみスイッチを内視鏡ロボット用の術者インタフェースに応用し、本論文で挙げたシステム A とシステム B のそれぞれの実装例を統合させたインタラクティブメディアの開発を行う。

本論文では、身体との物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアに注目し、ウェアラブル型入力装置を構成手法と実装を検討した。また内視鏡ロボットのマニピュレータの構成手法と実装の検討も行った。これらの研究成果が、ウェアラブルコンピュータとメディカルロボットの研究の発展へ寄与することを期待している。以下、視野を広げてウェアラブルコンピュータとメディカルロボットのそれぞれの分野について今後の展望を述べる。ウェアラブルコンピュータは、いつでも・どこでも・すぐに、メールや Web を通じて世界中の人々と対話でき、ネットワーク上の無限ともいえる知識を得ることができ、そしてコンピュータに接続された機器を操作することができる。まさに、ウェアラブルコンピュータは人の知識やコミュニケーション能力、そして身体能力を強化 (拡張) する機械である。このウェアラブルコンピュータの発展は、ユビキタス社会の実現に欠かせないものである。ユビキタスコンピューティングとは、個々人の多様性

を維持しつつ、社会活動を効率化できる情報系インフラとして今後期待されているものである [IV1]。しかしサイエンスフィクションの世界では、ウェアラブルコンピュータの発展により、人の記憶や人格が肉体を離れてネットワーク上の外部記憶に移動することが取り上げられており [IV2, IV3]、人と人工物の間があいまいになる危険性を示唆している。ウェアラブルコンピュータの発展は今まで思いもよらなかった新たな社会現象を生み出す可能性のある非常に興味深い学問領域である。今後は、ウェアラブルコンピュータに必要な科学技術の根本的な開発に留まることなく、科学技術と人類の関わり方を哲学的な観点も踏まえて研究を行い、その研究成果により人類の真の文化を創造していきたい。また、ウェアラブルコンピュータのさらに先にある技術的、インプラントブル（移植可能）コンピュータについても研究の必要性を感じている。

メディカルロボットは、surgical CAD/CAM systems と surgical assistant systems の2つの潮流を主として発展している。Surgical CAD/CAM systems は、医用画像技術を生かし、正確に手術を行うものである。一方、surgical assistant systems は、外科医を術中に支援するものである。両者とも従来の手技の枠組みで考案されたものである。今後は、surgical CAD/CAM systems と surgical assistant systems の特徴を兼ね備えたシステムを研究開発しさらに医工連携をより強めていくことで、メディカルロボティクスを軸とした従来の手技にとらわれない新たな低侵襲医療を実現していきたい。また、人類の行動範囲が宇宙空間へと拡大しているため、地球と宇宙ステーション間での手術などの遠隔手術や無重力空間での手術へのメディカルロボットの適応も考えていきたい。血圧、心電図、脳波などの医療情報、圧力計測装置や3次元位置計測装置などの情報、過去の医療データを統合し、術中に患者の身体的なダメージの分かる（痛みの分かる）メディカルロボットの開発も目指したい。さらに、体内の薬物やウイルス、そして癌再細胞を医療処置ことができるマイクロマシンの研究開発を行う夢を持ち始めた。このマイクロマシンを血液中や組織中に投与しておき、病気予防や治療を自動的に行おうという考えである。技術的にはカプセル内視鏡の延長線上にあるもののようにも思われる。

最後に、身体との物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアには、多くの研究題材があり、さらに認知科学、コンピュータ科学、ロボティクス、脳科学、言語学、芸術、経済学、そして動物行動学など様々な学問を融合した魅力のある学際的な研究分野である。この異分野間の融合から新しい文化や価値観を創造したい。

謝 辞

本論文は、平成17年4月から平成20年6月までに、大阪大学大学院基礎工学研究科機能創成専攻機能デザイン領域の宮崎文夫教授および西川敦准教授のもとで行われたものです。本論文を執筆するにあたり、御指導、御助言、そして御協力をいただいた多くの方々に謹んで暑く御礼申し上げます。

最初に、主査として、終始懇切丁寧なる御指導を賜りました大阪大学大学院基礎工学研究科 宮崎文夫教授に謹んで厚く御礼申し上げます。宮崎文夫教授は、私の人生の将来への希望や学び研究する機会を与えてくださいました。また、私が研究に没頭できるよう良い研究環境を提供してくださいました。さらに私を特任研究員に取り立ててくださるなど研究と生活の両方から支援をしてくださいました。重ねて御礼申し上げます。

本論文のまとめと審査にあたり、御多忙のところ、副査として御指導を賜りました、大阪大学大学院基礎工学研究科機能創成専攻専攻長 荒木勉教授、大阪大学基礎工学部システム科学科科長 新井健生教授、大阪大学大学院基礎工学研究科 西川敦准教授に厚く御礼申し上げます。

大阪大学大学院基礎工学研究科機能創成専攻専攻長 荒木勉教授には、非常に広く深い観点からウェアラブル型インタフェースの改良点と本研究に対する斬新かつ芸術的な素晴らしいアイデアをいただきました。御助言や御意見を研究に生かし、社会に役立ちさらに強いインパクトを与える成果を出していきたいと思っております。また、荒木勉教授は、若輩の私を日ごろから気にかけてくださいました。ここで重ねて心から深く御礼申し上げます。

大阪大学基礎工学部システム科学科科長 新井健生教授には、内視鏡ロボットならびにウェアラブル型インタフェースについて興味を持っていただき、数々の貴重な御助言と教育的な御意見をいただきました。本内視鏡ロボットの研究を始めるにあたり我々は新井健生教授の研究成果を勉強させていただきました。先生の御指導を仰げたことを名譽に思っています。重ねて御礼申し上げます。

大阪大学大学院基礎工学研究科 西川敦准教授には、研究の具体的な方向性や様々なアイデア、助言をいただきました。また、メディカルロボティクスならびにヒューマンマシンインタフェースの研究者としての素養を御指導していただきました。素晴らしい指導者に出会えたことは幸せであり、誇りに思っています。先生との出会いは私の人生において大きな財産です。今後、先生のような指導者また研究者になれるよう一生懸

命に努力していきます。重ねて心から深く感謝いたします。

大阪大学大学院基礎工学研究科 平井宏明助教には、研究室をゆったりとした雰囲気にしてくださり研究がしやすい気持ちにしてくださいました。ありがとうございます。

大阪大学大学院医学系研究科外科学講座消化器外科 関本貢嗣准教授には、内視鏡ロボットを構築する上でその方向性について医学的な立場から貴重な御意見をいただきました。また、内視鏡ロボットの複数回の評価実験にも御協力をいただきました。さらに、手術見学などを通じて内視鏡手術について御指導していただきました。感謝の念が絶えません。

大阪大学大学院医学系研究科外科学講座消化器外科 瀧口修司講師には、内視鏡ロボットおよび術者インタフェースについて、医学的な立場で評価してくださいました。また、多くのアイデアを提供してくださいました。ありがとうございます。

大阪大学大学院医学系研究科外科学講座消化器外科 山崎誠講師には、内視鏡ロボット（初号機）の評価実験において御協力していただきました。御礼申し上げます。

大阪大学大学院医学系研究科外科学講座消化器外科 藤原義之講師には、内視鏡ロボット（初号機）の評価実験において御協力していただきました。御礼申し上げます。

大阪大学大学院医学系研究科外科学講座消化器外科 関洋介氏には、内視鏡ロボットを臨床医の立場から意見をいただきました。また、手術見学を通じて内視鏡手術のカメラ助手の役割や問題点を教えてくださいました。さらに、大阪大学病院未来医療センターでは、鉗子による縫合方法について御指導していただきました。ありがとうございます。

大阪大学大学院医学系研究科外科学講座消化器外科 岡田一幸氏には、内視鏡ロボット（初号機）および術者インタフェースについて、医学的な立場で評価してくださいました。また、内視鏡ロボットの術者へのストレス評価について、その評価方法を確立する上で多くの実験に協力していただきました。誠にありがとうございます。

大阪大学大学院医学系研究科外科学講座消化器外科 相馬逸郎氏には、内視鏡ロボット（初号機、2号機）および術者インタフェースの評価実験に御協力いただきました。また、内視鏡ロボットの術者へのストレス評価について、その評価方法を確立する上で多くの実験に協力していただきました。さらに、腹腔鏡下胆嚢摘出術についても御指導いただきました。御礼申し上げます。

大阪大学大学院医学系研究科外科学講座消化器外科 鈴木玲氏には、内視鏡ロボットおよび術者インタフェースの評価実験に御協力いただきました。ありがとうございます。

大阪大学大学院医学系研究科外科学講座消化器外科 三吉範克氏には、内視鏡ロボット（初号機，2号機）の評価実験に御協力いただきました。また、多くの素晴らしいアイデアを提供してくださいました。ありがとうございます。

大阪大学大学院医学系研究科外科学講座消化器外科 川端良平氏には、内視鏡ロボット（2号機）および術者インタフェースの評価実験に御協力いただきました。ありがとうございます。

大阪大学大学院医学系研究科外科学講座消化器外科 金浩敏氏には、内視鏡ロボット（2号機）および術者インタフェースの評価実験に御協力いただきました。ありがとうございます。

大研医器株式会社 山田圭一代表取締役社長には、内視鏡ロボットの開発について会社を挙げて御協力をいただきました。心より深く御礼申し上げます。

大研医器株式会社 柳堀真司取締役には、内視鏡ロボットの開発を進めるにあたり様々な面で御尽力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

大研医器株式会社商品開発研究所 小林武治グループ長には、内視鏡ロボットの法律関係の業務のすべて、また年に8回もの展示会の対応など広く多くの面で御協力を賜りました。氏のリーダーシップは内視鏡ロボットの開発になくてはならないものです。ここで深く御礼申し上げます。

大研医器株式会社商品開発研究所 数原幸平氏には、内視鏡ロボットの機構の設計製作に対して御協力を賜りました。氏のものづくりに対する発想力、知識、そして技術の上に内視鏡ロボットが完成できました。また氏の人柄には、親しみを覚えました。ここで深く御礼申し上げます。

大研医器株式会社商品開発研究所 市原貴晴氏には、内視鏡ロボットの制御プログラムの開発に対して御協力を賜りました。氏の制御プログラミングは、メディカルロボットとしてとても高い信頼性を実現されたものでした。ここで深く御礼申し上げます。

大研医器株式会社商品開発研究所 倉下直人氏には、内視鏡ロボットの機構の製作やコンピュータシミュレーションによる解析など広く御協力を賜りました。ここで深く御礼申し上げます。

大研医器株式会社横浜支店 西村絵美氏には、私の健康をいつも気にかけてもらい、またいつも精神的に支えていただきました。氏のおかげで苦しいときもがんばることができました。心から深く御礼申し上げます。今後も末永くよろしく願いいたします。

株式会社総合医科学研究所 R&D 本部 杉野友啓主任には、内視鏡ロボットの術者へのストレス評価において、実験結果の解析と評価方法の確立に協力していただきました。氏のおかげで、内視鏡ロボットののための新たな評価方法を提案することができました。深く御礼申し上げます。

株式会社総合医科学研究所 R&D 本部 青柳さやか氏には、内視鏡ロボットの術者へのストレス評価において、実験結果の解析に協力していただきました。誠にありがとうございます。

大阪大学知的財産本部 吉田昭彦氏には、こめかみスイッチの知財化や産業化にたいして御協力を賜りました。ここで深く御礼申し上げます。

財団法人大阪産業振興機構 村山健氏には、内視鏡ロボットの特許について御支援いただきました。御礼申し上げます。

財団法人大阪産業振興機構 前井宏之氏には、内視鏡ロボットおよびこめかみスイッチの特許関係のすべてについて御支援いただきました。また、広い知識と深い考察により我々の技術の価値を高めてくださいました。ここで改めて深謝申し上げます。

大阪商工会議所経済産業部 松山裕氏には、御会議所主催の次世代医療システム産業化フォーラムをとおして大研医器株式会社と我々との産学連携体制を支援してくださいました。心から御礼申し上げます。

池内佐藤アンドパートナーズの弁理士 梶丘圭司氏には、内視鏡ロボットの特許出願において明細書の作成をしていただきました。素晴らしい明細書の作成していただいたことに、心より感謝しております。

池内佐藤アンドパートナーズの弁理士 川野工氏には、ウェアラブル型入力装置の特許出願において明確な明細書の作成をしていただきました。また、本入力装置の国内優先権出願においても戦略的な明細書を作成していただきました。深く感謝しております。

財団法人先端医療振興財団クラスター推進センター調査役 吉川典子氏には、内視鏡ロボットの治験に対して、多くの助言をいただきました。心から御礼申し上げます。

株式会社東レ滋賀事業所エンジニアリング開発センター 中越宏明氏には、氏が大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程に在籍していた2年間、私の研究を全般的にサポートしていただきました。氏の工学的才能には何度も助けられました。心から深く御礼申し上げます。

東京大学大学院工学研究科産業機械工学専攻 河西清一郎氏には、氏が大阪大学基礎工学部4年の時に宮崎研究室に在籍していた1年間、こめかみスイッチの開発に協力をいただきました。深く感謝いたします。また、氏の実直な人柄と熱心に研究に打ち込む姿には心を打たれました。

東海旅客鉄道株式会社執行役員 白國紀行氏には、超電導リニアの開発を例にし、安全の確保の方法、ものづくりの基本を伝授していただきました。深く感謝いたします。

株式会社東芝研究開発センター 吉見卓氏には、ロボットの研究者として多くの助言をいただきました。また、能動鉗子などの最新研究を見学させていただきました。大変お世話になりました。御礼申し上げます。

三菱電機株式会社先端技術研究所 吉桑義雄氏には、兄のように私の私生活や研究に対して親身にアドバイスをしていただきました。また、先端技術研究所ならびに伊丹製作所にての最新研究成果を見学させていただきました。氏の人柄は、研究室をいつも明るい楽しい雰囲気にしてくださいました。心より深く感謝いたします。

大阪大学大学院歯学研究科総合機能口腔科学専攻 山口哲助教には、氏が大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程2年の時、私の学生生活や研究全般についてとてもお世話になりました。研究に行き詰った時にはいつも助けていただきました。氏には、努力することの素晴らしさを教わりました。心から感謝します。

株式会社東レ滋賀事業所エンジニアリング開発センター 伊藤嘉奈子氏には、こめかみスイッチ開発段階で被験者をしていただきました。また、氏が大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程に在学中には、内視鏡ロボットについて多くの貴重な助言をいただきました。ありがとうございます。

株式会社神戸製鋼所 田中健太氏には、氏が大阪大学基礎工学部4年の時に宮崎研究室に在籍していた1年間、複合生体情報を用いたヒューマンマシンインタフェースの研究に関して共同で研究をさせていただきました。氏の発想力と考察の深さ、研究に対する熱意と情熱には感銘を受けました。ここで改めて深く御礼申し上げます。

三菱電機株式会社名古屋製作所 HMI システム部 小荒健吾氏には、こめかみスイッチの研究についてアドバイスをいただきました。ありがとうございます。

森谷邦幸先生には、電気工学全般について深く御指導いただきました。また社会人としての心構え、仕事に対する姿勢を教えてくださいました。本当に氏からは多くのことを学びました。さらに氏は私をいつも励まし、勇気付けてくださいました。最大限の感謝を申し上げます。

森井貞光先生には、情報技術全般について深く御指導いただきました。また、氏は私の社会人生活の中で最も辛い時期に、何度も、何度も私を助けてくださいました。さらに、氏はロボティクスを研究するきっかけを与えてくれました。今の私があるのは、氏のおかげです。特に深く御礼申し上げます。

有限会社ルウ研究所 石塚庸三代表取締役には、研究者としての心構えを御指導していただきました。厚く感謝いたします。

株式会社東芝研究開発センター 荒木猛司氏には、超電導工学研究所にて超電導物質の研究開発を通して実験の大切さを教えていただきました。心より御礼申し上げます。

JaiGuru 寺岡尊司氏には、こめかみスイッチの写真を撮影していただきました。私の要求を満足する写真を高度な技術を駆使して実現してくださいました。御礼申し上げます。

JaiGuru 前川結衣氏には、こめかみスイッチのモデルをしていただきました。氏がモデルしてくれた写真は、論文や新聞記事、そして展示会資料などに使用され、多くの人の注目を集めることができました。氏の表現力により、こめかみスイッチの魅力を十分に社会へ伝えることができました。厚く感謝いたします。

大阪大学基礎工学部 システム科学科機械科学コース事務室 花見和子氏には、私の博士前期課程と博士後期課程で必要な事務的な手続きを助けていただきました。大学院入学試験資料などの送付をしていただくなど、入学前から助けていただきました。事務室に氏がおられてとても心強かったです。心から厚く御礼申し上げます。

大阪大学大学院基礎工学研究科 専攻・学科事務室（機能デザイン領域担当） 奥村まゆみ氏には、平成18年4月から平成20年3月31日までの2年間にわたり私の博士後期課程で必要な事務的な手続きを助けていただきました。また、平成20年3月3日付の読売新聞に掲載された記事“携帯プレーヤー 両目つむり再生 阪大研究員、装置を開発”では、写真のモデルをしていただきました。急なお願いにも関わらず快く引き受けてくださり、とても助かりました。厚く御礼申し上げます。

大阪大学大学院基礎工学研究科 機能デザイン領域事務室 田中亮子氏には、平成20年度に事務的な手続きを助けていただきました。心から感謝いたします。

大阪大学基礎工学部 システム科学科機械科学コース事務室 芥川幸子氏には、平成17年4月から平成19年9月まで事務的な手続きを助けていただきました。感謝いたします。

大阪大学大学院基礎工学研究科 機能デザイン領域事務室 安藤菜見子氏には、平成

17年6月から平成18年10月まで事務的な手続きを助けていただきました。謝意を示します。

大阪大学ゆらぎプロジェクト秘書 佐藤久美氏には、平成18年度に事務的な手続きを助けていただきました。感謝いたします。

大阪大学ゆらぎプロジェクト秘書 坊農文氏には、平成19年度に事務的な手続きを助けていただきました。多くの海外出張の手続きをしていただきました。厚く御礼申し上げます。

大阪大学ゆらぎプロジェクト秘書 山田佳美には、平成20年度に事務的な手続きを助けていただきました。心から感謝いたします。

大阪大学大学院医学系研究科外科学講座消化器外科秘書 平郁子氏には、医学研究科と基礎工学研究科間で必要な様々な事務的な手続きを助けていただきました。御礼を述べます。

日本経済新聞社大阪本社記者 草塩拓郎氏には、こめかみスイッチの取材を通してお世話になりました。心から深く御礼申し上げます。

読売新聞大阪本社記事 藤田桂子氏には、内視鏡ロボットとこめかみスイッチの取材を通してお世話になりました。厚く御礼申し上げます。

日刊工業新聞社大阪支社 原田千鶴氏には、こめかみスイッチの取材を通してお世話になりました。御礼申し上げます。

株式会社 NEXTEP 制作本部 逸見忠利氏には、こめかみスイッチの取材を通してお世話になりました。心から深く御礼申し上げます。

株式会社 テーク・ワン 小阪英義氏には、こめかみスイッチの取材を通してお世話になりました。御礼申し上げます。

株式会社 エー・ビー・シーリブラ制作部 春名雄児氏には、こめかみスイッチの取材を通してお世話になりました。厚く御礼申し上げます。

ジョンソンエンドジョンソン株式会社エチコン事業部の皆様には、動物実験に際して大変お世話になりました。

タイコヘルスケアジャパンの皆様には、動物実験に際して大変お世話になりました。本研究のための犠牲となった動物実験の諸霊に対し、慎んで哀悼の意を奉げます。様々な形で私の研究を支えて頂いた宮崎研究室の皆様にも厚く御礼申し上げます。

最後に、これまで学生生活と支えてくださった父 美人, 母 千佐子, 姉 喜多川仁美, 母方の祖父 枝谷懿幸, 母方の祖母 枝谷璋子, そして亡き父方の祖父 谷口智雄に感謝の意を表します。

なお, 本研究は

- 統括責任者：大阪大学 鷺田清一学長, 文部科学省科学技術振興調整費 先端融合領域イノベーション創出拠点の形成：生体ゆらぎに学ぶ知的人工物と情報システム
- 研究代表者：大阪大学大学院基礎工学研究科 西川敦准教授, 文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (A) (課題番号：19206047)
- 研究代表者：大阪大学大学院医学系研究科 関本貢嗣准教授, 文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (C) (課題番号：16591253)
- 研究代表者：大阪大学大学院基礎工学研究科 西川敦准教授, 文部科学省科学研究費補助金若手研究 (B) (課題番号：17760352)
- 研究代表者：大阪大学大学院基礎工学研究科 谷口和弘, 文部科学省科学研究費補助金若手研究 (B) (課題番号：20700110)
- 研究代表者：大阪大学大学院基礎工学研究科 西川敦准教授, 独立行政法人 科学技術振興機構 平成 19 年度シーズ発掘試験 研究課題名：医用ディスプレイブルリニアアクチュエータの開発
- 研究代表者：大阪大学大学院基礎工学研究科 西川敦准教授, 独立行政法人 科学技術振興機構 平成 17 年度「シーズ育成試験 研究課題名：斜視鏡の特性を利用した小型軽量内視鏡把持マニピュレータ」
- 谷口和弘, 大阪大学先端イノベーションセンター ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー部門の第 4 回ベンチャー サポートプログラム
- 谷口和弘, 財団法人 NEC C&C 財団国際会議論文発表者助成事業 2007 年度後期国際会議論文発表者助成金

の御支援を受けました。御礼申し上げます。

2008 年 8 月

谷口和弘

参考文献

<第1章>

- [I 1] 中原英臣, 佐川峻: “新・進化論が変わる—ゲノム時代にダーウィンの進化論は生き残るか—”, 講談社, 2008.
- [I 2] Edward T. Hall: “The Hidden Dimension,” Doubleday & Company Inc., 1969.
- [I 3] 安村通晃: “コミュニケーションとインタラクション”, KEIO SFC JOURNAL, vol. 2, no. 1, pp. 10-29, 2003.
- [I 4] Claude Elwood Shannon: “A Mathematical Theory of Communication,” The Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379-423, 623-656, 1948.
- [I 5] Kensington Orbit: <http://us.kensington.com/> [accessed July 24, 2008]
- [I 6] Edgar Matias, I. Scott MacKenzie, William Buxton: “One-handed touch typing on a QWERTY Keyboard,” International Journal of Human - Computer Interaction, vol. 11, no. 1, pp. 1-27, 1996.
- [I 7] 蒔田哲郎, 上田俊史, 岡本達樹, 道盛厚司, 平澤宏祐: “ウェアラブルディスプレイ SCOPO” 三菱電機技報 2004 年 5 月号, pp. 29, 2004.
- [I 8] MGD-01: <http://www.goldendance.co.jp/> [accessed July 24, 2008]
- [I 9] Russell H. Taylor, Dan Stoianovici: “Medical robotics in computer-integrated surgery,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 19, no. 5, pp. 765-781, 2003.
- [I 10] 西川敦: “内視鏡手術の術者インタフェースについて”, 日本コンピュータ外科学会誌. Vol. 6, no. 2, pp. 69-74, 2004.
- [I 11] Yik San Kwok, Joahin Hou, Edmond A. Jonckheere, Samad Hayati: “A Robot with Improved Absolute Positioning Accuracy for CT Guided Stereotactic Brain Surgery”, IEEE transaction on biomedical engineering, Vol. 35, No. 2, pp. 153-160, 1988.

- [I 12] Russel H. Taylor, Brent D. Mittelstadt, Howard A. Paul, William Hanson, Peter Kazanzides, Joel F. Zuhars, Bill Williamson, Bela L. Musits, Edward Glassman, William L. Bargar: "An Image-Directed Robotic System for Precise Orthopaedic Surgery", IEEE transactions on robotics and automation, vol. 10, no. 3, pp. 261-275, 1994.
- [I 13] J. M. Sackier, Y. Wang: "Robotically assisted laparoscopic surgery from concept to development," Surgical Endoscopy vol. 8, no. 1, pp. 63-66, 1994.

<第 2 章>

- [II 1] 福本雅朗, 杉村利明: "NTT 技術ジャーナル", vol. 15, no. 9, pp. -57 -60, 2003.
- [II 2] 政策科学研究会, 「あさつてのオフィス研究会」編著: "着るオフィスー「モバイル」から「ウェアラブル」へ", 中央公論社, 2000.
- [II 3] Edgar Matias, I. Scott MacKenzie, William Buxton: "Half-qwerty: Typing with one hand using our two-handed skills," In CHI' 96 conference companion companion, pp. 51-51. ACM Press, April 1996.
- [II 4] 5DT DataGlove: <http://www.5dt.com/hardware.html> [accessed July 24, 2008]
- [II 5] CyberGlove and Cyber Touch:
http://www.immersion.com/3d/products/cyber_glove.php [accessed July 24, 2008]
- [II 6] Wii remote controller: <http://www.nintendo.co.jp/>
- [II 7] Masaaki Fukumoto, Yoshinobu Tonomura: "Body Coupled FingerRing :Wireless Wearable Key Board," in proceedings of CHI' 97, pp. 147-154, 1997.
- [II 8] Hiroshi Sasaki, Tomohiro Kuroda, Peter Antoniac, Yoshitsugu Manabe, Kunishiro Chihara: "Hand - menu system: A deviceless virtual input interface for wearable computers," CEAI, Vol. 8, No. 2, pp. 44 - 53, 2006.
- [II 9] 福本雅朗, 外村佳伸: " "指釘" : 手首装着型コマンド入力機構," 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 2, pp. 389 - 398, 1999.

- [II 10] J. J. Tecce, J. Gips, C. P. Oliveri, L. J. Pok, M. R. Consiglio : " Eye movement control of computer function , " International Journal of Psychophysiology 29, pp. 319 - 325. 1998.
- [II 11] 梶並淑子, 松尾宏明, 扇元直人 : "咀嚼回数計数装置", 特許出願公開番号 2002 - 253520, 日本国特許庁, 2002.
- [II 12] 白川裕記, 雛元昌弘 : "側頭筋の動きをカウントする咀嚼回数計", 特許出願公開番号 2005 - 329213, 日本国特許庁, 2005.
- [II 13] 鳴海弥生, 小館淳一 : "人体異常検知通信方法及び人体異常検知通信端末並びに側頭筋動作検出器", 特許出願公開番号 2004-258761, 日本国特許庁, 2004.
- [II 14] 小幡賢三, 佐伯高志, 田所嘉昭 : " 赤外線センサを用いた無接触型咀嚼回数測定装置, " 計測自動制御学会論文集, Vol. 38, No. 9, pp. 747-752, 2002.
- [II 15] optical sensors RPR-220 : <http://www.rohm.com/> [accessed July 24, 2008]
- [II 16] single-tip-computer PIC12F683 : <http://www.microchip.com/> [accessed July 24, 2008]
- [II 17] 佐々木正人 : "アフォーダンス入門", 講談社学術文庫, 2008
- [II 18] Donald A. Norman : " The psychology of everyday things, " Basic Books, 1988.
- [II 19] Tom Stafford, Matt Webb : "Minde Hacks, " O' Reilly Media inc., 2004.
- [II 20] Desmond Morris : "Man watching, " Jonathan Gape. 1977.
- [II 21] Eckhard H. Hess : " 瞳孔の大きさとコミュニケーション, " 日経サイエンス 1976年1月号, pp. 98-105, 1976.

<第3章>

- [III 1] J. M. Sackier, Y. Wang: "Robotically assisted laparoscopic surgery from concept to development, " Surgical Endoscopy vol. 8, no. 1, pp. 63-66, 1994.
- [III 2] Patrick A. Finlay: "A robotic camera holder for laparoscopy, " In proceedings of 10th International Conference on Advanced Robotics. Workshop 2 on Medical Robotics, pp 129-132, 2001.
- [III 3] Atsushi Nishikawa, Toshinori Hosoi, Kengo Koara, Daiji Negoro, Aya Hikita, Shuichi Asano, Haruhiko Kakutani, Fumio Miyazaki, Mitsugu Sekimoto, Masayoshi Yasui, Yasuhiro Miyake, Shuji Takiguchi, Morito Monden: "FAce MOUSe: A Novel

- Human-Machine Interface for Controlling the Position of a Laparoscope,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.19, no.5, pp. 825-841, 2003.
- [III4] Kazuhiro Taniguchi, Atsushi Nishikawa, Fumio Miyazaki, Mitsugu Sekimoto, Masayoshi Yasui, Shuji Takiguchi, Yosuke Seki, Morito Monden: “Face MOUSE Easy click:easy to use interface desing for controlling the position of a laparoscope ”, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2006), Vol. 1, sup. 1 p. 508, 2006.
- [III5] 谷口和弘, 西川敦, 養田隆宏, 伊藤嘉奈子, 関本貢嗣, 安井昌義, 瀧口修司, 門田守人, 宮崎文夫:”斜視鏡の光学特性を利用した小型内視鏡マニピュレータの開発”, 生体医工学, Vol. 45, No. 1 , pp. 36-47, 2007.
- [III6] Kazuhiro Taniguchi, Atsushi Nishikawa, Takahiro Yohda, Mitsugu Sekimoto, Masayoshi Yasui, Shuji Takiguchi, Yousuke Seki, Morito Monden, Fumio Miyazaki : “COVER: Compact Oblique-Viewing Endoscope Robot for laparoscopic surgery,” International journal of computer assisted radiology and surgery, vol. 1, supp. 1, pp. 207 - 209, 2006.
- [III7] R. Hurteau, S. DeSantis, E. Begin, M. Gagner : “Laparoecopic Surgery Assisted by a Robotic Cameraman: Concept and Experimental Results,” IEEE, pp. 2286 - 2289, 1994.
- [III8] Russel. H. Taylor, Janez Funda, Ben Eldridge, Steve Gomory, Kreg Gruben, David LaRose, Mark Talamini, Louis Kavoussi, James Anderson : “A telerobotic assistant for laparoscopic surgery,” IEEE Engineering in Medichine and Biology, vol. 14, no. 3, May-June 1995, pp. 279 - 288.
- [III9] V. F. Munoz, C. Vara - Thorbeck, J. G. DeGabriel, J. F. Lozano, E. Sanchez-Badajoz, A. Garcia-Cerezo, R. Toscano, A. Jimenez-Garrido : “A medical robotic assistant for minimally incasive surgery,” In proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.2901 - 2906, 2000.
- [III10] Victor. F. Munoz, J. Gomez De Gabriel, I. Garcia-Morales, J. Fernandez-Lozano, J. Morales: “Pivoting motion control for a laparoscopic assistant robot and human clinical trials,” Advanced Robotics, vol. 19, no. 6, pp. 694 - 712, 2005.

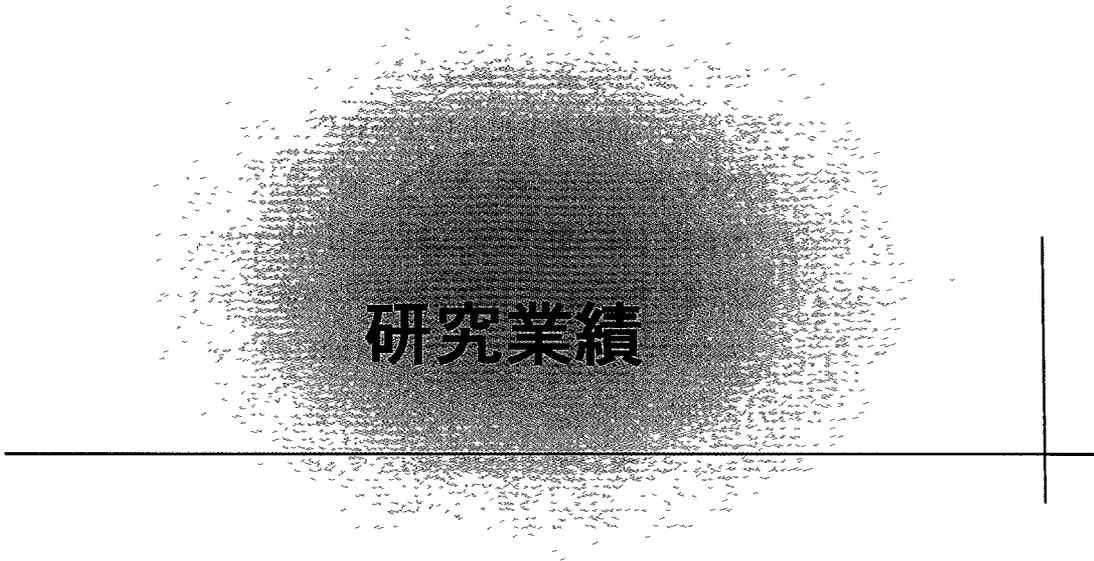
- [Ⅲ11] R. Polet, J. Donnez : “Gynecologic laparoscopic surgery with a palm-controlled laparoscope holder,” The Journal of the American Association of Gynecologic Laparoscopists 73-78, 2004.
- [Ⅲ12] 水野均 : “ロボテック・エンドサージェリー (RES)”, 第 5 回ロボットシンポジウム, pp. 115-118, 1995.
- [Ⅲ13] 小林英津子, 宮本潮, 大山国夫 : “低侵襲手術支援システム Naviot™ の開発”, 日本ロボット学会誌, vol. 23, no. 2, pp. 168-171, 2005.
- [Ⅲ14] J. Funda, K. Gruben, B. Eldridge, S. Gomory, R. H. Taylor : “Control and evaluation of a 7-axis surgical robot for laparoscopy,” In proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 1477-1484, 1995.
- [Ⅲ15] P. Berkelman, E. Boidard, P. Cinquin, J. Troccaz : “Control and User Interface Design for Compact Manipulators in Minimally-Invasive Surgery,” In proceedings of IEEE Conference on Control Applications, pp. 25-30, 2005.
- [Ⅲ16] Yun-Ju Lee, Jonathan Kim, Seong-Young Ko, Woo-Jung Lee, and Dong-Soo Kwon, “Design of a Compact Laparoscopic Assistant Robot : KaLAR,” In proceedings of the International Conference on Control Automation and Systems, pp. 2648-2653, 2003.
- [Ⅲ17] G. F. Buess, A. Arezzo, M. O. Schurr, F. Ulmer, H. Fisher, L. Gumb, T. Testa, C. Nobman : “A new remote-controlled endoscope positioning system for endoscopic solo surgery The FIPS Endoarm,” Surgical Endoscopy, Vol. 14, pp. 395 - 399, 2000.
- [Ⅲ18] T. Kimura, Y. Umehara, S. Matsumoto : “Laparoscopic cholecystectomy performed by a single surgeon using a visual field tracking camera,” Surgical Endoscopy, vol. 14, pp. 825 - 829, 2000.
- [Ⅲ19] Etsuko Kobayashi, Kim Daeyong, Ichiro Sakuma, Takeyoshi Dohi, Daijo : “A new wide-angle view endoscopic robot using wedge prisms,” In proceedings of CARS2001, pp. 149 - 153, 2001.
- [Ⅲ20] Y. Yamauchi, J. Yamashita, Y. Fukui, K. Yokoyama, T. Sekiya, E. Ito, M. Kanai, T. Fukuyo, D. Hashimoto, H. Iseki, K. Takakura : “A dual-view endoscope with image shift,” In proceedings of CARS2002, pp. 183 - 187, 2002.
- [Ⅲ21] 中口俊哉, 牧野治文, 五十嵐辰男, 上村健二, 津村徳道, 三宅洋一 : “腹腔鏡下手術における自動拡大追尾システムの実装”, 生体医工学会, vol. 43, no. 4, pp. 685-693, 2005.

- [III22] Nancy G. Leveson, Clark S. Turner: "An Investigation of the Therac-25 Accidents," IEEE Computer, vol. 26, no. 7, pp.18-41, 1993.
- [III23] 波多伸彦:メディカルロボティクス 岩波講座ロボット学 6 ロボットフロンティア第4章, pp.105-125, 岩波書店, 2003.
- [III24] 鎮西清行: "手術ロボティック機器の安全性—ナビゲーション医療分野のガイドライン—", 日本ロボット学会誌, vol. 25, no. 7, pp.1168 - 1171, 2007.
- [III25] 佐久間一朗, 小林英津子, 土肥健純, 橋爪誠: "内視鏡手術ロボット実用化で経験した技術的課題", 生体医工学第44巻, p.246, 2006.
- [III26] 西川敦: "内視鏡手術の術者インタフェースについて", 日本コンピュータ外科学会誌. Vol. 6, no. 2, pp.69-74, 2004.
- [III27] J. P. Merlet: Parallel Robot. Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [III28] Lung Wen Tsai: Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators, Wiley, 1999.
- [III29] 谷口和弘, 西川敦, 数原幸平, 小林武治, 関本貢嗣, 瀧口修司, 岡田幸一, 門田守人, 宮崎文夫: "医用水圧駆動型リニアアクチュエータの開発", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2007講演会論文集CD-ROM, 1P1-G06, 2007.
- [III30] Atsushi Nishikawa, Hiroaki Nakagoe, Kazuhiro Taniguchi, Fumio Miyazaki, Mitsugu Sekimoto, Shuji Takiguchi, and Morito Monden: "How Does the Camera Assistant Decide the Zooming Ratio of Laparoscopic Images? -Analysis and Implementation-", In proceedings of the 11th International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI 2008), 2008.
- [III31] Kazuhiro Taniguchi, Atsushi Nishikawa, Tomohiro Sugino, Mitsugu Sekimoto, Kazuyuki Okada, Shuji Takiguchi, Morito Monden, Fumio Miyazaki: "Evaluating the surgeon's stress when using surgical assistant robots," In proceedings of IEEE international symposium on robot and human interactive communication 2007, CD-ROM, WP-19, 2007.
- [III32] B. M. Kudielka, A. Buske-Kirschbaum, D. H. Hellhammer, and C. Kirschbaum: "HPA axis responses to laboratory psychosocial stress in healthy elderly adults, younger adults, and children: impact of age and gender," Psychoneuroendocrinology, Vol. 29, Iss. 1, pp. 83-98, 2004.

- [III33] Ure Markus Nater, Roberto La Marca, Ladina Floin, Anthony Moses, Wolfgang Langhans, Markus M. Koller, and Ulrike Ehlert: “Stress-induced changes in human salivary alpha-amylase activity - associations with adrenergic activity,” *Psychoneuroendocrinology*, Vo. 31, Iss. 1, pp. 49-58 2006.

<第4章>

- [IV1] 坂村健, “ユビキタスとは何か—情報・技術・人間”, 岩波新書, 2007.
- [IV2] 土郎正宗, “攻殻機動隊”, 講談社, 1991.
- [IV3] 櫻井圭記, “フィロソフィア・ロボティカー人間に近づくロボットに近づく人間—”, 毎日コミュニケーションズ, 2007.



研究業績

発表論文

1. 学術論文誌：6件（投稿中3件）
2. 解説記事：1件
3. 国際学会論文：12件
4. 国内研究会（査読有り）：1件
5. 全国大会：22件
6. 研究成果の出展：10件

招待講演・研修会：2件

新聞等報道記事：24件

広報誌等記事：8件

受賞関係：4件

特許：3件（国際公開1件，国際出願1件，国内出願1件）

研究費助成：3件

発表論文

1. 学術論文

1. 谷口和弘, 西川敦, 養田隆宏, 伊藤嘉奈子, 関本貢嗣, 安井昌義, 瀧口修司, 門田守人, 宮崎文夫, "斜視鏡の光学特性を利用した小型内視鏡マニピュレータの開発," 生体医工学, Vol. 45, No. 1, pp. 36-47 (2007年3月).
2. Kazuhiro Taniguchi, Atsushi Nishikawa, Seiichiro Kawanishi, and Fumio Miyazaki, "KOMEKAMI Switch: A Novel Wearable Input Device Using Movement of Temple," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 20, No. 2, pp. 260-272 (Apr. 2008).
3. 谷口和弘, 西川敦, 中越宏明, 小林武治, 数原幸平, 市原貴晴, 倉下直人, 青柳さやか, 杉野友啓, 関本貢嗣, 瀧口修司, 門田守人, 宮崎文夫, "ディスプレイ型内視鏡把持位置決めロボット," 日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 6 (2008) (掲載決定).
4. 谷口和弘, 西川敦, 宮崎文夫, "身体と物理的な接触を前提とするインタラクティブメディアの基本モデルの提案," ヒューマンインタフェース学会論文誌 (投稿中).
5. 谷口和弘, 西川敦, 宮崎文夫, "瞬きによる皮膚の変動を機器操作に利用したウェアラブル型入力装置の設計と実装," ヒューマンインタフェース学会論文誌 (投稿中).
6. 谷口和弘, 西川敦, 小林武治, 数原幸平, 市原貴晴, 倉下直人, 関本貢嗣, 瀧口修司, 三吉範克, 土岐祐一郎, 森正樹, 宮崎文夫, "水圧駆動型内視鏡把持位置決めロボットの in-vivo 評価," 生体医工学 (投稿中).

2. 解説記事

1. 谷口和弘, 西川敦, 宮崎文夫, "こめかみの動きでスイッチ操作", 検査技術, Vol. 13, No. 6, pp. 47-55 (2008年6月).

3. 国際会議論文

1. Kazuhiro Taniguchi, Atsushi Nishikawa, Takahiro Yohda, Mitsugu Sekimoto, Masayoshi Yasui, Shuji Takiguchi, Yosuke Seki, Morito Monden, Fumio Miyazaki, "COVER: Compact Oblique Viewing Endoscope Robot for laparoscopic surgery," CARS2006 -Computer Assisted Radiology and Surgery, Proceedings of the 20th International Congress and Exhibition, 207 (Osaka, 2006) .
2. Kazuhiro Taniguchi, Atsushi Nishikawa, Mitsugu Sekimoto, Masayoshi Yasui, Shuji Takiguchi, Yosuke Seki, Morito Monden, Fumio Miyazaki, "Design of a novel wearable laparoscope manipulator :SMART ," CARS2006 -Computer Assisted Radiology and Surgery, Proceedings of the 20th International Congress and Exhibition, 213 (Osaka, 2006) .
3. Kazuhiro Taniguchi, Atsushi Nishikawa, Mitsugu Sekimoto, Masayoshi Yasui, Shuji Takiguchi, Yosuke Seki, Morito Monden, Fumio Miyazaki, "FAce MOUSE Easy click:easy to use interface design for controlling the position of a laparoscope," CARS2006 -Computer Assisted Radiology and Surgery, Proceedings of the 20th International Congress and Exhibition, 508 (Osaka, 2006) .
4. Atsushi Nishikawa, Kanako Ito, Hiroaki Nakagoe, Kazuhiro Taniguchi, Mitsugu Sekimoto, Shuji Takiguchi, Yosuke Seki, Masayoshi Yasui, Kazuyuki Okada, Morito Monden, Fumio Miyazaki, "Automatic Positioning of a Laparoscope by Preoperative Workspace Planning and Intraoperative 3D Instrument Tracking, "MICCAI 2006 Workshop Proceedings, Workshop on Medical Robotics: Systems and Technology towards Open Architecture, 82 (Copenhagen, Denmark, 2006) .
5. Kazuhiro Taniguchi, Atsushi Nishikawa, Hiroaki Nakagoe, Kazuyuki Okada, Shuji Takiguchi, Mitsugu Sekimoto, Morito Monden, and Fumio Miyazaki, "Study of Evaluation of Surgical Assistant Systems: Surgeon's Stress Evaluation Using Saliva and Acceleration Plethysmogram," CARS2007 -Computer Assisted Radiology and Surgery, Proceedings of the 21st

- International Congress and Exhibition, S484 (Berlin, Germany, Jun. 2007).
6. Kazuhiro Taniguchi, Atsushi Nishikawa, Hiroaki Nakagoe, Tomohiro Sugino, Kazuyuki Okada, Shuji Takiguchi, Mitsugu Sekimoto, Morito Monden, and Fumio Miyazaki, "Evaluating the Surgeon's Stress When Using Surgical Assistant Robots," Proceedings of the 16th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication 2007 (IEEE RO-MAN2007), WP-19 (Jeju, Korea, Aug. 2007).
 7. Kazuhiro Taniguchi, Atsushi Nishikawa, Hiroaki Nakagoe, Kouhei Kazuhara, Takeharu Kobayashi, Takaharu Ichihara, Mitsugu Sekimoto, Kazuyuki Okada, Shuji Takiguchi, Morito Monden, and Fumio Miyazaki, "Development of a Novel Disposable Laparoscope Manipulator," Proceedings of the 19th International Conference of Society for Medical Innovation and Technology (SMIT2007), JS3-7 (Sendai, Nov. 2007).
 8. Kazuhiro Taniguchi, Atsushi Nishikawa, Fumio Miyazaki, Takeharu Kobayashi, Kouhei Kazuhara, Takaharu Ichihara, Mitsugu Sekimoto, Shuji Takiguchi, and Morito Monden, "Development of a Safe Disposable Laparoscope Manipulator using Hydraulic Actuators," Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (IEEE-ROBIO2007), SE4 (1) (Sanya, China, Dec. 2007) (A Finalist of Best Conference Paper Award of the IEEE ROBIO 2007 Conference).
 9. Kazuhiro Taniguchi, Atsushi Nishikawa, Fumio Miyazaki, Takeharu Kobayashi, Kouhei Kazuhara, Takaharu Ichihara, Naoto Kurashita, Mitsugu Sekimoto, Shuji Takiguchi, and Morito Monden, "A Disposable Laparoscope Manipulator using Hydraulic Actuators," Proceedings of the 2008 Annual Meeting of the Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons (SAGES 2008), ETP058, pp. 318-319 (Philadelphia, USA, Apr. 2008).
 10. Kazuhiro Taniguchi, Atsushi Nishikawa, Takeharu Kobayashi, Kouhei Kazuhara, Takaharu Ichihara, Naoto Kurashita, Mitsugu Sekimoto, Shuji Takiguchi, Morito Monden, and Fumio Miyazaki, "A Disposable Laparoscope Manipulator using Hydraulic Actuators with Air Spring," CARS2008

- Computer Assisted Radiology and Surgery, Proceedings of the 22nd International Congress and Exhibition (Barcelona, Spain, Jun. 2008).
11. Kazuhiro Taniguchi, Atsushi Nishikawa, Takeharu Kobayashi, Kouhei Kazuhara, Takaharu Ichihara, Naoto Kurashita, Mitsugu Sekimoto, Shuji Takiguchi, Morito Monden, and Fumio Miyazaki, "Development of a Disposable Laparoscope Manipulator using Hydraulic Actuators (Second Prototype)," Proceedings of the 20th International Conference of Society for Medical Innovation and Technology (SMIT2008) (Vienna, Austria, Aug. 2008).
 12. Atsushi Nishikawa, Hiroaki Nakagoe, Kazuhiro Taniguchi, Yasuo Yamada, Mitsugu Sekimoto, Shuji Takiguchi, and Morito , Fumio Miyazaki, "MondenHow Does the Camera Assistant Decide the Zooming Ratio of Laparoscopic Images? --Analysis and Implementation--, " Proceedings of the 11th International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI 2008) (New York, USA, Sep.2008).

4. 国内研究会（査読有り）

1. 谷口和弘, 西川敦, 宮崎文夫, "こめかみスイッチ：瞬きパチパチでスイッチカチカチな常時装用入力装置," インタラクシオン2008 論文集, pp. 25-26 (学術総合センター, 2008年3月). 採択率 39.1%.

5. 全国大会

1. 谷口和弘, 西川敦, 養田隆宏, 山口哲, 伊藤嘉奈子, 宮崎文夫, 関本貢 嗣, 安井 昌義, 瀧口修司, 門田守人, "斜視鏡の特性を利用した小型腹腔鏡把持マニピュレータの開発", 第 14 回日本コンピュータ外科学会大会, Vol. 7, No. 3, pp. 505-506, (海外職業訓練協会 (OVTA: オブタ) 研修施設, 2005年11月).

2. 谷口和弘, 西川敦, 山口哲, 宮崎文夫, “腹腔鏡下手術のためのフェイストラッキング型術者インタフェースの生理的評価”, 電子情報通信学会 情報・システムソサイエティ誌 2006年総合大会特別号学生ポスターセッション, p. 94 (国士舘大学世田谷キャンパス, 2006年3月).
3. 谷口和弘, 西川敦, 宮崎文夫, 関本貢嗣, 瀧口修司, 関洋介, 安井昌義, 門田守人, “患者着用型腹腔鏡把持マニピュレータの提案”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006, 2A1-A07 (早稲田大学大久保キャンパス, 2006年5月).
4. 谷口和弘, 西川敦, 宮崎文夫, 関本貢嗣, 安井昌義, 瀧口修司, 関洋介, 門田守人, “腹腔鏡把持ロボット用フェイストラッキング型インタフェース (Face MOUSE) の使いやすさの評価とその検討”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006, 2A1-A32 (早稲田大学大久保キャンパス, 2006年5月).
5. 谷口和弘, 西川敦, 宮崎文夫, 関本貢嗣, 安井昌義, 瀧口修司, 関洋介, 門田守人, “人間工学に基づいた腹腔鏡把持ロボット用フェイストラッキング型インタフェースの開発と評価”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006, 2A1-A33 (早稲田大学大久保キャンパス, 2006年5月).
6. 伊藤嘉奈子, 西川敦, 谷口和弘, 関本貢嗣, 安井昌義, 瀧口修司, 関洋介, 門田守人, 宮崎文夫, “手術器具の3次元追跡と作業領域の術前プランニング導入による術中の腹腔鏡自動位置決め”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006, 2A1-A02 (早稲田大学大久保キャンパス, 2006年5月).
7. Lee Ji Yuk, 西川敦, 谷口和弘, 伊藤嘉奈子, 関本貢嗣, 安井昌義, 瀧口修司, 関洋介, 門田守人, 宮崎文夫, “デジタルズームの選択的利用に基づく腹腔鏡マニピュレータシステム”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006, 2A1-A08 (早稲田大学大久保キャンパス, 2006年5月).
8. 東修士, 西川敦, 伊藤嘉奈子, 谷口和弘, 関本貢嗣, 安井昌義, 瀧口修司, 関洋介, 門田守人, 宮崎文夫, “術具ポインタ (SIMPLE): 手術器具先端の3次元位置情報に基づく腹腔鏡操作インタフェース”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006, 2A1-A34 (早稲田大学大久保キャンパス, 2006年5月).

9. 谷口和弘, 西川敦, 養田隆宏, 伊藤嘉奈子, 宮崎文夫, 関本貢 嗣, 安井 昌義, 瀧口修司, 門田守人, "斜視鏡の特性を利用した小型内視鏡把持マニピュレータの開発", 生体医工学シンポジウム 2006, No. 3-1 (新潟大学, 2006年9月).
10. 谷口和弘, 西川敦, 中越宏明, 宮崎文夫, 杉野友啓, 岡田幸一, 関本貢嗣, 門田守人, "手術支援システムの評価方法の検討-唾液によるストレス評価- 日本コンピュータ外科学会誌, Vol. 8, No. 3, pp. 188-189, 2006.
11. 岡田一幸, 瀧口修司, 関本貢嗣, 山崎誠, 宮田博志, 藤原義之, 土岐祐一郎, 中越宏明, 谷口和弘, 西川敦, 宮崎文夫, 門田守人, "腹腔鏡下手術における次世代型完全追尾内視鏡操作ロボットの開発について," 第107回日本外科学会定期学術集会, SF-003-1 (大阪国際会議場, 2007年4月).
12. 谷口和弘, 西川敦, 中越宏明, 杉野友啓, 関本貢嗣, 岡田一幸, 瀧口修司, 門田守人, 宮崎文夫, "手術支援システムの評価方法の検討-唾液と加速度脈波によるストレスの客観的な評価-, " 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007, 1P1-G05 (秋田拠点センターALVE, 2007年5月).
13. 谷口和弘, 西川敦, 数原幸平, 小林武治, 関本貢嗣, 瀧口修司, 岡田一幸, 門田守人, 宮崎文夫, "医用水圧駆動型リニアアクチュエータの開発," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007, 1P1-G06 (秋田拠点センターALVE, 2007年5月).
14. 谷口和弘, 西川敦, 河西清一郎, 宮崎文夫, "生体情報を利用したウェアラブルコンピューティングのためのヒューマンマシンインタフェースの開発-こめかみの動きを機器操作に利用したヒューマンマシンインタフェース-, " 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007, 2A2-A09 (秋田拠点センターALVE, 2007年5月).
15. 谷口和弘, 西川敦, 中越宏明, 小林武治, 数原幸平, 市原貴晴, 関本貢嗣, 瀧口修司, 門田守人, 宮崎文夫, "ディスプレイ型腹腔鏡把持位置決めロボットの提案," 第25回日本ロボット学会学術講演会, 1J27 (千葉工業大学, 2007年9月).
16. 谷口和弘, 西川敦, 河西清一郎, 宮崎文夫, "こめかみの動きを機器制御に利用したヒューマンマシンインタフェース-こめかみの動きの認識アルゴリズムの検討-, " 生体医工学シンポジウム 2007, No. 2-6-2 (北海道大学大学院情報科学研究科棟, 2007年9月).

17. 谷口和弘, 西川敦, 中越宏明, 小林武治, 数原幸平, 市原貴晴, 関本貢嗣, 瀧口修司, 岡田一幸, 門田守人, 宮崎文夫, “水圧駆動型腹腔鏡マニピュレータの開発,” 第16回日本コンピュータ外科学会大会, 07(1)-001 (広島大学霞キャンパス, 2007年11月).
18. 中越宏明, 西川敦, 谷口和弘, 瀧口修司, 関本貢嗣, 門田守人, 宮崎文夫, “腹腔鏡下手術における手術器具と腹腔鏡の位置関係の分析と腹腔鏡自動位置決めアルゴリズムの提案,” 第16回日本コンピュータ外科学会大会, 07(14)-061 (広島大学霞キャンパス, 2007年11月).
19. 田中健太, 西川敦, 谷口和弘, 宮崎文夫, “複合生体情報を用いたヒューマンロボットインタフェースの開発,” 電子情報通信学会 2008年総合大会, ISS-103 (北九州学研都市, 2008年3月).
20. 西川敦, 谷口和弘, 中越宏明, 小林武治, 数原幸平, 市原貴晴, 倉下直人, 関本貢嗣, 瀧口修司, 門田守人, 宮崎文夫, “ディスプレイザブル型内視鏡把持位置決めロボットの開発-現状と今後の検討課題・将来展望-”, 日本医工学治療学会第24回学術大会, S5-5 (幕張メッセ国際会議場, 2008年4月).
21. 中越宏明, 西川敦, 谷口和弘, 瀧口修司, 関本貢嗣, 門田守人, 宮崎文夫, “腹腔鏡下手術における手術器具と腹腔鏡の位置関係の分析と腹腔鏡自動位置決めシステムの開発”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008 (ROBOMECH2008) 講演会論文, 1A1-C09 (ビッグハット, 2008年6月).
22. 三吉範克, 瀧口修司, 関本貢嗣, 谷口和弘, 西川敦, 宮崎文夫, 森正樹, “次世代型内視鏡操作ロボットの開発 (第三報) -内視鏡手術操作支援ロボットの advanced surgery への応用-” 第21回日本内視鏡外科学会総会 (パシフィコ横浜, 2008).

6. 研究成果の会展

1. "内視鏡ロボット," 第 27 回日本医学会総会企画展示:いのち ひと 夢 EXPO 2007 みんなで考える医学と医療 (大阪城ホール, 2007年3月31日-4月8日).
2. "内視鏡手術支援ロボット," 第 82 回日本医科器械学会併設機器展示会 メディカルショージャパン&ビジネスエキスポ 2007 (東京国際フォーラム, 2007年5月24日-26日).
3. "内視鏡ロボット," 第 6 回産学官連携推進会議 (国立京都国際会館, 2007年6月16日-17日).
4. "内視鏡手術支援ロボット," Entertainment Media Complex Osaka 2007 付設展示会 (ホテルニューオータニ大阪, 2007年10月24日-25日).
5. "内視鏡ロボット," 第 45 回日本人工臓器学会大会・第 2 回国際人工臓器学術大会付設展示会 (グランキューブ大阪, 2007年10月29日-30日).
6. "内視鏡ロボット," 第 16 回日本コンピュータ外科学会大会学術展示 (広島大学, 2007年11月2日-4日).
7. "内視鏡ロボット," 第 19 回先端医療技術学会国際会議 SMIT2007 付設展示会 (仙台エクセルホテル東急, 2007年11月20日-22日).
8. "内視鏡ロボット," 第 69 回日本臨床外科学会総会付設展示会 (パシフィコ横浜, 2007年11月29日-12月1日).
9. "内視鏡ロボット," 第 83 回日本医科器械学会大会学術集会併設機器展示会 国際メディカルショージャパン&ビジネスエキスポ 2008 (東京国際フォーラム, 2008年5月29日-31日).
10. "こめかみスイッチ," 第 7 回産学官連携推進会議 (国立京都国際会館 2008年6月14日-15日).

招待講演・研修会等

1. “こめかみの動きを機器操作に利用したヒューマンインタフェース,” 第3回産学技術交流マッチング定例会 (大阪大学先端科学イノベーションセンター, 2007年5月31日).
2. “こめかみスイッチの技術に関する研修,” 特許庁特許審査第二部 (大阪大学, 2008年6月3日).

新聞等報道記事

1. 西川敦, “内視鏡手術に使い捨てロボ 衛生的低価格 大阪大准教授ら開発,” 秋田魁新報, 平成19年5月9日付 夕刊 3面 (2007年5月).
2. 西川敦, “内視鏡手術に使い捨てロボ 衛生的で安価 大阪大が開発,” 東京新聞, 平成19年5月9日付 夕刊 10面 (2007年5月).
3. 西川敦, “内視鏡手術に使い捨てロボ より経済的で衛生的 大阪大准教授ら開発,” 山梨日日新聞, 平成19年5月9日付 朝刊 3面 (2007年5月).
4. 西川敦, “アーム使い捨て内視鏡手術ロボ 大阪大准教授ら開発,” 岐阜新聞, 平成19年5月9日付 朝刊 30面 (2007年5月).
5. 西川敦, “内視鏡手術に使い捨てロボ,” 北國新聞, 平成19年5月9日付 朝刊 9面 (2007年5月).
6. 西川敦, “内視鏡手術に使い捨てロボ 阪大准教授ら開発,” 神戸新聞, 平成19年5月9日付 夕刊 10面 (2007年5月).
7. 西川敦, “内視鏡手術に使い捨てロボ 阪大准教授ら開発,” 四国新聞, 平成19年5月9日付 朝刊 3面 (2007年5月).
8. 西川敦, “部品交換式の内視鏡ロボ 衛生的で安価 阪大が開発,” 高知新聞, 平成19年5月9日付 朝刊 21面 (2007年5月).
9. 西川敦, “人体接触部分 使い捨て 内視鏡手術ロボを開発,” 山口新聞, 平成19年5月9日付 朝刊 19面 (2007年5月).

10. 西川敦, "内視鏡手術に使い捨てロボ 阪大 衛生的で安価," 南日本新聞, 平成19年5月9日付 夕刊 2面 (2007年5月).
11. 西川敦, "内視鏡手術に使い捨てロボ 衛生的で低コスト 阪大が開発," 大阪日日新聞, 平成19年5月14日付 朝刊 21面 (2007年5月).
12. 宮崎文夫, "奥歯グッとかみ音楽再生 こめかみの動き検出 阪大、実用化へ," 日本経済新聞, 平成19年8月10日付 朝刊 (2007年8月).
13. Kazuhiro Taniguchi, "Clench your teeth for tunes, Japan researchers say," AFP, August 20, 2007 (2007年8月).
14. Kazuhiro Taniguchi, "Hands-free iPod thanks to true grit," The Japan Times, August 23, 2007 (2007年8月).
15. 谷口和弘, "医療技術 産学連携に成果:ロボット手術助手「産学連携から生まれたロボット技術を使った内視鏡手術の装置」," 読売新聞, 平成19年11月22日付 朝刊 (2007年11月).
16. 谷口和弘, "こめかみスイッチ," フジテレビ「偉大なる未来図鑑」, 平成19年12月29日放映 (2007年12月).
17. 谷口和弘, "顔が伝える目で語る3 こめかみスイッチ 筋肉1ミリの差でオン・オフ," 日本経済新聞, 平成20年2月28日付 夕刊 (2008年2月).
18. 谷口和弘, "携帯プレーヤー 両目つむり再生 阪大研究員、装置を開発," 読売新聞, 平成20年3月3日付 朝刊 (2008年3月).
19. Kazuhiro Taniguchi, "Coming soon to Japan: remote control with a wink," AFP, March 3, 2008 (2008年3月).
20. Kazuhiro Taniguchi, "Blink and you'll miss it: Japan's new eye iPod," Reuters, March 4, 2008 (2008年3月).
21. Kazuhiro Taniguchi, "QUICK AS A WINK," The Japan Times, Tuesday, March 4, 2008 (2008年3月).
22. 谷口和弘, "瞬きで機器オン・オフ こめかみの動き検出 阪大が装置," 日刊工業新聞, 平成20年3月4日付 朝刊 (2008年3月).
23. 谷口和弘, "こめかみスイッチ," テレビ大阪「ニュース BIZ, 発掘ヒットのたまご」, 平成20年4月1日放送 (2008年4月).
24. 谷口和弘, "こめかみスイッチ," 朝日放送「今ちゃんの『実は...』, 週刊『実は...』」, 平成20年8月6日放送 (2008年8月)

広報誌等記事

1. “第27回日本医学会総会企画展示に「内視鏡手術支援ロボット」を出展,” 阪大NOW, No. 97, p. 24, 大阪大学 (2007年6月).
2. “こめかみで機器制御 CD プレーヤーで実験,” 大阪大学新聞 第363号, 平成19年9月20日付, 大阪大学新聞会 (2007年9月).
3. “内視鏡手術支援ロボット,” 大商ニュース 第1025号, 平成20年1月25日付, 大阪商工会議所 (2008年1月).
4. “KOMEMAMI Switch: A wearable input device using movement of temple,” <http://www.osaka-u.ac.jp/eng/index.htm> (大阪大学英語版トップページ写真), 2008年3月11日~7月3日, 大阪大学 (2008年3月).
5. “こめかみスイッチ:—こめかみ付近の表皮の動きを機器操作に利用したウェアラブル型スイッチング装置—,” 平成19年度RT技術シーズ調査業務報告書, pp. 10-11, 財団法人大阪市都市型産業振興センターロボットラボラトリー (2008年3月).
6. “瞬きによる「こめかみスイッチ」を開発,” Handai Walker, No. 107, p. 14, 大阪大学生生活共同組合 (2008年4月).
7. “谷口和弘特任研究員「インタラクティブ発表賞」受賞,” 阪大NOW, No. 103, p. 51, 大阪大学 (2008年4月).
8. “関西バイオクラスタープロジェクト「次世代医療システム産業化フォーラム」,” 内視鏡手術支援ロボット, 経済産業ジャーナル, pp. 48-49, 経済産業省 (2008年6月).

受賞関係

1. 谷口和弘, 大阪大学先端科学イノベーションセンター ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー部門 第4回ベンチャーサポートプログラム サポート賞 (2007年7月).
受賞題目「こめかみスイッチ」.
2. Kazuhiro Taniguchi, Atsushi Nishikawa, Fumio Miyazaki, Takeharu Kobayashi, Kouhei Kazuhara, Takaharu Ichihara, Mitsugu Sekimoto, Shuji Takiguchi, and Morito Monden, The finalist of Best Conference Paper Award of the IEEE Robio 2007 conference (in IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics 2007) (2007年12月).
受賞題目「Development of a Safe Disposable Laparoscope Manipulator using Hydraulic Actuators」.
3. 谷口和弘, 西川敦, 宮崎文夫, 情報処理学会インタラクシオン 2008 インタラクティブ発表賞 (2008年3月).
受賞題目「こめかみスイッチ:瞬きパチパチでスイッチカチカチな常時装用入力装置」.
4. 谷口和弘, 西川敦, 河西清一郎, 宮崎文夫, Annual Report of Osaka University 2007-2008, 24 Graphics Selection, (2008年).
対象論文: Kazuhiro Taniguchi, Atsushi Nishikawa, Seiichiro Kawanishi, Fumio Miyazaki, "KOMEKAMI switch: A novel wearable input device using movement of temple," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 20, No. 2, pp. 260 - 272, 2008.

特許

1. 西川敦, 宮崎文夫, 谷口和弘, 関本貢嗣, 門田守人, "MEDICAL MANIPULATOR AND MEDICAL MANIPULATOR DEVICE USING THE SAME, " WO/2007/136090 (2006年5月) .
2. 西川敦, 宮崎文夫, 谷口和弘, 関本貢嗣, 数原幸平, 小林武治, 市原貴晴, "医療用マニピュレータ装置, " 特願 PCT/JP2008/056194 (2007年3月)
3. 西川敦, 宮崎文夫, 谷口和弘, 河西清一郎, "入力装置, " 特願 2007-122660, 国優特願 2008-050552 (2007年5月) .

研究費助成

1. 大阪大学先端イノベーションセンター ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー部門の第4回ベンチャー サポートプログラム.
2. 財団法人 NEC C&C 財団国際会議論文発表者助成事業 2007 年度後期国際会議論文発表者助成金.
3. 文部科学省科学研究費補助金若手研究 (B) 研究代表者: 谷口和弘 (課題番号: 20700110) .

