

医療診断・治療技能の技術化・デジタル
化に基づく医療診断・治療ロボットの構築
—システム構築の基盤となる
機構・制御・画像処理・アルゴリズム技術—

小泉 憲裕

ナノ・マイクロ医療システム講義資料

<http://www.medigit.mi.uec.ac.jp/nanoMicro-p.pdf>

+++++出題課題(小泉担当分)+++++

(レポート課題)医療支援システムの例をひとつあげ、思考展開図をもちいて、要求機能およびパラメータについて実装を考慮して分類・整理せよ。つぎに、実装する機能をシステムの機構・制御・画像処理・アルゴリズム上で高度化(高速化, 高精度化, etc.)するための方法論(シーズ技術の選定, 臨床実験の方法, 想定される最大の問題点と解決アプローチ, etc.)について検討せよ。

注意)とりあげる医療支援システムはナノ・マイクロ技術を援用したシステムであることが望ましいが、これに限定しない。

<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/guesthome.jsp>

The screenshot shows the IEEE Xplore search results page. The browser address bar displays the URL <http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryTe>. The page header includes the IEEE Xplore logo, the text "Access provided by: UNIVERSITY OF TOKYO Sign Out", and the IEEE logo. The main navigation bar contains "BROWSE", "MY SETTINGS", and "WHAT CAN I ACCESS?". A search bar is present with the text "SEARCH". Below the search bar, there are links for "Advanced Search", "Preferences", "Search Tips", and "More Search Options".

The search results section shows "You searched for: Medical Robot" and "5,876 Results returned". The results are displayed in a table with columns for "Results per page" (set to 25) and "Sort by" (set to Relevance). The first result is "Capsule type medical robot with magnetic drive in abdominal cavity" by Nokata, M.; Kitamura, S.; Nakagi, T.; Inubushi, T.; Morikawa, S. The result is marked as "INCLUDED WITH YOUR SUBSCRIPTION".

The left sidebar contains a "FILTER THESE RESULTS" section with a search box and a "Search" button. Below this, there are checkboxes for "Only show full text results included in my subscription" and "CONTENT TYPE" (Conference Publications (5,263), Journals & Magazines (603), Early Access Articles (9), Books & eBooks (1)). The "PUBLICATION YEAR" section has radio buttons for "Single Year" and "Range".

On the right side, there are two boxes: "SEARCH HISTORY BETA" with the text "NEW! Search History BETA is now available using your personal IEEE account." and "STANDARDS DICTIONARY TERMS (What's this?)" with a "Browse Standards Dictionary" link.

Medical Robotics, Rehabilitation Robotics, Surgery, Diagnosticなどのキーワードで検索

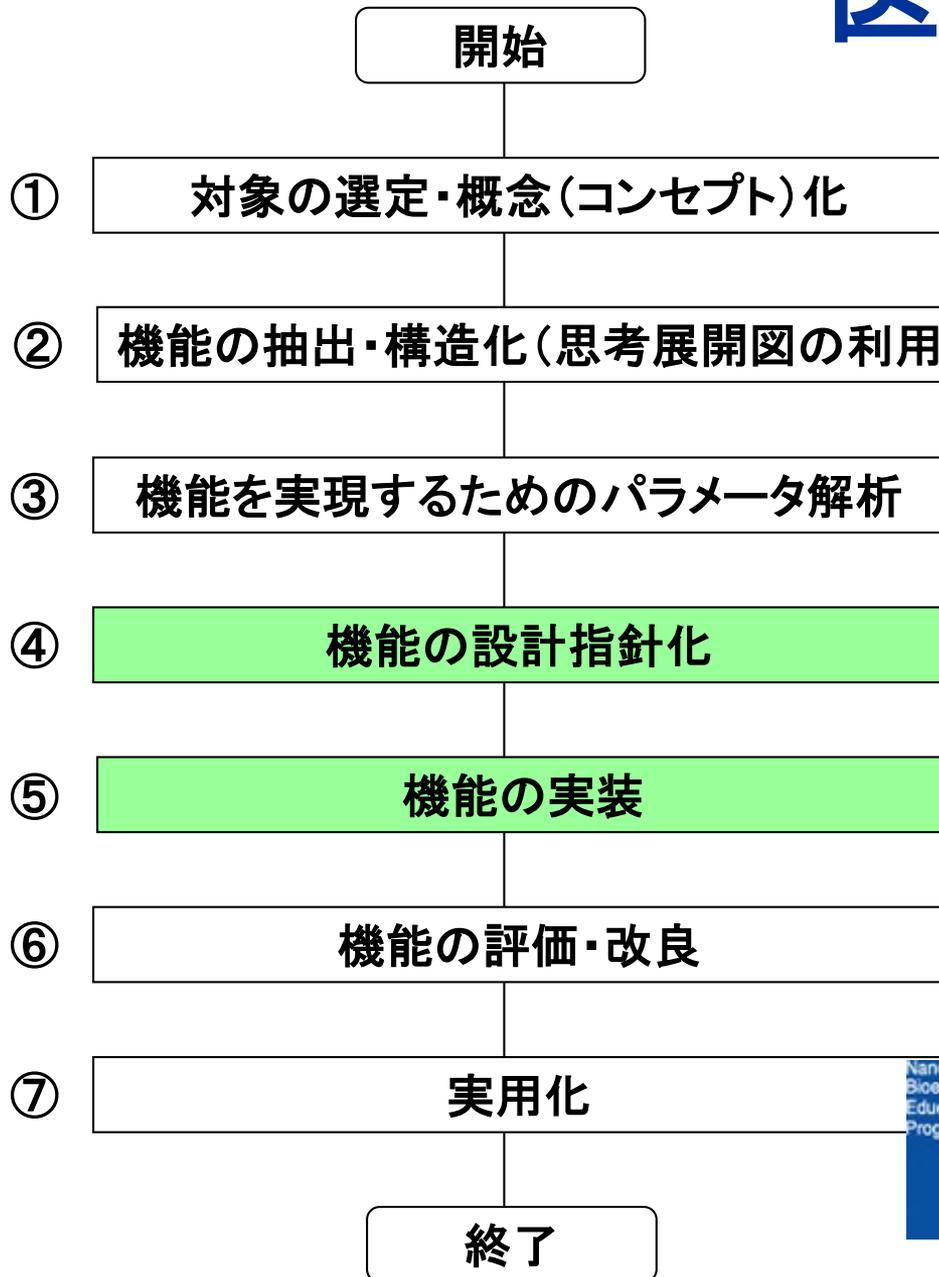
- [1] 光石衛, “21 世紀のロボティック医療への期待,” 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.1, pp.2-7, 2000.
- [2] R. H. Taylor and D. Stoianovici, “Medical robotics in computerintegrated surgery,” IEEE Trans. Robot. Automat., Vol.19, No.5, pp.922-926, 2003.
- [3] P.Kazanzides, G.Fichtinger, G.D.Hager, A.M.Okamura, L.L.Whitcomb, R.H. Taylor, “Surgical and Interventional Robotics - Core Concepts, Technology, and Design [Tutorial] ,” IEEE Robotics & Automation Magazine., Vol.15, No.2-4, 2008.
- [4] Alan M. Priester, Robotic ultrasound systems in medicine, 2013.
- [5] M Azizian, N Najmaei, M Khoshnam, R Patel, Visual servoing in medical robotics: a survey. Part II: tomographic imaging modalities–techniques and applications, Int J Med Robot Comput Assist Surg (IJMRCAS), 2014
- [6] <http://www.nml.t.u-tokyo.ac.jp/~nkoizumi/paperList.html>
- [7] 片岡一則, “医療ナノテクノロジー —最先端医学とナノテクの融合—”, 医療ナノテクノロジー人材養成ユニット(編集), 杏林図書, 2007,
- [8] 畑村洋太郎, “実際の設計”, 日刊工業新聞社, 1988.
- [9] 内山 勝, 中村仁彦, ロボットモーション, 岩波書店, 2004.
- [10] 吉川恒夫, “古典制御論”, 昭晃堂, 2004.
- [11] 中野 道雄, 美多 勉, “制御基礎理論—古典から現代まで,” 昭晃堂, 2000.
- [12] 田村秀行, “コンピュータ画像処理”, オーム社, 2002.
- [13] L, Qing and Y.Caroline, “リアルタイム組込みOS,” 翔泳社, 2005.
- [14] 伊藤穰一, ネットで進化する人類 ビフォア/アフター・インターネット, 角川学芸出版, 2015.
- [15] 人工知能と社会: 2025年の未来予想: 栗原 聡、長井 隆行、小泉 憲裕、内海彰、坂本 真樹、久野美和子著 (ohmsha)
- [16] <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/guesthome.jsp> (Medical Robotics, Rehabilitation Robotics, Surgery, Diagnosticなどのキーワードで検索)



- 1 システム構築全体のながれ
(例:遠隔超音波診断システム)
- 2 医療診断・治療技能の技術化・デジタル化
(例:非侵襲超音波診断・治療統合システム)
- 3 機構設計技術
- 4 メカトロニクスとリアルタイム制御技術
- 5 通信技術と遠隔操作技術
(例:遠隔超音波診断システム)

- 1 システム構築全体のながれ
(例:遠隔超音波診断システム)
- 2 医療診断・治療技能の技術化・デジタル化
(例:非侵襲超音波診断・治療統合システム)
- 3 機構設計技術
- 4 メカトロニクスとリアルタイム制御技術
- 5 通信技術と遠隔操作技術
(例:遠隔超音波診断システム)

医療支援システムの構築手順



ロボットのシーズ技術に精通し、医療ニーズの開拓・ロボット技術開発を工学技術者とスムーズに連携しながら行なう**医師**の必要性



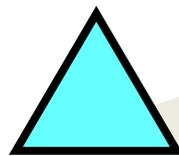
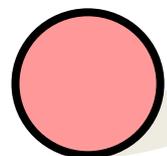
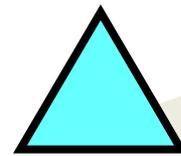
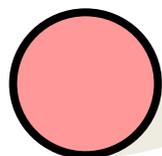
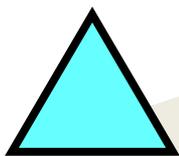
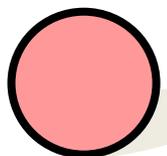
医工融合
人材養成ユニット

医学系人材

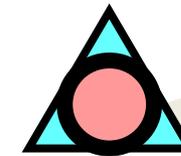
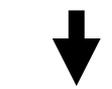
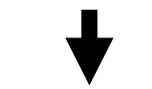
工学系人材

医学系人材

工学系人材



共同研究



共同研究

従来の医工連携
 (医学あるいは工学のみの基盤を
 理解した人材による共同研究)

医工融合の人材養成ユニット
 (医学と工学の双方の基盤を理解し、**医工融合領域の研究・開発を先導する人材を養成**)



医療ナノテクノロジー人材養成ユニット
<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/NBEP/>



卒業後の進路実例紹介

月原弘之先生

東京大学大学院医学系研究科

心臓外科助手

(平成18年3月に当ユニットを修了)

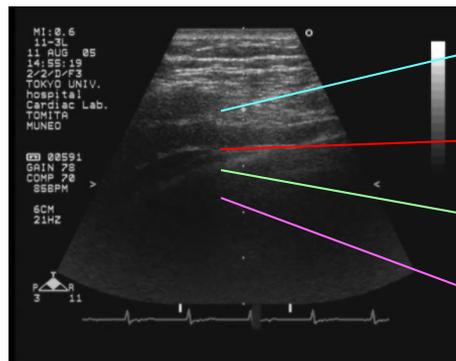
現在の活動状況

1. 心臓外科医としての臨床活動
2. 日本成人心臓血管外科手術データベースの構築
3. 超音波立体表示装置を用いた心臓低侵襲手術の開発
4. 超音波画像解析による心臓癒着評価に関する研究

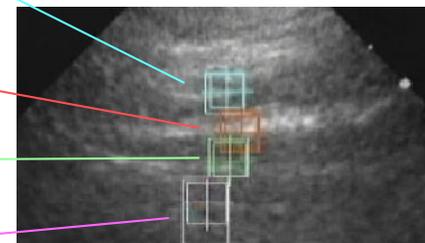
超音波画像解析による心臓癒着評価に関する研究

心膜と心外膜の癒着を画像解析することで、心臓再手術時の危険性を評価

本ユニットの
特任教員と
の共同研究
へ発展



- ① 心膜外組織
- ② 心膜
- ③ 心外膜
- ④ 右室心筋

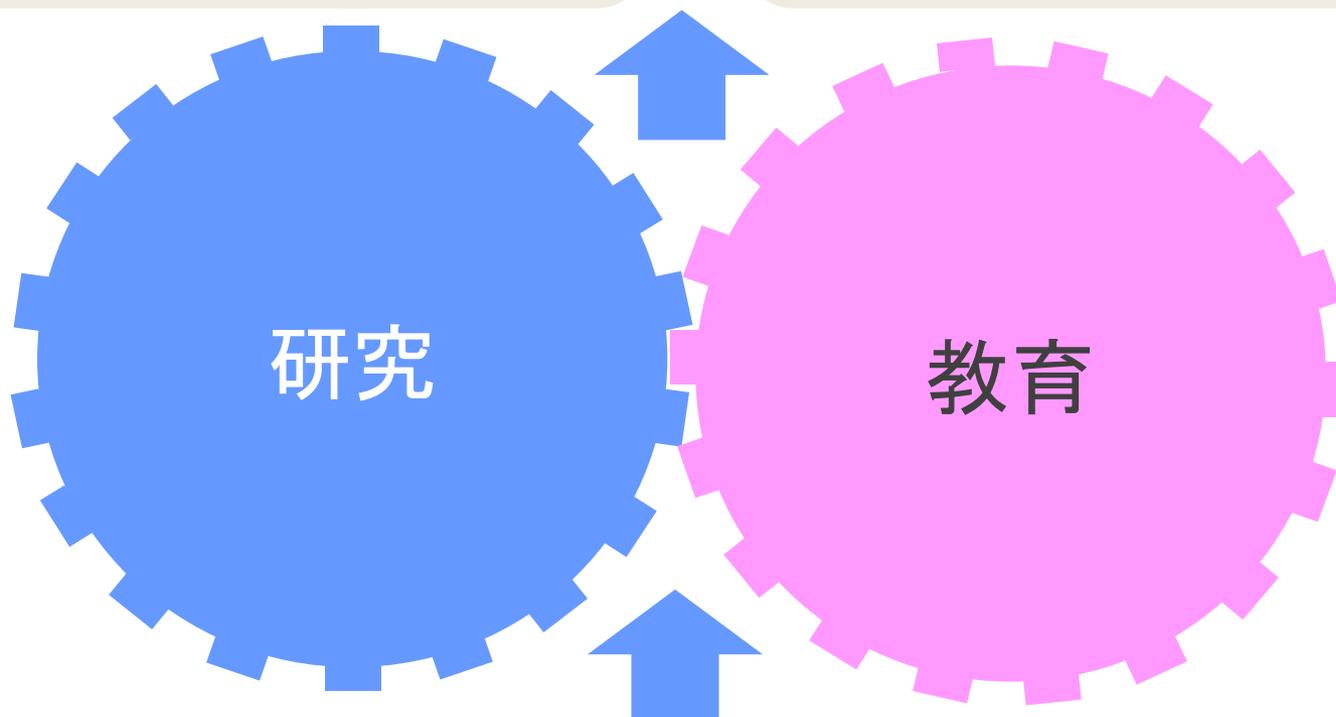


超音波診断画像解析

(今後の展望) ナノテクを用いた心臓・癒着防止剤の開発・評価へ発展

生活の質の向上に直結する
質の高い医療機器

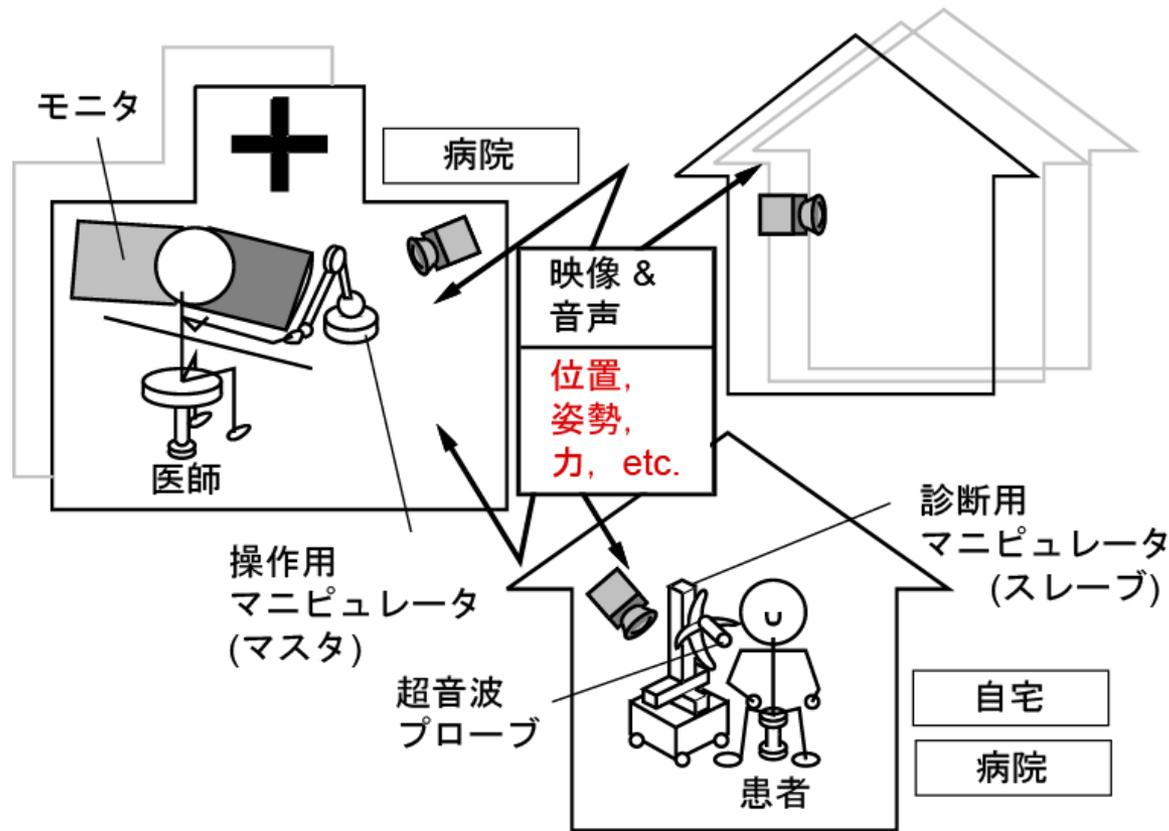
生活の質の向上に直結する
質の高い医療機器を効率的
に研究・開発できる
医学と工学を融合的に修得し
た医学系および工学系人材



研究テーマ: 医療技能の技術化・デジタル化による
医療支援システムの構築法

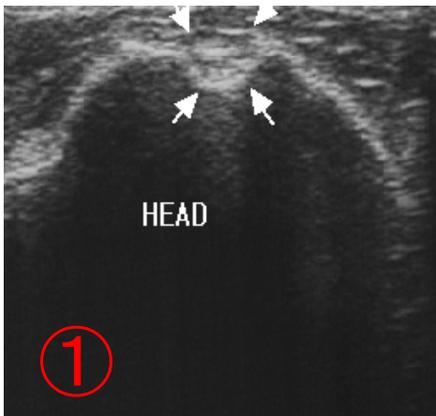
遠隔超音波診断システムの概念図

診断画像のやりとりだけでなく、
診断画像の**獲得操作**も遠隔で行なう

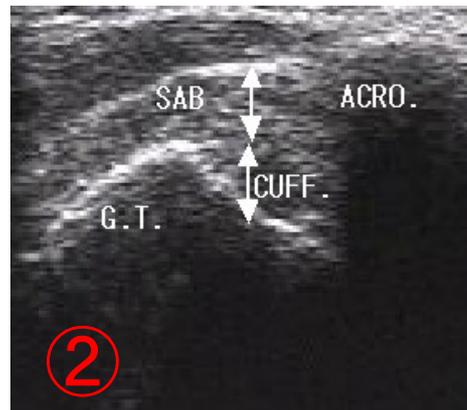


透析患者の肩関節疾患 (透析肩痛)

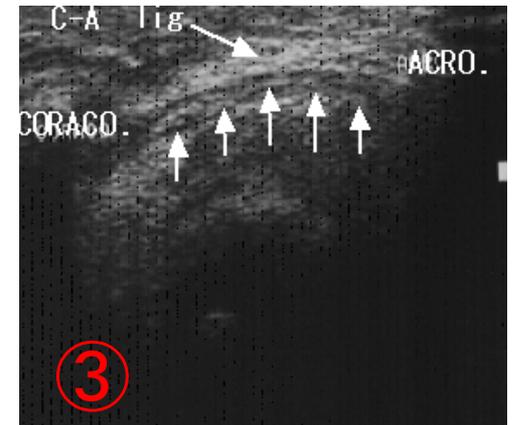
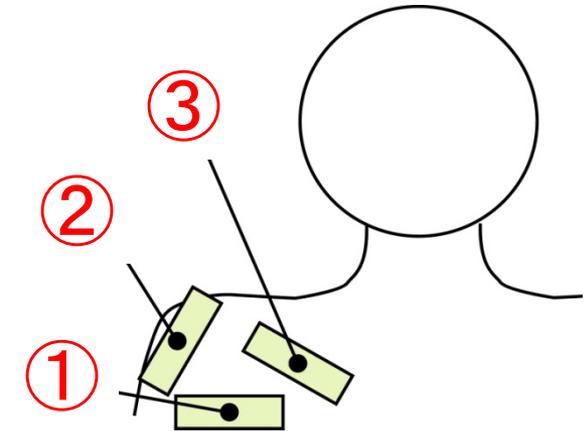
診断画像



棘上筋腱短軸像

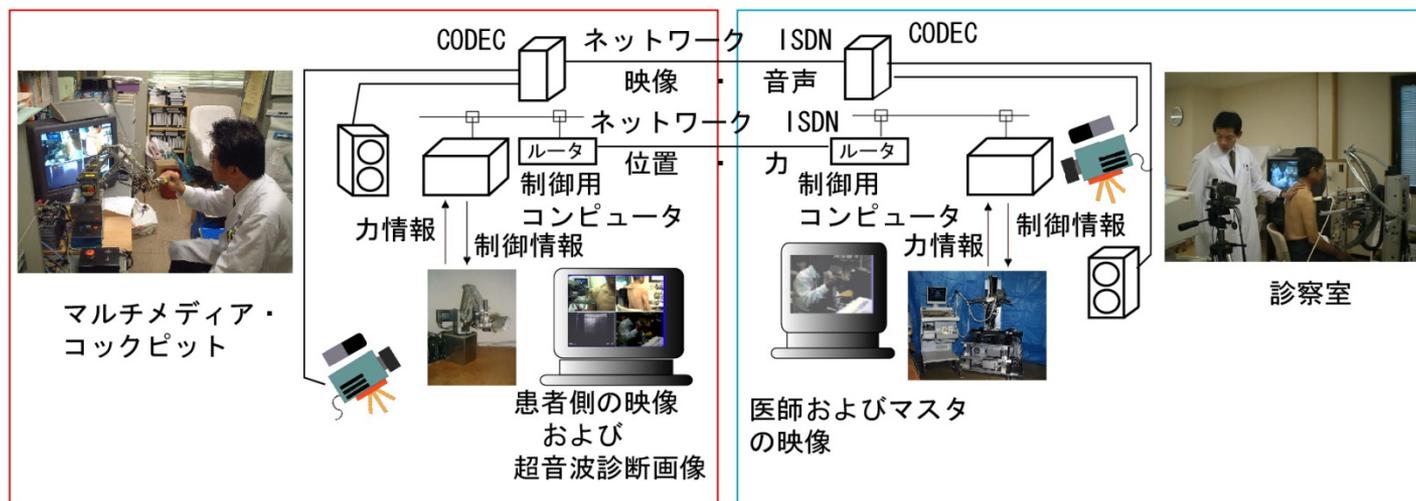


棘上筋腱長軸像



烏口肩峰靭帯像

システム構成



マスタ側

スレーブ側

- ① **通信ネットワーク**を介したマスタ・スレーブ・システム
- ② [マスタ・サイト] 医師および**マスタ**
- ③ [スレーブ・サイト] 患者, 助手, ならびに**スレーブ**

遠隔診断臨床実験

もし、ロボットの手でプロの手を再現、だれもが簡単に共有できるとしたら、、、

Remote ultrasound diagnostic experiment 2

a long axis view of the tendon of the
supraspinatus muscle

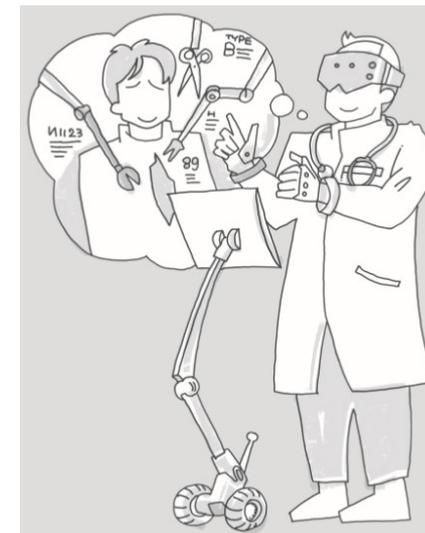
buckling:

DSH: mm

Patient No. 14

HD 6.5 year, Man

2001. 10. 30. Tue



TROBOT2009,
ICRA 2003

世界初の遠隔超音波臨床診断(2001)

補足資料：エコー検査を行う医療従事者

法的にエコー検査ができる医療従事者：約200万人

(医師、臨床検査技師、臨床放射線技師、看護師、准看護師)



エコー検査が“できる”医療従事者：約7万人

(医師、臨床検査技師の一部)

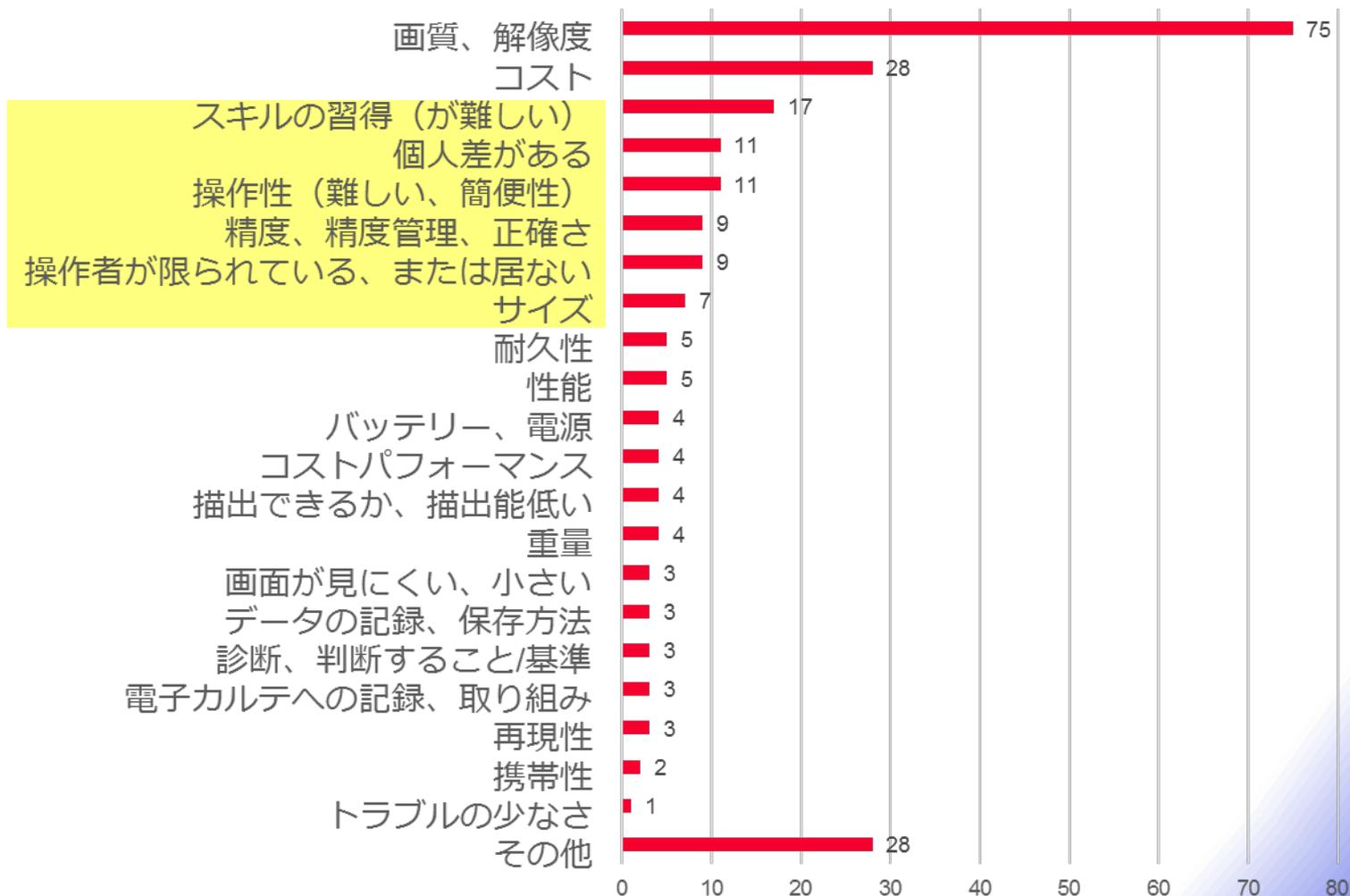


“しっかり”エコー検査が
できる医療従事者：約7000人

(医師、臨床検査技師のごく一部)

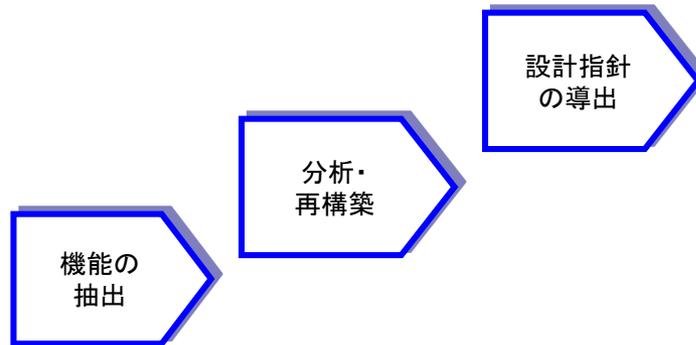
補足資料：現行のエコーに共通する課題

Q.ポータブル型エコーについて、現状課題だとお考えになる点について、できるだけ具体的に教えてください（医師300人へのアンケート）



超音波遠隔医療診断システムの構築法の確立

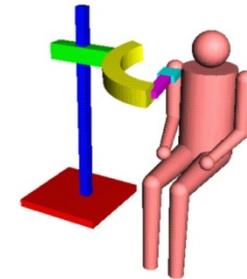
診断



機能実装・システムの具現化

安全・安心
接触動作機能
(インピーダンス制御)

なめらか動作・
高追従機能
(Continuous Path 制御)



タスクに応じて使いやすくする機能
(制御系の動的切替え)

医デジ化の基礎

診断

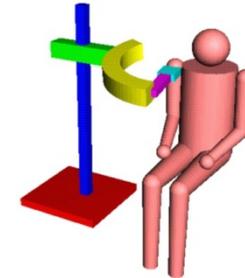


機能分解・再構築

機能実装・システムの具現化

安全・安心
接触動作機能
(インピーダンス制御)

なめらか動作・
高追従機能
(Continuous Path 制御)



タスクに応じて使いやすくする機能
(制御系の動的切替え)

機能の
抽出

分析・
再構築

設計指針
の導出

医デジ化のための機能構造化

機能分解と再構築

Ultrasound diagnostic
experiment 2 (manual)

a long axis view of the tendon of the
supraspinatus muscle

buckling:

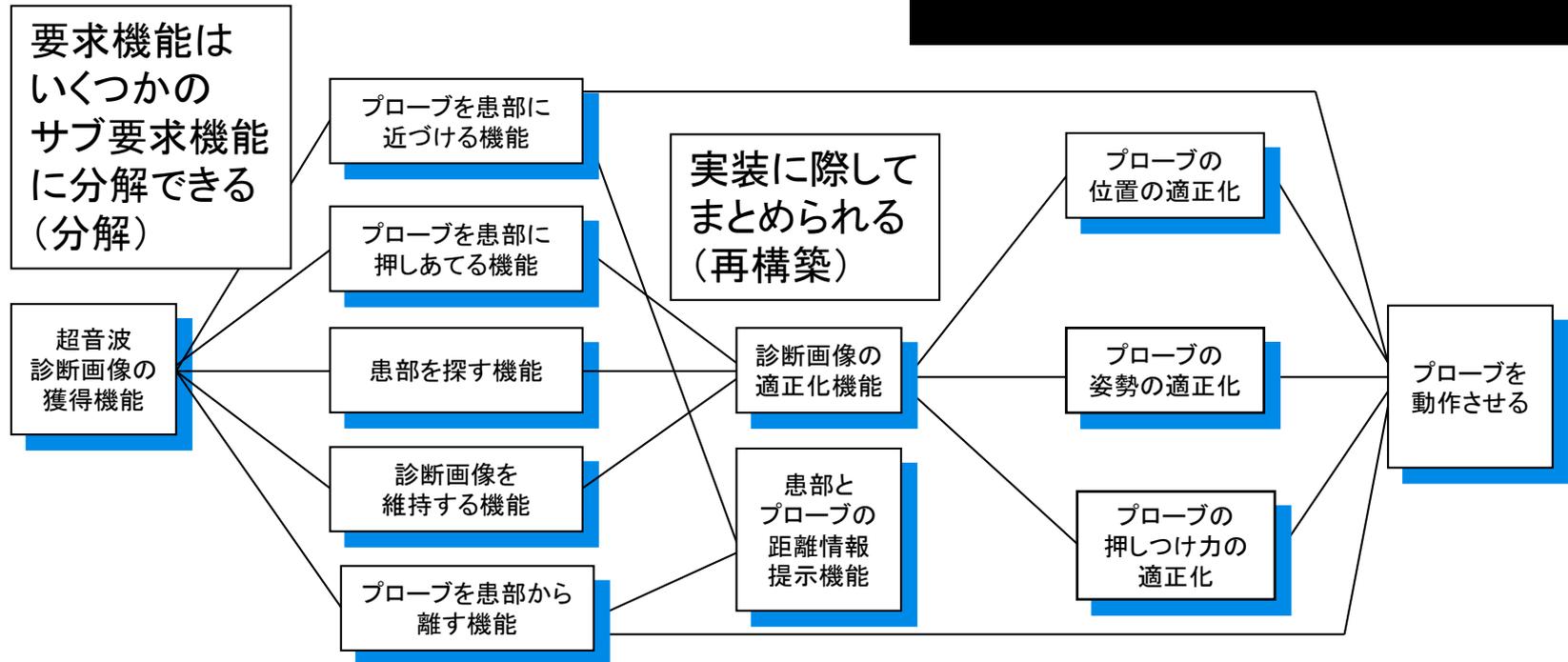
DSH:

mm

Patient No. 14

HD 6.5 year, Man

2001. 10. 30. Tue



機能解析・構造化

機能のパラメータ化

診断画像と押しつけ力

実験目的

診断画像を適正化するために要求される押しつけ力の範囲を明らかにする。

実験条件

対象： 診断画像②
被験者： 患者3名
健常者2名

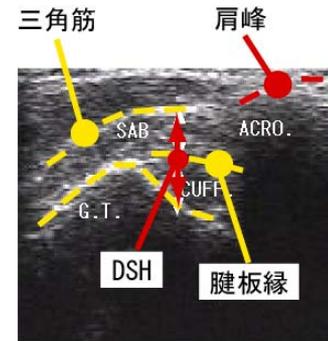
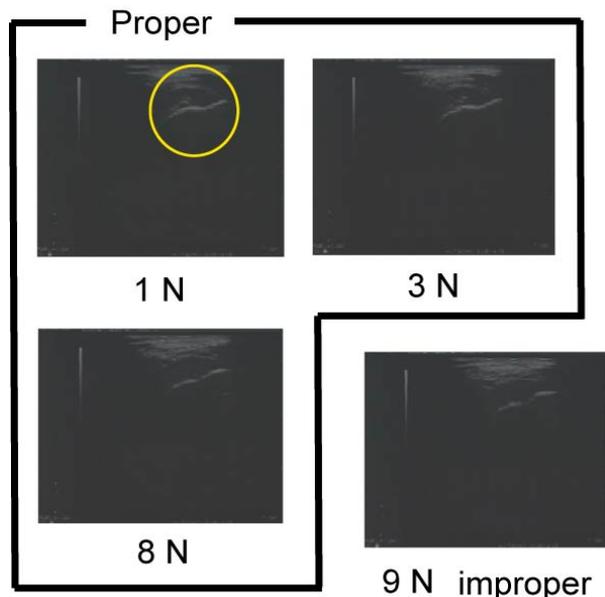
実験方法

診断画像が得られている状態において、**1Nずつ押しつけ力を変化**。



2~7N程度！

9N以上では患部が変形！

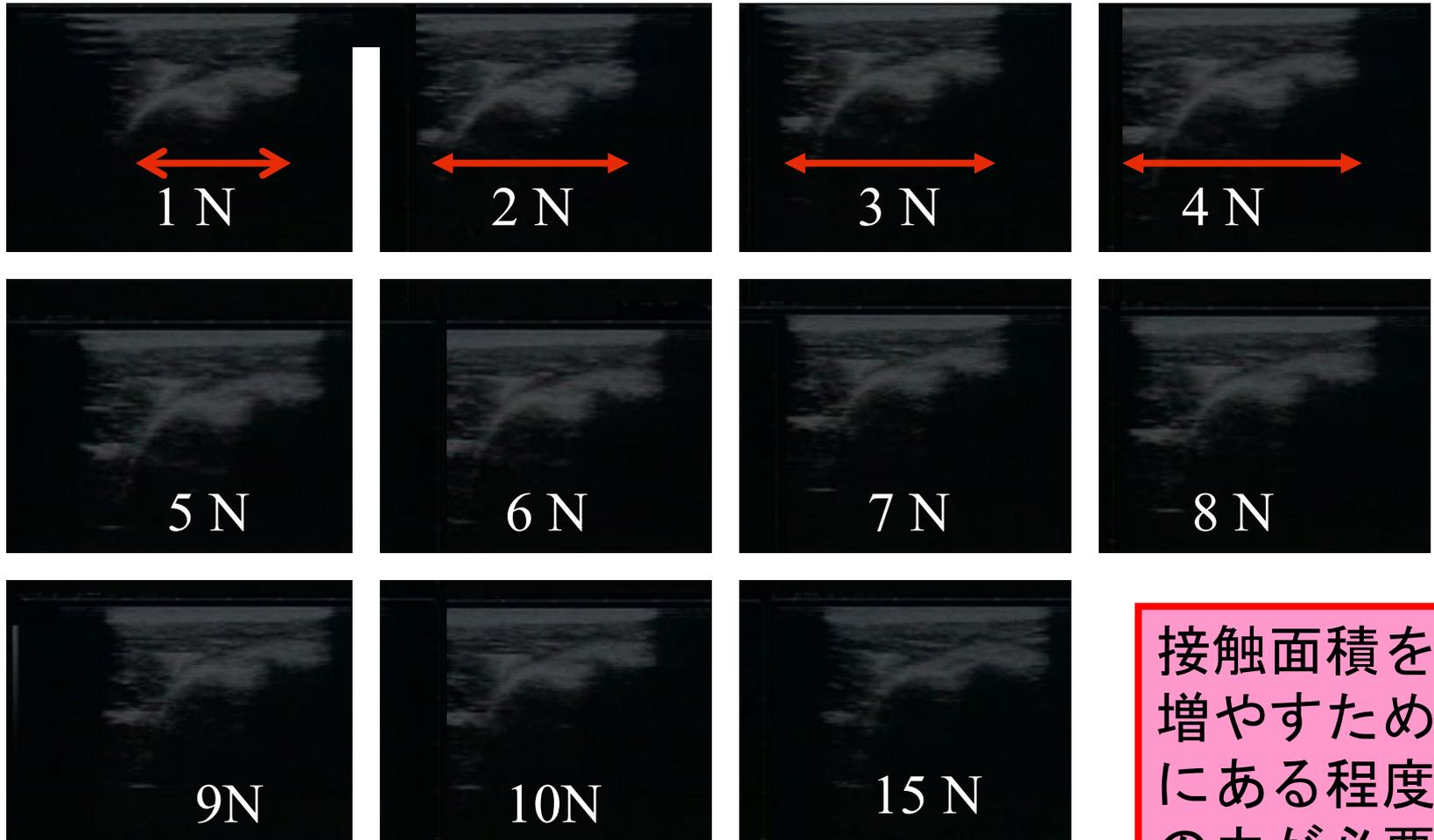


実験結果

適切な診断画像のための押しつけ力の範囲
診断画像1: 2 N~8 N
診断画像2: 1 N~7 N
診断画像3: 1 N~10 N
(被験者5名の平均)

医デジ化のための機能パラメータ化

プローブ接触面積と押しつけ力



接触面積を増やすためにある程度の力が必要

プローブの押しつけ力と診断画像

上腕二頭筋長頭腱：4 N

棘上筋腱長軸像：8 N

烏口肩峰靭帯像：4 N

(健常者1名, 患者1名の平均)

診断画像を獲得する段階では**接触面積を増やすため強い力**

上腕二頭筋長頭腱：2 N~8 N

棘上筋腱長軸像：1 N~7 N

烏口肩峰靭帯像：1 N~10 N

(健常者2名, 患者3名の平均)

診断画像獲得後は患部**を圧迫・変形させない程度**の力

医デジ化のための機能パラメータ化

機能実装・システムの具現化

診断



機能抽出・
構造化技術

機能分解・再構築

(例)安全・安心
接触動作機能
(インピーダンス制御)

(例)なめらか動作・
高追従機能
(Continuous Path 制御)

安全・安心
接触動作技術

超音波診断・治療
タスクに応じたシステム
動作切替え技術

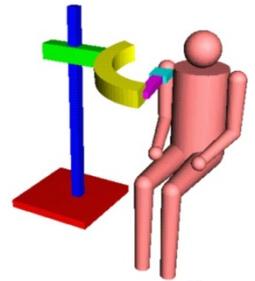
リアルタイム
超音波医用画像
処理技術

設計指針
の導出

分析・
再構築

機構設計技術

機能の
抽出

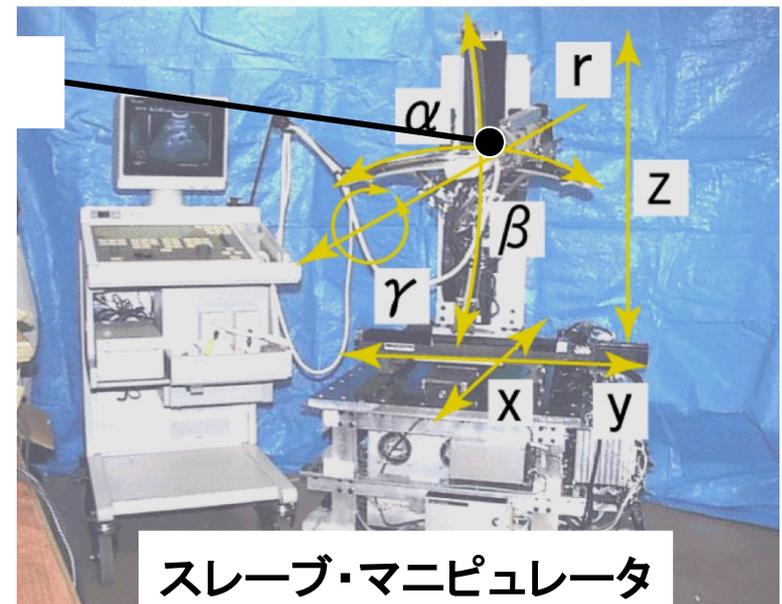
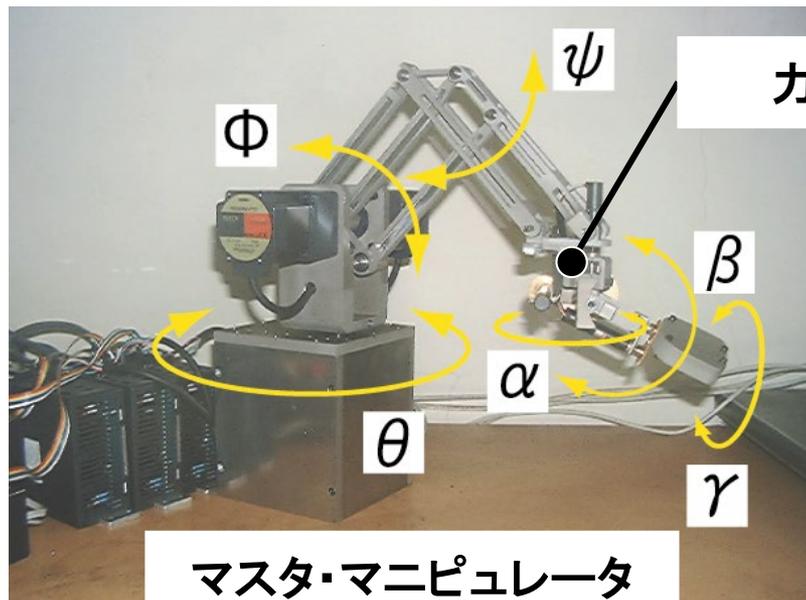


医デジ化のためのコア基盤技術

ハードウェアにおける機能実装

位置・姿勢・押しつけ力の適正化機能

- ①位置を調節しながら姿勢のみを変更できる**自由度構成**
 - ②位置・姿勢を正確に実現できる**剛性**の高い機構
 - ③接触状態を提示するための**力センサ**
センサがないと感覚が伝わらない！
- 誤差が蓄積しない機構構成！



$$F = k\Delta x \quad c = 1/k$$

力 剛性 変形量 コンプライアンス

[mm/N]



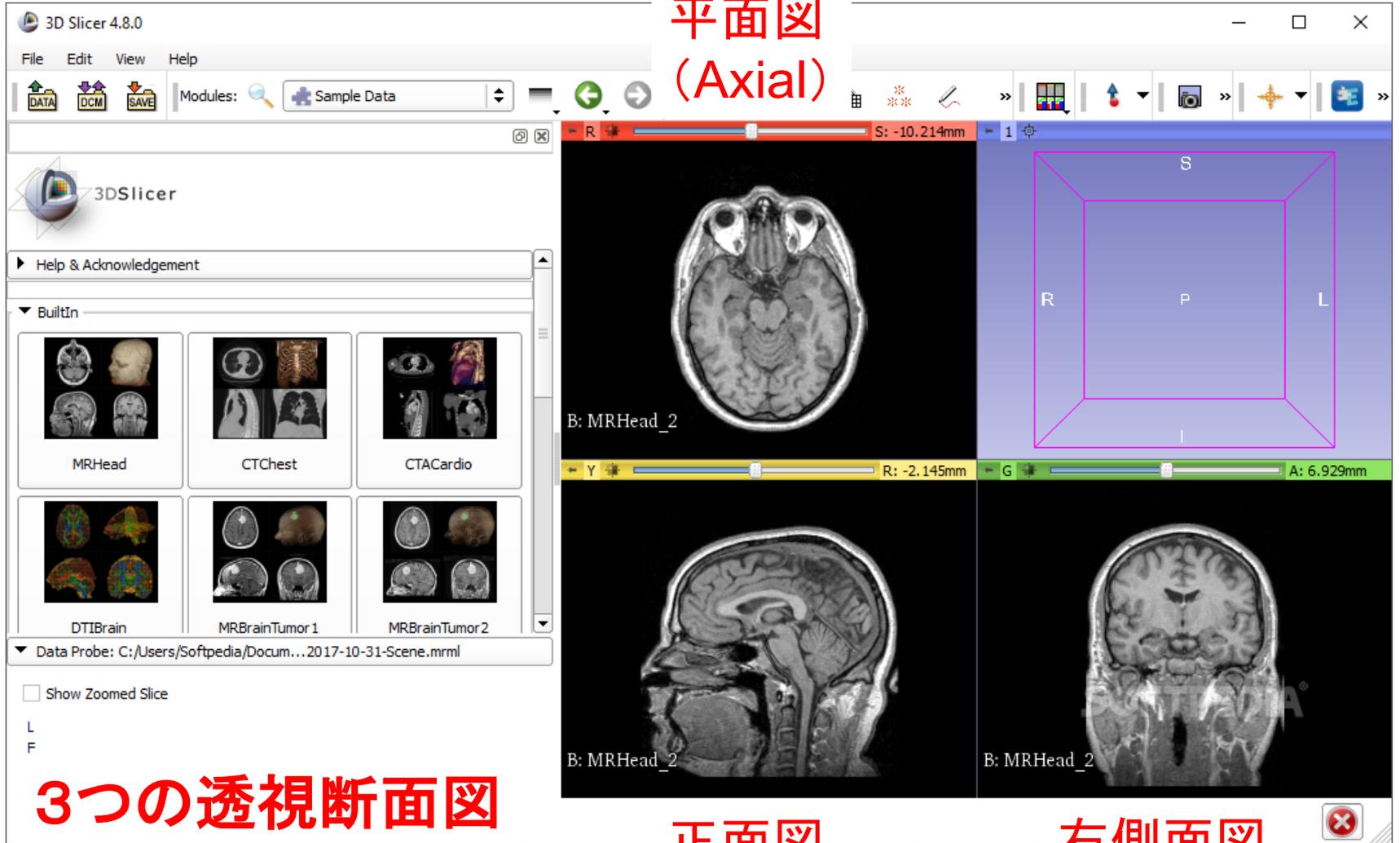
スポンジの硬さ計測

<http://www.forcegauge.net/force-displacement/17811.html>

- 1 システム構築全体のながれ
(例:遠隔超音波診断システム)
- 2 医療診断・治療技能の技術化・デジタル化
(例:非侵襲超音波診断・治療統合システム)
- 3 機構設計技術
- 4 メカトロニクスとリアルタイム制御技術
- 5 通信技術と遠隔操作技術
(例:遠隔超音波診断システム)

Computer Aided Diagnosis

平面図
(Axial)

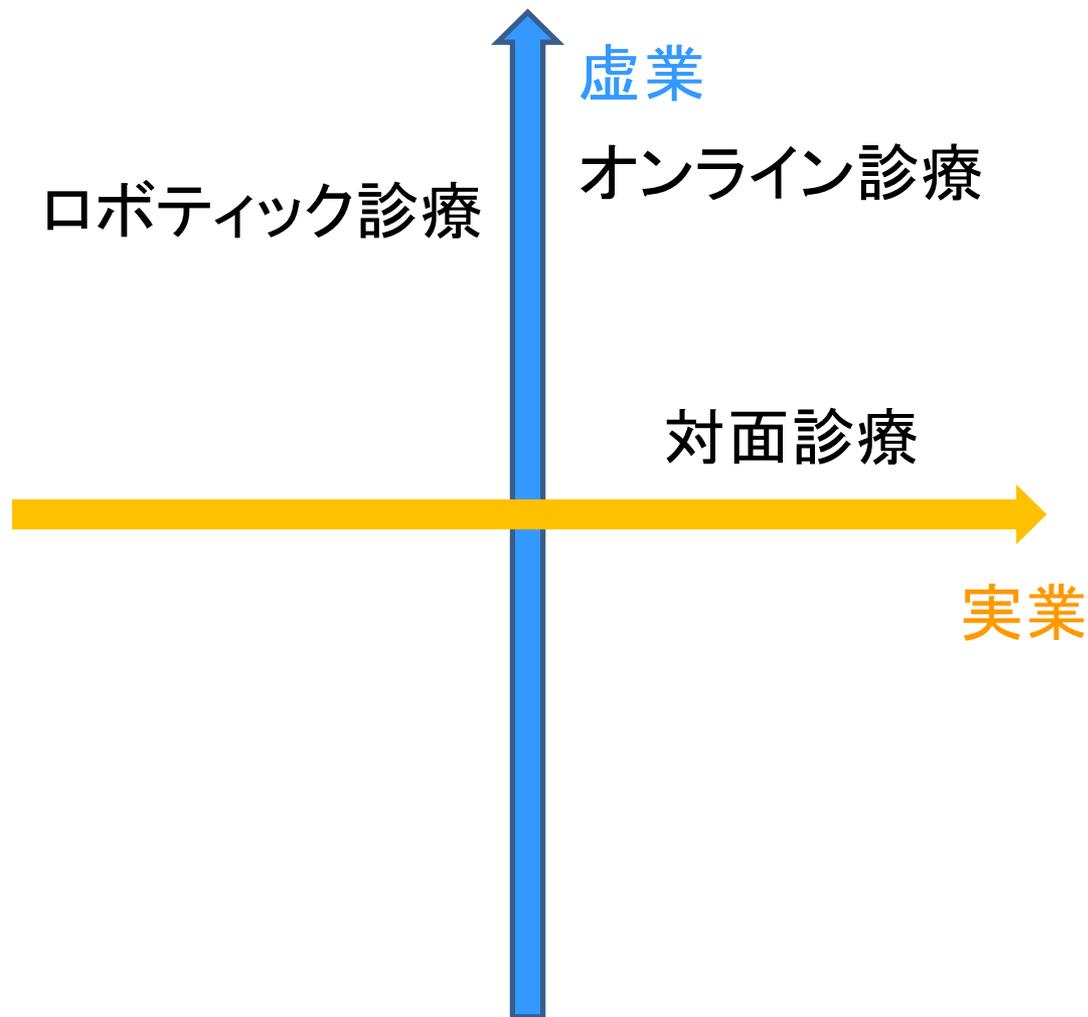


3つの透視断面図

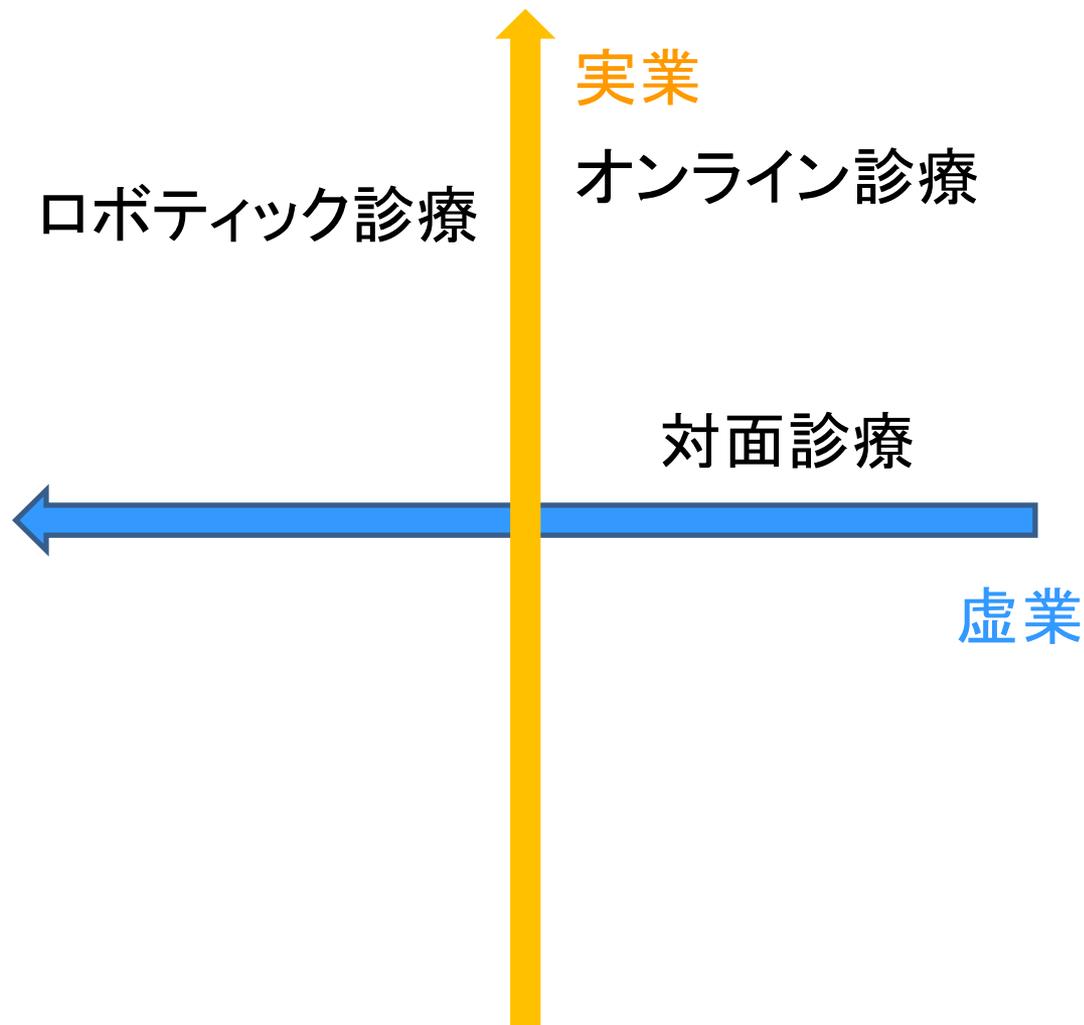
正面図
(Sagittal)

右側面図
(Coronal)

実業と虚業の関係



実業と虚業の関係



遠隔超音波診断システム

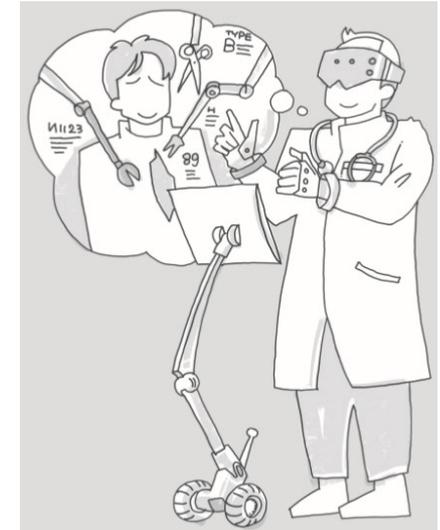
もし、ロボットの手でプロの手を再現、だれもが簡便に共有できるとしたら、、、

Remote ultrasound diagnostic experiment 2

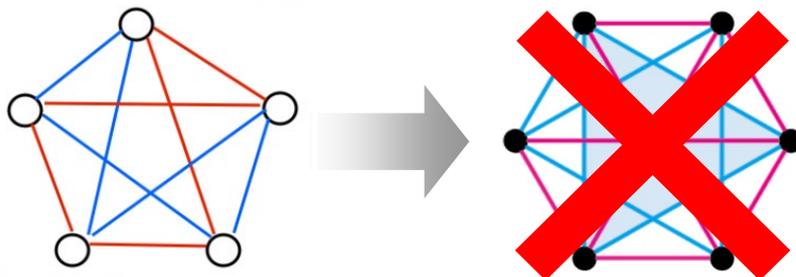
a long axis view of the tendon of the supraspinatus muscle

buckling:
DSH: mm

Patient No. 14
HD 6.5 year, Man
2001. 10. 30. Tue



TROBOT2009,
ICRA 2003



世界初の遠隔超音波
臨床診断(2001)

医療・バイオ分野の技能



医療・バイオ分野における
技能の技術化・デジタル化
Me-Dig IT

熟練した専門家のように動作し、人間の能力を超える高精度な診断・治療・生命科学実験を行なうシステムの実現

機能抽出・分解・再構築

技能における機能の抽出・構造化

機能を実現するためのパラメータ解析

機能の設計指針化

機能の高度化

機能の実装

ロバスト・高精度
動画像処理
アルゴリズム

構築したシステムの検証

機能実装・システムの具現化

なめらか動作・高追従制御



安全・安心接触動作機構



効果

負担軽減

技能の技術標準化

技能のデジタル化

学問体系化・設計指針化

専門家の技能

安全・安心

中高齢者



医学・生命科学分野の専門家



医療・バイオ分野の技能



医療・バイオ分野における
技能の技術化・デジタル化
Me-Dig IT

熟練した専門家のように動作し、人間の能力を超える高精度な診断・治療・生命科学実験を行なうシステムの実現

機能実装・システムの具現化

なめらか動作・高追従制御



安全・安心接触動作機構



$$DF(t, x, h, H) \geq Lev$$

高精度
画像処理
アルゴリズム



技能における機能の抽出・構造化

するための
パラメータ解析

機能の
高度化

構築した
システムの
検証

効果

負担軽減

技能の技術標準化

技能のデジタル化

学問体系化・設計指針化

専門家の技能
安全・安心

中高齢者



医学・生命科学
分野の専門家



中高齢者

Me-Dig IT Effect

<http://www.learner.org/interactives/renaissance/printing.html>

1. The Intersection

2. Creating the Medici Effect

3. Making Intersectional Ideas Happen

THE MEDICI EFFECT
Essential Insights on the Intersection of Ideas, Groups, & Cultures
FRANS JOHANSSON

ON THE SHOULDERS OF GIANTS
THE GREAT WORKS OF PHYSICS AND ASTRONOMY
FINISHED WITH QUANTUM BY STEPHEN HAWKING

medici Effect", 2004
Intersection of
s into a large n
the
enth

cultures, you can
ry new ideas. The
from a

Gutenberg's press
Everybody can read bibles

ビル・ゲイツ: 『もしいま自分が学生だとしたらバイオを学ぶ』
MITメディアラボ創設者ニコラス・ネグロポンテ: 『Bio is new digital.』

AGTC

MEDICAL & BIO ARE NEW DIGITALS!

Me-Dig IT Effect

SEPTEMBER 4-27, 2015
LIVING with ROBOTS

Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia
"Leonardo da Vinci" in Milano

Everybody can receive high-quality-medicine by IT (Robot) technology

なぜ医デジ化なのか？

(医療)システムを構築・実装・製品化して
これを普及するフレーム(骨格)として

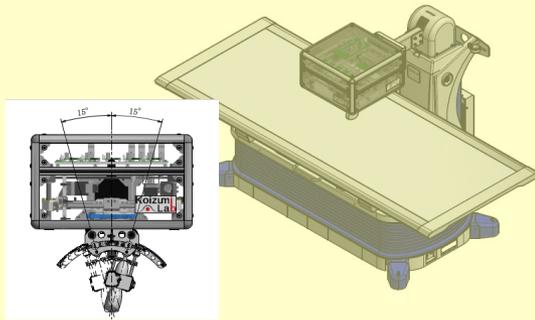
- ① 統一(合)・普遍的で、
- ② 直観(幾何学・野性)的に見通しよく単純明解で、
- ③ だれもが簡便・随意(自由自在)に
安全・安心・安定的に思いやりをもって
扱えることが本質(決定)的に重要



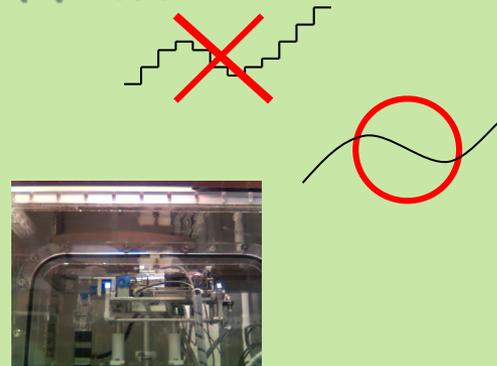
医デジ化

非侵襲の超音波診断・治療を支援する ベッド型ロボットの開発

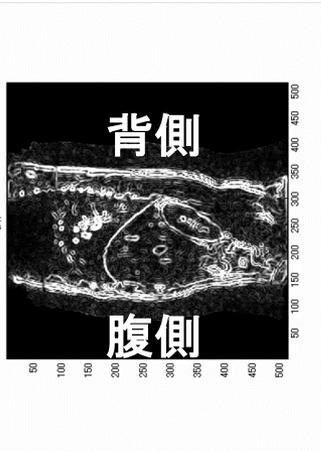
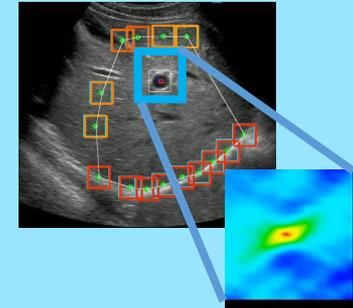
(1) 機構



(2) 制御



(3) 画像処理・アルゴリズム



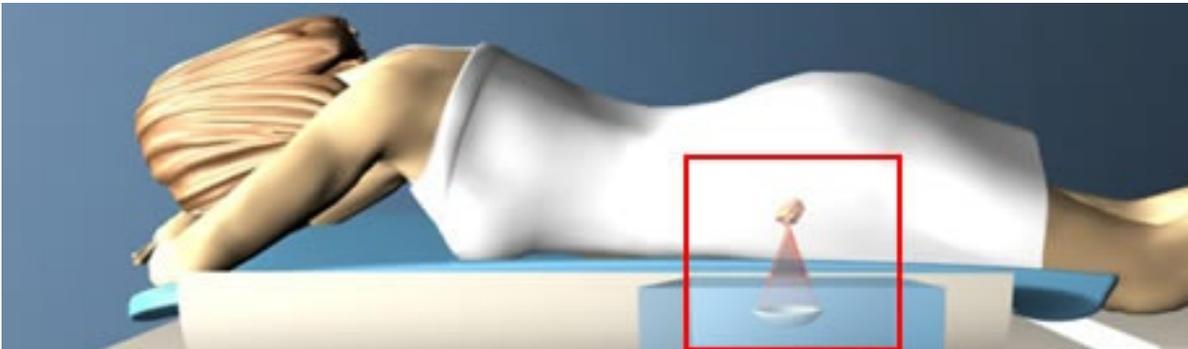
がんや結石を自動抽出・トラッキングする自律型ベッドロボット

HIFU治療はNon Invasive治療

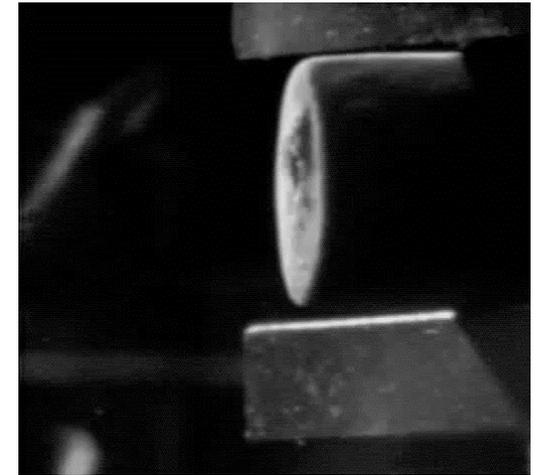
体表を傷つけない非侵襲手術

強力集束超音波治療

HIFU (High Intensity Focused Ultrasound)



http://japan.gehealthcare.com/cwcjapan/static/rad/mri/MRgFUS_ExAblate2000



Y. Matsumoto, et. al.

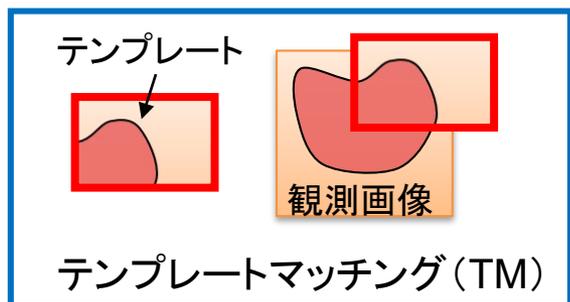
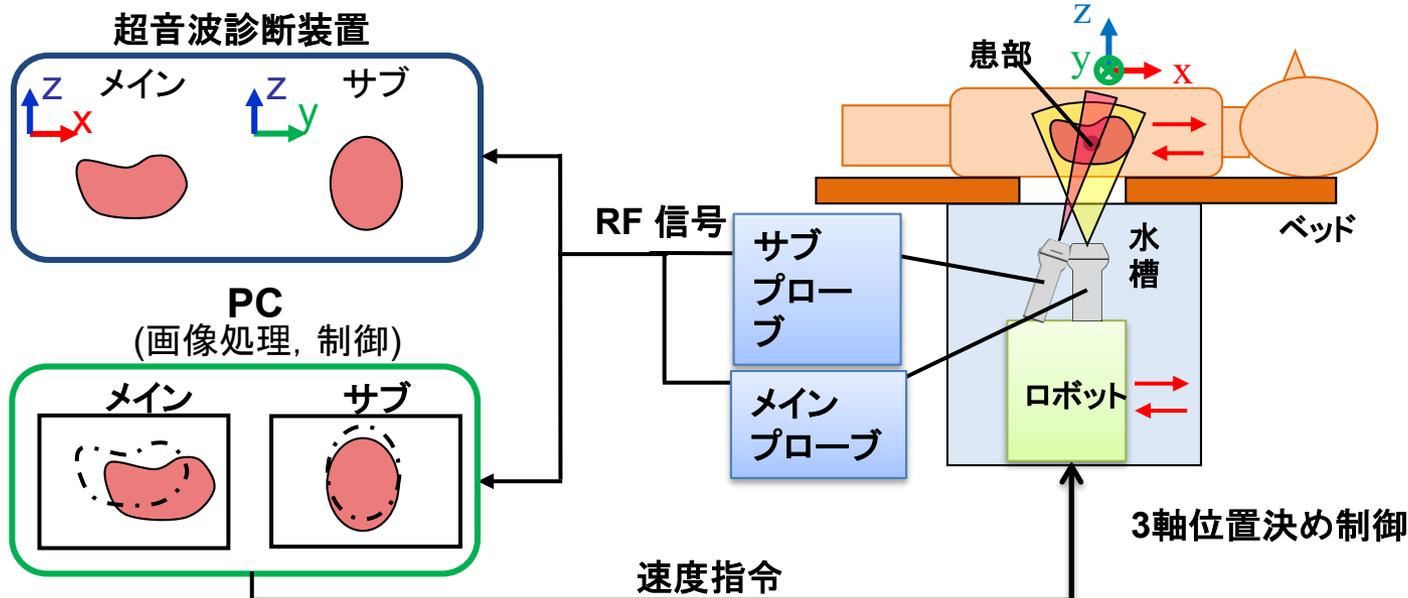
結石の破砕

厚労省認可状況

- ・2010年：子宮筋腫、前立腺肥大
- ・2015年：骨転移ガン痛み緩和、前立腺のアブレーション治療(がんを含む)

非侵襲超音波診断治療統合システム

プロの眼と手を再現・共有できると



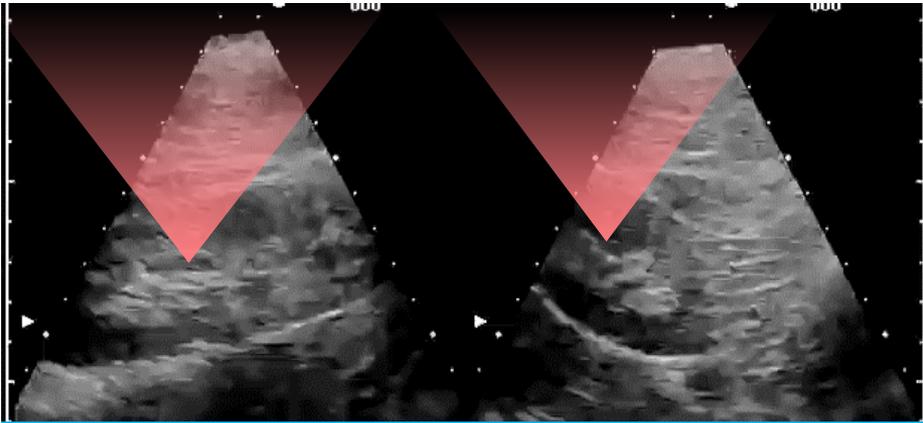
腎臓追従実験の様子



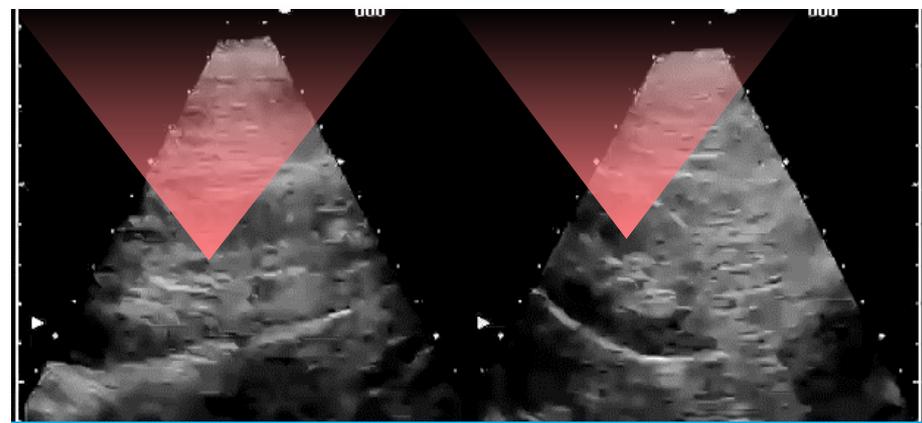
静止状態で診断・治療

2方向からの超音波画像を基に3D的に患部に追従、体動補償

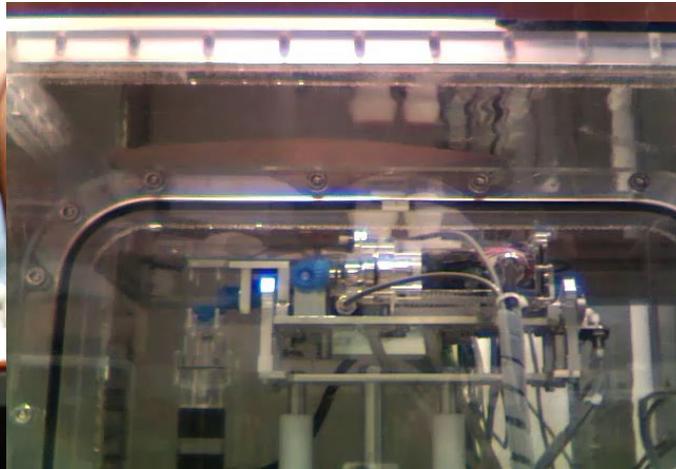
腎臓の体動補償



追従なし



追従あり



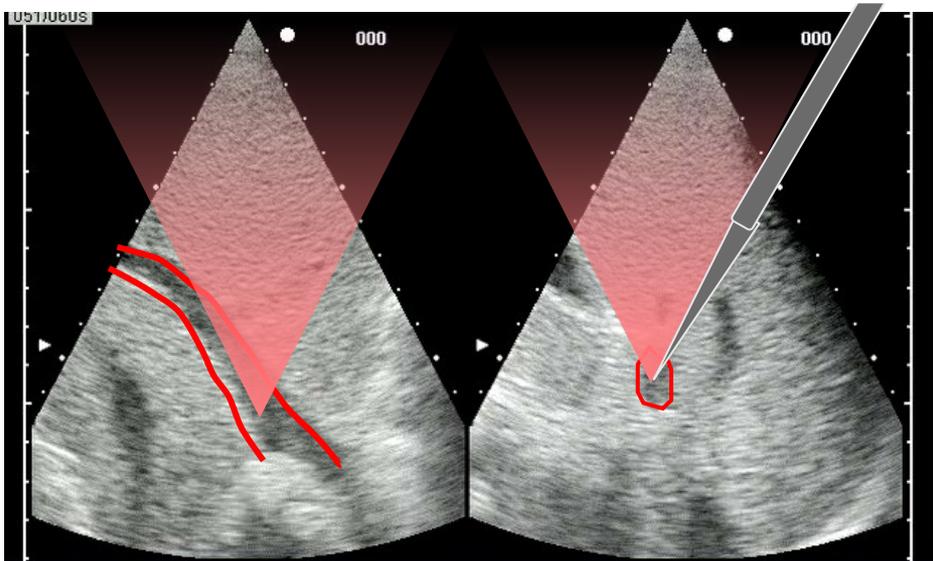
腎臓の体動補償

**体動の90 %
を補償,
1mm
の精度を
実現**

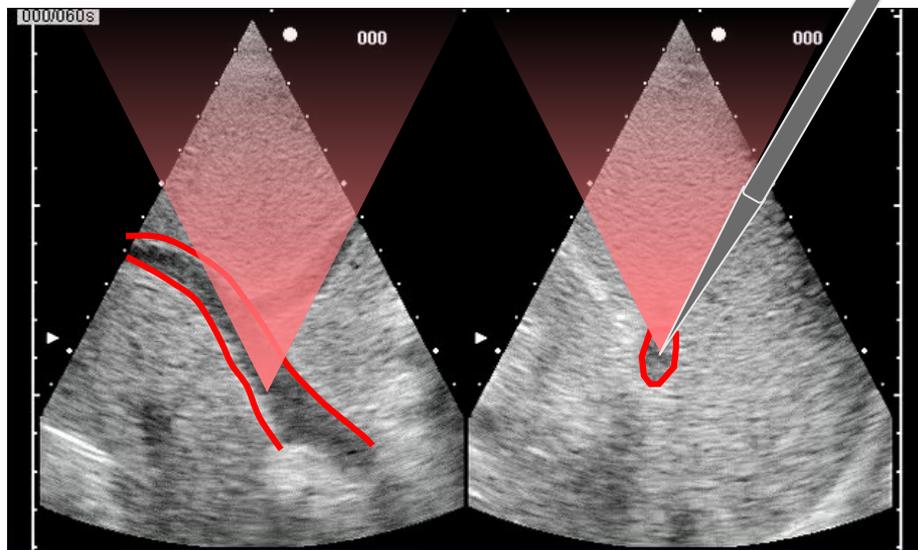
肝臓の体動補償

1.3 mm の精度を実現

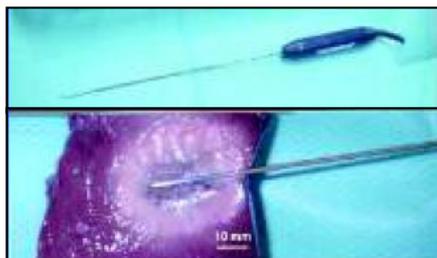
静的な世界で診断・治療



追従なし



追従あり

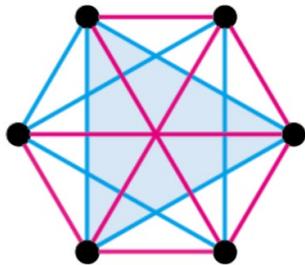
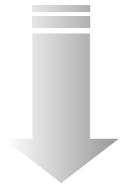
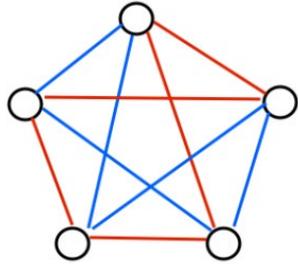


RFA治療

超音波ガイド下の
診断・治療を容易化



イノベーション・ジャパン



JSTイノベーション・ジャパン(2016)における深江 英典先生(埼玉県産業振興公社 先端産業コーディネータ)との出会い



埼玉県内の企業(大林製作所)のご紹介・共同研究に発展



株式会社大林製作所

昭和27年8月会社設立、本社文京区、川口に工場
事業内容：医用機器の開発・製造および販売

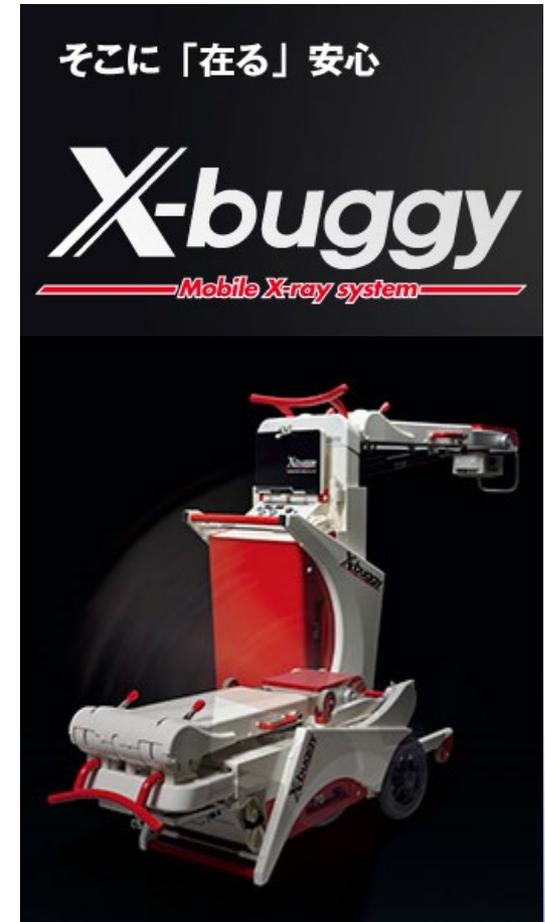
テーマ：人にやさしいモノづくり

汎用X線診断装置用電動式患者台
臥位撮影台（FPD、CR対応）、胸部撮影台（FPD、CR対応）

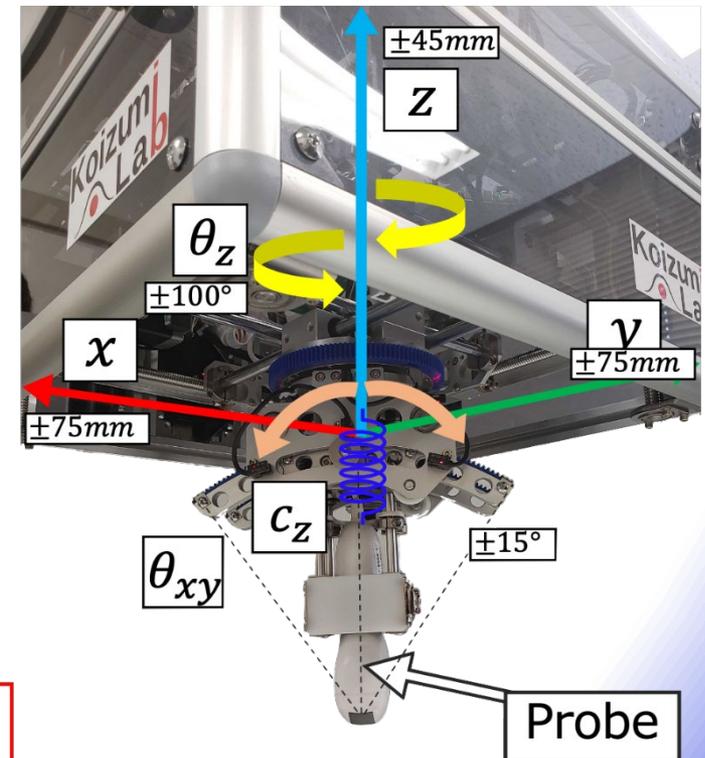
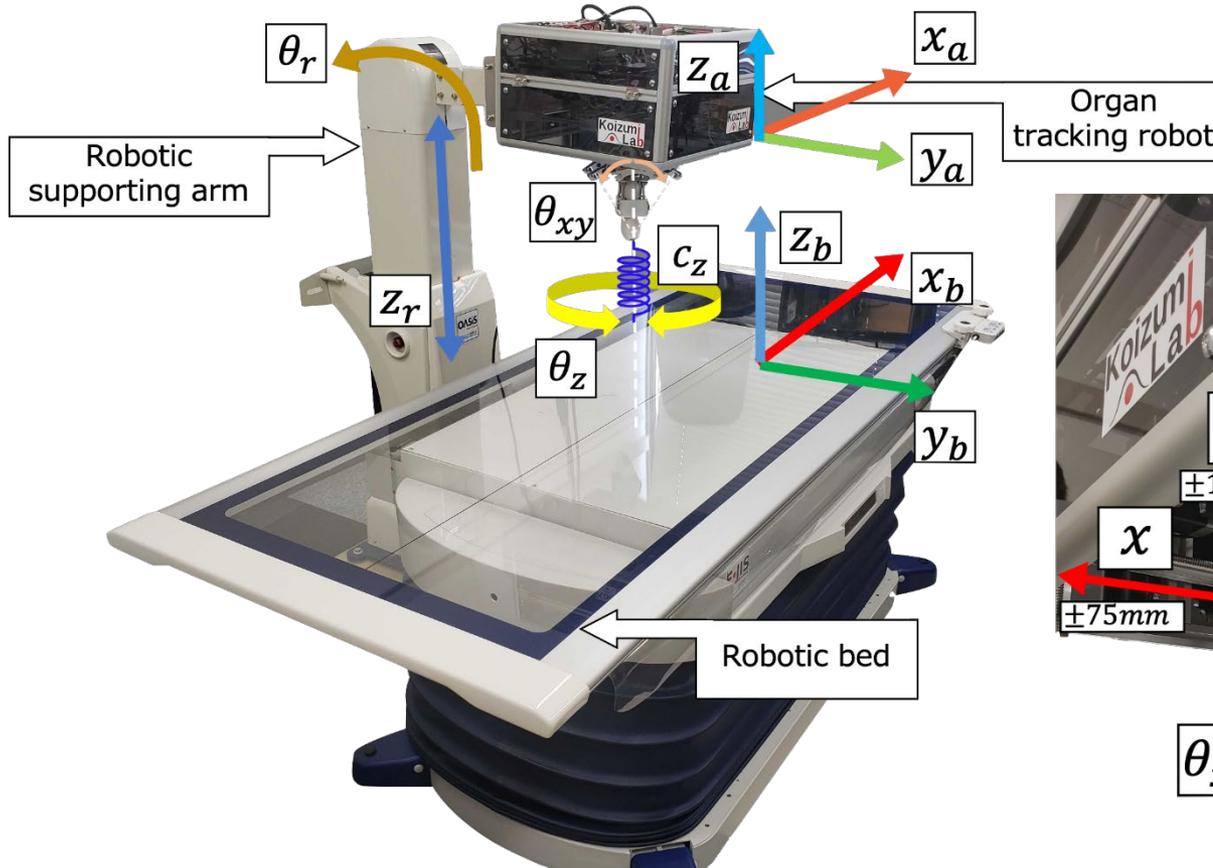


株式会社大林製作所

ポータブル、モバイルX-ray
成人男性一人で持てる胸部撮影台
わずか30kg、梱包不要で
すばやく変形・車載可能



医デジ化技術1(ロボット機構)

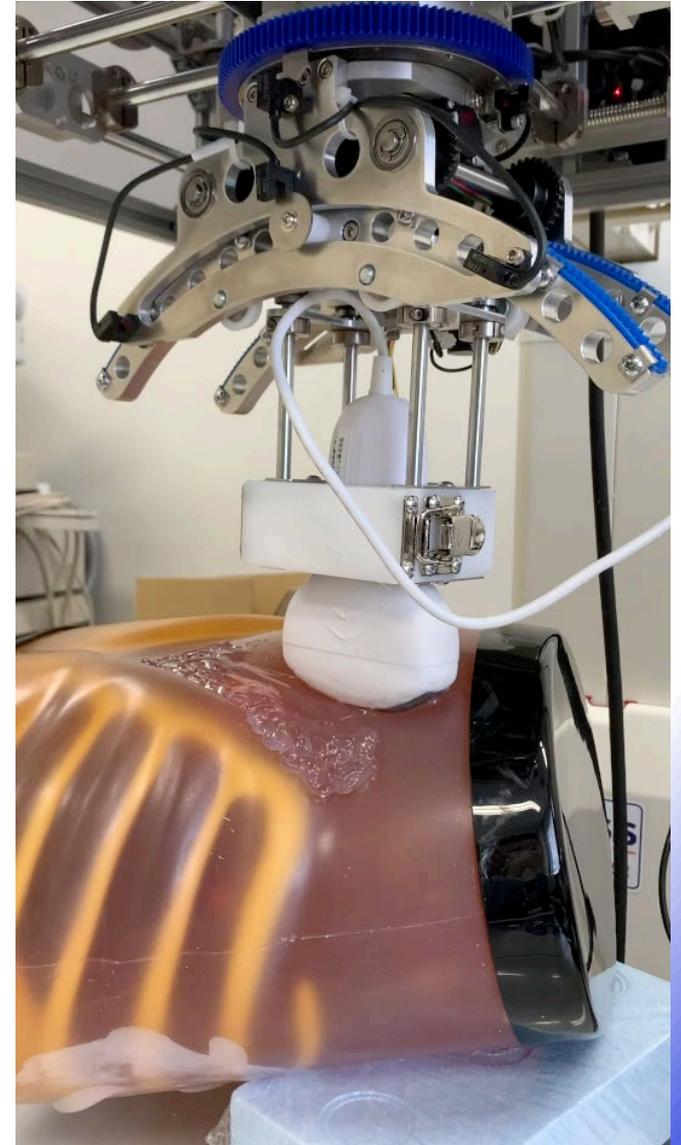
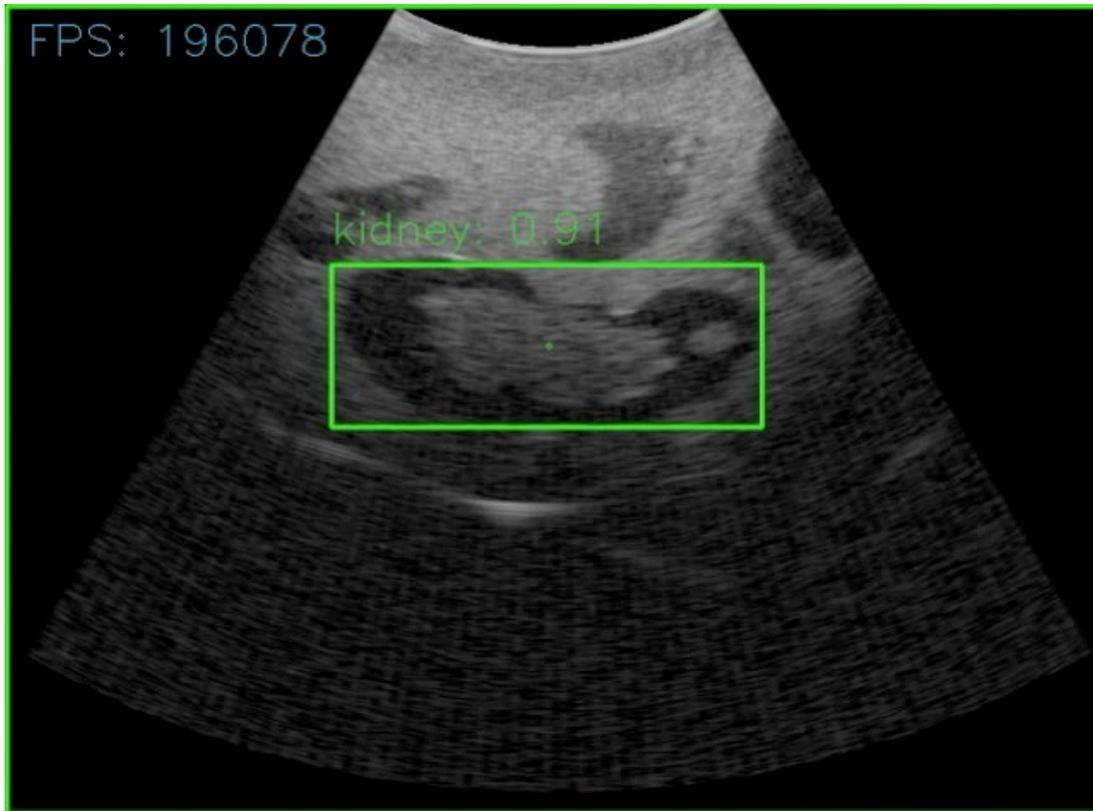


RUDS: Robotic ultrasound diagnostic system

K. Kobayashi, et al.,
JSUM20奨励賞受賞

臓器抽出・追従実験

様々な断面を見るために



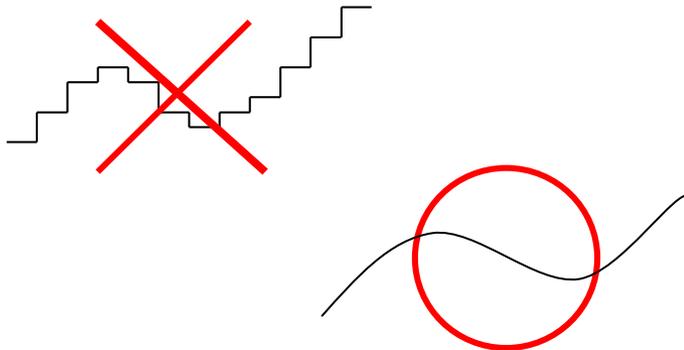
医デジ化技術2(ロボット制御)



TMECH 2008



ICRA 2014

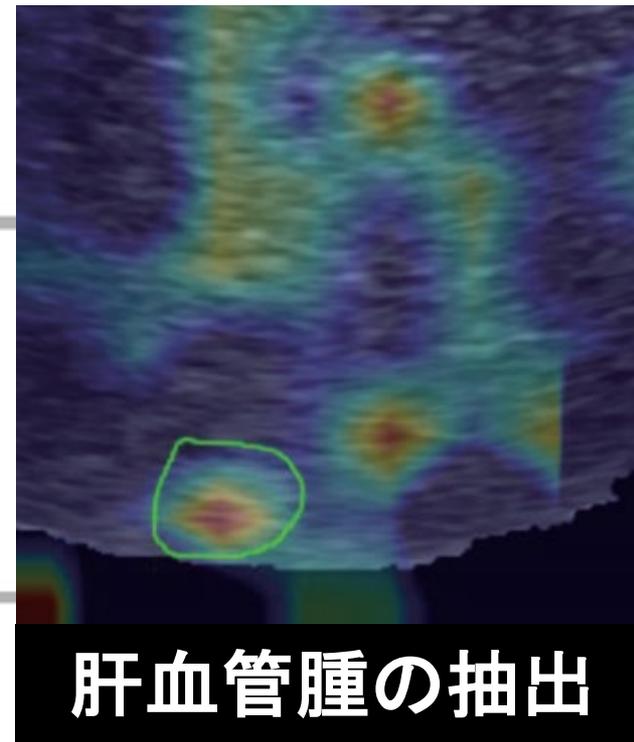
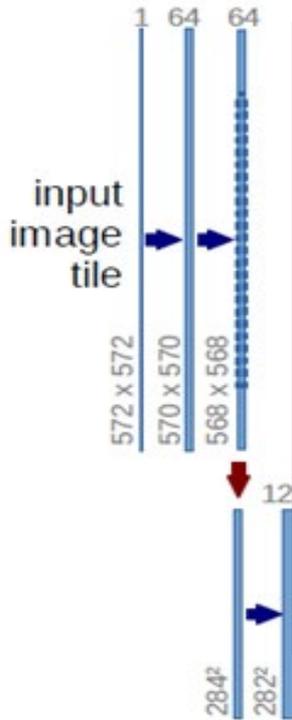


**人体との安定接触，
なめらか・高速・高精度な
ロボット動作制御技術**

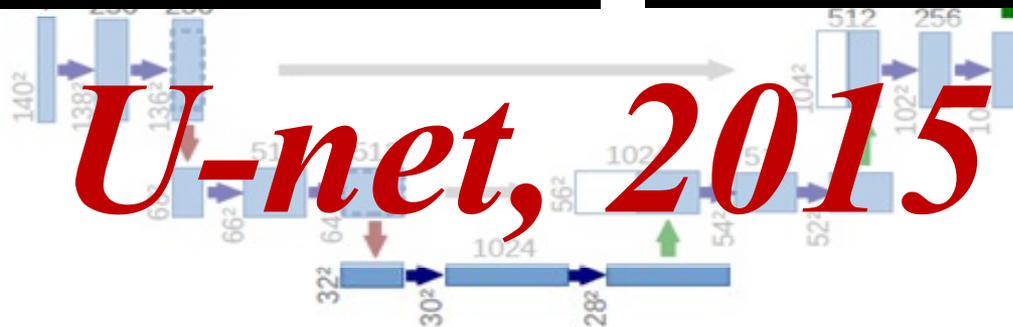
ロボットビジョン

R. Saito, et al.,
ACCAS2020

K.Kusahara, et al.,
CARS 2020



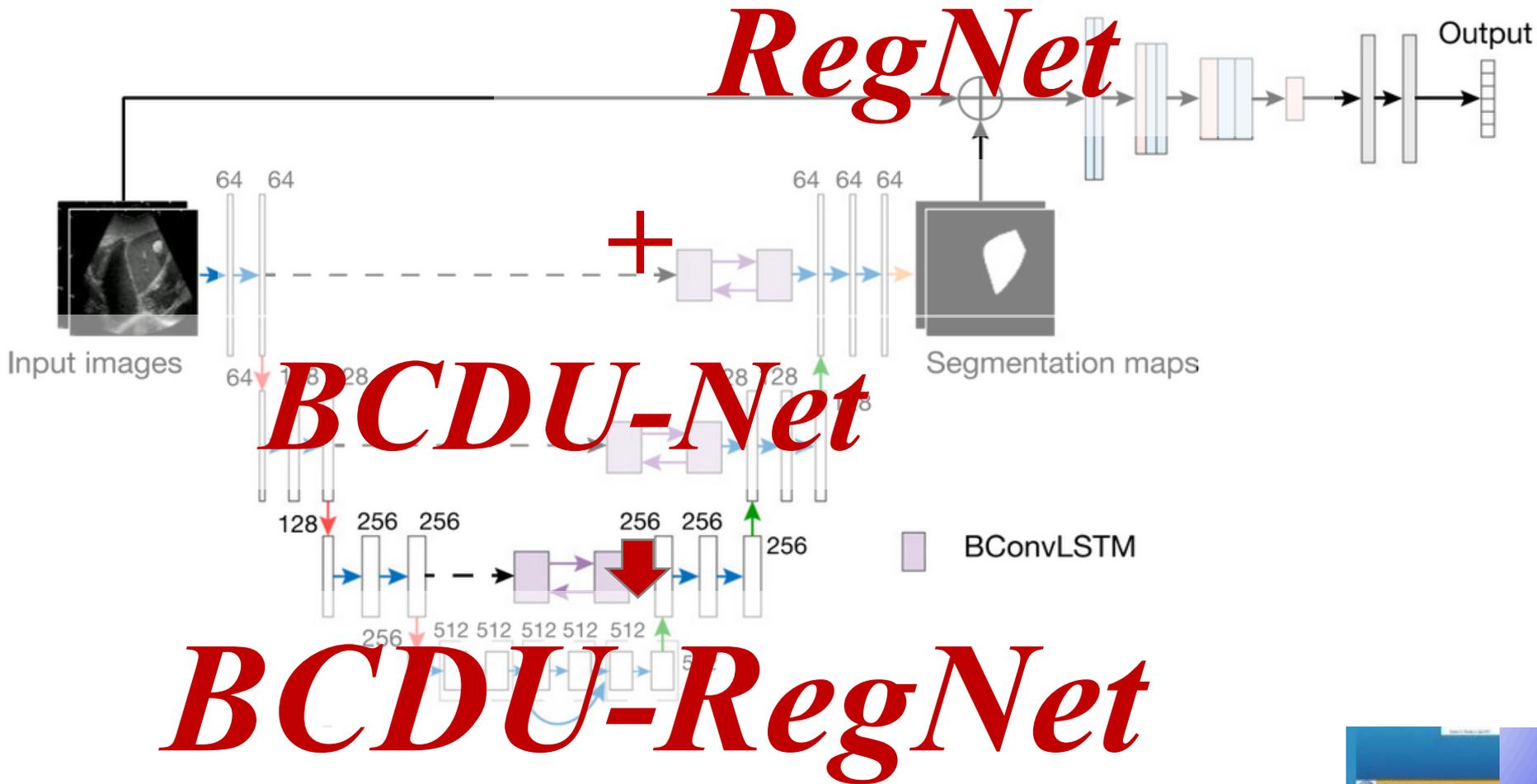
output
segmentation
map



U-net, 2015

- conv 3x3, ReLU
- copy and crop
- ↓ max pool 2x2
- ↑ up-conv 2x2
- conv 1x1

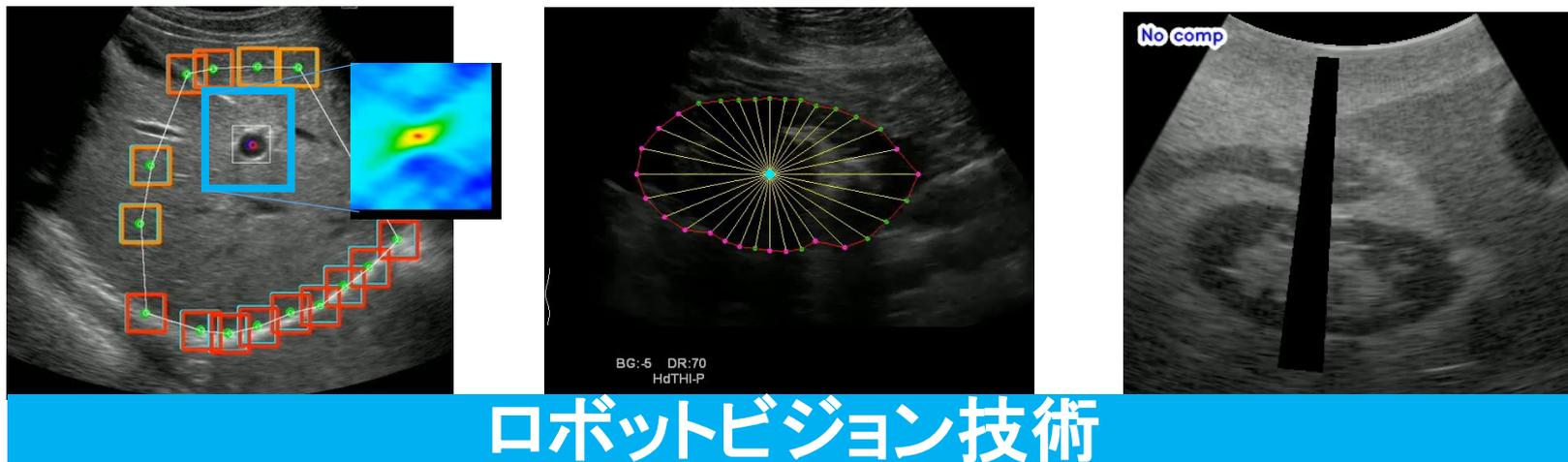
医デジ化技術(ロボットビジョン)



S. Yagasaki, et al., IJCARS, 2020.

医デジタル化技術(ロボットビジョン)

もし、『かしこい』眼鏡でプロの眼を再現、だれもが簡単に共有できるとしたら、、、

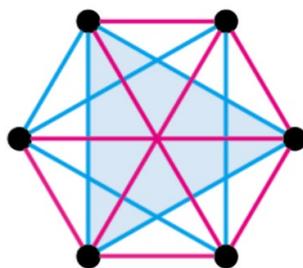
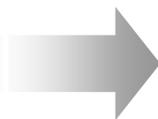
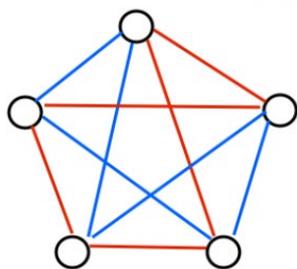


R. Kondo, et al.,
URAI17

K. Tomita, et al.,
URAI17

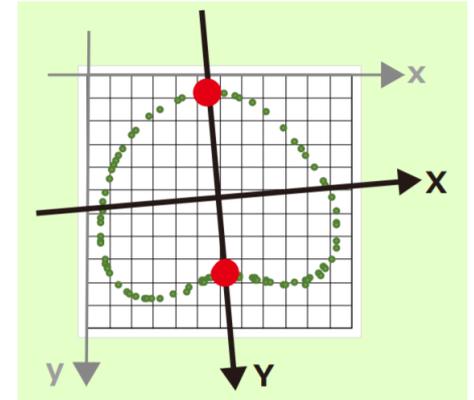
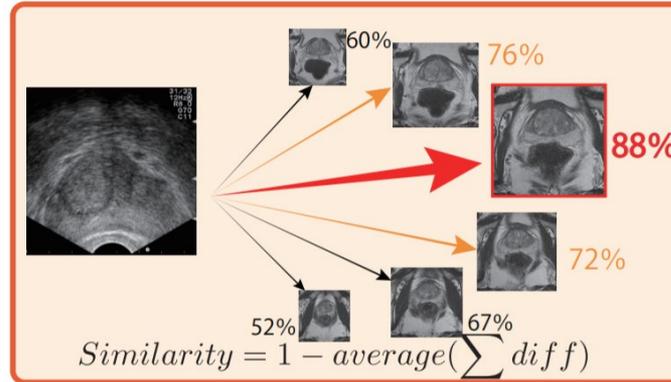
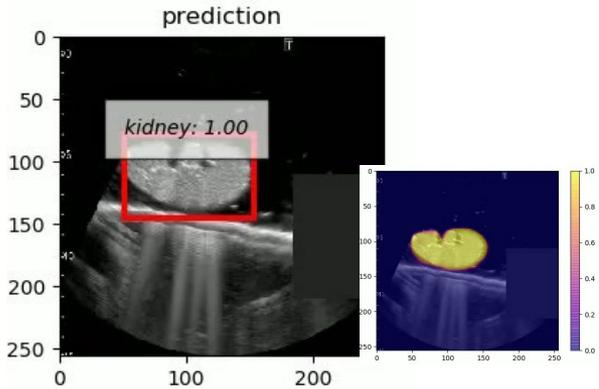
A. Otsuka, et al.
UR2018

医療専門家(プロ)の世界観を共有



医デジ化技術(ロボットビジョン)

もし、『かしこい』眼鏡でプロの眼を再現、だれもが簡便に共有できるとしたら、、、



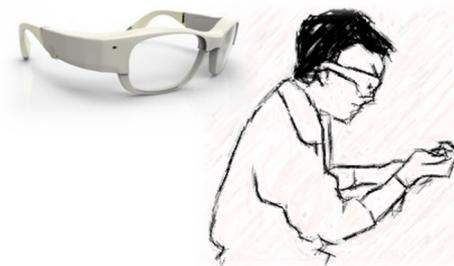
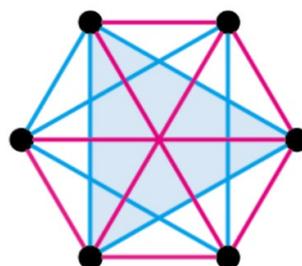
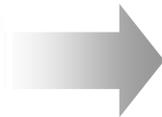
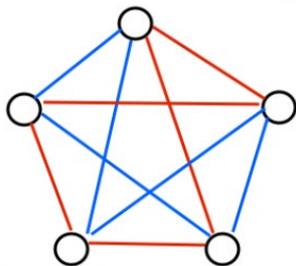
ロボットビジョン技術

K. Tomita, et al., JSTU18
最優秀演題賞受賞

R. Igarashi, et al., JSTU18
ベストポスター賞受賞

Y. Shigenari, et al., JSTU18
学生研究奨励賞受賞

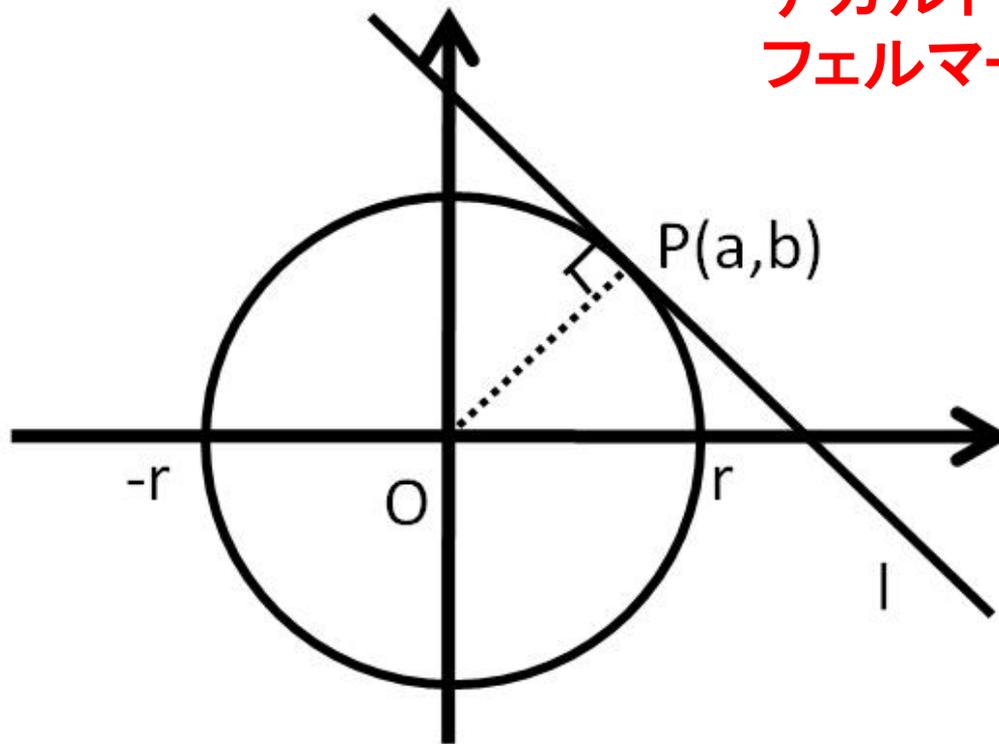
医療専門家(プロ)の世界観を共有



医デジタル化技術(ロボットビジョン)

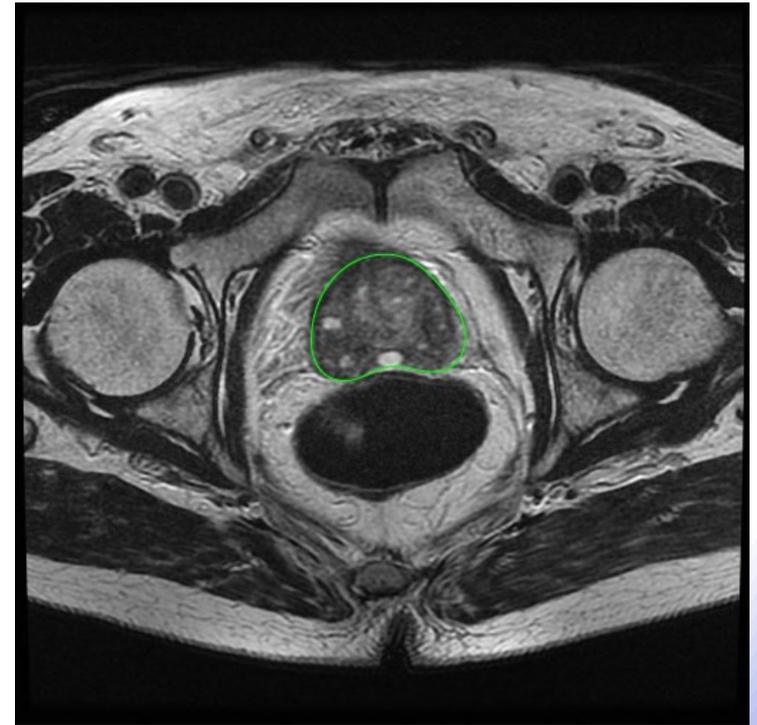
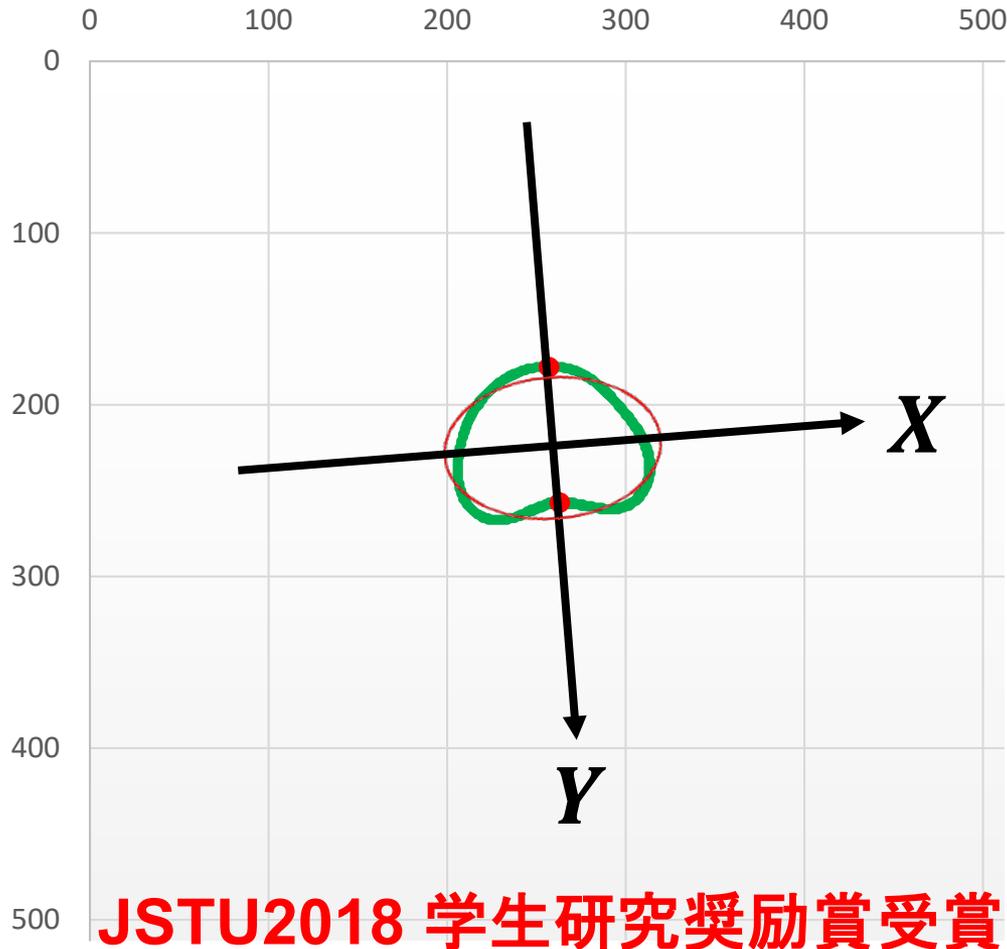
幾何+座標系 → 解析幾何学 デカルト(・フェルマー)の座標系

デカルトは論文化したが
フェルマーはしなかった



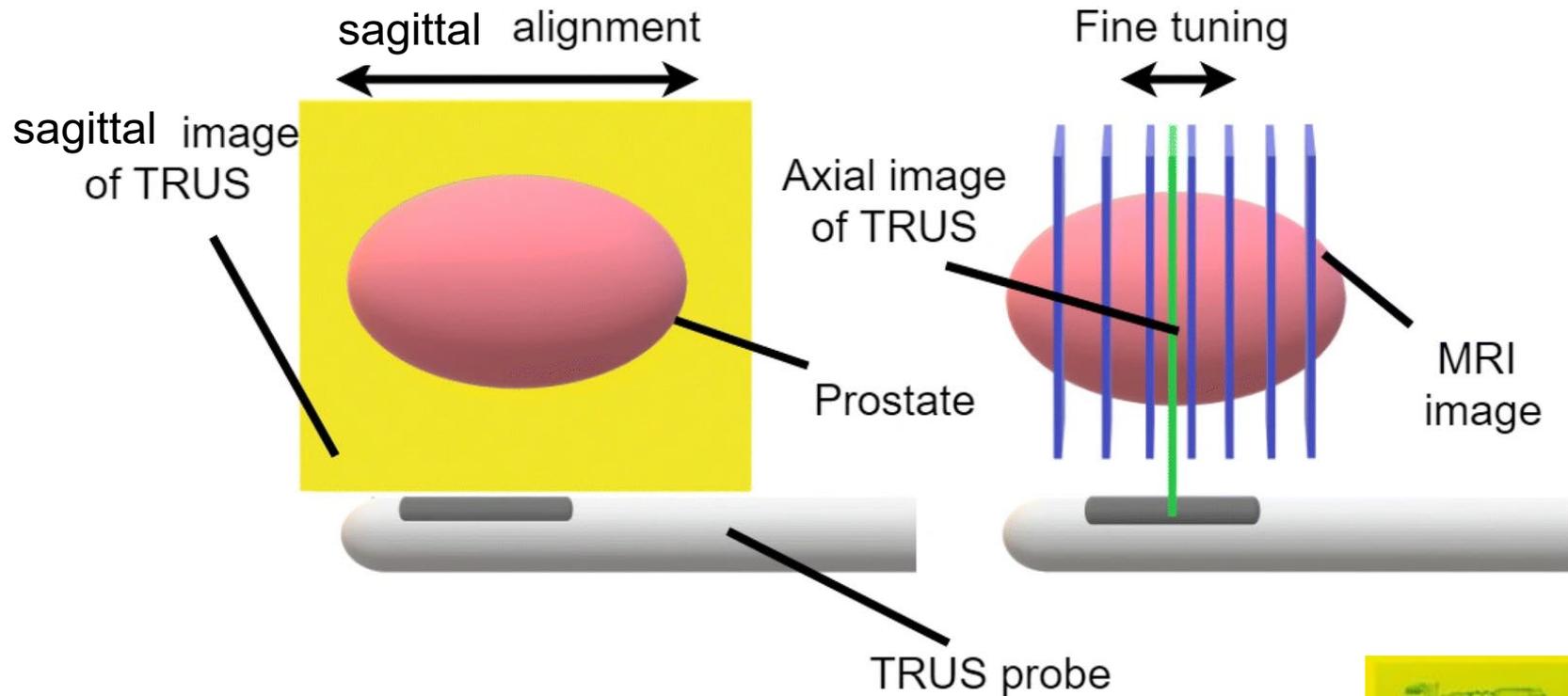
医デジ化技術(ロボットビジョン)

医療+デジタル化技術 ➡ デジタル解析医学



Y. Shigenari, et al.,
UR18

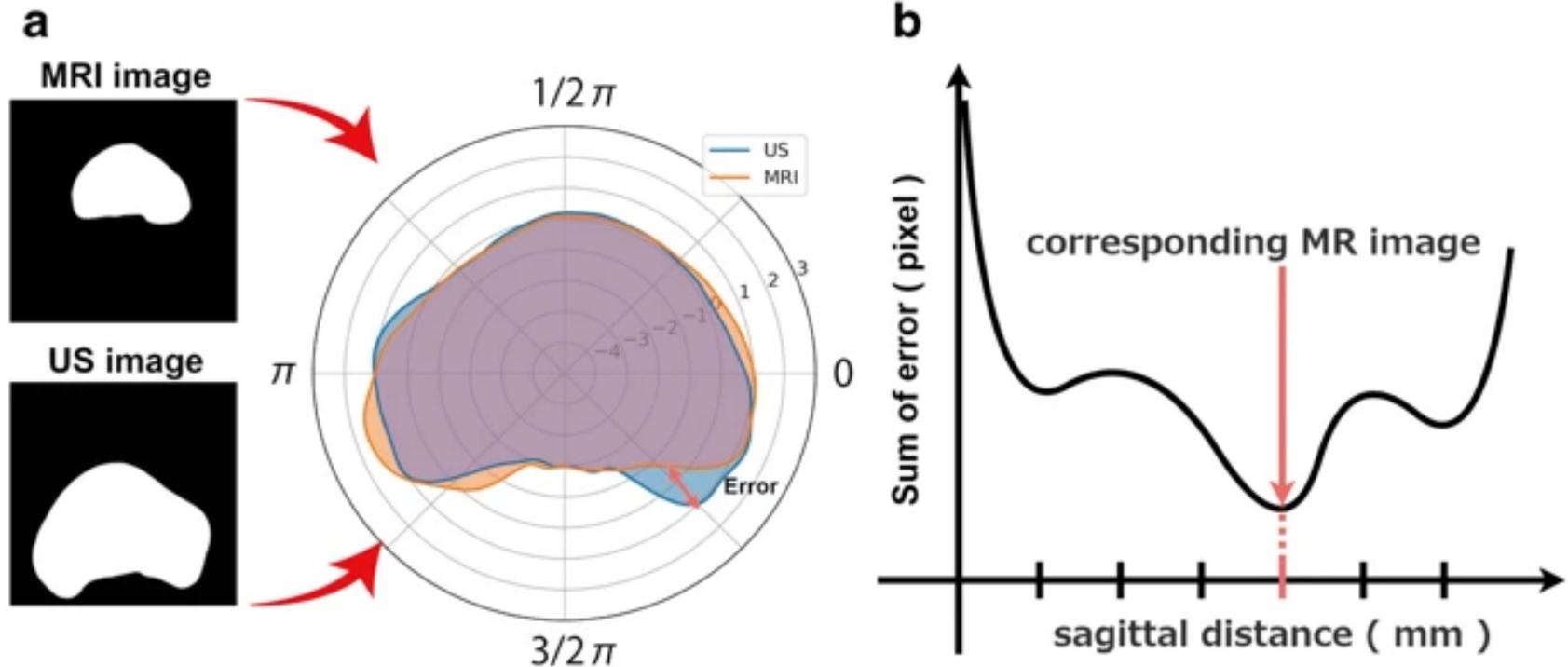
医デジ化技術(ロボットビジョン)



R. Igarashi, et al., Robomech Journal, 2019



医デジタル化技術（ロボットビジョン）



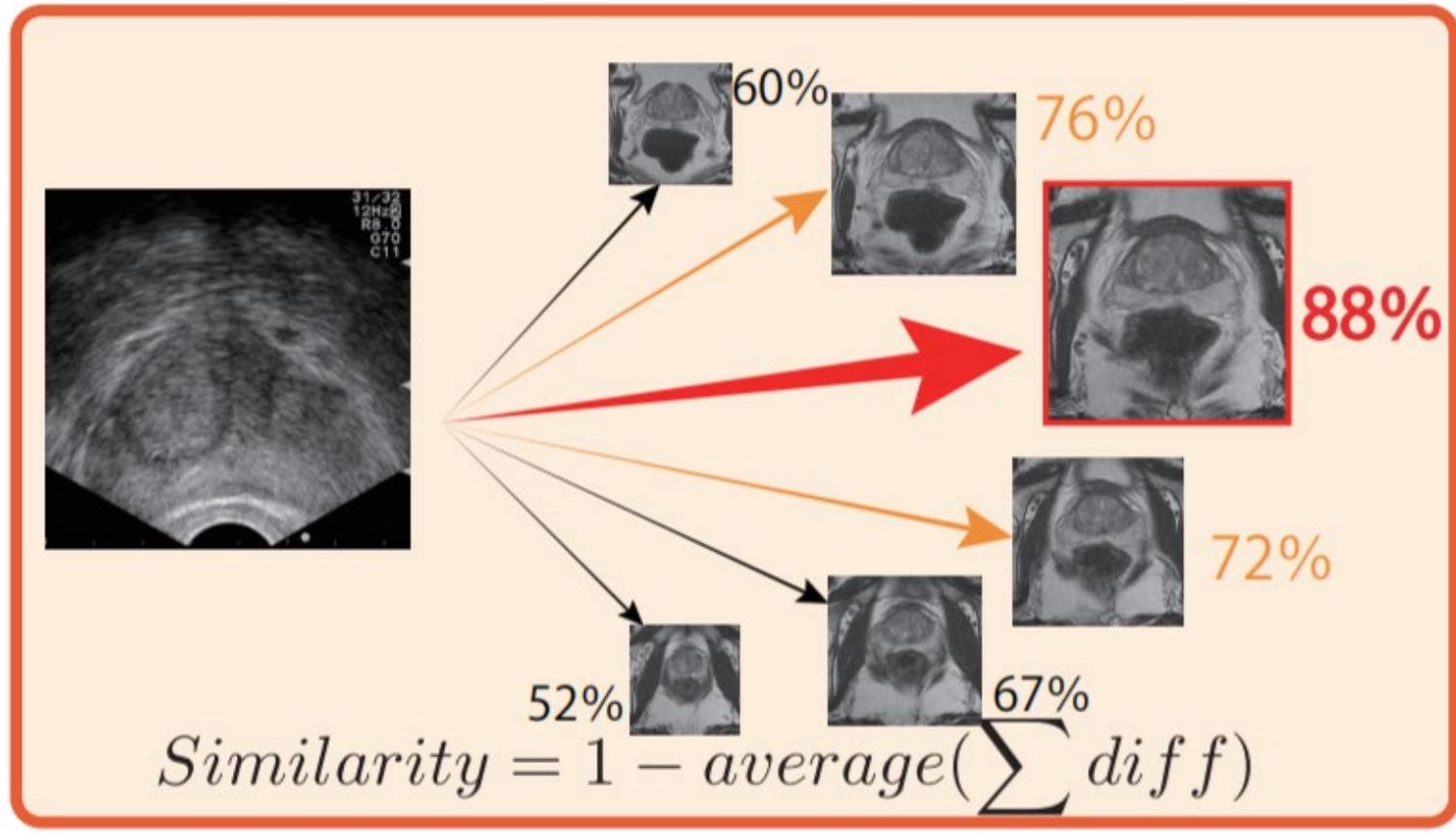
R. Igarashi, et al., Robomech Journal, 2019



医デジ化技術(ロボットビジョン)

超音波画像

MR画像



R. Igarashi, et al., JSTU18ベストポスター賞受賞

なぜ医デジ化なのか？

(医療)システムを構築・実装・製品化して
これを普及するフレーム(骨格)として

- ① 統一(合)・普遍的で、
- ② 直観(幾何学・野性)的に見通しよく単純明解で、
- ③ だれもが簡便・随意(自由自在)に
安全・安心・安定的に思いやりをもって
扱えることが本質(決定)的に重要



医デジ化

埼玉県内企業との連携

大林製作所の医療用ベッド技術× 電通大のロボットビジョン技術

UEC TOKYO

埼玉県 Powered by Saitama Prefecture
先端産業創造プロジェクト

MEDICAL & BIO ARE NEW DIGITALS!
Me-Dig IT

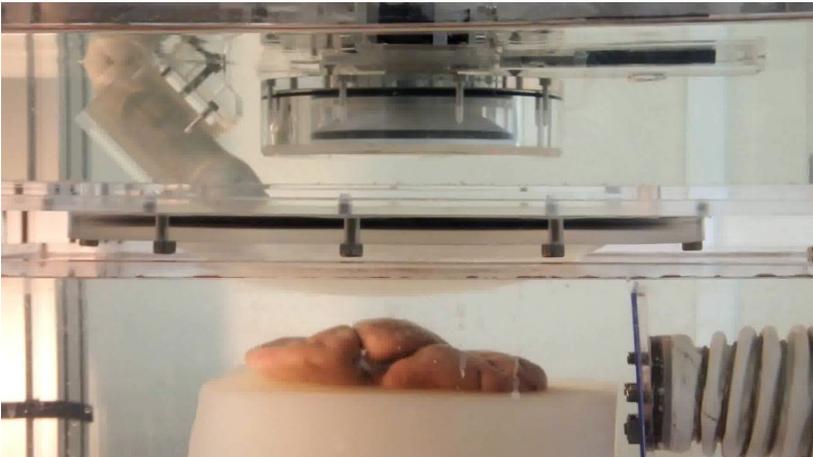
IREX[®] 2019
INTERNATIONAL ROBOT EXHIBITION
2019国際ロボット展
INTERNATIONAL ROBOT EXHIBITION 2019

株式会社 大林製作所

コンセプト

本研究で提案する非侵襲超音波診断・治療統合システム(NIUTS)とは、呼吸・拍動等により能動的に運動する患部を抽出・追従・モニタリングしながら、超音波を集束させてピンポイントに患部へ照射することにより、がん組織の焼灼や、結石の破碎を、患者の皮膚表面を切開することなく非侵襲かつ低負担で行なおうとするもの

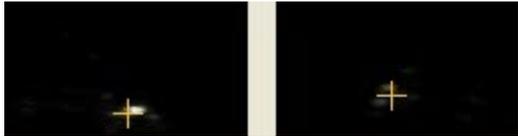
Ex. vivo exp. (swine, model kid. stone)



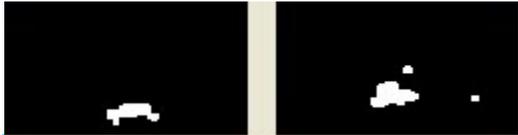
動物摘出腎中の結石追従・破碎

焦点は常時患部に一致

超音波画像



超音波画像(2値化)

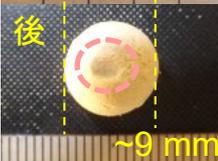


追従画像

破碎前

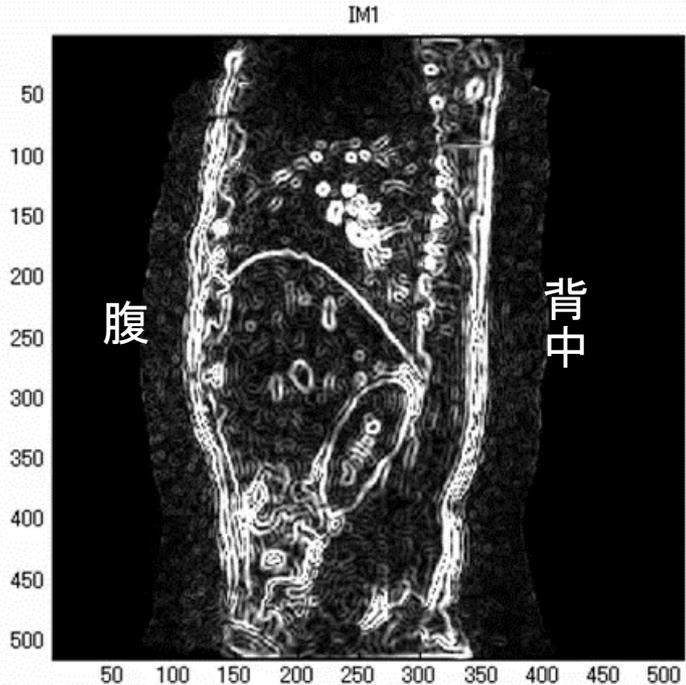


後

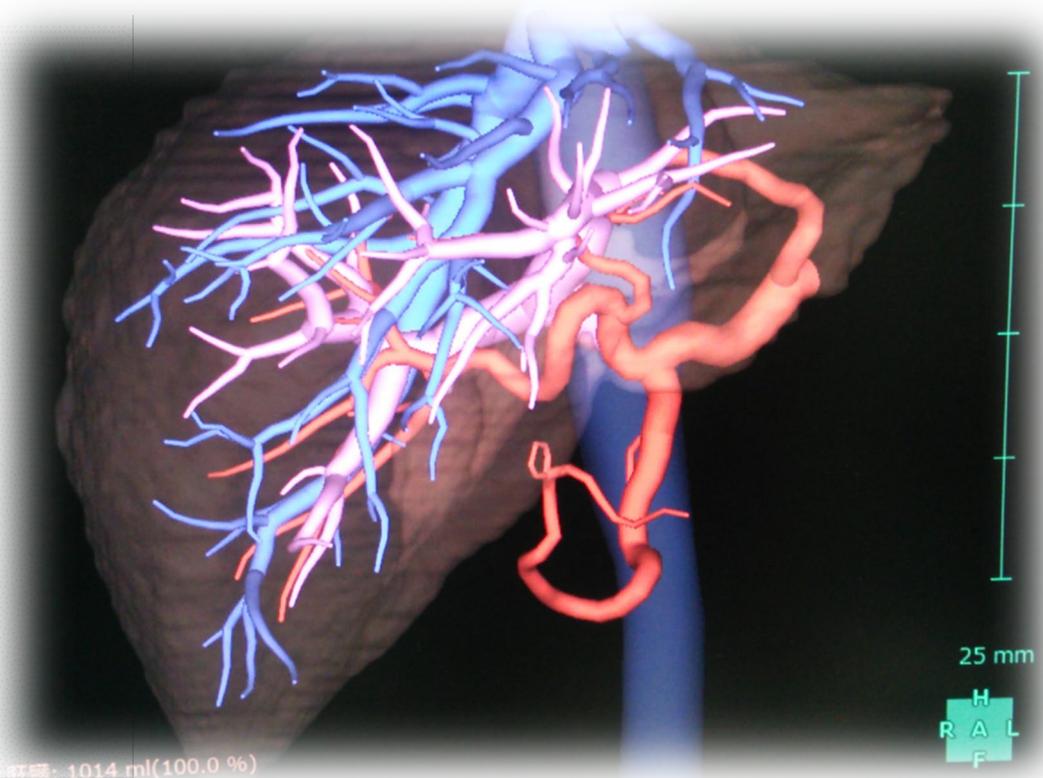


破碎結果 (結石)

~9 mm



K. Kuroda, et. al.

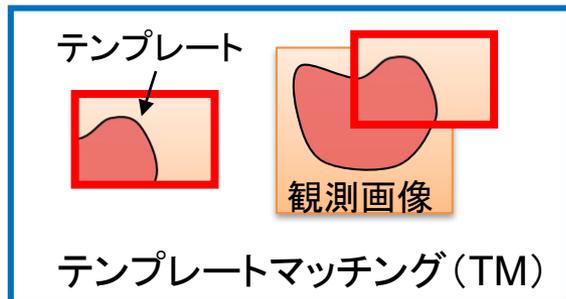
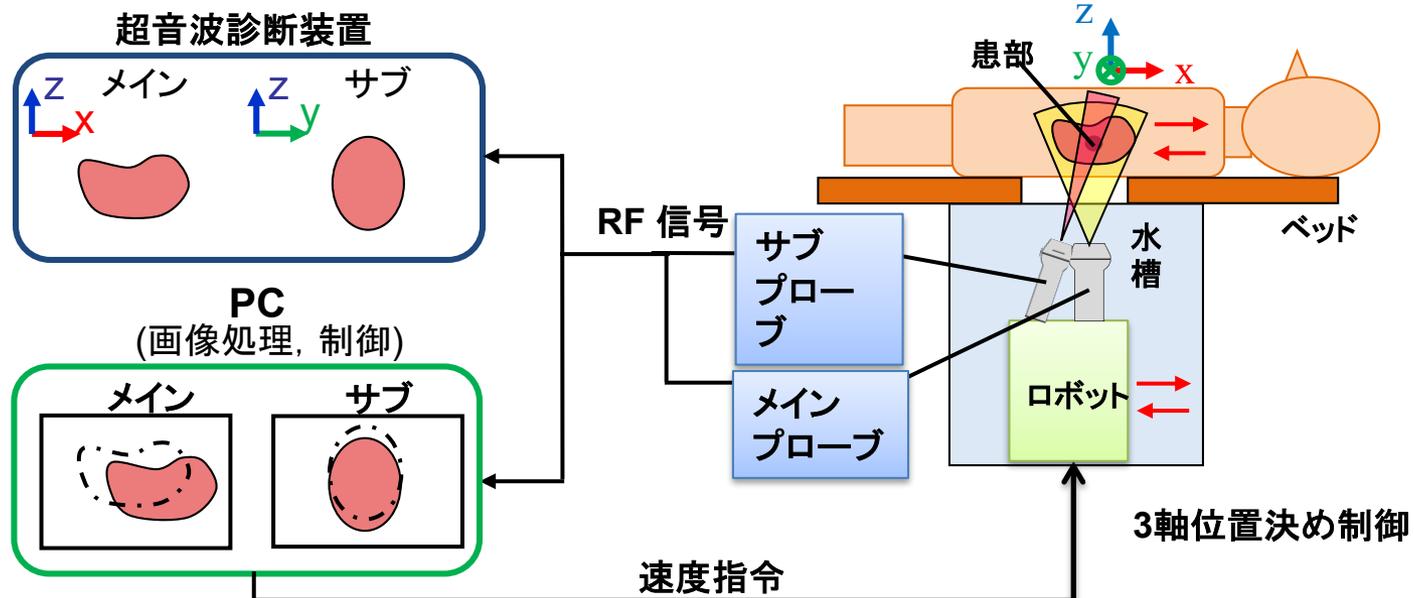


運動する臓器 (MR, 側面)

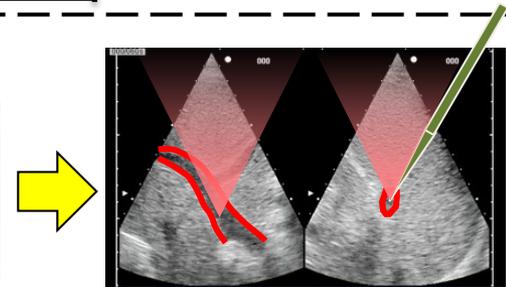
肝臓の血管 (CT)

**主要血管, 横隔膜, 消化管を傷つけないために
2.5mm、場所によっては1mm の要求精度**

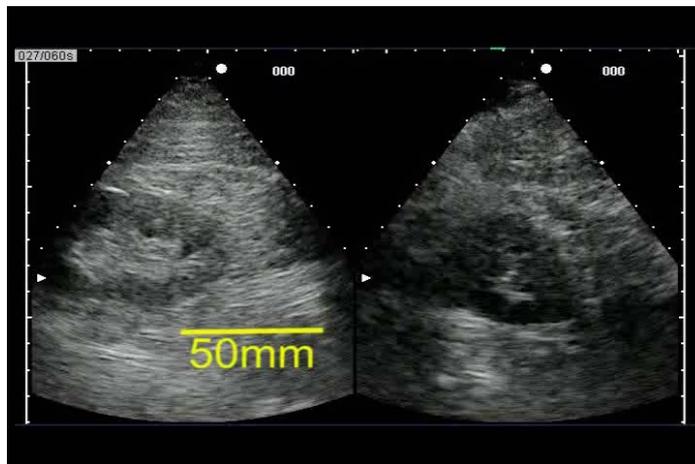
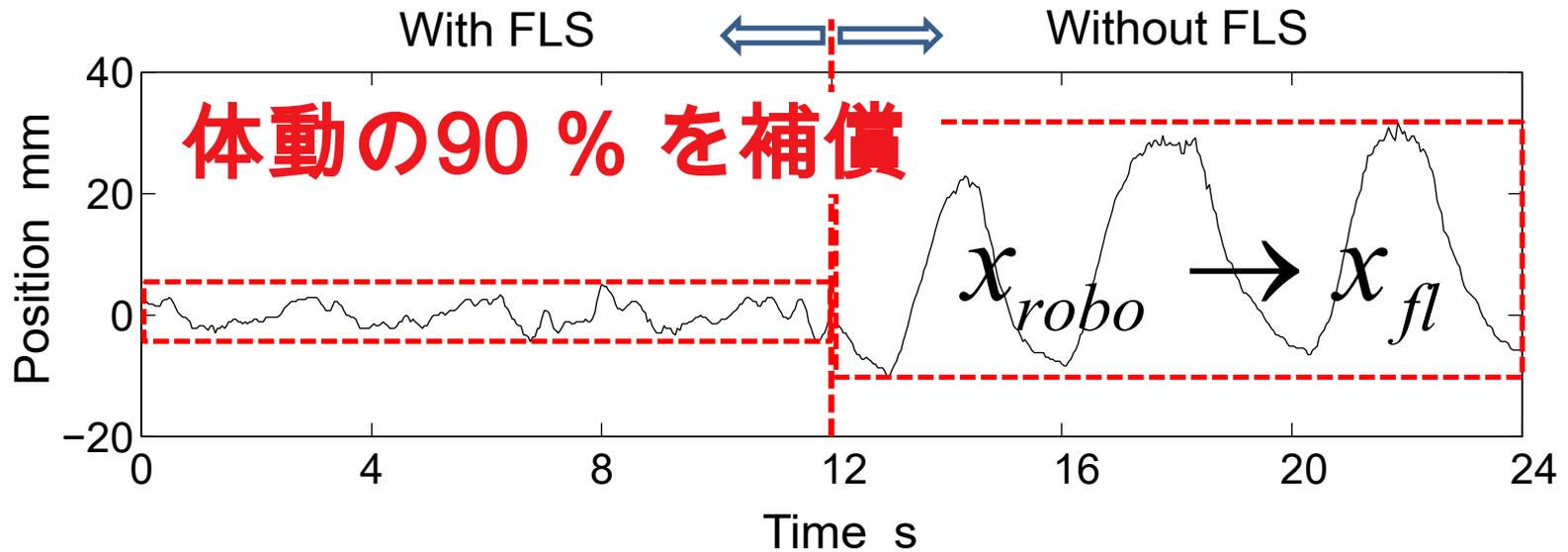
2方向からの超音波画像を基に3D的に患部に追従、体動補償



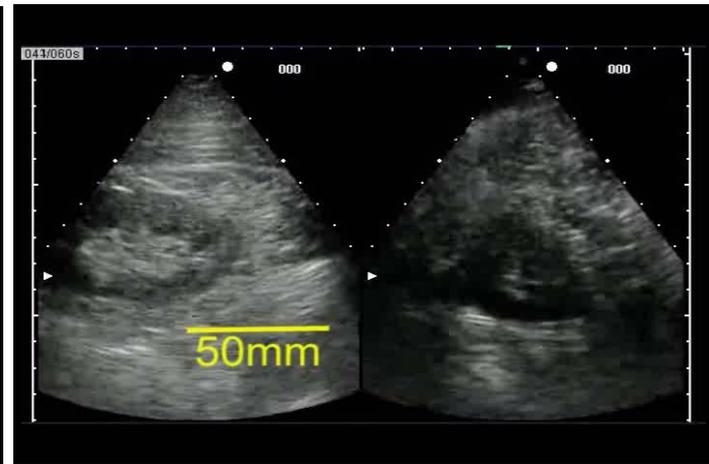
腎臓追従実験の様子



静止状態で診断・治療



With servoing



Without servoing

医療ロボットによる体動補償技術

REVIEW ARTICLE

Table 1. Visual servoing techniques used for physiological motion compensation in medical robotic applications

Contribution	Imaging modality	Markers	Rate (Hz)	DOF	Motion	Tracking	Controller
Howe (10)	3D US	Passive	28	1	H	See Cardiac surgery and interventions	
Lee et al. (31)	Bi-planar US	None	30	3	H-R	Template matching	-
Koizumi et al. (32,34)	Bi-planar US	None	100	3	R	Template matching and image moments	Feed-forward control (see section on HIFU therapy)
Seo et al. (35)	Bi-planar US	None	20	3	R	Condensation	Multi-rate delay compensation

Column 5 shows the number of DOFs used for actuation; column 6 lists the source of physiological motion to be compensated. H, heart beat; R, respiration.

HIFU therapy
 Tracking and following organ movement, while simultaneously irradiating high-intensity focused ultrasound (HIFU) onto an affected area, generates servoing errors primarily due to changes in the US image as a result of position errors, bubbles, oscillations, etc. In order to overcome these problems, Lee et al. (31) developed a visual servoing controller for targeting kidney stones (lithotripsy), using HIFU. Biplanar US images were captured using two US probes simultaneously at a rate of 30 Hz to track a kidney stone in 3D, in order to compensate for the physiological motions caused by respiration and heart beat. A hierarchical (correlation-based) template matching was used for tracking the kidney stone with a sub-pixel accuracy in each image.

In another study, Koizumi et al. (32) proposed a non-invasive US therapy and diagnostic system that tracks the movement of a kidney stone, for use in targeting by HIFU. Two approaches were applied simultaneously. The first approach was to minimize the servoing error. This was done through a robust detection method of the stone position, based on shape information, by taking advantage of the Graham scan algorithm (33), which generates a convex-shaped hull of the stone. A feed-forward controller based on utilizing the quasi-periodical motion of the affected area (mainly caused by respiration) was proposed and implemented to enhance the servoing performance (34). It was shown that this method enhanced the servoing performance by a maximum error of 2.4 mm and an average error of 0.11 mm. The second approach was to reduce the effect of the servoing error (to enhance patient safety) by controlling HIFU irradiation power in accordance with the servoing error.

Seo et al. (35) used the coagulated lesion created by HIFU as a spatial landmark to track the motion of the organ in biplanar US images. The initial location of a tumour is estimated by registration of a pre-operative image of the organ, e.g. obtained by a multidetector CT, then HIFU is applied to create the initial lesion. The 3D position of the coagulated lesion is then tracked by applying a stochastic motion-tracking algorithm to the biplanar US images in real time. The focal point of the HIFU transducer is located at the intersection of the US image planes and the biplanar US probe in a fixed configuration. The HIFU transducer and US probes are carried by a three-DOF robot. Visual servoing is applied to minimize the distance between the focal point of the HIFU and the 3D position of the coagulated lesion while the organ is moving due to respiration. An RMS error of approximately 2 mm was achieved in phantom studies (35). This technique is especially useful for cases such as renal cell carcinoma, where the tumour boundaries are difficult to segment and there is significant physiological motion (e.g. due to respiration).

Azizian M (Intuitive Surgical Inc.), et al. Visual servoing in medical robotics Part II: tomographic imaging modalities – techniques and applications. *Int J Med Robot Comput Assist Surg (IJMRCAS)* 2014

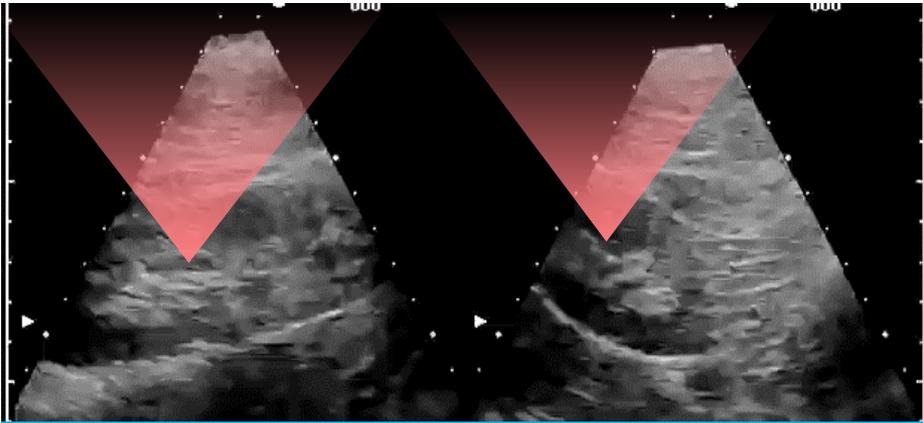
(31) Lee D, Koizumi N, Ota K, et al. Ultrasound-based visual servoing for kidney stone lithotripsy. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (**IROS2007**).

(32) Koizumi N, Seo J, Lee D, et al. Robust kidney stone tracking using ultrasound theragnostic system – servoing performance. In IEEE International Conference on Robotics Automation (**ICRA2008**).

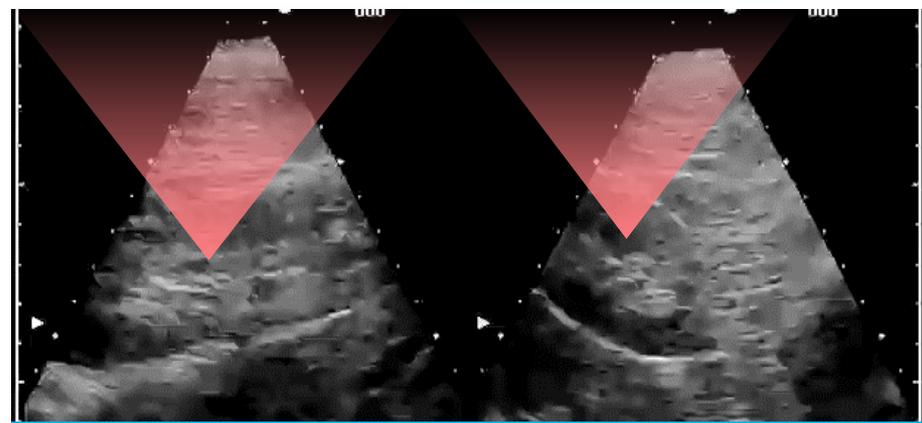
(34) Koizumi N, Seo J, Suzuki Y, et al. A control framework for visual servoing of ultrasound theragnostic system. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (**IROS2009**).

(35) Seo J, Koizumi N, Funamoto T, et al. Visual servoing of a therapeutic HIFU system by coagulated lesion tracking: a preliminary study. *Int J Med Robot Comput Assist Surg (IJMRCAS)* 2011.

医療ロボットにおける体動補償技術のパイオニアかつ中核的存在



Without servoing



With servoing



2015/03/06 12:42:10

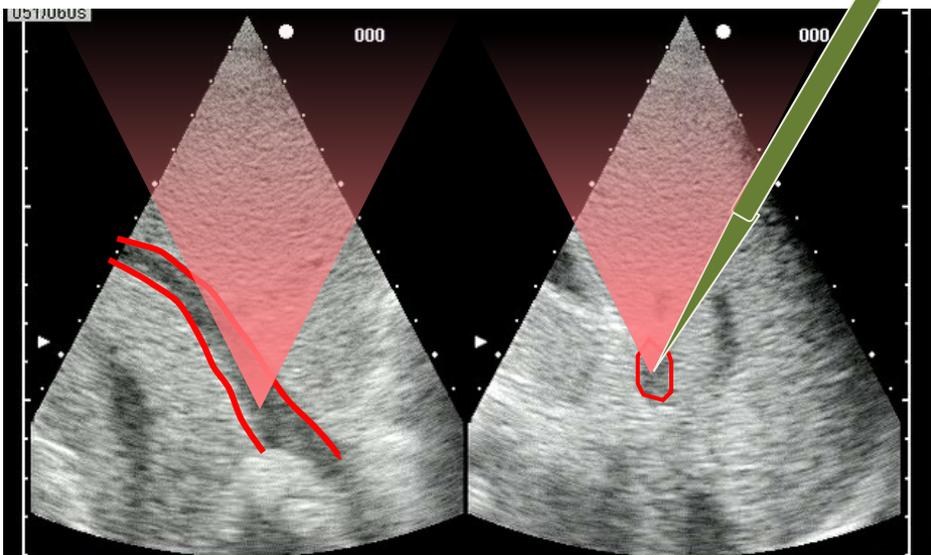


Kidney motion compensation

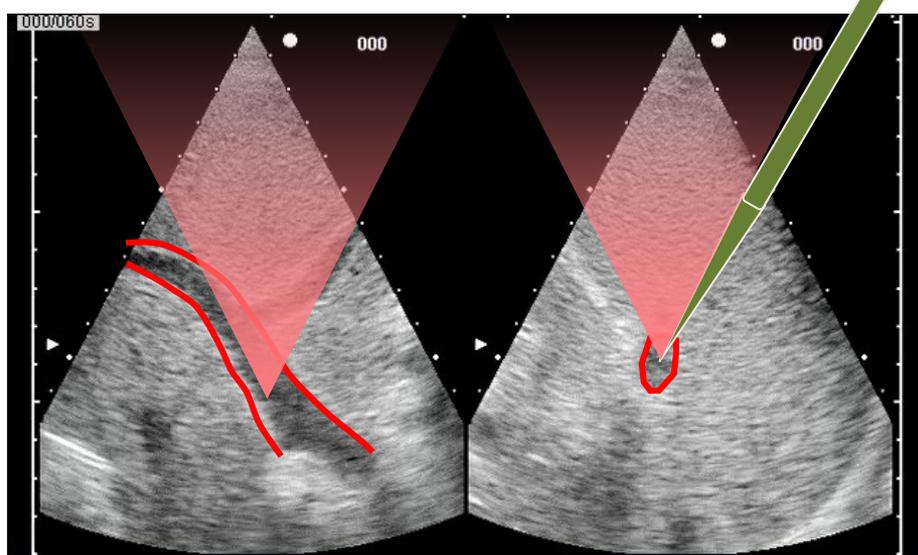
**体動の90 %
を補償,
1mm
の精度を
実現**

1.3 mm の精度を実現

静的な世界で診断・治療



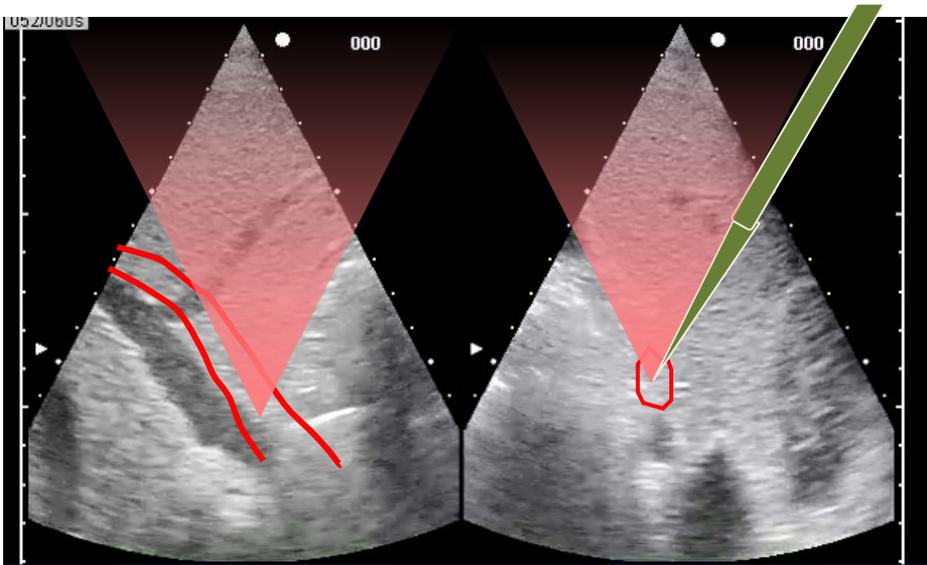
Without servoing



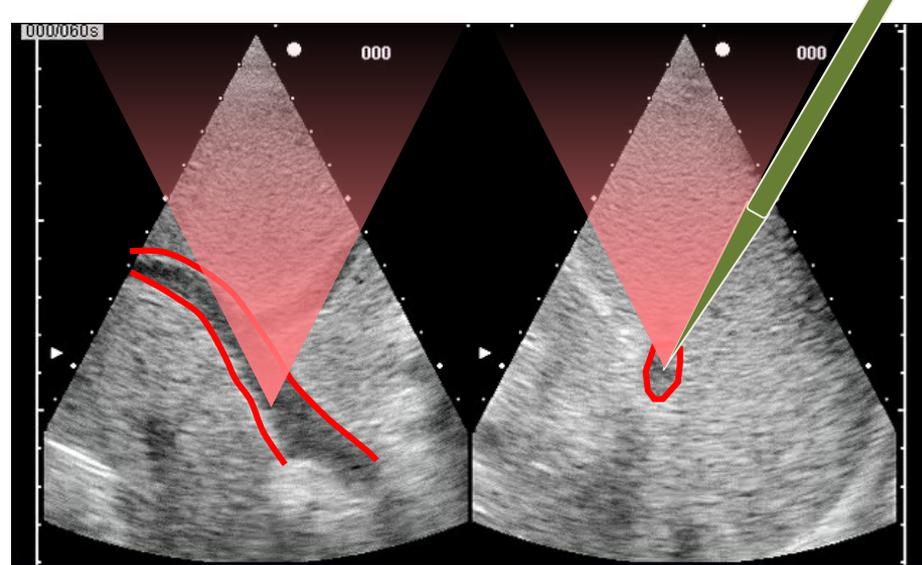
With servoing

1.3 mm の精度を実現

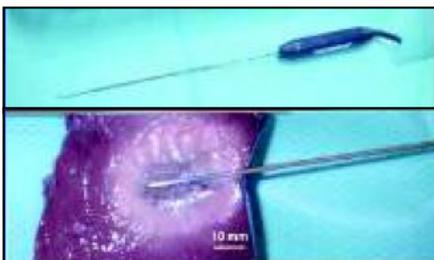
静的な世界で診断・治療



Without servoing



With servoing



RFA治療

超音波ガイド下の
診断・治療を容易化
装置の普及を促進



研究ロードマップ

非侵襲超音波診断・治療統合システム

人体に対して安全・安心に動作するとともにがんや結石の超音波診断・治療を非侵襲かつ低負担で行なうシステムの実現



医師

負担軽減

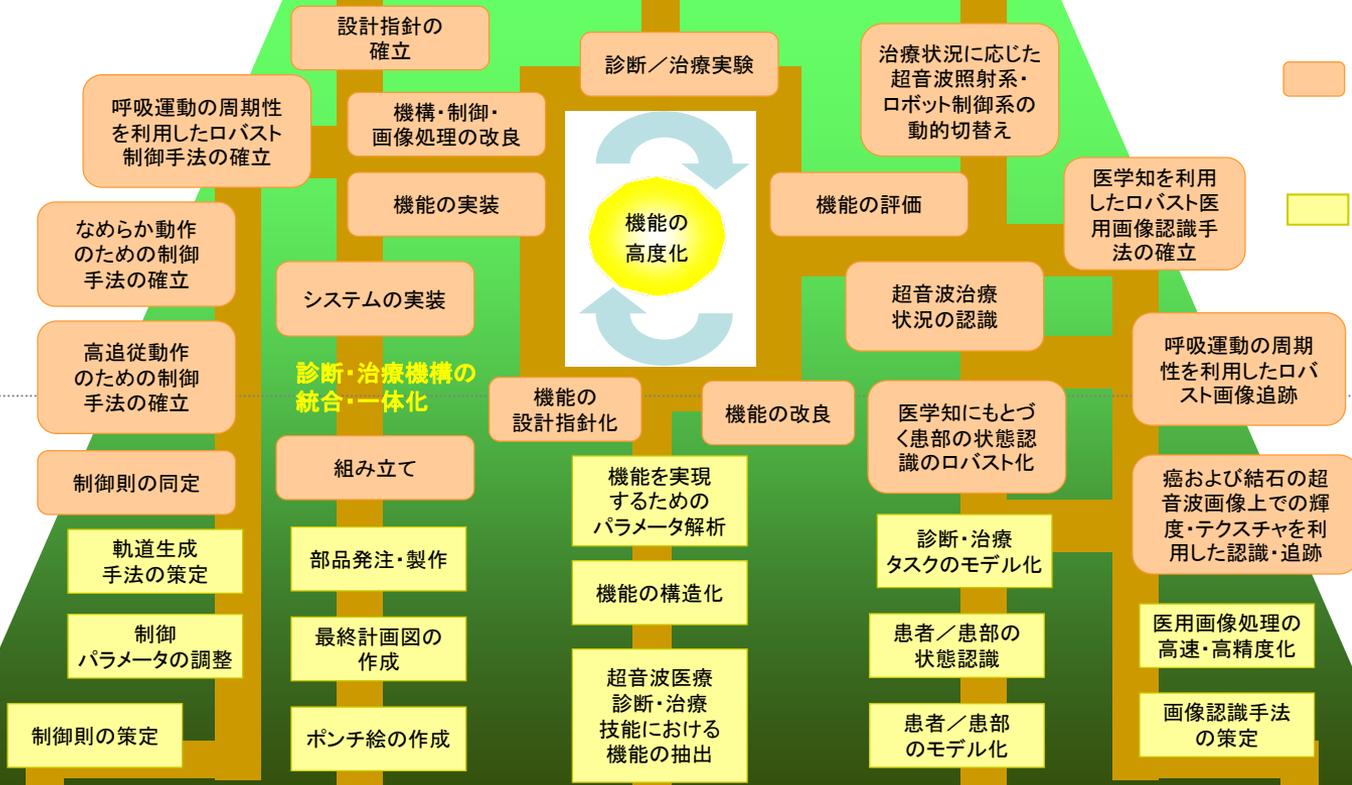


中高齢者

負担軽減

平成YY年度

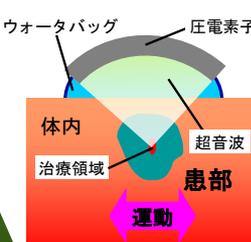
平成XX年度



- ...研究・開発のステップ, 特に, 研究成果の発表を予定.
- ...研究・開発のステップ.

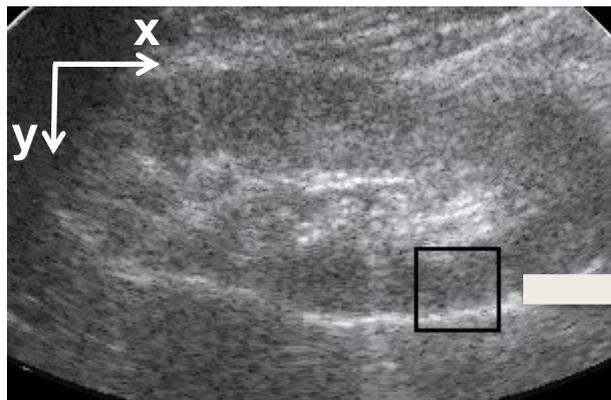


がん / 腎臓結石の診断

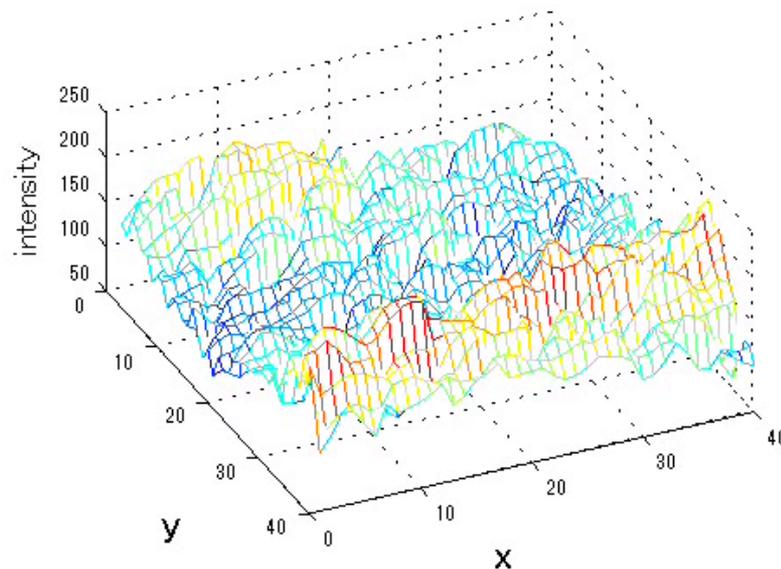


非侵襲超音波治療

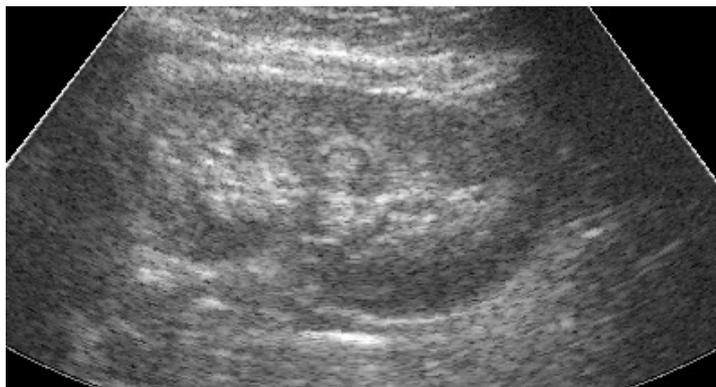
- 人体に対する安全・安心 接触 / 非接触 動作技術
- 機能に応じた高精度機構 設計技術
- 超音波医療 診断・治療技能 における機能抽出・ 構造化技術
- 超音波診断・ 治療タスクに応じた システム動作 切替え技術
- リアルタイム 医用超音波画像 処理技術



呼吸停止状態



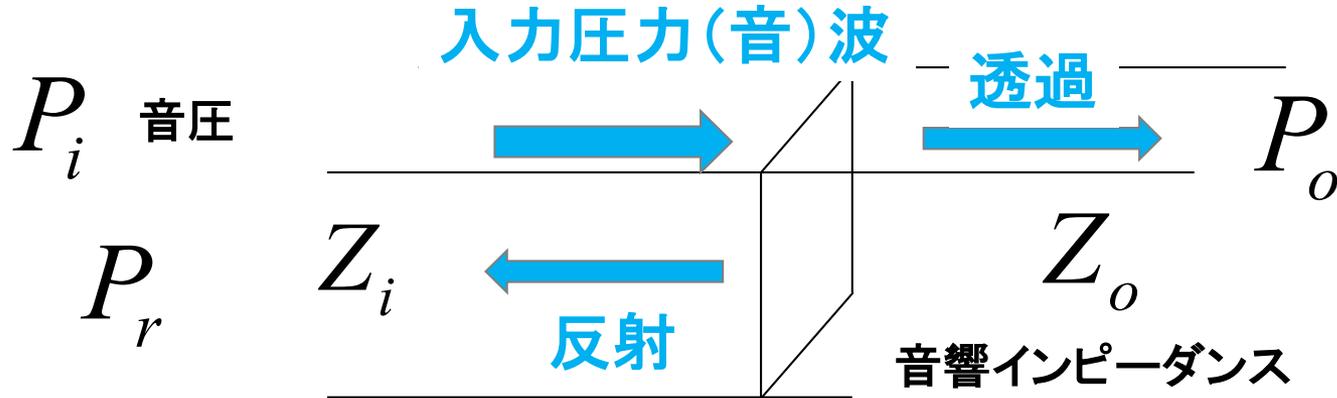
輝度値の変動



呼吸状態

超音波画像はノイズが大きい
医用画像！

手前の反射・散乱体の影響で
後方の画像が乱れる



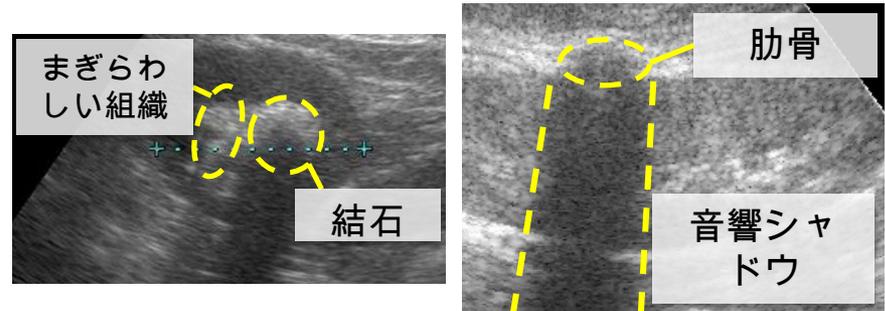
反射音圧 $P_r = \frac{Z_o - Z_i}{Z_o + Z_i} P_i$

反射係数

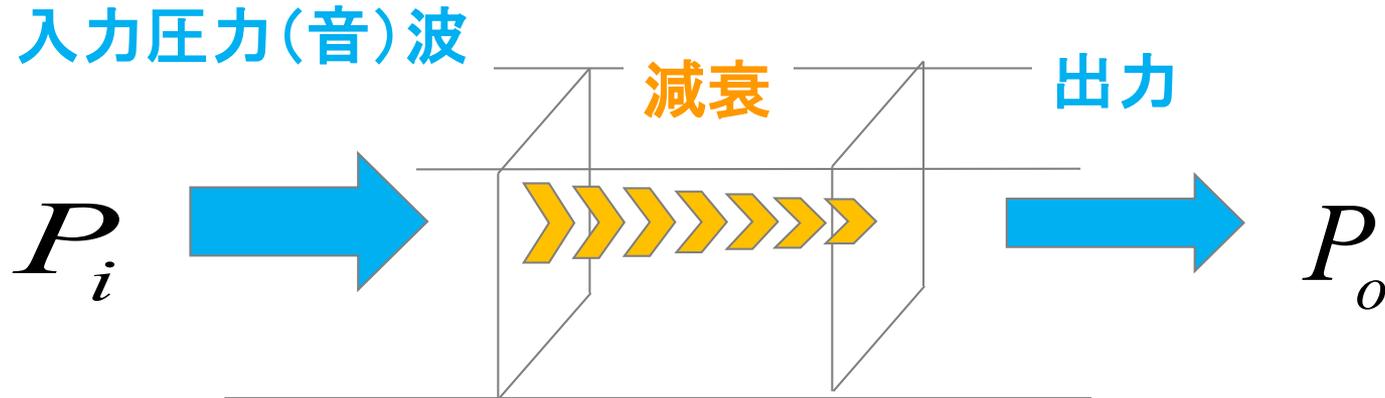
透過音圧 $P_o = \frac{2Z_o}{Z_o + Z_i} P_i$

Table 4.4: Reflection coefficients in human abdomen

$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$	Blood	Fat	Muscle	Kidney	Water	Renal calculi
Blood	0	0.08	0.024	0	0.032	0.325 to 0.601
Fat		0	0.104	0.08	0.0482	0.395 to 0.650
Muscle			0	0.024	0.056	0.303 to 0.586
Kidney				0	0.0318	0.325 to 0.601
Water					0	0.353 to 0.621
Renal calculi						0



インピーダンス・マッチングが低いと、音は透過できない！



音の減衰理由

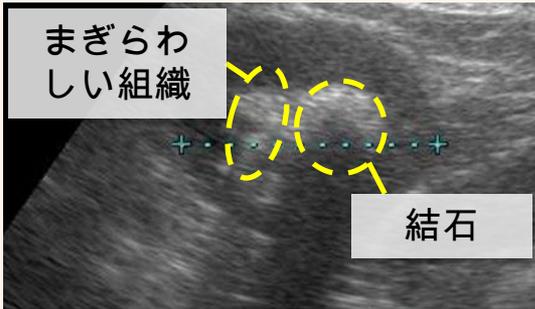
- (i) 熱への変換
- (ii) 拡散減衰
- (iii) 散乱減衰
- (iv) 遅延減衰

減衰率:

$$\beta = 20 \log \frac{P_o}{P_i}$$

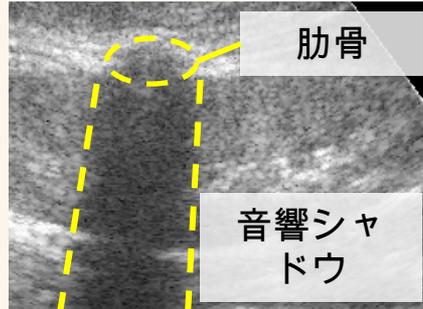
高周波超音波は、高分解な画像
を取得できるが、減衰が大きい！

生体における追従の問題点



(i) まぎわらしい組織

画像の質: 低



(ii) 音響シャドウ

画像の質: 低



(iii) 気泡ノイズ

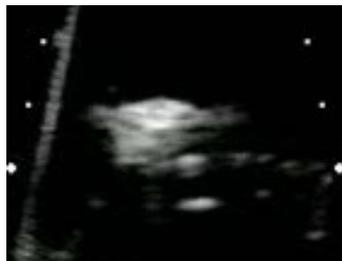
画像の質: 低



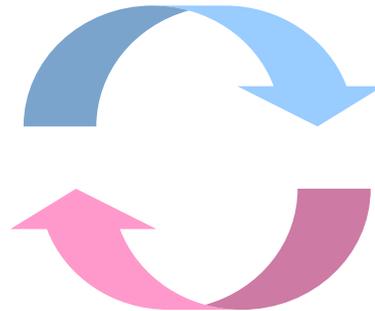
(iv) 機構振動

画像の質: 低

追従誤差の増大 視点の変化



画像の質: 高



画像の質 (Image Quality) の劣化

- (i) まぎわらしい組織
- (ii) 音響シャドウ
- (iii) 気泡ノイズ
- (iv) 機構振動

何らかの方法で追従精度を向上することができれば、劇的に追従精度が向上する可能性

2つのアプローチ

アプローチ1. 追従誤差の最小化

画像情報を利用したがん／結石のロバスト認識と位置の同定手法

呼吸情報の周期性を利用した追従精度向上手法

先端独立制御機構・照射強度制御による画像の質向上

アプローチ2. 追従誤差発生時の影響の最小化・リカバリ

誤差に応じた照射強度制御手法

患部位置推定モデルによる追従失敗時のロバスト追従復帰

研究ロードマップ

非侵襲超音波診断・治療統合システム

人体に対して安全・安心に動作するとともにがんや結石の超音波診断・治療を非侵襲かつ低負担で行なうシステムの実現



医師

負担軽減

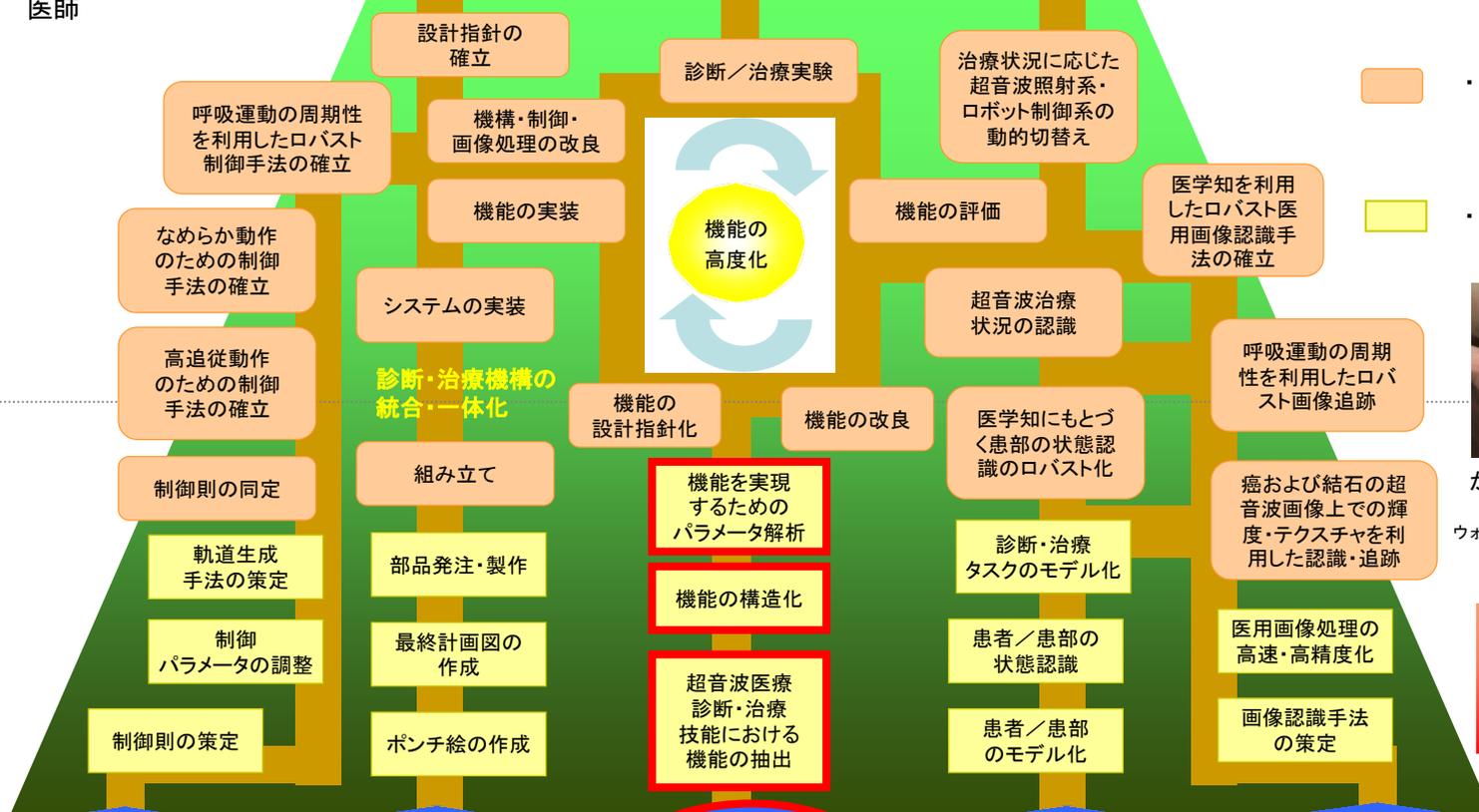


中高齢者

負担軽減

XX年度

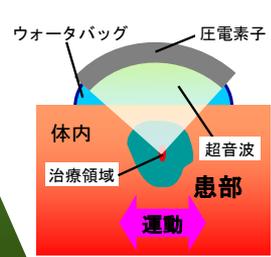
YY年度



- ...研究・開発のステップ, 特に, 研究成果の発表を予定.
- ...研究・開発のステップ.



がん / 腎臓結石の診断



非侵襲超音波治療

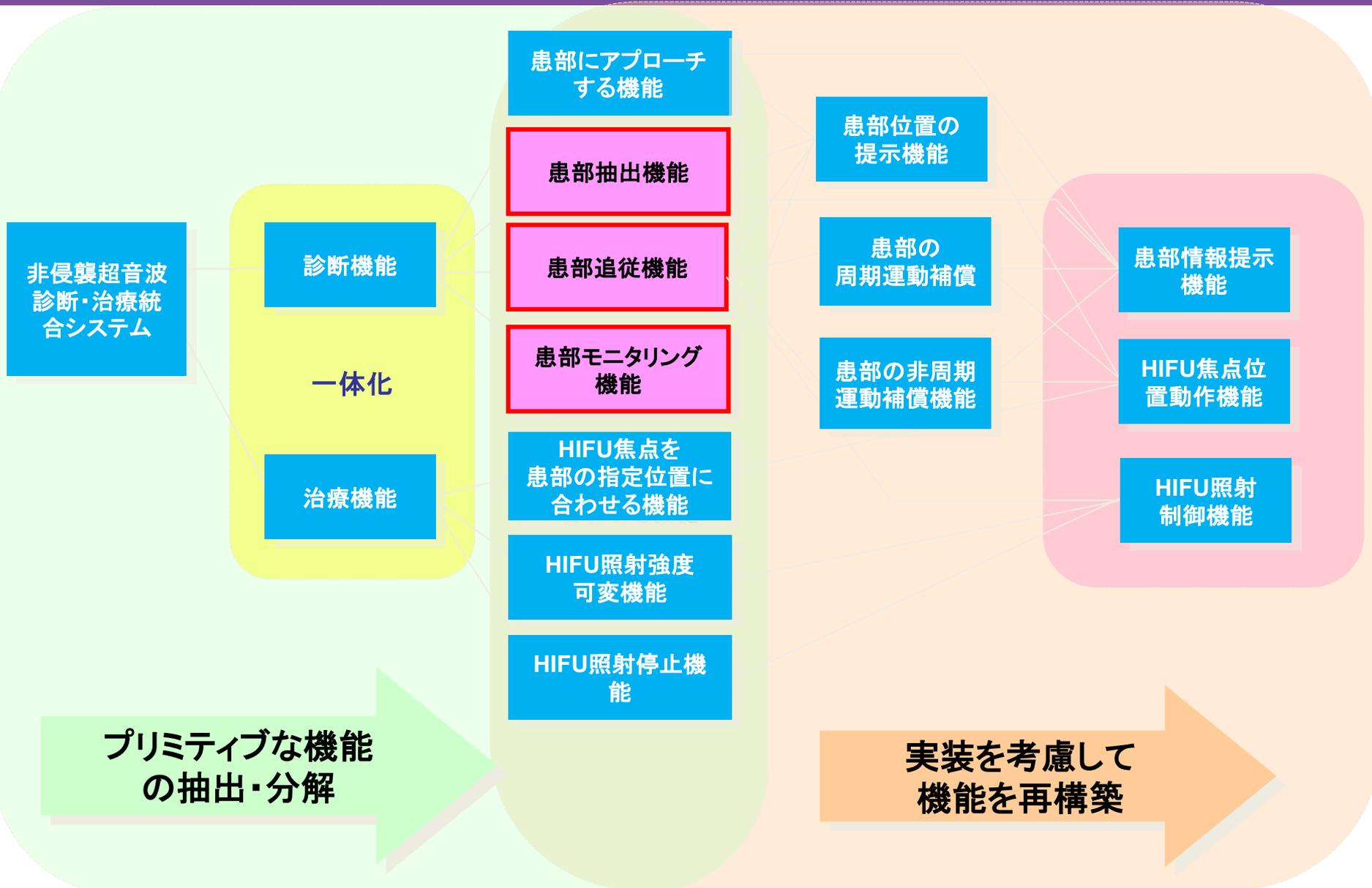
人体に対する安全・安心 接触 / 非接触 動作技術

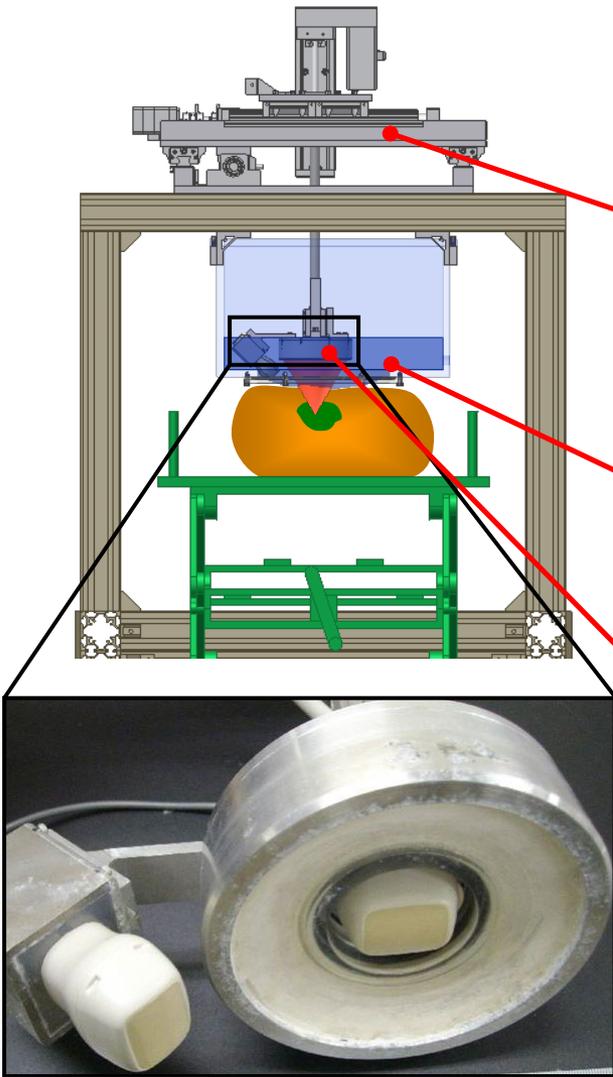
機能に応じた高精度機構 設計技術

超音波医療 診断・治療技能 における機能抽出・ 構造化技術

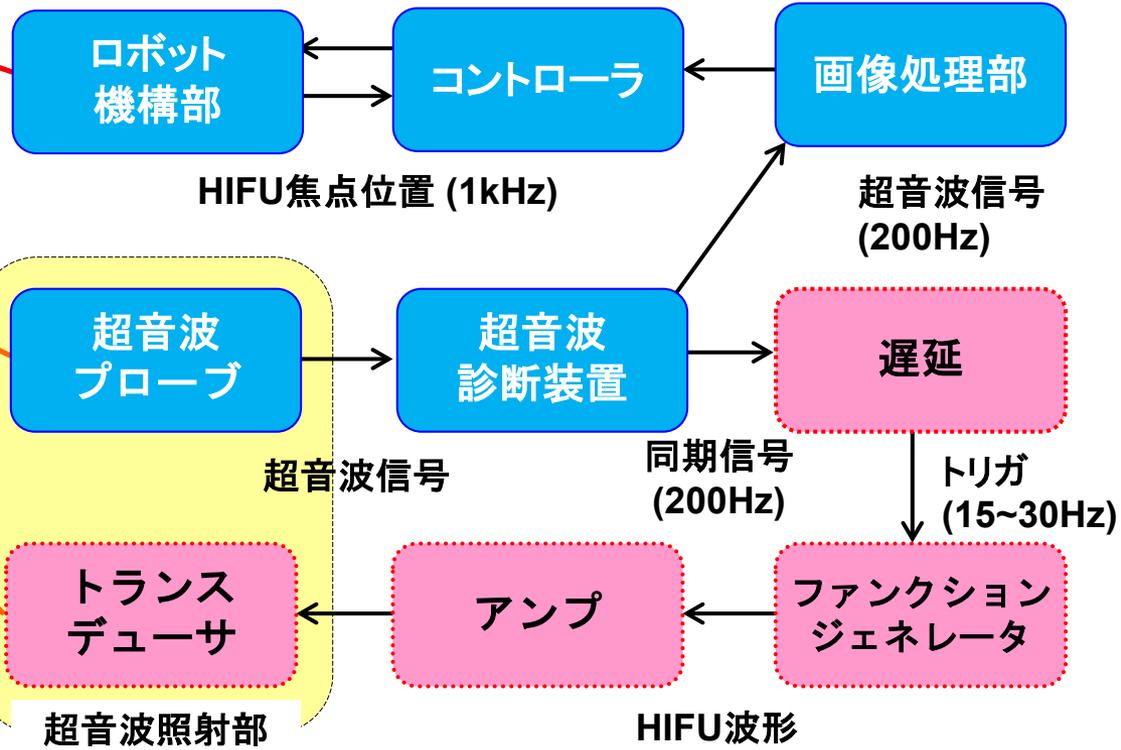
超音波診断・ 治療タスクに応じた システム動作 切替え技術

リアルタイム 医用超音波画像 処理技術



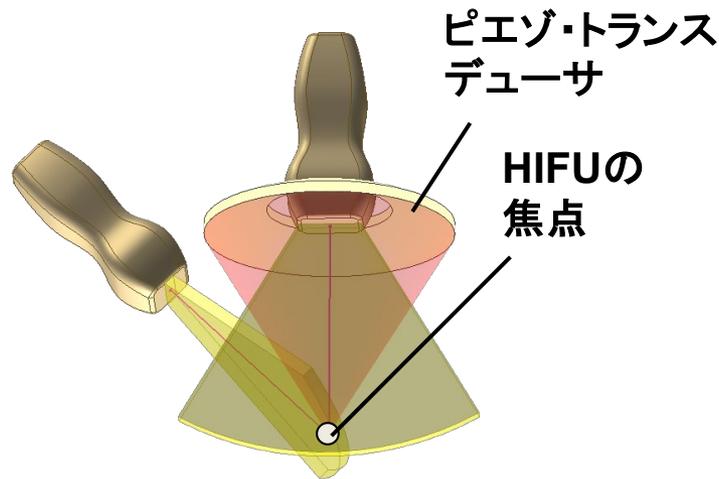


超音波照射部



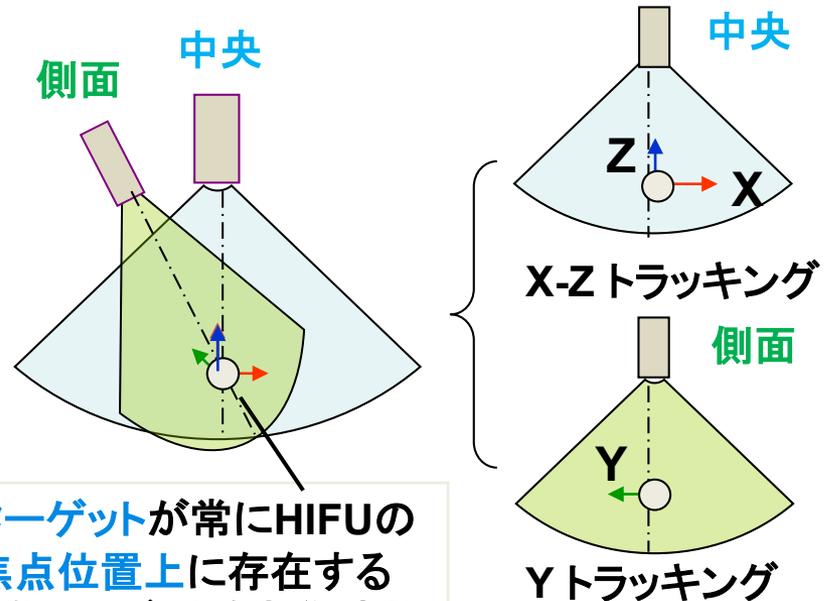
青色ブロック: 患部抽出・追従・モニタリング部
赤色ブロック: 治療用超音波照射部

超音波プローブ



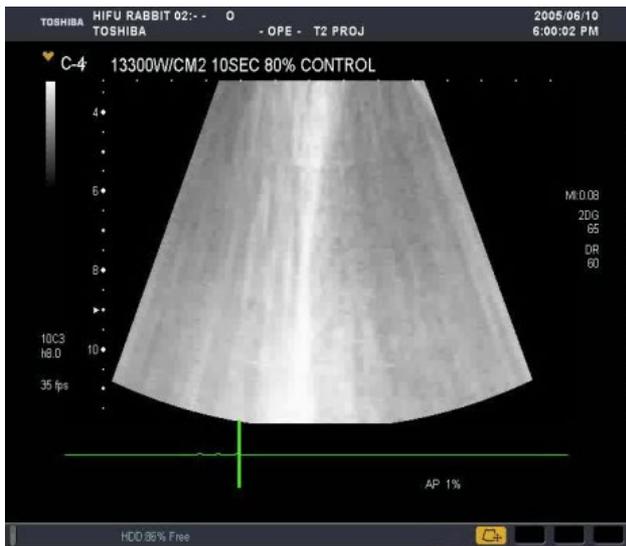
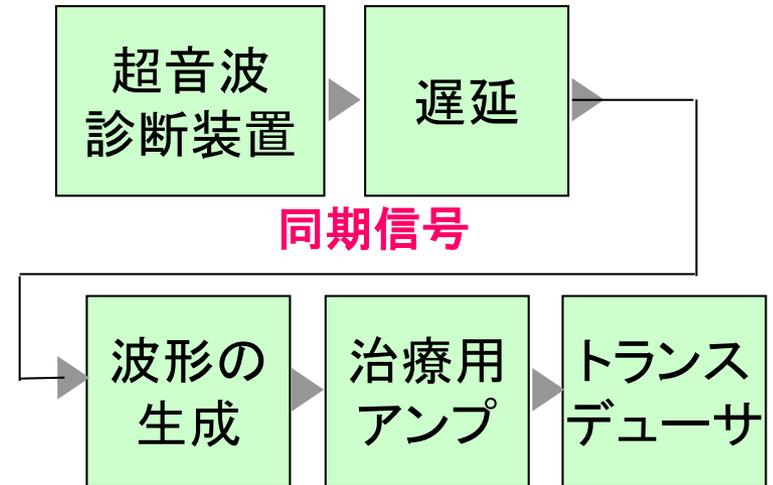
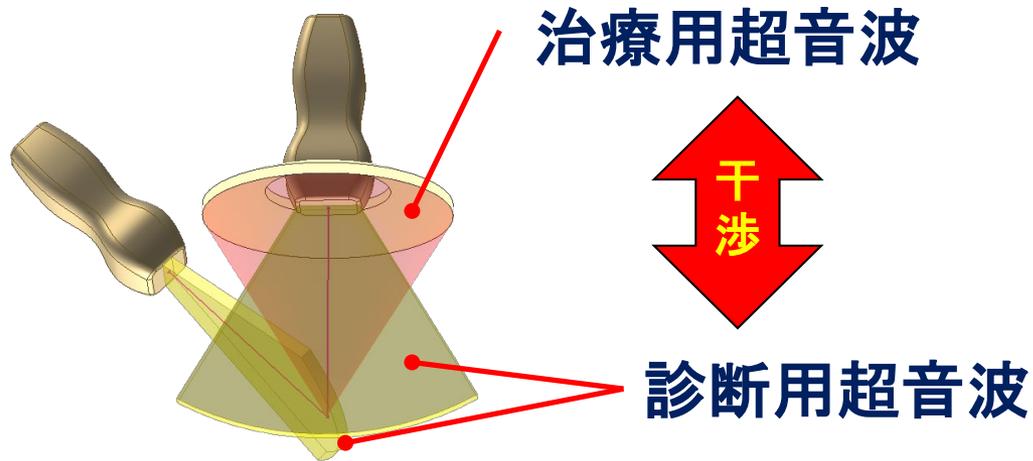
スキャンする平面が互いに直交する2本のプローブ

プローブ・トランスデューサ配置



ターゲットが常にHIFUの焦点位置上に存在するようにロボットを制御する

ステレオ超音波画像によるターゲット位置同定



同期信号なし



同期信号あり

何らかの方法で追従精度を向上することができれば、劇的に追従精度が向上する可能性

2つのアプローチ

アプローチ1. 追従誤差の最小化

画像情報を利用したがん／結石のロバスト認識と位置の同定手法

呼吸情報の周期性を利用した追従精度向上手法
先端独立制御機構・照射強度制御による画像の質向上

アプローチ2. 追従誤差発生時の影響の最小化・リカバリ

誤差に応じた照射強度制御手法

患部位置推定モデルによる追従失敗時のロバスト追従復帰

腎臓結石の音響インピーダンスが周囲の身体組織と比較して高いために、超音波画像上で**高い輝度**を有することを利用

解析領域

ヒストグラム

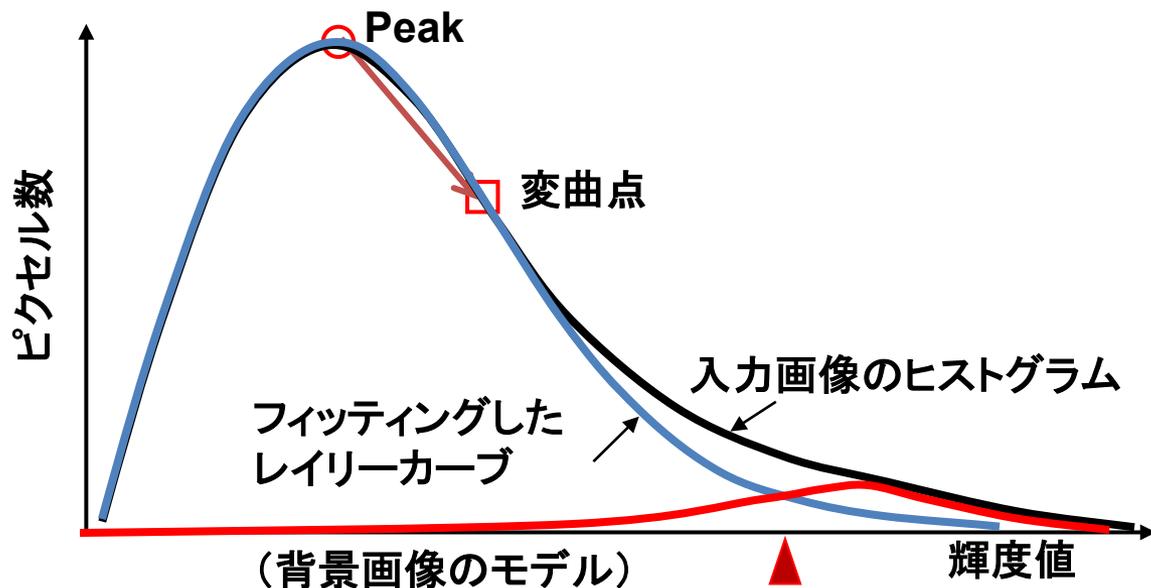
結石なし

結石の抽出

結石あり

音響インピーダンスが周囲の生体組織と比較して**高い**

レイリーカーブ(背景画像のモデル)を利用して背景と結石との輝度の閾値を決定, 入力画像から結石を抽出

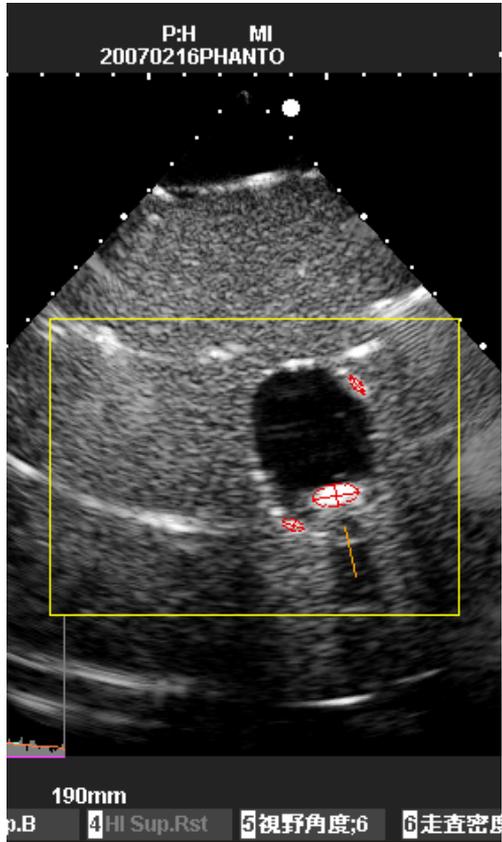


動物摘出腎中の
モデル結石抽出

Threshold
(これより高い輝度を入力画像
から抽出し, 結石の候補とする)

一般化レイリー・カーブ:
$$f(x | \sigma, S, x_0) = \frac{x - x_0}{\sigma^2} \exp \frac{-(x - x_0)^2}{2S^2 \sigma^2}$$

結石の後ろ側に音響シャドウ（放射状の影）
 ができることを利用して，結石かどうかを判別



入力画像



解析画像

超音波画像



超音波画像(2値化)



結石抽出パラメータ調整

Stone Detection Both Left Right

Threshold: 7.00
 Auto

Area [mm²] > 6.45

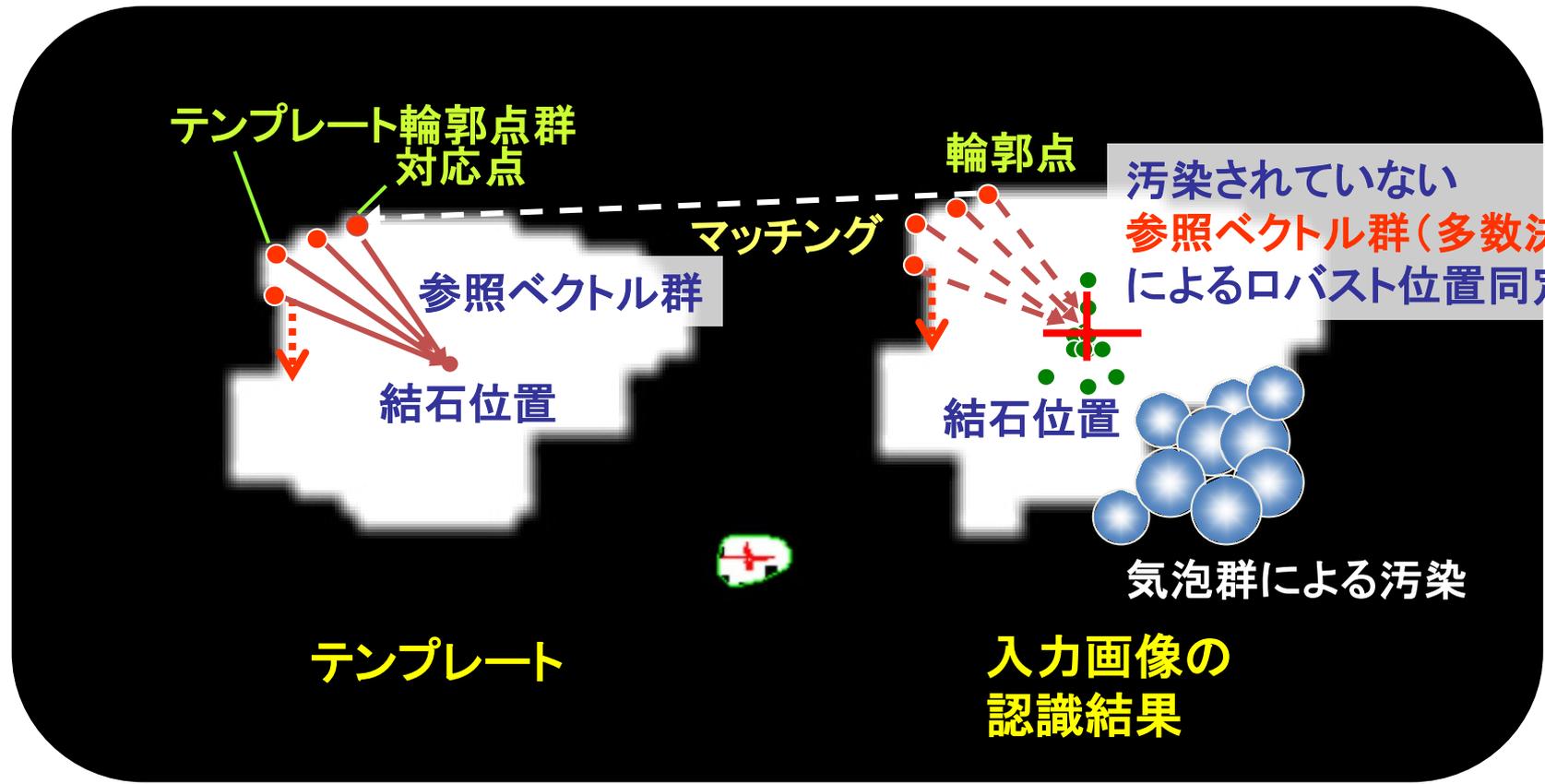
Flatness[0,1] < 0.90

Shadow factor > 0.00

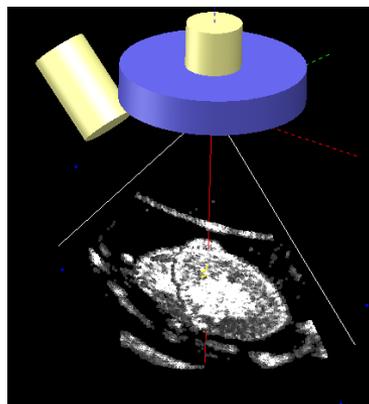
動物摘出腎中の
 モデル結石抽出

—形状情報を利用したロバスト認識と位置の同定—

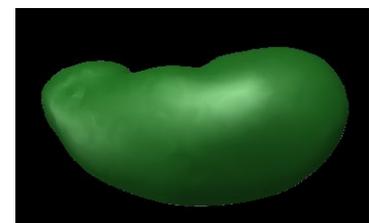
輪郭情報を利用してロバストに結石位置を同定
 結石の一部が気泡群に汚染されても、ロバストに結石位置を同定



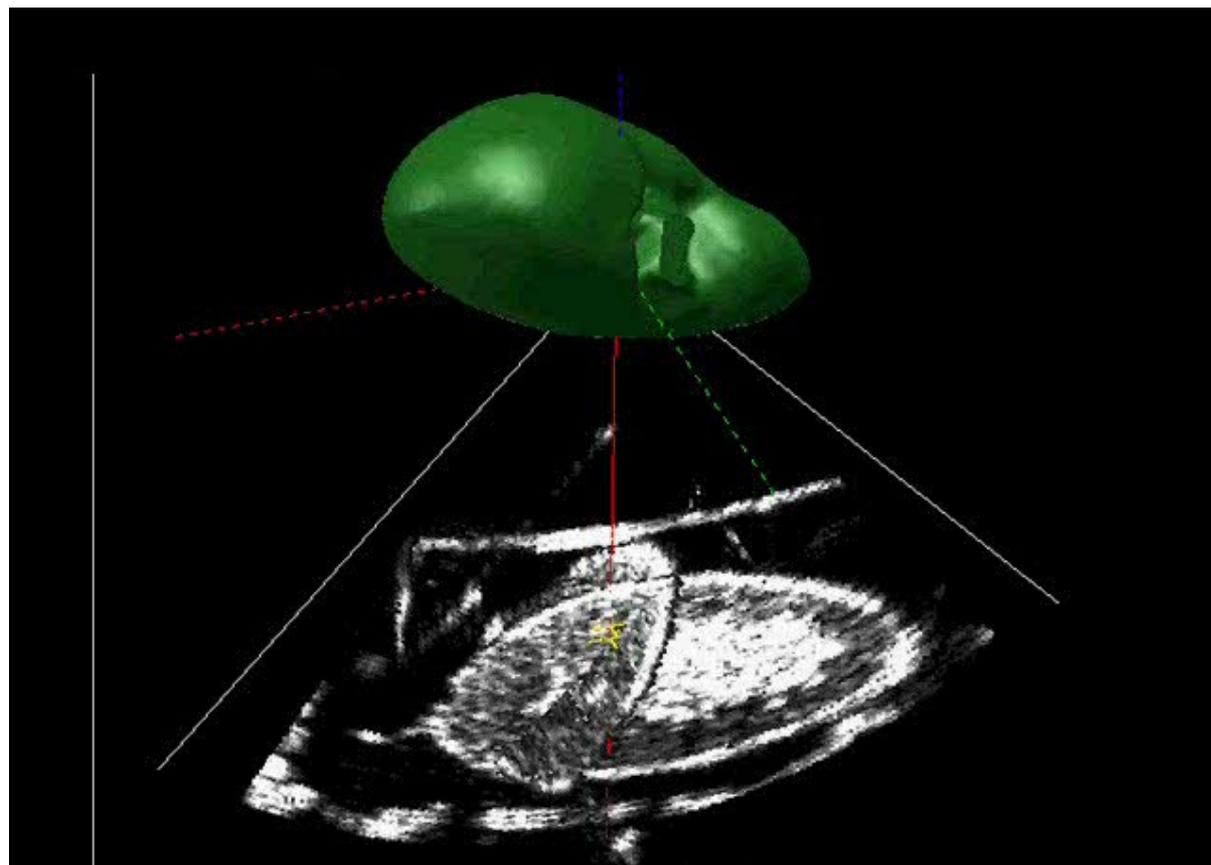
臓器のレジストレーション



ステレオ
超音波画像

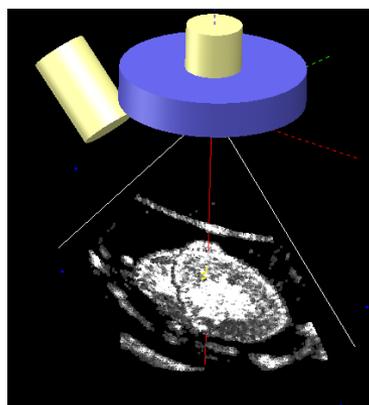


3次元モデル



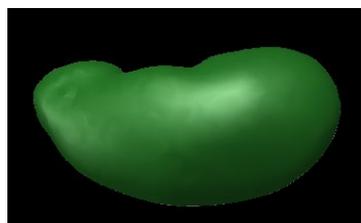
臓器(患部)抽出用レジストレーション

臓器のレジストレーション

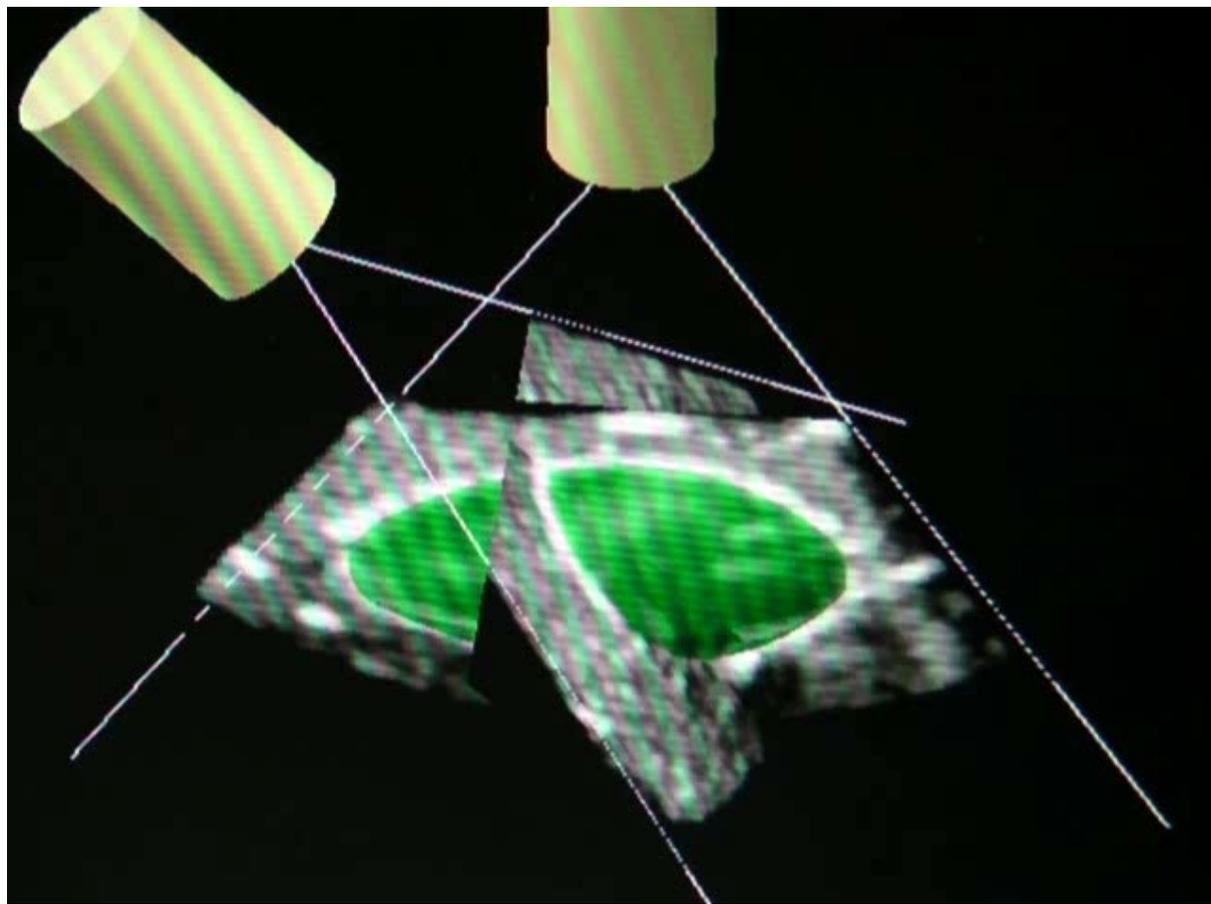


ステレオ
超音波画像

+

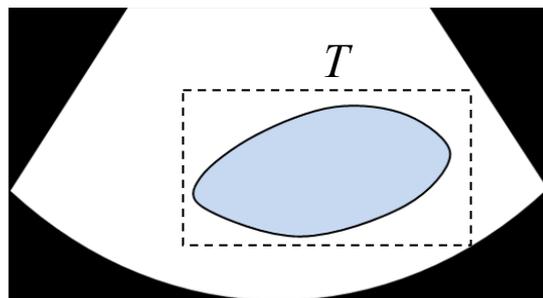


3次元モデル

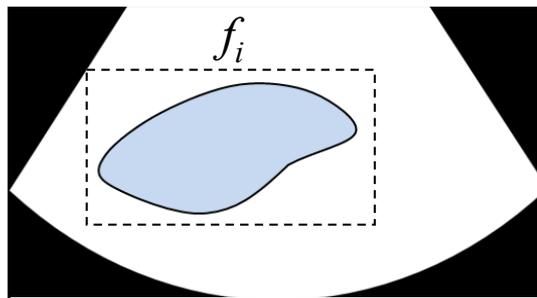


追従・モニタリング中のレジストレーション

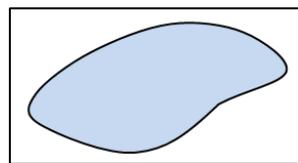
周期運動中に、超音波画像上で繰り返し変化する高ノイズ領域を除去することにより、追従精度を向上



テンプレート

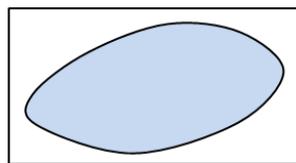


リアルタイム入力画像



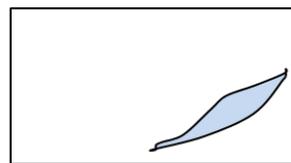
リアルタイム
入力画像

-

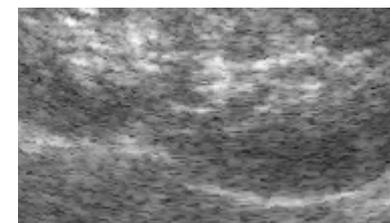


テンプレート

=



高ノイズ
領域

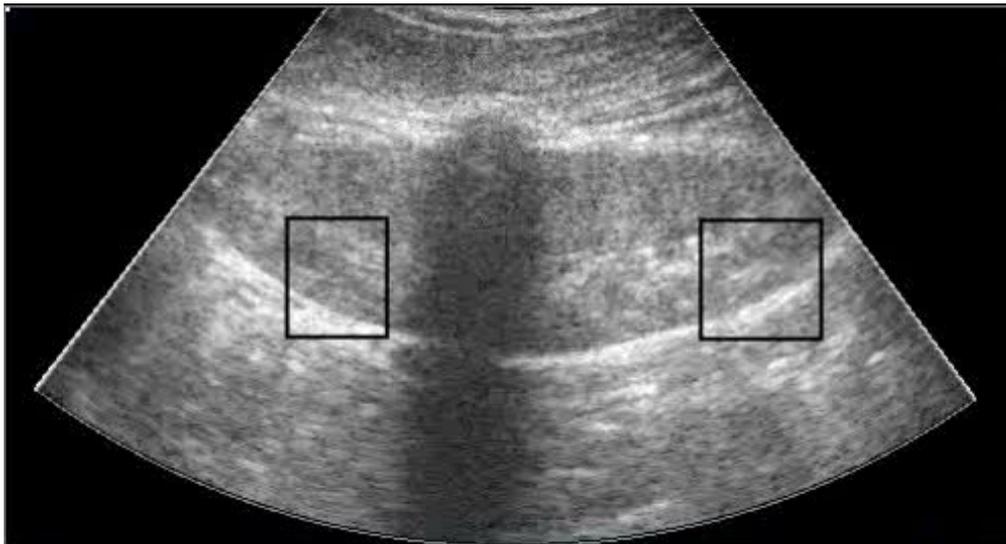


テンプレート
↓
高ノイズ
領域除去



高ノイズ領域除去
テンプレート

周期運動中の繰り返しノイズは
ピンポイントに除去可能！



入力超音波画像

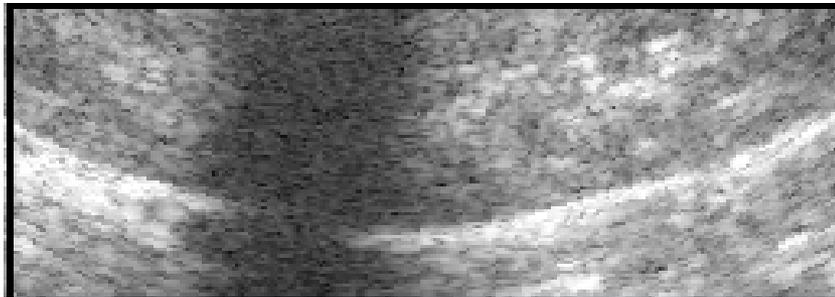


テンプレート



音響シャドウの除去

①テンプレート領域指定と
音響シャドウ領域の除去



テンプレート

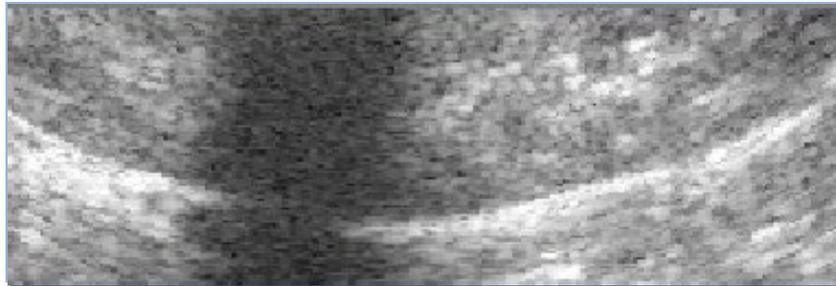


テンプレート対応領域(入力画像)



ノイズの計算

②ノイズ(テンプレートと入力画像間の差分)の計算, 音響シャドウ影響領域計算



元のテンプレート

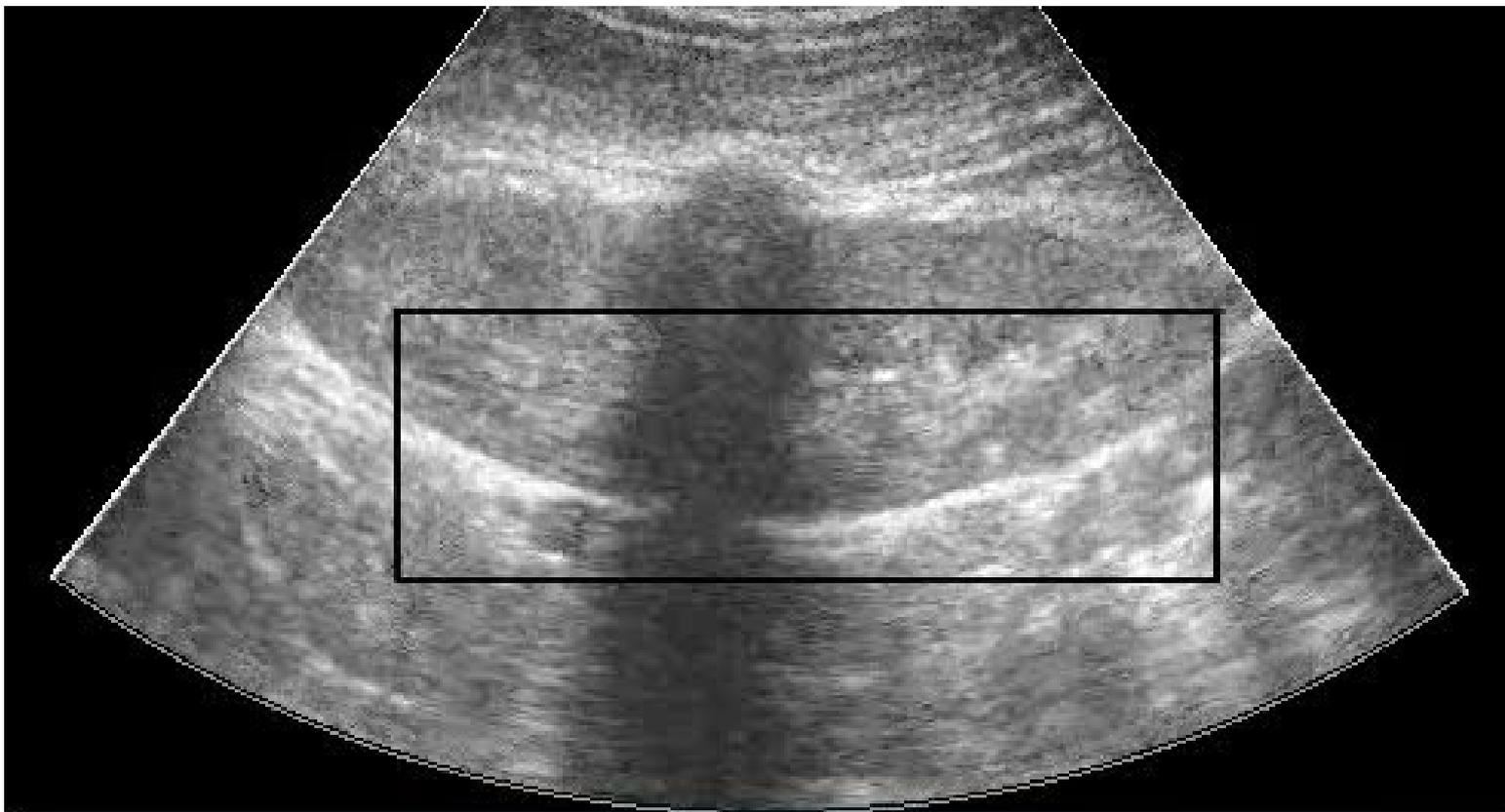


ノイズの積分値 (3-4周期分)

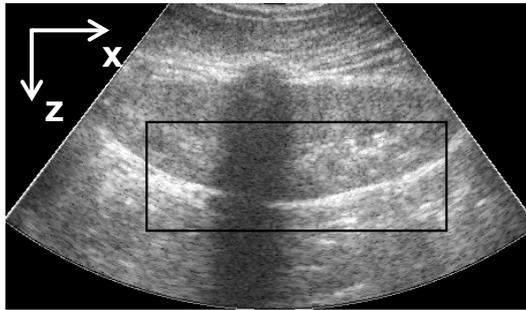


ノイズ除去テンプレート

②元のテンプレートからノイズの積分値が高い領域を除去



**ノイズの影響を除去することにより、
きわめて安定的な追従の実現！**



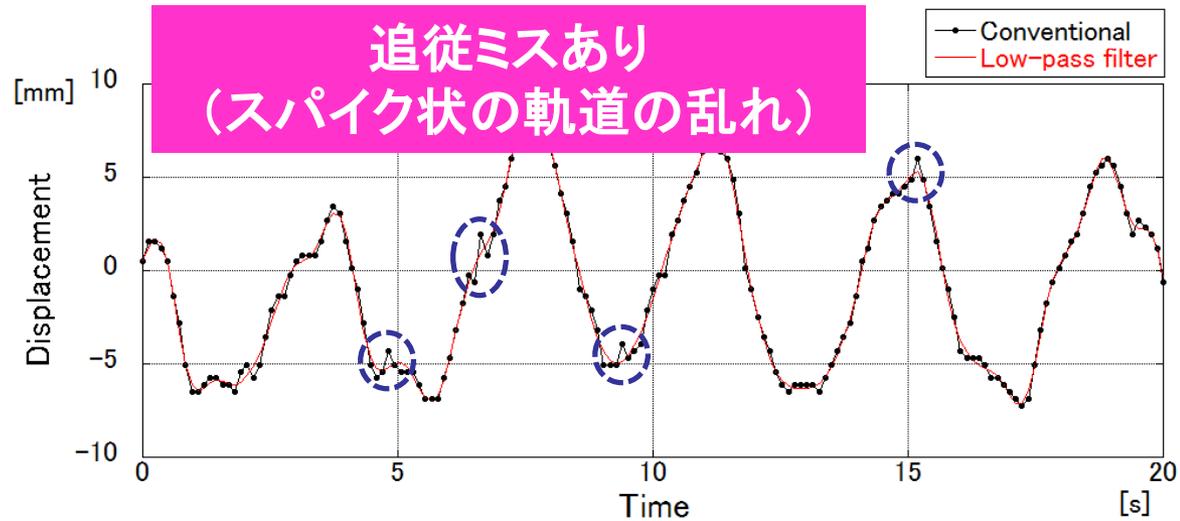
テンプレートとして選択した領域



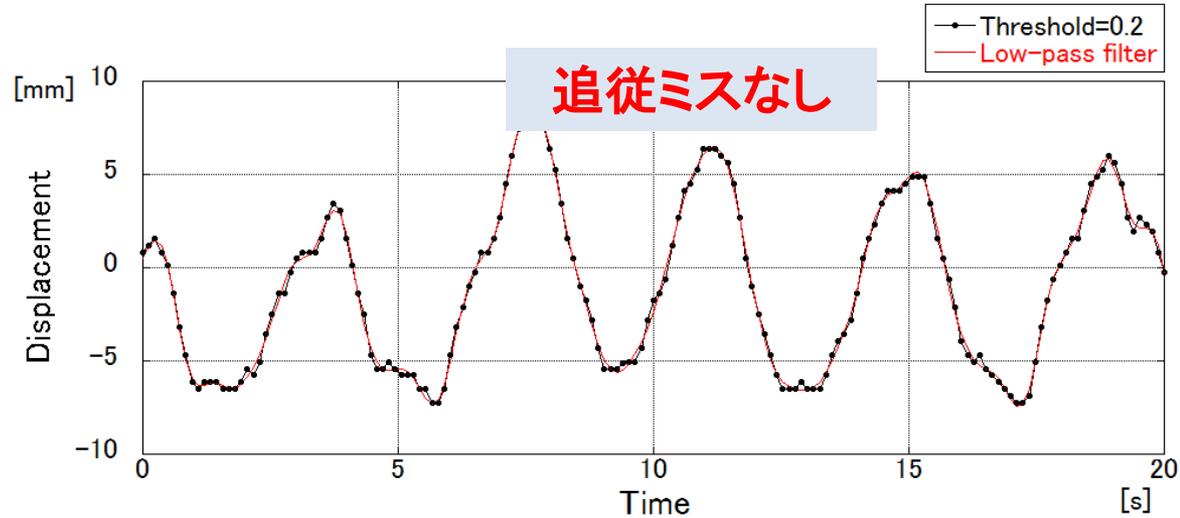
高ノイズ領域除去なしテンプレート



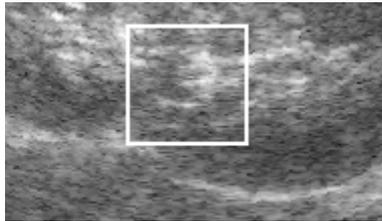
高ノイズ領域除去テンプレート



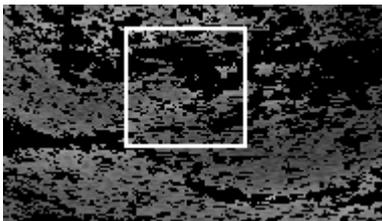
高ノイズ領域除去なしテンプレートによる追従



高ノイズ領域除去テンプレートによる追従

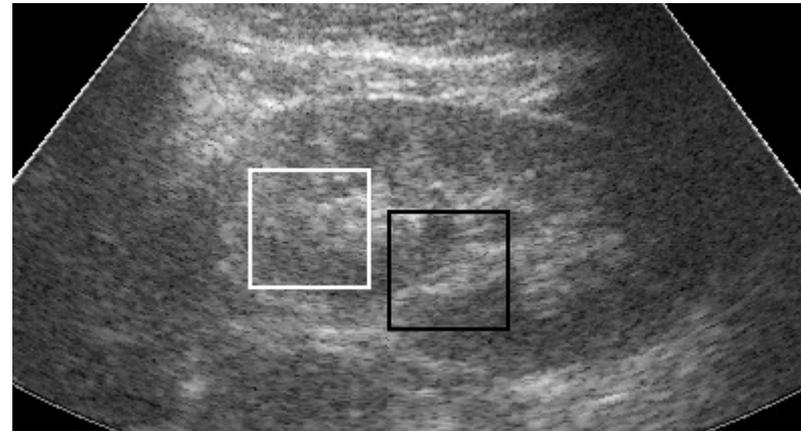


通常テンプレート



提案テンプレート

テンプレート



白: 通常テンプレート

黒: 提案テンプレート

患部追従

特に、小さなテンプレート領域しか得られない
場合に追従ロバスト性が大きく改善！

何らかの方法で追従精度を向上することができれば、劇的に追従精度が向上する可能性

2つのアプローチ

アプローチ1. 追従誤差の最小化

画像情報を利用したがん／結石のロバスト認識と位置の同定手法

呼吸情報の周期性を利用した追従精度向上手法

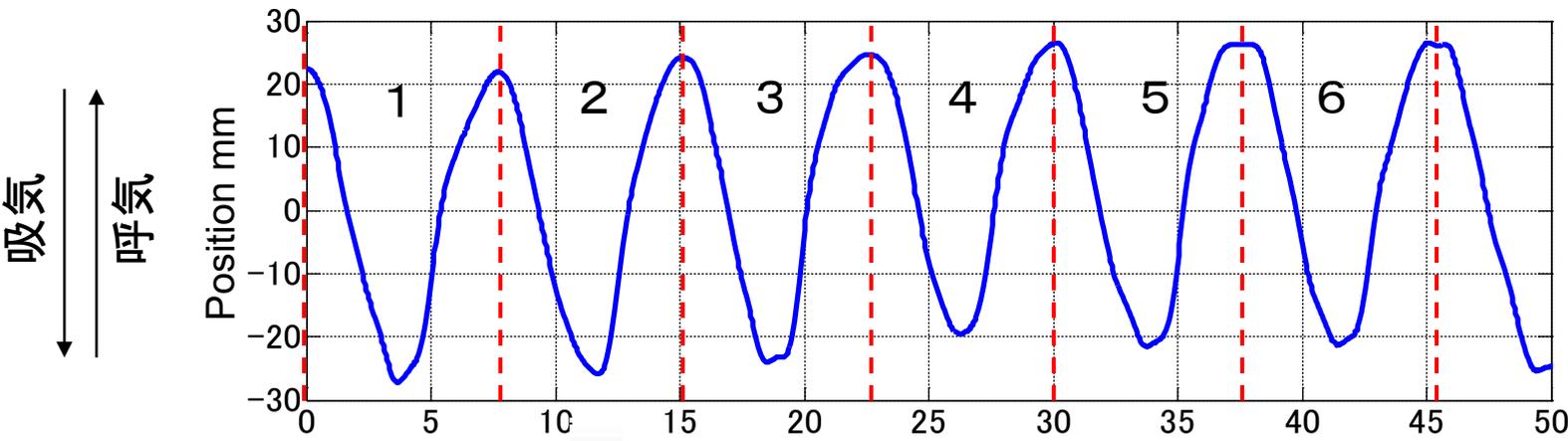
先端独立制御機構・照射強度制御による画像の質向上

アプローチ2. 追従誤差発生時の影響の最小化・リカバリ

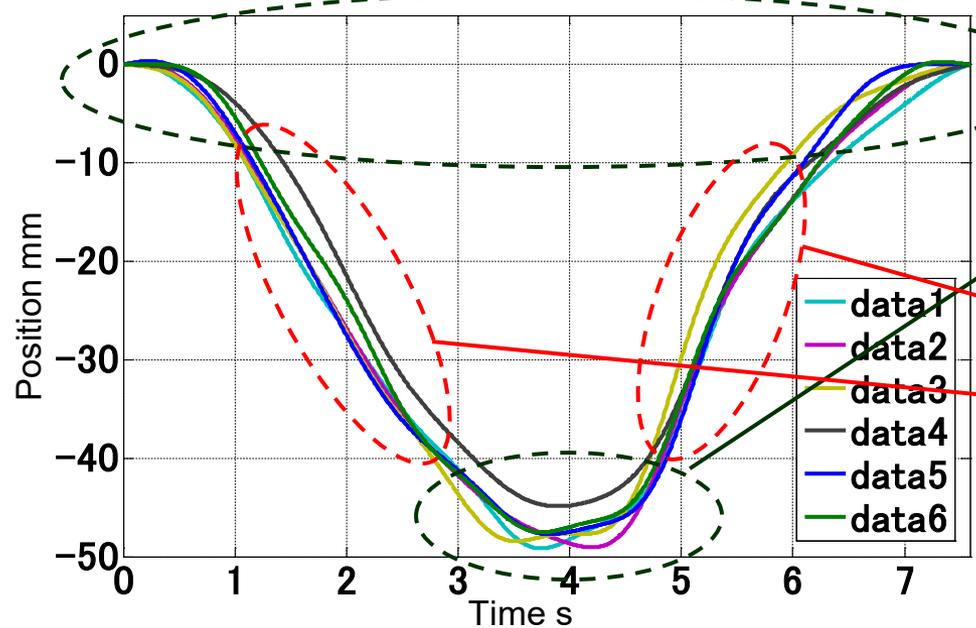
誤差に応じた照射強度制御手法

患部位置推定モデルによる追従失敗時のロバスト追従復帰

腎臓の運動

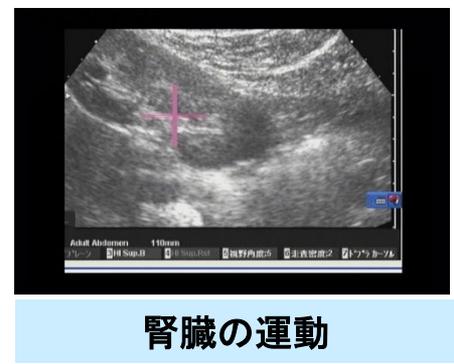


Time s
一周毎に切断



不一致
(低速部)

速度(傾き)の
高い再現性
(高速部)



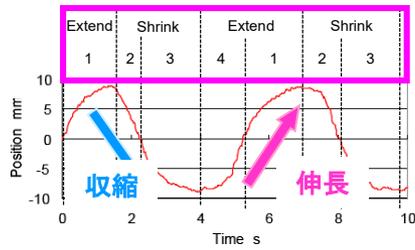


腎臓の運動



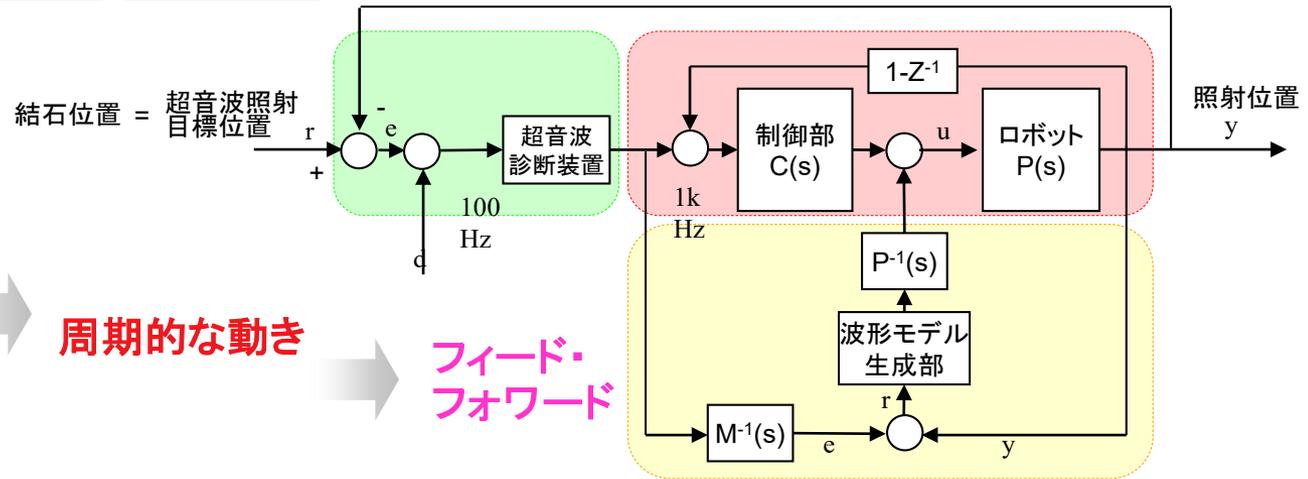
周期・振幅のずれ・
振動中心の移動・
その他の外乱

フィードバック



周期的な動き

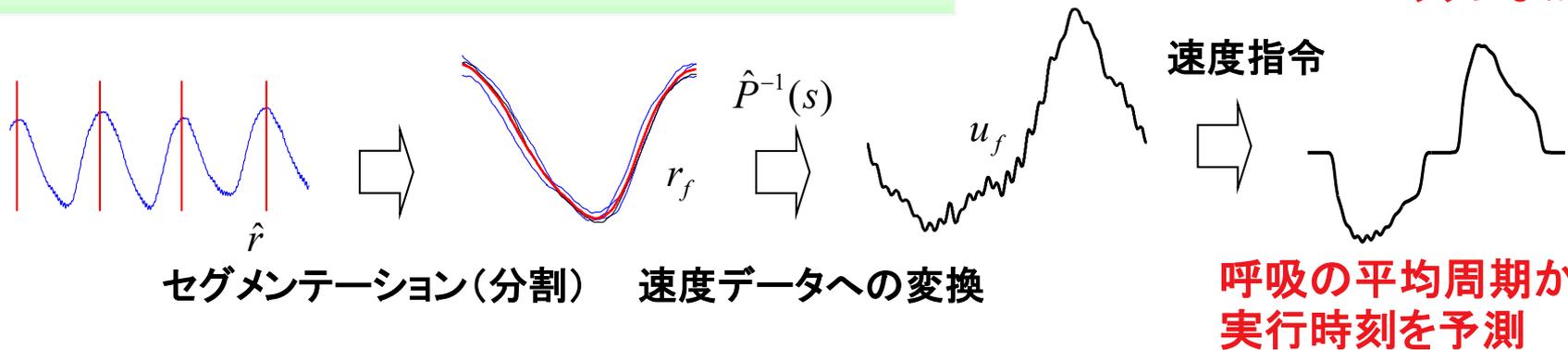
フィード・
フォワード



時間遅れ補償器

低速部はフィード・
バックにまかせる

波形モデルのリアルタイム生成アルゴリズム

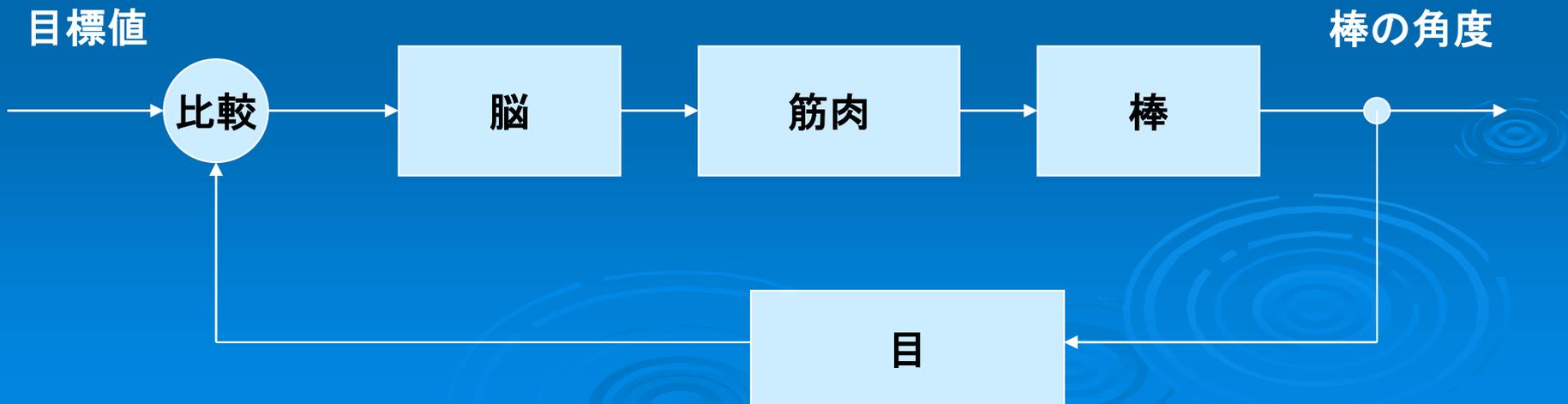
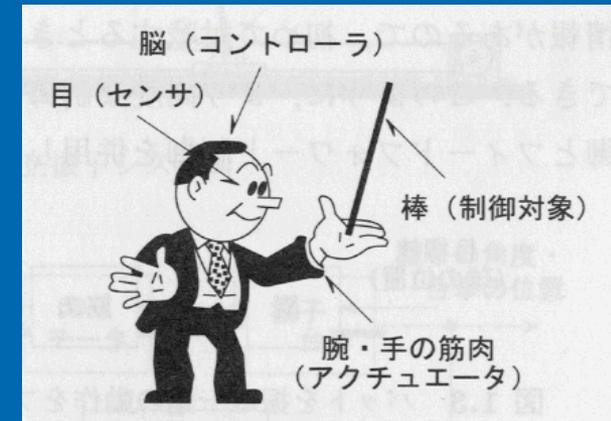


フィードバック制御

フィードバック制御

- ① 棒を立たせ続けるために、目(センサ)で棒の傾きを感知する。
- ② 目標値と棒の傾きの偏差から、脳でどのくらいの力を加えればよいかを考え、筋肉、すなわち、腕や手を動かす。

人間はフィードバック制御を自然に行なっている！



フィードフォワード制御

フィードフォワード制御

出力結果を利用せずに**予測**をたてて制御を行なう方式
「いつ、どこにバットを振ればよいかを予測して振る」
ことに相当。

予期せぬ球種やスピードの球(不確定性)に対応できない！

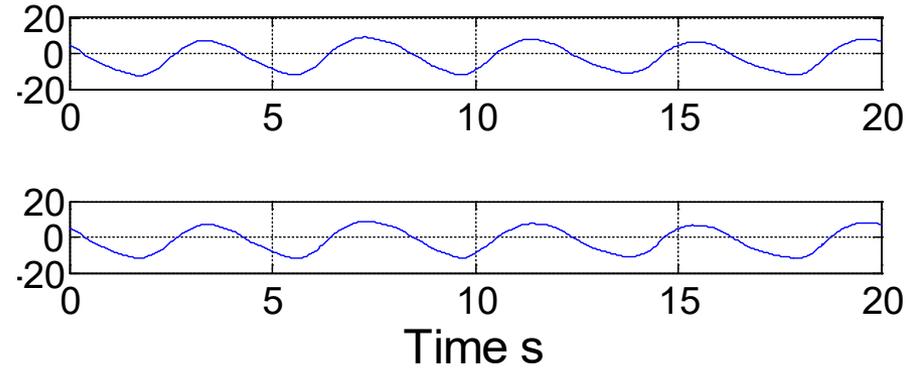
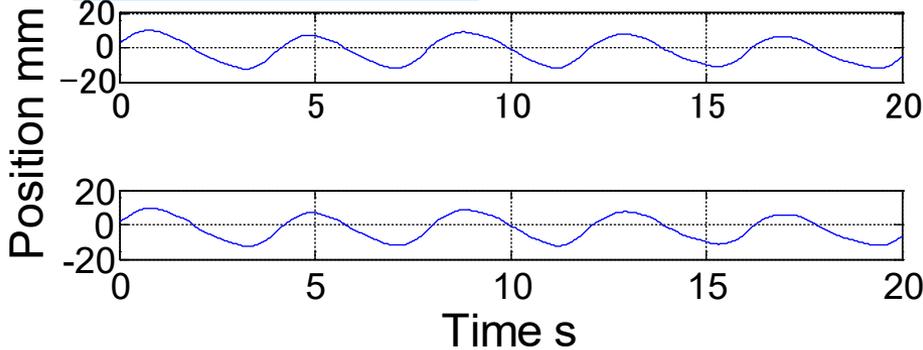


一度でも対戦したことのあるピッチャーが相手ならば、
どのような球種、スピードの球を投げるかという事前
情報があるので、初めて対戦するときよりもうまく球に
バットを当てることができる。

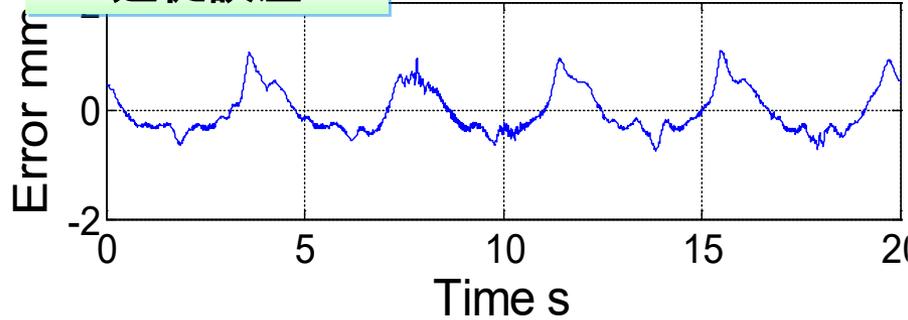
**より高度な制御を実現するためには、フィードバック制御と
フィードフォワード制御を併用した2自由度制御が効果的！**

追従実験結果

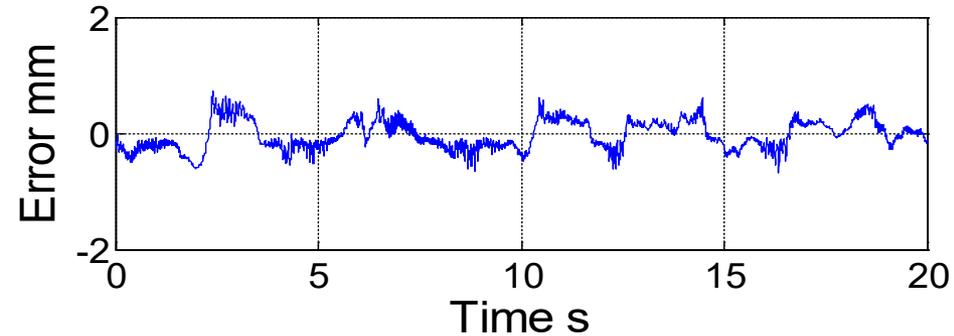
呼吸動作の入出力



追従誤差



FB+NF



FB+NF+FF

評価	FB+NF	FB+NF+FF
最大誤差 mm	1.15	0.73
平均誤差 mm	0.36	0.22
標準偏差 mm	0.21	0.13

追従性能が向上
平均誤差**0.2mm**程度
での追従を実現

目標精度: 1mm以下



問題点の解決策

気泡群の発生による
追従失敗



振動の発生

呼吸の周期性を利用した制御系

フィードバックのみ

特に、高速動作部における追従誤差増大

呼吸の周期性に着目した
フィード・フォワード制御系による追従精度向上

ノッチフィルタを利用した振動抑制

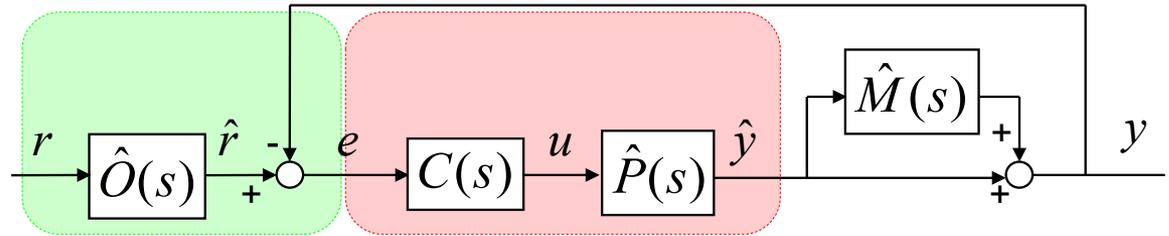
機構部の共振周波数

振動の増幅

ノッチフィルタを制御系に導入し、振動抑制

フィードバック制御系の構成

システムの簡略化



フィードバック制御系を構築

コントローラ C

XYZ ステージ $P(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \cdot \frac{1}{s} + d_p$ d_p : 外乱
 $\omega_c \approx 1000$ (カットオフ周波数)

超音波診断装置
 + 画像処理部 $\hat{O}(s) = \exp(-0.01s)$
 $O(s) = \hat{O}(s) + d_o$ d_o : 外乱

機構振動部 $M(s) = -\frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} + d_m$

$\omega_n = 8.9 \times 2\pi$ (共振周波数) $\zeta = 0.11$ (減衰比) d_m : 外乱

e : 追従誤差

\hat{e}' : 追従誤差の計測値(100Hz)

\hat{r} : 追従対象位置の推定値

\hat{e}'' : 追従誤差の推定値(1kHz)

u : 制御量(速度指令)

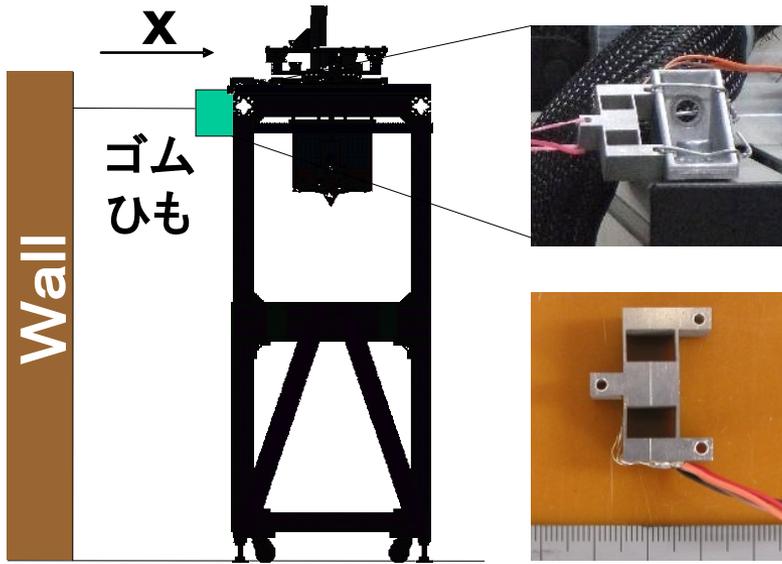
y : HIFU焦点位置

\hat{y} : HIFU焦点位置の計測値

\hat{y}' : HIFU焦点位置の推定値

コントローラ C を設計

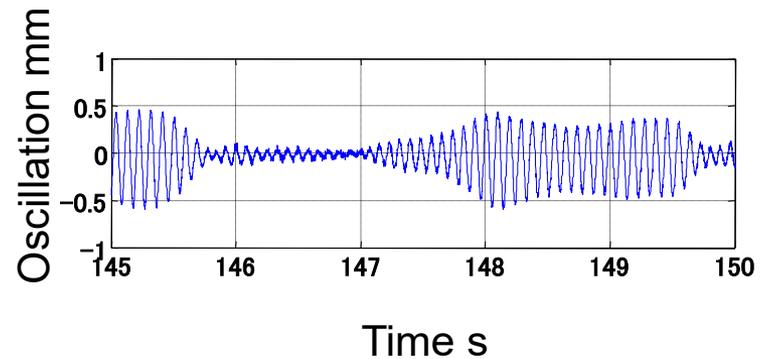
機構部の振動計測系の構築



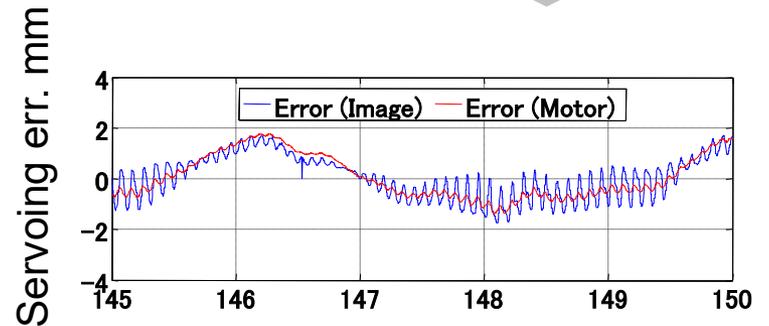
カセンサ

**振動の影響が
追従誤差に影響！**

機構部の振動



追従誤差



制御系への振動抑制フィルタの導入

機構振動部の同定:

振動抑制フィルタ: $F(s) = \frac{s^2 + 2d\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$

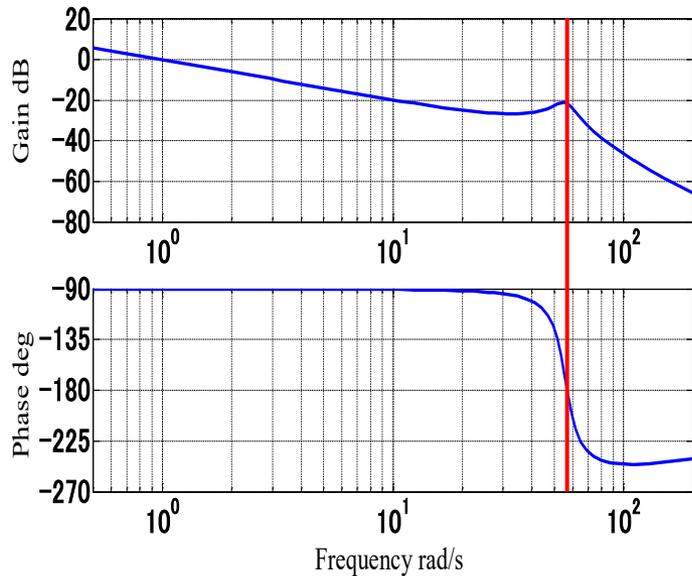
$$\hat{M}(s) = \frac{-s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$\zeta = 0.9 \quad \omega_n = 8.9 \times 2\pi$

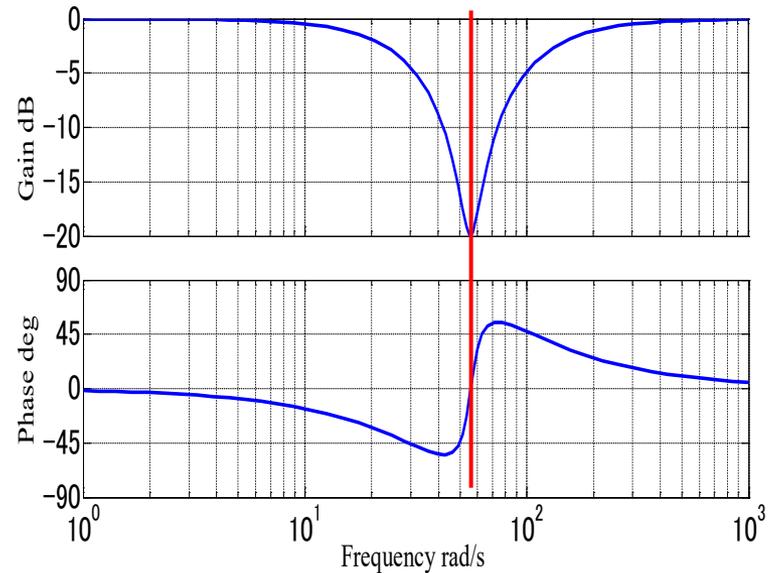
$\zeta = 0.9 \quad \omega_n = 8.9 \times 2\pi \quad d = 0.1$

$C(s) = C'(s)F(s) \quad C'(s)$ の設計

ノッチフィルタの導入



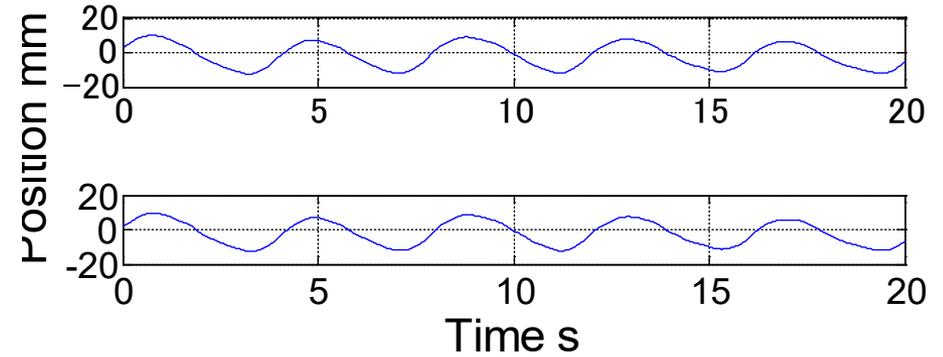
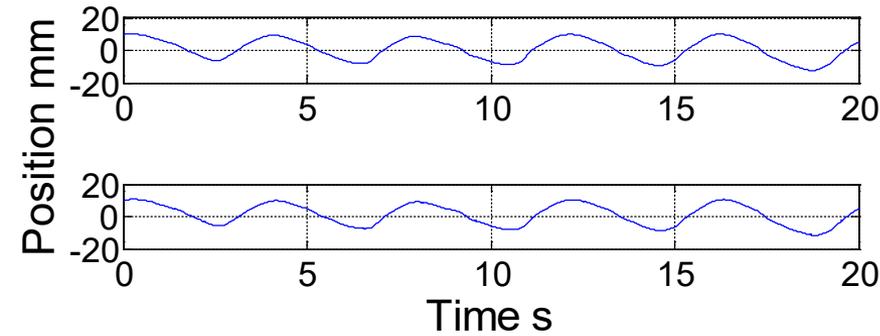
システムの周波数特性



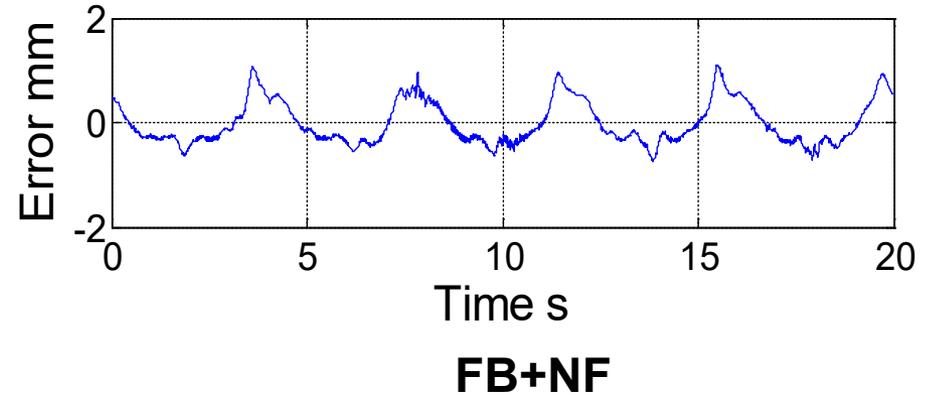
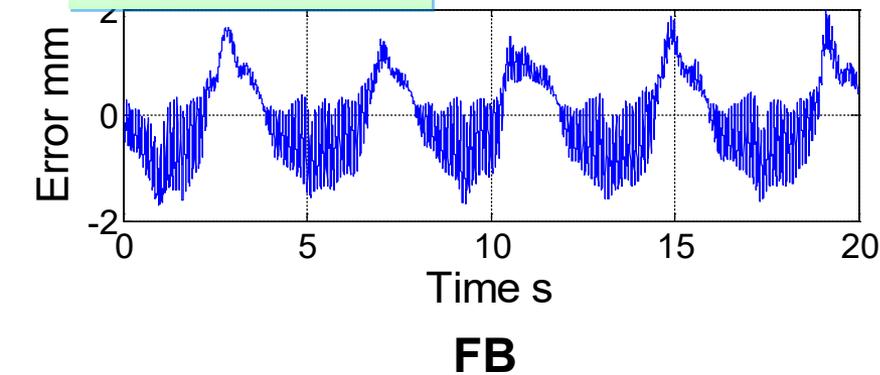
ノッチフィルタの周波数特性

追従実験結果

呼吸動作の入出力



追従誤差



評価	FB	FB+NF
最大誤差 mm	1.99	1.15
平均誤差 mm	0.67	0.36
標準偏差 mm	0.42	0.21

追従性能が向上
平均誤差0.3mm程度
での追従を実現
振動の除去を実現

何らかの方法で追従精度を向上することができれば、劇的に追従精度が向上する可能性

2つのアプローチ

アプローチ1. 追従誤差の最小化

画像情報を利用したがん／結石のロバスト認識と位置の同定手法

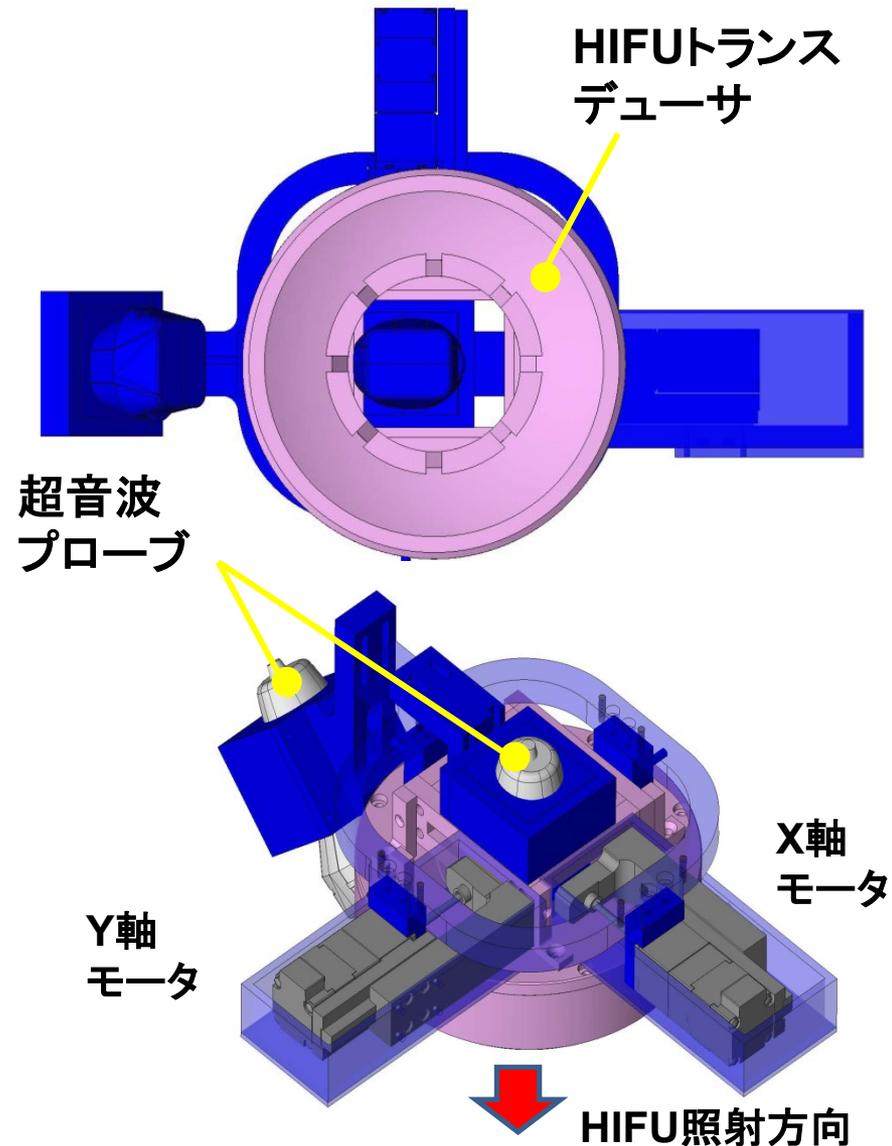
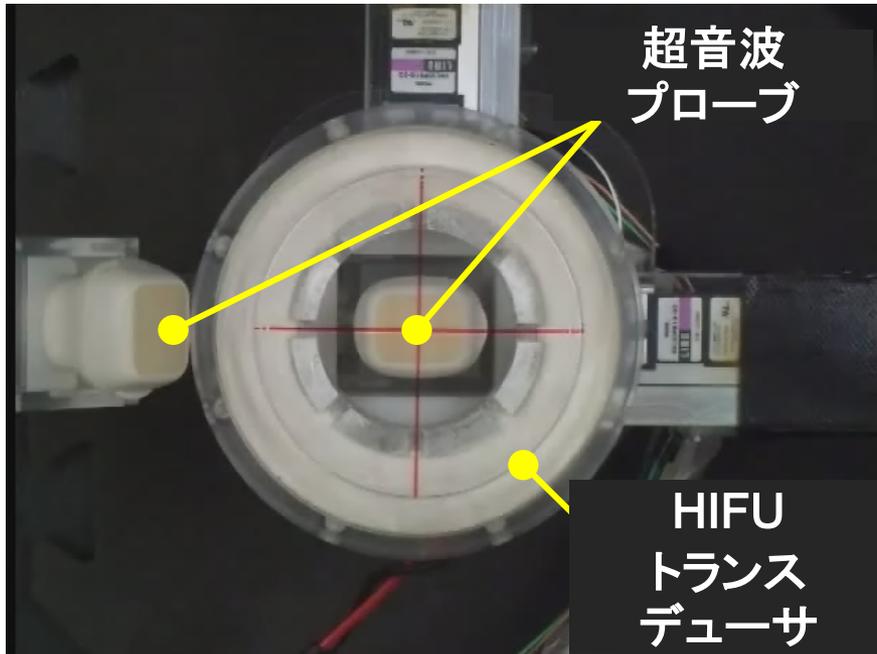
呼吸情報の周期性を利用した追従精度向上手法

先端独立制御機構・照射強度制御による画像の質向上

アプローチ2. 追従誤差発生時の影響の最小化・リカバリ

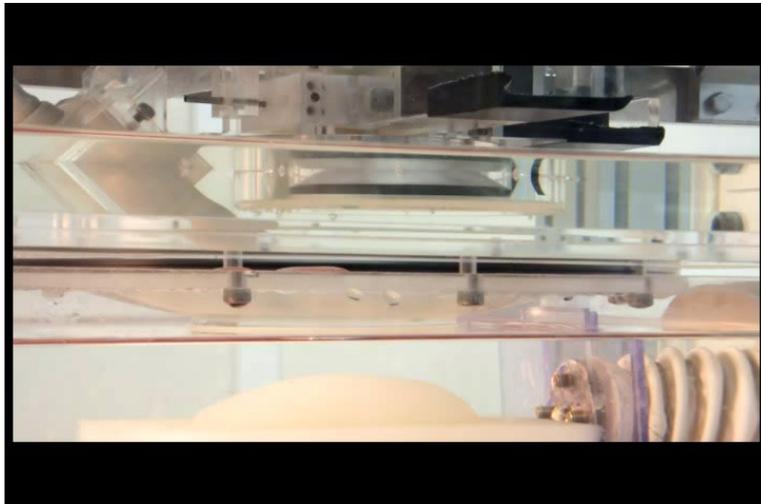
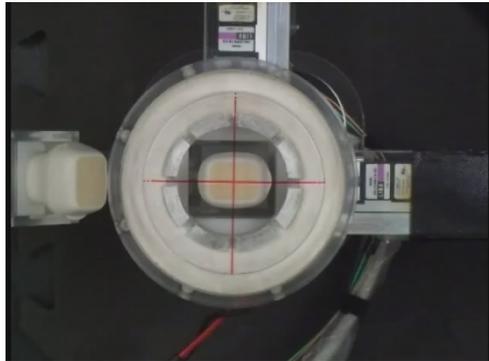
誤差に応じた照射強度制御手法

患部位置推定モデルによる追従失敗時のロバスト追従復帰



青色: 超音波プローブによる診断部

桃色: 治療用超音波照射部



動作風景



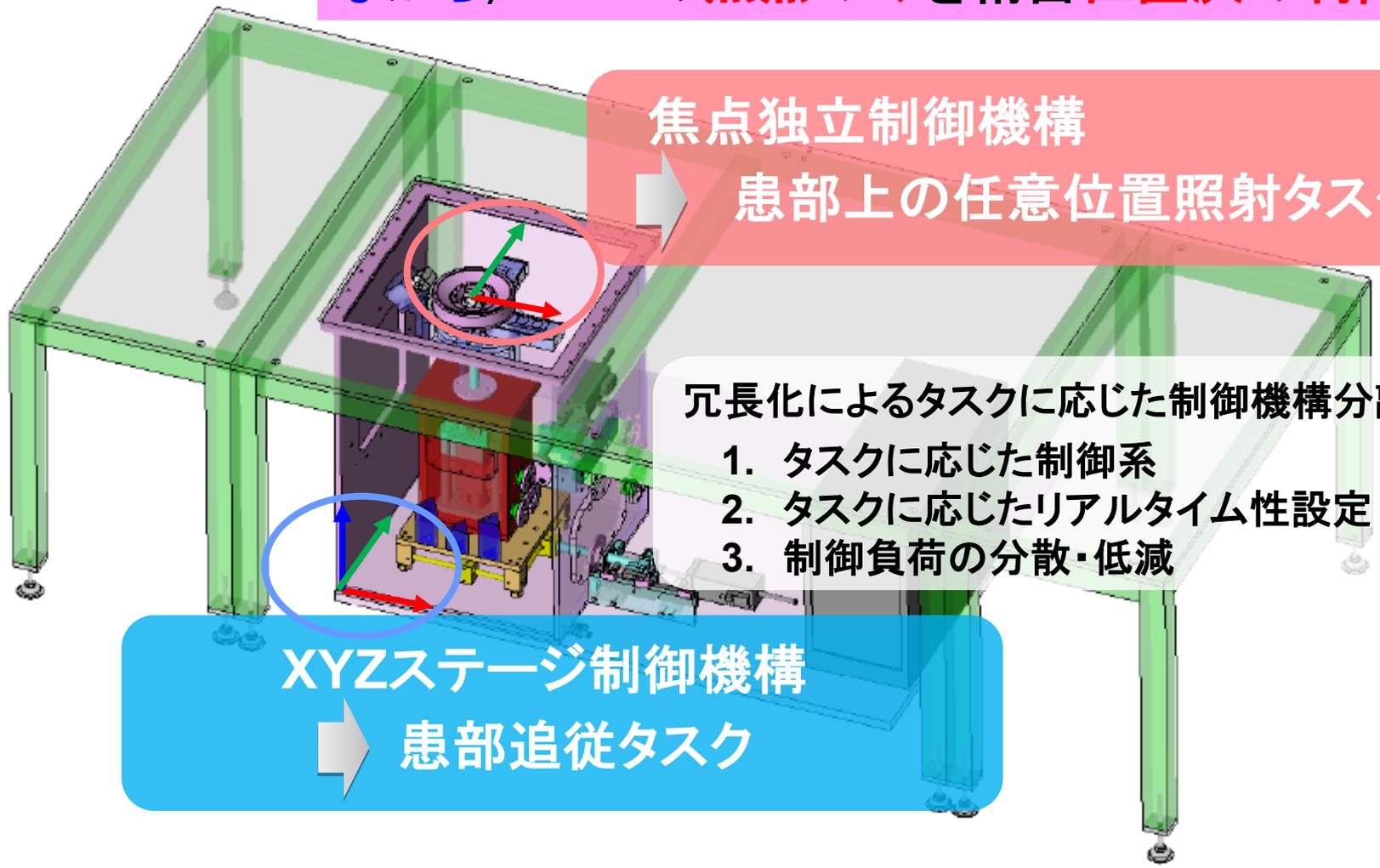
超音波画像

患部上の指定した位置に超音波照射可能！



HIFU焦点が診断プローブから 独立に動作する冗長な先端部機構

プローブの視点を変化させることなく追従制御しながら、HIFUの**焦点のみ**を精密位置決め制御



焦点独立制御機構

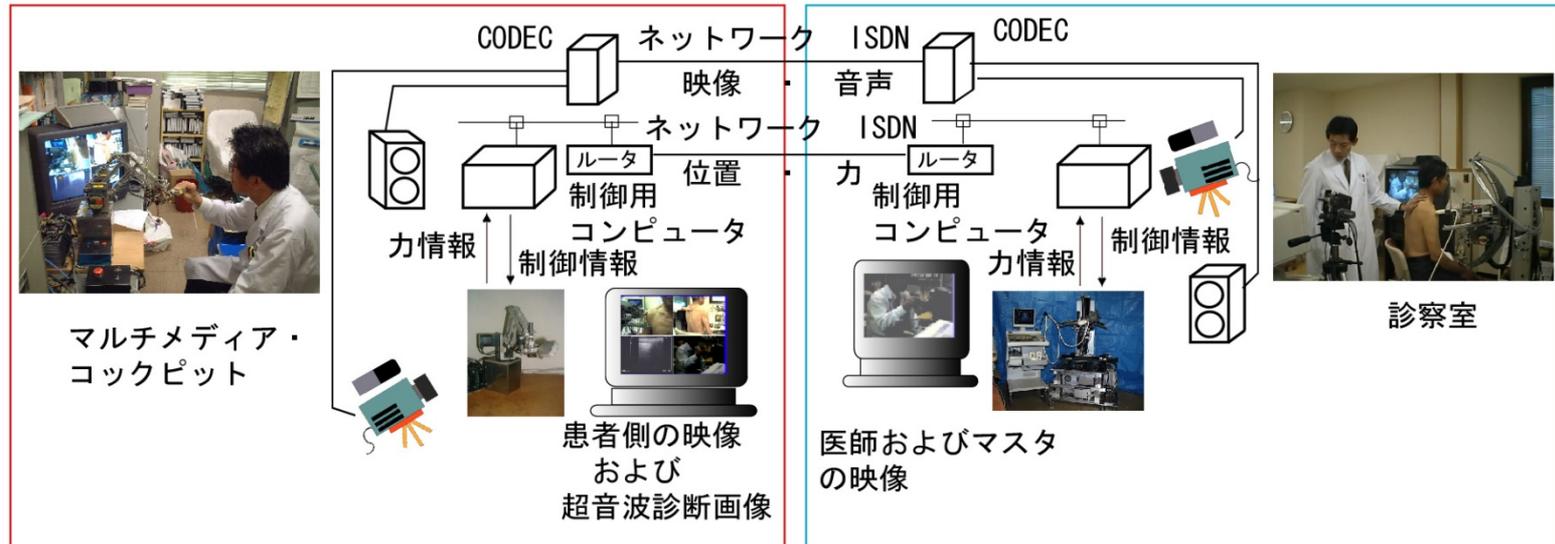
患部上の任意位置照射タスク

冗長化によるタスクに応じた制御機構分離

1. タスクに応じた制御系
2. タスクに応じたリアルタイム性設定
3. 制御負荷の分散・低減

XYZステージ制御機構

患部追従タスク



Master site

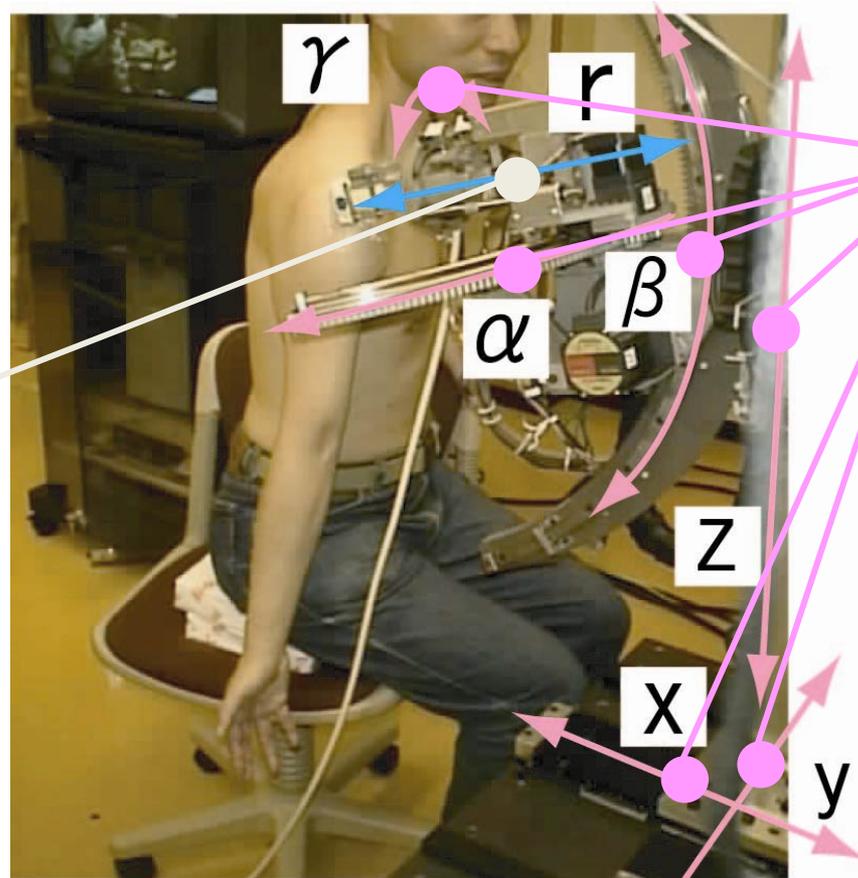
Slave site

マスタ・スレーブ・システム

カフィードバック

診断のための超音波画像の伝送

コミュニケーションのための映像・音声相互伝送



スレーブ側で
ローカルに制御

プローブと患部の
安定接触維持タスク

スレーブ側で
ローカルに制御

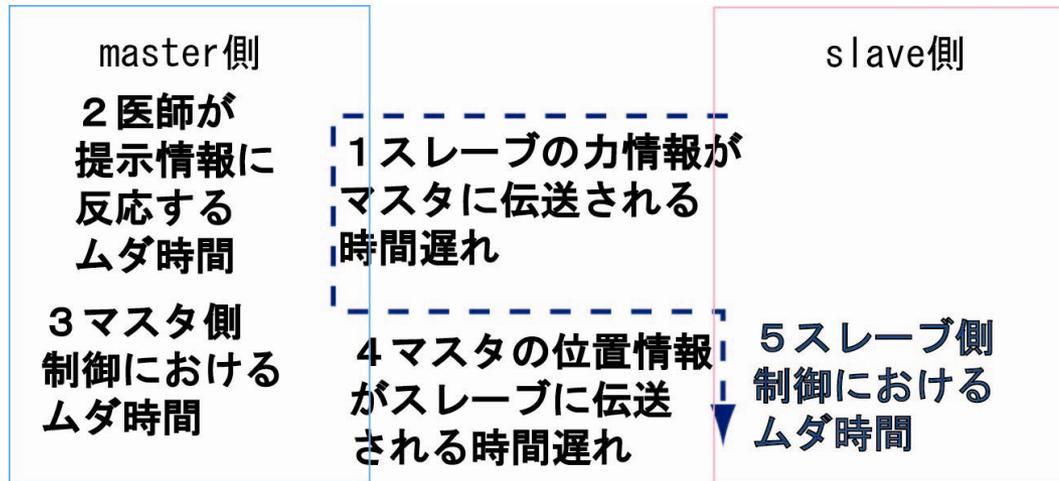
マスタ側から
バイラテラル
に制御

プローブを指定した
位置に指定した姿勢で
押しつけるタスク

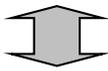
と

マスタ側から
バイラテラル
に制御

を冗長にすることで分離する！



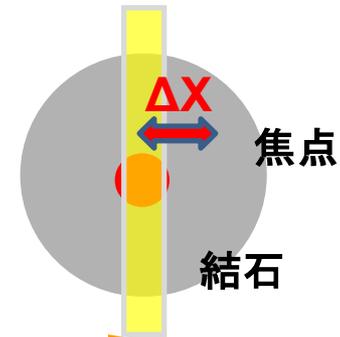
バイラテラルの制御 $T_{dall} = T_{dsm} + T_{dmm} + T_h + T_{dms} + T_{dss}$

$H_s = 1 / T_{dall}$ 

制御のためのサンプリング周波数が
バイラテラルの制御と比較して向上！

スレーブ側
ローカルの制御 $T_{dall} = T_{dss}$

焦点移動により，超音波画像上に
映りこむ気泡ノイズを減らす



追従のための画像の質の向上



$\Delta X = 0$ mm



1 mm



2 mm



3 mm



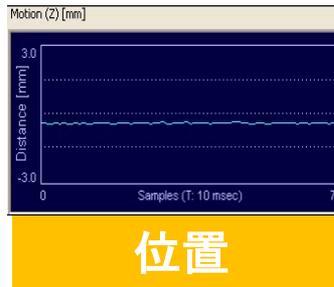
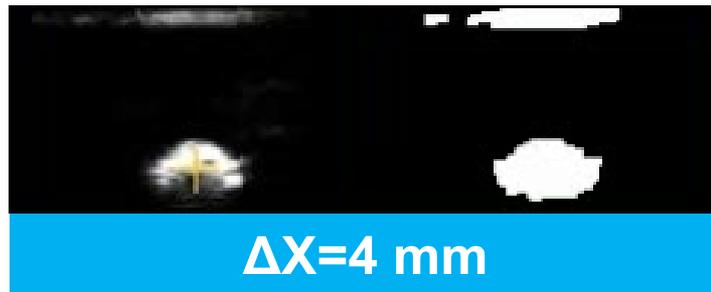
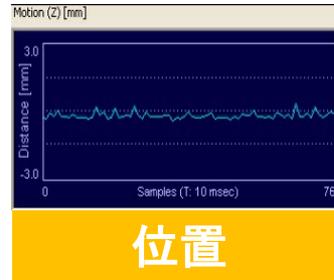
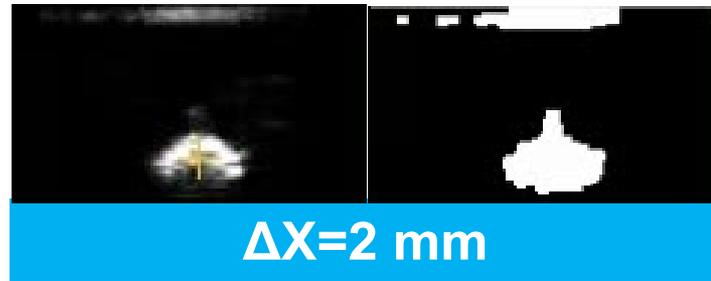
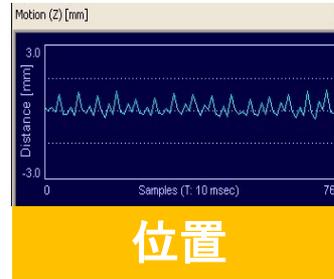
4 mm



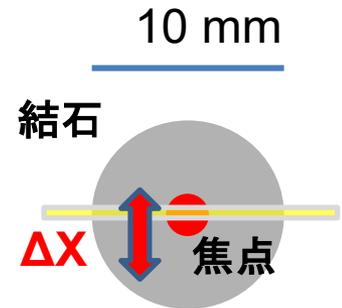
5 mm

焦点移動 ΔX (オフセット距離)

画像の質向上



位置同定精度向上



何らかの方法で追従精度を向上することができれば、劇的に追従精度が向上する可能性

2つのアプローチ

アプローチ1. 追従誤差の最小化

画像情報を利用したがん／結石のロバスト認識と位置の同定手法

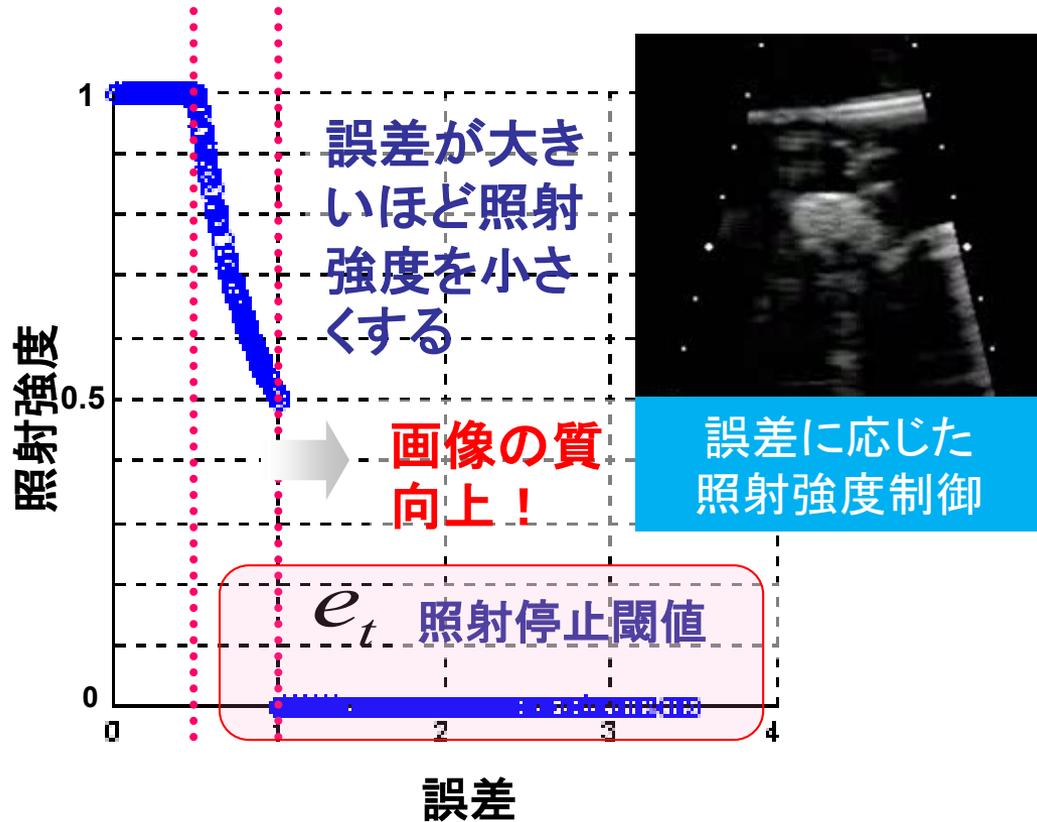
呼吸情報の周期性を利用した追従精度向上手法

先端独立制御機構・照射強度制御による画像の質向上

アプローチ2. 追従誤差発生時の影響の最小化・リカバリ

誤差に応じた照射強度制御手法

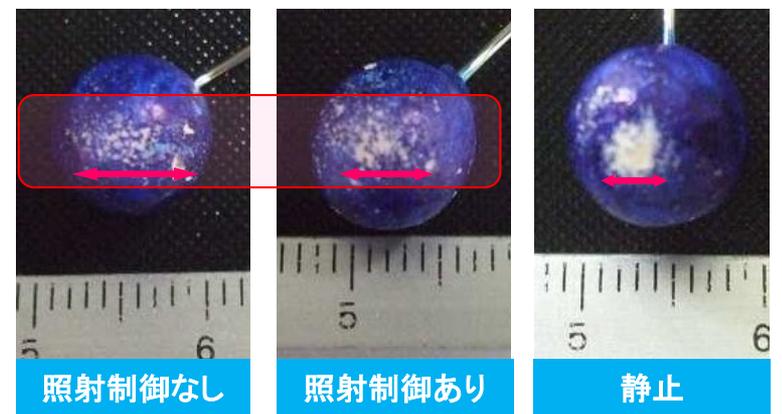
患部位置推定モデルによる追従失敗時のロバスト追従復帰



問題点
 患部追従誤差のため、正常組織を損傷

解決策
 誤差に応じた照射制御

照射強度, パターン, etc.

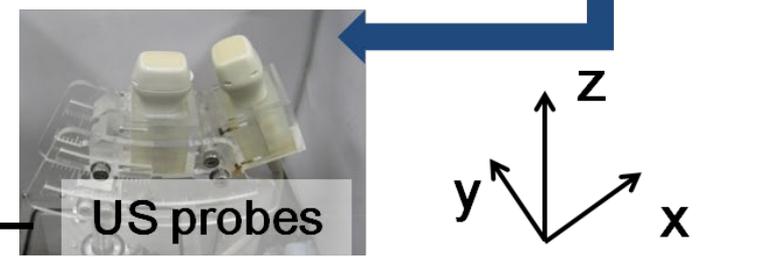
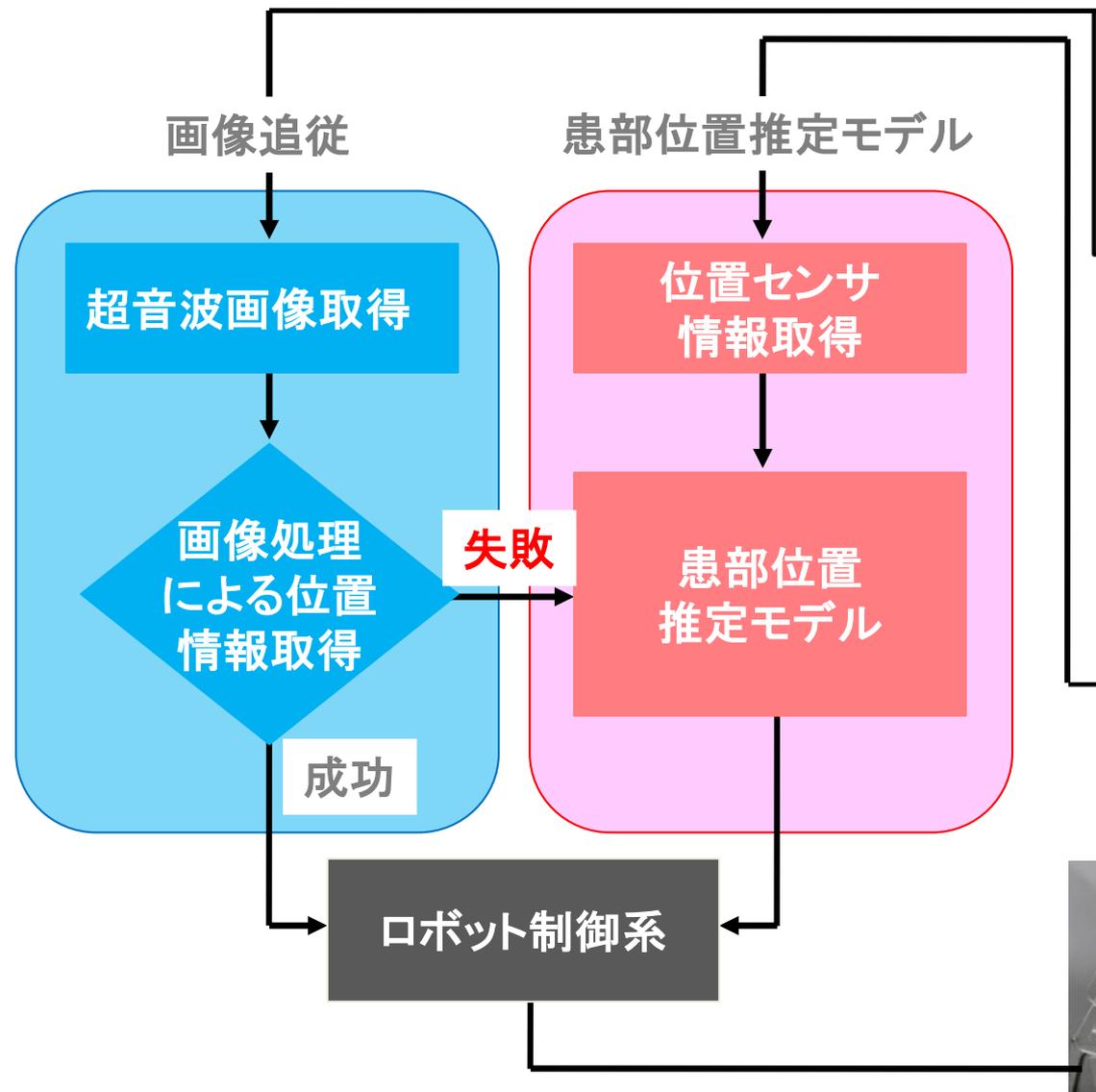


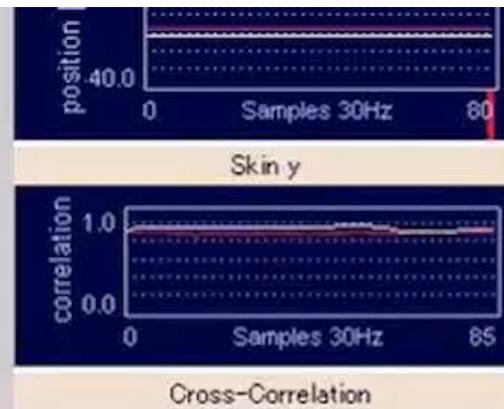
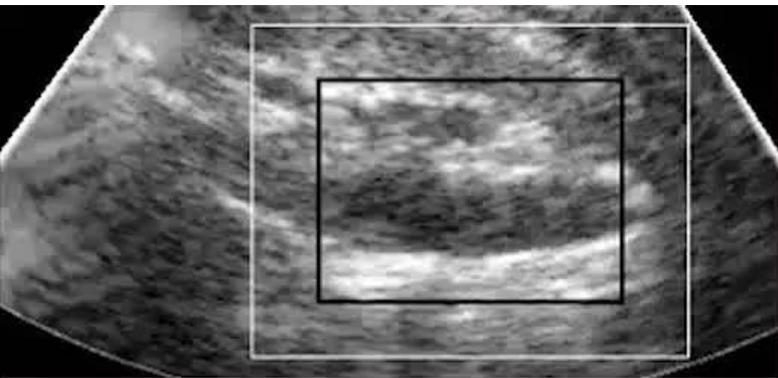
運動方向の分布が縮小!

超音波照射中の平均追従精度を向上!



治療時間(非照射時間)の増大(将来課題)





- 1 システム構築全体のながれ
(例:遠隔超音波診断システム)
- 2 医療診断・治療技能の技術化・デジタル化
(例:非侵襲超音波診断・治療統合システム)
- 3 機構設計技術
- 4 メカトロニクスとリアルタイム制御技術
- 5 通信技術と遠隔操作技術
(例:遠隔超音波診断システム)

研究ロードマップ

非侵襲超音波診断・治療統合システム

人体に対して安全・安心に動作するとともにがんや結石の超音波診断・治療を非侵襲かつ低負担で行なうシステムの実現



医師

負担軽減

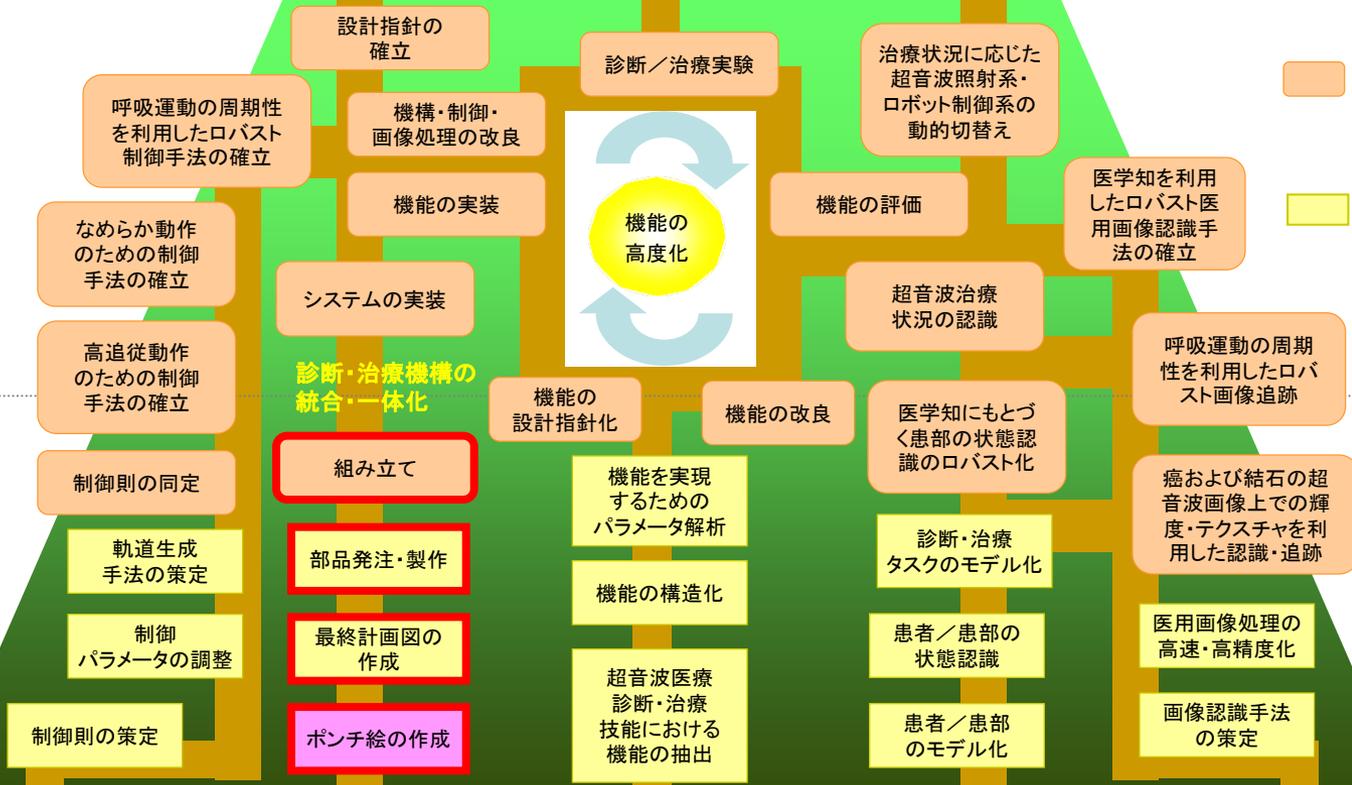


中高齢者

負担軽減

平成YY年度

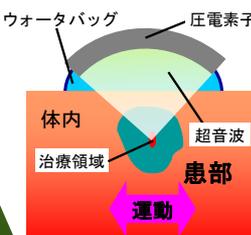
平成XX年度



- ...研究・開発のステップ, 特に, 研究成果の発表を予定.
- ...研究・開発のステップ.



がん / 腎臓結石の診断



非侵襲超音波治療

人体に対する安全・安心接触／非接触動作技術

機能に応じた高精度機構設計技術

超音波医療診断・治療技能における機能抽出・構造化技術

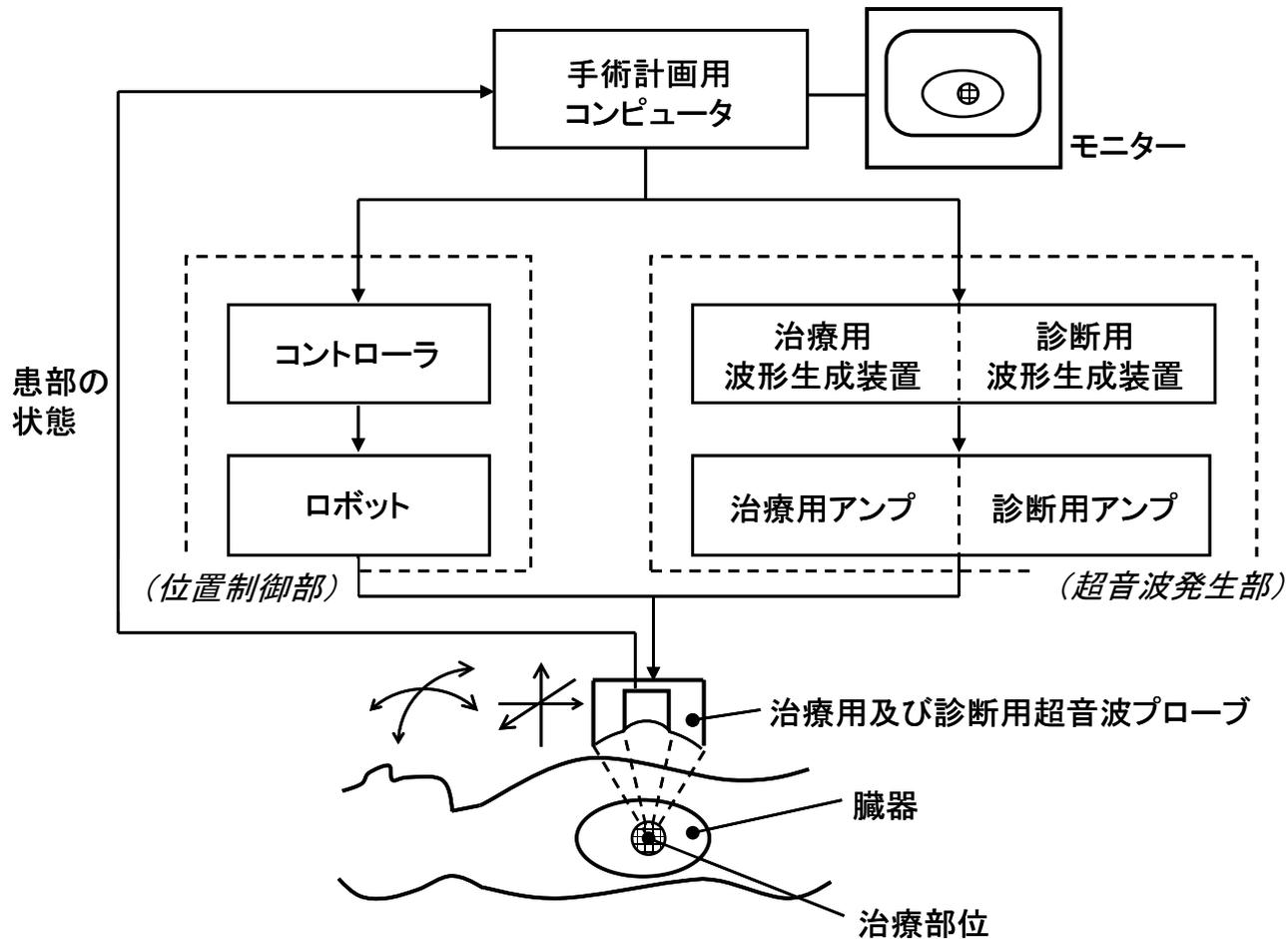
超音波診断・治療タスクに応じたシステム動作切替え技術

リアルタイム医用超音波画像処理技術

ポンチ絵の例

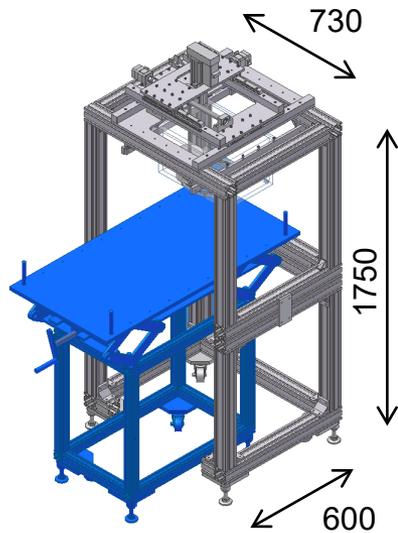
非侵襲診断・治療統合システム

2000年△月□日

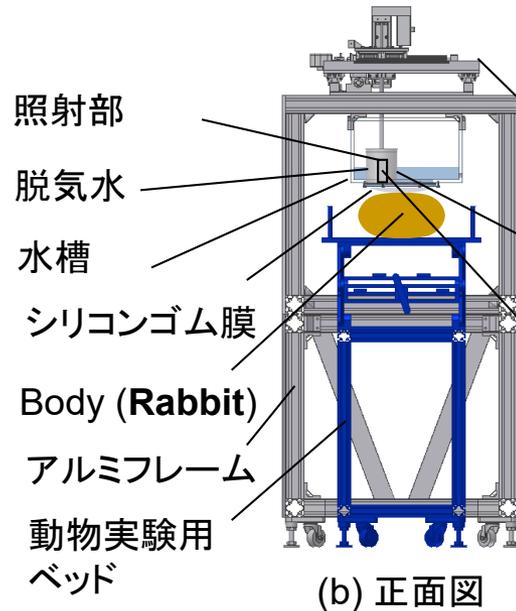


計画図例

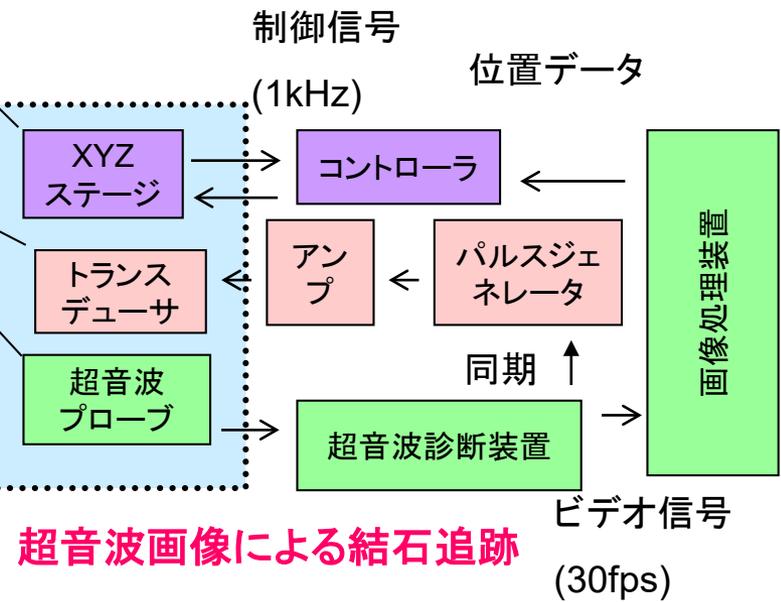
2000年△月□日



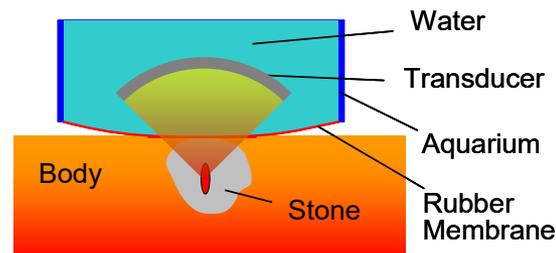
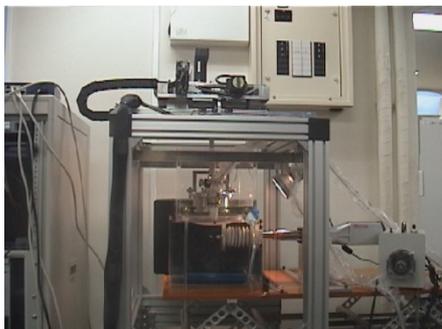
(a) 等角図



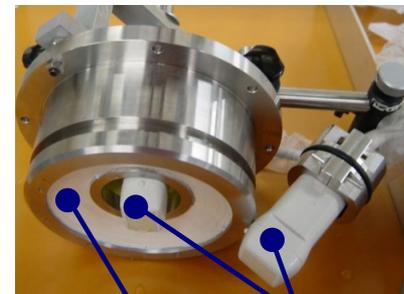
(b) 正面図



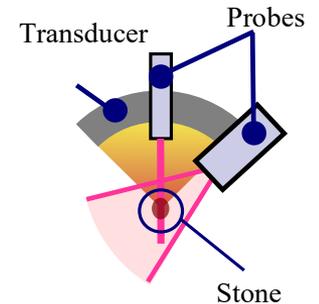
超音波画像による結石追跡



患部までの経路確保

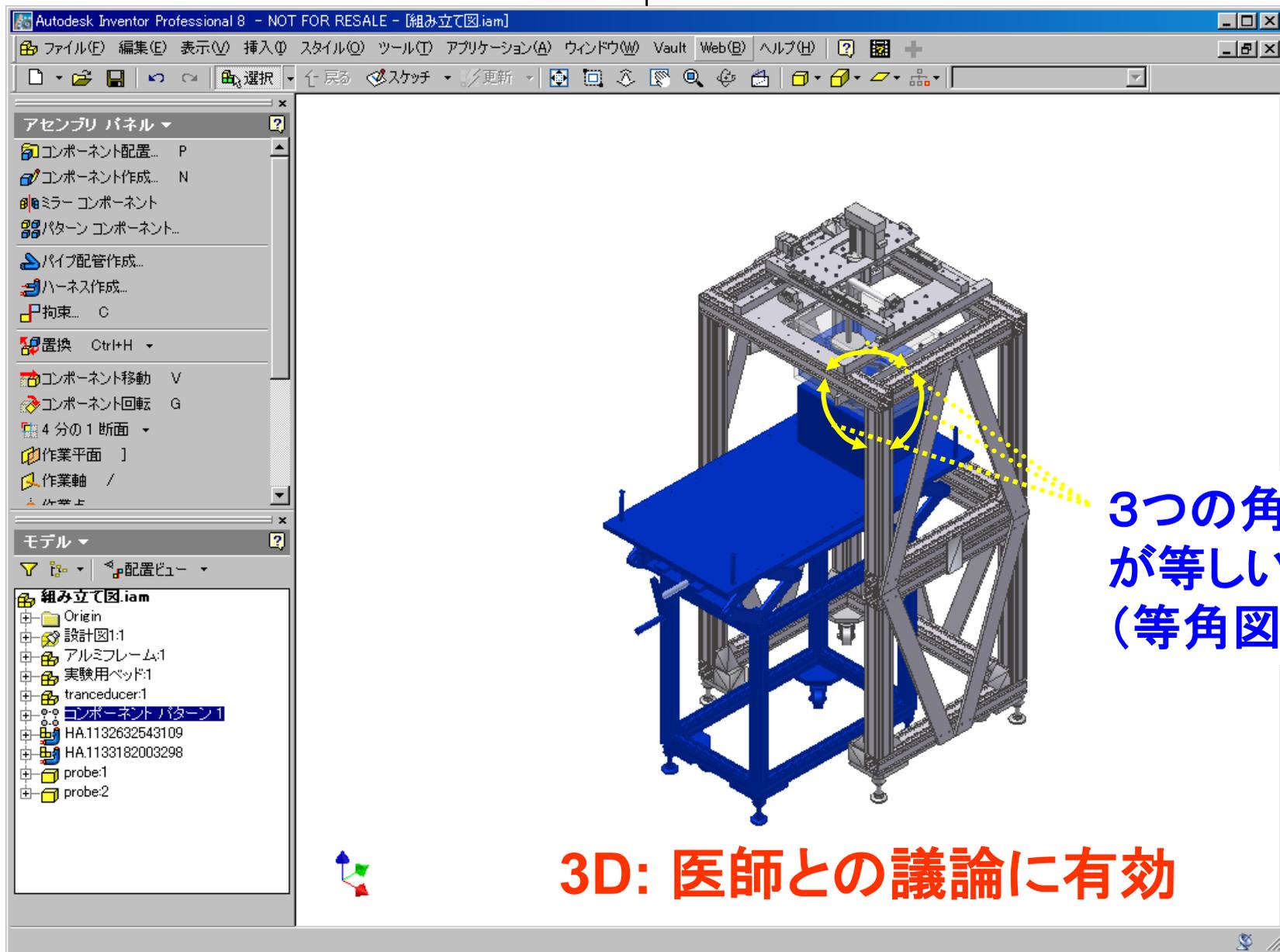


Transducer Probes



スキャンする平面が互いに直交する2本のプローブ

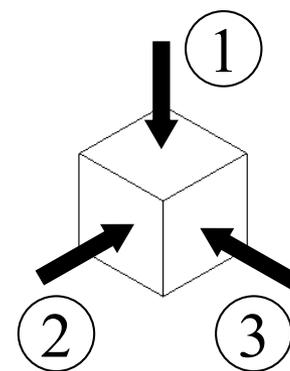
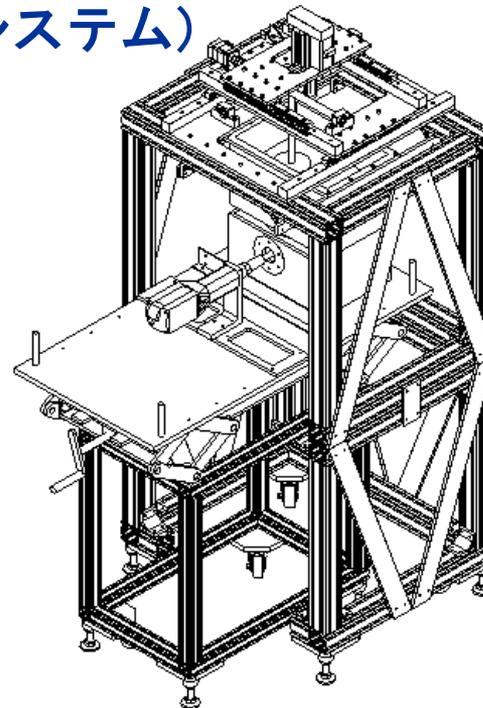
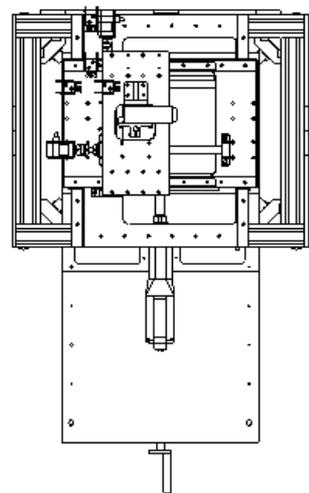
3D-CAD画面の例 (Autodesk社 Inventor8)



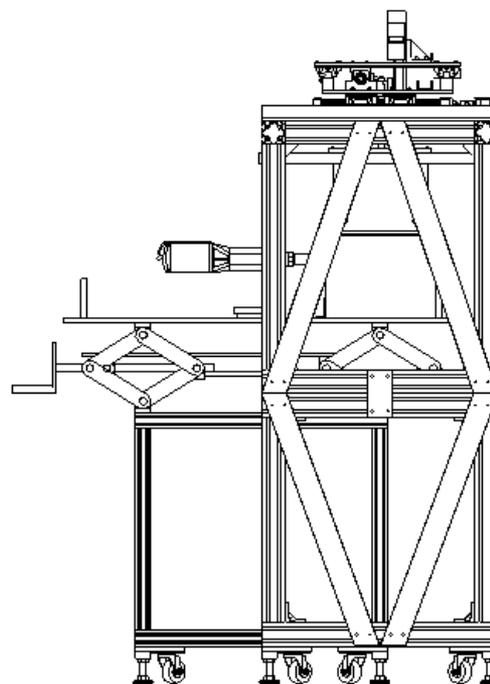
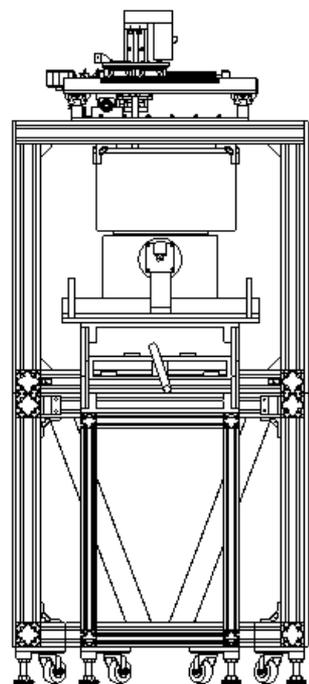
3D: 医師との議論に有効

第3角法 (非侵襲超音波診断・治療統合システム)

① 平面図

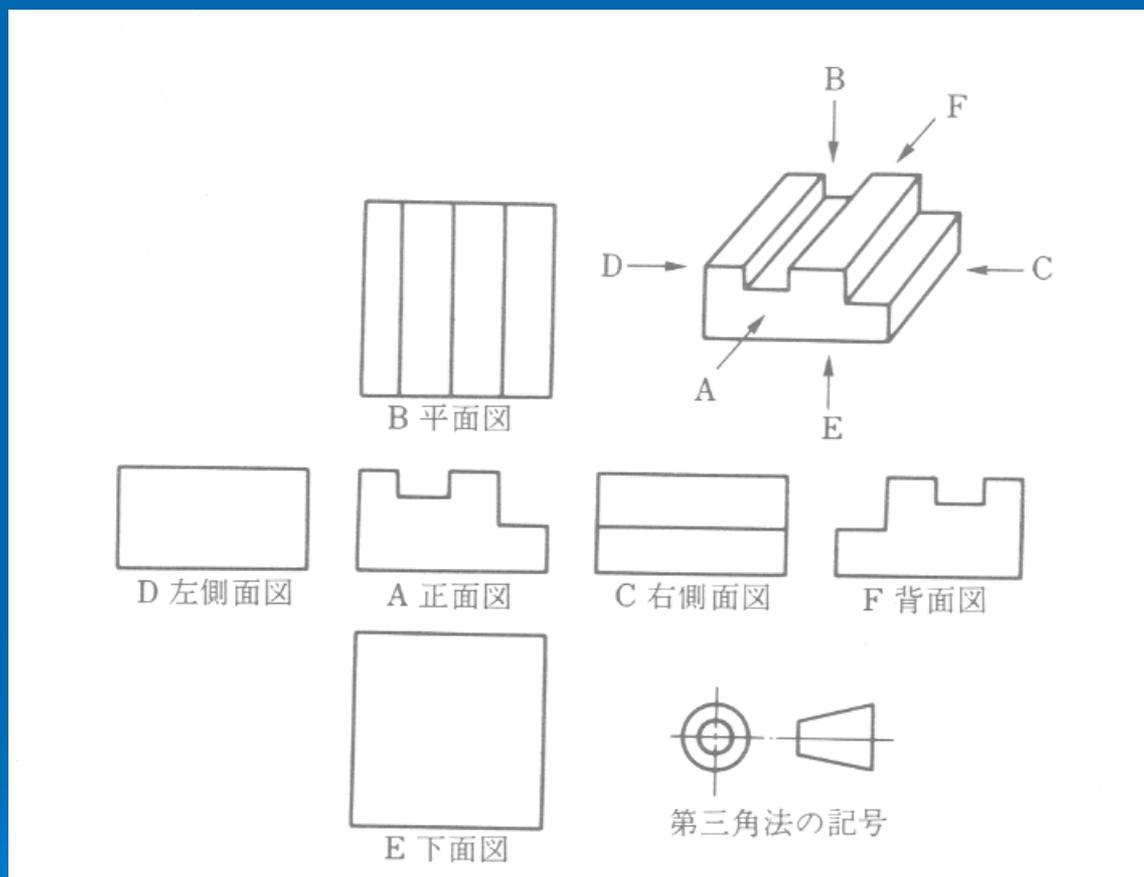


② 正面図



③ 側面図

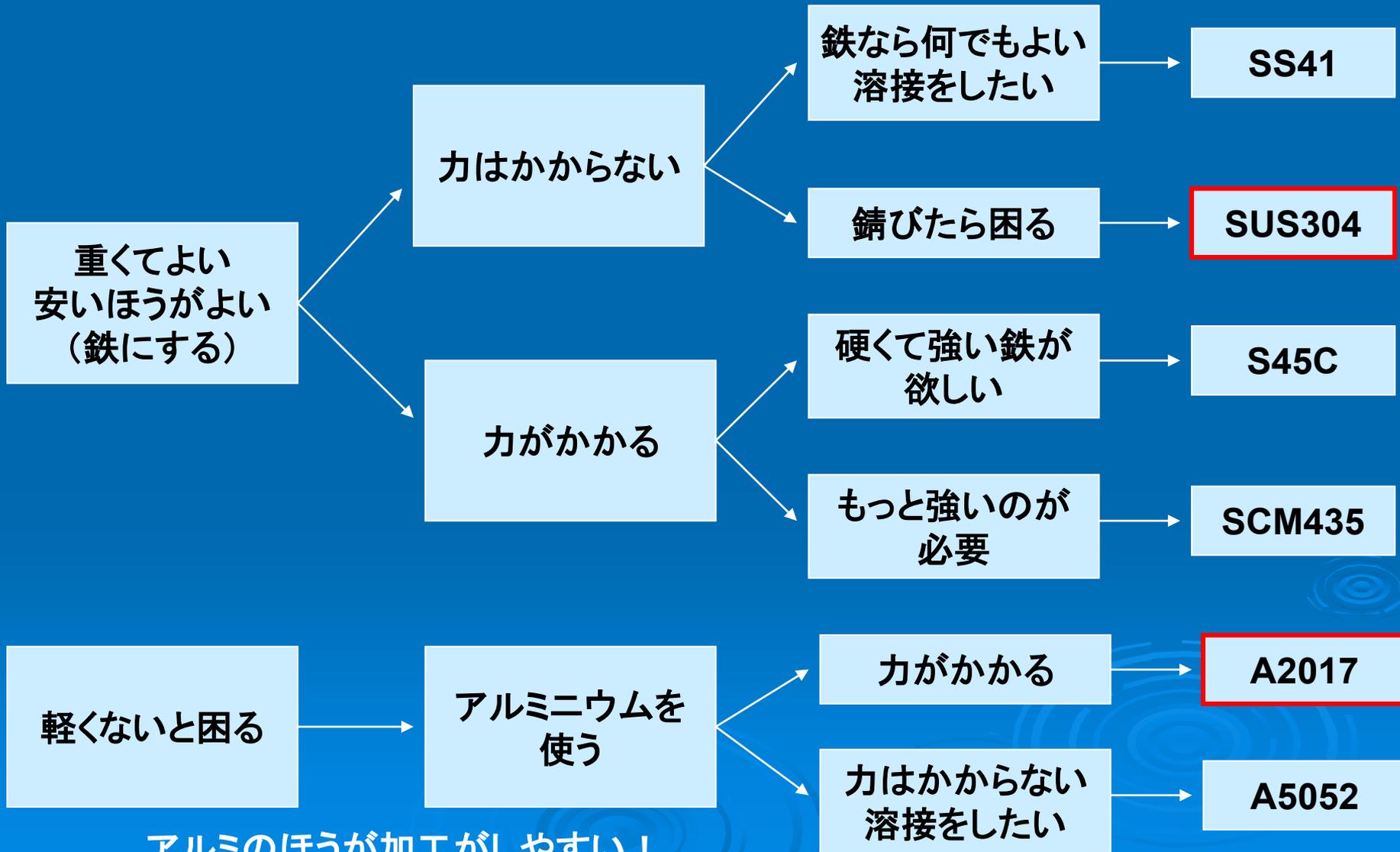
図形の表わし方(第3角法)



A~F方向からみたときの
平面投影図の展開図になっている

(参考文献)畑村洋太郎, "実際の設計",
日刊工業新聞社, 1988.

材料の選び方



アルミのほうが加工がしやすい！

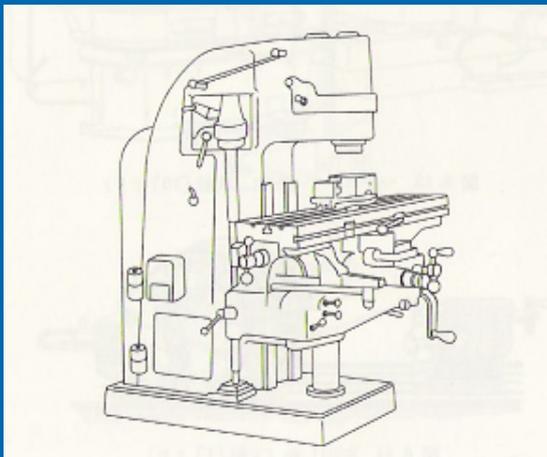
加工法

一般的な機械部品の製作の過程

- ① 素形材(ブランク)の製作
- ② 外形加工(切削加工・研削加工・板金加工)
- ③ 測定
- ④ 熱処理(主に, 金属材料) かたさ調節, しなやかさ調節など
- ⑤ 表面処理 適切な機械材料特性をもたせる!
- ⑥ 組立

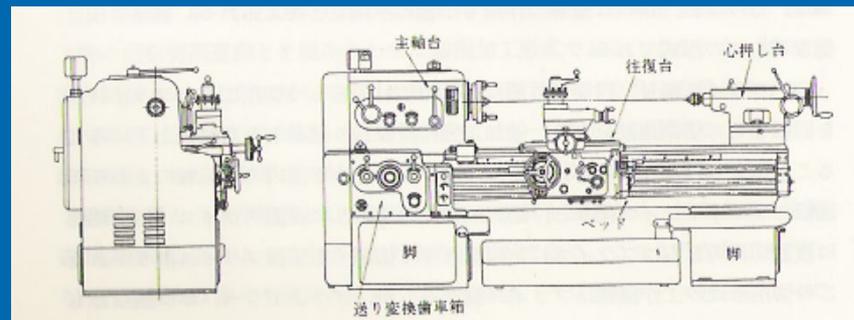
外形加工

平面や溝をつくる



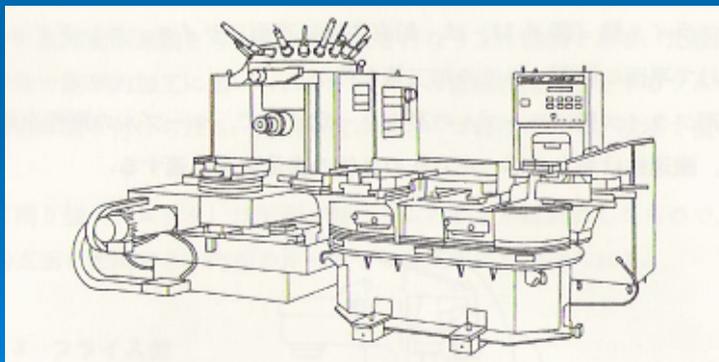
フライス盤

丸棒, 円筒形のものをつくる



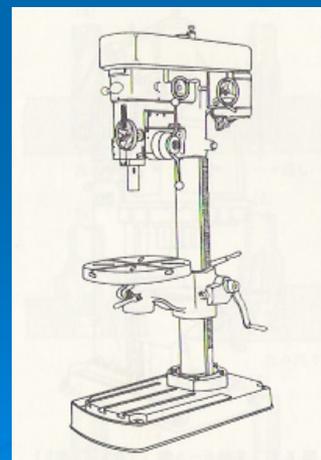
旋盤

穴をあける



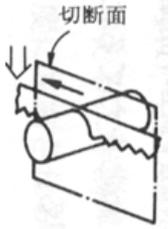
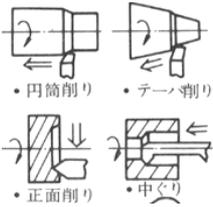
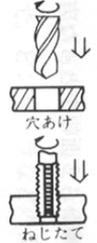
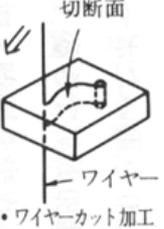
マシニング・センタ

正確な平面, 溝, 穴をあける



ボール盤

外形加工

	素材切断	旋削	フライス削り	穴あけ・ねじたて	研削	放電加工
削られる形 (←切削運動) (←送り運動)						
工作機械	コッターマシン	旋盤	フライス盤・マシニングセンタ	ボール盤・マシニングセンタ	円筒研削盤・平面研削盤	ワイヤーカット放電加工機 ビデオ
精度	下(1mm)	中(30 μ m)	中(30 μ m)	中～下(0.1mm)	高(10 μ m)	中～高(20 μ m)
被削材質	素形材一般	金属材料一般・プラスチック	金属材料一般・プラスチック	金属材料一般・プラスチック	主に鋼材	金属材料一般・導電性材料
コスト(時給)	2000円	3000円～5000円	5000円～7000円	3000円～4000円	8000円～10000円	3000円～5000円

要求精度を考え、コストを抑える！

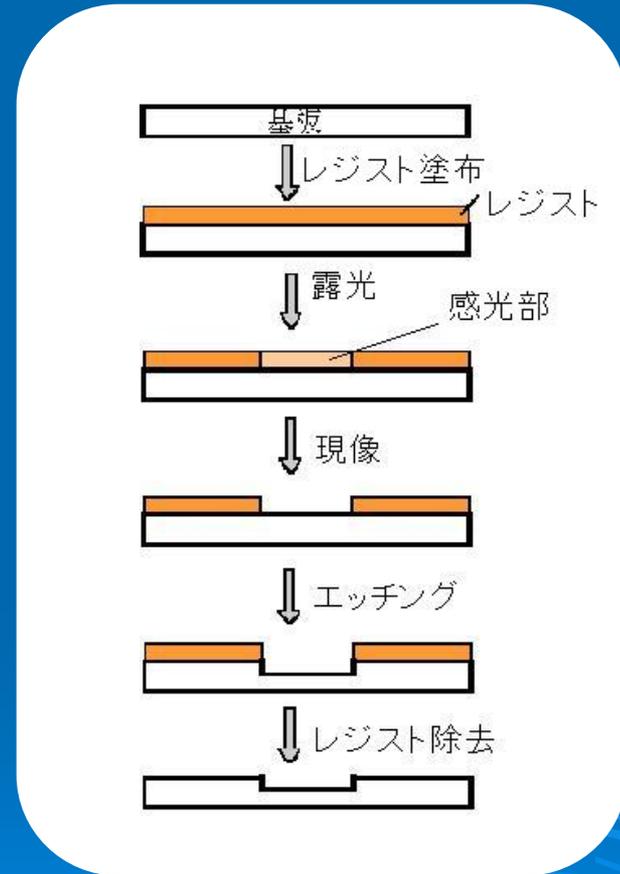
(参考文献)畑村洋太郎，“実際の設計”，日刊工業新聞社，1988.

ナノ・マイクロ外形加工



Focused Ion Beam

ナノ・マイクロオーダーの加工も可能に！



フォトリソグラフィ

測定

測定機器	測定精度	用途
スケール	$\pm 0.5\text{mm}$	おおまかな長さの測定
ノギス	$\pm 0.05\text{mm}$	簡易な長さの測定(外径, 段差)
マイクロメータ	$\pm 0.01\text{mm}$	精密な長さの測定
ダイヤルゲージ	$\pm 0.01\text{mm}$	精密な比較測定
3次元測定器	$\pm 0.01 \sim 0.005\text{mm}$	複雑な形状の精密な測定
真円度測定器	$\pm 0.1\mu\text{m}$	真円度・同心度の測定
表面粗さ測定器	$\pm 0.1\mu\text{m}$	表面粗さの測定

ノギス



<http://www.webshiro.com/syouhinsetumei/cd10cpn.htm>

ダイヤルゲージ



3次元測定器



<http://www.koyo-seiki.co.jp/html/sokuteiki.html>

10cm, 1°C, 1ミクロン! (鋼鉄)

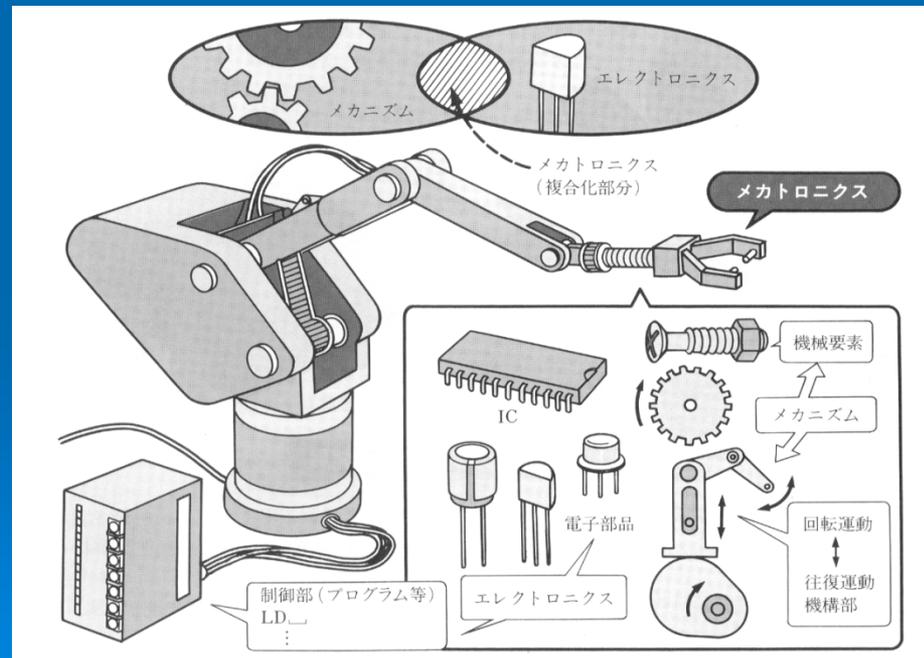
(参考文献) 畑村洋太郎, “実際の設計”,
日刊工業新聞社, 1988.

- 1 システム構築全体のながれ
(例:遠隔超音波診断システム)
- 2 医療診断・治療技能の技術化・デジタル化
(例:非侵襲超音波診断・治療統合システム)
- 3 機構設計技術
- 4 **メカトロニクスとリアルタイム制御技術**
- 5 通信技術と遠隔操作技術
(例:遠隔超音波診断システム)

メカトロニクスとは

Mechanics + electronics

機械的な技術を意味する**メカニクス**と電気・電子的な技術を意味する**エレクトロニクス**とが合成された和製英語。



(参考文献)森田克己ほか, “メカトロニクス入門”,
オーム社, 1997.

リアルタイム制御

リアルタイム制御

制限時間付きの制御

天気予報！

イベント(処理要求)の発生

イベントごとに定められた制限時間

応答

センサ情報

ほかの機器

ほかのタスク

同時に複数のイベントが発生した場合であっても、優先順位にしたがって、制限時間内に応答する！

割込み

割込み

割込みが発生したら、主となるプログラムの**処理をいったん中断し**、割込み要因にあわせたタスクに飛んで、**必要な処理をおこなう**。その処理が終了したら、再び主となるプログラムの処理にもどる。

割込みは、よく、仕事中にかかってきた電話にたとえられる！

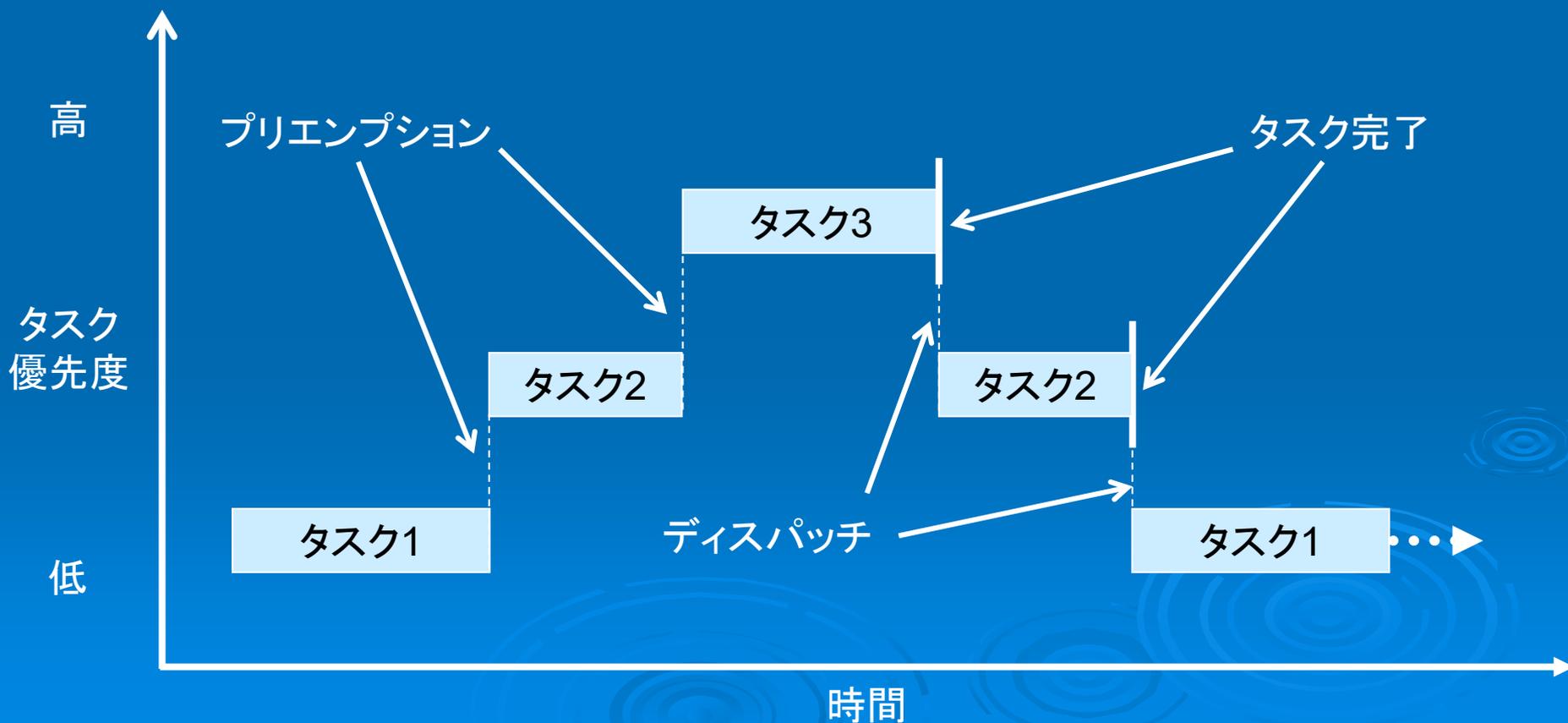
タイマー割込み

内蔵タイマで設定した**ある時間が経過**したときに割込みを発生させる。

優先順位に従ったタスク管理

プリエンプション方式

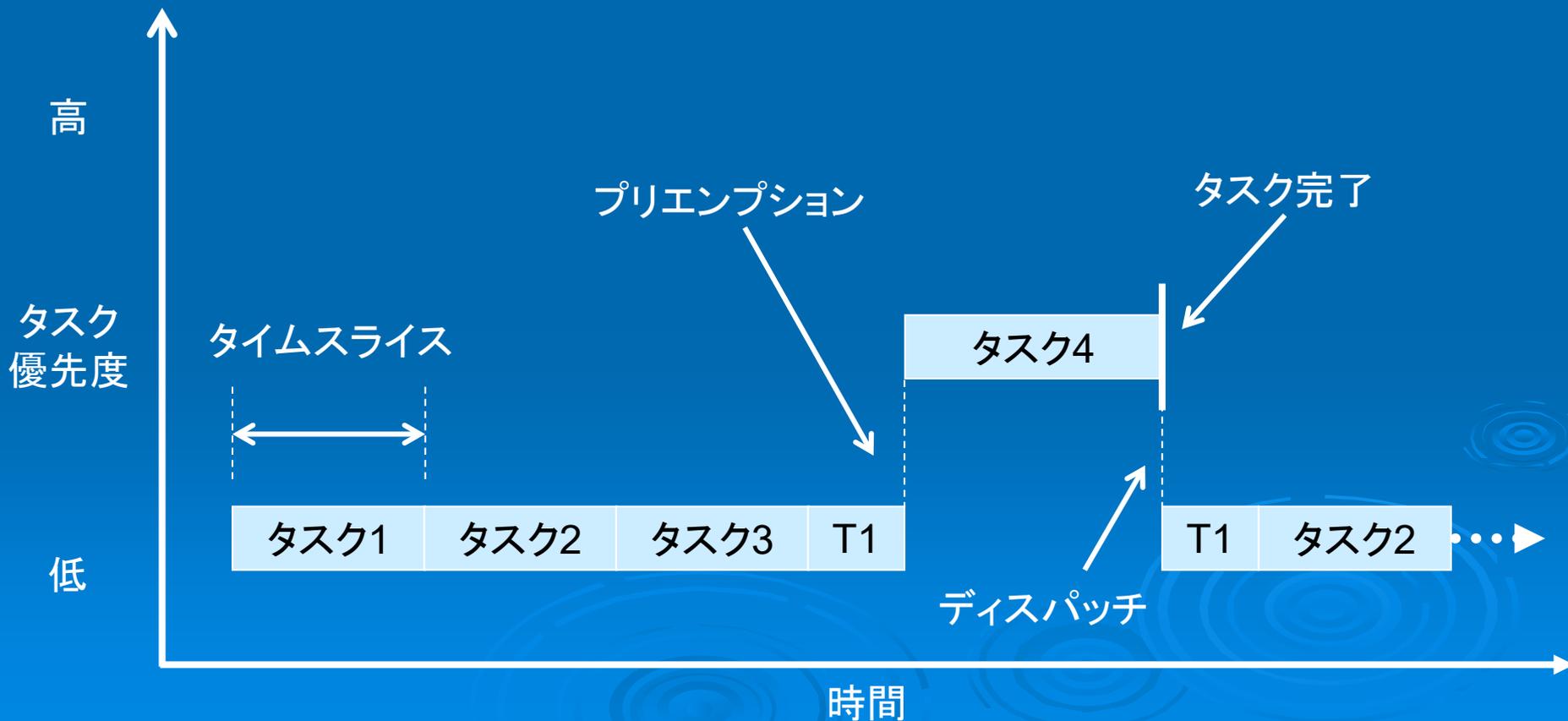
優先順位の高い別のタスクの割込みによって実行中のタスクの実行が**中断**される。



ラウンドロビンスケジューリング

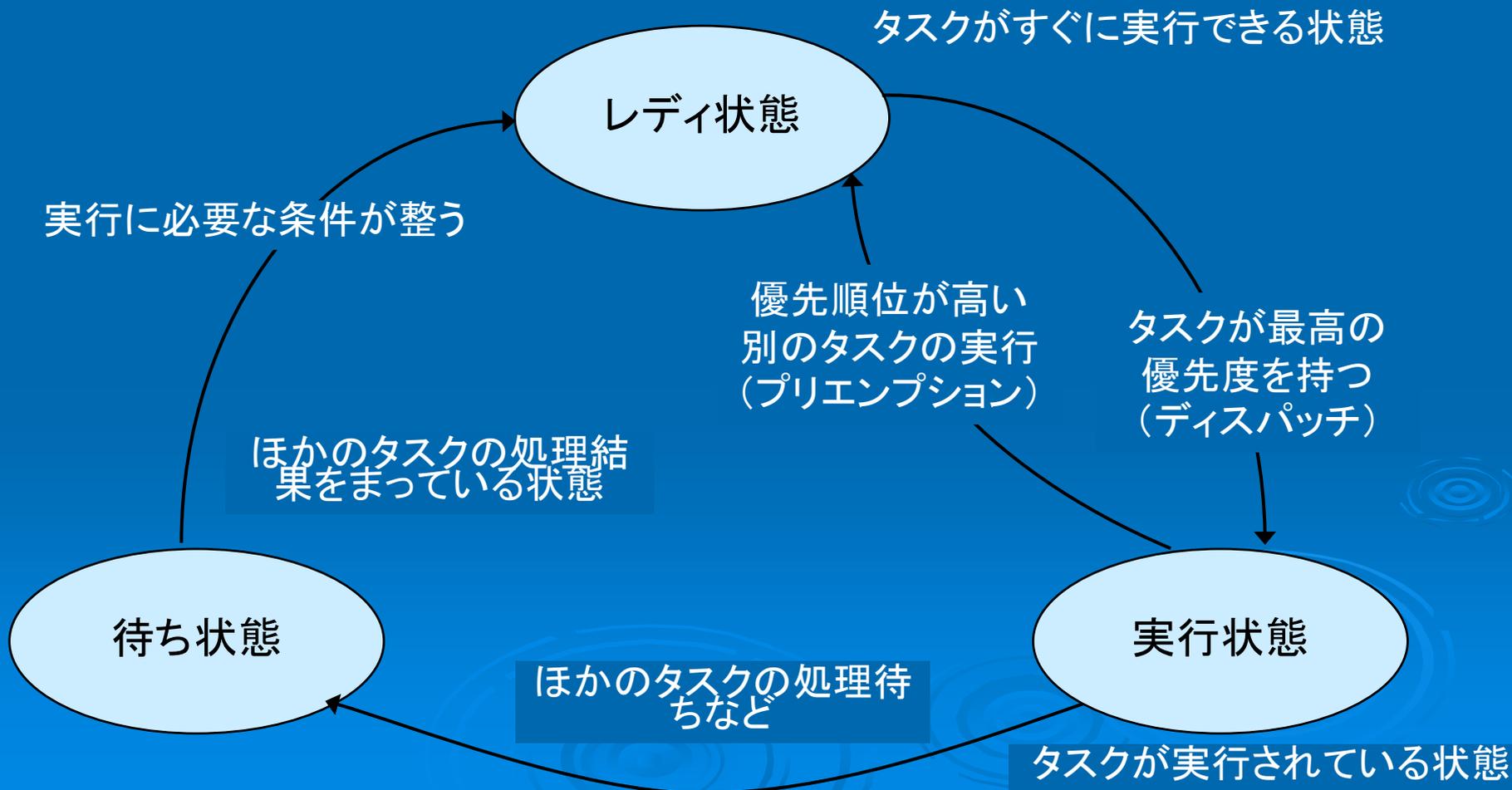
ラウンドロビン・スケジューリング

同一優先順位のタスクにたいして、順番にタイムスライスとよばれる一定時間を割り振ることで複数のタスクを同時に実行していく。



タスクの状態

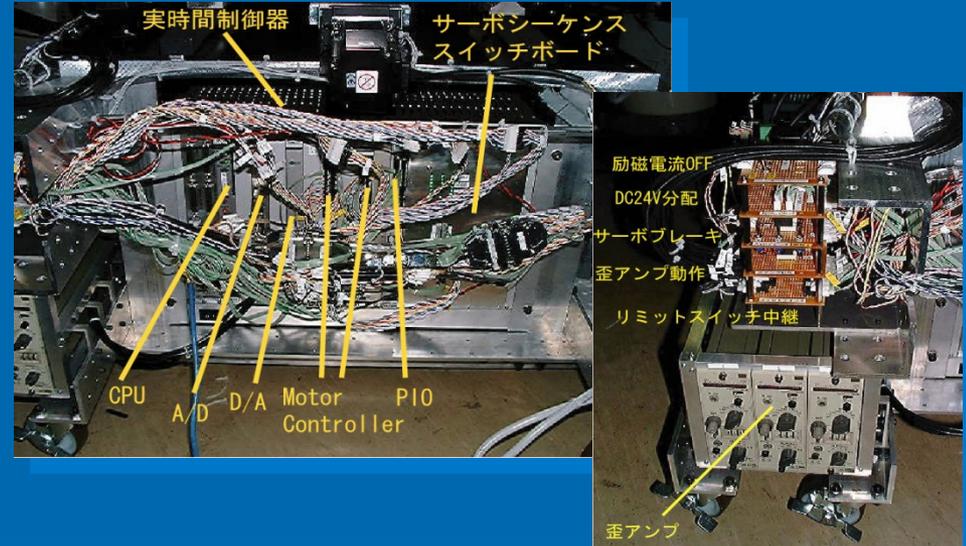
タスクにはある時点の状態として、①**レディ状態**、②**実行状態**、③**待ち状態**が存在し、カーネルのスケジューリング機能によって状態の切り替えがおこなわれる。



インタフェースボード

ひとつのインタフェースを1枚の基盤上にまとめたもの。

スイッチボックス	自動・手動で機器の処理手順を切り替えるリモコン器など。
パラレルIO	ON/OFFのビット群を並列した入出力器。
ADコンバータ	アナログ／デジタル変換器。
DAコンバータ	デジタル／アナログ変換器。
タイマカウンタ	時間ごとに基準パルスをカウントする。カウンタボードともよぶ。
エンコーダボード	エンコーダのパルスをカウントする。
モータドライバ	モータなどの駆動回路。
音声ボード	FFTなどを備えたDSPボード。
画像ボード	カメラからの画像データを取り込み&処理。
通信ボード	計測データの転送や指令伝達を行なう。



リアルタイムOS: VxWorks5.4
(Windriver社)

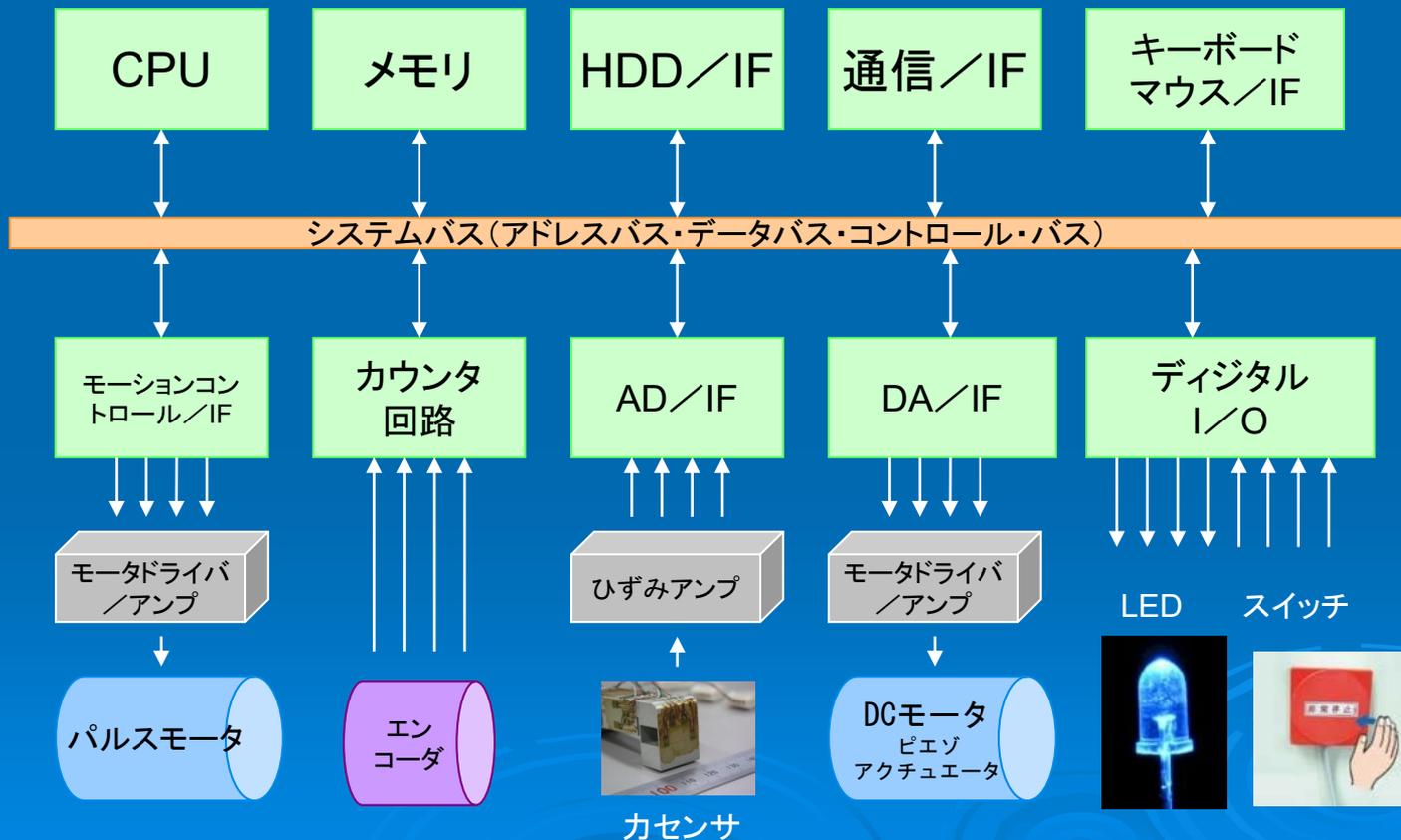
Mars Path Finderにも!

画像処理ライブラリ: MIL8.0
(Matrox社)



インタフェースボードとシステムバス

ひとつのインタフェースを1枚の基盤上にまとめたもの。



システムバス

システムバス

CPUがメモリや入出力装置と情報をやりとりするための信号の束

アドレスバス

CPUがデータのやりとりをする**相手を指定**するためのバス。
16bitのバスでは $2^{16}=65536$ とおりのアドレスを指定可能

データバス

アドレスバスによって指定されたメモリ番地や入出力ポートに**データを転送**するためのバス

コントロールバス

データの転送におけるCPUの**データ入出力の相手**（メモリ、入出力ポート）・**タイミング**を制御するためのバス

センサ

目的	物理量	センサ
ロボット動作の制御	位置(姿勢) (角)速度 (角)加速度	ポテンシオメータ エンコーダ・リミットスイッチ タコジェネ 加速度センサ
反力提示, 安全・安心接触動作 人体位置・動作認識	力 圧力	カセンサ 圧力センサ 感圧フィルム(FSR)
レジストレーション ロボット・ナビゲーション	位置(姿勢)	光学・レーザ顕微鏡 (高速)CCDカメラ 医用画像
異常検知	温度	サーミスタ

アクチュエータ

目的	位置制御	トルク制御	アクチュエータ
トルク制御	△	○	AC/DC サーボモータ
位置制御	○	△	ステッピング・モータ
高磁場(MRI) 環境下	△	△	超音波モータ
微細(ナノオー ダ)動作	○	○	ピエゾ
高速動作	○	△	リニアモータ
高トルク	△	○	油圧モータ



駆動源が磁力ではない！

超音波モータ

www2.cc.oshima-k.ac.jp

AD/DAインタフェース

AD/DAインタフェース

ADコンバータとDAコンバータは、華やかではないが**アナログ**量と**デジタル**量をやりとりするインタフェース。

携帯電話

携帯電話などでは、最初は**アナログ**（音声）から**デジタル**へ変換（AD変換）、また、最後は**デジタル**から**アナログ**へ変換（DA変換）される。

AD変換のプロセス

標本化

アナログ信号の値を**一定周期**ごとにとりだす

量子化

アナログ量を**デジタル**数値に**変換**する

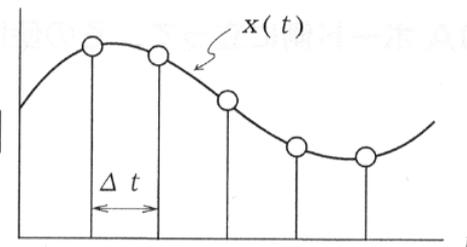
符号化

2進数のデータに直す

アナログ信号： 電圧
のサンプリング

デジタル化： デジタル量

符号化： 2進 n bit



(Δt はサンプリング周期)

分解能と精度

分解能

となりあう値をどこまで**細分化**できるかという能力。

精度

変換されるデジタル量の**正確さ**。真値とのずれ。

ビット数	分解能	分解能 [%]
8	1/256	0.39
10	1/1024	0.10
12	1/4096	0.024
16	1/65536	0.0015
20	1/1048576	0.0001

サンプリング定理

サンプリング定理（標本化定理）

取り扱っている信号の最大周波数が f_{\max} のとき、この信号を完全に復元するためには、 $f_s = 2 f_{\max}$ 以上の周波数でサンプリングする必要がある。



波形再現性を考えれば $f_s = 10 f_{\max}$ 以上欲しい。

プローブ動作のサンプリング

超音波診断における医師のプローブ動作を解析



比較的周波数の高い動作であっても $f_{\max} = 1 \sim 2\text{Hz}$



周波数 f_{\max} の動作を再現するためには $f_s \geq 2f_{\max} = 2 \sim 4\text{Hz}$



波形再現性を考えれば, $f_s \geq 10 f_{\max} = 10 \sim 20\text{Hz}$

名医の医療技能をクセまでも含めて後世にのこすには？ (技能の技術化)

- 1 システム構築全体のながれ
(例:遠隔超音波診断システム)
- 2 医療診断・治療技能の技術化・デジタル化
(例:非侵襲超音波診断・治療統合システム)
- 3 機構設計技術
- 4 メカトロニクスとリアルタイム制御技術
- 5 通信技術と遠隔操作技術
(例:遠隔超音波診断システム)

遠隔制御における諸問題

通信時間遅れ

通信にかかる時間により生じるデータの**位相**遅れ.

+

信号波形の変化

短い周期でまとめてデータが受信されたり, 長い時間にわたり, データが受信されない場合に生じる**波形**の変化.

通信システム

専用の通信回線を用いることにより、
通信時間遅れが一定であると仮定できる条件で
制御用通信システムを構築する。



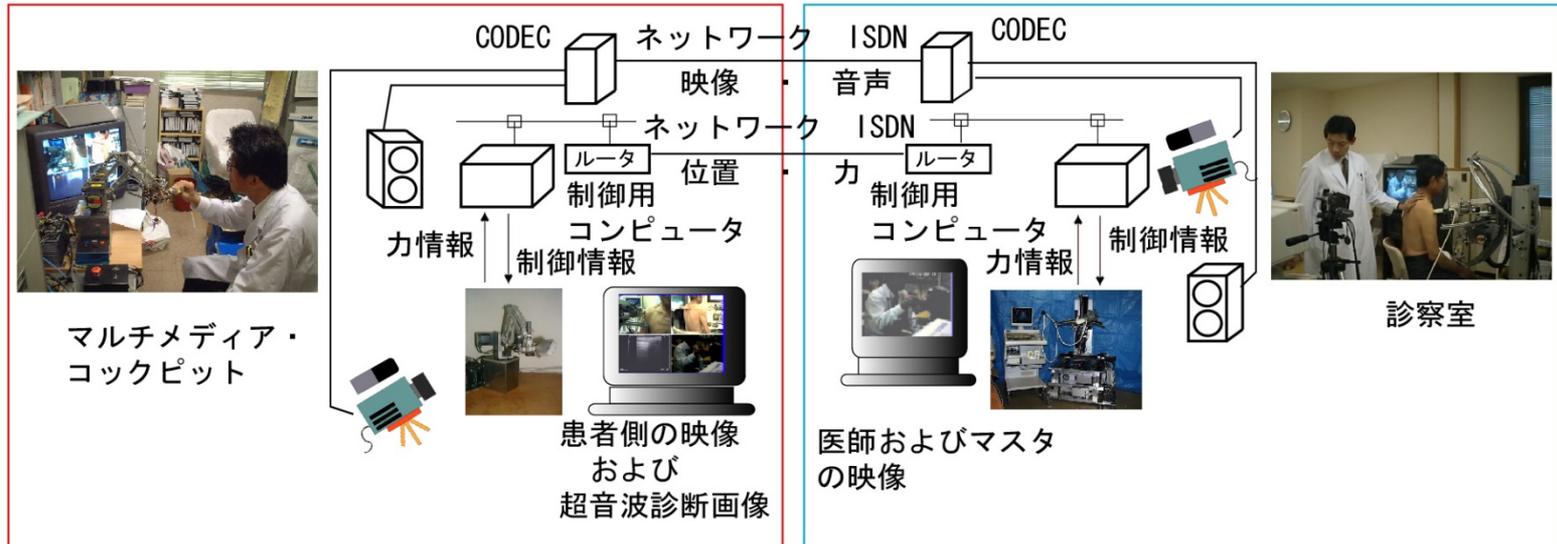
リアルタイムOSを用いることにより、以下のタスクができるだけ
一定周期で正確に実行されるように配慮する。

- データをサンプリングする
- データを伝送する
- データを受信する
- 指令値を与える

TCP v.s. UDP

項目	TCP	UDP
順序づけ機能	有	無
誤り訂正機能	有	無
再送機能	有	無
コネクション	コネクション型	コネクションレス型
高速性	低速	高速
信頼性	高	低
一定間隔送信	×	○

遠隔超音波診断システムにおける 機構・制御・通信システム



Master site

Slave site

マスタ・スレーブ・システム

力フィードバック

診断のための超音波画像の伝送

コミュニケーションのための映像・音声相互伝送

プローブ操作機能タスク

機能タスク1

プローブの押しつけ**位置**を適正化する
→ **インピーダンス制御**

→ **安定接触動作を実現しよう！
診断状況に応じて最適な制御系を実現しよう！**

機能タスク2

プローブの押しつけ**姿勢**を適正化する
→ **CP(経路)制御**

機能タスク3

プローブの押しつけ**力**を適正化する
→ **インピーダンス制御+ハイブリッド制御**

問題点

インピーダンス制御

従来型のマスタ・スレーブ型の操作システムでは、
操作対象は静的であり、
マスタと同様な動作の実現を目的とする。

診断中に患者が動作するため、
安定接触を維持するのが困難！

安全・安心な
安定接触動作

Technique: インピーダンス制御

マスタと操作者

プローブ



F_s



F_m

患者が動作！

- ①接触状態を提示するために
運動方程式に基づくプローブ動作
- ②安定接触を維持するための制御則
- ③操作容易性のために
インピーダンス調整可能。

安定接触を維持するための制御則

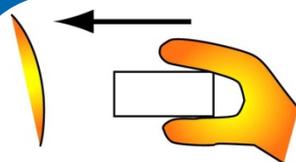
Not using
control regulation

even if $F_s > F_m$
force = $F_m - F_s$

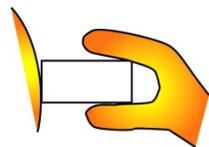
問題点

制御系の動的切替え

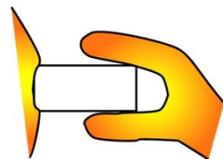
従来型の制御においては、
作業開始から終了まで同一の制御系



Task 1) 患部から離れた位置
でのプローブ操作



Task 2) 患部付近の操作
(軽い接触を含む)



Task 3) 患部付近の操作
(強い接触を含む)

タスクにより、最適な制御系は異なる！



Technique: 制御系の動的切替え

プローブ操作タスクに応じた
操作性の向上

- ① 接触力, 操作力, ならびにプローブと患部の距離情報によってプローブ操作タスクを認識.
- ② 認識されたタスクに応じてインピーダンス・パラメータを動的に切替える.

プローブ操作機能タスク

機能タスク1

プローブの押しつけ**位置**を適正化する
→ **インピーダンス制御**

機能タスク2

プローブの押しつけ**姿勢**を適正化する
→ **CP(経路)制御**

→ **追従性を損なうことなく
なめらかな動作を実現しよう！**

機能タスク3

プローブの押しつけ**力**を適正化する
→ **インピーダンス制御+ハイブリッド制御**

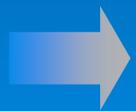
PTP v.s. CP

Point To Point 制御

- ①通過／到達すべき位置／姿勢が目標値として与えられる制御
- ②途中の経路は問わない
(例)ハードディスクの位置決め制御

Continuous Path 制御

- ①ある目標軌道 (Trajectory) を設定／生成
- ②目標軌道に追従するように速度／加速度が目標値として与えられる制御
(例)工作機械の3次元表面加工

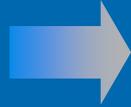


軌跡 (Locus) : 時間の関数ではない
軌道 (Trajectory) : 時間の関数
軌跡の各点を通過する時間を定めると軌道になる !

PTP (遠隔の場合)

PTP制御

- ① 通過／到達すべき位置／姿勢が目標値として与えられる制御
- ② 途中の経路は問わない
(例) ハードディスクの位置決め制御



マスタ側から時々刻々と送られてくる
位置・姿勢データがスレーブの目標値となる

CP制御

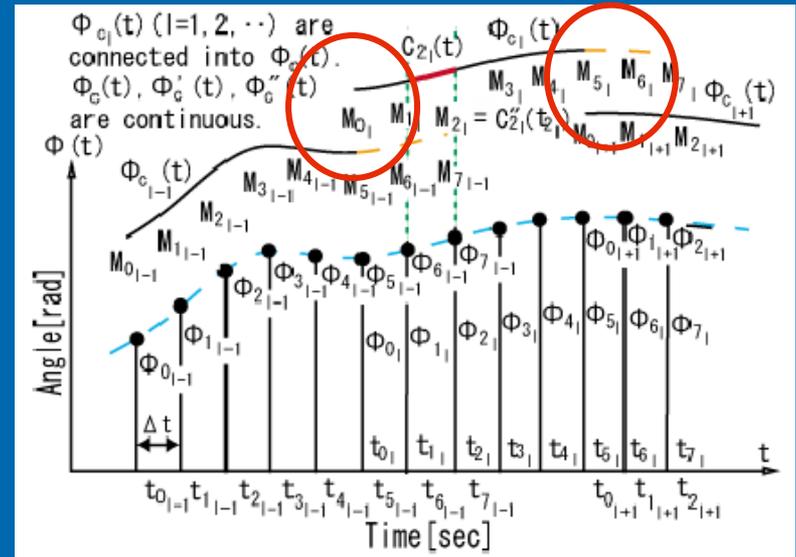
- ① ある目標軌道 (Trajectory) を設定／生成
- ② 目標軌道に追従するように速度／加速度が目標値として与えられる制御
(例) 工作機械の3次元表面加工

Continuous Path 制御

問題点

伝送されたデータは連続的でない!

従来型の制御では追従性を損なうことなくなめらかな動作の実現が困難



Technique: Continuous Path 制御

なめらかで高追従な動作

- ① スプライン関数により連続的な経路を生成する。
- ② 生成された経路はひとつ前の経路に連続的に接続する。
- ③ 追従性を損なうことなく、なめらかなスレーブ動作が実現。

CP制御の効果

PTP制御

プローブ操作機能タスク

機能タスク1

プローブの押しつけ**位置**を適正化する
→ **インピーダンス制御**

機能タスク2

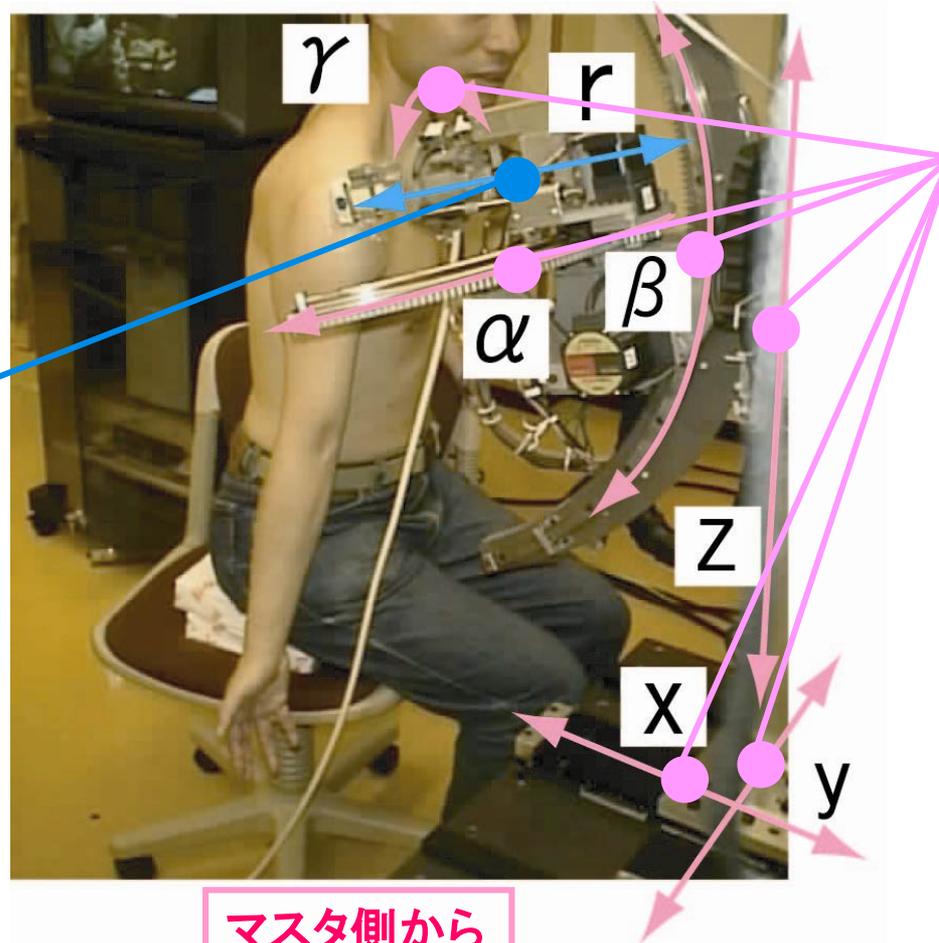
プローブの押しつけ**姿勢**を適正化する
→ **CP(経路)制御**

機能タスク3

プローブの**押しつけ力**を適正化する
→ **インピーダンス制御+ハイブリッド制御**

→ **ローカルでの力一定制御**
マスタ側から目標押しつけ力を指定

ハイブリッド制御(機構)



スレーブ側で
ローカルに制御

マスタ側から
バイラテラル
に制御

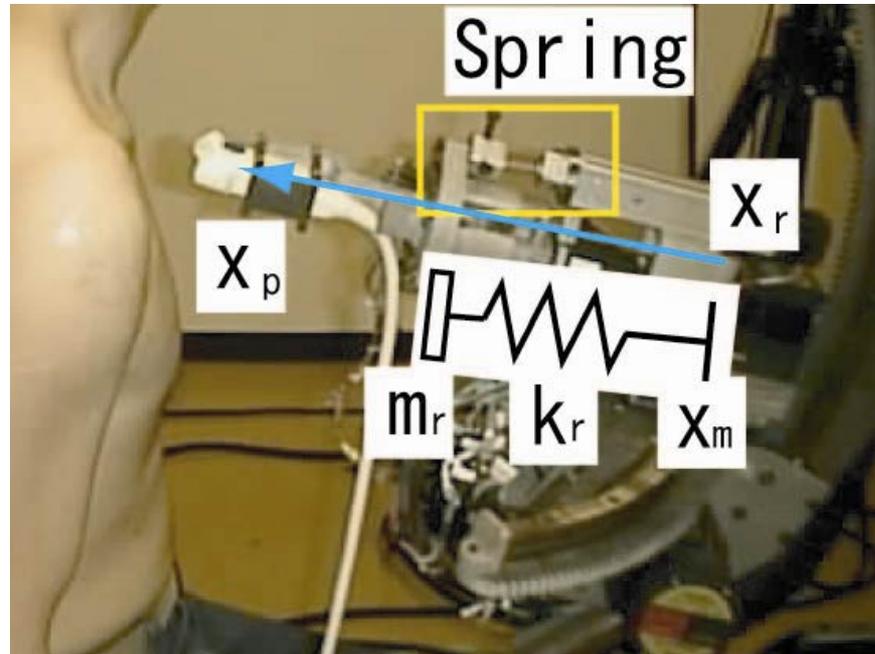
スレーブ側で
ローカルに制御

と

マスタ側から
バイラテラル
に制御

を冗長にすることで分離する!

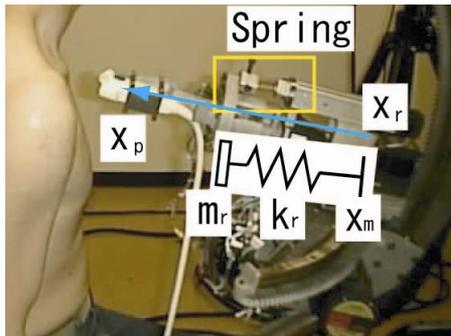
ハイブリッド制御(機構)



プローブ位置 $x_p = x_m + x_r$

力一定制御 $F_{contact} = k_r \Delta x_r$

制御系の切り分け



$$F = M_d \ddot{x}_m + C_d \dot{x}_m$$

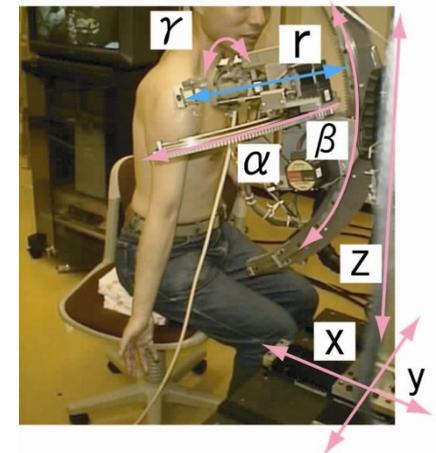
インピーダンス制御

$$x_p = x_m + x_r$$

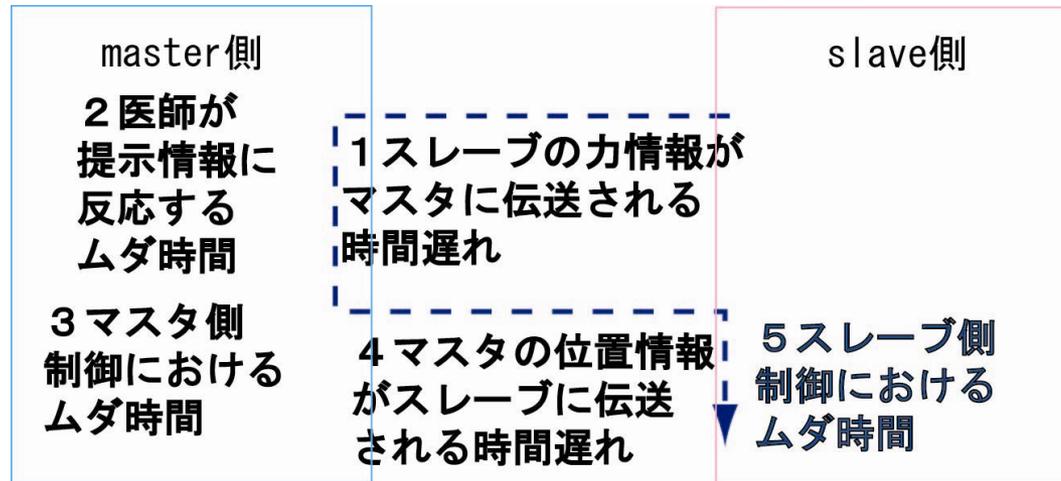
スレーブ・ローカルでの力一定制御

$$F_{contact} = k_r \Delta x_r$$

- ①接触状態を提示するために
運動方程式に基づくプローブ動作
- ②安定接触を維持するための制御則
- ③操作容易性のために
インピーダンス調整可能.



制御のための サンプリング周波数



バイラテラルの制御 $T_{dall} = T_{dsm} + T_{dmm} + T_h + T_{dms} + T_{dss}$

$$H_s = 1 / T_{dall}$$

制御のためのサンプリング周波数が
バイラテラルの制御と比較して向上！

スレーブ側
ローカルの制御 $T_{dall} = T_{dss}$

ハイブリッド制御実験

実験目的

提案した位置と力のハイブリッド制御の**有効性**を確認する

実験方法

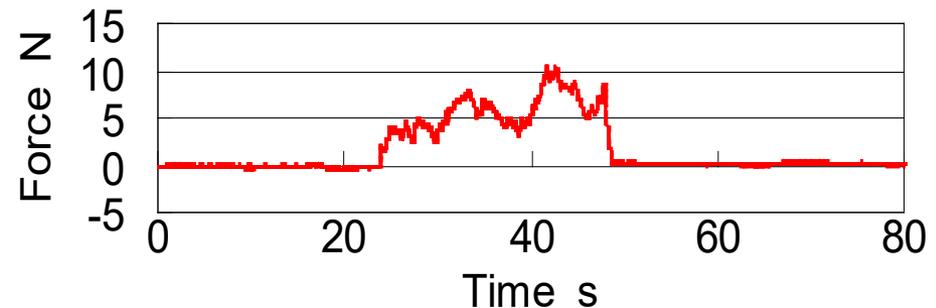
ハイブリッド制御を**用いる**場合と**用いない**場合で**押しつけ力の推移**を比較する

実験条件

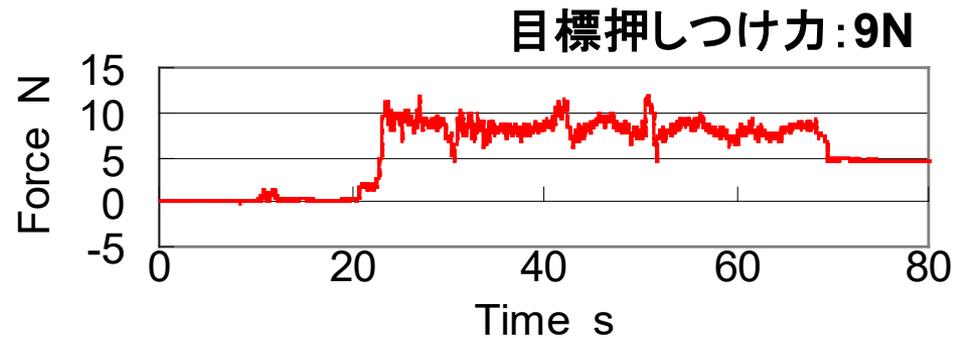
被験者：健常者
I S D N回線（128kbps：制御信号，
384kbps：映像・音声）

実験結果

(a) ハイブリッド制御を用いなかった場合



(b) ハイブリッド制御を用いた場合



押しつけ力の推移からハイブリッド制御を用いない場合と用いた場合で**同等の結果**
押しつけ力保持のタスクを**ロボット**が代わりに**行なう**ことで**医師の負担が軽減**された
過度の押しつけ力がかかることがなくなり、**患者にとっても不快感が軽減**された

ローカルでの押しつけカー一定制御



安全性の確保

安全・安心な
システム

フェイル・セーフ

問題が生じた場合にも**人間**にとって
安全側に遷移するシステム



- 電源がきれると停止する電磁ブレーキ
- ソフトウェアが暴走してもプローブの位置を維持する機構

過剰な押しつけ力を検出→退避動作

End