MEDICAL & BIO ARE NEW DIGITALS !
Me-Dig IT

医デジ化による超高精度な超音波診断・治療ロボットの開発

ー医療・バイオはあたらしいデジタルだ！ー

小泉　憲裕

脳科学ライフサポート研究センター（BLSC）セミナー,
東3号館306会議室, 2016.12.21

100th ANNIVERSARY SINCE 1918
機械知能システム学専攻
http://www.medigit.mi.uec.ac.jp/
Koizumi Lab

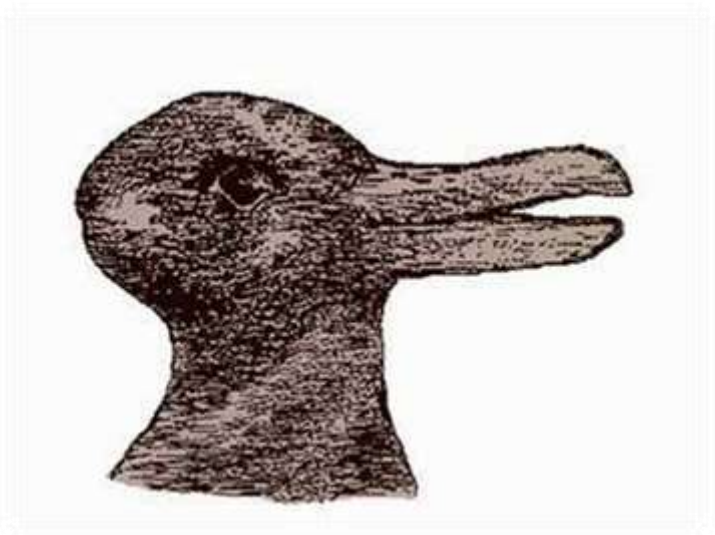
内容

1. 医デジ化の手法，効果と社会的インパクト

2. 医デジ化による遠隔超音波診断システムの構築法（基礎編）

3. 医デジ化による非侵襲超音波診断・治療統合システムの構築法（応用編）

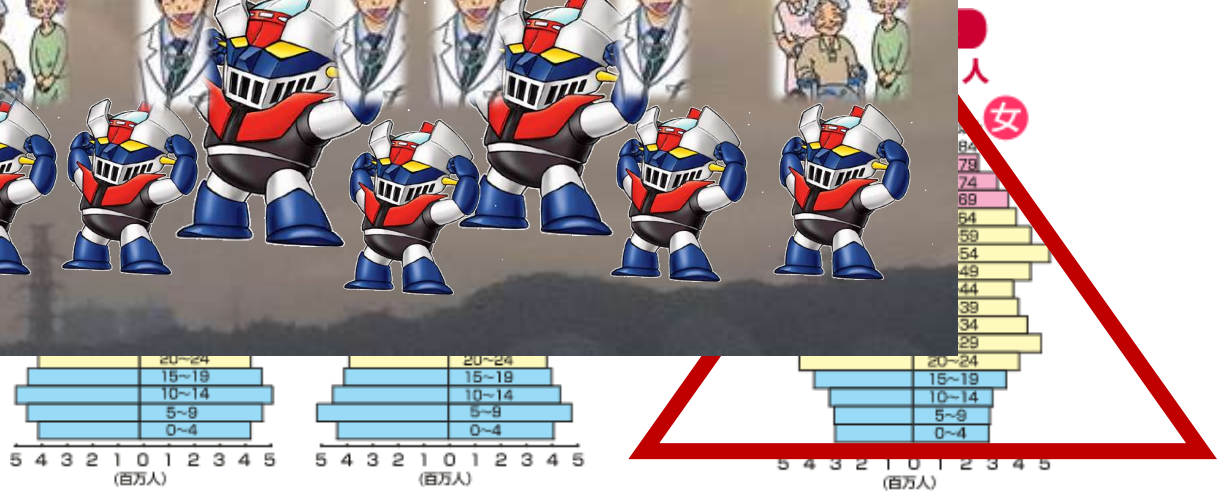
知能と環境のモデル



https://i.ytimg.com/vi/RjNGfwxdI6c/hqdefault.jpg

http://stamp.bokete.jp/33956141.png

なぜ、医デジ化なのか？



http://www.cmf-world.jp/web/koso8/koso8_column_aging_society1.html

なぜ、医デジ化なのか？

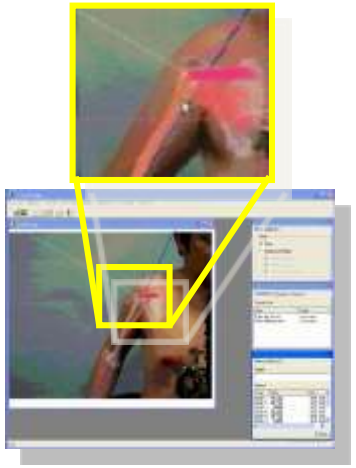
http://www.takumi-cg.co.jp/shop/ta-data/ta1167.html
http://seiga.nicovideo.jp/

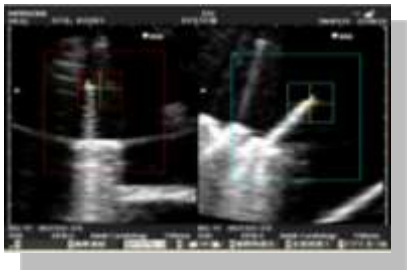
研究分野の概要

医療・福祉ロボティクス・メカトロニクス分野
医療技能の技術化・デジタル化により
医療システムを高度化・最適化するためのロボット
機構・制御・画像処理・アルゴリズムの分野を開拓

・遠隔超音波医療診断システム
・非侵襲超音波医療診断・治療統合システム

ロボットによる
世界初の遠隔
超音波臨床診断

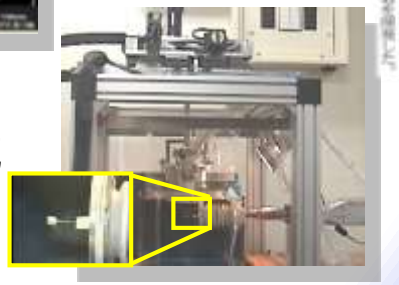




IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS
A PUBLICATION OF THE IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION SOCIETY

TRO, TMECHへの掲載

IJMRCAS,
TUFFCへの掲載



精密工学会春季大会
ベストプレゼンテーション賞受賞

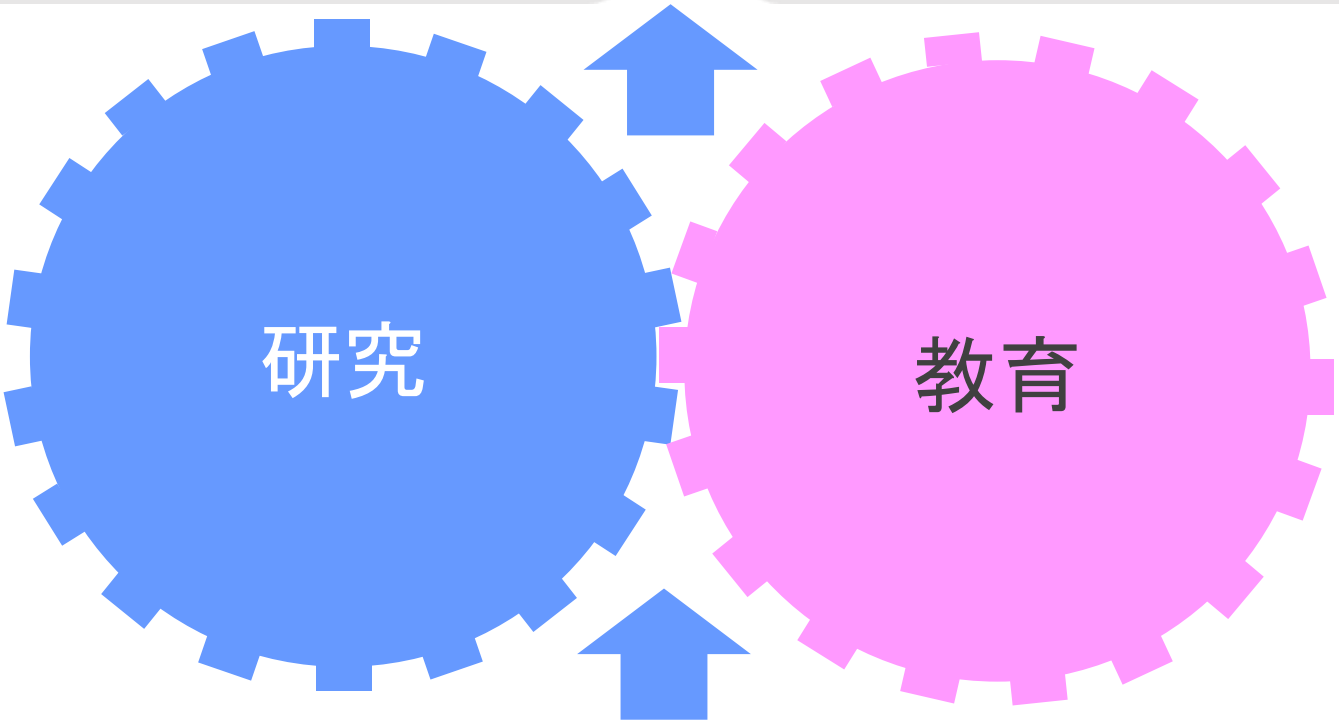
日本機械学会ロボティクス・
メカトロニクス部門一般表彰

日本設計工学会 The Most
Interesting Readings賞受賞

医工融合教育・研究の相乗効果

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
た医工融合人材



研究テーマ：医療技能の技術化・デジタル化による
医療ロボットの構築法

医デジ化：Me-Dig ITalization

超音波医療 診断・治療技能

医療技能の技術化・デジタル化 Me-Dig IT

熟練した専門医のように動作し，人間の能力を超える高精度な診断・治療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

機能の実装

機能の高度化

構築したシステムの検証・最適化

機能実装・システムの最適化

なめらか動作・高追従制御

安全・安心接触動作機構

ロバスト・高精度動画像処理アルゴリズム

日本設計工学会 The Most Interesting Readings賞受賞

IJAT09

効果

医療・健康・福祉専門家

技能の技術標準化

負担軽減

技能のデジタル化

学問体系化・設計指針化 システムの最適化

専門家の技能

安全・安心

ユビキタス化

中高齢者

診断・治療支援対象

診断・治療（評価）支援対象

対象1. **結石**（腎結石・膀胱結石・胆石, etc.）の診断・治療
基礎～臨床段階

対象2. **がん**（腎がん・肝がん・乳癌・骨腫瘍, etc.）の診断・治療
臨床段階

対象3. **痛み**（透析肩・腰痛・関節痛, etc.）の評価・治療
基礎～臨床段階

対象4. **内臓脂肪**（メタボリックシンドローム）評価
製品化段階

対象5. **循環器疾患・組織癒着**（血栓・心臓癒着・腹部癒着）評価
応用～臨床段階

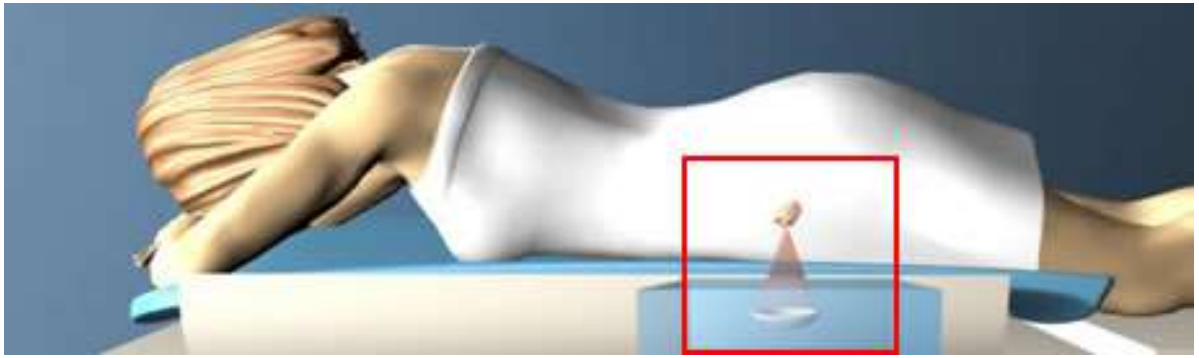
対象6. **肝線維化, 肝硬変**の評価,
臨床段階,

HIFU治療はNon Invasive治療

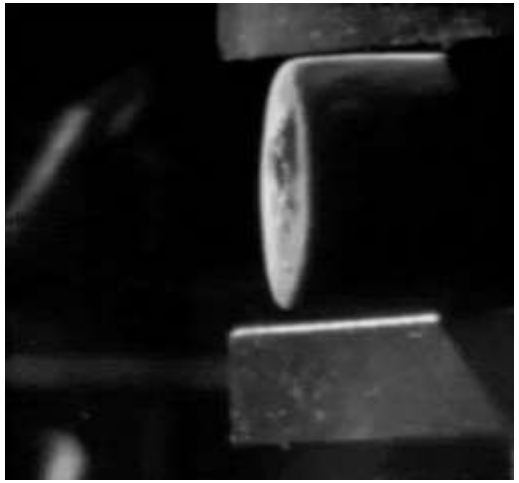
体表を傷つけない非侵襲手術

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

<u>厚労省認可状況</u>

・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）

HIFUによる肝がん治療技術

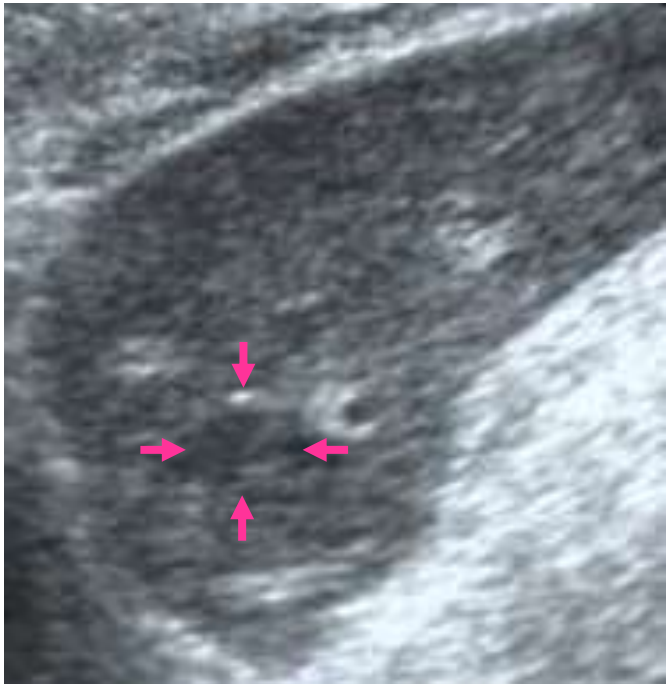
海外製治療装置によるUSガイド下の肝がん治療

Fukuda, et al., 超音波ガイドのHIFU治療

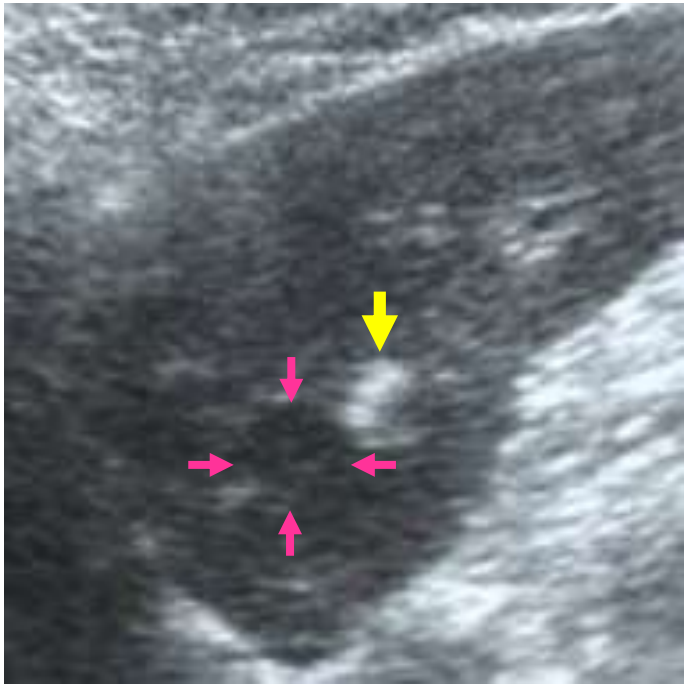
HIFUによる肝がん治療の効果

HIFUにより、肝腫瘍部が熱凝固

Before HIFU



After HIFU

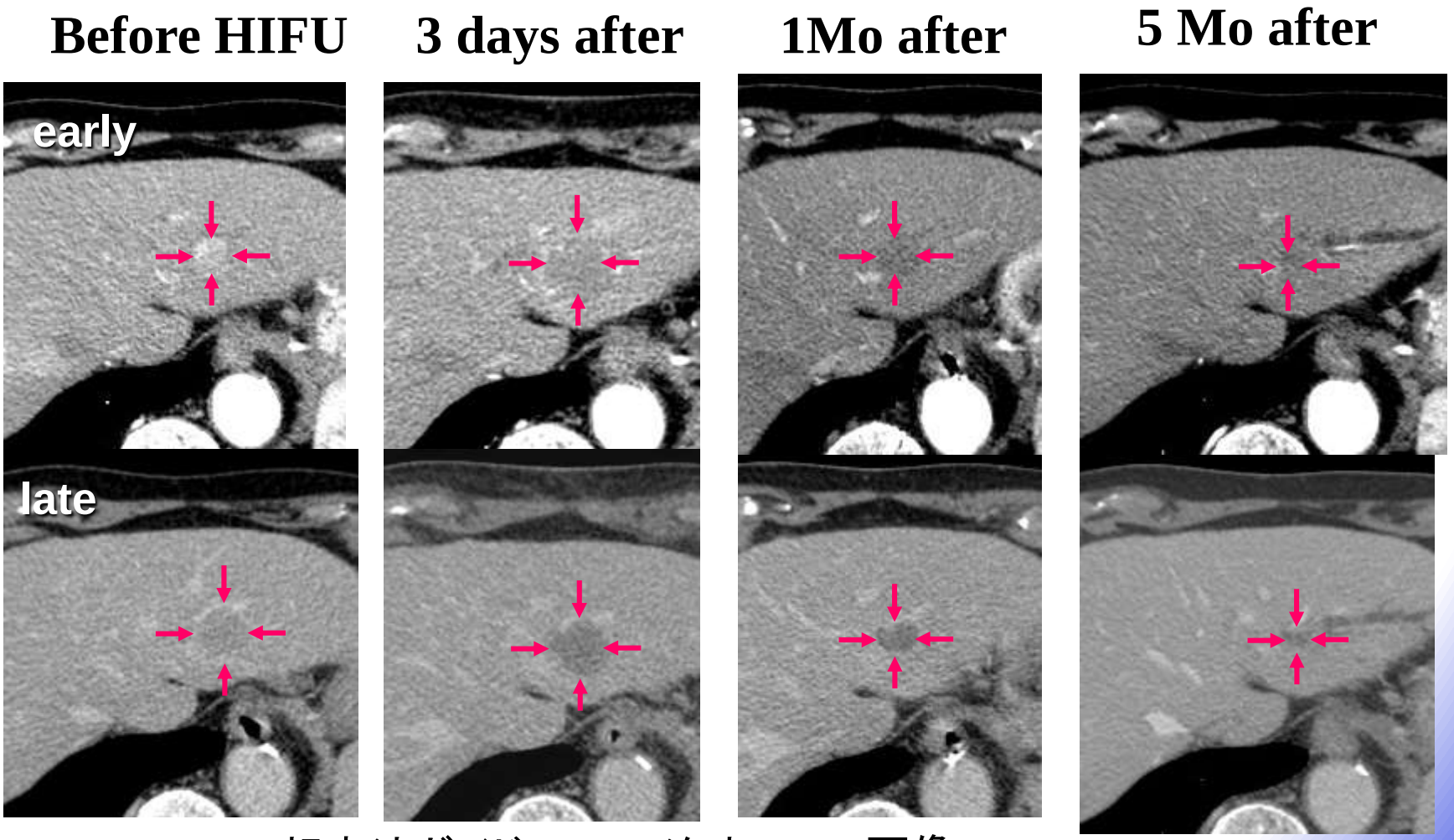


超音波画像

Fukuda, et al., 超音波ガイドのHIFU治療

HIFUによる肝がん治療の効果

肝腫瘍領域が熱凝固（壊死）により縮小



Fukuda, et al., 超音波ガイドのHIFU治療　CT画像

診断・治療支援対象

診断・治療（評価）支援対象

対象1. **結石**（腎結石・膀胱結石・胆石, etc.）の診断・治療
基礎～臨床段階

対象2. **がん**（腎がん・肝がん・乳癌・骨腫瘍, etc.）の診断・治療
臨床段階

対象3. **痛み（透析肩・腰痛・関節痛, etc.）の評価・治療**
基礎～臨床段階

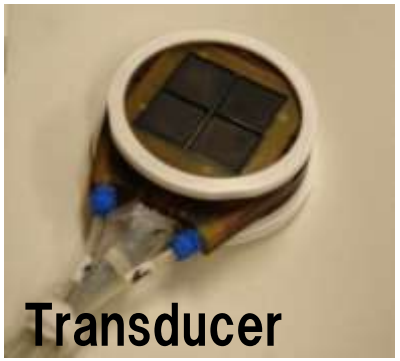
対象4. **内臓脂肪**（メタボリックシンドローム）評価
製品化段階

対象5. **循環器疾患・組織癒着**（血栓・心臓癒着・腹部癒着）評価
応用～臨床段階

対象6. **肝線維化, 肝硬変**の評価,
臨床段階,

HIFUによる疼痛緩和治療技術

海外製治療装置によるMRガイド下の疼痛緩和治療

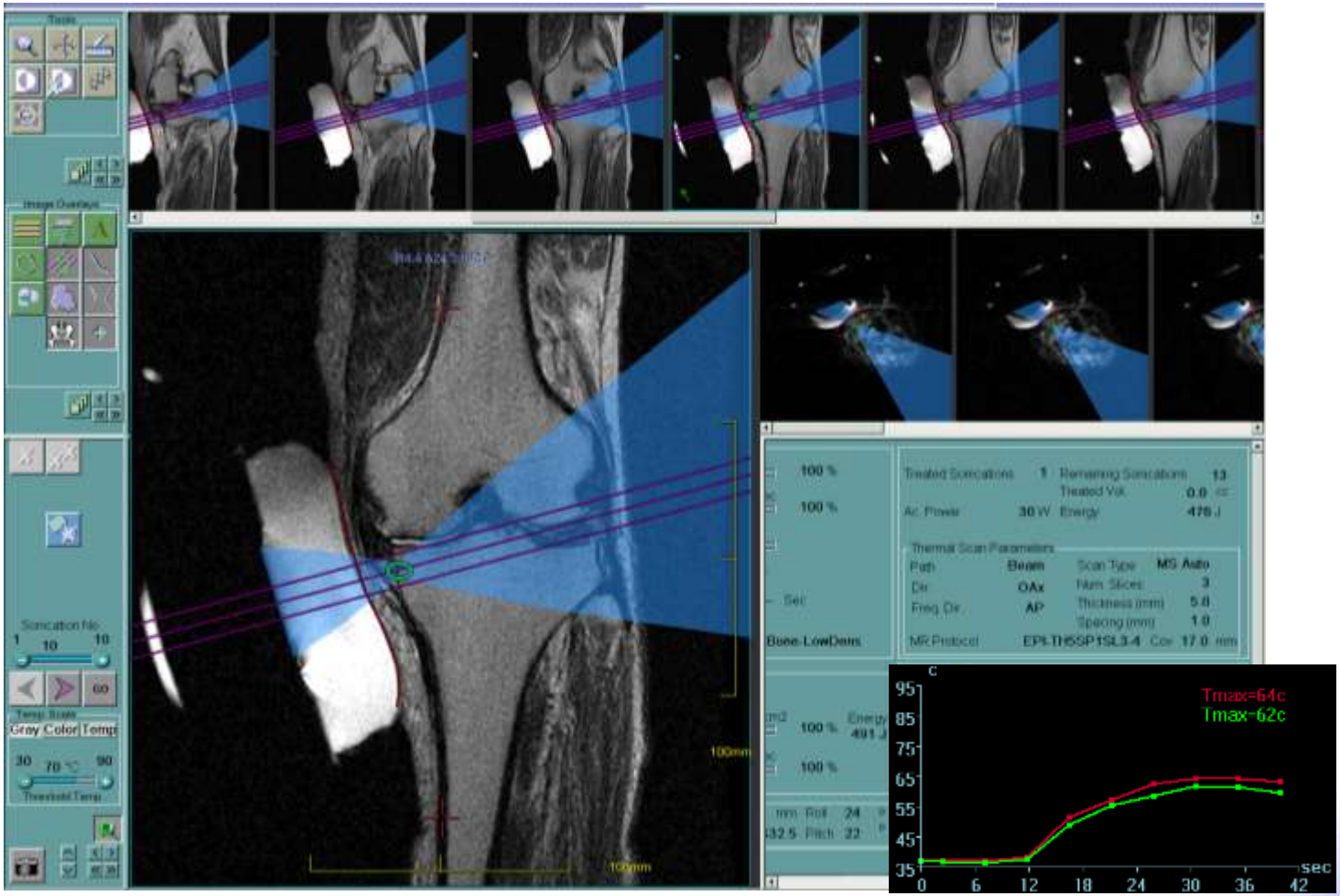


ExAblate® 2100 Conformal Bone System
InSightec Ltd., Haifa, Israel

Kawasaki, et al., MRガイドのHIFU治療

HIFUによる疼痛緩和治療技術

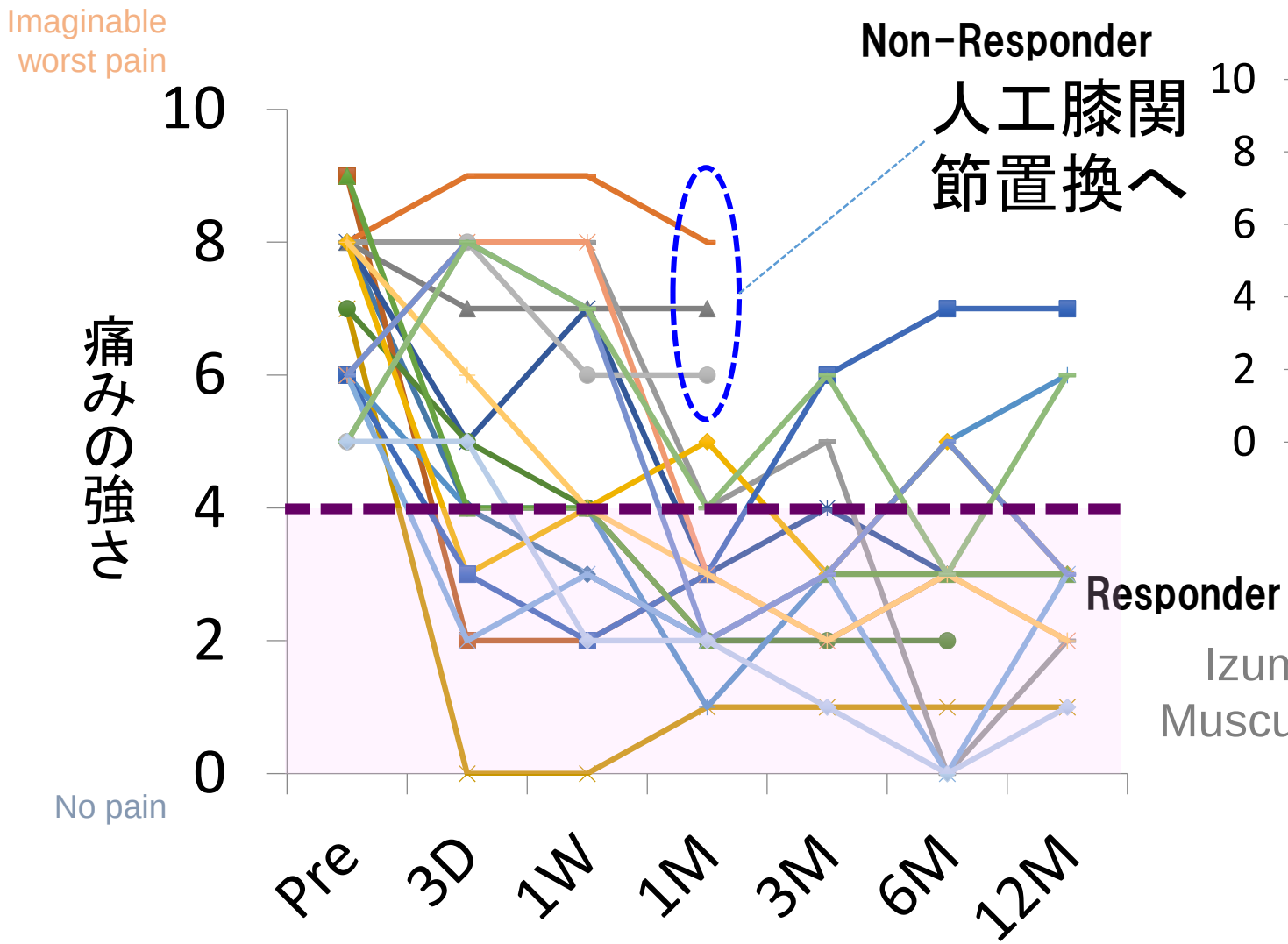
海外製治療装置によるMRガイド下の疼痛緩和治療

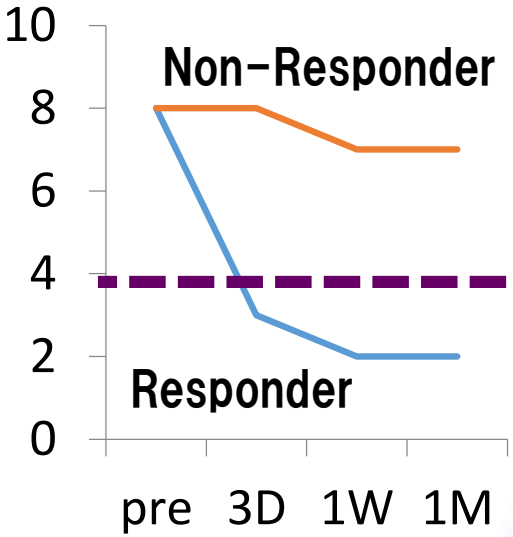


Target temperature: more than 55°C Kawasaki, et al., MRガイドのHIFU治療

HIFUによる疼痛緩和治療の効果

ほとんどの患者さんに対して疼痛が緩和





Izumi, et. al, BMC Musculoskelet Disord, 2013

診断・治療支援対象

診断・治療（評価）支援対象

対象1. **結石**（
基礎～

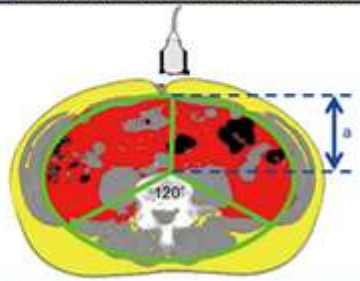
対象2. **がん**（
臨床段

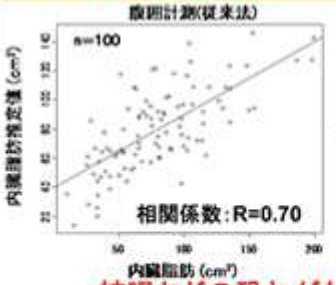
対象3. **痛み**（
基礎～

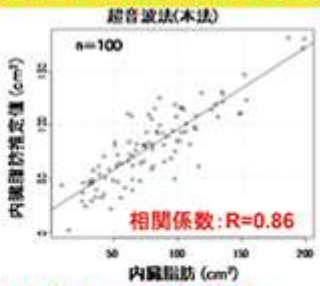
従来の内臓脂肪量測定の欠点を打破した低侵襲・高精度な超音波を用いた定量的計測技術の開発

楕円面積S=πa√(c²/π²/2−a²)

特許番号：第5368615号







- 被曝などの恐れがなく非侵襲的で安全である
- 繰り返し測定が可能である
- 内臓脂肪と皮下脂肪を画像的に分離できる
- 汎用性が高く簡便であり再現性に優れる

市場規模：メタボリックシンドローム(予備群含む)2千万人以上、診断装置5万式

対象4. **内臓脂肪（メタボリックシンドローム）評価**
製品化段階

対象5. **循環器疾患・組織癒着**（血栓・心臓癒着・腹部癒着）評価
応用～臨床段階

対象6. **肝線維化，肝硬変**の評価，
臨床段階，

医デジ化：Me-Dig ITalization

超音波医療 診断・治療技能

医療技能の技術化・デジタル化 Me-DigITalization

熟練した専門医のように動作し，人間の能力を超える高精度な診断・治療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

機能の実装

機能の高度化

構築したシステムの検証・最適化

機能実装・システムの最適化

なめらか動作・高追従制御

安全・安心接触動作機構

ロバスト・高精度動画像処理アルゴリズム

日本設計工学会 The Most Interesting Readings賞受賞

IJAT09

効果

医療・健康・福祉専門家

技能の技術標準化

負担軽減

技能のデジタル化

学問体系化・設計指針化 システムの最適化

専門家の技能

安全・安心

ユビキタス化

中高齢者

医療ロボット開発のスタンス

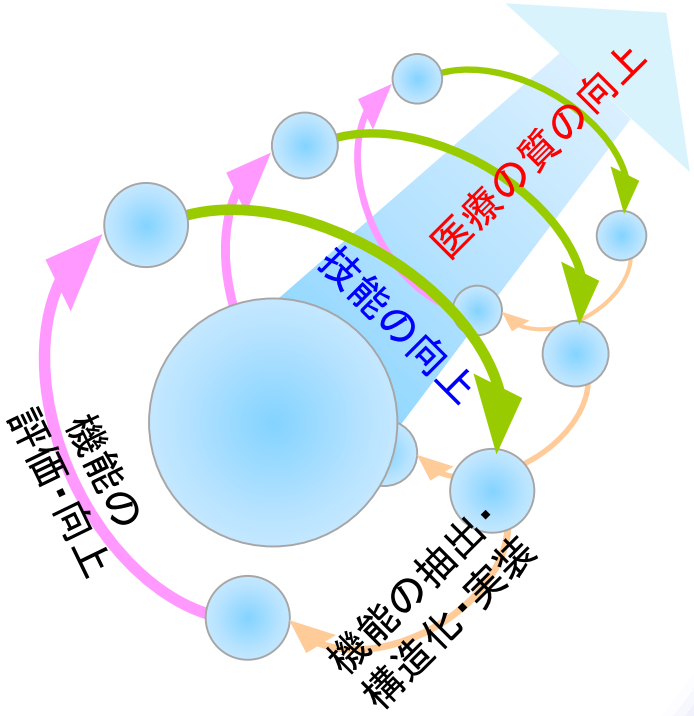
医療ロボット開発のスタンス

医師の技能向上の仕組みを確保しつつ，医デジ化を通して
診断・治療を容易化したり，新たな診断・治療の可能性を開拓

~~ロボットの機能が~~
~~人間にとって代わる~~

医師の技能向上の仕組みを確保しつつ，医デジ化を通して診断・治療を容易化したり，新たな診断・治療の可能性を開拓

医療機器の普及には診断・治療を容易化することが求められる



Me-Dig IT Effect

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

Frans Johansson, “The Medici Effect”, 2004.
- When you step into an intersection of fields, disciplines, or cultures, you can combine existing concepts into a large number of extraordinary new ideas. The name I have given this phenomenon, the Medici Effect, comes from a remarkable burst of creativity in fifteenth-century Italy.

Gutenberg’s press
Everybody can read bibles

http://www.agtc.com.tr/

MEDICAL & BIO ARE NEW DIGITALS !

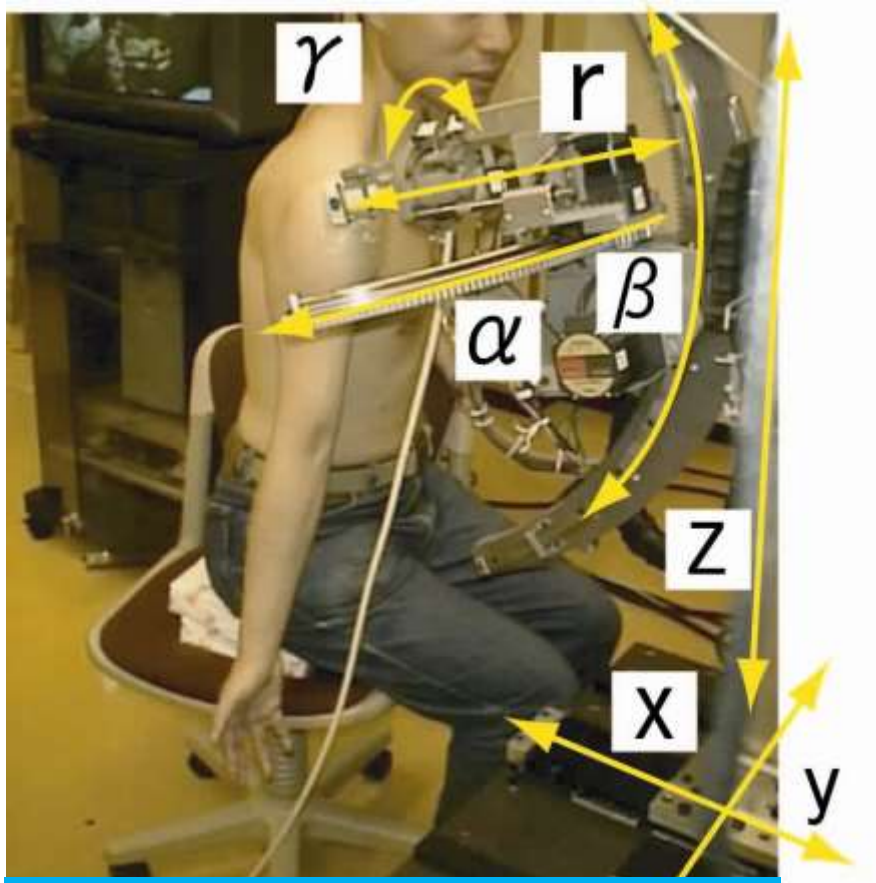
ビル・ゲイツ:『もしいま自分が学生だとしたらバイオを学ぶ』
MITメディアラボ創設者ニコラス・ネグロポンテ:『Bio is new digital.』

Me-Dig IT Effect

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

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

医デジ化技術1（ロボット機構）



高剛性機構

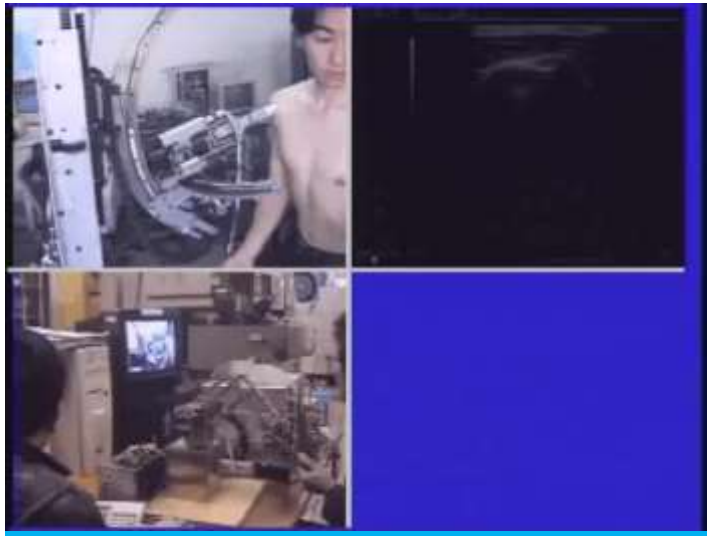
TRO 2009

高剛性防水可視化機構

高速・高精度かつ安全・安心な高剛性機構、だれもが容易に扱える機構

アフォーダンスが重要！

医デジ化技術2（ロボット制御）

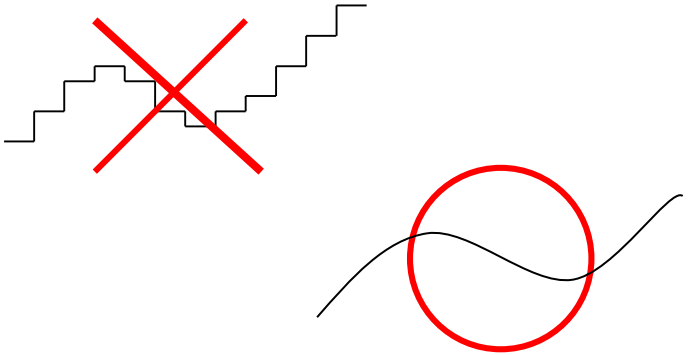


ロボット遠隔操作

TMECH 2008

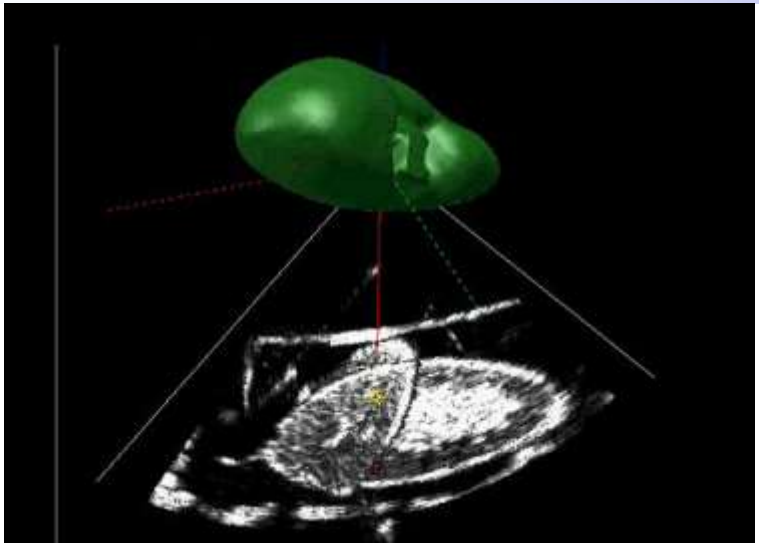
ロボット追従動作

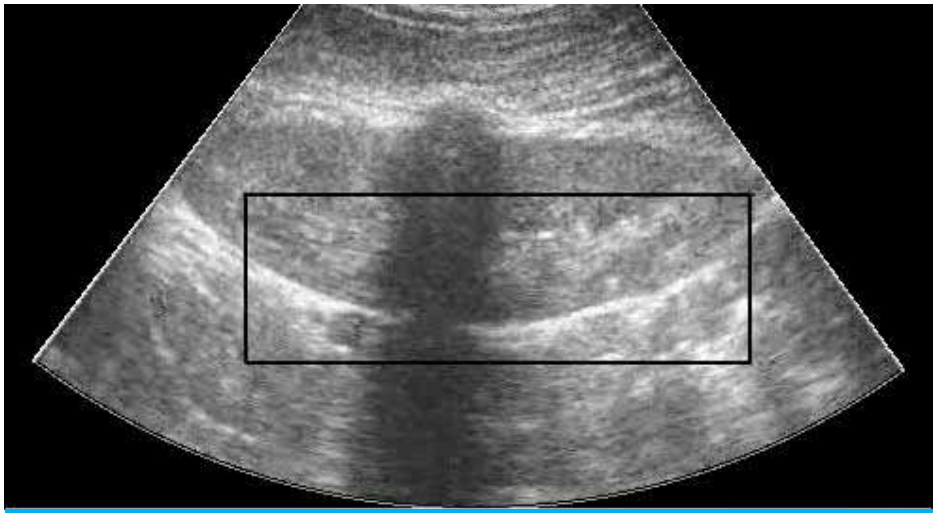
ICRA 2014



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

医デジ化技術3（ロボットビジョン）

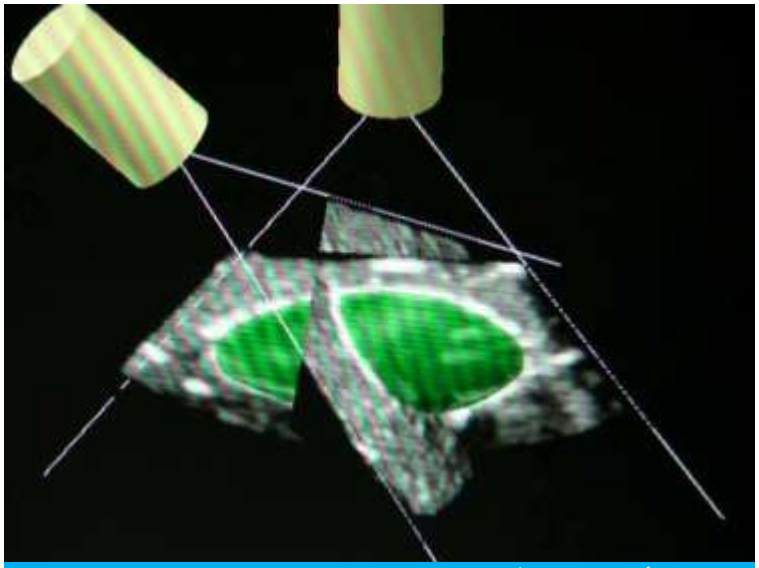




画像処理アルゴリズム

ICRA 2014

生体患部に対する高速・高精度かつロバストなロボットビジョン技術



画像処理アルゴリズム IJMRCAS 2011

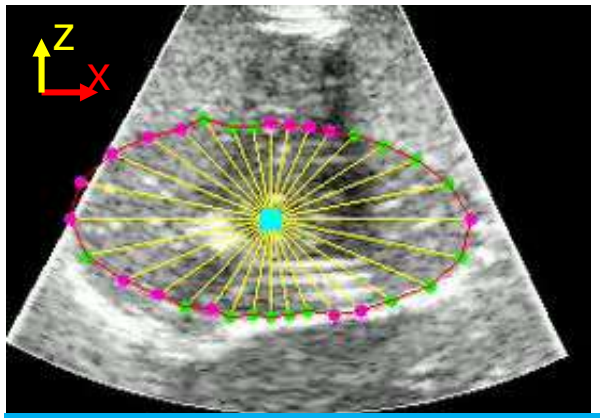
医デジ化技術3（ロボットビジョン）

従来法

提案法

１本の補助線が問題を解決に導く！

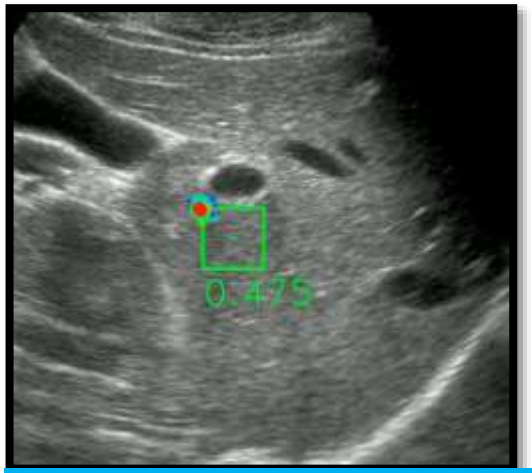
医デジ化技術3（ロボットビジョン）



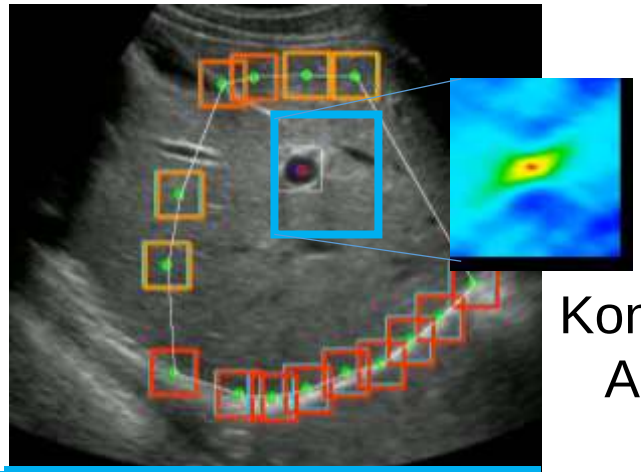
PASM + SNAKE

Kayasuga, et al., ASA-ASJ 2016

Tomita, et al., ASA-ASJ 2016



PF+E



MT+E

Kondo, et al., ASA-ASJ 2016

内容

1. 医デジ化の手法，効果と社会的インパクト

2. 医デジ化による遠隔超音波診断システムの構築法（基礎編）

3. 医デジ化による非侵襲超音波診断・治療統合システムの構築法（応用編）

遠隔超音波診断システムの背景

高齢化社会の到来

→ 医療の高効率化

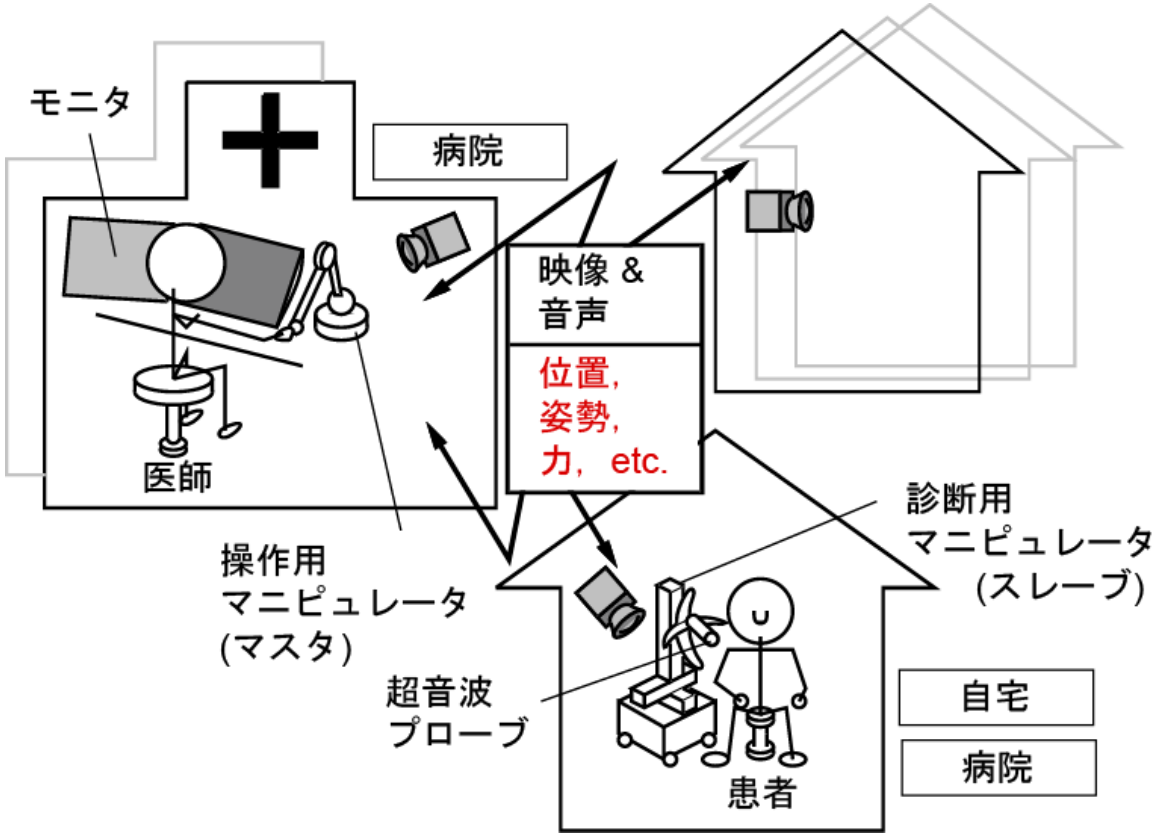
→ 超音波遠隔医療診断システム

↓

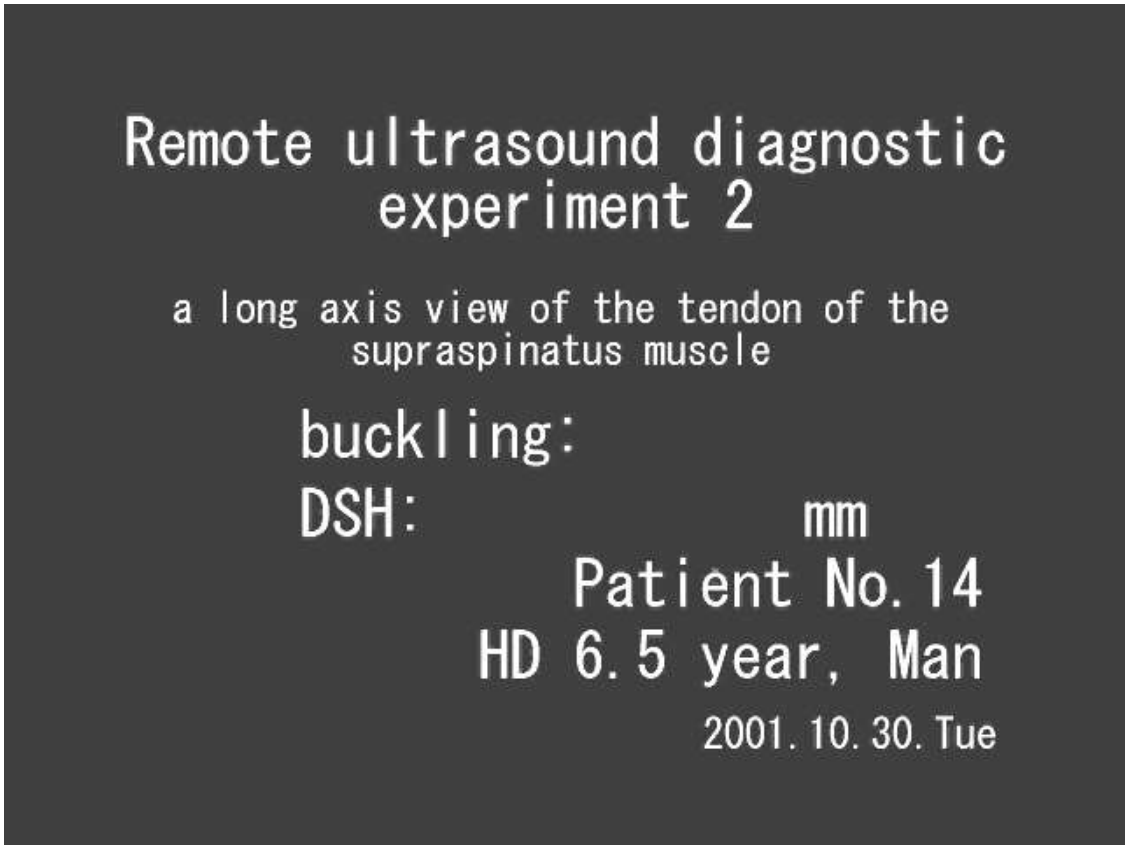
- 医療の地域格差の是正
- 患者および医師の負担軽減

遠隔超音波診断システムの概念

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



遠隔超音波診断システム



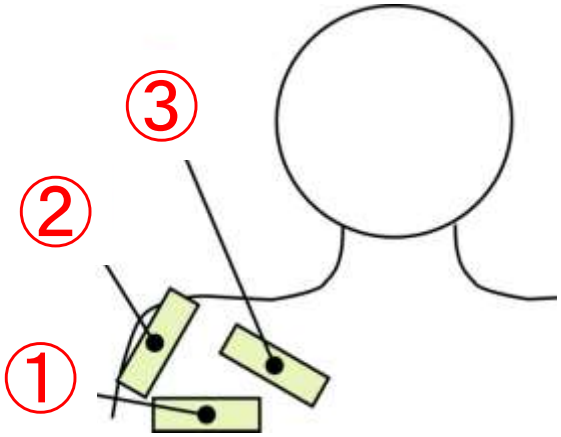
IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS

TROBOT2009,
ICRA 2003

世界初の遠隔超音波臨床診断(2001)

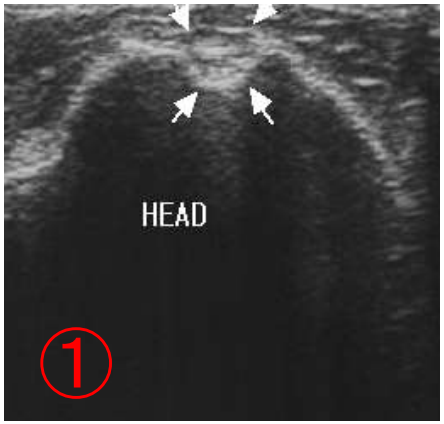
診断支援対象

透析患者の肩関節疾患
（透析肩痛）

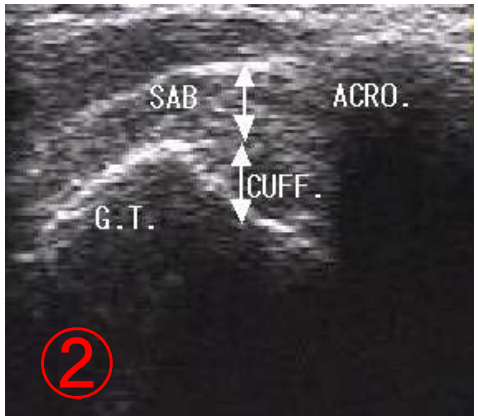


診断画像

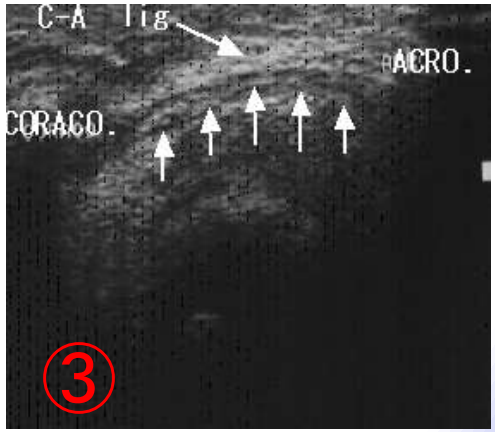
適正化



棘上筋腱短軸像

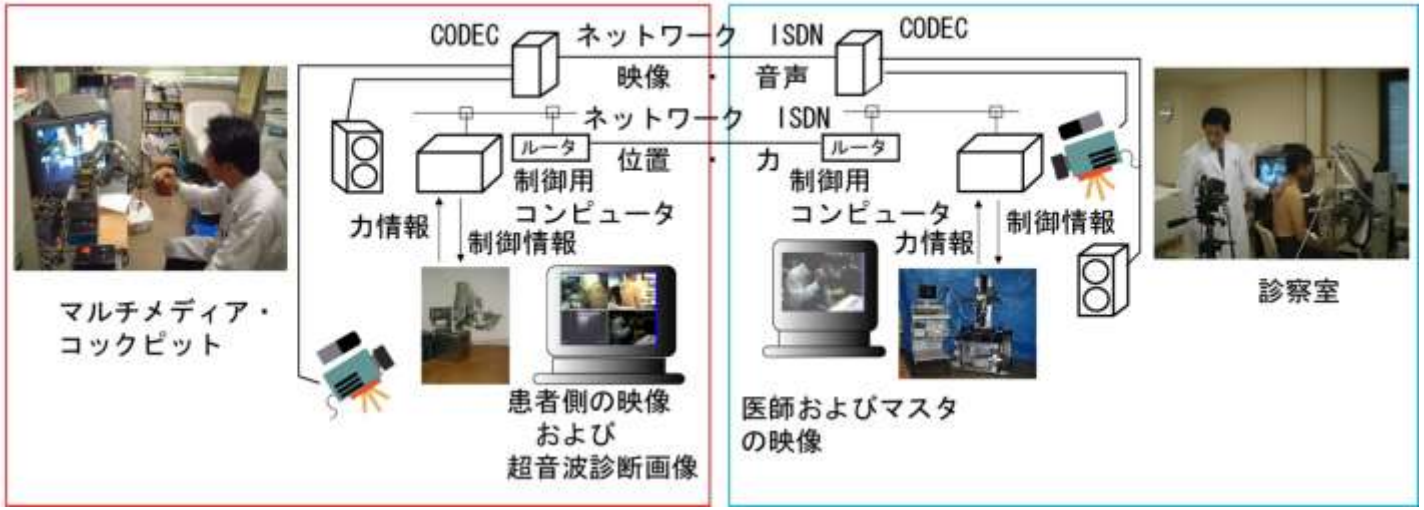


棘上筋腱長軸像



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

研究目的

超音波遠隔医療診断システムの構築法の確立

診断

機能分解・再構築

機能の抽出

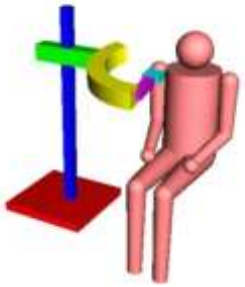
分析・再構築

設計指針の導出

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

機能分解・再構築

診断

機能分解・再構築

機能の抽出

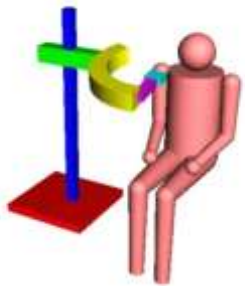
分析・再構築

設計指針の導出

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）

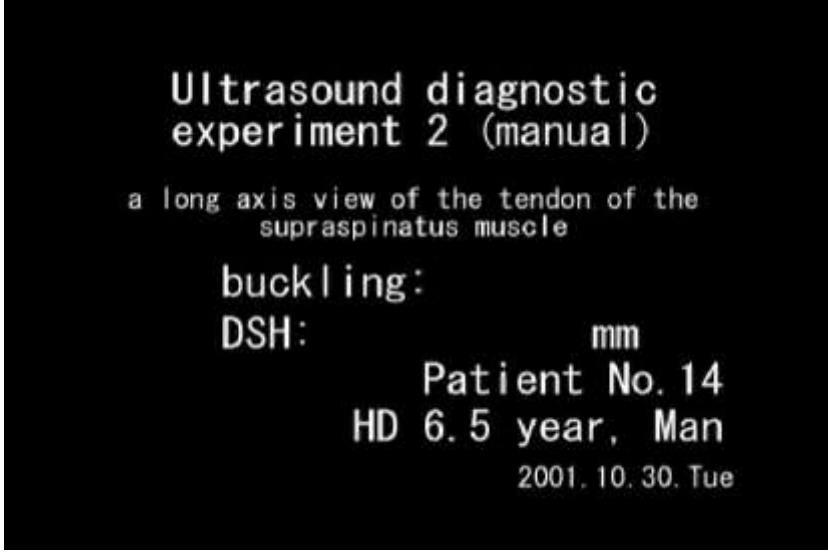
なめらか動作・
高追従機能
（Continuous Path 制御）

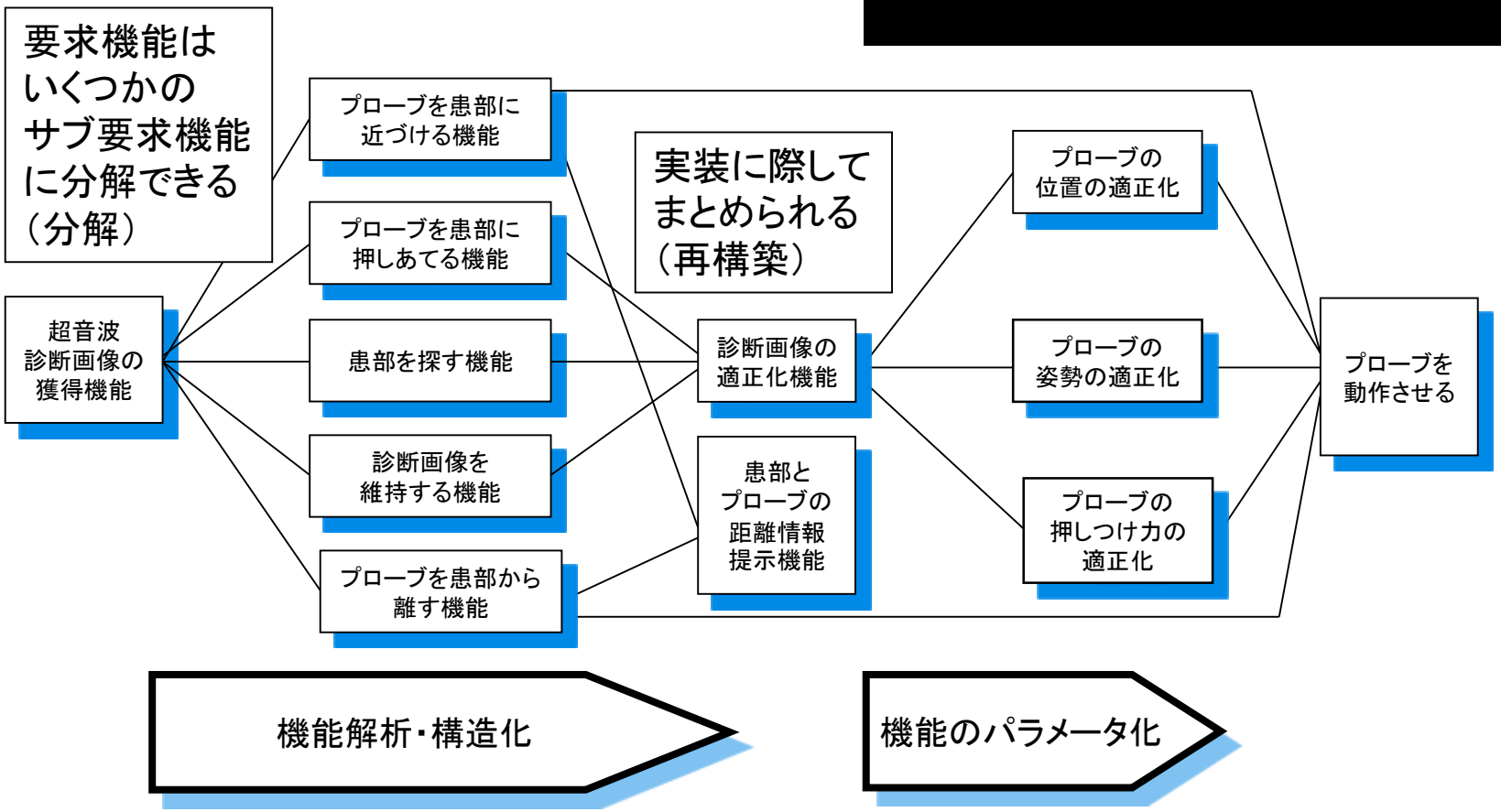


タスクに応じて使いやすくする機能
(制御系の動的切替え)

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


要求機能は
いくつかの
サブ要求機能
に分解できる
（分解）
実装に際して
まとめられる
（再構築）
超音波
診断画像の
獲得機能
プローブを患部に
近づける機能
プローブを患部に
押しあてる機能
患部を探す機能
診断画像を
維持する機能
プローブを患部から
離す機能
診断画像の
適正化機能
患部と
プローブの
距離情報
提示機能
プローブの
位置の適正化
プローブの
姿勢の適正化
プローブの
押しつけ力の
適正化
プローブを
動作させる
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

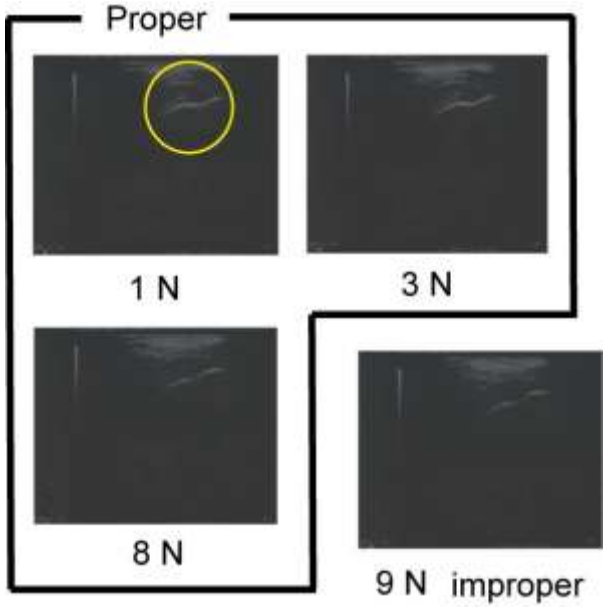
対象：　診断画像②
被験者：　患者３名
　　健常者２名

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！

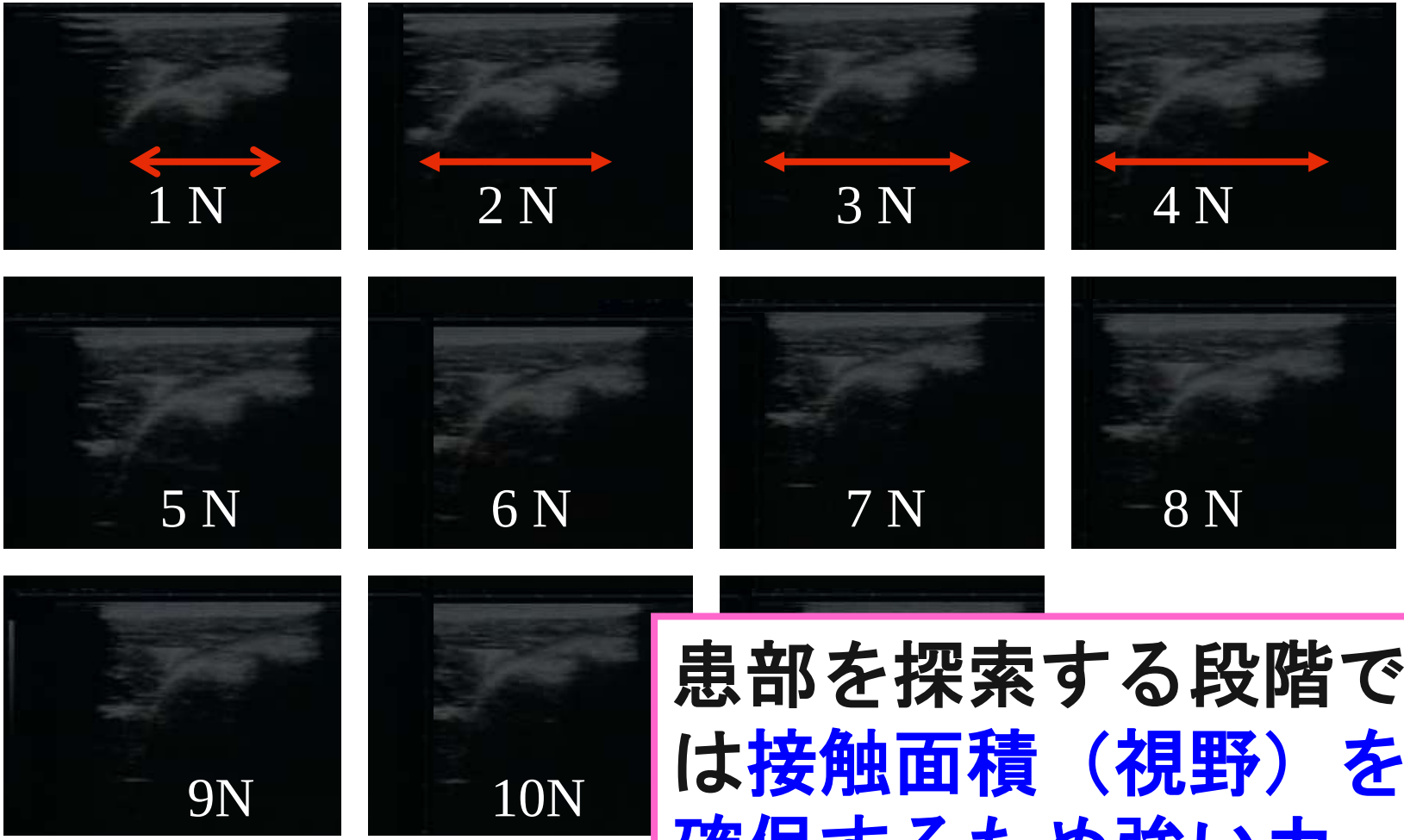


実験結果

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



患部を探索する段階では**接触面積（視野）を確保するため強い力**

プローブの押しつけ力と診断画像

上腕二頭筋長頭腱：４N
棘上筋腱長軸像：８N
烏口肩峰靭帯像：４N
（健常者１名，患者１名の平均）

患部を探索する段階では接触面積を確保するため強い力

上腕二頭筋長頭腱：２N～８N
棘上筋腱長軸像：１N～７N
烏口肩峰靭帯像：１N～１０N
（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同定

機能実装･システムの最適化

機能実装･システムの最適化

診断

機能抽出･
構造化技術

（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）

機能分解･再構築

TRO09

安全･安心
接触動作技術

設計指針
の導出

分析･
再構築

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

機能の
抽出

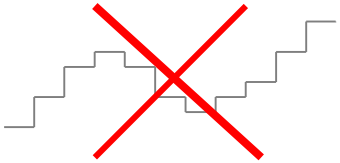
機構設計技術

リアルタイム
超音波医用画像
処理技術

医デジ化のためのコア基盤技術

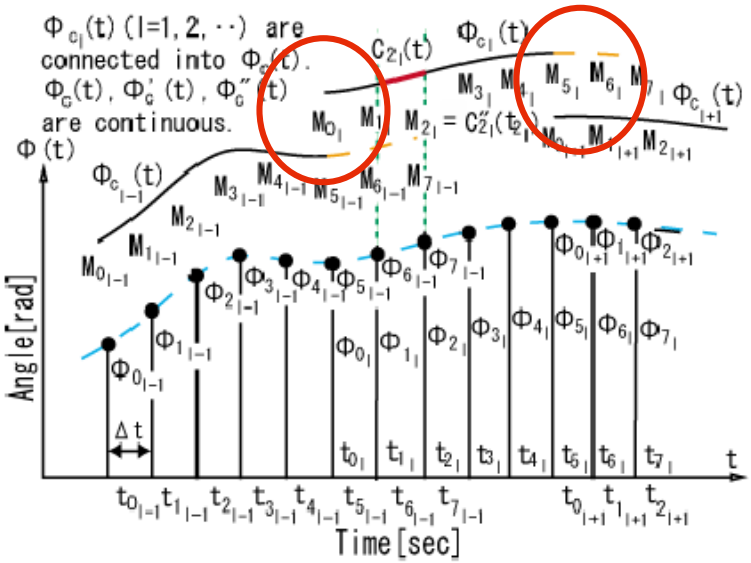
遠隔 Continuous Path 制御

問題点



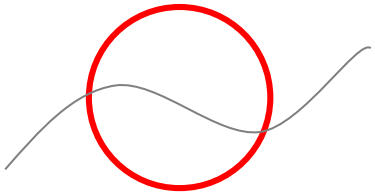
伝送されたデータは連続的でない！

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を実現することが困難



Technique: 遠隔 Continuous Path 制御

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



なめらかで
高追従な動作

TMECH08

IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS

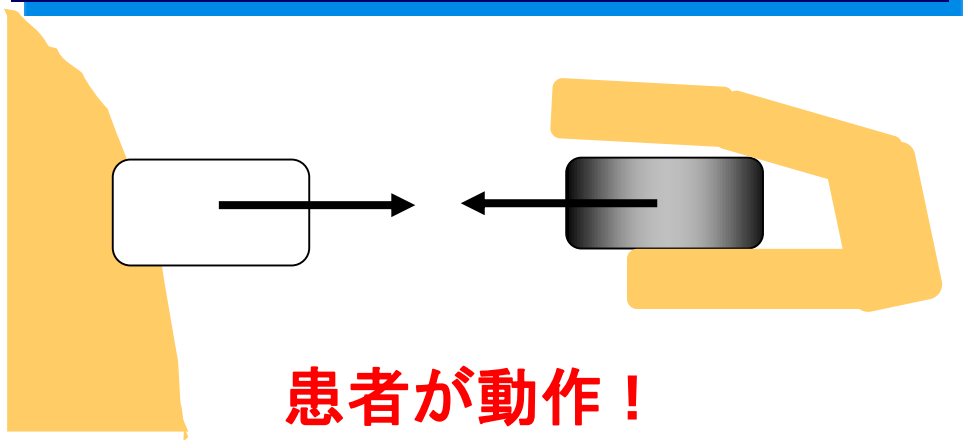
遠隔インピーダンス制御

問題点

時間おくれの存在下で患者が動作
（従来型の遠隔操作では静的な対象）

遠隔での安定接触維持が困難

Technique: 遠隔インピーダンス制御



患者が動作！

安全・安心な
安定接触動作

①接触状態を提示するための
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操作容易化のための
インピーダンス調整

IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS TRO09

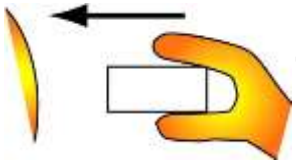
Not using
control regulation

even if Fs > Fm
force = Fm − Fs

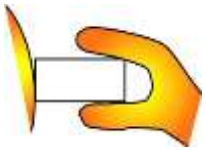
制御系の動的切替え

問題点　**制御とタスクのミスマッチ**

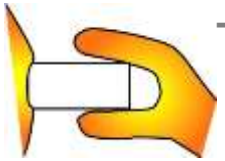
従来型の制御においては，
作業開始から終了まで同一の制御系



Task 1)　患部へのアプローチ



Task 2)　患部を探索



Task 3)　診断画像の適正化

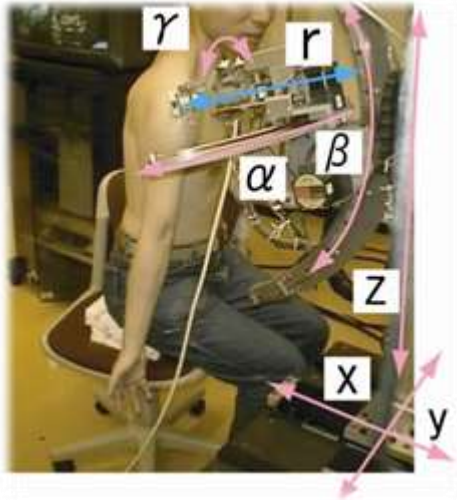
タスクにより最適な制御系は異なる

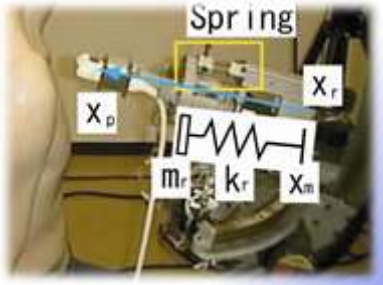
Technique: 制御系の動的切替え

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制御系を動的に切替える

JRM04，TRO09





精密工学会春季大会
ベストプレゼンテーション賞受賞

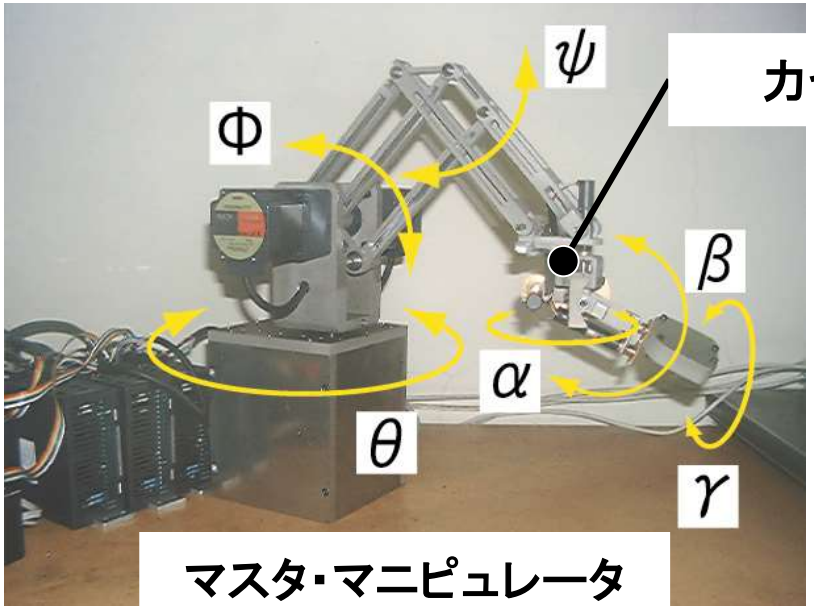
ロボット機構における機能実装

位置・姿勢・押しつけ力の適正化機能

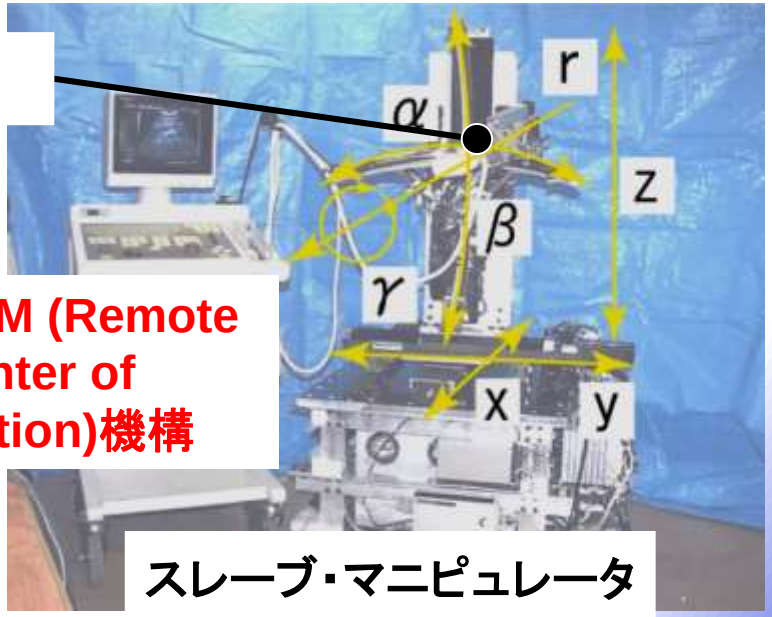
①直観的にわかりやすく誤差が蓄積しない自由度構成
②位置・姿勢を正確に実現できる剛性の高い機構
③患部との接触状態を維持・医師に提示するための力センサ・先端冗長機構

センサにもとづいてロボットを動作

力を受けても変形しないガイド機構



カセンサ



RCM (Remote Center of Motion)機構

IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS TRO09

IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS TMECH08

内容

1. 医デジ化の手法，効果と社会的インパクト

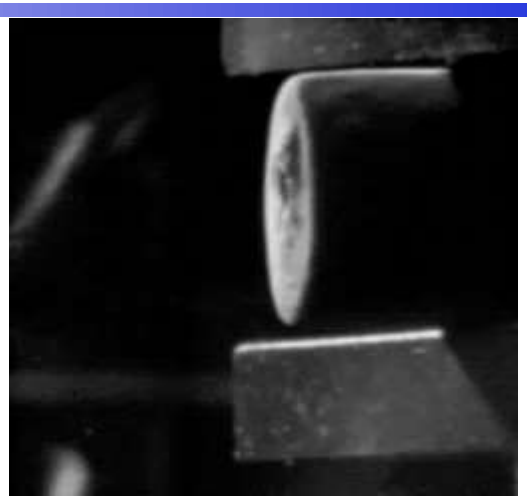
2. 医デジ化による遠隔超音波診断システムの構築法（基礎編）

3. 医デジ化による非侵襲超音波診断・治療統合システムの構築法（応用編）

強力集束超音波治療

HIFU (High Intensity Focused Ultrasound)

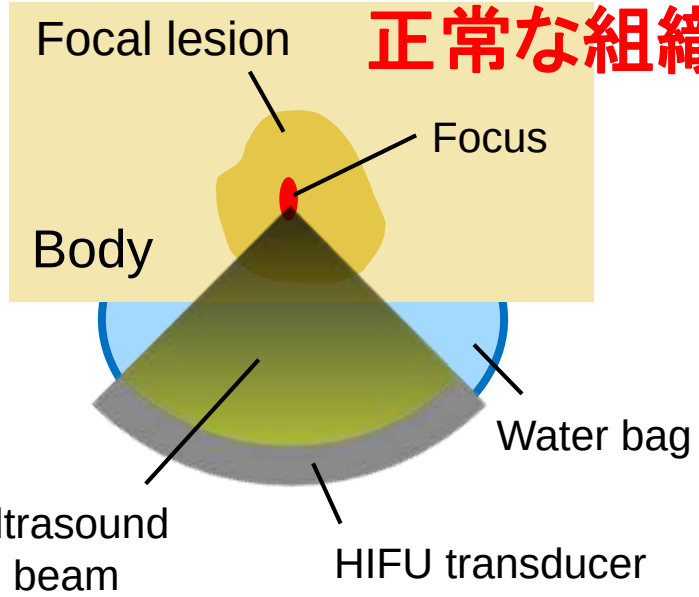
体表を傷つけない非侵襲手術



Y. Matsumoto, et. al.

結石の破砕

正常な組織を傷害

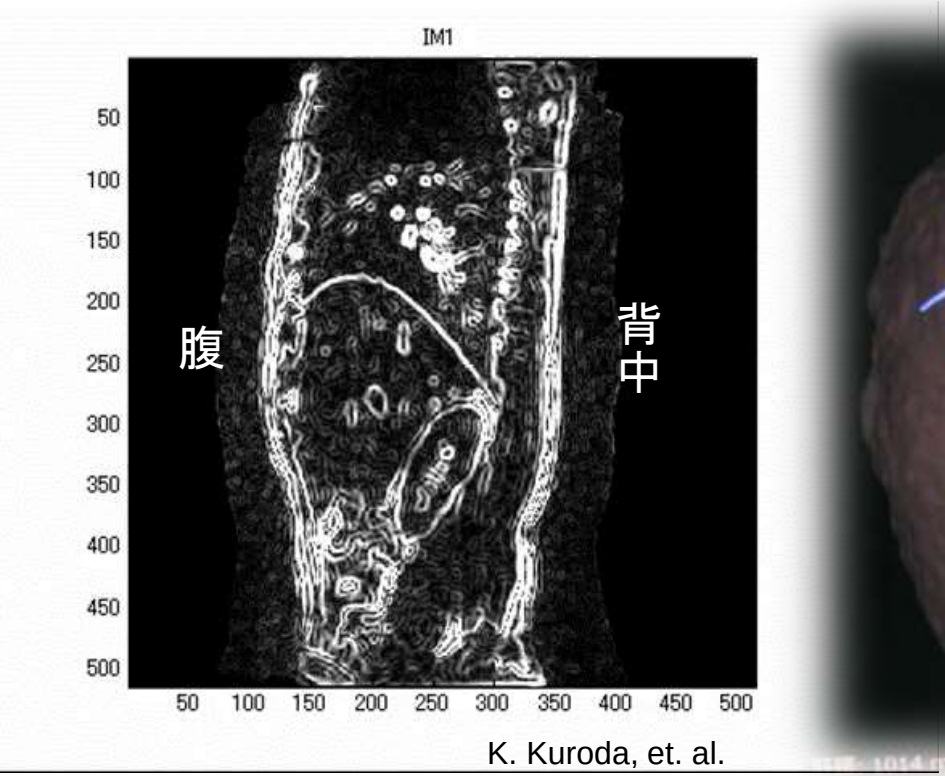


ExAblate 2000 (GE Healthcare)

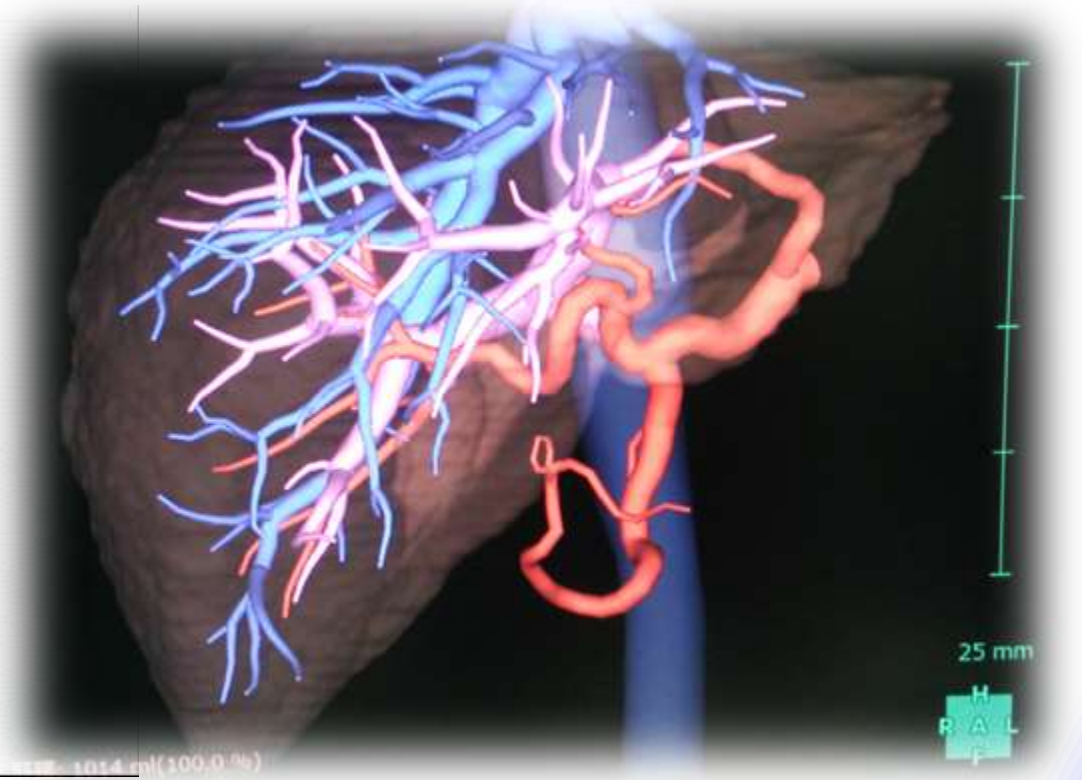
JC Haifu System (Chongqing Haifu Medical Technology Co. Ltd.)

商用システム

要求精度



K. Kuroda, et. al.



運動する臓器（MR，側面）

肝臓の血管（CT）

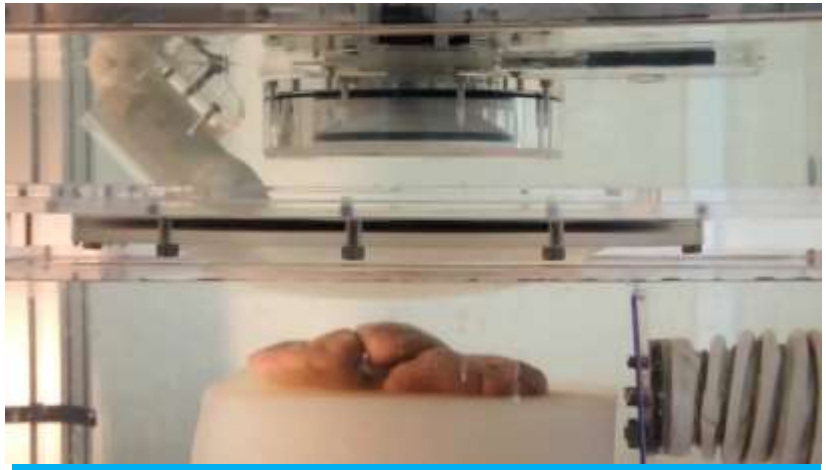
主要血管，横隔膜，消化管を傷つけないために
必要な1mm の要求精度

非侵襲超音波診断治療統合システム

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，結石の破砕を，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）



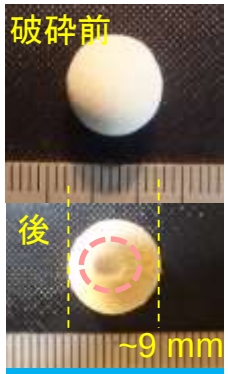
動物摘出腎中の結石追従・破砕

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

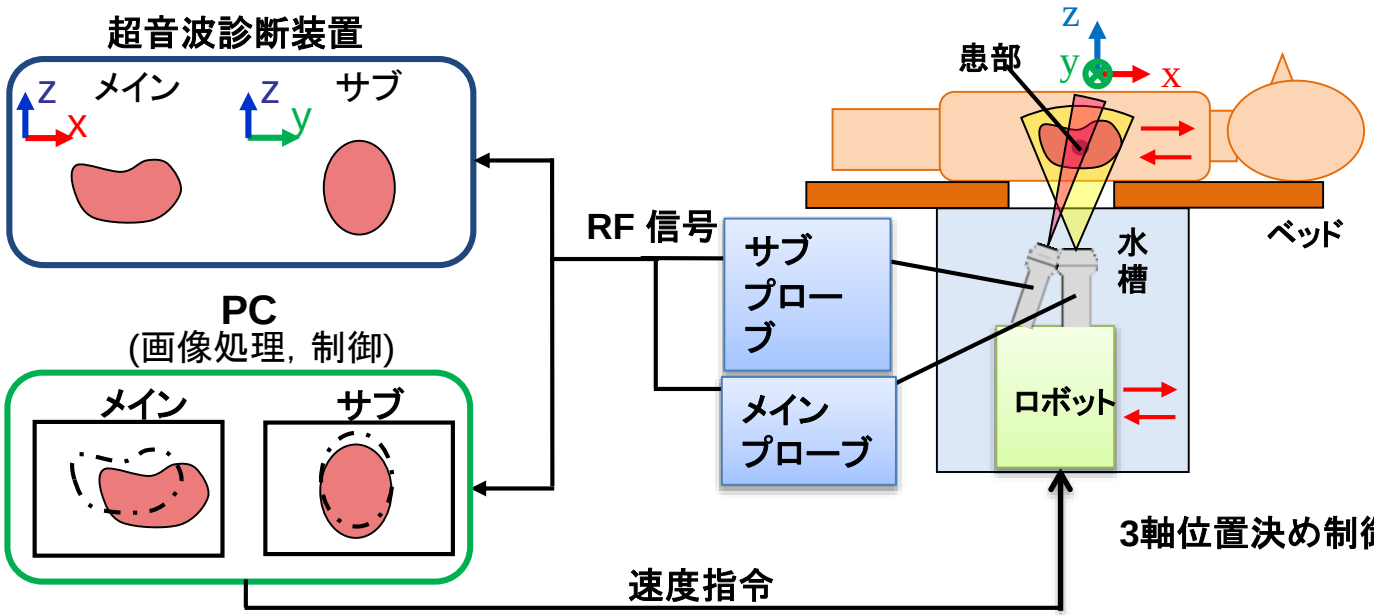


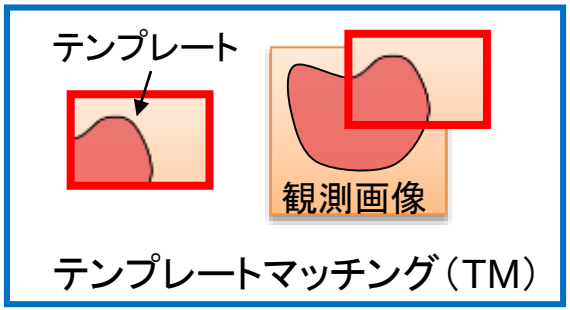
破砕結果（結石）

IROS 2007, 09, 14, 15, ICRA 2011, 14

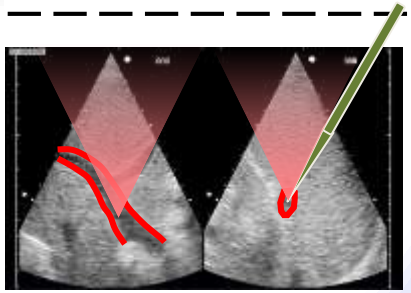
非侵襲超音波診断治療統合システム

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



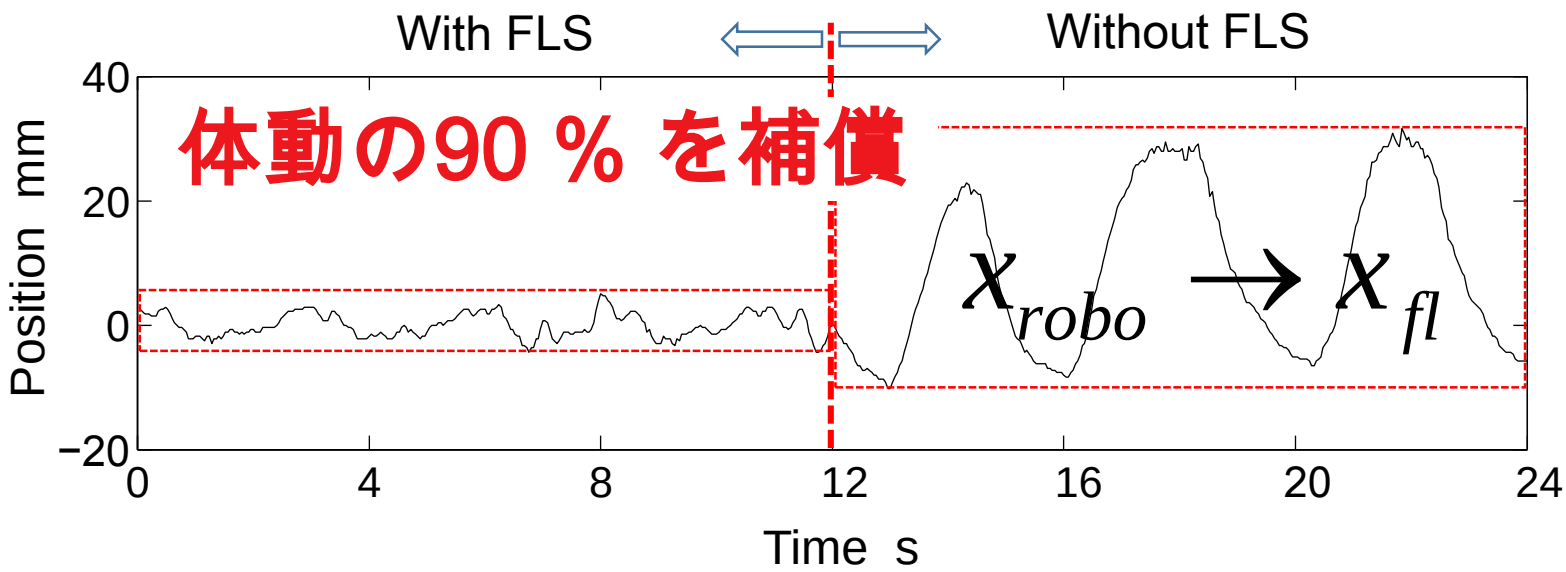


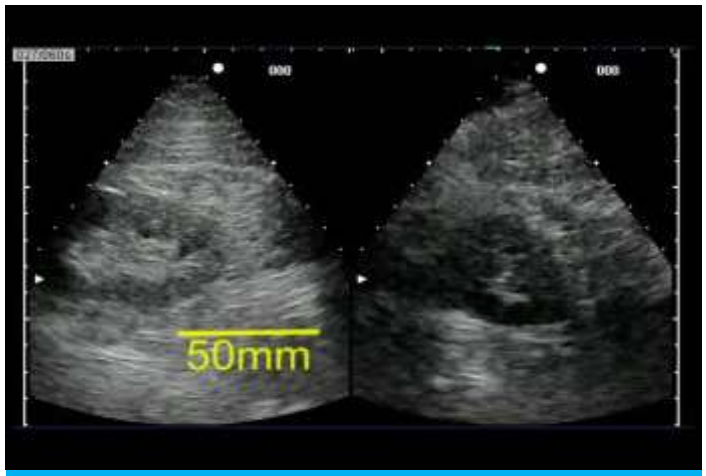
腎臓追従実験の様子



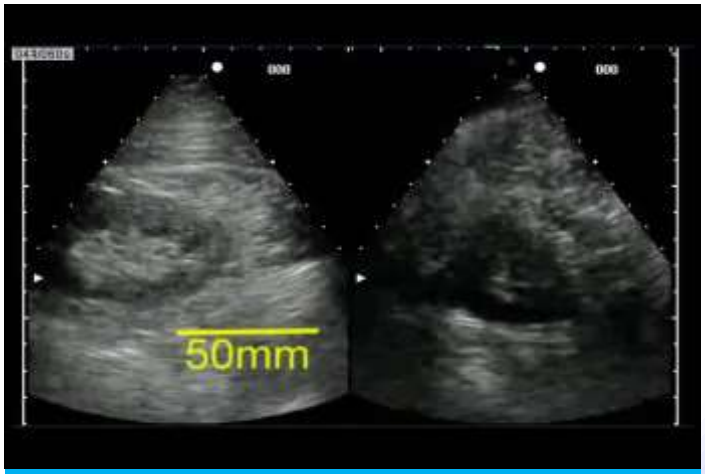
静止状態で診断・治療

腎臓の体動補償能力





With servoing



Without servoing

医療ロボットによる体動補償研究

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 c
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 Compu
(**IJMRCAS**) **2014**

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

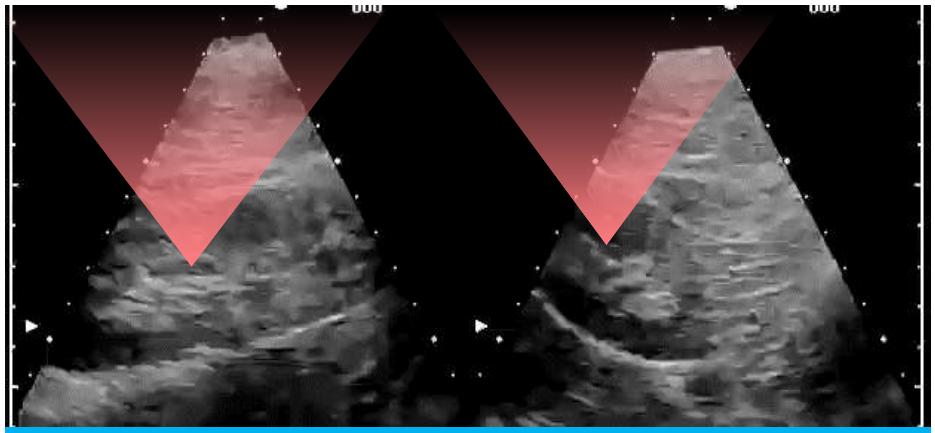
(31) Lee D, Koizumi N, Ota K, et al. Ultrasound-based vi
lithotripsy. In IEEE/RSJ International Conference on Inte
(**IROS2007**).

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

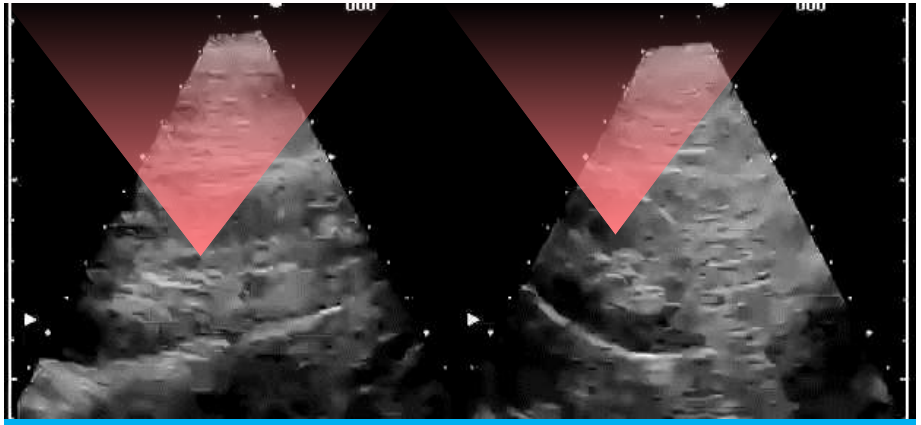
(34) Koizumi N, Seo J, Suzuki Y, et al. A control framew
ultrasound theragnostic system. In IEEE/RSJ Interantion
Robots and Systems (**IROS2009**).

(35) Seo J, Koizumi N, Funamoto T, et al. Visual servoin
therapeutic HIFU system by coagulated lesion tracking:
Robot Comput Assist Surg (**IJMRCAS**) **2011**.

腎臓の体動補償



Without servoing



With servoing

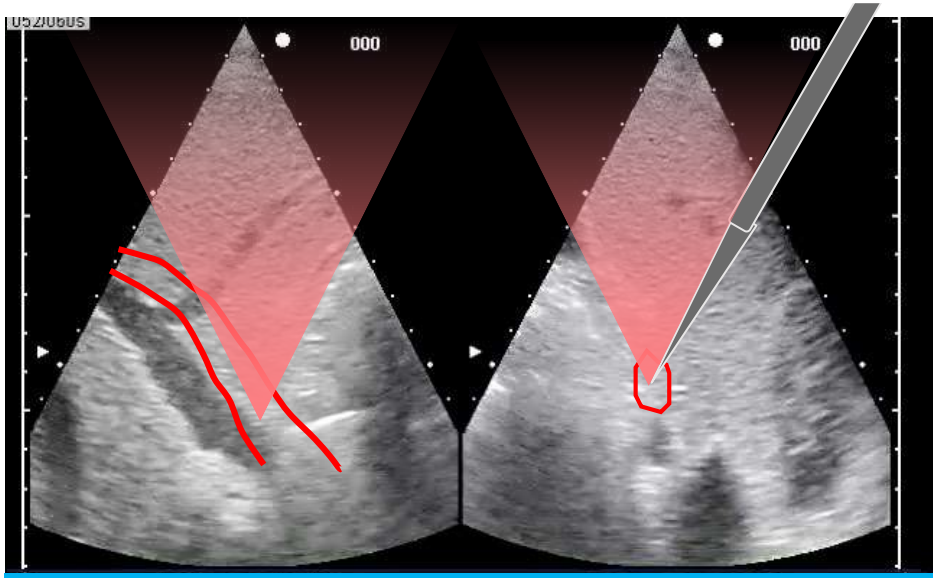
Kidney motion compensation

体動の90 %を補償，1mmの精度を実現

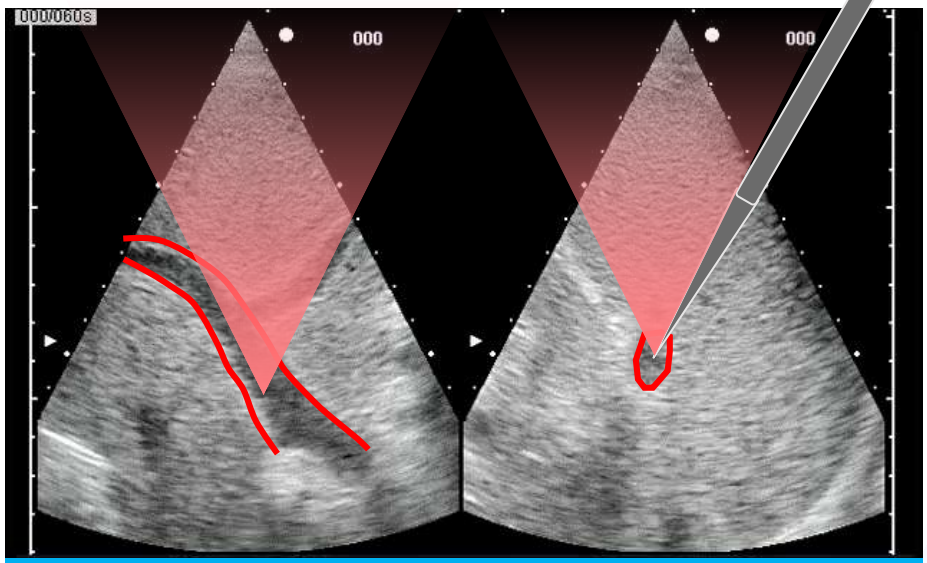
肝臓の体動補償

1.3 mm の精度を実現

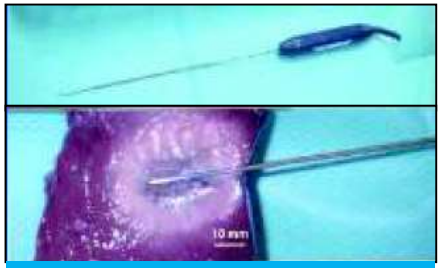
静的な世界で診断・治療



Without servoing



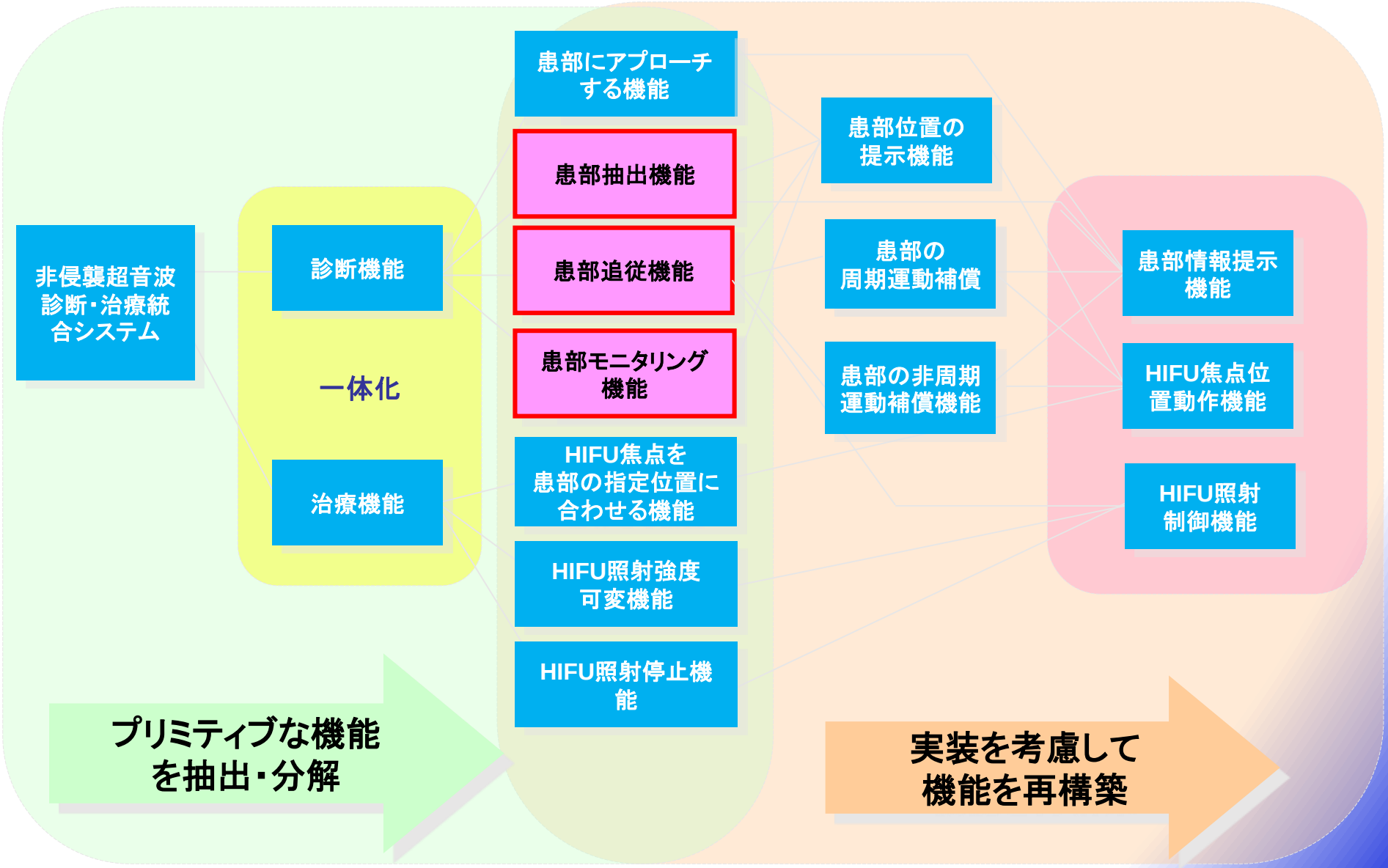
With servoing



RFA治療

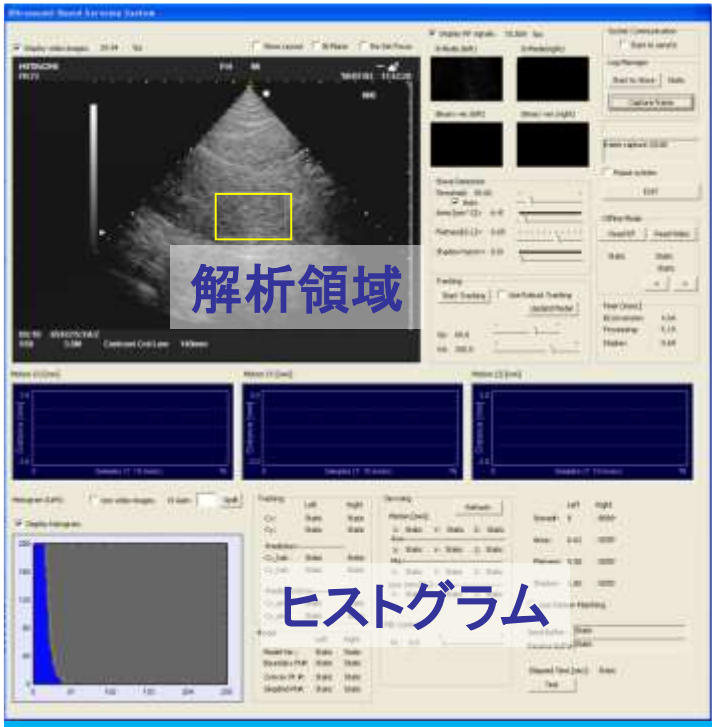
超音波ガイド下の
診断・治療を容易化
装置の普及を促進

医デジ化のための機能構造化

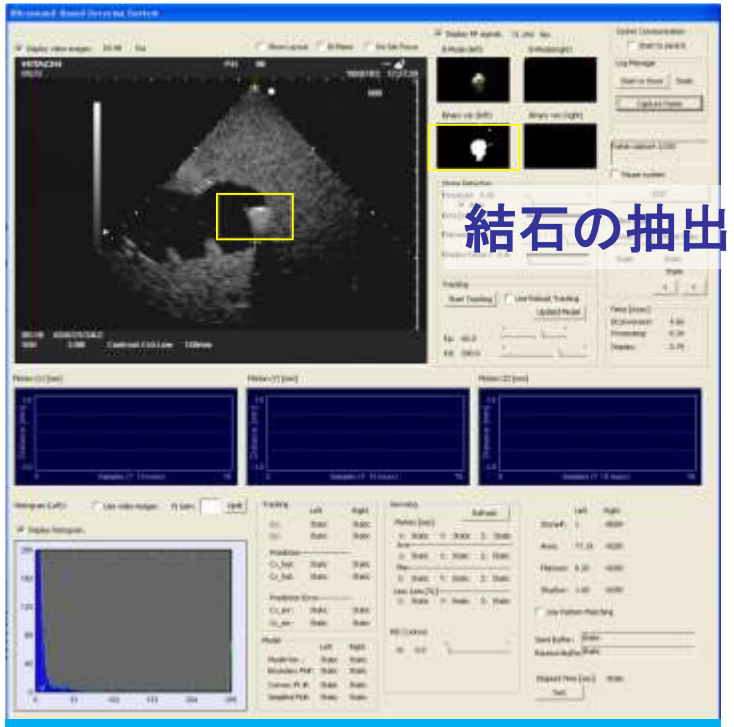


患部の自動／半自動抽出（例：結石）

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



結石なし



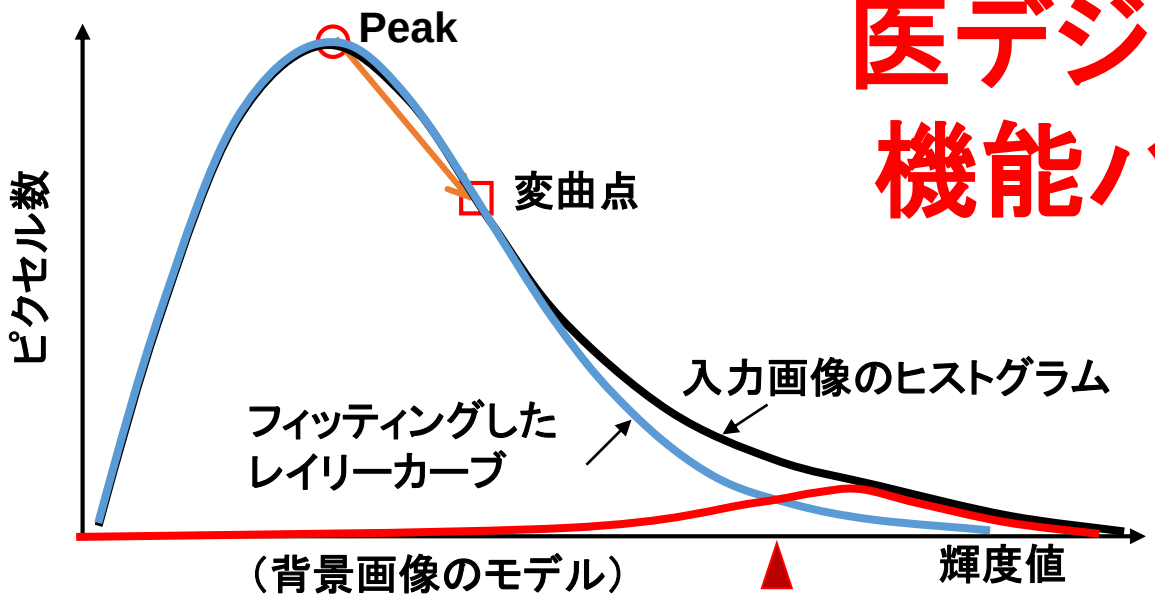
結石あり

音響インピーダンスが周囲の生体組織と比較して高い

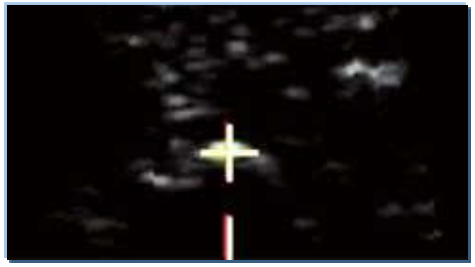
IROS07

患部の自動／半自動抽出（例：結石）

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



医デジ化のための機能パラメータ化



動物摘出腎中のモデル結石抽出

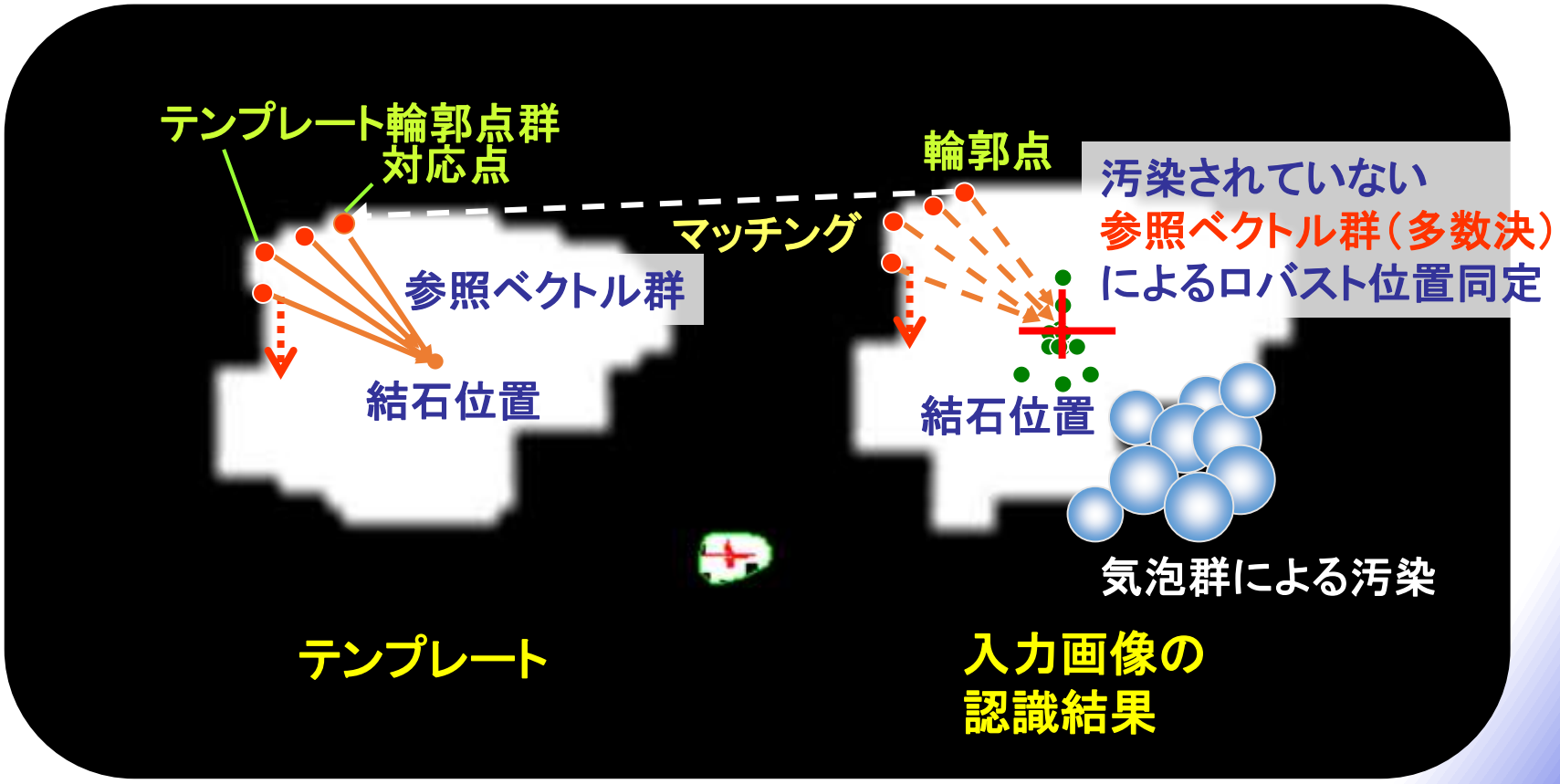
IROS07

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： $f(x \mid \sigma, S, x_0) = \frac{x - x_0}{\sigma^2} \exp \frac{-(x - x_0)^2}{2S^2\sigma^2}$

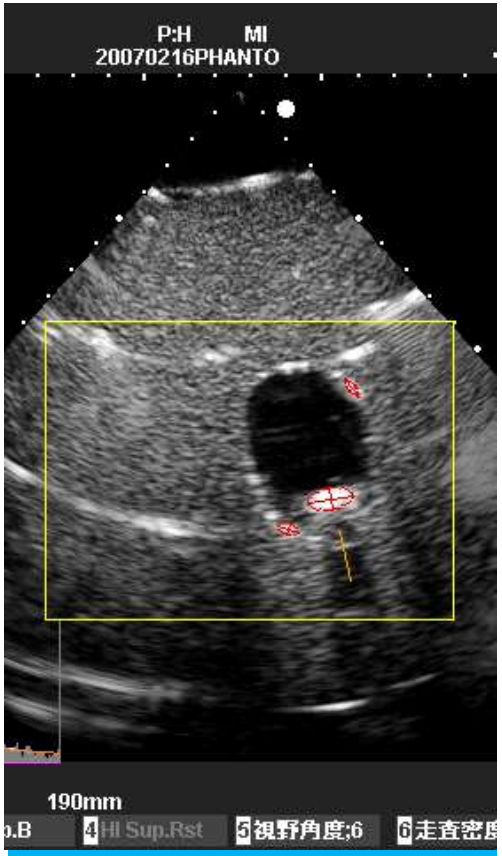
患部の自動／半自動抽出（例：結石）

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

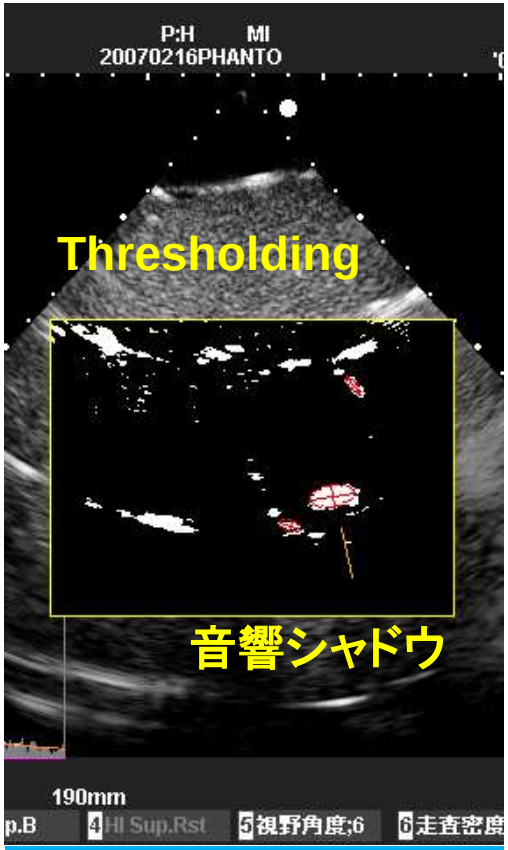


患部の自動／半自動抽出（例：結石）

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



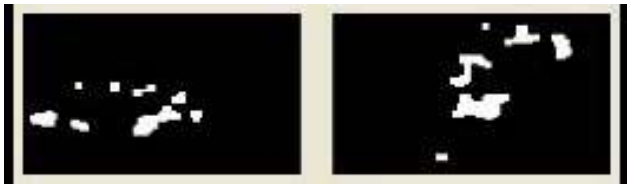
入力画像



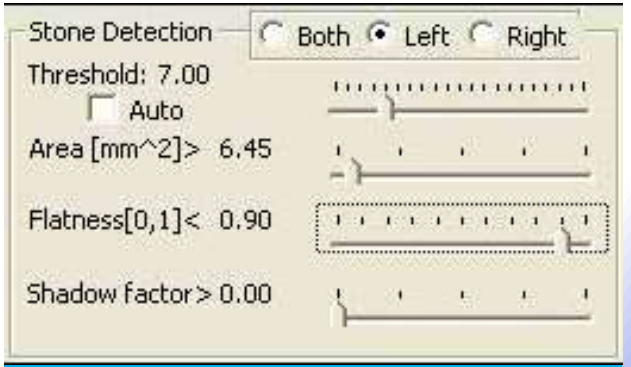
解析画像

超音波画像

超音波画像（2値化）



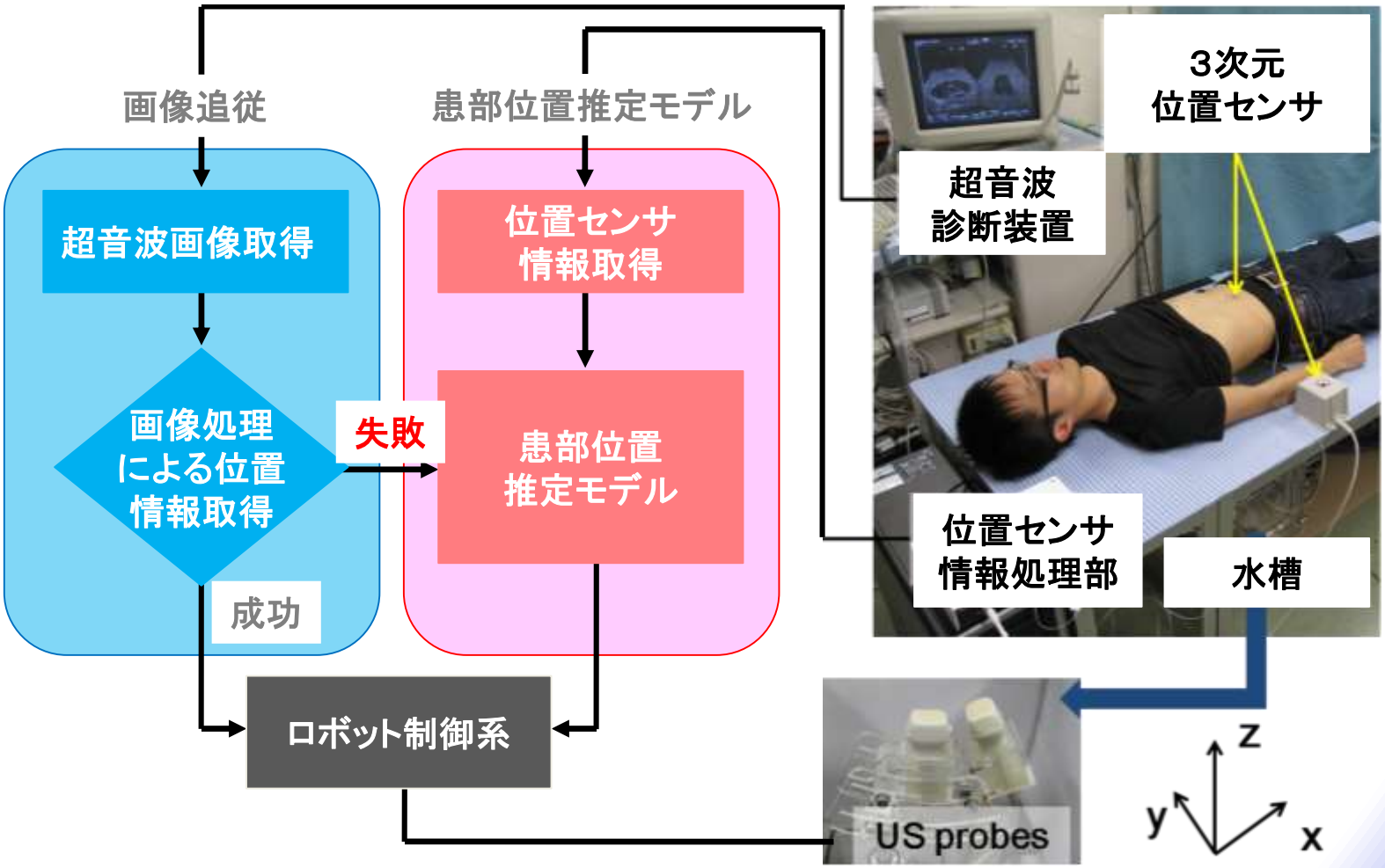
結石抽出パラメータ調整



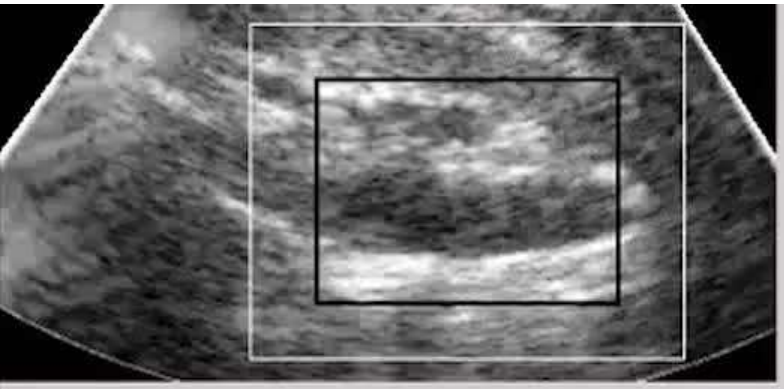
動物摘出腎中の
モデル結石抽出

IROS07

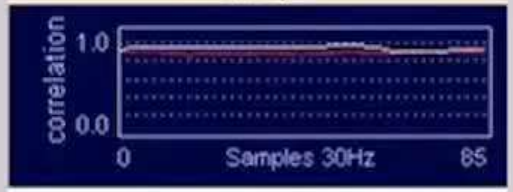
追従失敗時のロバスト追従復帰



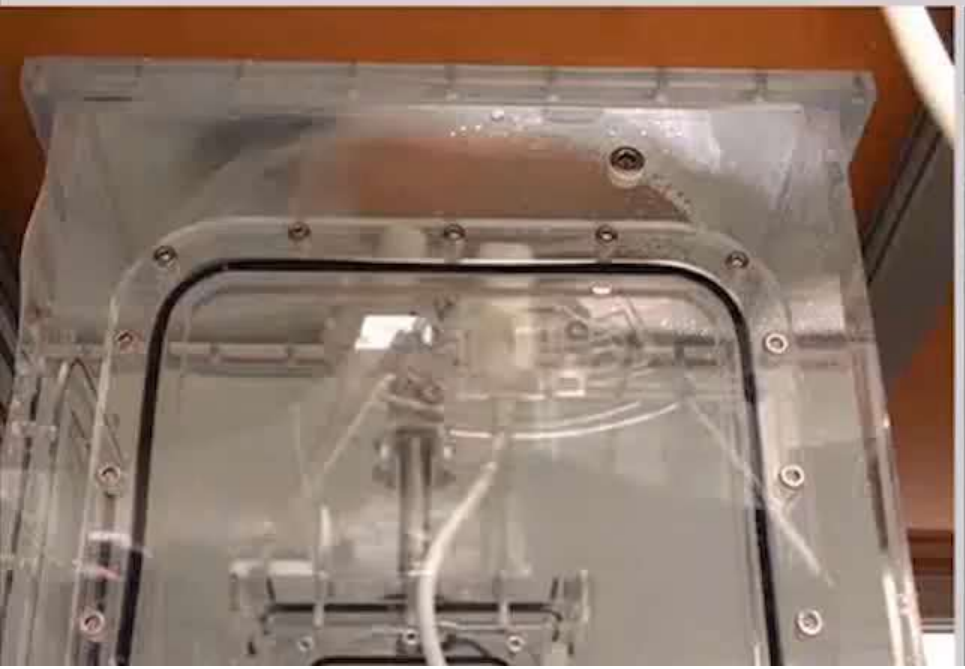
追従失敗時のロバスト追従復帰



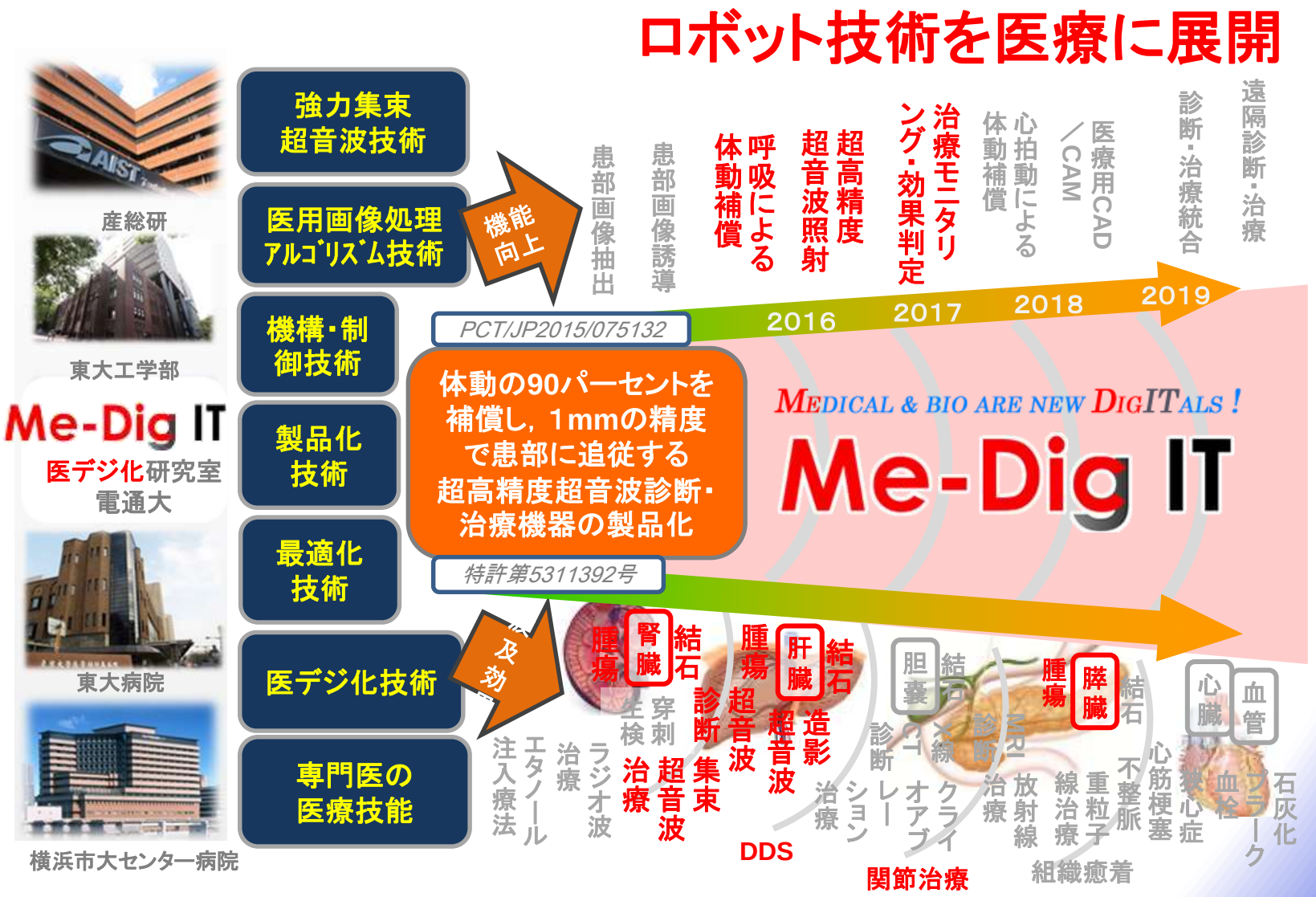
Skin y



Cross-Correlation



研究開発プロジェクト・ロードマップ



The University of Electro Communications, Tokyo

東京大学
The University of Tokyo

RIKEN

医療はあたらしいデジタルだ!

医デジ化による超高精度な診断・治療の実現

お力添えをお願いします！

国立大学法人　電気通信大学
機械知能システム学専攻　医療ロボティクス研究室
URL: http://www.medigit.mi.uec.ac.jp/

MEDICAL & BIO ARE NEW DIGITALS !
Me-Dig IT

NML Mitsuishi Sugita Lab.

TSBMI Translational Systems Biology and Medicine Initiative

GMSI Global Center of Excellence for Mechanical Systems Innovation

Koizumi Lab