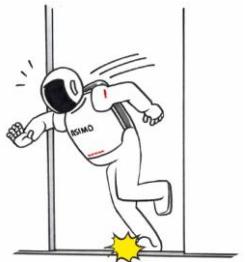


可変剛性アクチュエータ実現のための EAP積層に関する共同研究報告

F5K 2BL 織田 豊生



人共存環境や災害環境においては、ロボットが意図しない衝突を許容することが不可欠である



ロボットの**柔軟性**が必要



部位が限定された
コンプライアンスではカバーできない

外乱吸収能力を高めるためには
関節柔軟性が必須である



おっとっと



コップ作業



人共存環境や災害環境において、
確実に移動や作業を遂行しなければならない



ロボットの**精密性(位置決め精度の高さ)**が必要



精密な動作を実現するためには
関節剛性を高めてモデル誤差を含む
外乱を抑制しなければいけない



硬いサス



俊敏な動き

“柔軟性”と“精密性(位置決め精度の高さ)”という2つの相反する要求を
ロボットは満たすべきである



状況によって関節剛性を変更できる



関節可変剛性アクチュエータ

目的

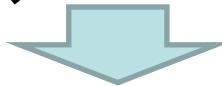
ロボットの意図しない衝突を許容して、かつ
精密な作業を実施できる関節可変剛性アクチュエータを実現する

項目	理由
剛性範囲が広いこと	柔軟性 \leftrightarrow 精密性(位置決め精度の高さ)の両立
瞬時に剛性を変更できること	ロボットの躊躇データや、手先衝突の試験より50ms以内に衝突力が最大となるため
重量が軽いこと	質量が重いと衝突エネルギーが増大するため
最大変位量を大きくとれること	吸収できる衝突エネルギーを多くするため

以上の項目を元に、次世代ロボットの満たすべき仕様を検討する

<作業時の外界との衝突時を例に仕様化>

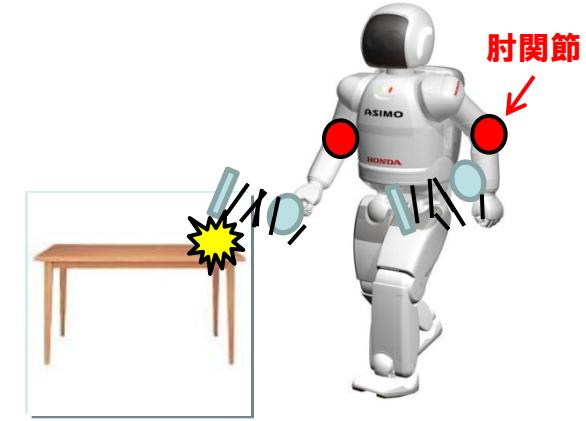
肘関節を想定して、ロボットが出しうる手先最大速度
で机に衝突する状況で、



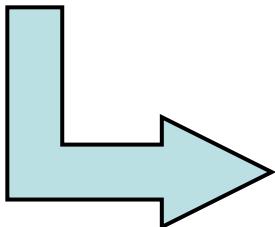
肘関節は、衝撃吸収のためバネ機構と高応答なトルク制御
が実装されていると仮定する。

<要件>

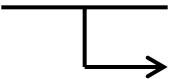
- 衝撃吸収時には破壊せずに、通常時には
従来のASIMO相当なサーボ剛性を維持できること
- 接触センサ、画像などのセンサ情報を用いて瞬時に剛性を変更できること



[必要な要件]



関節剛性範囲	200 – 800 Nm/rad
最大バネ変位	7 deg
応答速度	50ms以下
許容トルク	80Nm
駆動トルク	40Nm
デバイス重量	200g以下(関節でAsimo同等)

- **機構的実現法**
 - てこの原理を用いた方法
- **機能材料的実現法**
 - MR粘弹性エラストマ
 - EAP(ElectroActivePolymer)デバイス

→ 電場応答性高分子

てこの原理を用いた方法 (Italian Institute of Technology)

<概要>

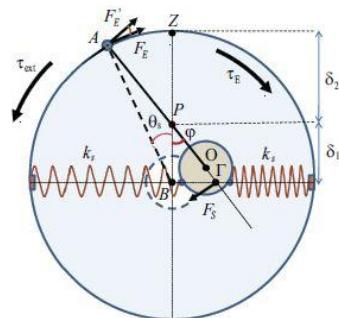
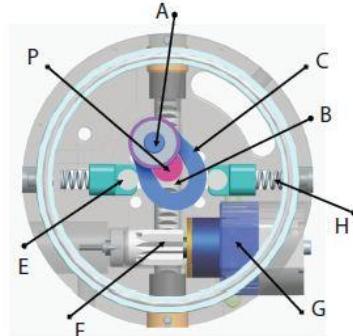
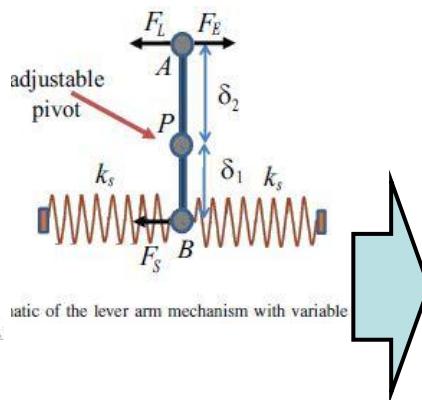
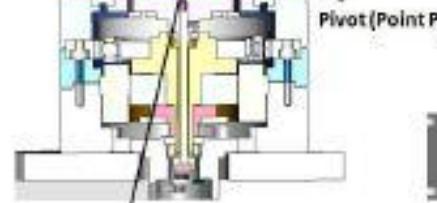


Fig. 7. Schematic of the ComnAct-VSA functional principle.



Joint between the link and the lever arm (Point A)

Variable stiffness module



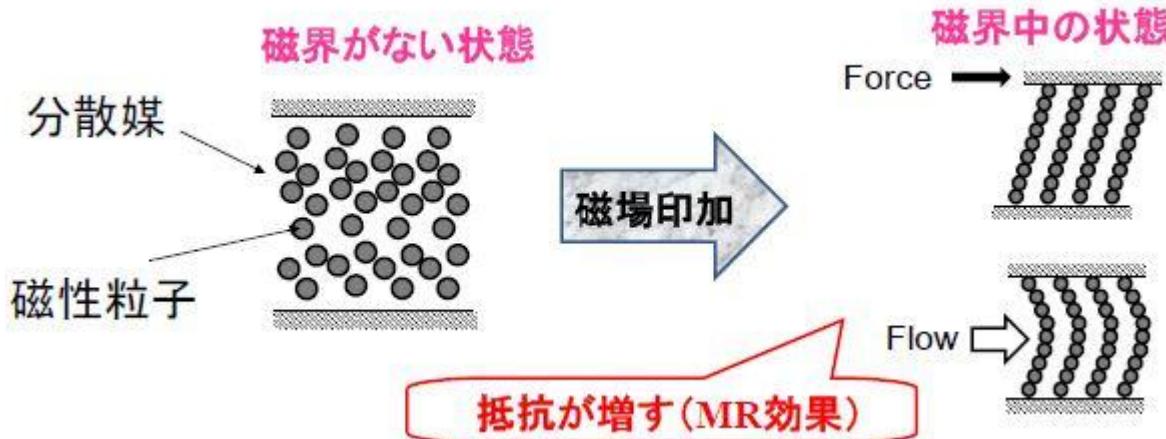
<利点>

- ・再現性が良いこと
- ・剛性設計し易い
- ・先例が多くあり、応用展開が容易

<欠点>

- ・機械時定数が大きく応答が遅い
- ・構成が複雑である
- ・機械構成部品が多く重くなる(1.5kg程度)
- ・容積が大きい
- ・大きさ変更があまりできない
- ・エネルギー効率が低い

MRエラストマを用いた方法



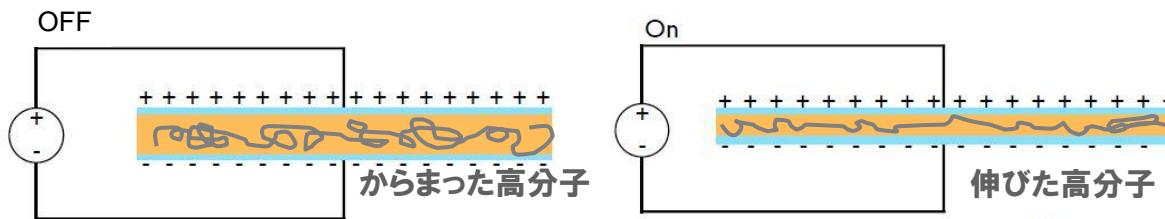
利点

適用が容易
フレームを要しない
剛性範囲広い

欠点

反応速度と剛性
がトレードオフ

EAPを用いた方法



ON

$$p = \epsilon_0 \epsilon_r E^2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r V^2}{t^2}$$

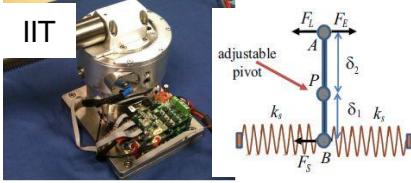
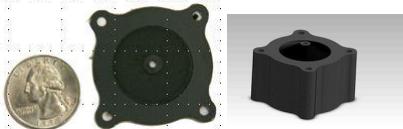
Maxwell-Wagner(界面分極)効果

利点

反応が速い
剛性範囲広い
軽い

欠点

高電圧

	関節剛性範囲 (200 – 800 Nm/rad)	応答速度 (50ms以下)	最大バネ変位 (7 deg)	デバイス重量 (200g以下)
機構的実現方法 (てこの原理) 				
機能材料方法 (MRE) 金沢工業大学 	975-1949 N/m			
機能材料方法 (EAP)  Stanford			8mm/80μm	

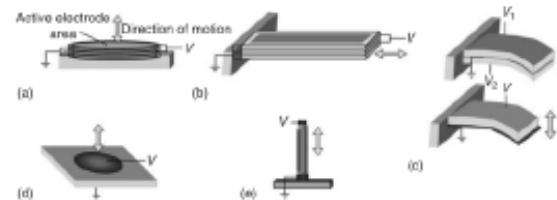
ロボット関節への適用例はないが、EAPは大きな可能性を持っている

EAPとは～Stanford EAPの特徴について

Electroactive Polymers

- Principle of Operation

- Pelrine and Kornbluh (2000) [SRI]



- Geometry and Design

- Choi (2003)

- Rosenthal (2000)

[SRI]

- Modeling

- Wissler (2005)

[EMPA ETH]

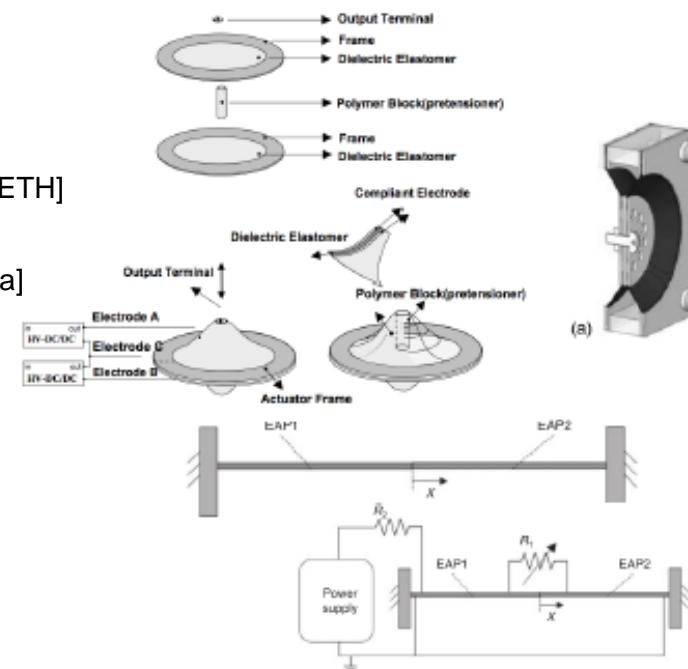
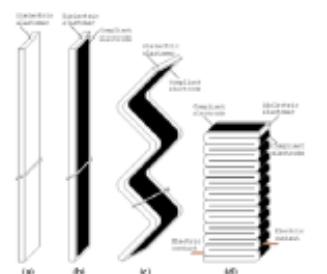
- Scalable Manufacturing

- Carpi (2007), Kovacs (2007) [Uni.Pisa]

- Tunable Suspensions

- Pelrine (2008)

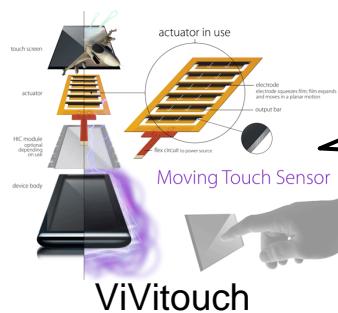
[SRI]



SRIの特許で記載されている構成や活用法のいろいろ

2000年辺りからEAP研究が始まりこれまで動作原理～作成方法まで幅広く研究されてきたが、可変インピーダンスは2008年以降である

AMI (Bayer)



圧電素子と比較した売りは、
分解能の高い力覚表現(4倍)
比較にならない薄さ(.5mm)
従来より70%効率高い

ハプティクス製品で従来デバイスと比較すると
EAPのポテンシャルは極めて高いので今後普及すると思われる

EMPA(ETH Zurich)

一枚50μm



400stack

33%収縮
出力100N



シリコン系の材料なども研究例としてはあるが、アプリケーション研究の多くは3MVHB4910を使用したものが多く、EAPは**材料研究的要素**がそれほど高くない

研究

AMIは、SRIのスピンオフだがBayerに買収
Bayerは、EUのEAPコミュニティ紙で
ポリウレタン、シリコン系の素材を用いて
バルブ、ポンプ、位置決めなどのアプリケー
ションのための研究を実施していると紹介
されていた

研究

DE-EAPの特性解析から研究を始め、その結果から
シートを引き伸ばして厚さを50μmにして積層した
アクチュエータを開発した。このアクチュエータは33%
収縮できて、100Nぐらい出せるが動画で見る限り
動きはそれほど速くない。
その他論文で、シリコン系の材料を用いたり、
またアームレスリングやエアシップなどのアプリケーション
研究を実施している。最近法人化。

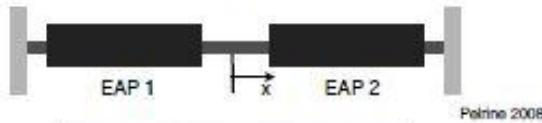
100を超える積層で大きな力を出せる
アクチュエータ研究例もある

<剛性範囲の広さ>
<最大変位量の大きさ>

Tunable Stiffness

Principle of Operation

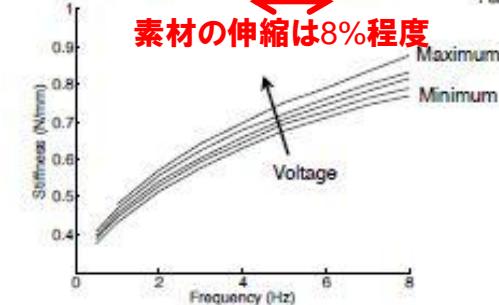
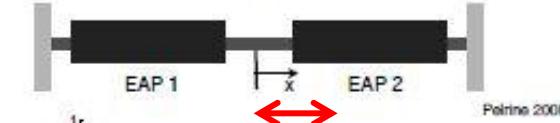
To change stiffness, use antagonistic co-contraction



Tunable Stiffness

Principle of Operation

To change stiffness, use antagonistic co-contraction



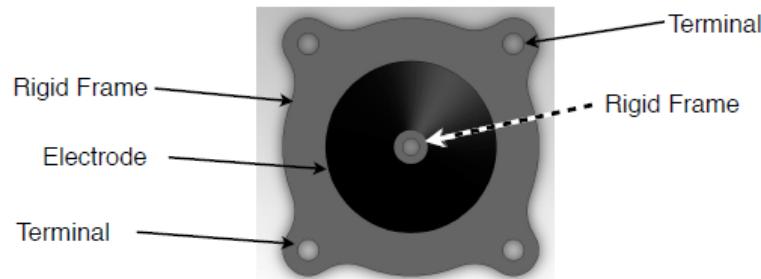
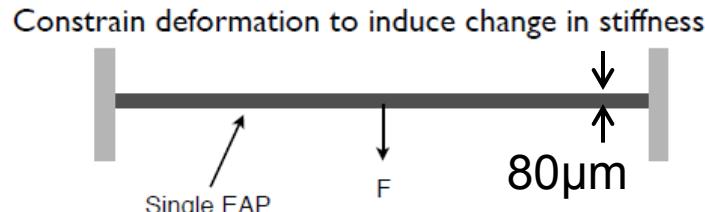
Slide by Sanjay Dastoor(stanford)

関節剛性の変化量は10%程度で最大変位も小さく適用不可

<最大変位量>

Tunable Stiffness

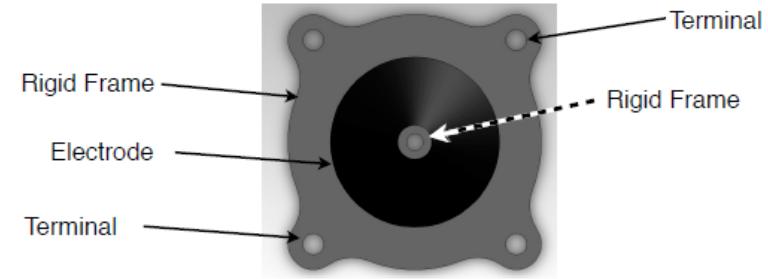
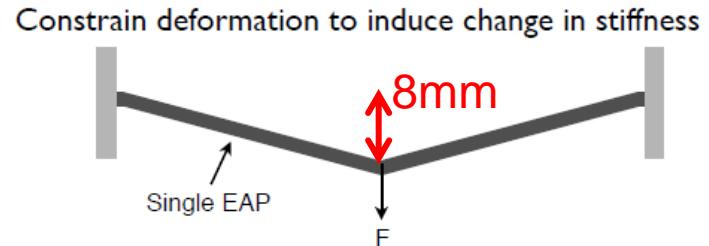
Principle of Operation



49

Tunable Stiffness

Principle of Operation

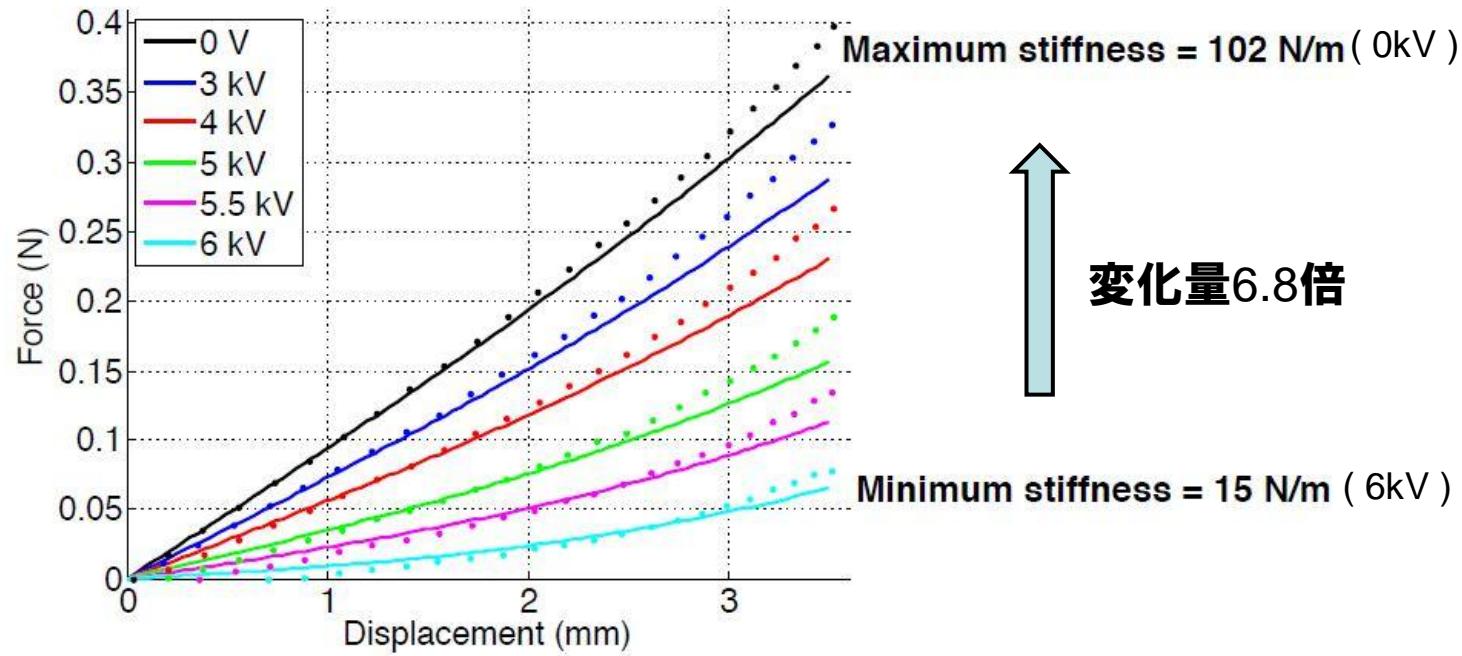


50

Slide by Sanjay Dastoor(stanford)

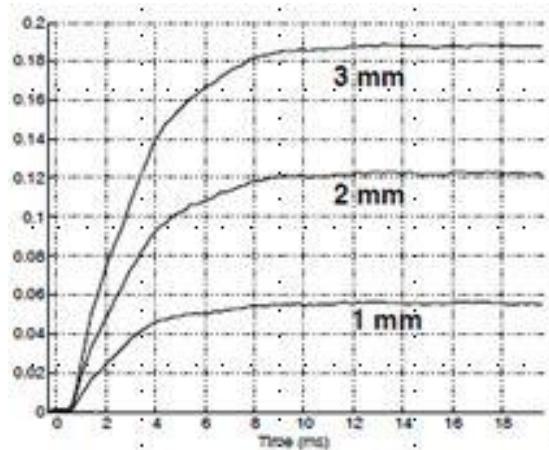
弓矢と同じ構造を採用して、**大きな変位**を実現した

<剛性範囲の広さ>



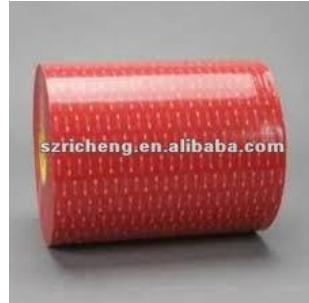
弓矢と同じ構造を採用して、非常に大きな剛性幅を実現できた

<瞬時に剛性を変更できること>



10ms以下で目標剛性に収束する

<重量が軽いこと(EAPの特徴)>



3M VHB4910
1g/cm³

<<

アルミ
2.7g/cm³

チタン
4g/cm³

- 可変粘性にも同デバイスで対応できる
EAPに出入りする電荷を制御することによって、剛性と独立に制御

項目	仕様	Stanford EAP
剛性範囲が広いこと	200-800Nm/rad	10倍程度範囲
瞬時に剛性を変更できること	50ms	10ms以内
重量が軽いこと	デバイス 200g	アクリル系素材使用のため軽い
最大変位量を大きくとれること	7deg	弓矢構造のため80μmで8mm変位

我々の仕様を満たす可能性があることを再確認した

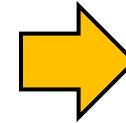
現状のデバイスを単純に積層して課題達成しようとすると



TABLE I: Test diaphragm properties

Mass (g)	1.6
Dimensions (mm)	38 x 38 x 0.7
Inner diameter (mm)	5.5
Outer diameter (mm)	25
Displacement range (mm)	8
Stiffness range over 1 mm (N/m)	15 - 102
Stiffness range over 8 mm (N/m)	32 - 117

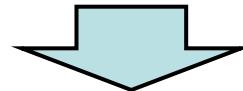
大きなギャップ



積層枚数は数百～数千に及ぶ

(単層構造の見直しを実施しても、数百程度の積層は最低必要と考える)

- 正しく駆動するデバイスを本当に製作可能なのか？
- EAP自体が占める容積は少なくともその他フレームなどで相当巨大になるのではないか
- 積層デバイスにおいて、単純に単層のN倍の剛性を作り出せるのか



ロボット関節を目指す前に積層にポイントを絞った実証する
必要があると考える

Step 1 積層化EAPによる可変剛性機構研究

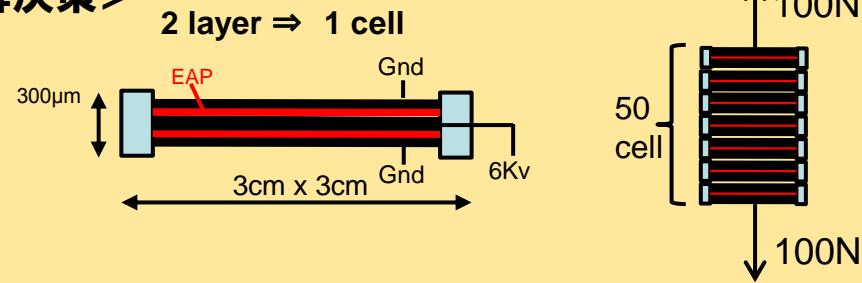
<実現項目>

- 100N以上の外力に耐える
- 10倍程度の剛性範囲
- 数十msで剛性変更可能

<重点課題>

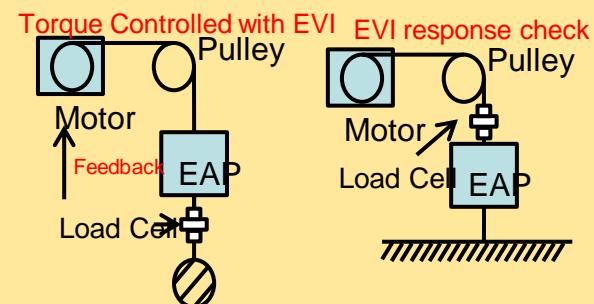
- 1セル許容量の向上
- 1セルの質量・容量低減
- 効率的なセル製作

<解決策>



<検証項目>

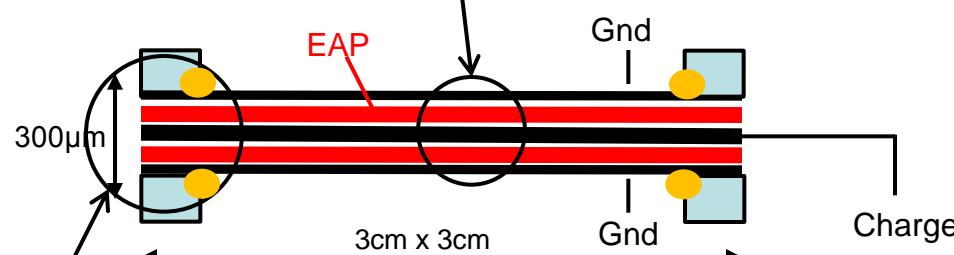
- EAPデバイスの設計と実際の差の大きさ
実現までの課題の整理
- 生産効率、機械耐性の高さ
- 機械特性の制御的利用価値



- ・ 1セルの質量や容積低減
- ・ 1セルでの許容力の向上(EAPレイヤー数、EAP形状)

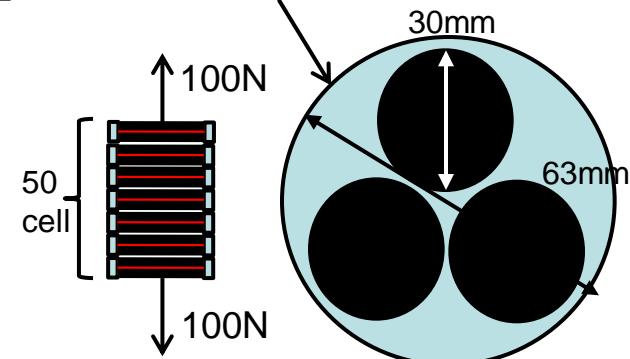
2 EAP layer \Rightarrow 1 cell

電極数が減る、フレーム共用できる。耐力二倍



並列化(3cell)

フレーム共用化

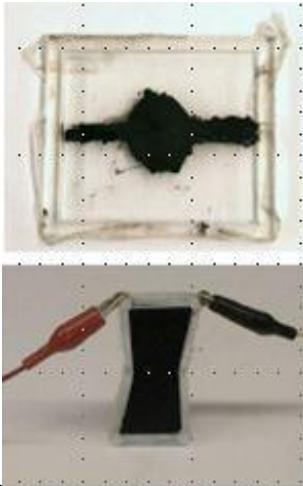


フレーム材を樹脂化してさらに柔軟素材でエッジコーティングする
接触面積低減。駆動時にフレームエッジがEAPを傷付けない
これまでの半分の厚み

試作スキルの高さを活用して、複数のアイディアを
短いスパンで製作し評価することによって最もよい方法を採用する

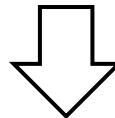
- 効率的セル製作

<SRI(従来)>



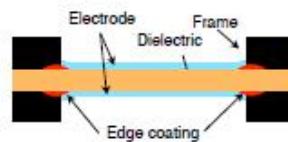
製作に12時間以上

マスクやフレームの作成
マスキング、スプレー、
接着、切断、組み付けなど



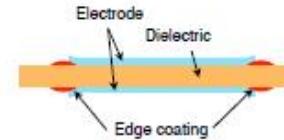
10%以下の生産性
特性のばらつきも多い

正確な位置決めによる組み立て



製作失敗要因の低減

不均一電極: 液体シリコンとカーボン
フレーム端による傷: エッジコーティング



Stretch

Edge Treatment

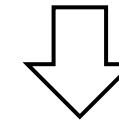
Electrode

Frame Attachment

33

<Stanford EAP>

製作を1時間に短縮



70%以上の生産性



Stretch Edge Treatment Electrode Frame Attachment

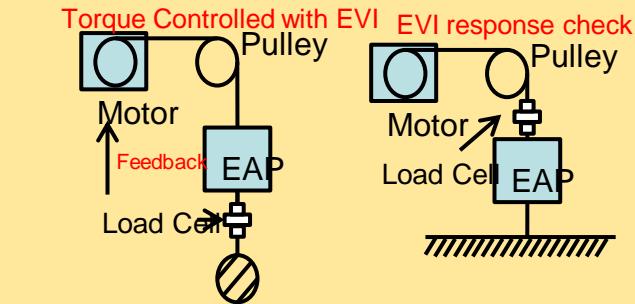
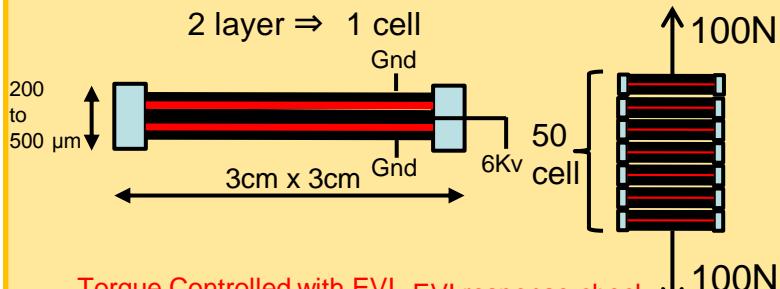
35

100枚を超える製作も可能だと考えているが、更なる効率化を実施する予定

Step 1 Research Subject

積層化EAPによる可変剛性機構研究

- ・ 1セル許容力の向上
- ・ 1セルの質量・容量低減
- ・ 効率的なセル製作



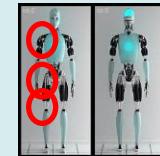
<必要な検証項目>

- ・ EAPデバイスの設計と実際の差の大きさ
実現までの課題の整理
- ・ 生産効率、機械耐性の高さ
- ・ 機械特性の制御的利用価値

Step 2 Research Subject

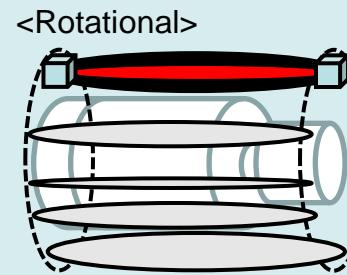
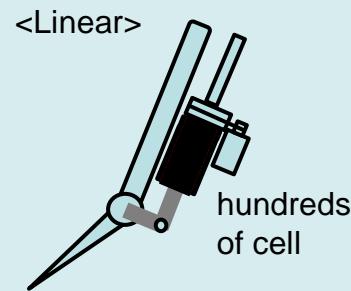
2.1 マニピュレータ用ロボット可変剛性アクチュエータ

- ・ 直動⇒回転変換
- ・ インテグレーテッドシステムの実現
- ・ 仕様に基づく剛性範囲の実現
- ・ メインアクチュエータとの協調



2.2 ヒューマノイド用高出力アクチュエータ

- ・ 200Nmオーダーの大トルクを許容
- ・ 材料・電極配置方法の変換による低量化
- ・ 電気漏洩しないシステム

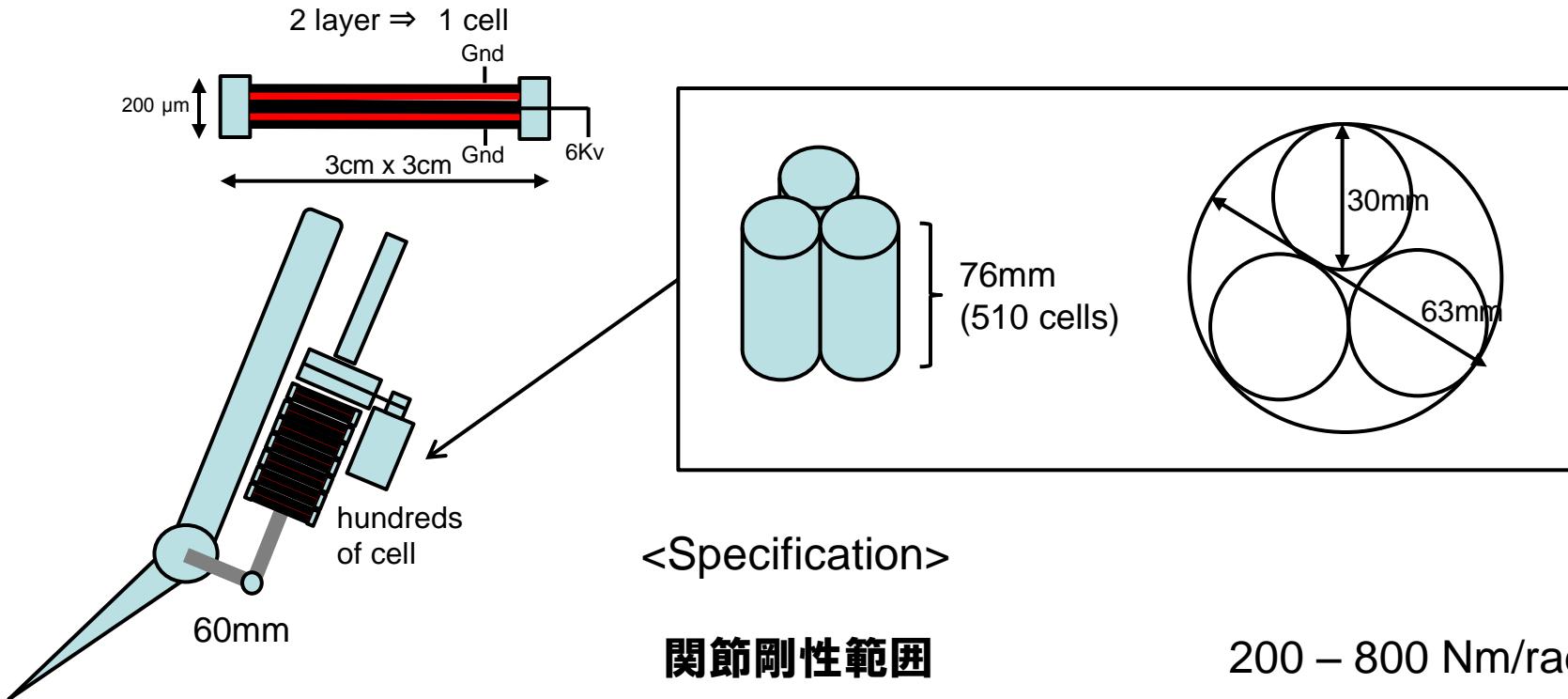


<必要な検証項目>

- ・ 現状EAPデバイスを用いた回転適用の限界
⇒材料、その他要件の抽出
- ・ EAPデバイスの容量、重量の今後の見通し
- ・ 安全性に関する注意(必要)項目の列挙
- ・ プロトタイプデザインの方法を習得

Linear

Circle frame type



<Specification>

関節剛性範囲

200 – 800 Nm/rad

最大バネ変位

7 deg

許容トルク

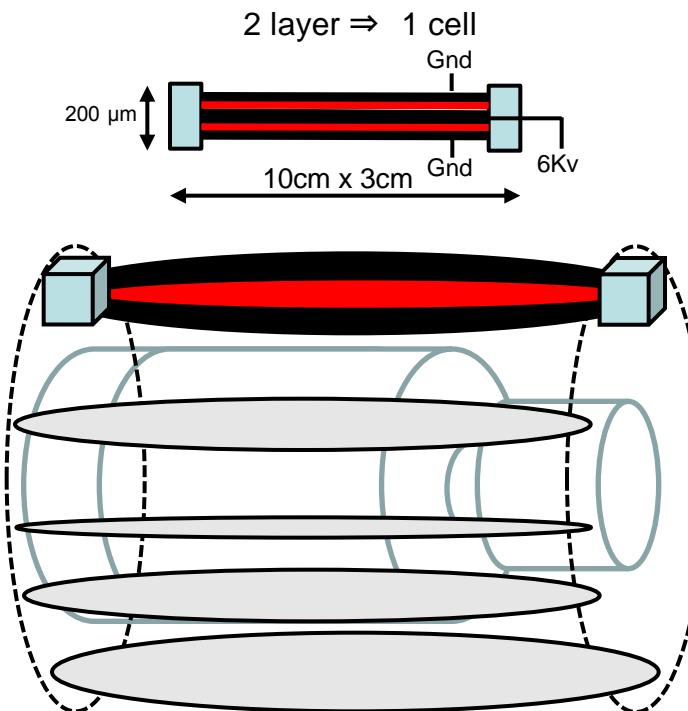
91.8 Nm

電気的安全性(human)

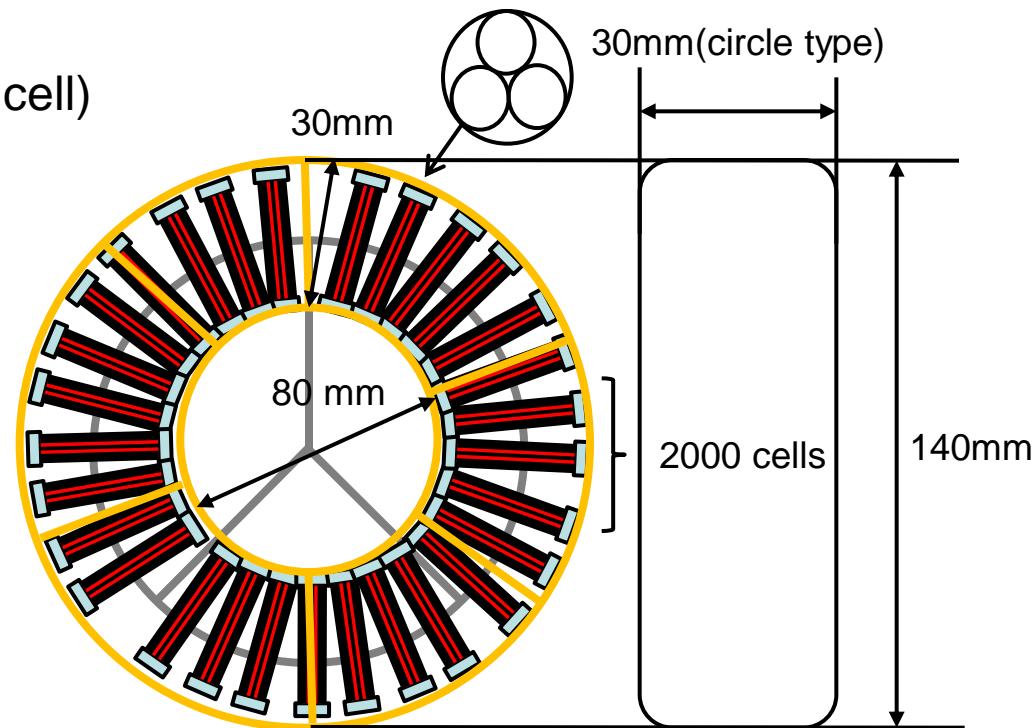
3A / 1.1ms

Rotational

Ellipsoid frame type (large force / cell)



3cellタイプを使用すれば
より径や枚数を減らせる(D120mm)



<Specification>
関節剛性範囲

200 – 800 Nm/rad

最大バネ変位
許容トルク

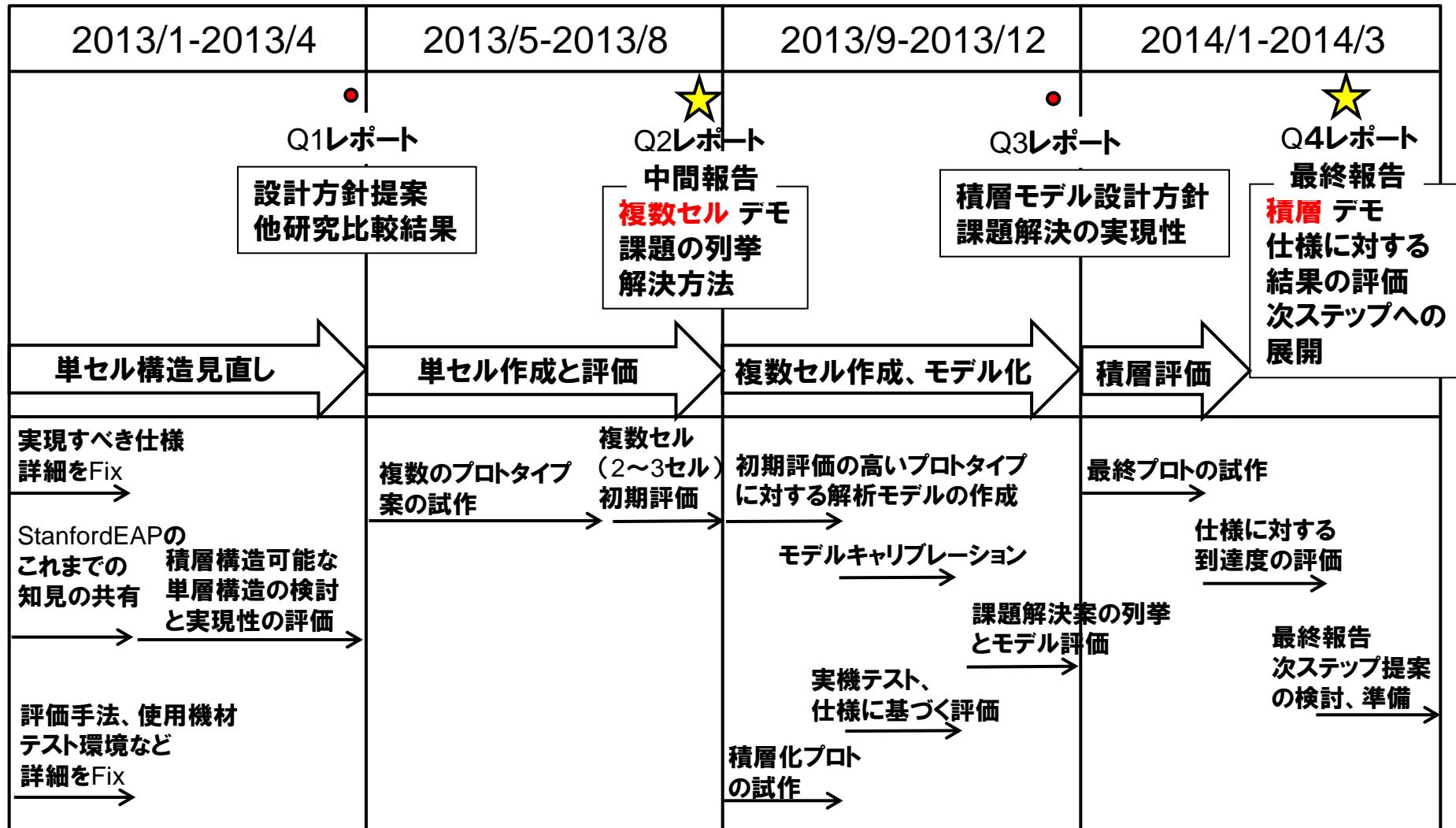
7 deg

110 Nm

電気安全性(human)

3A / 1.5ms

両タイプ共に実現可能性ありと判断するが、**低容量デザインは必要**



実施体制

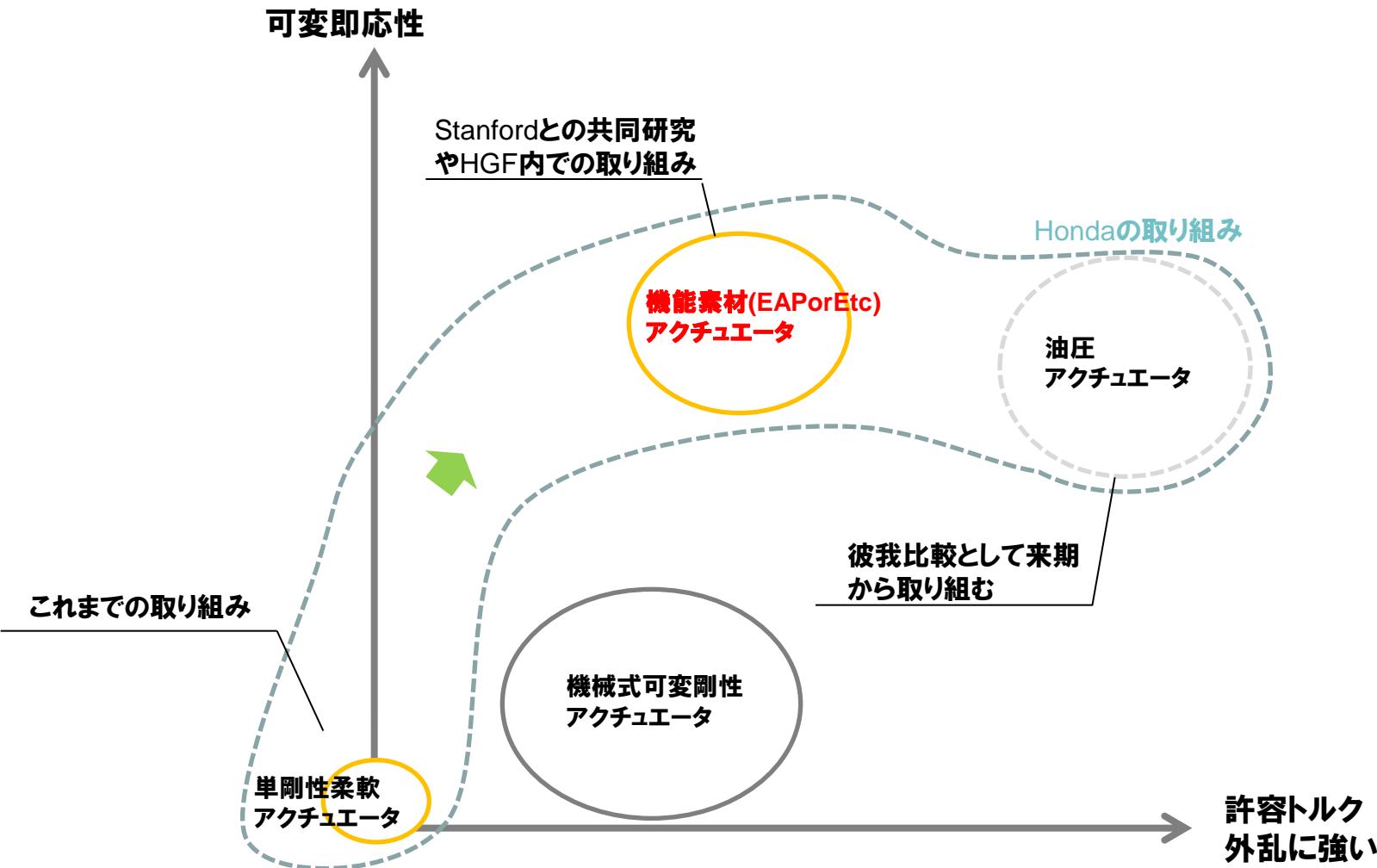
Stanford
HondaR&D

Mark Cutkosky教授
織田 豊生

PosDoc 1名

予算

約 \$150K / Year



- 我々が重視している外乱許容と可変即応性について電動で油圧に**対抗**するものを構築したい
- 油圧は、性能が秀でているが、一方で**効率**、**重量**、**環境性**などに課題があると考えている。
社内検証を実施して、電動アクチュエータの有効性を証明したい

人環境などの不確かさが多く含まれる環境においては、ハードウェア(特に関節)の柔軟性が重要であるが、精度良く動作してかつ柔軟性をもつには、可変剛性機構が不可欠である

機能性素材(EAP)は、応答特性、機械特性範囲、重量において大きな可能性がある

従来のEAP研究はアクチュエータを目指して積層などの研究が実施されているが、可変剛性装置としての研究は、まだ発展途上である

弓矢構造を採用しているStanford大の可変剛性方式は、剛性範囲等、我々の要求仕様を満たすことができる可能性があるが、積層に課題がある

よって

可変剛性アクチュエータを目指した“EAPの積層化”に関する共同研究をStanford大学Mark Cutkosky教授と一年間限定で実施させていただきたい

実施期間

2013/1 - 2014/3

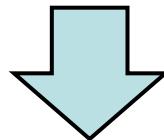
金額

\$ 150K / Year

ロボットにおける
関節アクチュエータ

↔

自動車における
エンジン、トランスミッション、ショックアブソーバ
センシング(トラクション、姿勢)



革新的な技術開発によって

災害環境、人共存環境でのロバストで確実な移動・作業ロボット

FA環境における人・ロボット協調

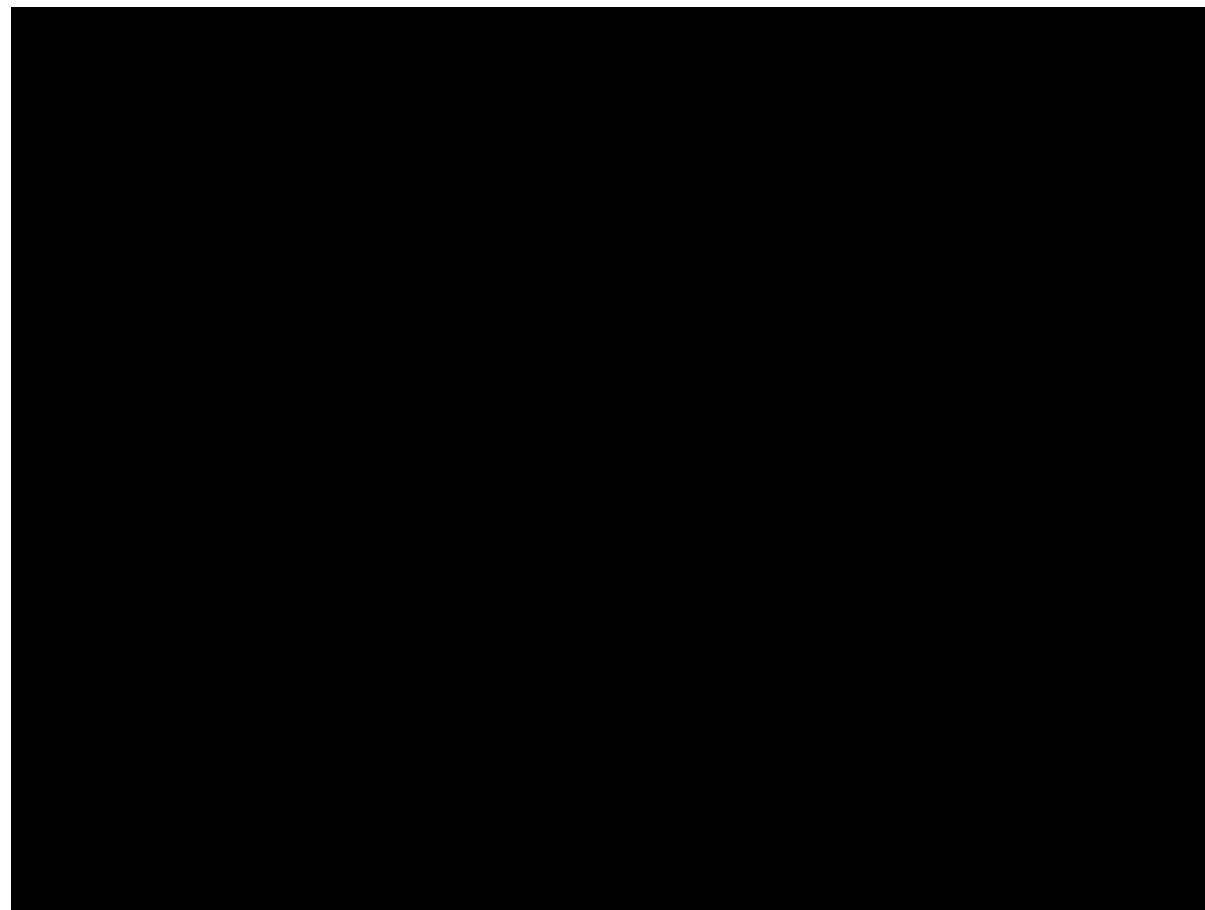
人の状況に応じて関節特性を変化できるワークアシストロボット

ホームユースにおける人共存些事支援ロボット

に大きな貢献ができると考えております

Appendix

EAP device



EAPのロボット適用に向けた課題

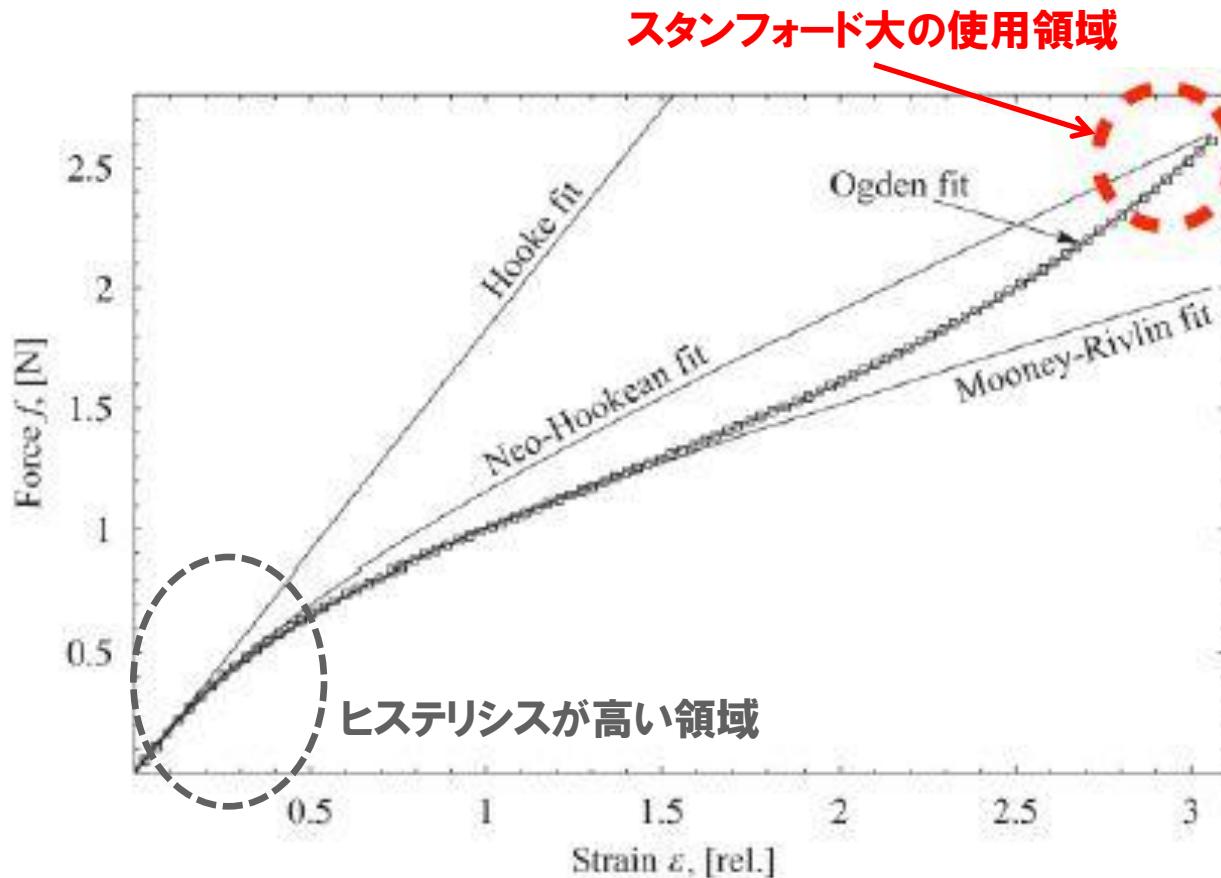
Assumed Problem which should be solved

	Estimated difficulty	Assumed methods	Executing Phase
■ Linear Move ⇒ Rotational Move	Easy	Utilizing Well-known way	1 st Collabo
■ Viscoelastisity increase within 4Hz	Solved	Pre-high Strained	Done
■ Multi-Layer EAP more than 10 Nm order	Difficult	Quite new 1 structured Challenge a lot	1 st Collabo
■ Usability of Mechanical Impedance	Easy	Appropriate Environments	Each Collabo
■ Device Volume (including Charge System) within Robot Arm capacity	Medium	Using a capacitor	1 st Collabo
■ Co-actuated with Electro Magnetic Actuator (Uniformed design)	Easy	Normal isolation	2 nd Collabo
■ Electrical Safety	Medium	EMCO with capacitor and non-grounded	1 st Collabo
■ Ultra Multi-Layer EAP more than 100Nm order	Difficult	Material change and bland new design	2 nd Collabo

以下の技術課題を踏まえて、共同研究の内容を検討する

	Estimated difficulty	Assumed methods	Executing Phase
■ Linear Move ⇒ Rotational Move	Easy	Utilizing Well-known way	1 st Collabo
■ Viscoelastisity increase within 4Hz	Solved	Pre-high Strained	Done
■ Multi-Layer EAP more than 10 Nm order	Difficult	Quite new 1 structured Challenge a lot	Pre Collabo
■ Usability of Mechanical Impedance	Easy	Appropriate Environments	All Collabo
■ Device Volume (including Charge System) within Robot Arm capacity	Medium	Using a capacitor	1 st Collabo
■ Co-actuated with Electro Magnetic Actuator (Uniformed design)	Easy	Normal isolation	1 st Collabo
■ Electrical Safety	Medium	EMCO with capacitor and non-grounded	1 st -2 nd Collabo
■ Ultra Multi-Layer EAP more than 100Nm order	Difficult	Material change and bland new design	2 nd Collabo

ヒステリシス



非常に低ヒステリシスに使用できる

F1KにおけるEAPの検討

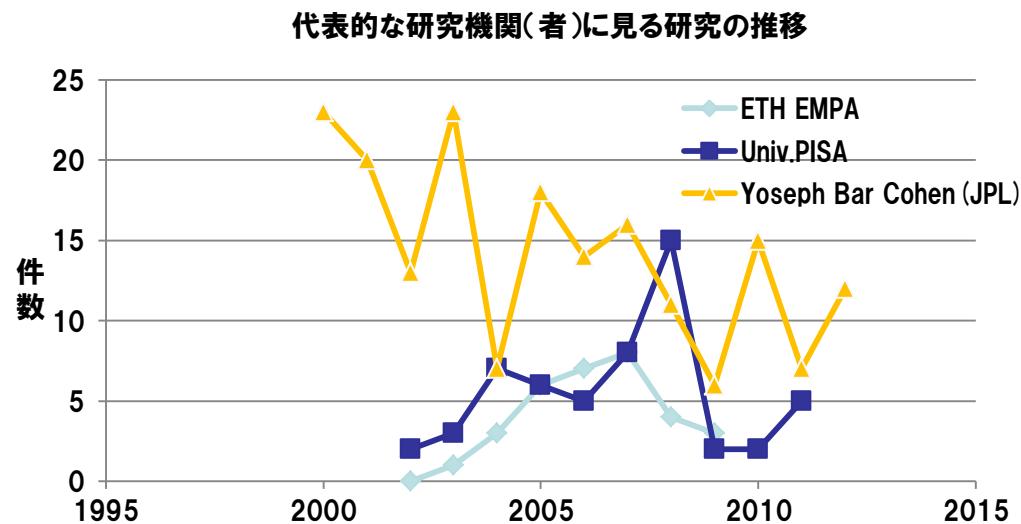
加川さん

Asimoのハンドに利用できるような小型アクチュエータを目指して機能性材料を選定する中でDE-EAPに出会ったが、“高電圧”であることを理由に導電性高分子を用いた手法を採用してMITと共同で研究した

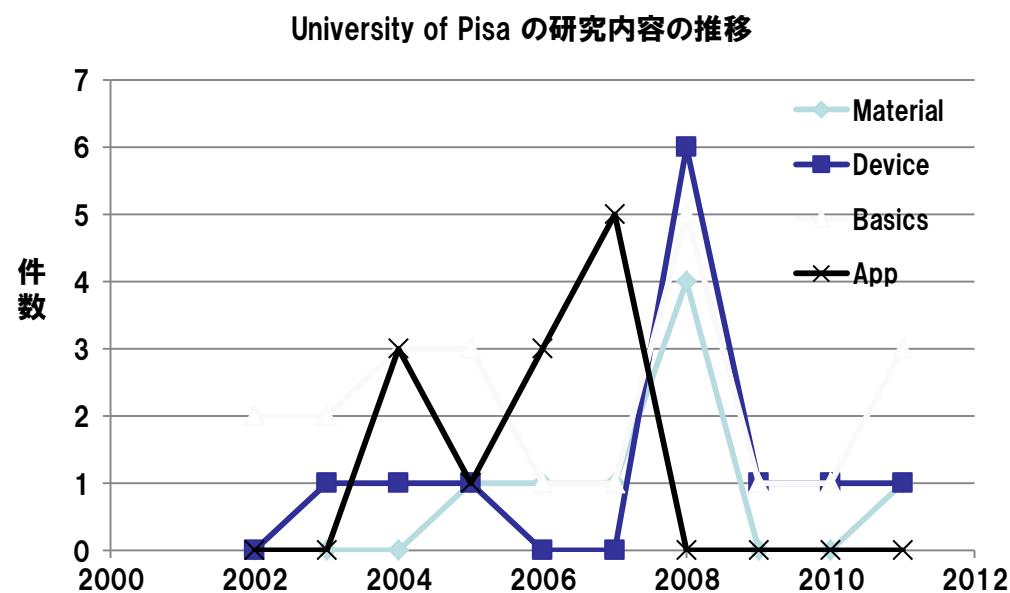
鶴さん

HRI-USからホンダのベンチャーインキュベータがAMIに投資する話を聞いて、共同研究に向けた検討を実施した。
材料を購入して電極を着けて伸縮を試したりは実施したが、本検討から研究開始までのスケジュールを立てたところで鶴さんの駐在によって、中止になった。

EAP研究の推移



- 2000年 SRI InternationalがScienceにEAPに関する論文を投稿
- 2004年 SRI InternationalのEAP部門がAMIとして独立
- 2008年 AMIがViVitouch開発開始
- 2010年 AMIがBayerに買収される
- 2011年 AMIがVivitouch販売開始



2007年ごろに山があって
その後少し斜陽化が見られた。
今後は、Vivitouchの普及などに
よって変化があると思われる

EAPに用いるエラストマーに関して

Actuator Type (specific example)	Max. Strain (%)	Max. Pressure (MPa)	Specific Elastic Energy Density (J/g)	Elastic Energy Density ³ (J/cm ³)	Max. Efficiency (%)	Relative Speed (full cycle)
ELECTROACTIVE POLYMER	Dielectric elastomer ¹					
	Acrylic	380	8.2	3.4	3.4	60–80
	Silicone	63	3.0	0.75	0.75	Fast
	Electrostrictive Polymer (P(VDF-TrFE-CFE) ²)	4.5	45	>0.6	1.0	–
	Graft Elastomer ³	4	24	0.26	0.48	Fast
	Electrochemo-mechanical Conducting Polymer (Polyaniline) ⁴	10	450	23	23	< 1%
	Mechano-chemical Polymer/Gels (Polyelectrolyte) ⁵	> 40	0.3	0.06	0.06	Slow
	Piezoelectric Polymer (PVDF) ⁶	0.1	4.8	0.0013	0.0024	n/a

基本は、3M VHB4910が全般的に特性が良いので、現状最も良く使用されている。
材料系の研究は、Siliconeベースが多い。

始めはVHBを用いて構造研究を実施して、価値を示すことにする

EAPの研究動向の調査について

	他材料研究	多積層	デバイス/アプリケーション	論文/Pat	所感、特徴
Bayer(AMI)	なし	なし	ハプティック ショックアブソーバー (SRI 2007年)	Pat多数 (SRI⇒AMI) 2000年～	唯一のプロダクトレベル研究機関だが Bayer本体の研究はスタートしたばかり なのかほとんど研究結果なし。 プロダクトレベルを体感するにはAMIに 行くべきだが、Bayerは許可してくれない。
Fraunhofer LBF	なし	あり	ショック アブソーバー (Stanfordの後追い)	数件 2008年～	機能解析をしっかりやっている。 チームは非常に小さい。 (Posdoc1名)
University of Pisa	Silicone系 複数あり	あり (複数案)	オートフォーカスレンズ ハプティック	論文多数 2005年～	現状メンバーは少ないが、これまでの論文数は 2005年ぐらいから非常に多い。 研究分野は、材料からモデリング、デバイス、 アプリケーションまですべて。 EAPを用いたアクチュエータ研究に関する知見がある
EMPA ETH	silicone	あり	人口筋肉 魚口ボット	論文多数 2005年～ (特許2件)	材料的には、特殊性はないと思われる。 他より大きいデバイスを目標として研究 リソースは他と変わらないが、最近法人化
Stanford	なし	なし	可変インピーダンス デバイス	数件 2010年～	従来のアクチュエータとしての研究でないEAPの使い方 を提案。EAPの特性を理解した上で、利点を活かした デバイス構成を提案。後発だがスピード感がある。

StanfordはEAP研究では後発であり、ショックアブソーバーとしての研究もSRIの方が先であるが
アイディアがまったく異なりStanfordの方が有用である。実際Stanfordの後追い研究が数例ある。

情報元: WW-EAP Newsletter editor Yoseph Bar-Cohen(JPL, NASA)

EAPAD2013 Keynote Compliant Mechanism Larry Howell (Brigham Young University)

EAPAD2012 Keynote Actuation of toys Jeff Corsiglia (Vice President of Spin Master)

Keynote stretchable electronics through soft lithography
John Rogers (University of Illinois)

Advances in EAP(2012)

	研究内容	特徴	訪問可能性
Aerospace Engineering-Propulsion	Modeling DEA Compressor for Gas Turbine Engines by ANSYS	Multi Layer With 1/50 s For 1 action	× 相手組織の所在等 がわからないため
Artificial Muscles, Inc(Bayer)	ViviTouch for headphone	Product Level Device	○
Meggitt Sensing Systems, Denmark	Highly active flexible piezoelectric Material with ultra-low acoustic impedance	Piezo Paint Material (Patented)	△ 独自素材に興味あり だがベンチャー企業
Fraunhofer Institute, Germany	Artificial muscles As shock absorbers これは2012年に発表Stanfordの後追い	Multi Layer (44/20mm) Single Stiff	△ 用途が近い 積層したモノがある
Semmelweis University, Hungary collaborated with Tohoku.Univ (Nakano Masakazu)	Novel electroactive polymer Composites performing rotation In uniform DC electric field	Rotational Actuator (micro actuator)	流体EAP に特化 ×

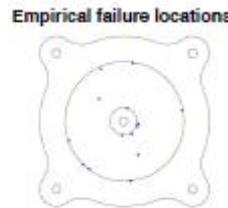
Advances in EAP(2011-2012)

	研究内容	特徴	訪問可能性
University of Willongong, Australia	Polymer actuators set to Improve quality of life for Breast cancer survivors	アプリケーションに 関する資料のみなので 実現手段に特殊性なし?	×
Technical University of Cartagene, Spain	One muscle and several Sensors embedded in one Device – theoretical description	? 机上計算のみ	×
Universidad Politecnica de Madrid, Spain	Neural network approach To modeling the behavior Of ionic polymer-metal Composites in dry env	流動アクチュエータ 机上計算のみ	×
Auckland Bioengineering Institute, New Zealand	a) Cyber- proprioception and cyber pain b) A hand-held	Only proposing possibility Of DE	×
Compliant Transducer Systems(EMPA-ETH) company Of EMPA(ETH)	dielectric elastomer Spinner company Of EMPA(ETH)	Di-electric EAP 素材、Modeling デバイスまで	○
JKU Linz and Harvard University	Harnessing snap-through Instability in soft dielectrics To achieve giant voltage-triggered deformation	VHB4910素材を 1692%伸ばした (現素材の可能性UP)	×
North Carolina State University	Enhanced IPMC with Nanostructured Block Ionomers	流動 アクチュエータ	×
Penn State University under NIH grant	Compact core-free tubular Actuators based on PVDF	Tube actuator Dis 1mm-1N	×
University of Pisa, Italy	Bioinspired tunable lens made of DEA Hand rehabilitation app Haptics Braille display	Di-electric EAP のアプリ探索 を多く実施	○

製法について

Electroactive Polymers

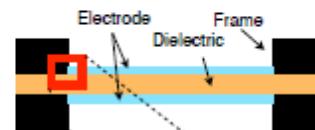
Edge Treatment



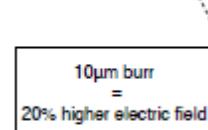
22

Electroactive Polymers

Edge Treatment

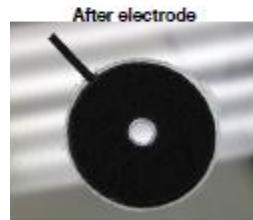
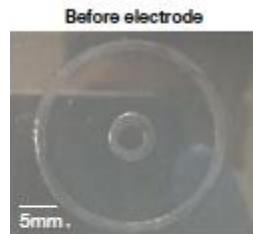


Cross-section of EAP actuator



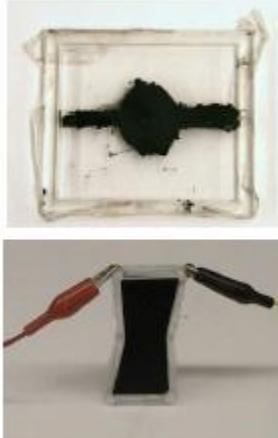
Zoomed view of edge

21



Electroactive Polymers

Conventional Manufacturing

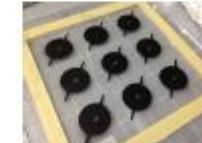
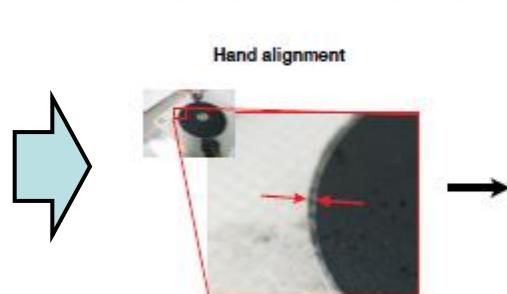


- 12+ hours of manufacturing time
- Design
- Fabrication of masks, frames
- Masking, spraying, gluing, curing, assembly
- Each step introduces variations and errors
- Inconsistent performance
- Low manufacturing yield
- Early failure (mechanical and electrical)

24

Electroactive Polymers

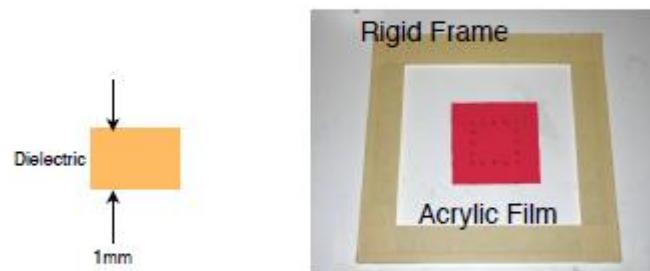
Alignment during Manufacturing



25

Electroactive Polymers

Manufacturing Process



Stretch Edge Treatment Electrode Frame Attachment

27

Electroactive Polymers

Manufacturing Process



Stretch Edge Treatment Electrode Frame Attachment

28

Electroactive Polymers

Manufacturing Process

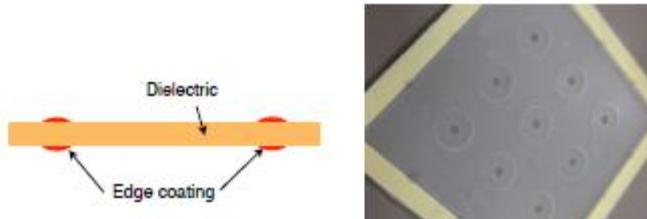


Stretch Edge Treatment Electrode Frame Attachment

29

Electroactive Polymers

Manufacturing Process

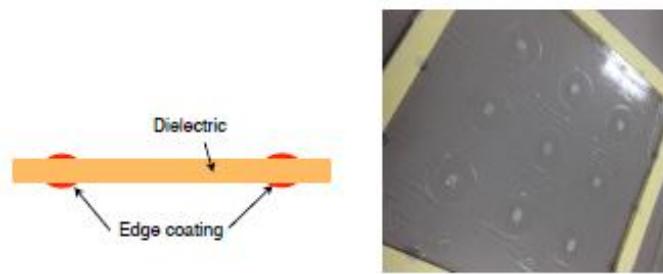


Stretch Edge Treatment Electrode Frame Attachment

30

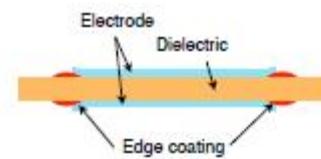
Electroactive Polymers

Manufacturing Process



Electroactive Polymers

Manufacturing Process



Stretch

Edge Treatment

Electrode

Frame Attachment

31

Stretch

Edge Treatment

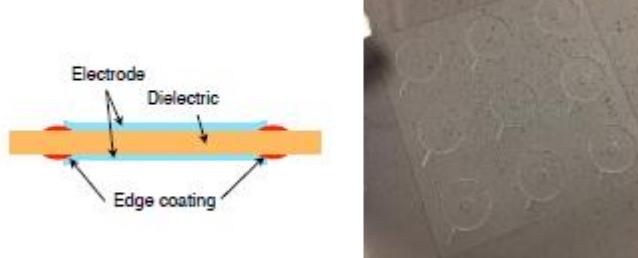
Electrode

Frame Attachment

32

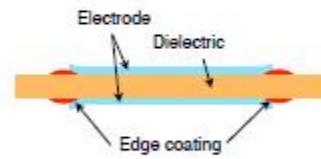
Electroactive Polymers

Manufacturing Process



Electroactive Polymers

Manufacturing Process



Stretch

Edge Treatment

Electrode

Frame Attachment

33

Stretch

Edge Treatment

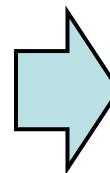
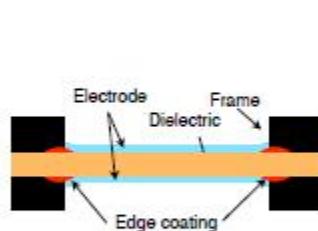
Electrode

Frame Attachment

34

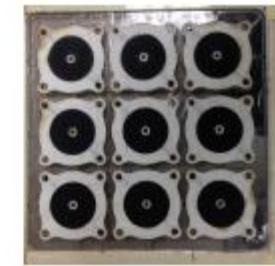
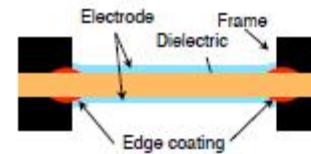
Electroactive Polymers

Manufacturing Process



Electroactive Polymers

Manufacturing Process



Stretch Edge Treatment Electrode Frame Attachment

35

36

Electroactive Polymers

Manufacturing Process

1 hour build time

100% yield

Reliable (10,000+ cycles)

Consistent across batch

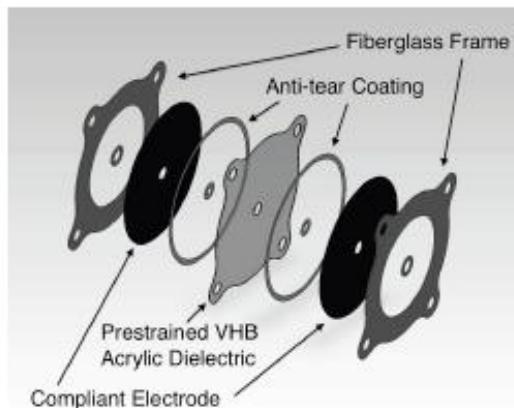


Stretch Edge Treatment Electrode Frame Attachment

37

Tunable Stiffness

Physical Module

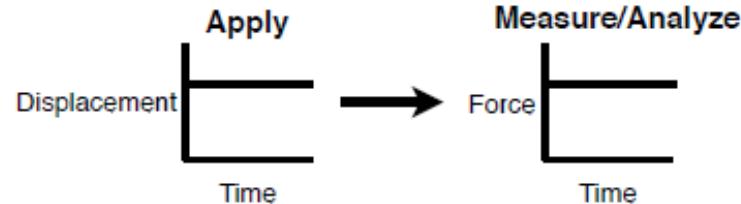


Mass (g)	Dimensions (mm)	Inner Diameter (mm)	Outer Diameter (mm)	Displacement Range (mm)
1.6	38 x 38 x 0.7	5.5	25	7

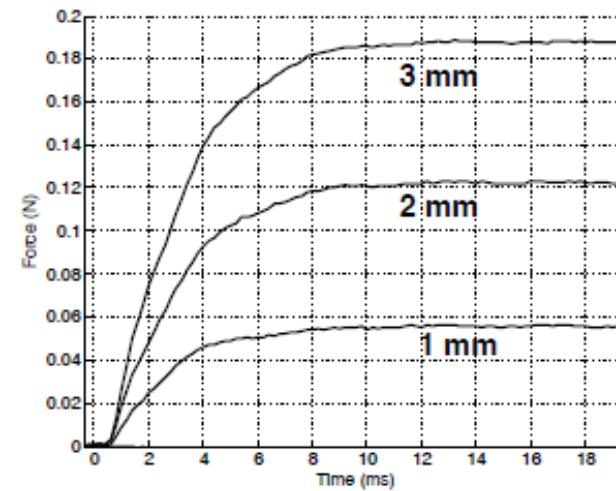
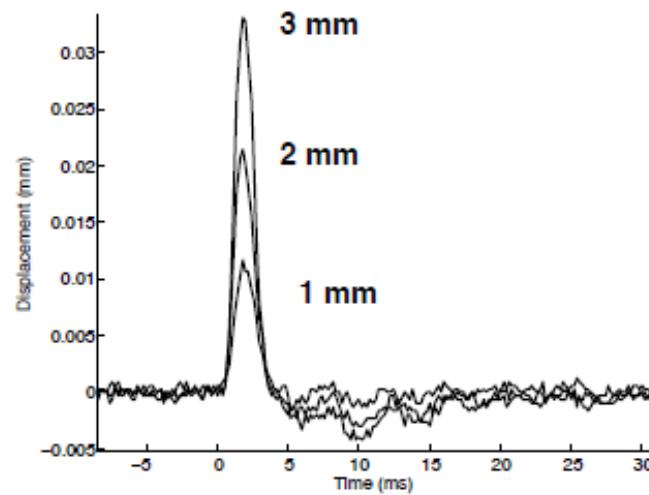
応答特性について

Tunable Stiffness

Response Time

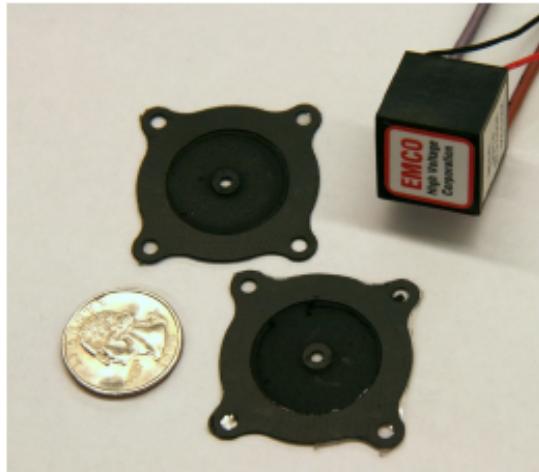


電気的な方が速いのは
周知



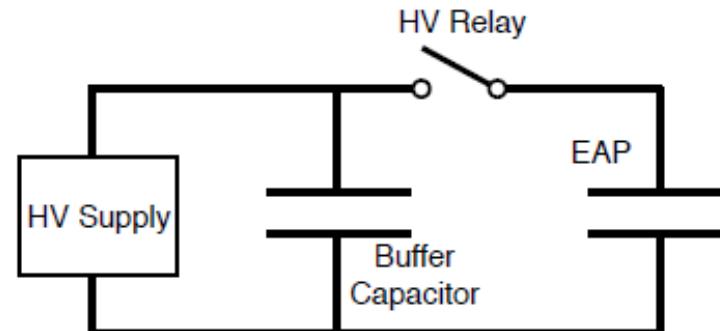
Tunable Stiffness

Response Time



0.5W Power Supply
Input: 5VDC @ 250mA
Output: 6kV @ 50µA

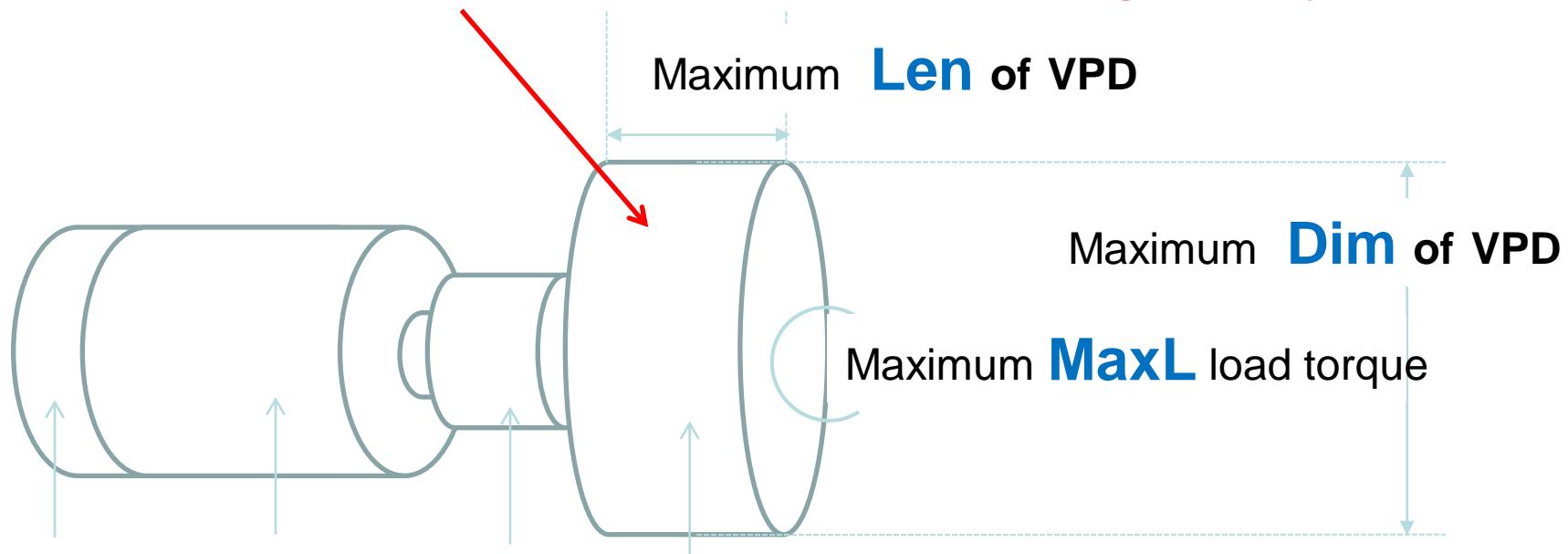
電気的な方が速いのは
周知



Power Supply	Cont. Current (mA)	Peak Current (mA)
Trek 610B	2	2
Emco Q101	0.05	0.05
Buffered Q101	0.05	2000

共同研究における題材と解決方法 について

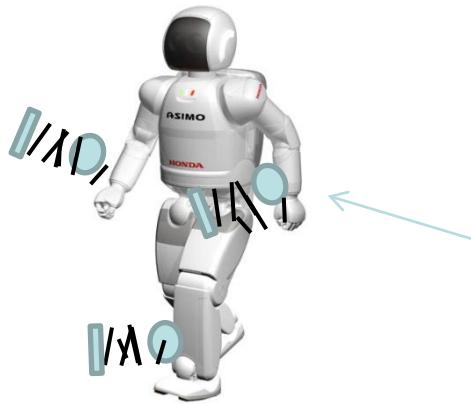
Needed to have
Variable Stiffness and Variable Damping property



Encoder Motor Reduction EAP device with spring ratio **K** and damping ratio **D**
Gear

Type	K [Nm/rad]	D	MaxL [Nm]	Dim [mm]	Len [mm]	Energy [J]
Type E	200 - 1200	-	50	60	10	1.0
Type SL	1500-3000	-	100	60	20	1.6

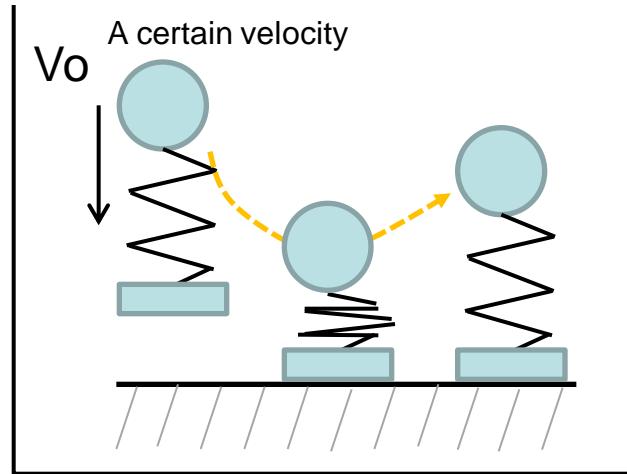
Supposition of end effector collision



Arm and leg mass
Is aligned at end effector

This is about **5 %** of
Total mass(suppose 30kg).

Basic assumption of collision



About stiffness in collision

Arm mass resonance frequency is

$$\text{Sqrt}(K_{\text{edge_spring}}/m) * 0.15 / 2\pi \text{ Hz}$$

Suppose that active control is effective less than 15 Hz

so

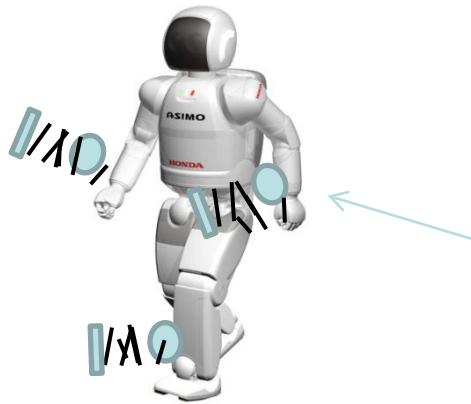
$$K_{\text{edge_spring}} \leq 4 * 3.14 * 3.14 * 15 * 15 * 0.05 * 30$$

Feasible

Elbow link length

$$K_{\text{joint_spring}} \leq 4 * 3.14 * 3.14 * 15 * 15 * 0.05 * 30 * 0.23 * 0.23 = 704 \text{ Nm/rad}$$

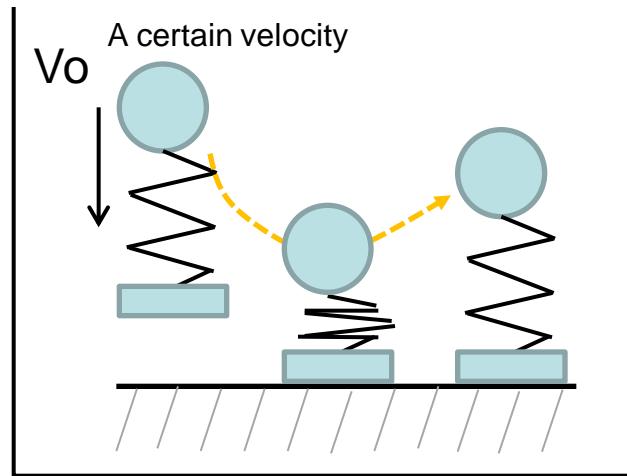
Supposition of end effector collision



Arm and leg mass
Is aligned at end effector

This is about **5 %** of
Total mass(suppose 30kg).

Basic assumption of collision



About spring deflection in collision

Absorb energy $\frac{1}{2} 0.05*30*2.7*2.7=5.46$ J

It should be equivalent to Spring Energy $\frac{1}{2} k_{edge_spring}*edge_deflection^2$

So, if we choose 700 Nm/rad for joint spring
Deflection is

$$\sqrt{5.46^2/13310.46}/0.23*180/3.14 = 7.13 \text{ deg}$$

More than 4 deg is reasonable

← This is maximum deflection
when elbow absorbs all energy

Feasible

In 1st Collaboration (for elbow joint)

Item	AWAS-II (IIT)	FSJ (DLR)	EVI (Stanford)
Range of Motion	-150~150 deg	-180~180 deg	-10~170 deg
Range of angular Deflection	17 deg	3 – 15 deg	4 deg
Range of Stiffness [Nm/rad]	Zero to Rigid	52.4 to 826	200 to 800
Time of changing stiffness	0.8 s	0.33 s	within 10 ms
Maximum Energy	5.8 J	5.3 J	around 2 J
Peak Output Torque	80 Nm	67 Nm	50 Nm
Overall Weight	1.1 kg	1.41 kg	Under 400 g

Quite Competitive

Motor 238 g
Gear 45 g

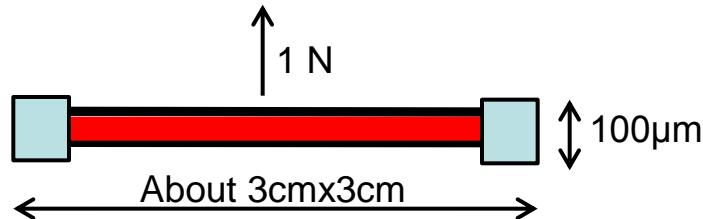
Low to High stiff
→ very quick
EVI device weight
Is lower than 100g



TABLE I: Test diaphragm properties

Mass (g)	1.6
Dimensions (mm)	38 x 38 x 0.7
Inner diameter (mm)	5.5
Outer diameter (mm)	25
Displacement range (mm)	8
Stiffness range over 1 mm (N/m)	15 - 102
Stiffness range over 8 mm (N/m)	32 - 117

<brief structure>



Maximum deflection in high stiffness is

$$1 / 117 = 0.0085 \text{ m}$$

Maximum storing energy is

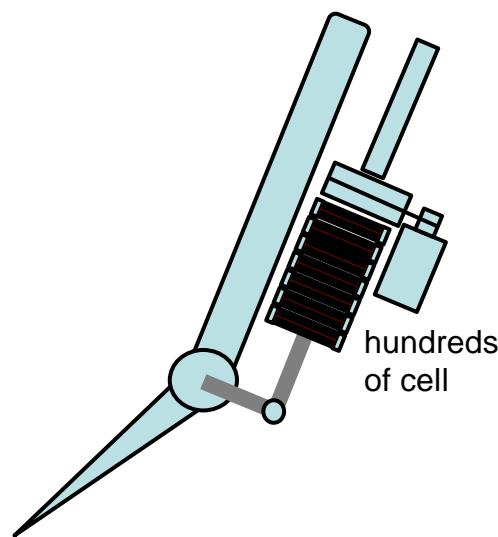
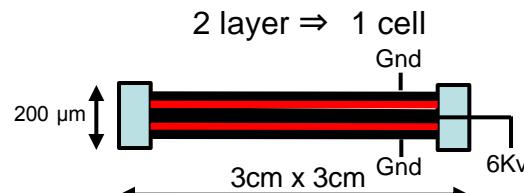
$$\frac{1}{2} 117 (0.0085)^2 = 0.004 \text{ J}$$

	Volume	Energy
Current	0.09 cm ³	0.004 J
Estimated	113.04 cm ³	5.02 J
Joint	(226.04 cm ³)	(10.04 J)

This is much lower than fundamental calculation.

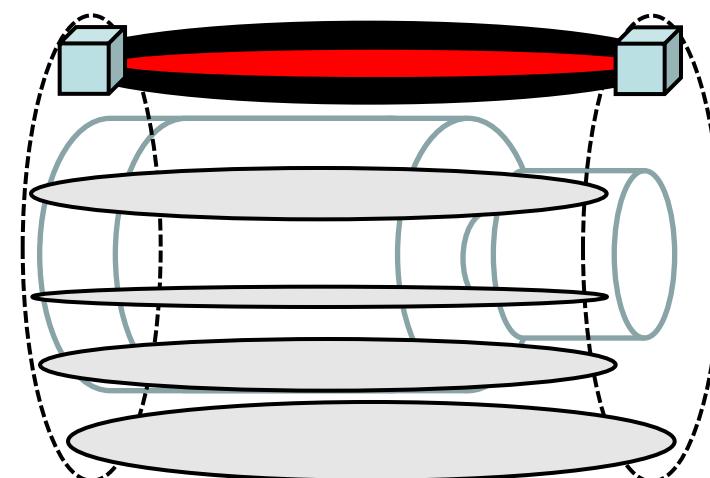
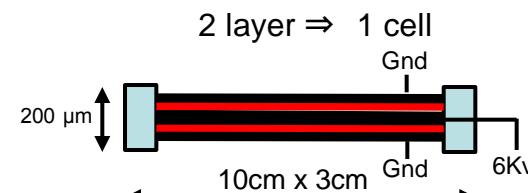
Linear

Circle frame type



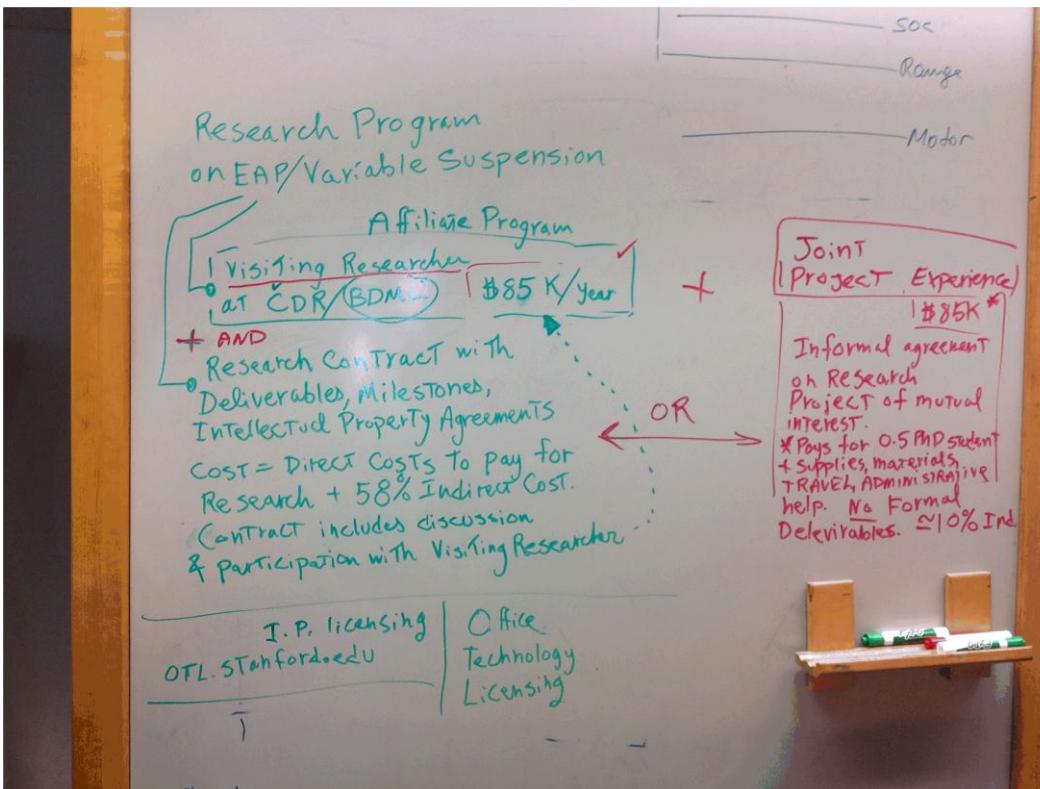
Rotational

Ellipsoid frame type (large force / cell)



Linear type is easier than Rotational type, however
Rotational type is also feasible.

共同研究予算 について



PosDoc or PhD student cost

About \$125K

Material, Equipment cost

About \$10 K

Minimum \$135K

Additionally visiting researcher cost

About \$85K

Other collaboration

Panasonic

DARPA(year by year)

JPL

Meka

SRI

Robotic Drilling systems

Draper Lab(MIT)

KAUST(under water robot)

NIH

予定では3年で500K程度

EAPとは～Stanford大の特徴について

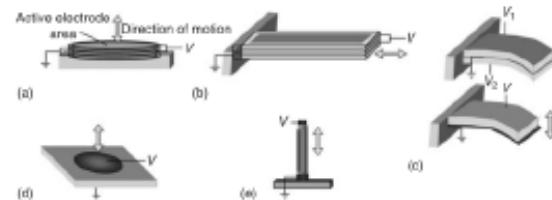
情報元: 2011,2012WW-EAP Newsletter editor Yoseph Bar-Cohen(JPL, NASA)
SPIEの通年のカンファレンスの結果を反映して独自に抽出されたもの



Electroactive Polymers

- Principle of Operation

- Pelrine and Kornbluh (2000) [SRI]



- Geometry and Design

- Choi (2003)

- Rosenthal (2000)

[SRI]

- Modeling

- Wissler (2005)

[EMPA ETH]

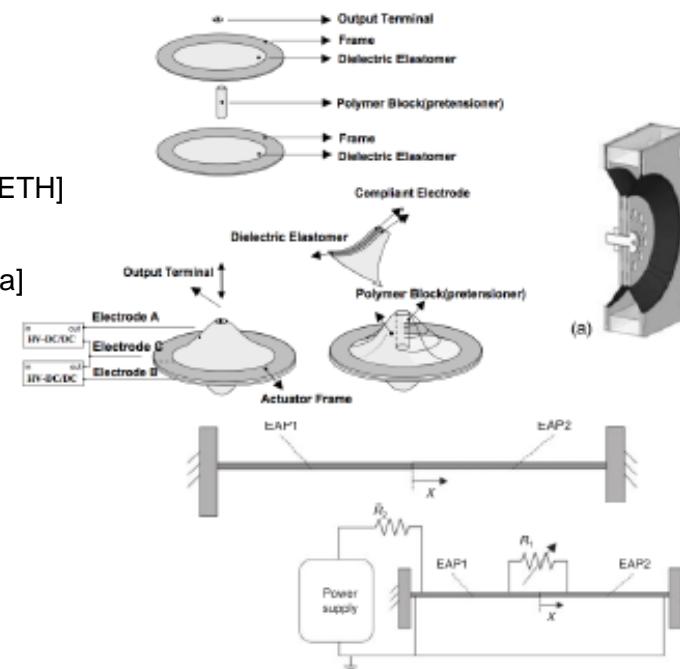
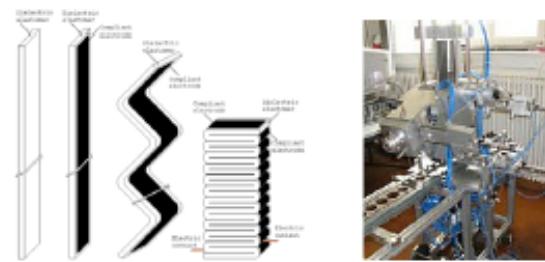
- Scalable Manufacturing

- Carpi (2007), Kovacs (2007) [Uni.Pisa]

- Tunable Suspensions

- Pelrine (2008)

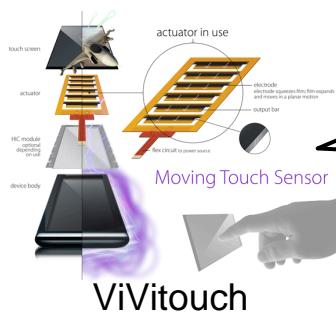
[SRI]



SRIの特許で記載されている構成や活用法のいろいろ

2000年辺りからEAP研究が始まりこれまで動作原理～作成方法まで幅広く研究されてきたが、可変インピーダンスは2008年以降である

AMI
(Bayer)



圧電素子と比較した売りは、
分解能の高い力覚表現
比較にならない薄さ(.5mm)
従来より70%効率高い

ハプティクス製品で比較するとEAPのポテンシャルは高い
AMI-Bayerは研究に重きを置いていない

研究

AMI自体の現在の研究内容はわからない。
Bayerは、EUのEAPコミュニティ紙で
ポリウレタン、シリコン系の素材を用いて
バルブ、ポンプ、位置決めなどのアプリケー
ションのための研究を実施していると紹介
されていた

特許

AMIがSRI時代に取得した特許が多く、
全体の80%ぐらいを占める。

Fraunhofer LBF

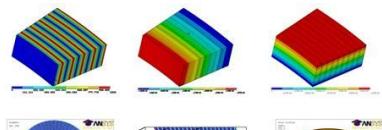


Figure 2: Numerical simulation of cylindrical EAP actuators

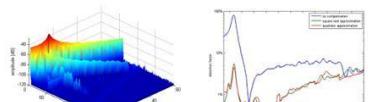


Figure 3: Analyzing nonlinear effects in the frequency range (left) and reduction of the distortion factor by compensation methods (right)

挙動解析



ショックアブソーバー



Figure 1: Test stand for characterization of EAP-actuators

実験設備

研究

エラストマーの挙動をFEA技術で数値シ
ミュレーションする研究を中心としている。
実挙動とのキャリブレーションが強み。
ショックアブソーバー研究は、ここ一年ぐら
いの成果でスタンフォードの追試研究とい
える。積層は40層程度である

特許

現在のところ、見つかっていません。

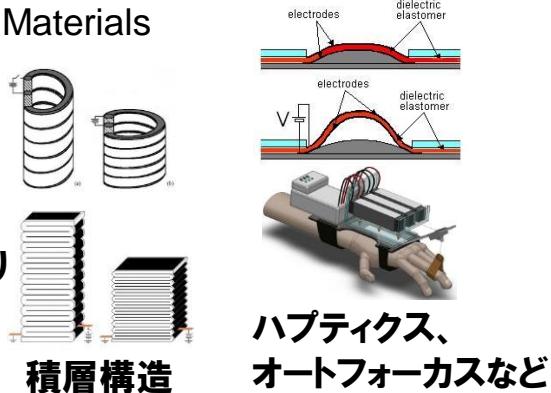
EAPの挙動はかなりシミュレートできる
積層ありのショックアブソーバの例もある

University of Pisa(Federico Carpi)
Bioengineering and Robotics Research Center
Artificial Muscles & Smart Materials

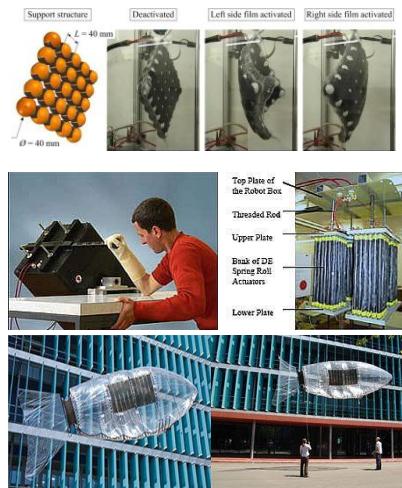
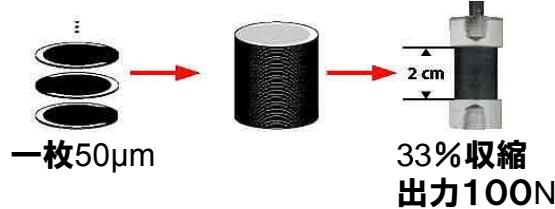
新材料への取り組み

Silicone/Poly(hexyl-thiophene)
Silicone/PMN-PT composites
Silicone/TiO₂ composites

材料研究で通常のSiliconより
強さが倍になるものもある



EMPA(ETH Zurich)



研究

これまでの論文数は、2003年ぐらいから非常に多い。研究分野は、材料だとシリコン系を主に使用して人工筋肉を実現すべくアクチュエータ研究を実施積層構造のアイディア、アプリケーションの製作など2008年ぐらいまで勢力的に研究してきたが、近年やや投稿論文数が減ってきた。

特許

アプリケーションに関する特許が数件ある。

研究

DE-EAPの特性解析から研究を始め、その結果からシートを引き伸ばして厚さを50μmにして積層したアクチュエータを開発した。このアクチュエータは33%収縮でき、100Nぐらい出せるが動画で見る限り動きはそれほど速くない。その他論文で、シリコン系の材料を用いたり、またアームレスリングやエアシップなどのアプリケーション研究を実施している。最近法人化。

特許

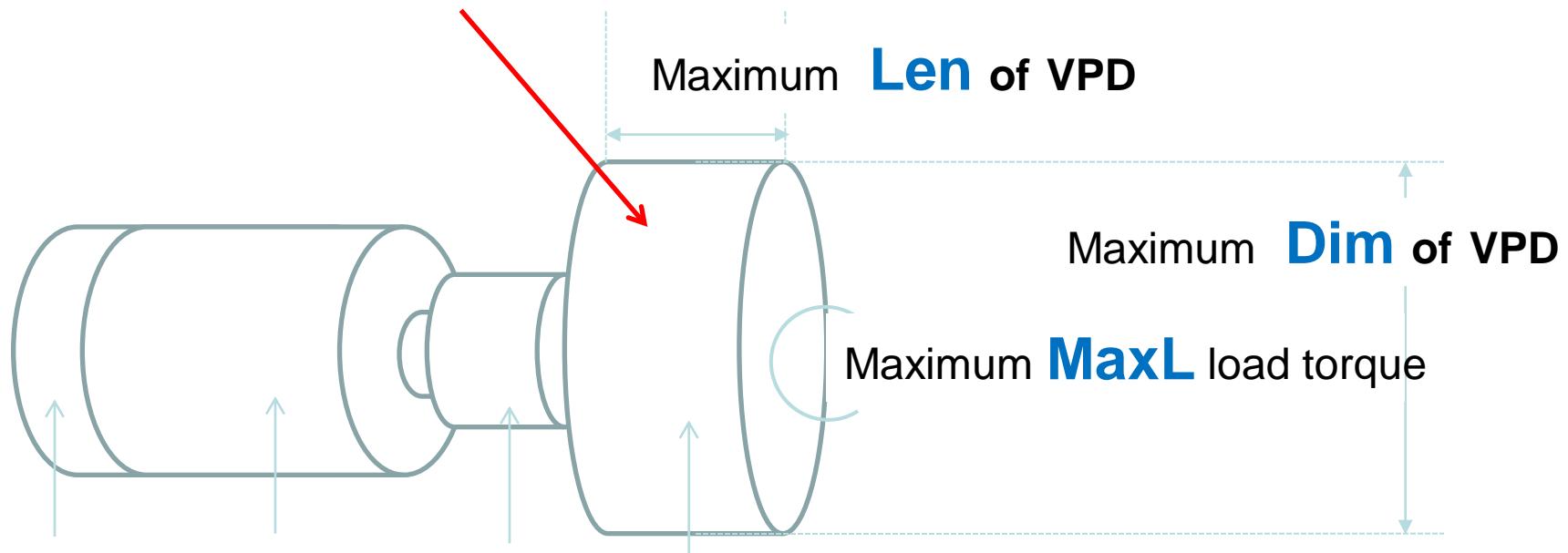
アクチュエータとエアシップで各一件

100を超える積層で大きな力を出せる
アクチュエータ研究例もある

	使用材料	多積層	デバイス/アプリケーション	論文/Pat
Bayer(AMI,SRI)	3M VHB 2000年の論文 で多数比較	なし	ハプティック ショックアブソーバー (SRI 2007年)	Pat多数 (SRI→AMI) 2000年~
Fraunhofer LBF	3M- VHB	40tissue	ショック アブソーバー (Stanfordの後追い)	数件 2008年~
University of Pisa	Silicone系を中心 として添加物を 追加	複数の積層案は あるがEMPAほど うまくいっていない	オートフォーカスレンズ ハプティック	論文多数 2005年~
EMPA ETH	silicone	200tissue以上の 実績あり駆動は 遅いが力は出ている	人口筋肉 魚口ボット	論文多数 2005年~ (特許2件)

- 実際に動くものができている例はほとんど3M-VHBを使用したものであるので、安定な素材といえる
- EAPは長らく人工筋肉を実現する夢の素材として主にアクチュエータとして研究されてきて、積層して大きな力を出せるものも研究例として存在している
- 可変インピーダンス装置としてのEAPの活用は、SRIが先行したもののスタンフォード大の構造はまったく異なり、また、その後スタンフォード大の構造の類似研究がFranhoferやドイツの複数の大学から発表されていることから、EAP研究の新しい流れを作り出した。

Capacity for Variable Stiffness/Damping Device



Encoder Motor Reduction Gear EAP device with spring ratio **K** and damping ratio **D**

Type	K [Nm/rad]	D	MaxL [Nm]	Dim [mm]	Len [mm]	Max Torque [Nm]
Type E	200 - 800	0-variable	50	60	10	40

Suppose that

Energy density : about 100 W / kg

Material density : about 1g / cm³

Type E's (SL's) device volume is

$$3.14 \times 6\text{cm} \times 6\text{cm} \times 1(2) = 113.04 \text{ cm}^3 (226.08 \text{ cm}^3)$$

Device weight is

$$113.04 \text{ g} (226.08 \text{ g})$$

Maximum Energy is

$$100 \text{ W/kg} \times 113.04 / 1000 = 11.3 \text{ W} (22.6 \text{ W})$$

EAP can handle this energy in quite short time.(within 50 ms)

According to

$$1 \text{ J} = 1 \text{ W} \times 1 \text{ S}$$

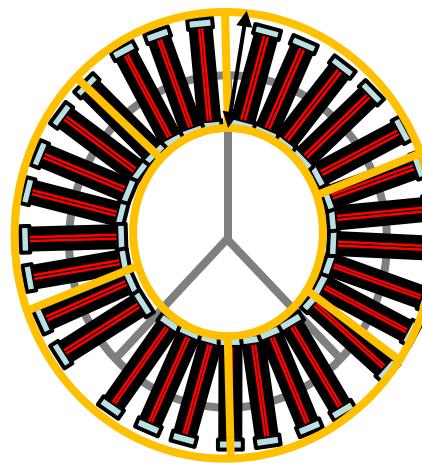
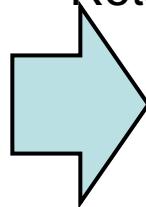
I think that EAP's potential is fundamentally very high

要求仕様どおり回転関節で構成した場合と、リニアアクチュエータとして構成して回転変換をかける場合について検討した

Start from this



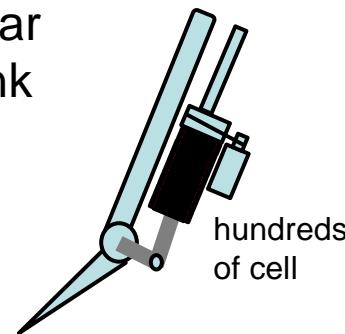
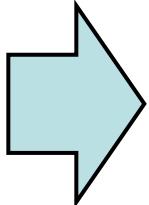
Linear
⇒ Rotational



$$40\text{Nm} / 0.030\text{ m} / 1\text{N/cell} = 1333 \text{ cells}$$

$$1333 \text{ cells} \times 100\mu\text{m} = 0.133 \text{ m} \quad (< 0.38\text{m outer})$$

Still Linear
with crank



$$40\text{Nm} / 0.060\text{ m} = 666 \text{ N}$$

$$666 \text{ N} / 1\text{N/cell} = 666 \text{ cells}$$

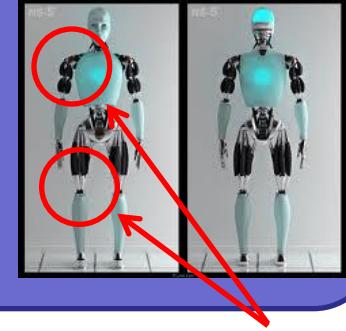
$$666 \text{ cells} \times 100\mu\text{m} = 0.066 \text{ m}$$

直動タイプの方が構成し易いことはわかったが、何百という積層必要

~2016

Large Power Joint for Humanoid Robot

- Large maximum torque
- Much higher energy density for lower volume
Material
Structural



Shoulder,Knee Joint

The main topic to realize it is

Optimizing Elastomer for EAP performance <- chemical engineering

And it is

- Energy Density but also functional geometry
- Strength in high stress
- Uniform sheet

Re-Selection or utilizing chemical modification of Elastomer such as
European Research (University of Pisa, University at Denmark)

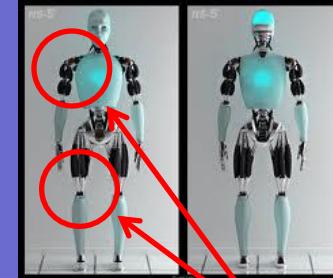
or

Sub-collaboration with chemical engineering

~2016

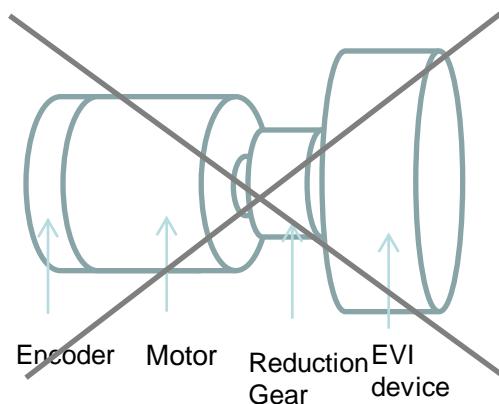
Large Power Joint for Humanoid Robot

- Large maximum torque
- Much higher energy density for lower volume
Material
Structural

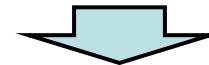


Shoulder,Knee Joint

Another topic is



Series Elastic System



Small Volume for EVI device

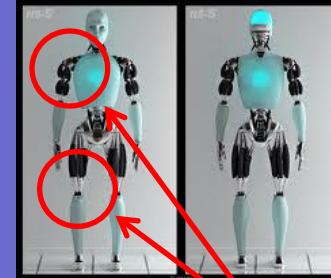
So to get bigger volume for EVI device

Integrated Design of Electro-Magnetic And ElectroActivePolymer

~2016

Large Power Joint for Humanoid Robot

- Large maximum torque
- Much higher energy density for lower volume
Material
Structural



Shoulder,Knee Joint

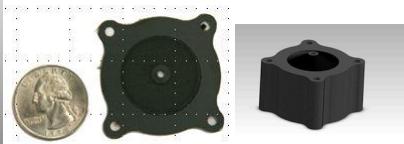
Main research topics which we can do are

To get larger volume for EAP, and totally compact design

Integrated Design of Electro-Magnetic And ElectroActivePolymer

To get higher Strength and Uniformity

Re-Selection or utilizing chemical modification of Elastomer such as European Research (University of Pisa, University at Denmark)

	関節剛性範囲 (200 – 800 Nm/rad)	応答速度 (50ms以下)	最大バネ変位 (7 deg)	粘性 (なし +別途独立制御 できると良い)	デバイス重量 (全体500g以下)
機構的実現方法 (てこの原理)  	0- ∞ Nm/rad	800ms	15deg	なし (別途装置必要)	全体 1.1kg
機能材料方法 (MRE) 金沢工業大学 	975- 1949 N/m	数百ms	1mm/20mm	あり (調整不可)	デバイス 0.6kg
機能材料方法 (EAP)  Stanford	15- 102 N/m	数ms	8mm/80 μ m	なし (印加電流に よって独立調整可)	デバイス 0.2g

ロボット関節への適用例はないが、EAPは大きな可能性を持っている