

機構のダイナミクスの計測制御を基盤とする 人間機械調和型ロボットシステムの研究

宮寄 哲郎

自己紹介

- 氏名 宮崎 哲郎 (みやざき てつろう)
- 所属
東京大学大学院 情報理工学系研究科 システム情報学専攻
システム第2研究室 (川嶋研究室) 助教
- メール Tetsuro_Miyazaki@ipc.i.u-tokyo.ac.jp
- 電話 03-5841-1671 (内線：21671)
- 専門 ロボット工学, 機械工学, 制御工学

自己紹介

略歴

- 平成26年3月 東京工業大学大学院 理工学研究科
機械物理工学専攻 博士課程後期課程 修了 博士（工学）

職歴

- 平成26年4月－29年3月 横浜国立大学 大学院工学研究院
システムの創生部門 研究教員のち助教
- 平成29年4月－令和2年3月 東京医科歯科大学
生体材料工学研究所 バイオメカニクス分野 助教
- 令和2年4月－現在 東京大学 大学院情報理工学系研究科
システム情報学専攻 助教

関心のある研究領域

- **人間機械調和型ロボットシステム**の最適設計と最適制御をハードウェアとソフトウェアの両面から研究
 - 剛体リンク系，流体駆動系，柔軟材料など，多様な物理特性を有する機械要素を組み合わせ，人と調和し高い性能を発揮する新たなハードウェアを構成
 - 個々の機械要素を詳細にモデル化し，精密な制御や外乱オブザーバによる状態推定を可能とするソフトウェアを設計
- 本講演では，これまでに発表者が携わった研究をご紹介します
 - 1) **ロボットの身体と運動の統合設計**
 - 2) **空気圧駆動式ロボットシステムの設計・制御**

(3) センサ機能を有するソフトアクチュエータ は2)の中で説明)

- 発表の目次

- 1) ロボットの身体と運動の統合設計

- 2) 空気圧駆動式ロボットシステムの設計・制御

ロボットの身体と運動の統合設計

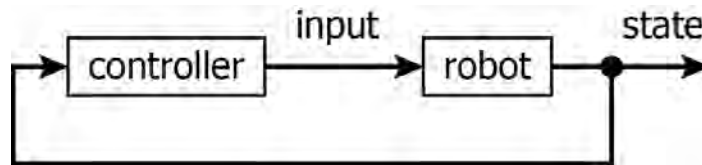
- ロボットの運動生成 & タスクパフォーマンス最大化
 - 一般的に、はじめにロボットの身体を設計、その後に運動を生成
 - 身体と運動の両方の最適化には、設計見直しなどの工数増大
- 提案：
ロボットの身体と運動を統合的に設計する方法を研究
 - ロボットの力学的拘束を満足する運動変換（岡田ら, 2013）
 - ロボットの身体と運動の統合設計（Miyazaki et al., 2016, 2017）

ロボットの力学的拘束を満足する運動変換 (岡田ら, 2013)

背景

- ロボットの運動： 身体・環境・制御系の相互作用の結果
ポテンシャル場（以下，場）を共創
場に従って運動が実現

- 場を設計： 運動と制御系を設計
 - 軌道アトラクタに基づいた自律制御系の設計法 (岡田ら, 2007)



- 時間遅れなし
- 外部指令なし

- 場の設計の課題
 - 実現可能な運動の軌道**を先に与える必要あり
 - ロボットごと・運動ごとに場を設計する必要あり

ロボットの力学的拘束を満足する運動変換 目的

- 提案方法

- (i) 既存の運動の場を変換し，実現可能な運動の軌道と制御系を同時に設計する方法
- (ii) 運動の軌道のみを変換し，これを用いて従来の制御系設計法により場を設計する方法

ロボットの力学的拘束を満足する運動変換

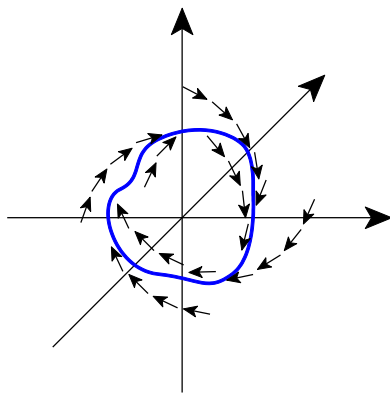
(i) 運動の場を変換する方法

- 既存の運動の場を他のロボットの場へと写像し、その場を生成するコントローラを設計

ロボット1

$$\dot{x} = F(x) + G(x)u$$

$$u = h(x)$$



写像

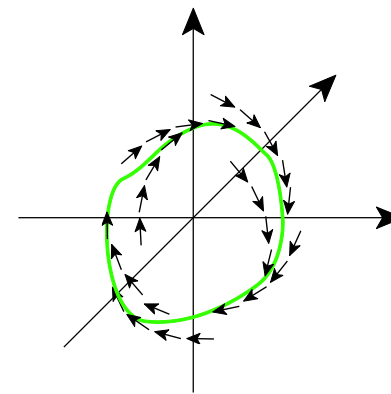
$$\xi = T(x)$$



ロボット2

$$\dot{\xi} = f(\xi) + g(\xi)\mu$$

$$\mu = \boxed{?}$$



ロボットの力学的拘束を満足する運動変換

(i) 運動の場を変換する方法

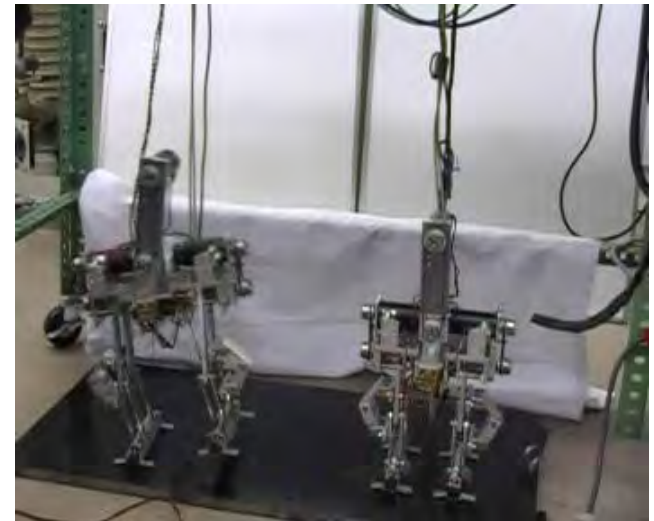
- タップダンスロボットを用いた実験検証
 - ロボットSmallの運動の場をロボットLargeの運動の場に変換

ロボットSmall



変換

ロボットLarge



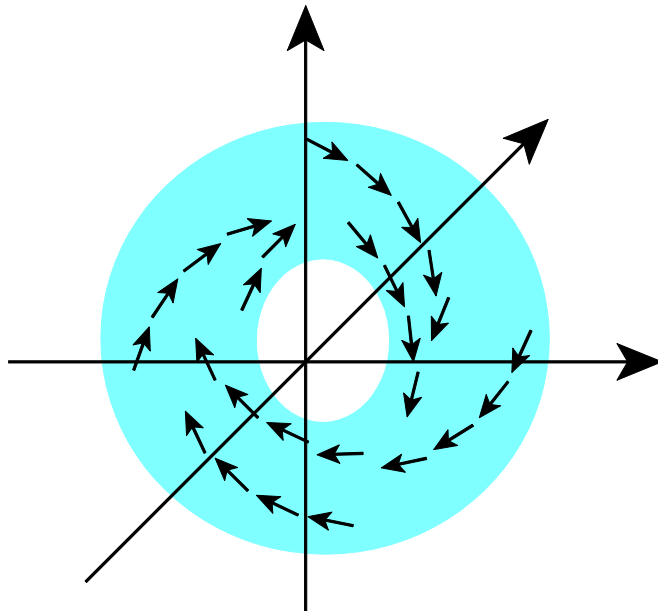
- ロボットLargeの安定な運動を実現. 運動の周期共通
- 課題 : 写像の計算量 **大**

ロボットの力学的拘束を満足する運動変換

(ii) 運動の軌道を変換する方法

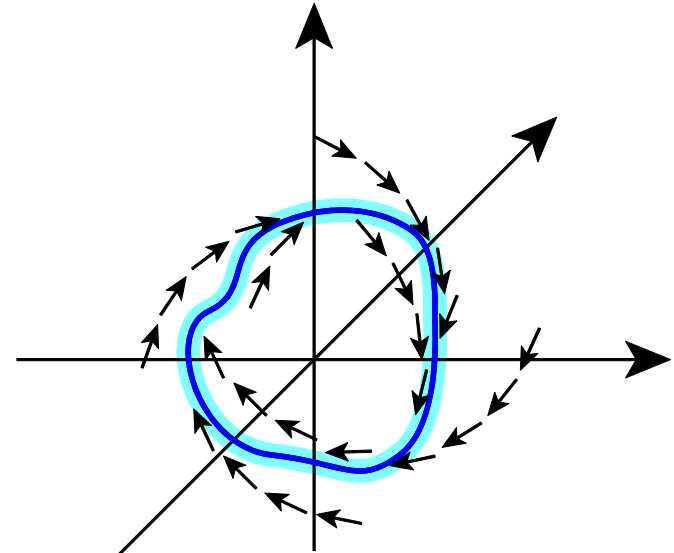
- 計算量の課題を解決するために、運動の軌道の設計に焦点

運動の場の変換



軌道周辺の空間全体で計算

運動の軌道の変換



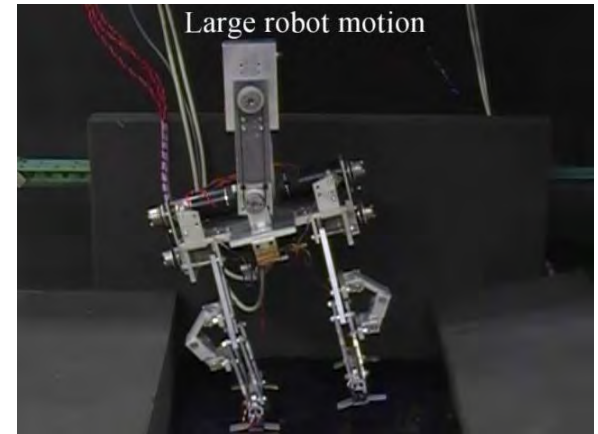
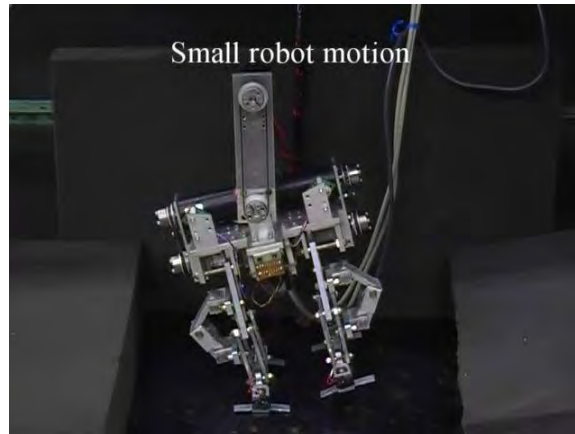
軌道上のみで計算
計算量が減少

- 人間の運動を計測・変換し、ロボットの運動の軌道を得て、これを用いて従来法で場を設計

ロボットの力学的拘束を満足する運動変換

(ii) 運動の軌道を変換する方法

- 人間の運動をタップダンスロボットの運動へ変換
 - ロボットSmallとLargeの運動を実現
 - 左右非対称な強い非線形性を有する運動

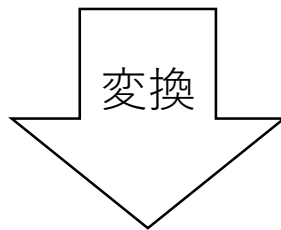


ロボットの力学的拘束を満足する運動変換

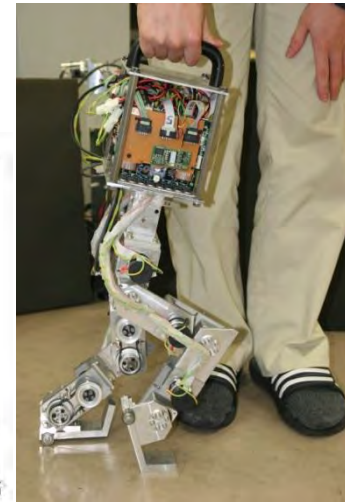
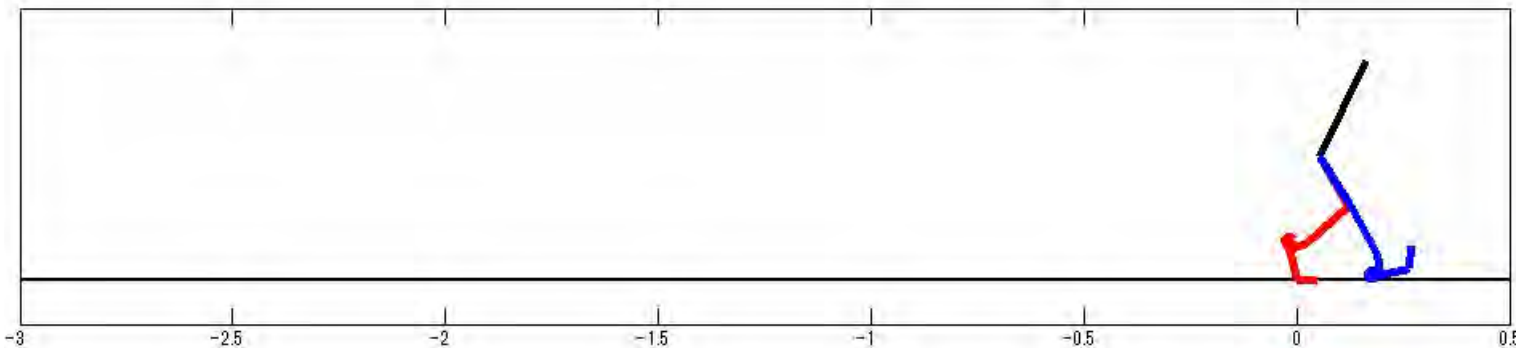
(ii) 運動の軌道を変換する方法

- 人間の運動をムーンウォークロボットの運動へ変換

- 人間のムーンウォーク



- ロボットのムーンウォーク (シミュレーション)



ロボットの身体と運動の統合設計 (Miyazaki et al., 2016, 2017)

背景

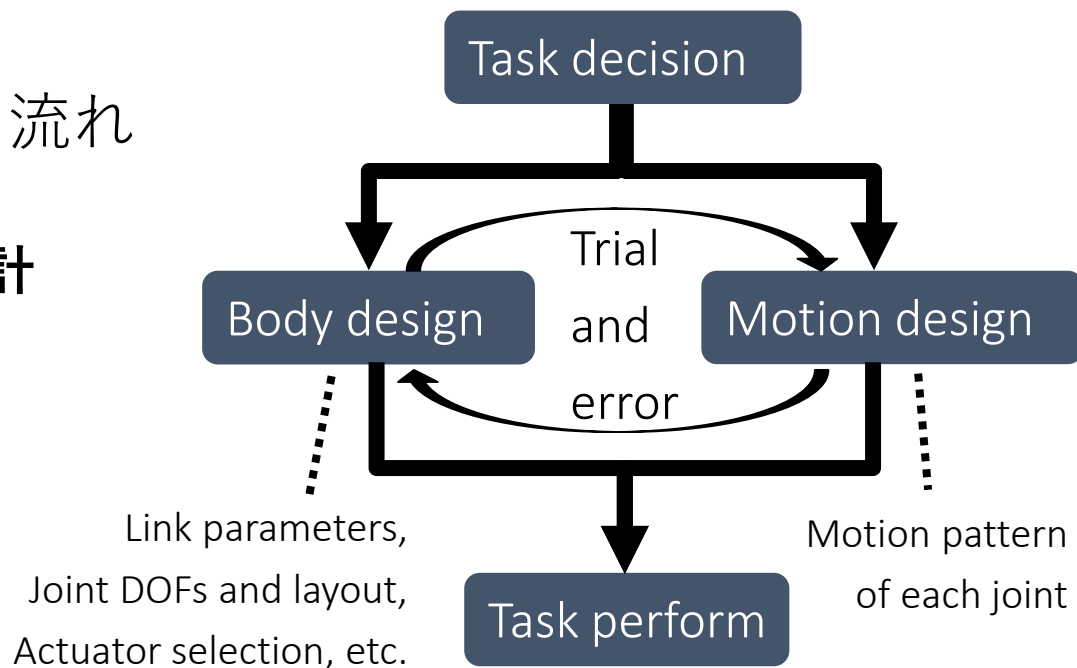
- “ロボットの力学的拘束を満足する運動変換”の設計対象：
運動の軌道 & コントローラ
 - ロボットの身体は設計対象外

- 本研究課題の設計対象：ロボットの運動と身体

- ロボットのタスク実現の流れ

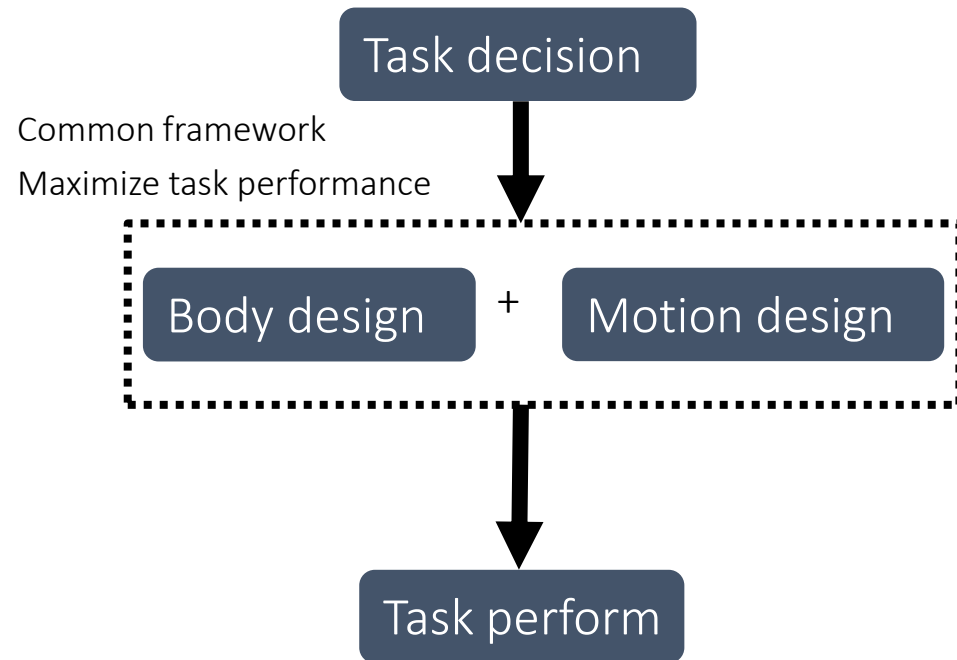
- ① 目的のタスクを設定
- ② **身体と運動を個別に設計**
(試行錯誤, 工数増大)
- ③ タスク実行

- 課題： 手順②の改善



ロボットの身体と運動の統合設計 目的

- 提案方法 : ロボットの運動と身体を統合的に設計
 - 運動と身体を共通の枠組みで設計し, **タスク性能を最大化**
 - 身体的设计で考慮すべき項目
 - リンクパラメータ
 - アクチュエータ選定
 - 関節自由度数 など
- 設計事例 : 投球ロボット

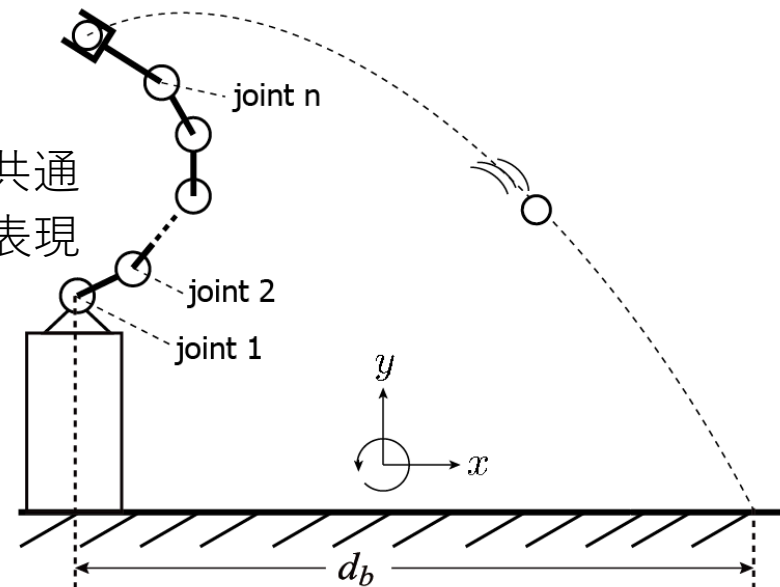


ロボットの身体と運動の統合設計

投球ロボットの関節数とリンクパラメータ設計

• 投球ロボット

- n 自由度平面シリアルマニピュレータ
- 身体設計の仮定
 - 中間リンクの構造とアクチュエータは共通
 - リンクパラメータをリンク長の関数で表現
- ボール飛距離 d_b を最大化するように、運動パターンと身体パラメータを設計



- 運動方程式 : 身体的设计変数を用いて構成
- 運動パターン : 基底関数（三角関数）で表現
- 設計変数 :

$$\xi = [\underbrace{\omega^T \quad \phi^T \quad a^T \quad \theta_0^T}_{\text{運動的设计変数}} \quad \underbrace{\ell \quad n}_{\text{身体的设计変数}}]^T$$

(基底関数のパラメータ) (リンク長 & 関節自由度数)

ロボットの身体と運動の統合設計

投球ロボットの関節数とリンクパラメータ設計

- 設計変数の計算アルゴリズム
 - 逐次二次計画法 (SQP) で最適化

$\max_{\xi, t=t_v} d_b(\xi)$ ボール飛距離の最大化

subject to

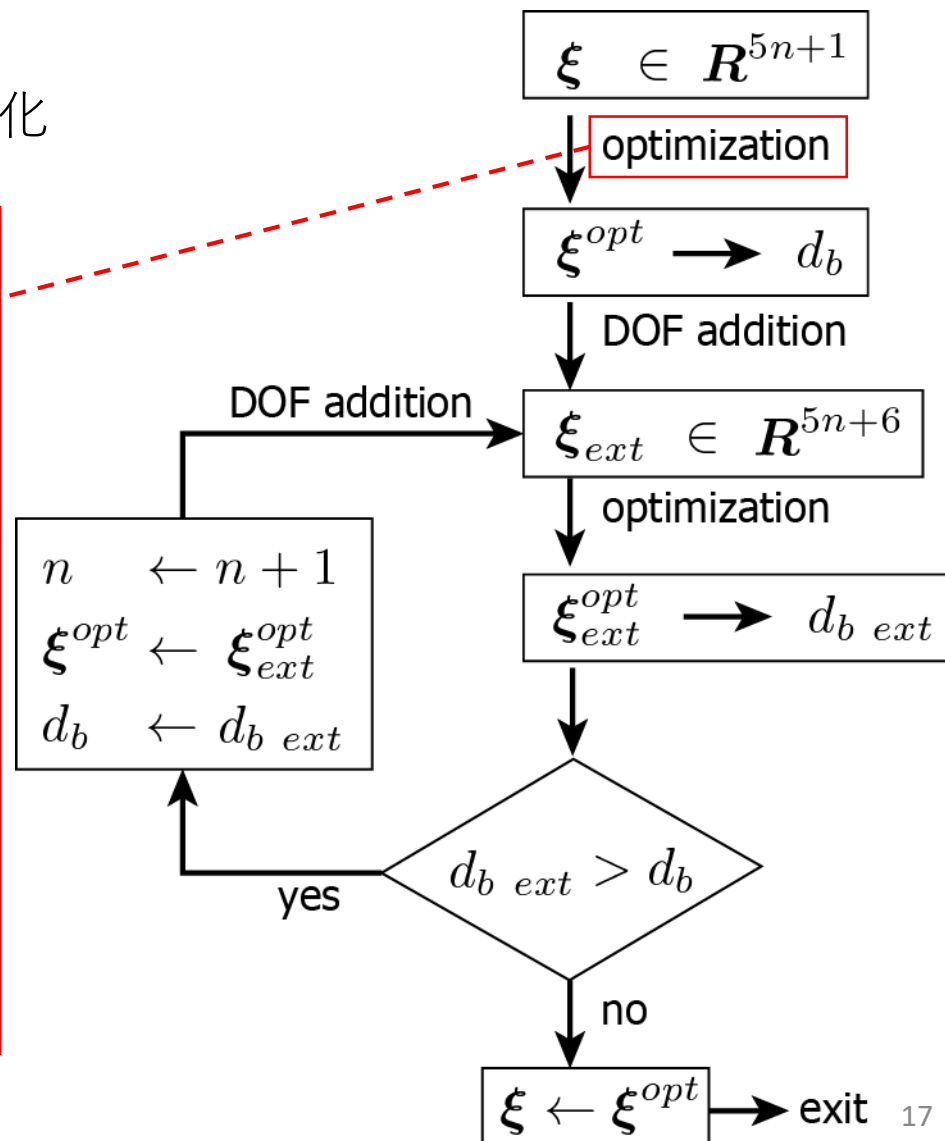
$$\frac{-\phi_i + \pi/2}{\omega_i} < \frac{-\phi_{i+1} + \pi/2}{\omega_{i+1}} \quad \text{角速度波形の伝播}$$
$$(i = 1, \dots, n-1)$$

$$\theta_{min} \leq \theta(\xi) \leq \theta_{max}$$

$$\tau_{min} \leq \tau(\xi) \leq \tau_{max} \quad \text{角度・角速度・トルクの制限}$$

$$V_{min} \leq V(\xi) \leq V_{max}$$

$$d_c \leq \Delta d(\xi) \quad \text{衝突の回避}$$
$$p_{hy min} \leq p_{hy}(\xi)$$



ロボットの身体と運動の統合設計

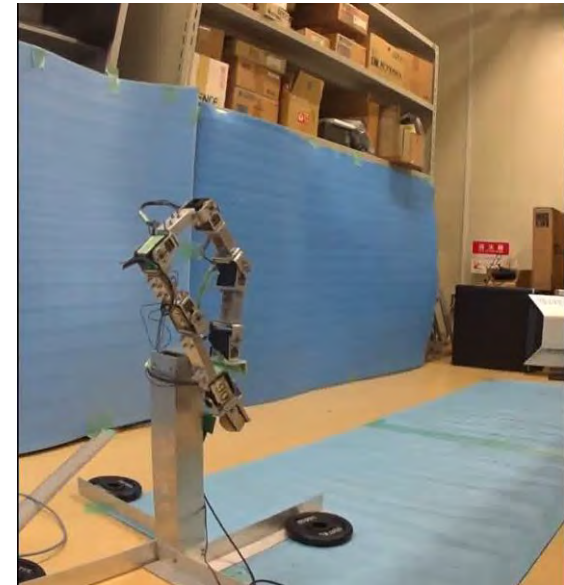
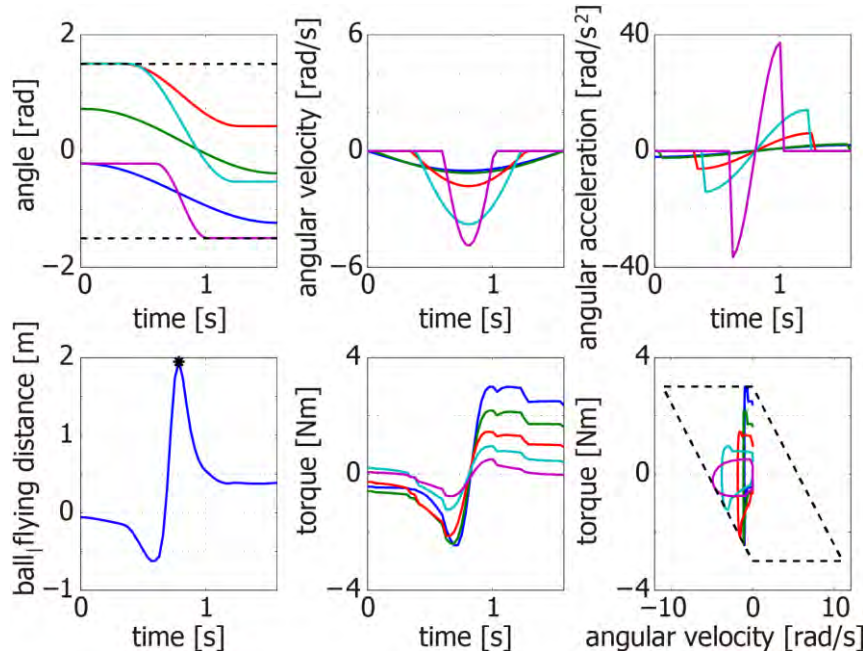
投球ロボットの関節数とリンクパラメータ設計

- ボール飛距離の計算結果

DOF	1	2	3	4	5	6
Distance [m]	0.98	1.30	1.73	1.87	1.95	1.92

- 5自由度投球ロボットの運動パターン

中間リンク長さ : 0.10 m
手先リンク長さ : 0.20 m



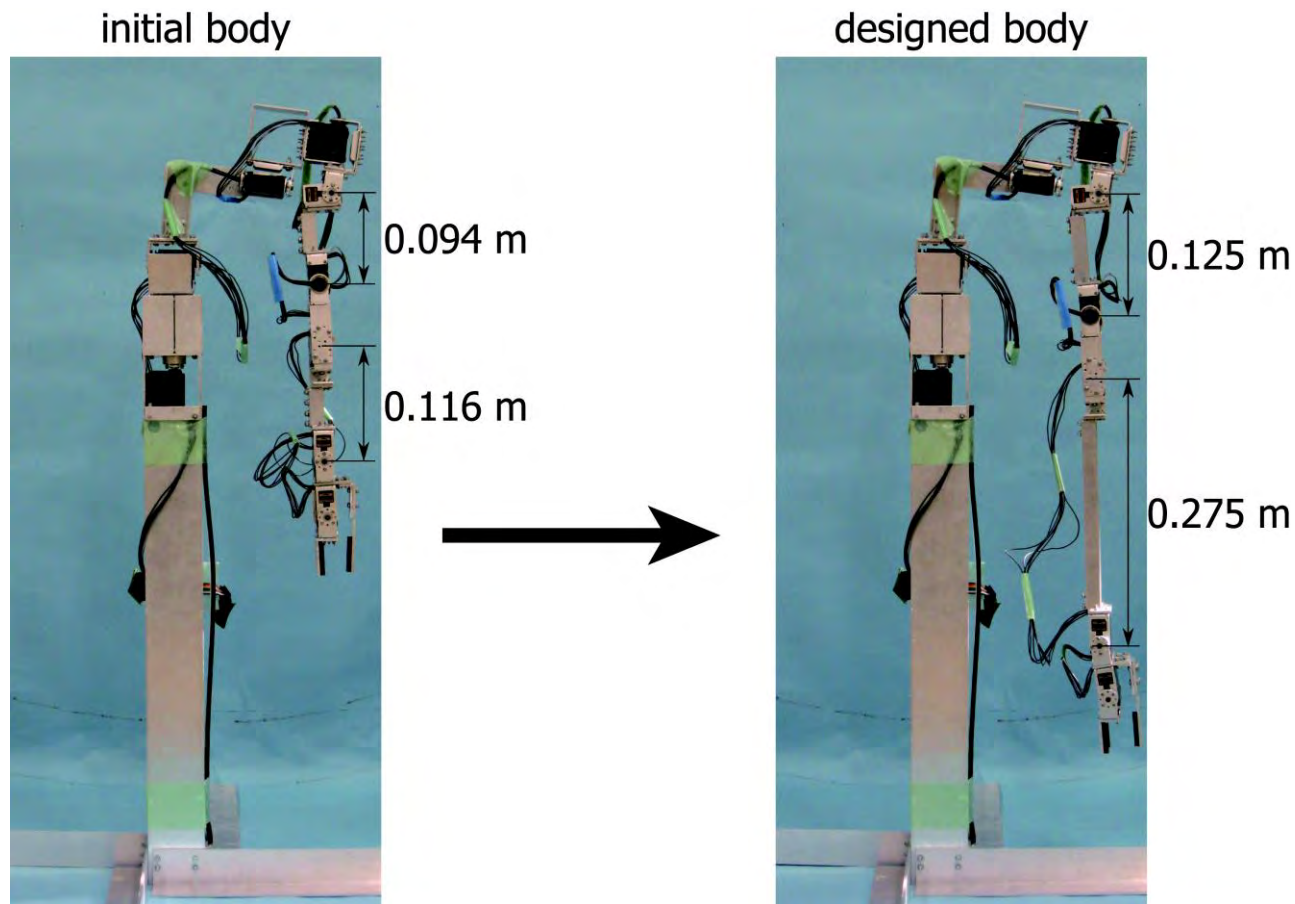
実験の
飛距離
1.85 m

- ボール飛距離を最大化する投球ロボットの身体と運動が設計された**

ロボットの身体と運動の統合設計

空間マニピュレータ型投球ロボットの設計

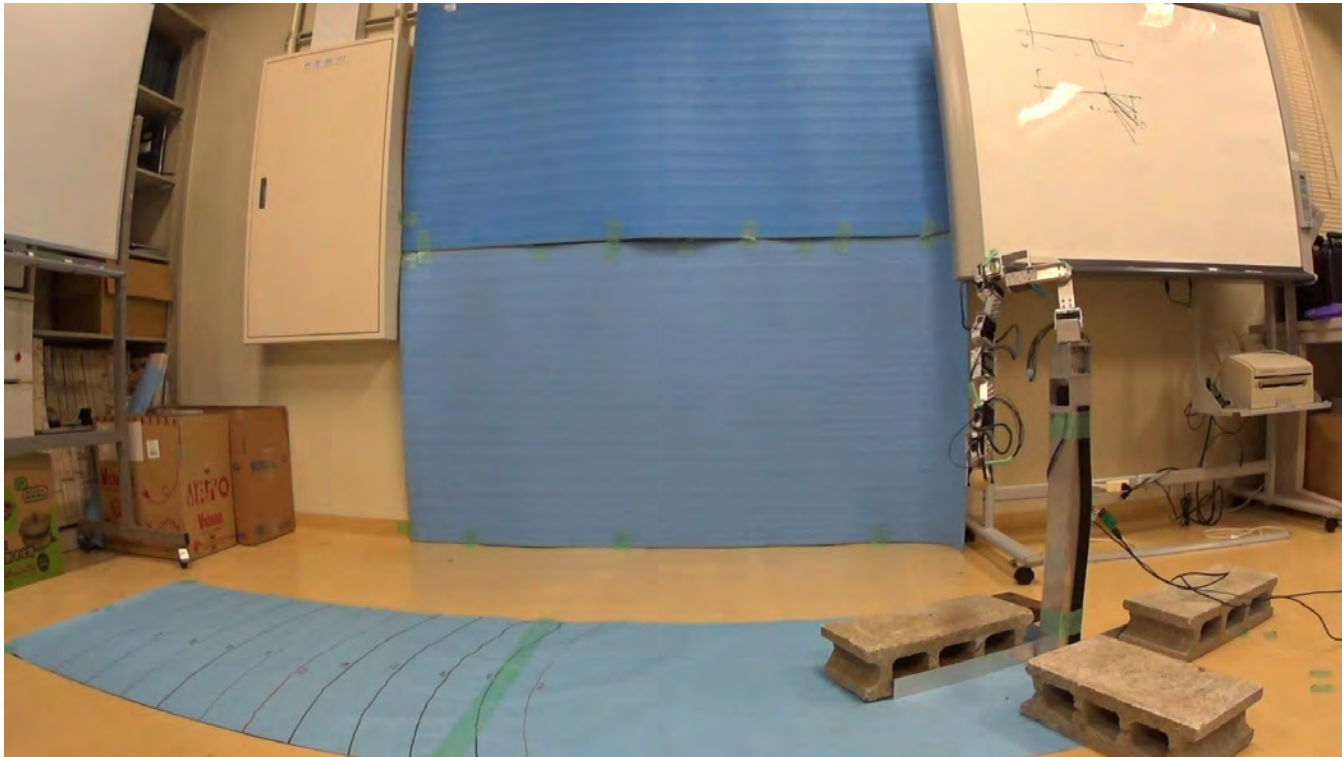
- 9自由度空間マニピュレータの身体と運動を設計した事例
 - 身体的设计パラメータ (アームのリンク長) が变化



ロボットの身体と運動の統合設計

空間マニピュレータ型投球ロボットの設計

- 投球の実験
 - 初期身体：運動を設計



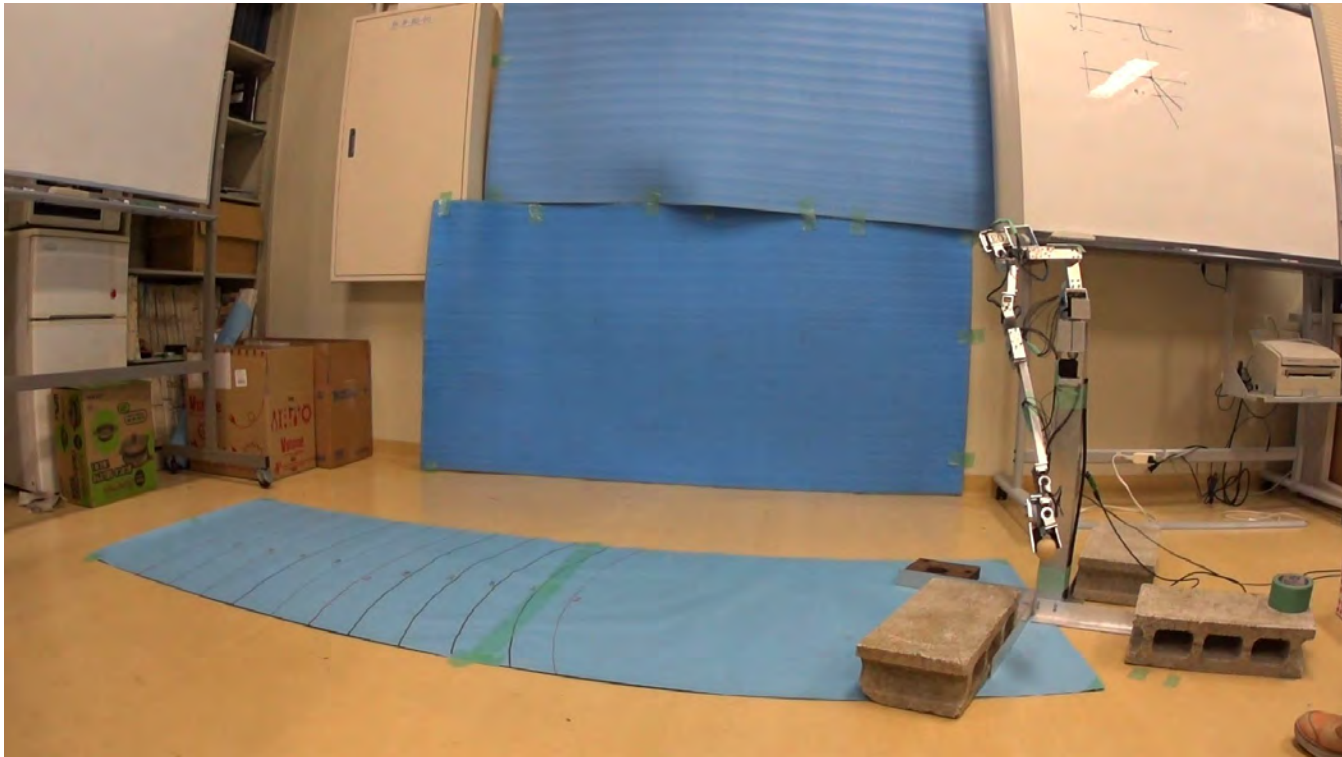
- ボール飛距離　：　1.5 m

ロボットの身体と運動の統合設計

空間マニピュレータ型投球ロボットの設計

- 投球の実験

- 設計した身体： 運動と身体を設計



- ボール飛距離　：　1.9 m
 - 提案方法により，投球タスクのパフォーマンスが改善した

- 発表の目次

- 1) ロボットの身体と運動の統合設計

- 2) 空気圧駆動式ロボットシステムの設計・制御

空気圧駆動式ロボットシステムの設計・制御

- 空気圧アクチュエータの特長
 - 軽量でダイレクトドライブ（直接駆動）が可能
 - 空気の圧縮性を利用したバックドライバビリティ（逆駆動性）
 - ⇒ 柔らかで安全な力を発揮
 - ⇒ 手術用デバイスやパワーアシストシステムなど人間と接触する機器の駆動に適している
- 空気圧で駆動される人間機械調和型ロボットシステム（これまでの開発事例）
 - 工場作業者の身体負荷を軽減する荷重支持アーム（宮嵯ら, 2016, 2017）
 - 空気圧ゴム人工筋を用いた歩容アシストスーツ（Miyazaki et al., 2019, 2020, 2021), (Tagami et al., 2020), (Kawase et al., 2021)
 - 空気圧駆動式手術支援ロボットデバイスの設計・制御（Iwai et al., 2019, 2021), (Mikada et al., 2020), (Kanno et al., 2020)

空気圧ゴム人工筋を用いた歩容アシストスーツ 背景

- 様々な使用目的でパワーアシストデバイスが開発されている例：
 - モータ駆動式スーツ (Sankai et al., 2011)
 - ワイヤ駆動式スーツ (Asbeck et al., 2014)
 - 空気圧駆動式スーツ (Kobayashi et al., 2002)

など

- 装着者とデバイスの動作同期にセンサを使用
 - 多種類・多数のセンサを使用 → 動作検知精度向上
 - ただし、デバイスの着用時間増加, キャリブレーション煩雑化
- ユーザビリティの観点： 装着するセンサは少ないほど良い

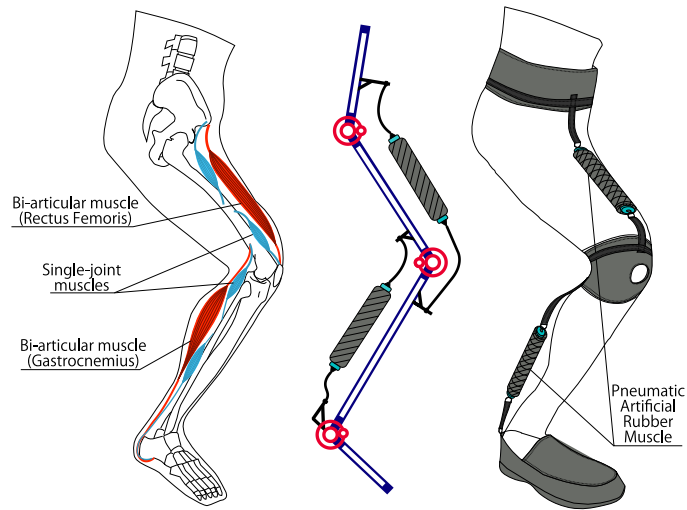
空気圧ゴム人工筋を用いた歩容アシストスーツ 背景

- 先行研究：空気圧ゴム人工筋
（PAM：Pneumatic Artificial Muscle）
のバックドライバビリティを利用した
歩行アシスト装置 (Kanno et al., 2015)
 - PAMの内圧を装着者から離れた場所の
圧力センサで計測
 - 圧力の時間微分値をアシストタイミングの
検知に利用
 - センサの装着不要
- 剛体リンク機構，堅牢な外骨格
 - メリット：大きなアシスト力を発生可能
 - デメリット：装着者身体を拘束，装置重量増大



歩行アシスト装置

空気圧ゴム人工筋を用いた歩容アシストスーツ 目的



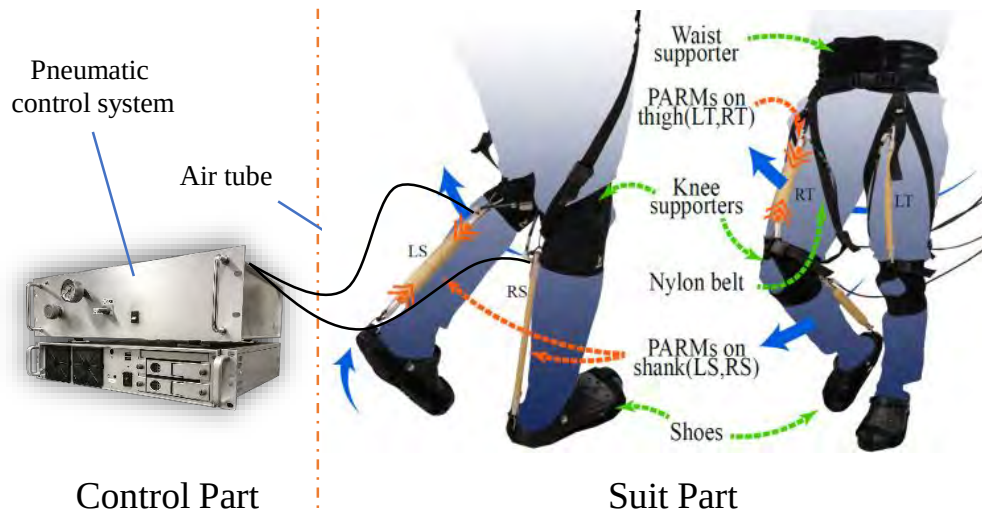
PAMの装着位置と補助される筋肉部位

課題解決のアイデア



軽量柔軟かつセンサを装着しない
アシストスーツとその制御法を提案

1. 軽量柔軟な部品のみで構成
→装着者身体を拘束しない
→容易に着脱可能
2. 二関節筋を考慮した補助
→少数の駆動部で多関節を補助
3. PAMの内圧変化から歩行検知
→センサ非装着（先行研究と同じ）
→水中でも使用可能



内骨格型空気圧式歩容アシストスーツ

空気圧ゴム人工筋を用いた歩容アシストスーツ アシスト制御則



アシスト歩行の様子

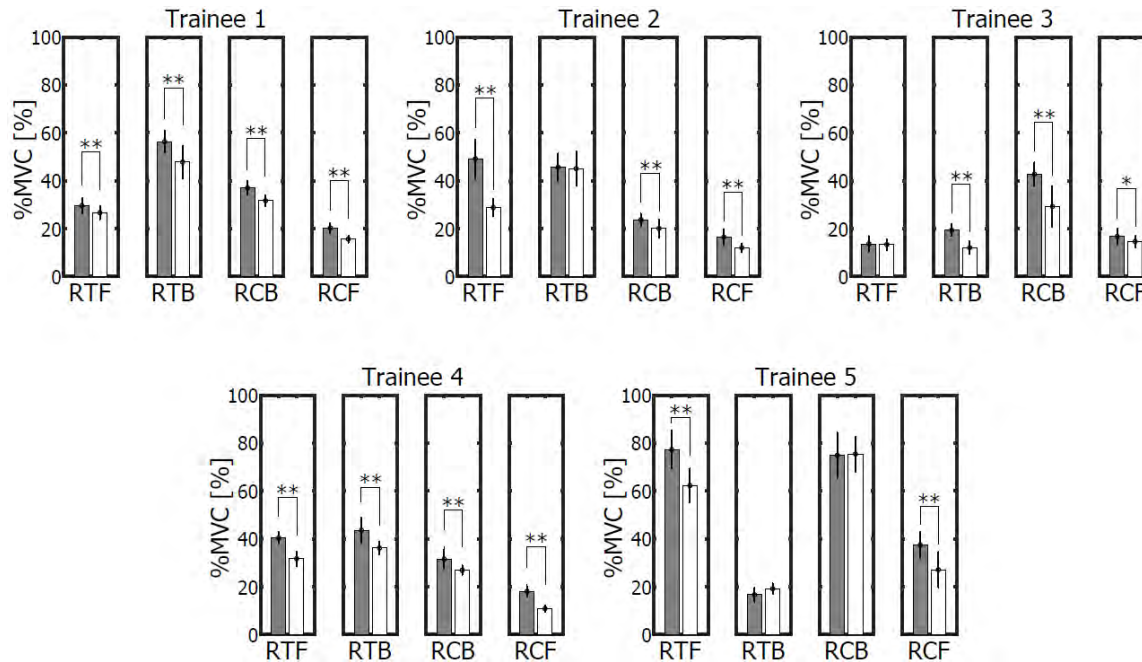
- 1) Resting (圧力 : 150 kPa)
- 2) Start walking
- 3) Detect gait phase (閾値 : 内圧微分値-30 kPa/s)
- 4) Assist walking (空気圧ゴム人工筋に圧力印加 : 400 kPa)
- 5) Non-detection time 1.1 s (誤検知を防止)

3)～5)を周期的に繰り返し、連続的なアシスト歩行を実現

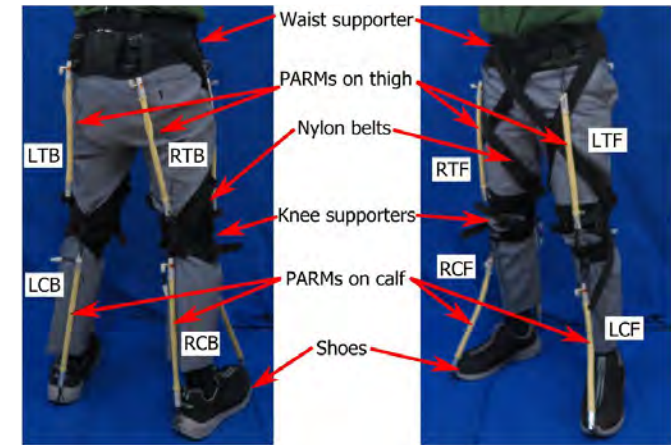
空気圧ゴム人工筋を用いた歩容アシストスーツ アシスト効果の検証

• 歩行アシスト実験 (Miyazaki et al., 2019)

- 5人の被験者に対し、アシスト効果を検証。脚部の筋電位（EMG）を計測
- アシストなし vs アシストあり で比較



EMG計測実験の結果
(黒：アシストなし，白：アシストあり)

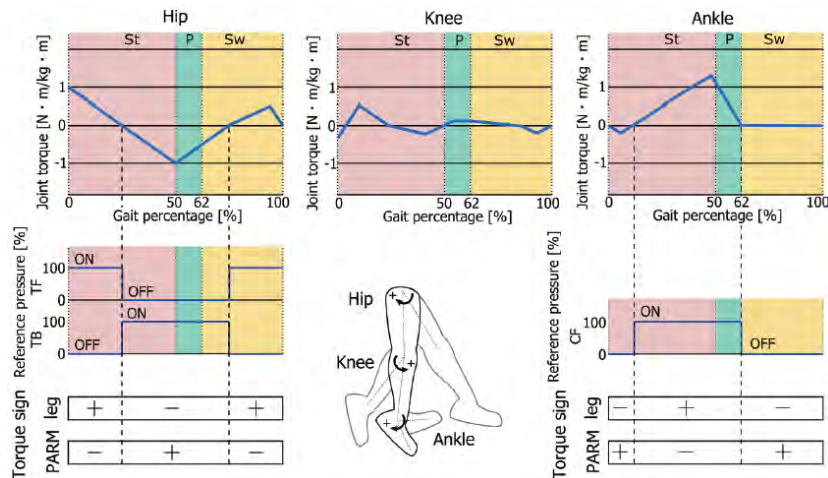


PAMを増設（片脚2つ⇒4つ）

20チャンネル中，16チャンネルで
EMGの大きさが有意に減少

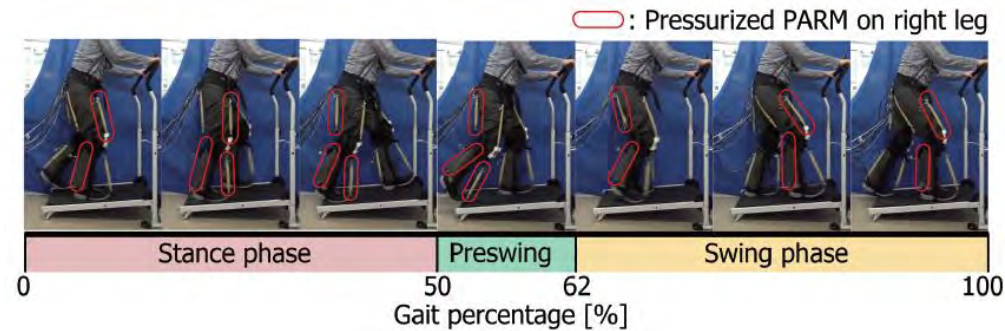
空気圧ゴム人工筋を用いた歩容アシストスーツ 歩行の負荷増大トレーニング (Miyazaki et al., 2020)

- 歩行周期中の脚部関節トルクの方角を調べ、
負荷を増大するタイミングで各PAMを駆動

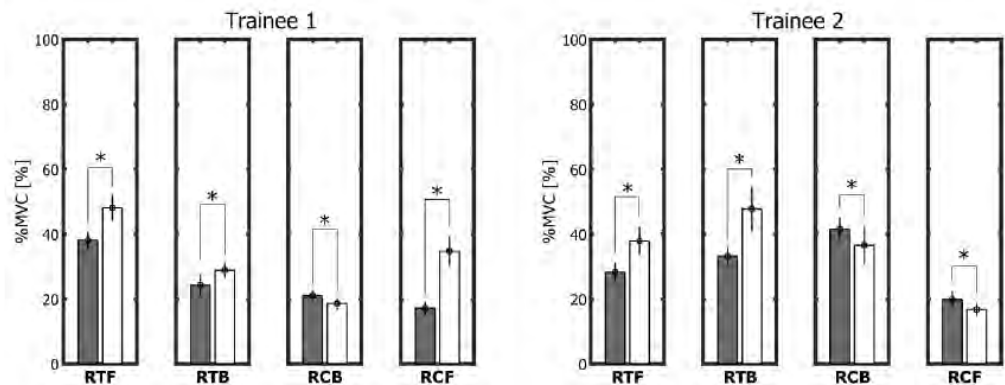


脚部関節トルクとPAMの目標圧力

- EMG計測： 被験者2名
- 大腿部のEMG増大を確認

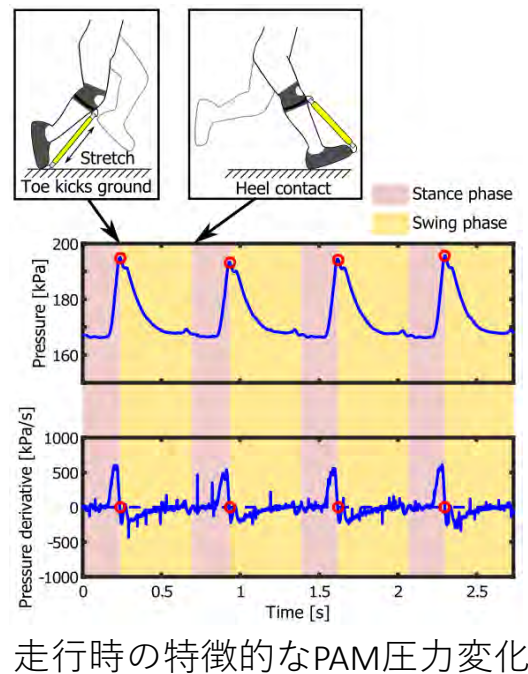
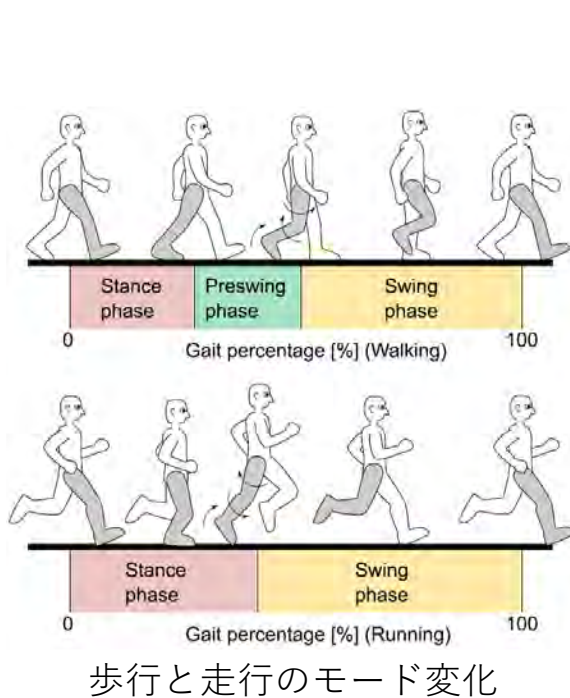


歩行負荷増大トレーニングの様子



EMG計測実験の結果
(黒：スーツなし、白：スーツの負荷あり)

空気圧ゴム人工筋を用いた歩容アシストスーツ 走行アシスト (Miyazaki et al., 2021)



- 歩行と異なるモード：**走行**
- 走行用の検知アルゴリズムを提案
- 走行アシストの効果検証
 - 被験者： 4名
 - 計測チャンネル14/16で有意に**EMG減少**

	LTF	LTB	LCB	LCF
Trainee 1	-9.2 ** (53.4 → 44.2)	-12.2 ** (45.7 → 33.5)	-3.5 ** (25.9 → 22.4)	-15.2 ** (30.6 → 15.4)
Trainee 2	-80.3 ** (123.6 → 43.3)	-64.1 ** (130.9 → 66.8)	-4.3 ** (55.3 → 51.0)	-1.4 ** (21.5 → 20.1)
Trainee 3	+4.8 n.s. (86.6 → 91.4)	-10.7 ** (39.8 → 29.1)	-10.5 ** (59.2 → 48.7)	-17.1 ** (49.0 → 31.9)
Trainee 4	-5.7 ** (80.0 → 74.3)	-8.7 ** (33.6 → 24.9)	+2.7 * (32.8 → 35.5)	-7.7 ** (36.5 → 28.8)

%MVC [%]

EMG計測実験の結果
(青：アシストで減少，赤：増加) 30

空気圧ゴム人工筋を用いた歩容アシストスーツ 空気圧回路系のダイナミクスをモデル化 (Tagami et al., 2020)

• スーツの空気圧回路系

- スーツのPAM圧力はバルブ直下で計測

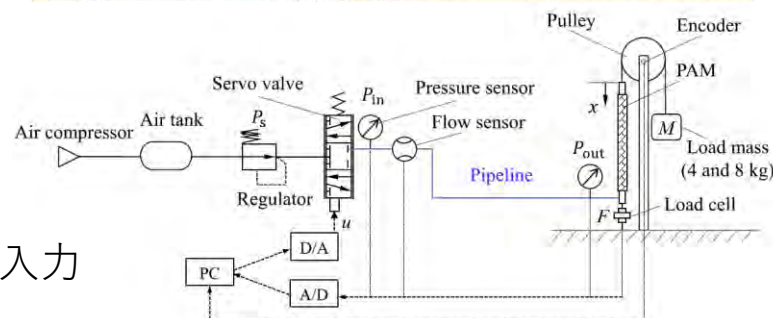
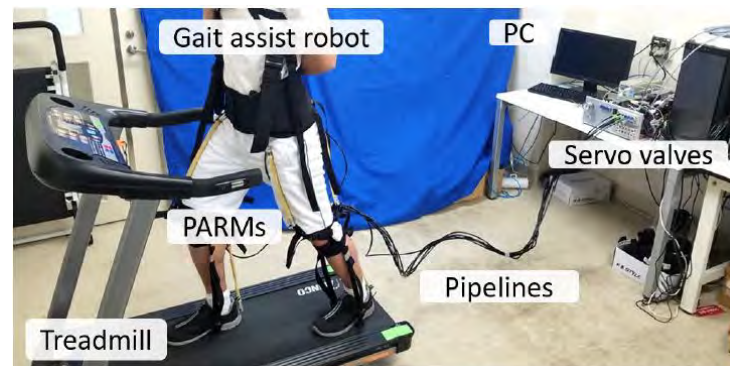
- PAM内の圧力と誤差あり → 解消したい
- 要因：バルブ、PAM、管路の特性

- 圧力制御性能を改善するための空気圧回路モデルを提案

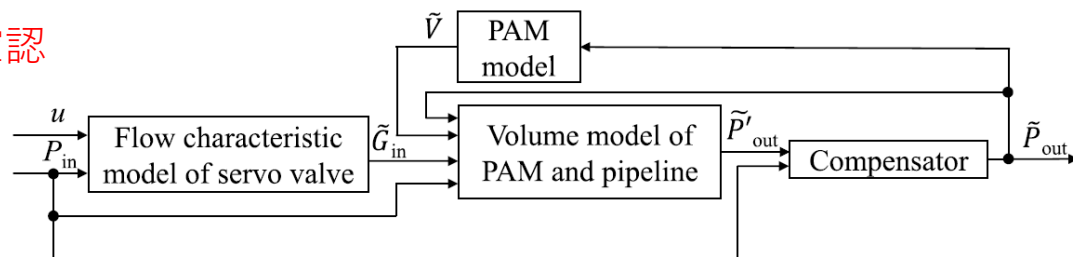
- PAM内圧力を推定し、制御に利用

- 実験評価

- 周波数1.5Hz, 負荷質量8kgで正弦波圧力を入力
- 従来制御誤差： 約45 kPa
- 提案制御誤差： 約20 kPa
- 圧力制御の応答性向上を確認

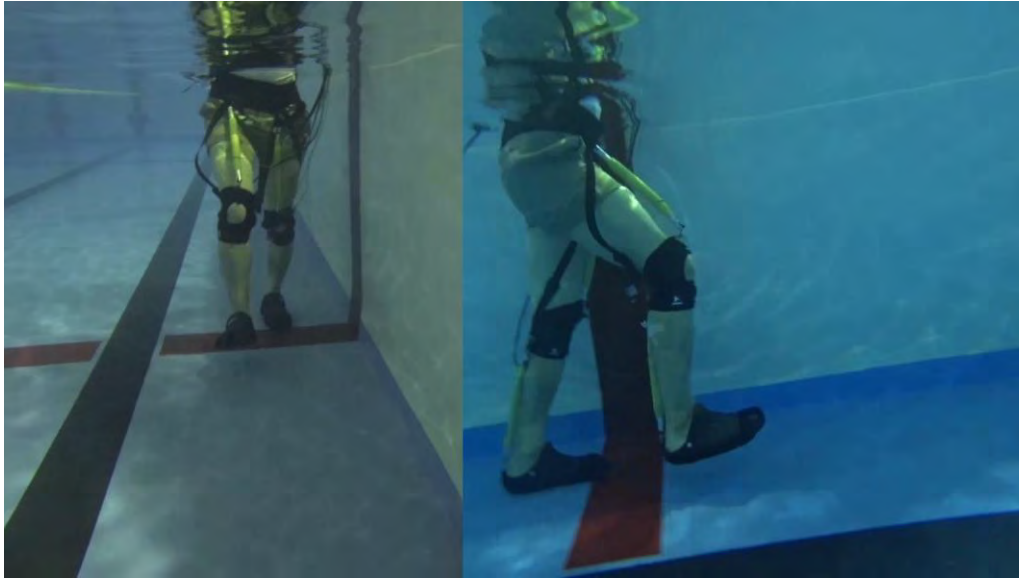


アシストスーツの空気圧回路系

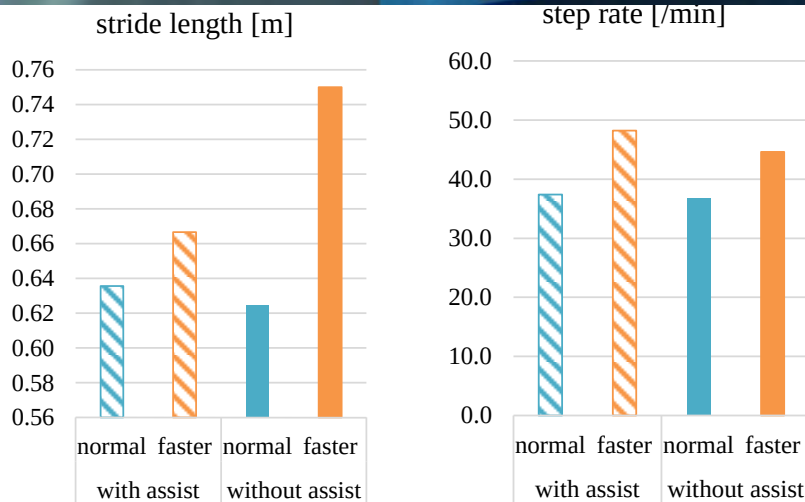


空気圧回路モデルのブロック線図

空気圧ゴム人工筋を用いた歩容アシストスーツ 水中歩行実験による環境耐性検証 (Miyazaki et al., 2019)



水中歩行実験の様子



歩幅の比較 (単位: m)

歩行周波数 (単位: /min)

実験結果

- 水中アシスト歩行が可能
- 2種類の歩行速度で計測
- 速い歩行のとき、歩幅が小さく歩行率が高い
 - 水の抵抗と補助力により特異な歩容を獲得した?

空気圧ゴム人工筋を用いた歩容アシストスーツ マススレーブ型動作教示システム (Kawase et al., 2020)

システムの
動作
(予測なし)

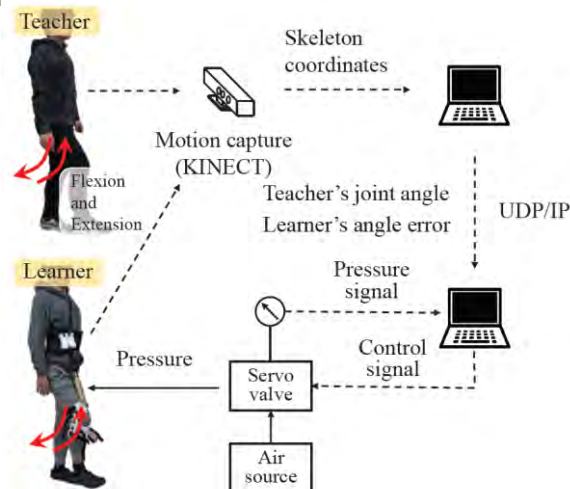


- 運動教示にアシストスーツを使用
- 教師の運動を学習者に視覚的・力覚的に伝える
- 教師・学習者の姿勢はモーションキャプチャシステムKinectにより計測し、位置制御に用いる
- 当初開発したシステムでは教師 → 学習者の遅れが約0.4秒
- 視覚・力覚を同時に感じるためには約0.1秒以下にする必要がある

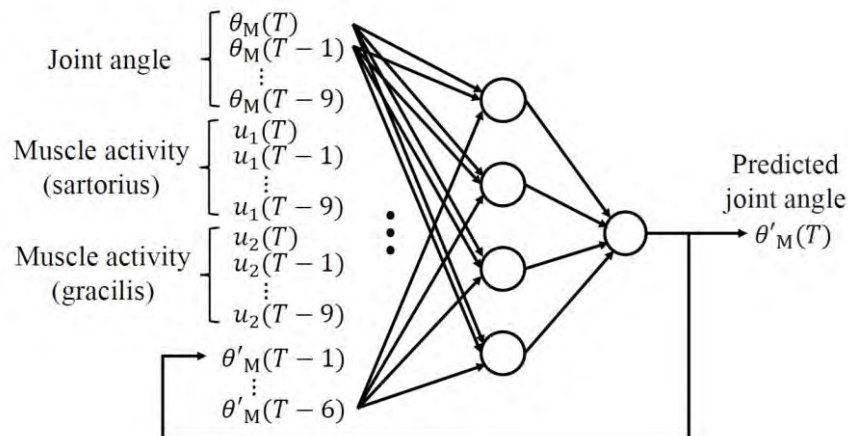


教師の運動を約0.3秒前に
予測する手法を開発

システム
概要

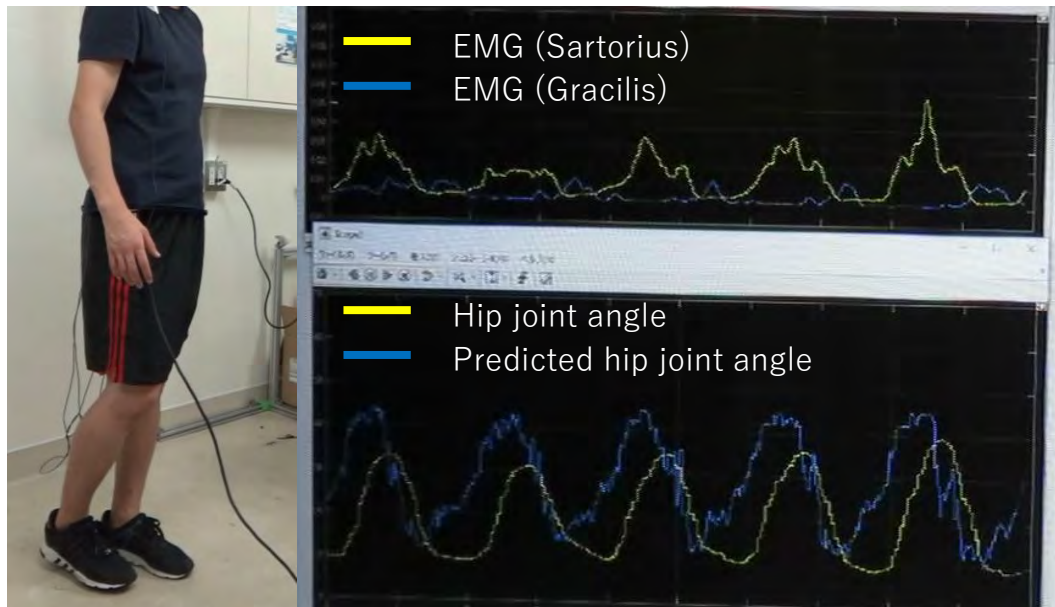


空気圧ゴム人工筋を用いた歩容アシストスーツ マススレーブ型動作教示システム

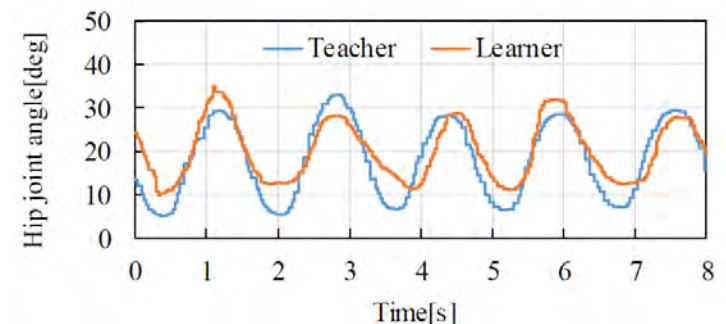


予測に用いるニューラルネットワーク

- 筋電位による動作予測
 - リカレントニューラルネットワークにより、過去0.2秒の筋活動と関節角度から0.3秒後の関節角度を予測
- オンラインの予測に成功
- オフライン実験では
アシストスーツの遅れを
0.1秒程度にまで減少



オンライン予測の結果



予測した関節角度による制御を用いた場合の
教師と学習者の関節角度

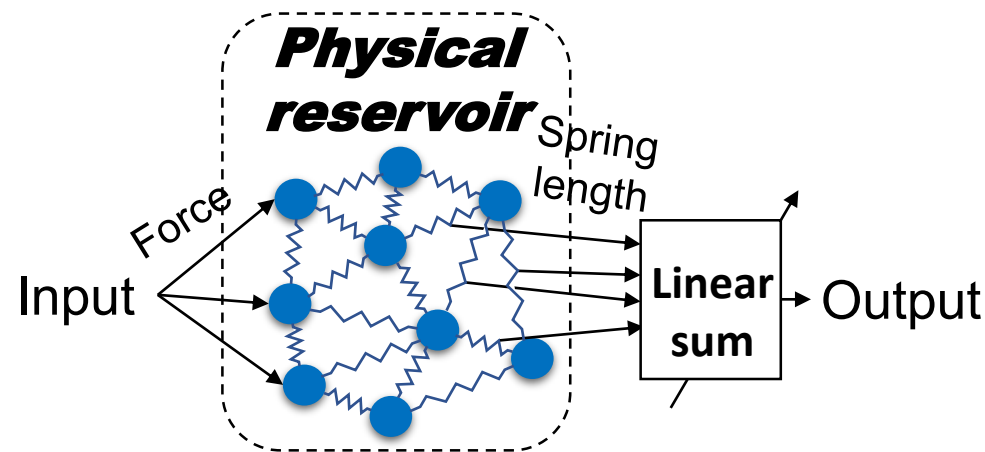
空気圧ゴム人工筋を用いた歩容アシストスーツ 空気圧リザーバーコンピューティングによる推定・制御

- リザーバーコンピューティング

- リザーバー：ニューロンがランダム結合したニューラルネットワーク
- 過去の入力を反映した多様な信号を生成

- 物理リザーバーコンピューティング

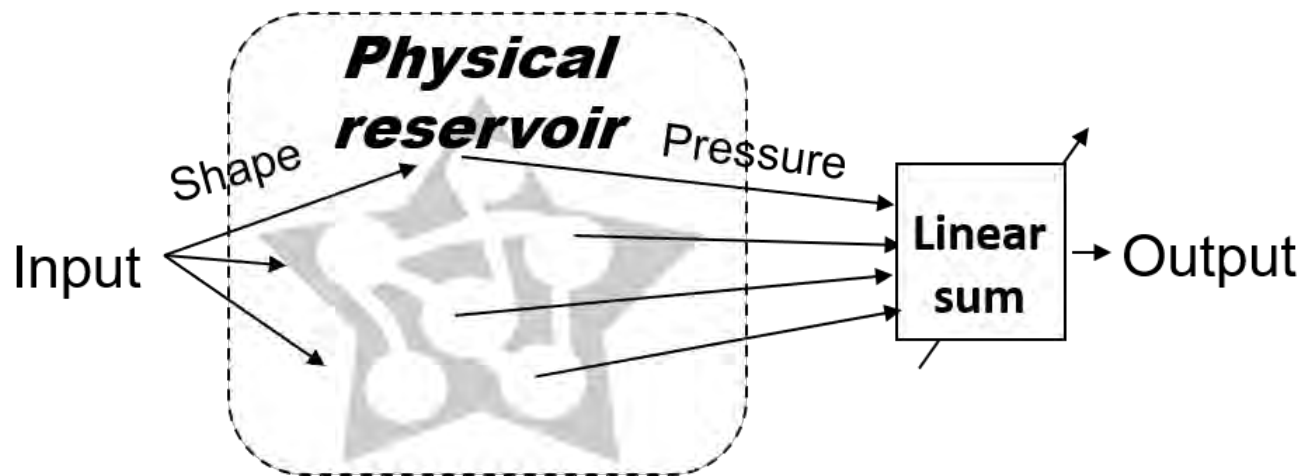
- リザーバー部を複雑な非線形応答を起こす物理系に置き換えた手法
- 物理リザーバー：ばね・質量系，光学系，量子系，など
- 計算の主要部分をCPUではなく物理系に委ねるため低消費電力



物理リザーバーコンピューティング
(ばね・質量系)

空気圧ゴム人工筋を用いた歩容アシストスーツ 空気圧リザーバーコンピューティングによる推定・制御

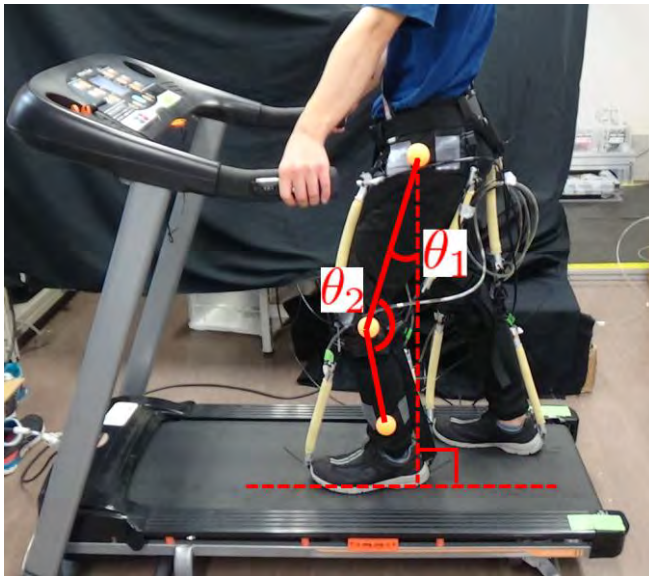
- 空気圧リザーバーコンピューティング (Kawase, et al., 2021)
 - 新たな物理リザーバーコンピューティングの手法として、配管で繋がれた空気室を設けたシステムを物理リザーバーとする方法を提案
 - システムの変形時、空気室で生じる内圧変化を計算資源として利用
- 適用事例として、歩容アシストスーツに実装



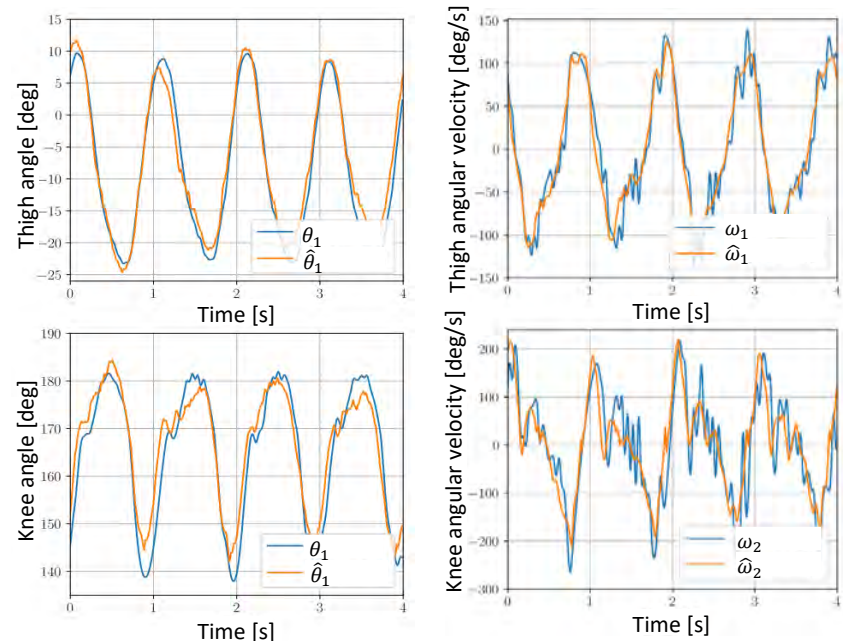
空気圧リザーバーコンピューティング

空気圧ゴム人工筋を用いた歩容アシストスーツ 空気圧リザーバーコンピューティングによる推定・制御

- 歩容アシストスーツの運動状態推定実験
 - スーツに含まれる8本のPAMと管路で空気圧リザーバーを構成
 - リザーバー内に約100 kPaの圧力を印加し密閉
 - 圧力変化から歩行時の大腿部と膝部の関節角度・角速度を推定
 - 歩容モード（歩行 or 走行）の推定にも成功



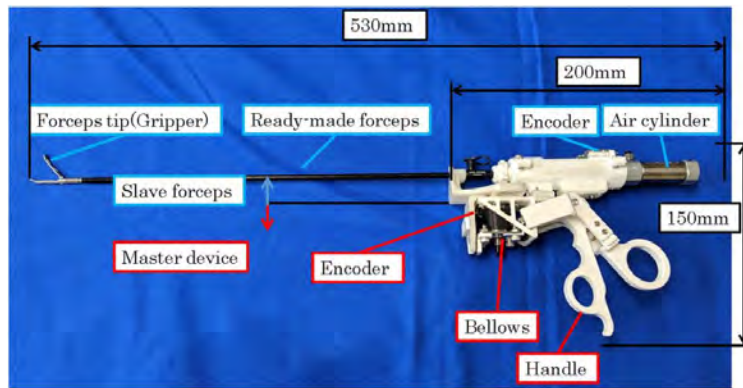
実験の様子（ θ_1 : 腰角度, θ_2 : 膝角度）



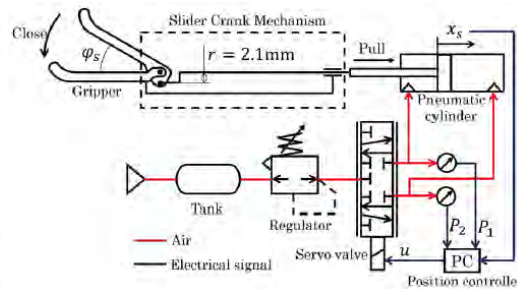
腰・膝の角度と角速度の推定結果

空気圧駆動式手術支援ロボットデバイスの設計・制御 把持トルクを増幅し提示する手術鉗子 (Iwai et al., 2019)

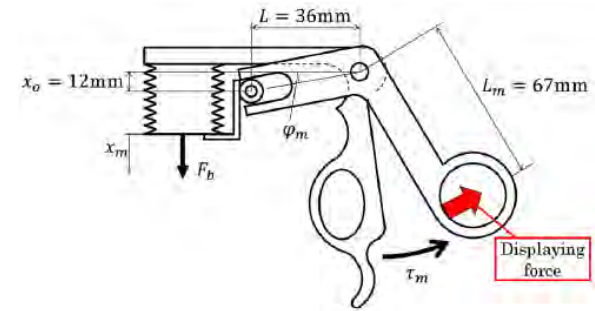
- 手術の安全性向上のために、先端把持トルクを推定し、術者が持つ**ハンドル部へ増幅トルクを提示**する鉗子
 - 空気圧から把持トルク推定： 推定誤差約7 mNm



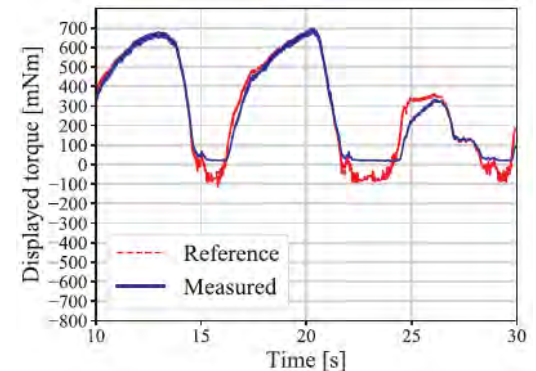
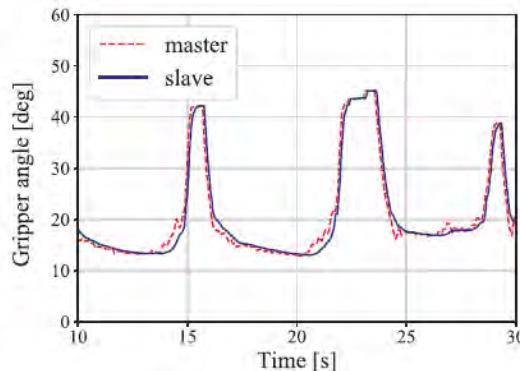
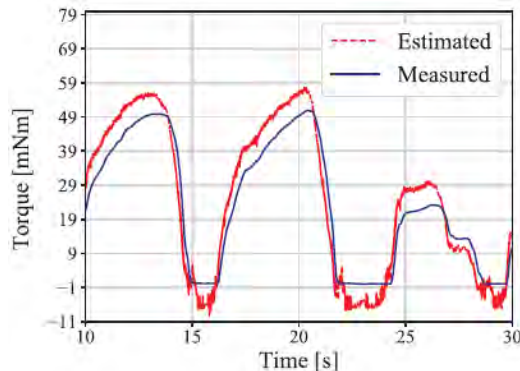
マスタスレーブ体型鉗子



スレーブ鉗子



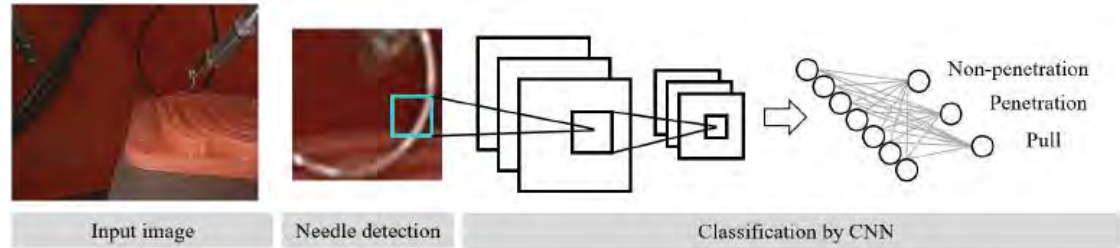
マスタデバイス



制御実験の結果（左：把持トルク，中央：角度，右：ハンドルへ提示するトルク）

空気圧駆動式手術支援ロボットデバイスの設計・制御 術者と協調する手術ロボットの縫合支援 (Mikada et al., 2020)

- 外科手術の完全自動化は難しい → 半自動化（人と協調）



縫合タスクの状態推定（YOLOv3とCNNを使用）

- 縫合タスクを例に,
1マスタ & 2スレーブ
でロボットを半自動制御
 - 内視鏡画像とYOLOv3, CNNを用いて, 針の貫通状態・引張状態を推定
 - 1マスタを人が操作し, 1スレーブがそれに追従
 - もう一つのスレーブは針の推定状態からタスクの進行度を判定し, 自動で動作（針の引き抜き & 受け渡し）

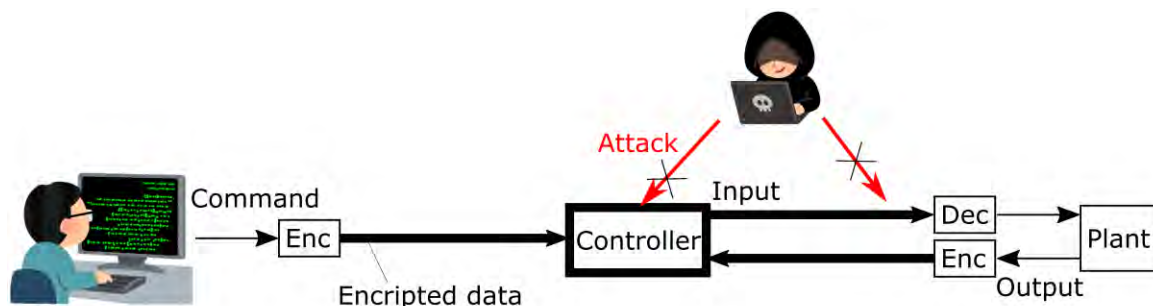
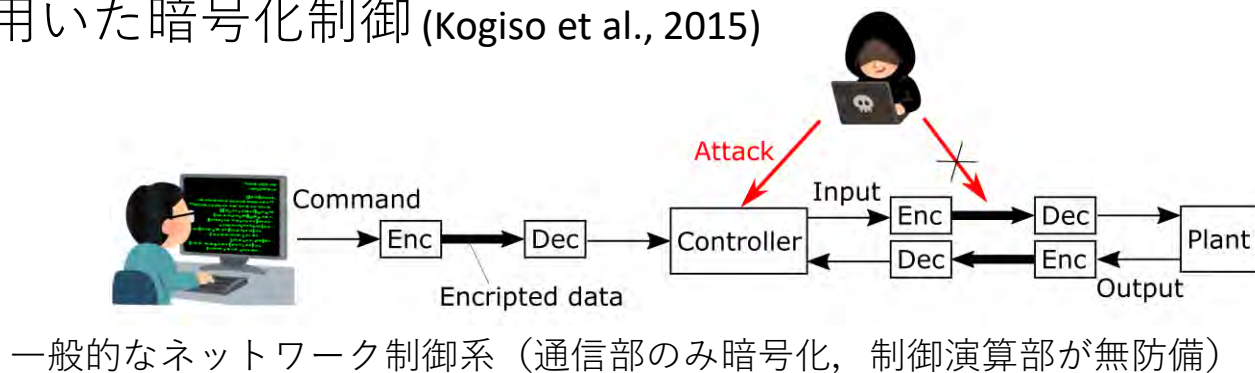


半自動縫合タスク実験の様子 39

空気圧駆動式手術支援ロボットデバイスの設計・制御 力帰還型バイラテラル暗号化制御 (宮寄ら, 2021)

- ネットワーク化制御系：
サイバー攻撃対策，セキュリティ確保は重要
 - 制御演算部への攻撃：制御器内部の情報窃盗，
制御系の不正操作，制御対象の破壊 など (Teixeira et al., 2012)
- 暗号化制御：制御器内の演算やパラメータ情報などを秘匿化
 - Ex. ElGamal暗号を用いた暗号化制御 (Kogiso et al., 2015)

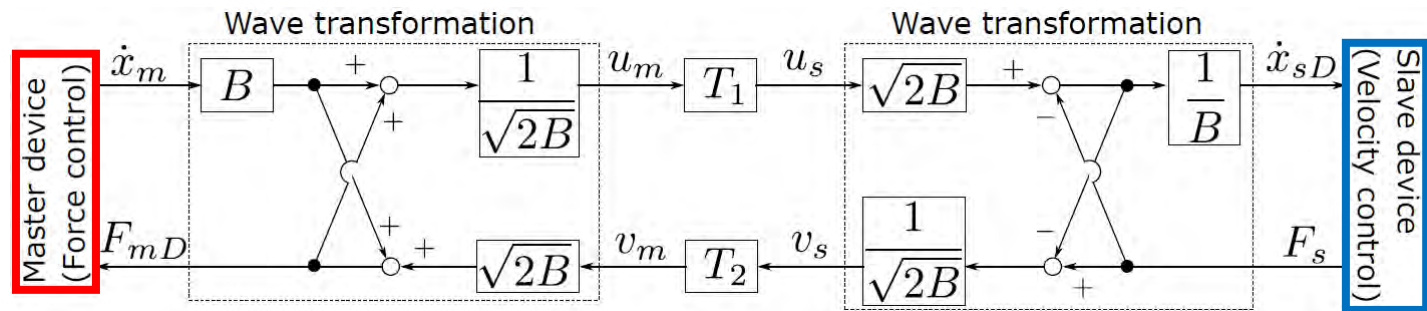
- 一対の制御対象と
制御器を含む
制御系について
の検証が主に実施
されている



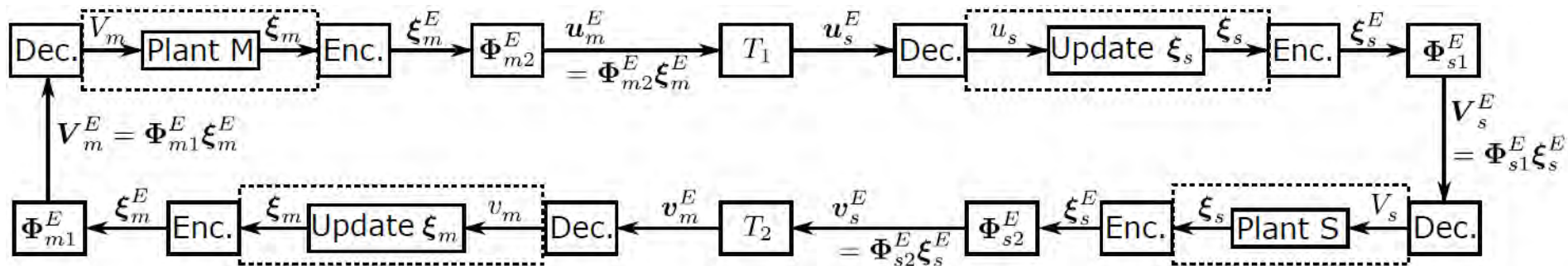
暗号化制御を用いたネットワーク制御系
（制御演算部も含めて暗号化）

空気圧駆動式手術支援ロボットデバイスの設計・制御 力帰還型バイラテラル暗号化制御

- 分散型制御系（マスタ・スレーブ型遠隔手術ロボット）に暗号化制御を適用
 - 暗号化制御の実装可能性をシミュレーションで確認
 - 外部から攻撃を受けた場合についてダミーノイズを与えて検証し、暗号化制御実装により攻撃検出性能が向上する可能性が示唆された



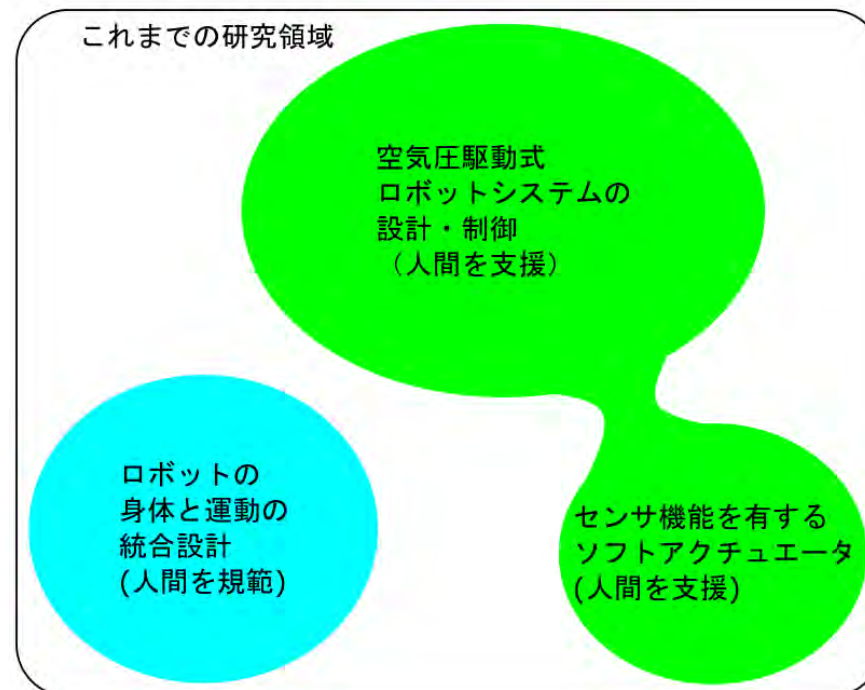
波変数を用いた力帰還型バイラテラル制御



暗号化制御の実装

まとめと今後の展開

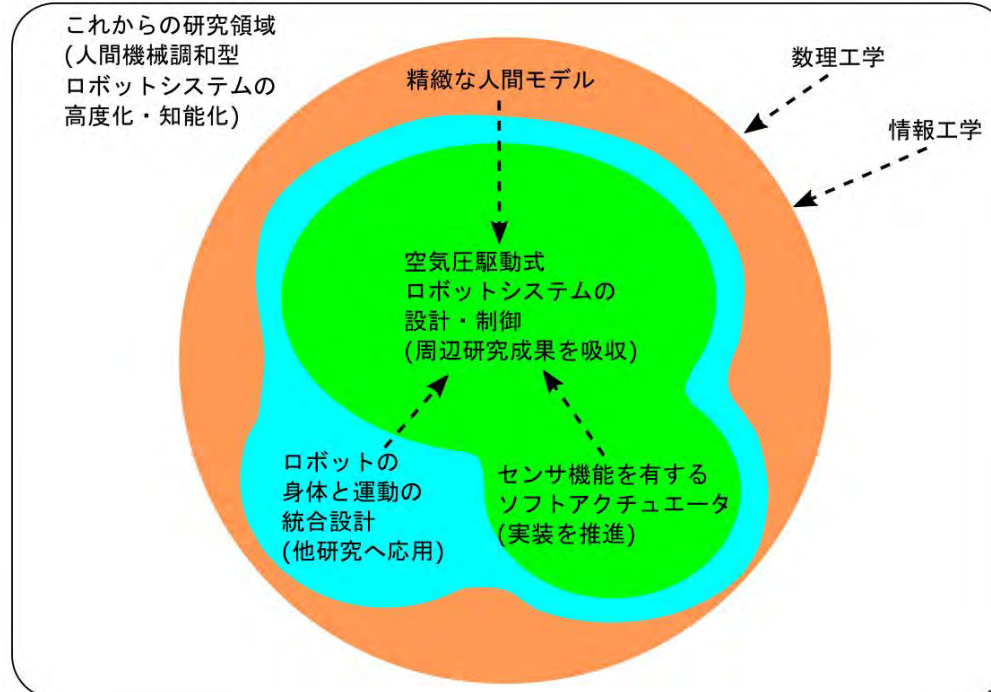
- 発表者のこれまでの研究をご紹介した
 1. ロボットの身体と運動の統合設計
 2. 空気圧駆動式ロボットシステムの設計・制御
(+ 3. センサ機能を有するソフトアクチュエータ)
- これらは人間を規範とするシステム & 人間を支援するシステム
 - 基本的に人間が動作主体であり, 機械はそれに追従 (一方向・保守的)



まとめと今後の展開

• 今後の展開

- 人間と機械が対等となることで、系全体として最高性能を発揮
(**双方向・積極的. 真の人機一体**)
- 最新の数理・情報工学の知見を用いて、精緻な人間モデルを構築・実装し、人間機械調和型ロボットシステムを高度化・智能化することで、 **Society 5.0** の実現に貢献したい



Society 5.0 :
サイバー空間と
フィジカル空間を
高度に融合させた
システムにより、
経済発展と
社会的課題の
解決を両立する
人間中心の社会