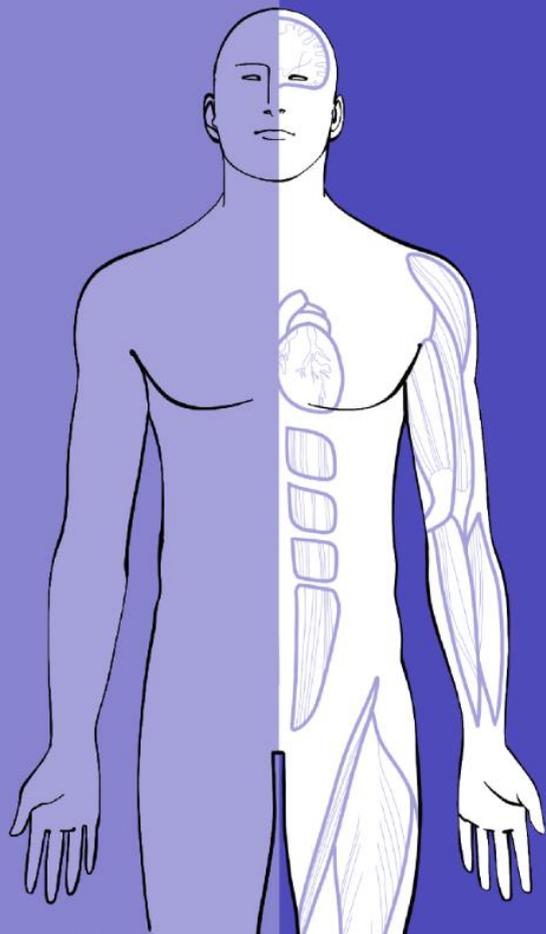
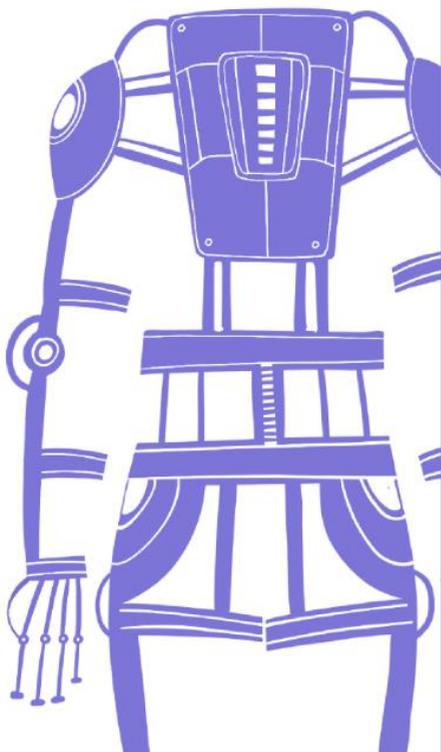


# 人間の特性に配慮した 動作拡張テクノロジー

## 動作アシストの設計指針

人間の動作アシストテクノロジーに対する  
適応能研究プロジェクトチーム



# 目次

## Part 1

---

### 序論

はじめに	1
アシスト技術とは?	2

## Part 2

---

### 問題認識と設計指針の提案

問題1. 協調への人間の適応?	3
問題2. ギャップ：動作アシスト vs. 人間知覚	4
問題3. 両立：負担軽減 vs. 精度	5
人間・機器協調に影響を与えるのは?	6
人間特性を考慮しましょう	7

## Part 3

---

### アシストに対する人間反応

“動作アシストは、 筋肉の活動をどのくらい減らせるのか?”	9
“筋張力・活動を減らす人間本来の能力は?”	11
“動作アシストとの協調中に現れる運動制御戦略は?”	13
“多様な関節へのアシストとその影響は?”	14
“高齢者はアシストをどの様に感じるのか?”	16
“電動台車：歩行アシストによる動作変化は?”	17
“スマートウォーカー：運動強度・歩行パターン がどのように変わるのか?”	18
“身体装着型の歩行アシスト機器の影響は?”	21
“協調動作のトレーニングが与える影響は?”	22
その他	23

## Part 4

---

付録	24
----	----

## ■ はじめに

近年、身体動作を拡張するアシストテクノロジー（以下、動作アシスト）の開発・導入が進んでいます。この技術は人間の身体に着用して利用され、いわゆる「人間の超人化」を現実化します。

しかしながら、円滑かつ精確な動作拡張のためには、人間が動作アシストに対してどのような潜在能力を持っているかを把握する必要があります。

このような視点から、動作アシストの開発・設計プロセスに役立てるための指針として、この冊子を発刊しました。この冊子は、人間が動作アシストに対してどのような適応能を表現するのかを解明する研究プロジェクトの研究成果に基づいて編集しています<sup>1)</sup>。

この指針を通して、開発・設計担当者が人間の能力に関して新しい視点を持ち、動作アシストの開発・設計の一助になれば幸いです。

---

1) 科学研究費基盤研究A、  
研究課題「身体動作能力を拡張するテクノロジーに対する人間の適応能の理解とその応用」  
研究期間：2017～2020年

## ■ アシスト技術とは？

アシスト技術は**人間の運動能力を維持・拡張**することを主な目的としています。この技術を通じて介護や農水産業等、過酷な身体労働が求められる現場において労働者の身体負担を減らすことや、老化や障害によって衰えた動作能力を維持・拡張し、生活の質を高めることが期待されています。

例えば、利用者の自立度を高める用具や機器に車いす・介護ロボットがあり、それらは利用者（人間）の能力を全面的に代替します。しかし、アシスト技術の場合、例えばアシストスーツでは、利用者が着用してマシンと協調しながら動作を遂行し、オペレーターとしての人間の役割を担いながら身体負担を減らします。それゆえ、この技術は**人間とマシンの適切な協調（co-operation）**が欠かせません。

身体の完全代替



車いす

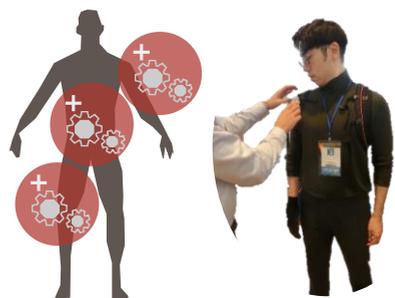
負担軽減



介護ロボット

### 人間とマシンの協調

“身体の部分的な代替”  
“身体的な負担を軽減”

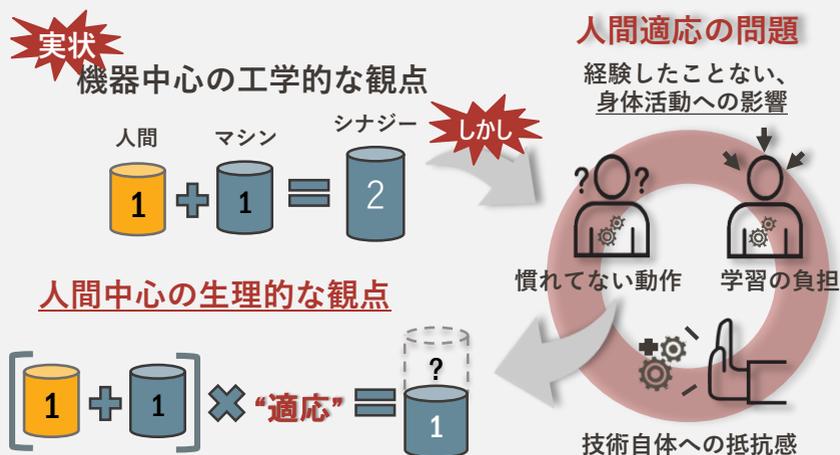


“人間の運動能力を保存・拡張”

## ■ 問題1. 協調への人間の適応？

アシスト技術の対象は身体動作だけではありません。人間の諸機能をアシストする様々な技術が誕生し、その度に人間の適応という問題が生じます。現状のアシスト技術開発は機器・技術中心的な(Technology-oriented)側面が指摘されています。その観点からは、人間とマシンの**協調シナジー**は2つの要素を足すことで簡単に得られるものとされます。しかし、人間側から見ると(Human-oriented)、マシンからのアシストは今まで経験したことない動作制御が求められるため、シナジーは簡単に得られません。**特に、協調のための学習過程において、協調の失敗が連続的に生じれば、最悪の場合この技術自体へ抵抗感もでてくる可能性があります。**

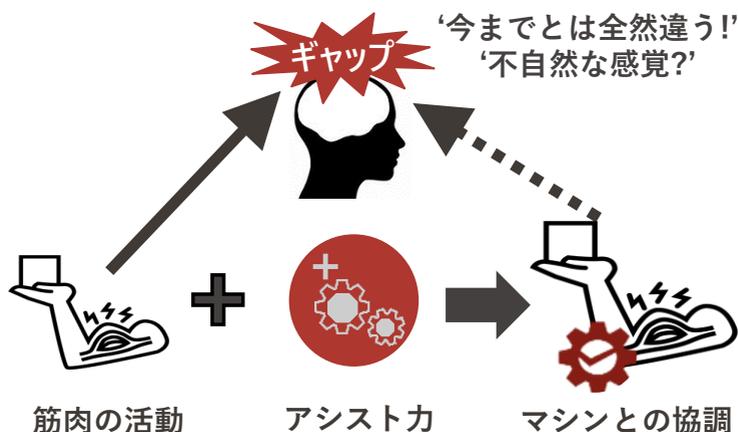
このように動作アシストを実用する前には、人間に現れる様々な適応の問題を事前に解明する必要があります。



## ■ 問題2. ギャップ：動作アシスト vs. 人間知覚

動作アシストを用いた身体運動は、極めて複雑な運動制御（motor control）・学習が求められます。利用者は動作アシスト装置から受けるアシストの力の大きさ、位置、向き等を知覚しながら、関節運動に関わる筋の張力の大きさや発揮するタイミング等を巧みに調節して、目的とする動作の成立を試みなければいけません。

しかし、動作アシストから外的な力を与えられても、実際人間が動作中にその効果、すなわち負担軽減を知覚できるのかはまだ疑問として残っています。例えば、手で握った鉄アレイを肘の屈曲によって持ち上げる時にアシスト力が付与される場合、アシストとの協調運動は過去の運動経験とは異なるため、様々な感覚（位置覚、運動覚、抵抗覚、重量覚）を混乱させる可能性があります。



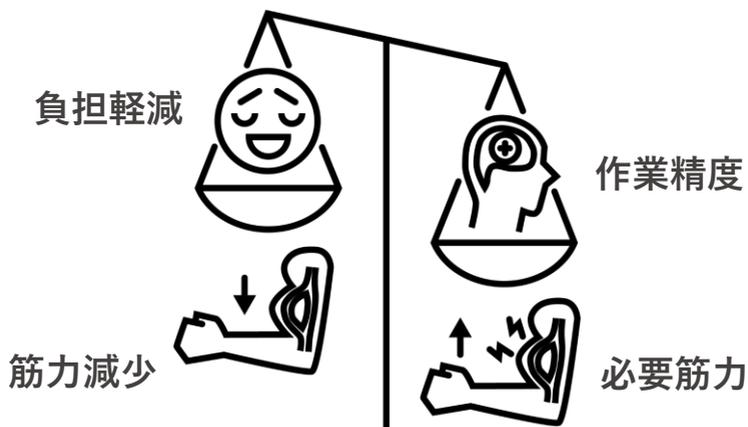
### ■ 問題3. 両立：身体の負担軽減 vs. 動作の精度

動作アシスト時、利用者には二つの調整が求められます。一つは外部からかかる力を受け入れ、筋張力を脱力させて「**身体の負担軽減**」を試みることです。もう一つは動作と関連する筋群を共に収縮して張力を発揮し、実行部の細かな位置や向きを調整する「**動作の精度**」です。

動作アシスト時は、これら両方の調節を同時に行うことが困難になります。例えば図のように動作（作業）の精度を優先すると、負担軽減効果を図ることが疎かになります。

動作アシストの効果はこれら二つの側面から評価する必要があります。

#### “拡張動作の成立”



## ■ 人間・機器協調に影響を与えるのは？

日常生活・労働環境での人間の動作は複合的・協調的であり、それに対応するためのアシストの仕様も複雑になります。そうなる  
と機器側または人間側の様々な要因によって疑問・課題も生じます。簡単な例では、異なる動作アシストの力・速度に対して協調  
できる運動能力範囲はどのくらいなのか、アシストが複数部位  
(例えば両上肢)に同時に付与されたとき、人間はそれぞれのア  
シストに対して適応できるかどうか、また、アシストの適応性が  
運動部位(例えば上肢と下肢との違い、利き腕と非利き腕との違  
い)によって異なるかどうかなどの疑問が考えられます。これは  
一例に過ぎませんが、アシスト機器が発展するに伴って、検討す  
べき課題も増えていくでしょう。

### 機器設計の要因

- ✓アシストの対象運動
- ✓制御(アクチュエータ)
- ✓力・速度
- ✓精度
- ✓安全性
- ✓運動自由度
- ✓フィードバック
- ✓タイミング
- ✓大きさ
- ✓重量(バッテリー)

### 人間側の要因

- ✓年齢/性別
- ✓運動能力
- ✓知覚能力
- ✓学習能力
- ✓経験度
- ✓信頼度
- ✓使用時間
- ✓作業種類・強度
- ✓作業安定性
- ✓利き・非利き手(足)

## ■ 人間特性を考慮しましょう

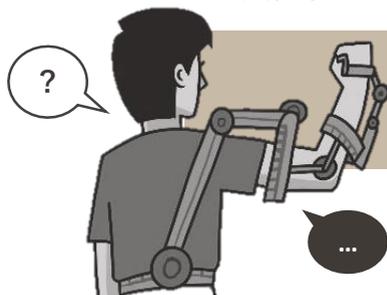
人間にとってアシスト技術を利用して身体動作を拡張することは簡単ではありません。特に人間は、この新しい技術が求める協調動作へ適応する問題と、普段の動きと機器との協調の間に発生する知覚のずれ、そして負担軽減と作業精度との間のジレンマを解決しなければならないという新たな課題に直面しています。そこでアシスト機器の開発・設計過程では、人間側の様々な特性と要因が協調に引き起こす影響を考慮することが望まれます。

### < 研究チームの対策アプローチの考え方 >



#### 1. アシストとの協調時：生じる問題

- 適応できるか？
- 知覚できるか？
- 負担軽減と精度の両立？



何を検討するか？

研究チームでは、この技術を使う際の**身体運動・生理反応・心理変化**など**人間特性を検討**することから、人間にとって追従しやすく、動作を習得・学習しやすい最適のアシスト機能について研究を進めています。これは、動作アシストだけでなく、様々な先端テクノロジーと人間の共存を考える上での指針になると期待しています。

## 2. 事前対策

“人間特性を検討”



身体運動

生理応答

心理変化



## 3. 設計指針の提案

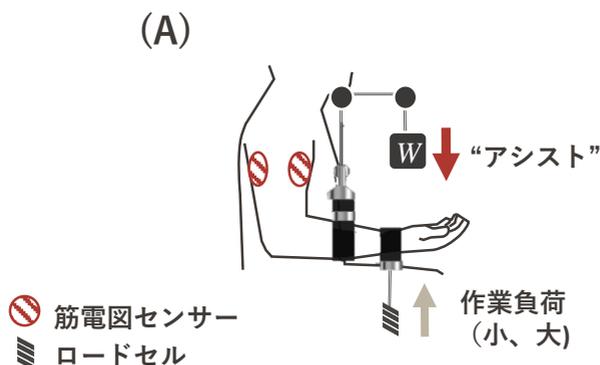
“最適な協働  
および人間の能力拡張”



### “動作アシストは、 筋肉の活動をどのくらい減らせるのか?”

動作アシストに対する筋肉の活動を理解するために、肘関節運動を対象として実験を行いました<sup>2)</sup>。20代の被験者25名は図のように肘関節を一定の張力で屈曲する作業課題を行いました。作業負荷の水準は小(最大限界負荷の20%)、大(40%)に設定しました。その途中で(A)のように重りをかけることでアシストを与えました。筋肉の活動は筋電図にて、張力の値はロードセルにて測りました。

その結果、筋活動はアシスト力(重りの重さ)のレベルが上がると減少しました。しかし、筋活動減少の効果は期待したパターンとは異なりました。(B)の点線(赤)のようにアシスト力が増加してもそれに見合う筋活動の減少はみられませんでした。特に、作業負荷が少ない場合に効率が下がりました。



この結果から、アシストは筋肉の負担が大きい作業に効果的であるが、アシスト力を大きくするほど効率良い協調が難しくなることが分かりました。また、筋張力を脱力して得られる負担軽減効果よりも関節の動きを調整する方を優先し、アシストに頼らないことを選択することが示唆されます。つまり、アシストの力が十分ではない場合、人間はアシストとの協調よりも自分で制御だけを選択する傾向がみられました。

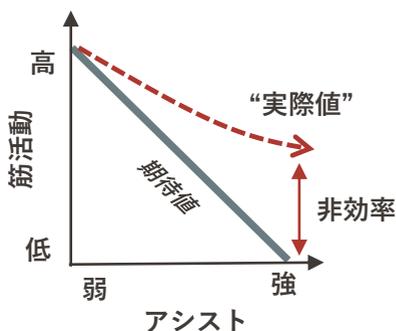


### 設計指針：

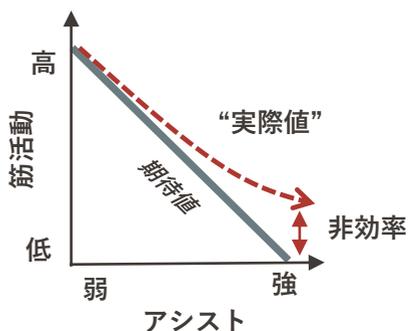
- アシストは筋肉の負担が大きい作業により効果的
- アシストの効率はアシストのレベルが高くなるほど減少
- アシストの力が十分ではない場合、人間はアシストとの協調より自分のマニュアルな制御に頼る

(B)

<作業負荷：小>



<作業負荷：大>



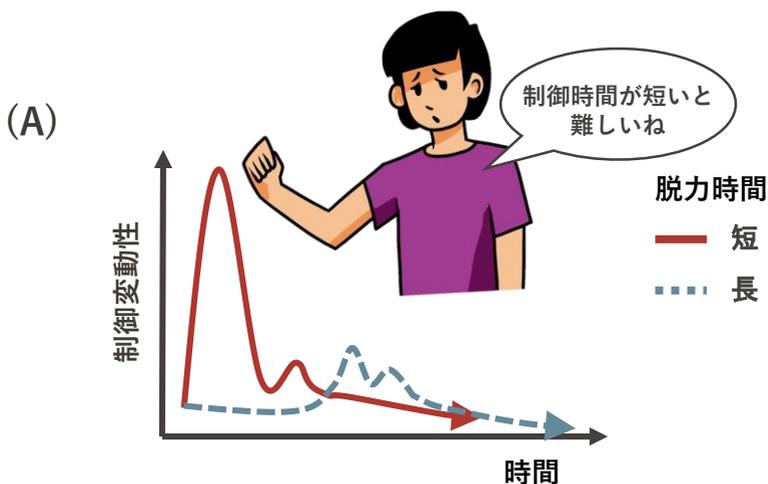
アシストとの協調以前に、

## “筋張力・活動を減らす人間本来の能力は?”

筋力を自分で減少させる際の運動制御特性を把握できれば、アシストによる筋力減少時の特性を類推できるようになります<sup>3)</sup>。

そこで、20代の被験者12名を対象に、肘関節屈曲のための筋張力を随意的に減少させる課題（アシストは与えない）を行いました。被験者はパソコン画面を見ながら、指示されたように張力を下げる課題を行いました。課題では、張力を減少するための速度や大きさが指示されます。

その結果、(A)のように脱力の時間を長くすることで制御の変動性を減少させることができました。ただし、その長い脱力時間は関連筋群の活動を上げるデメリットも観察されました。



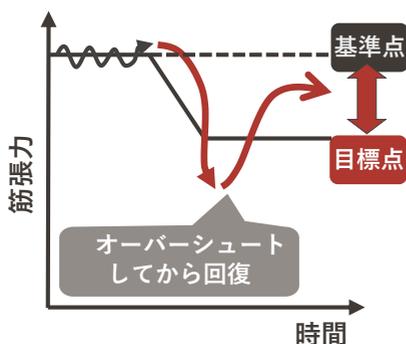
一方、(B)のように張力の減少量が小さい場合には、積極的に筋力を減少させて目標のレベルを一瞬超えてしまう、いわゆるオーバーシュートが起きます。反対に、張力の減少量が大きい場合には、オーバーシュートが起きないように筋力をキープしながら消極的に脱力することが分かりました。この研究は、脱力の戦略が運動条件に応じて変化することを示します。

### 設計指針：

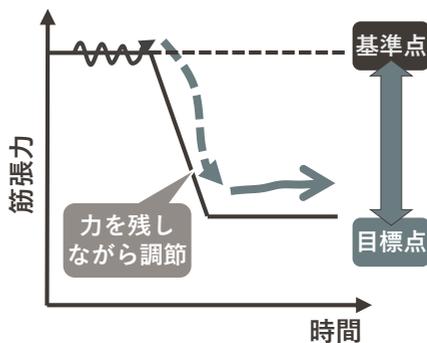
- 筋張力の変動（増減）を小さくするために、脱力の時間を十分に与えること
- 脱力の大きさによって異なる制御戦略を回避、または応用するようにアシスト力の与え方を工夫

## (B)

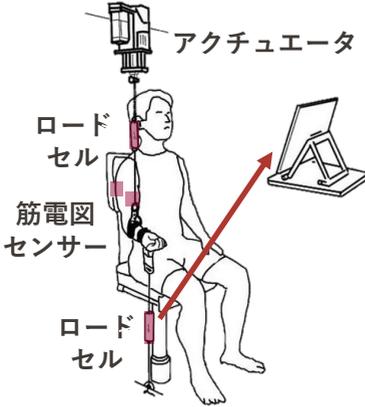
<脱力目標・小さい：積極的>



<脱力目標・大きい：消極的>



# “動作アシストとの協調中に現れる運動制御戦略は？”

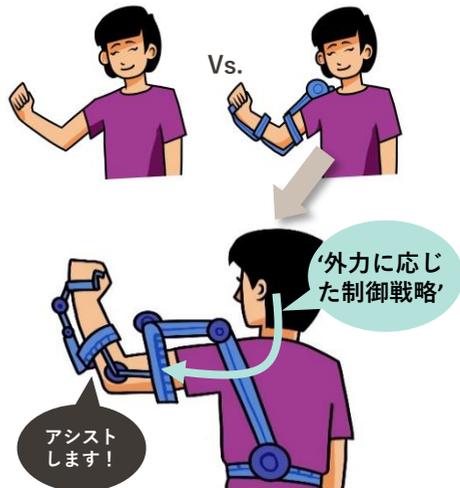


実際の動作アシストによる筋力減少（脱力）は人間の意図的な筋力減少に比べてどのような特徴を持つのでしょうか。この実験ではアクチュエータ（一定の力でアシストを与えるように設計）を用いて、肘関節運動時に様々な速度・カレベルを持つアシストを13名の被験者に提供しました<sup>4)</sup>。

運動中の筋電図波形を同様な条件で比較分析した結果、動作アシストが与えられる時には自分で力を抜く時と比べて動作の安定化に関わる特定の筋電図成分が増加することが見られました。

これは人間・機械協調で人間の筋神経系は、外力に対応するために特別な戦略を採用することを示唆します。

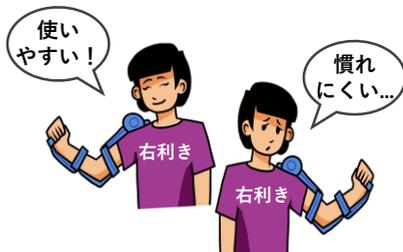
“自分で力を抜く！” “アシストによって抜く！”



## “多様な関節へのアシストとその影響は？”

福祉・作業現場においては、人間は慣れている利き腕側を利用する傾向にあります。アシストとの協調の際、利き腕と非利き腕の反応の違いはあるのでしょうか。被験者13名を対象とした実験では、非利き腕にアシストを与えた場合、筋力減少の効率がより低減することがわかりました<sup>5)</sup>。これはアシストとの協調が各関節運動の熟練度によっても影響を受けることを意味します。

### 利き腕・非利き腕筋活動の違い



#### 設計指針

- ・ 関節運動の熟練度に合わせてアシスト力を付与する

一方、アシストを受けている側の腕の生理反応やパフォーマンスがアシストを受けていない側の腕に影響を受ける可能性もあります。続く実験では被験者11名を対象として、アシストを受けていない側に運動をさせました。その結果、アシストを受けている側の動作の安定性が向上するメリットがあった反面、筋力減少の効率は小さくなるというデメリットが生まれました。

### 他関節運動介入の影響



#### 設計指針

- ・ アシストを受けていない関節運動の影響に注目する必要

5) Wang, Y., Choi, J., Loh, P. Y., & Muraki, S. (2019). A comparison of motor control characteristics of the dominant and non-dominant arms in response to assistive force during unilateral task. *Isokinetics and Exercise Science*.

(続き)

## “多様な関節へのアシストとその影響は？”

両腕運動の際、両側にアシストがどのように与えられるかによってパフォーマンスが変わる可能性を検討しました。

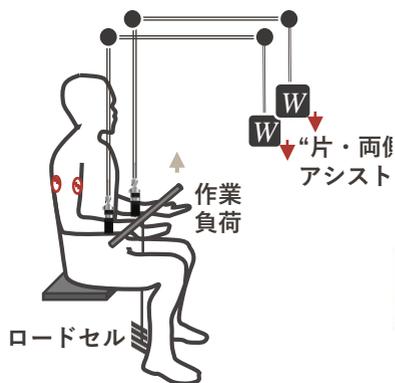
20代被験者14名を対象として、各被験者は(A)のような環境で棒を持ち上げて一定の張力を維持しました。その途中で片側または両側に重りをかけることでアシストを与えました。

その結果、(B)のように両方にアシストが与えられた場合、片側にアシストがない場合と比べて張力の変動性と主観的運動強度が減少することが分かりました。

### 設計指針：

- 両腕運動には左右バランス(シンメトリー)をとれるアシストを付与する

(A)



(B)



若年者との比較、

## “高齢者はアシストをどのように感じるか？”

身体能力が低下する高齢者はアシスト技術の主な利用者になると期待されています。高齢者は若年者と比べてアシストのような外力をどのように感じて評価するのでしょうか。

高齢者12名、若年者10名を対象とし、12ページと同じ実験を行った結果、両群ともアシストによって運動時の筋活動は小さくなるのが分かりました。しかし、若年者群の主観的運動強度はアシストによって減少した反面、高齢者群は主観評価の結果があまり変わりませんでした。つまり、高齢者はアシストを負担軽減に役立てる能力は持っているが、その動作自体に集中して実際の負担軽減は感じにくいことが示唆されました。

### 設計指針：

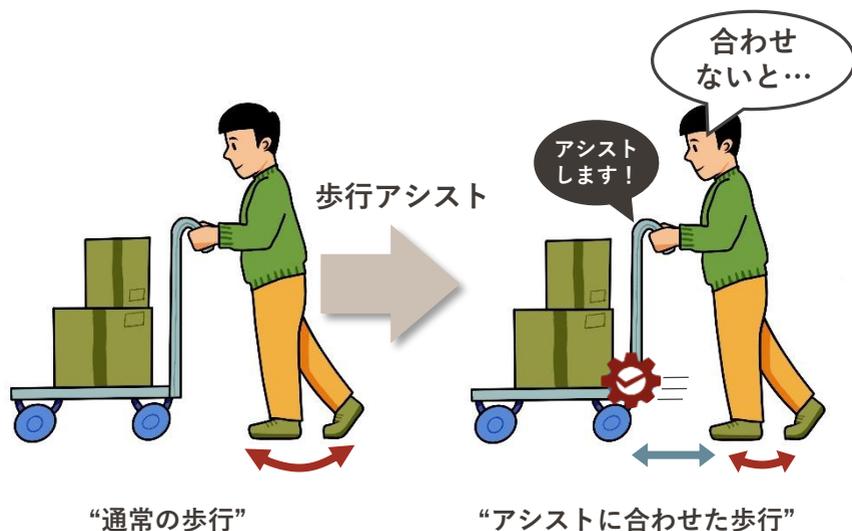
- 高齢者にはアシストの効果・利点をより具体的に説明する
- 高齢者にはアシストとの協調に慣れる時間をより長く設ける



## “電動台車：歩行アシストによる動作変化は？”

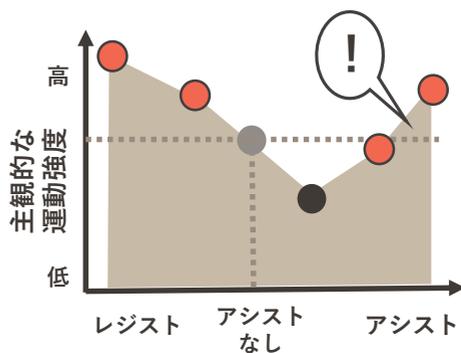
現状の電動アシスト台車はモーターによって推進力を与えていますが、利用者である人間側がどのように台車を押しているかはあまり考慮されていません。人間が台車の推進特性に合わせてどのように操作を行うのかを検討するため、三次元動作解析を用いた実験を行いました。

20代被験者13名に電動台車と協調しながら10mを歩かせ、その時の関節運動・歩行特性を検討した結果、電動アシストを使う場合、歩行はより受動的になり、ステップ長はアシスト機能を利用しない場合より短くなりました。つまり、利用者は台車の前進速度に適應するため歩行動作を調整するということが示唆されました。



## “スマートウォーカー：運動強度・歩行パターンがどのように変わるのか？”

我々の研究チームでは電動機能がついたウォーカー（以下、スマートウォーカー）にも着目しています。そして、研究のために歩行アシストの力と速度を一定に制御することができるスマートウォーカーを開発しました。この実験では 20 代被験者 18 名に実験用歩行トラックでスマートウォーカーと協調しながら10mを歩かせました。協調中のアシスト力はその程度によって6段階に分けました。その結果、被験者が感じた主観的な運動強度はアシストの力が一定以上増加する場合、アシストがない状態に比べて増加することが見られました。これは動作アシストによって人間の使用負担が逆に増える可能性を示唆します。



### 設計指針

- 利用者の運動レベルに合わせてウォーカーの力・速度を設定する

(続き)

## “スマートウォーカー：運動強度・歩行パターンがどのように変わるのか？”

スマートウォーカーは高齢者・歩行能力低下者等の歩行支援に使われますが、手動式ウォーカーとは別の歩行パターンを求める可能性があります。20代被験者19名に実験用歩行トラックでウォーカーと協調しながら10mを歩かせ、その時の動きを三次元動作解析を用いて測定しました。

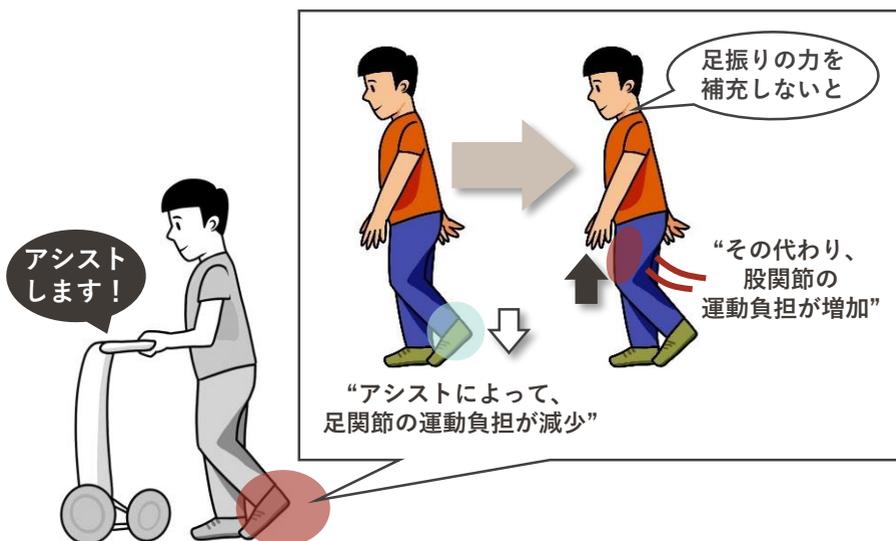
その結果、電動ウォーカーからアシストされる場合には、踵が地面に着地する時（ヒールコンタクト）の膝伸展運動の負担が増加しました。人間の歩行はアクセル（蹴り出し）やブレーキ（着地）を交互に繰り返しながら行われます。動作アシストは其中でアクセルを補強しますが、逆により強いブレーキを求めることになるという問題が浮かび上がりました。



一方、床反力計を用いてスマートウォーカーの被験者の足からの下半身の関節負担を算出しました。三次元動作解析の結果、アシストが与えられる場合、蹴り出し時の足関節運動（底屈）の負担は低減しますが、その後の足振り動作に必要な股関節運動（伸展）の負担が増加する傾向が見られました。つまり、歩行アシストはプラスとマイナスの両面があることを示唆しています。

### 設計指針

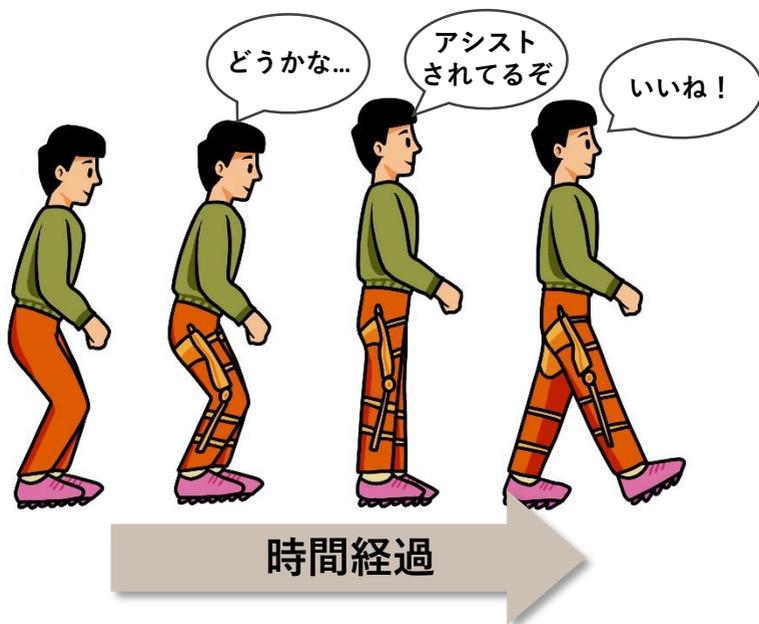
- スマートウォーカー利用時の歩行特性を考慮する
  - ✓ 人間はアシストに合わせて歩行のパターンを調整する
  - ✓ 歩行時の動作アシスト効果は特定の関節運動に限定される
  - ✓ 低減した負担は他の関節運動の負担増加に転換される



## “身体装着型の歩行アシスト機器の影響は？”

動作アシスト技術は、現段階では多くの人にとって経験したことのない技術であるため、身体だけでなく心的側面にも何らかの負荷や影響が生じる可能性を考慮する必要があります。そこで、身体装着型の歩行アシストスーツの使用時について、使用者の動作の計測と、アンケート用紙などを用いて使用に関する主観的な評価の聴取を行いました。

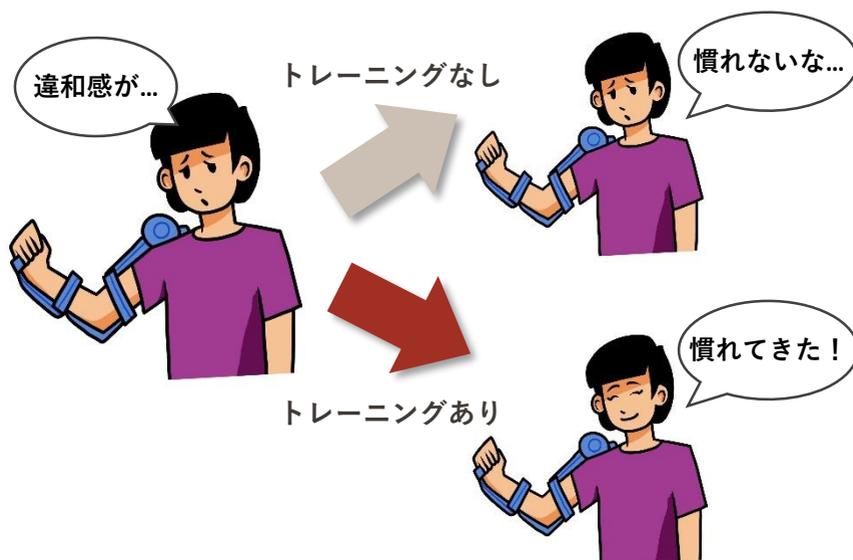
この結果、時間の経過に伴って、「アシストの力の大きさがどれくらいであったか」の感じ方は現れないものの、「アシストされること」に対する捉え方はポジティブになるということが示唆されています。



## “協調動作のトレーニングが与える影響は?”

動作アシストとの協調はトレーニングによってどのくらい向上するのでしょうか。20代の被験者19名を対象とし、12ページと同じ仕組みに基づいた実験環境で4日間のトレーニングを行いました。被験者を2群に分け、9名はアシスト有りでのトレーニング（以下、アシスト群）、10名はアシストなしでのトレーニングを行いました。アシスト群ではトレーニング期間（2、3日目）、運動負荷中に運動負荷の50%水準のアシストを与えました。

その結果、アシスト群においてアシスト付与時の力調節変動性がトレーニング後に有意に向上しました。アシストを繰り返し利用していくことで人間は、アシストに対する適切な協調動作スキルを獲得し、適応できることが分かりました。

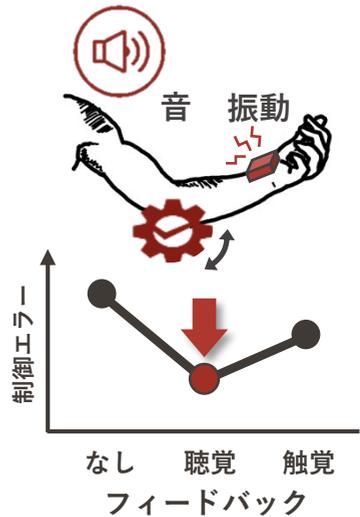


## その他

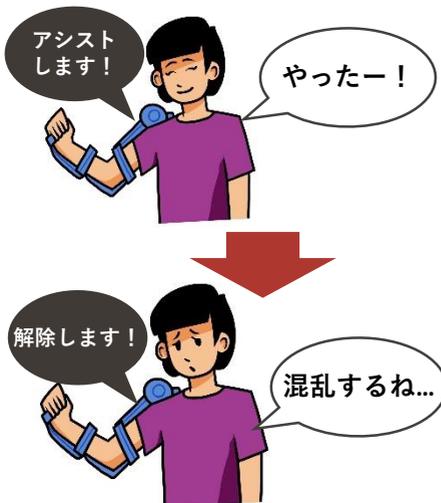
### “感覚フィードバック活用の影響は？”

協調作業中に、視覚だけではなく他の感覚フィードバックを与えて協調を補助することもできます。20代の被験者12名は一定の角速度で与えられたアシストに合わせて、できる限り一定のトルクを発揮するように指示されました。

トルク発揮のフィードバックとして音と手首の振動を与えた結果、制御のエラーは聴覚フィードバックの場合一番小さくなることが分かりました。



### “協調後、アシスト消失の影響は？”



アシストの使用開始時、そして使用終了後は、協調作業とマニュアル作業（自身のみ力）の切り替えのため運動制御が混乱し、動作が不安定になります。特に使用終了後の混乱が大きくなります。

アシストを使用する場合は、使用後にも注意を払う必要があります。

## ■ 研究施設・設備

### 居住空間実験住宅

- ・ 三次元動作解析システム
  - 赤外線カメラ 11台
  - 約10mの歩行路
  - 歩行・トレッドミル実験可能
- ・ 3Dプリンター
- ・ AR・VR実験環境
- ・ 他の実験装置
  - 無線筋電計・加速度計



### 体育館内体力測定室

- ・ 実験用滑車
- ・ 速度調節引力装置
- ・ トルクジェネレーター
- ・ 他の実験装置
- ・ ADコンバーター
  - 有線筋電計
  - 加速度計
  - 張力計
  - 握力計
  - ...

## ■ 研究業績 (2020年8月現在)

### 国際学術雑誌掲載

- Yeoh WL, Loh PY, Saito S, Muraki S. Interaction between a motorized walker and its user: effects of force level on within-stride speed and direction fluctuations. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2020
- Yeoh WL, Choi J, Loh PY, Saito S, Muraki S. The effect of horizontal forces from a Smart Walker on gait and perceived exertion. Assistive Technology. 2020
- Choi J, Yeoh WL, Matsuura S, Loh PY, Muraki S. Effects of mechanical assistance on muscle activation and motor performance during isometric elbow flexion. Journal of Electromyography and Kinesiology. Vol. 50, Article No. 102380, 2020
- Loh PY, Hayashi K, Nasir N, Muraki S. Changes in muscle activity in response to assistive force during isometric elbow flexion. Journal of Motor Behavior. 52(5), 634-642, 2019
- Choi J, Yeoh WL, Loh PY, Muraki S. Force and electromyography responses during isometric force release of different rates and step-down magnitudes. Human Movement Science. Vol. 67, Article No. 102516, 2019
- Wang Y, Choi J, Loh PY, Muraki S. A comparison of motor control characteristics of the dominant and non-dominant arms in response to assistive force during unilateral task. Isokinetics and Exercise Science. 2019
- Muraki S. Human-centered design for advanced technology. Advances in Social Science, Education and Humanities Research. Vol.207, 2018 (招待講演論文)
- Nasir N, Hayashi K, Loh PY, Muraki S. The effect of assistive force on the agonist and antagonist muscles in elbow flexion. Movement, Health & Exercise. 6(2), 35-52, 2017

### 国際学会・展示会発表



### 謝辞

この冊子は、文部科学省科学研究費基盤研究A、研究課題「身体動作能力を拡張するテクノロジーに対する人間の適応能の理解とその応用」に基づいて作成されました。

当冊子はα版です。  
今後、一部改訂や情報追加する場合があります。

---

発行日

2020年 9月

---

代 表

九州大学大学院芸術工学研究院  
デザイン人間科学部門  
福祉人間工学研究室

教授 村木 里志

〒815-8540 福岡市南区塩原4-9-1

Website: <http://www.design.kyushu-u.ac.jp/~muraki>

email: [muraki@design.kyushu-u.ac.jp](mailto:muraki@design.kyushu-u.ac.jp)

---

編 集

九州大学大学院芸術工学研究院  
デザイン人間科学部門  
学術研究員 チェ・ジウオン

---

イラスト

九州大学大学院芸術工学府  
デザイン人間科学コース  
修士課程 フロレス・ヘロイサ

---