

ロボティクスのシステムからの再考 ～現場で有用なロボットシステム開発を目指して～

川村貞夫

立命館大学 立命館グローバル・イノベーション研究機構

特別招聘研究教授

株式会社チトセロボティクス 取締役副社長

産業用ハンドリングシステムアライアンス 会長

※事務局（建設用ロボット委員会）より
川村先生のお問い合わせ先は下記のとおりです。
kawamura@se.ritsumeai.ac.jp

目次

1. 川村研究室 過去の研究紹介
2. 産業用ロボットの現状と新事業化課題
3. システムからの再考
4. おわりに

研究方針

・機構と制御から問題解決 ・システムインテグレーションの技術と科学

研究分野

繰り返し学習制御 空気圧駆動システム ワイヤ駆動システム 水中ロボット
ロボットハンド ロボット運動制御理論 身体運動科学 合気道の科学

1996 – 2022 立命館大学ロボティクス学科教授

2003 - 2006 立命館副総長・立命館大学副学長

2011 - 2012 日本ロボット学会会長

2015 - 2020 日本学術会議 ロボット学分科会 委員長

2018 – 現在 株式会社チトセロボティクス 副社長

2022 – 現在 立命館グローバルイノベーション研究機構 特別招聘研究教授

2022年 – 現在 産業用ハンドリングシステムアライアンス (IHaSA) 会長

ロボット革命イニシアティブ協議会 (RRI) マニピュレーション委員会 委員長

一般社団法人 日本食品機械工業会 (FOOMA) 食品製造ライン自動化推進プロジェクト委員長

機械振興協会 「サービスロボットの市場発展および産業の成長に関する調査研究」委員長

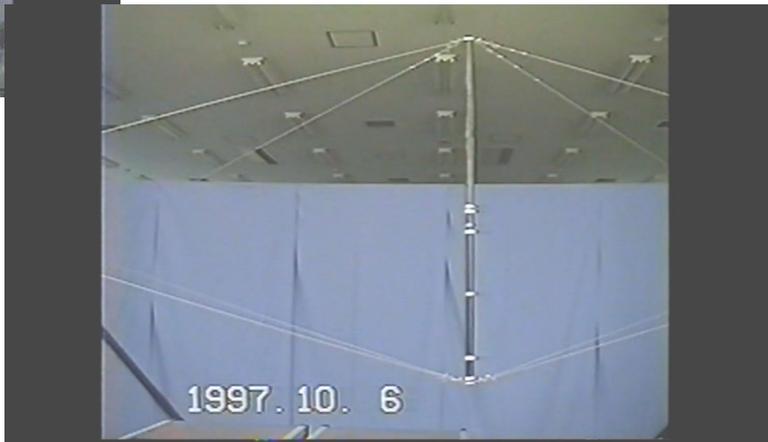
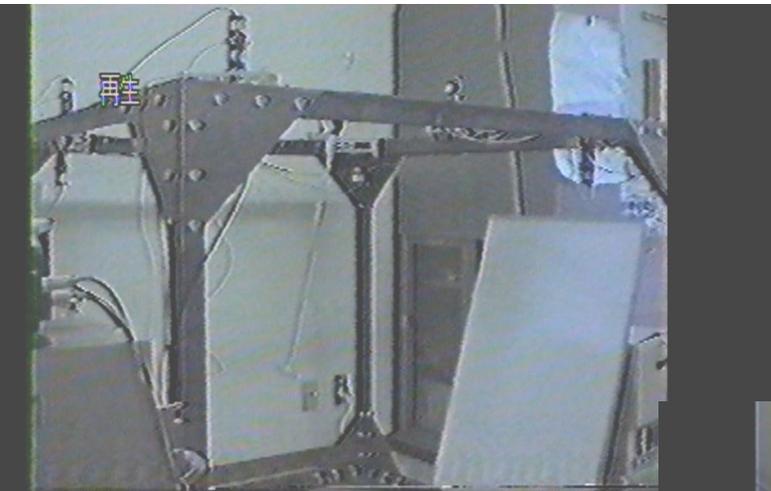
近畿経済産業局 公益財団法人 大阪産業局 スマート生産性向上研究会 委員長

NEDO ロボット・AI部 「ロボット分野における研究開発と社会実装の大局的なアクションプラン」

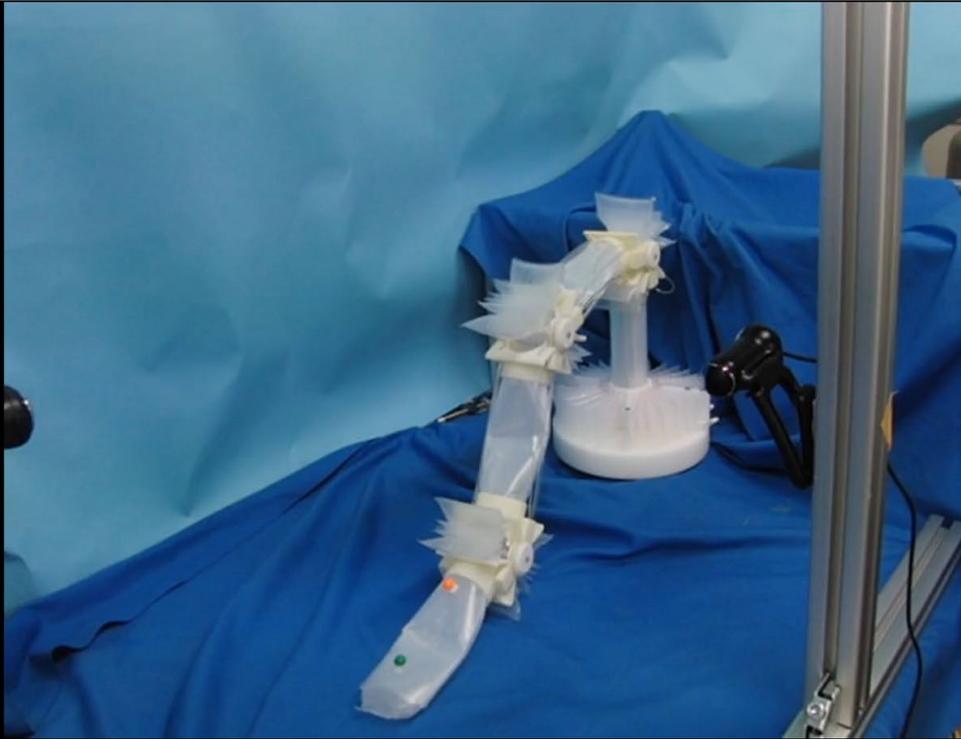
ロボットアクションプラン策定に掛かる有識者委員会 委員長

ワイヤ駆動ロボット 1987年～2006年

高速運動，大空間運動などに利用



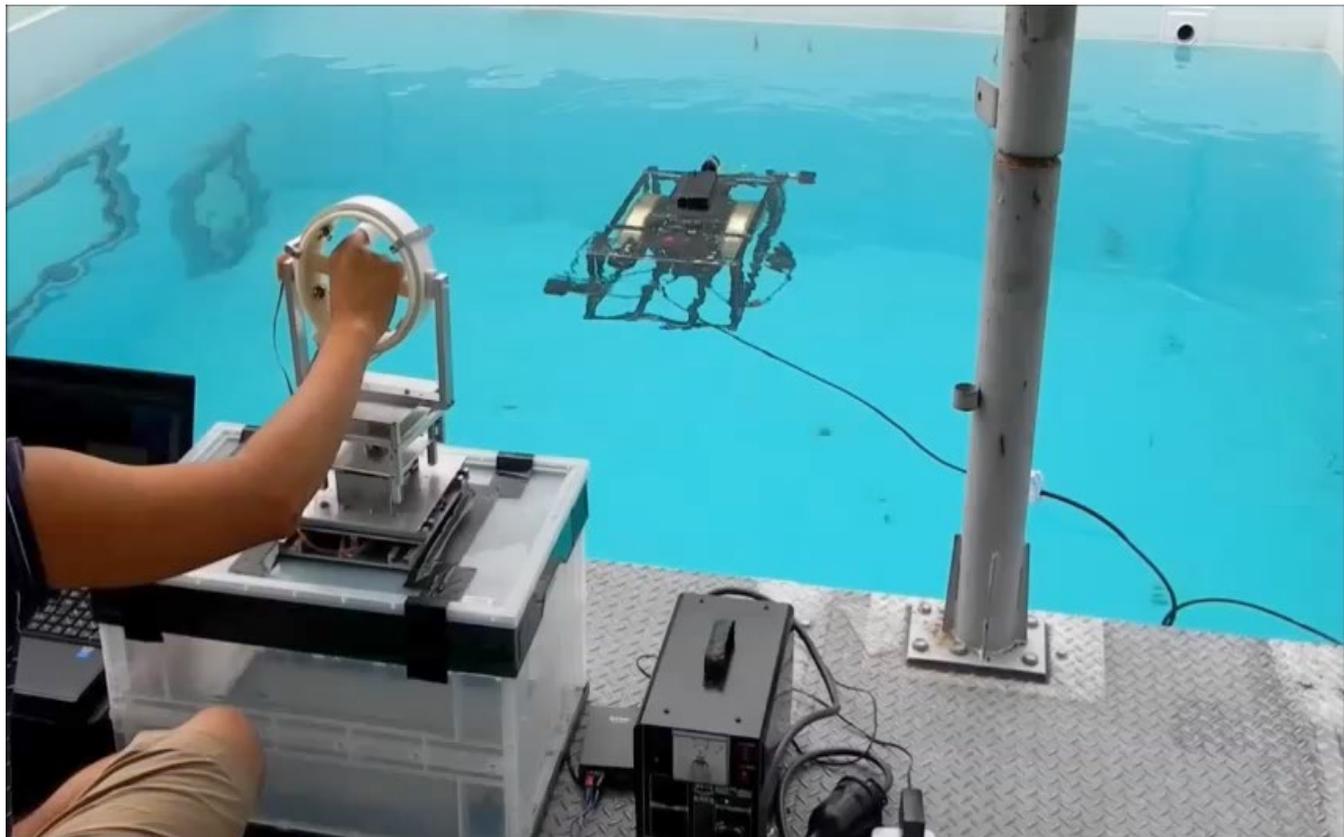
空気圧駆動システム 2007年～2021年



リンクやアクチュエータが、インフレータブル構造であるので、内部の空気を抜けば、小型化できる可能性があります。
Since the links and actuators have an inflatable structure, there is a possibility that they can be miniaturized by removing the air inside.

YouTube公開中

片手操縦可能水中ロボット“有手海”



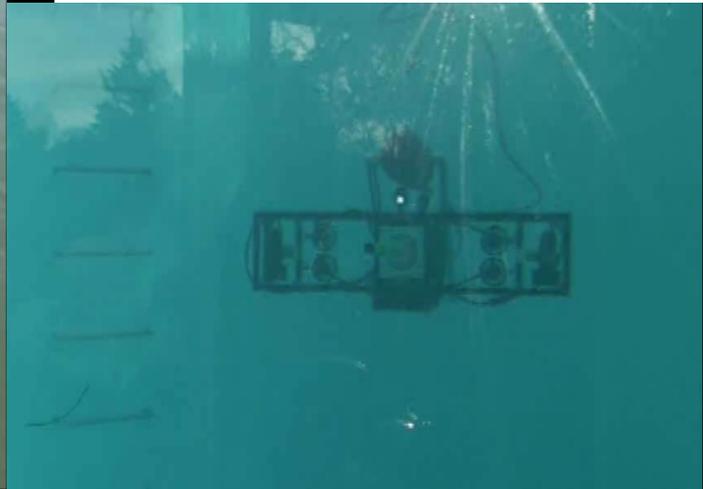
YouTube公開中

柱状採泥水中ロボット“海剣”



YouTube公開中

回転式完全密封採泥管



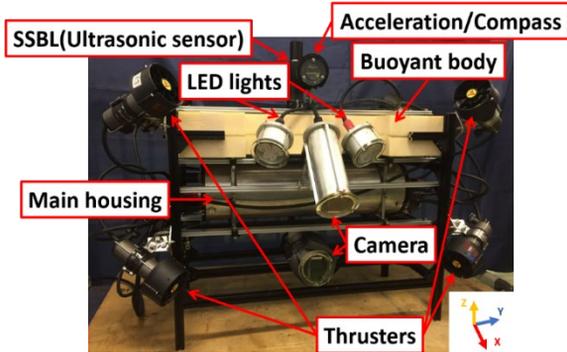
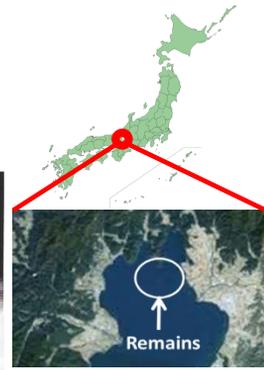
考古学用水中ロボット“海観”

琵琶湖 葛籠尾崎湖底遺跡調査

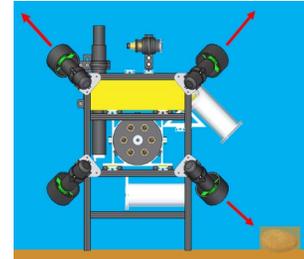
- Maximum depth about 80 m
- Fluctuated water-flow 0.3 ~ 0.5 [m/s] or more



Jomon pottery



- Push against lake bottom to stabilize
- Blow around object using lower thrusters to remove soil

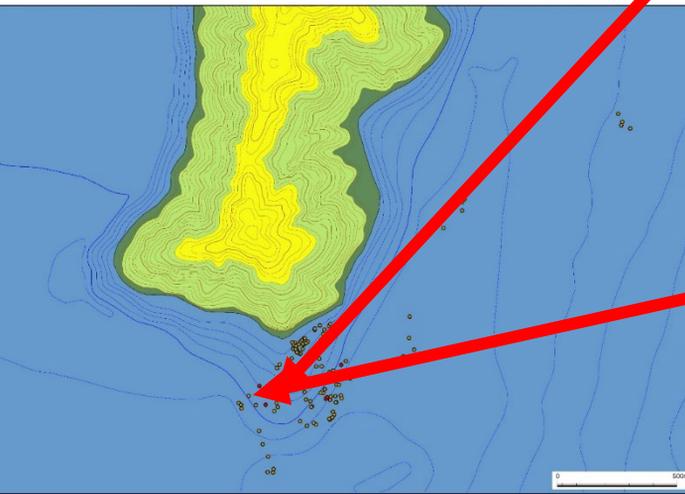


Sueki
(dish)
about
1500years
ago

第9回2015年8月24日南水域

付近 水深28.8m 須恵器

付近 水深44.8m 須恵器



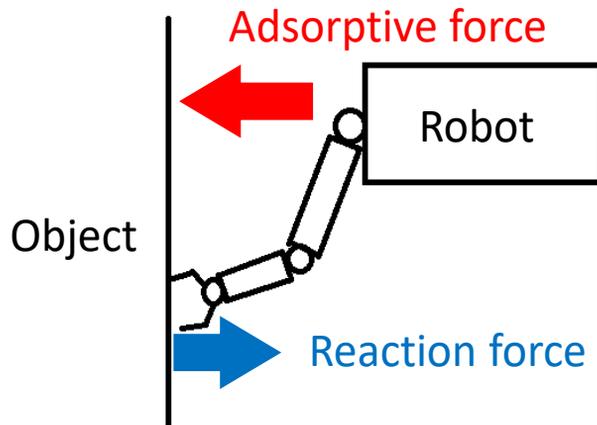
水中ハンドリング作業

- ・流れの影響
- ・対象物への力発生による反力の影響



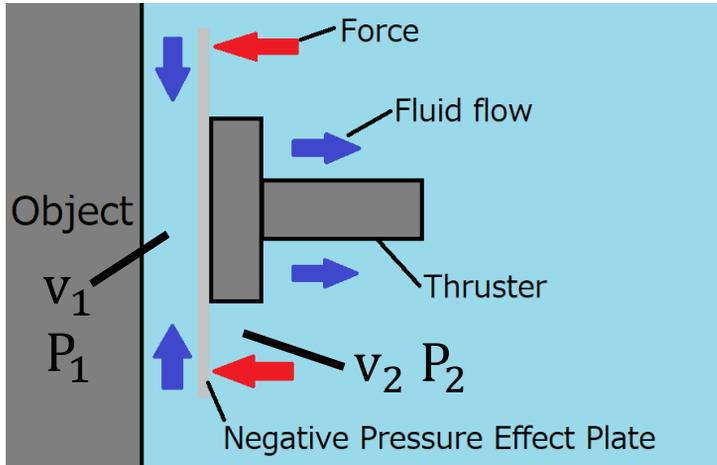
Resistance to reaction force by fin kick
(Shibuya Diving Industry Co. HP)

対象物に押し付ける力
(吸着力) が必要



Reaction force generated during work

負圧効果板 ベルヌーイ効果の利用



Principle of Negative Pressure Effect Plate

- Form narrow flow path between plate and object



- Flow velocity increases

$$v_1 > v_2$$



- Pressure becomes small

$$P_1 < P_2 \quad (Z_1 \cong Z_2)$$



- Adsorption to object by pressure difference

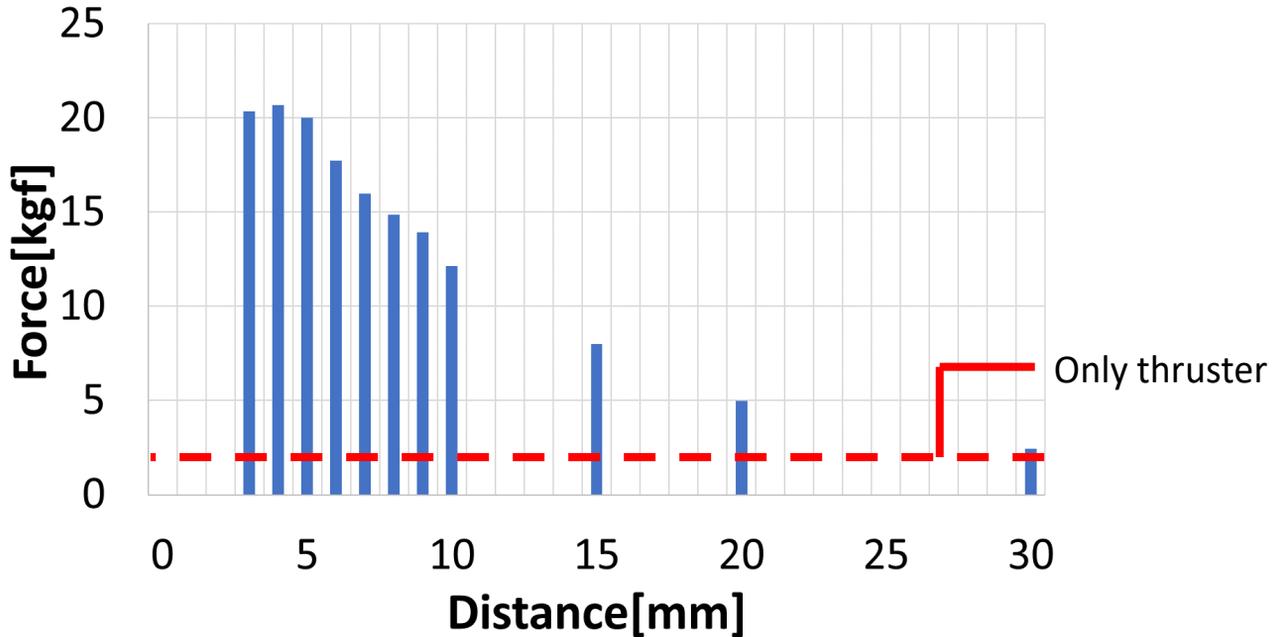
Bernoulli's principle

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + P_1 + \rho g z_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + P_2 + \rho g z_2$$

Between plate and object

Outside plate

実験結果



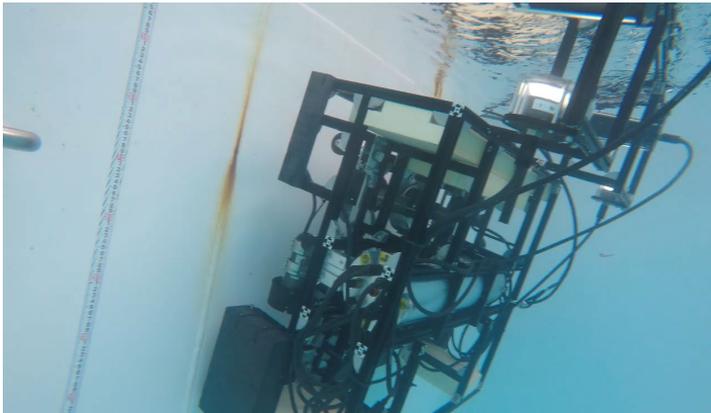
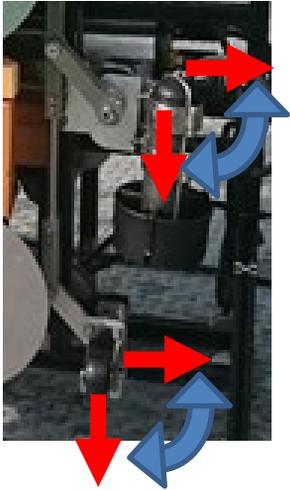
- Measured up to 3 mm distance.
In the case of 2 mm, the strain gauge contacted the bottom surface.
- The maximum adsorption force was **9 times** larger than that of the thruster alone.

ダム検査水中ロボット“堤瑕無”

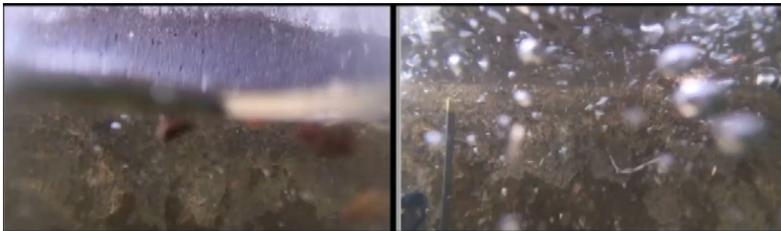
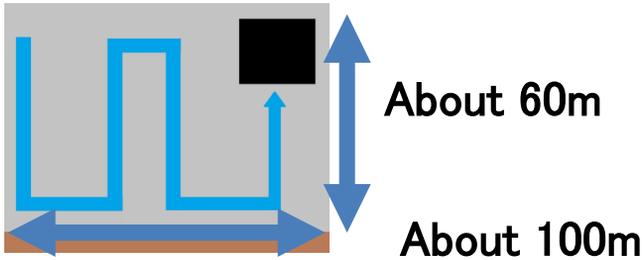


Experiments in pool

A motor changes motion direction by changing direction of wheels and thrusters.

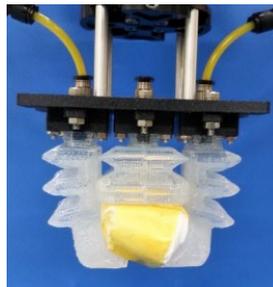


Experiments in dam lake (Shorenji dam)



システム化技術開発例 冷凍カキフライ高速ハンドリング

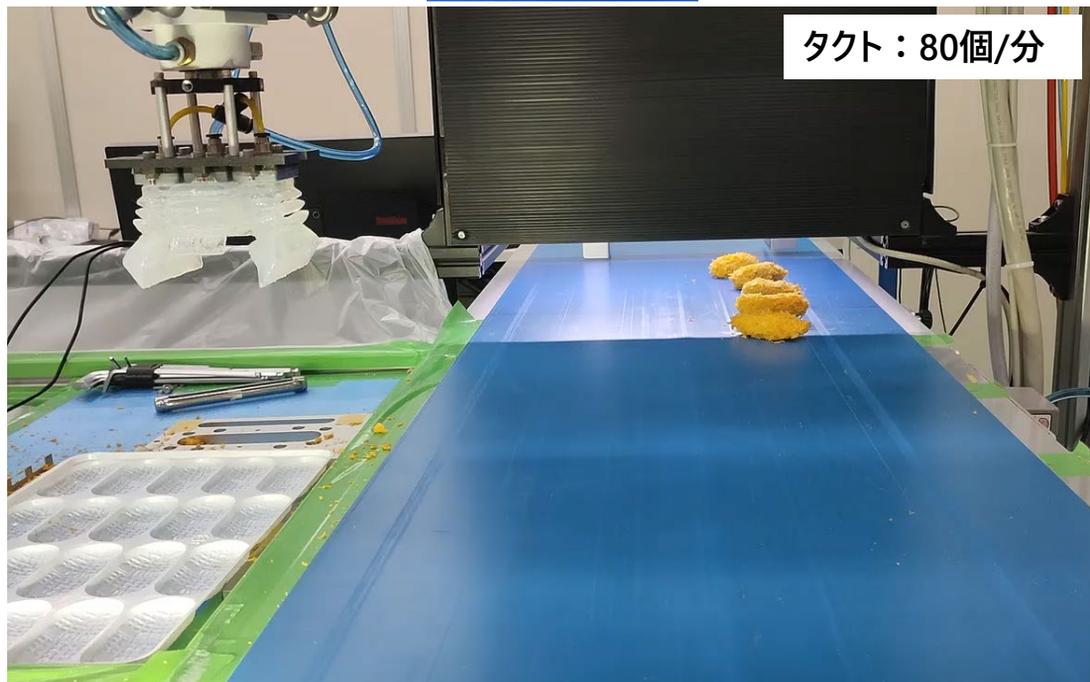
液体シリコン3Dプリンタ利用 ロボットハンド開発



カキフライ (40 g)



耐久性：100万回突破



タクト：80個/分

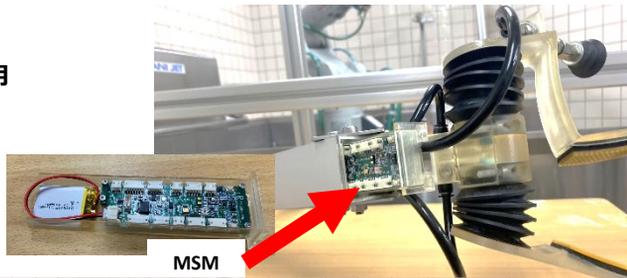
システム化技術開発例 レストランバックヤード食洗作業

■ 要求仕様

- ・様々な状態での食器の認識
- ・小空間作業実現
- ・EEは水没可能
- ・遠隔トラブル対策
- ・洗浄後の衛生管理

■ 設計方針

- ・クラウドの深層学習による食器認識
- ・小型ロボット（4kg可搬）1台のみ利用
- ・水没可能な空気圧駆動EE
- ・インターネット利用遠隔管理
- ・作業ごとのEEの取り替え



システム化技術開発例 レストラン下膳作業



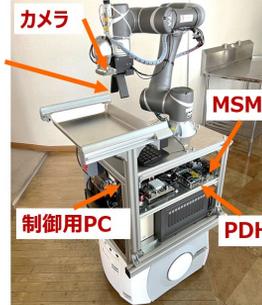
■ 要求仕様

- ・様々な状態での多様な食器の認識
- ・お手拭き、箸など薄い対象物ハンドリング
- ・広い宴会場での回収

■ 設計方針

- ・クラウドの深層学習による食器認識
- ・モバイルコンピュータによる作業実施
- ・薄物把持可能エンドエフェクタ
- ・センサ、MSMによるクラウドでの状態理解

電動モータ駆動
ハンド



- ・40人程度の被験者（食事者）の食後画像データを入力
- ・クラウドサーバによって
深層学習モデル構築
- ・深層学習モデルをロボット制御PCにダウンロード
- ・各食器、お手拭き、箸、箸袋、紙などを認識して把持点決定

システム化技術開発例 食品盛り付け作業

■ 要求仕様

- ・多様な食品の認識
- ・多様な食品の
直接接触エンドエフェクタ
- ・高速盛り付け作業
- ・目標盛り付けの決定

■ 設計方針

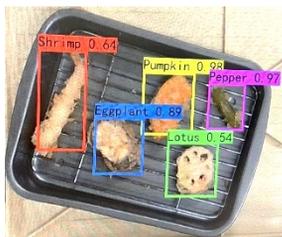
- ・クラウドの深層学習による食品認識
- ・微少把持力発生のエンドエフェクタ
- ・盛り付け目標位置姿勢の機械知能による実現
- ・センサ, MSMによるクラウドでの状態理解



人工知能による
目標盛り付け位置姿勢



プロの盛り付け例



人工知能による食品認識



目次

1. 川村研究室 過去の研究紹介
2. 産業用ロボットの現状と新事業化課題
3. システムからの再考
4. おわりに

現状の産業用ロボットの構成/制御方法

剛体リンク

関節角度で手先位置
計測可能

高減速比ギア付きモータ

モータ側計測で
回転角の高分解能

確定環境

工場内など
設備調整

位置制御

位置による信頼性

教示再生方式

据え付け誤差などの問題解消

精密機械

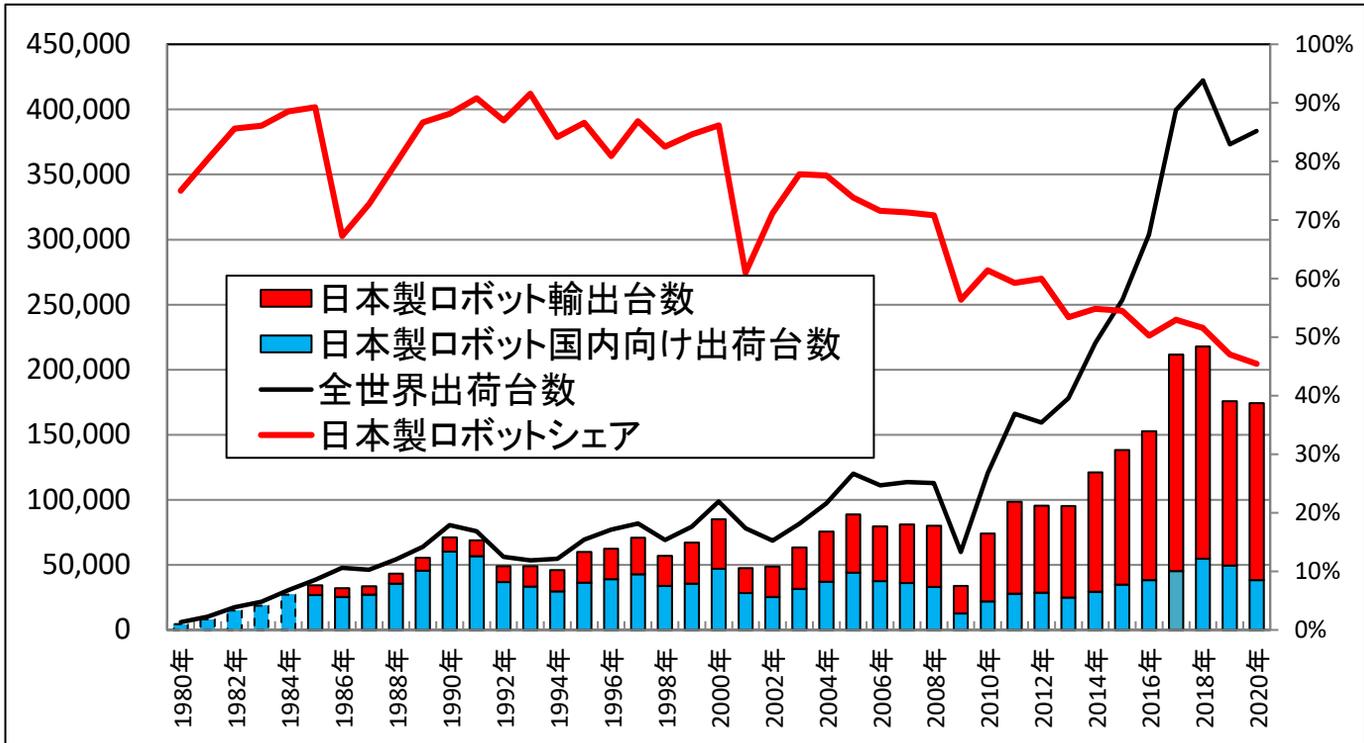
数十 μm
繰り返し位置精度

[The Robot Revolution: Companies that are Using Intelligent and Efficient Machines — Tekh Decoded](#)

高剛性ロボットが確定環境で作業 ➡ 高速 高精度
自動車, 重工業, 電気電子産業で大成功

2000年以降 外国製ロボットの急速な伸び

JARA (Japan Robot Industry Association)
IFR (International Robot Federation)



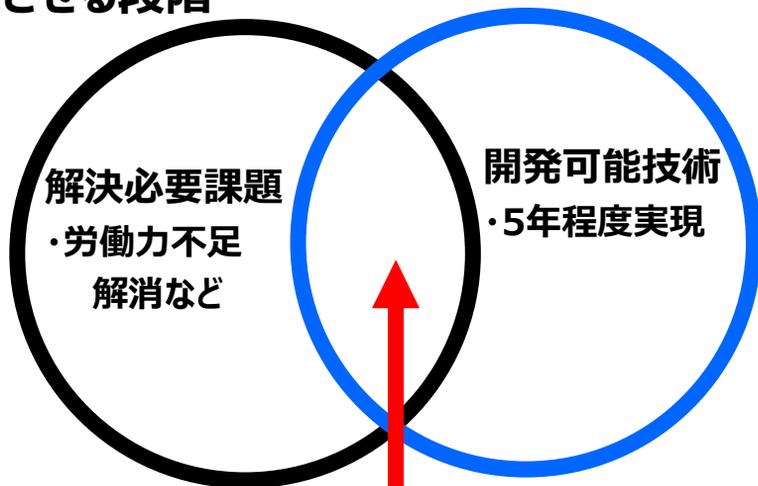
新しい分野でのロボット事業化必要

グラフデータ提供
小平紀生氏のご厚意による

研究開発成果から事業化への道

社会課題から技術開発実施

事業として成立させる段階



事業化？

SIP 社会課題を技術で解決

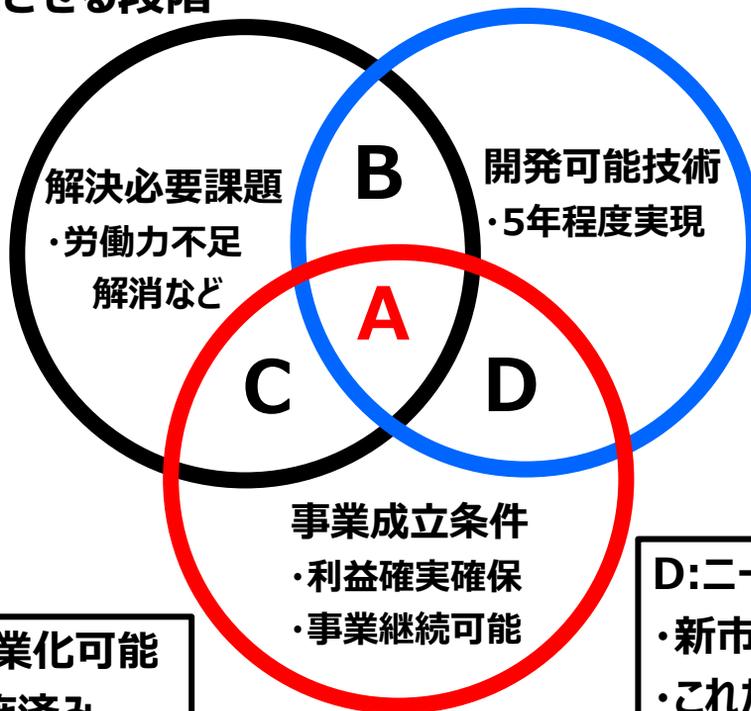
研究開発成果から事業化への道

社会課題から技術開発実施
事業として成立させる段階

B:技術開発完了, 事業化未到達

A領域を目標とする

A-Goal



C:既存技術で事業化可能

- ・既に企業が実施済み
- ・残された事業化は困難？

D:ニース創生型

- ・新市場を形成
- ・これだけでは
課題解決はできない

実用化・社会実装の阻害分析から解決へ

国際ロボット展 (iREX2023) NEDOフォーラム
2023.11.30 一部修正

[1] ロボットが果たすべき機能問題

自動車、飛行機、半導体



移動能力で
評価可能



計算/記憶能力で
評価可能

解くべき開発課題（問題）が容易に作成可能



ロボット 汎用性？ 問題の境界線設定？

評価が難しく費用対効果を読みにくい 問題作成が難しい



成功例 お掃除ロボット 自律専用作業ロボット

[2] 概念/言葉の曖昧性問題

「ロボットは汎用機械である」

- ・汎用機械など無い，人も汎用ではない。

「汎用性の高いロボットが優れたロボット？」

- ・階段も上がれず掃除しか出来ないロボット

「無限定環境で利用可能」

- ・無限定環境など現実にはない。限定から高機能化可能

「人とロボットの共生」

- ・生命/非生命 境界線があいまいで混乱の原因

「位置と力のハイブリッド制御」は，「速度と力の直交制御」に変更すべき



事業化大成功

概念や言葉の曖昧性のために，

経営者（投資家）と技術開発者の

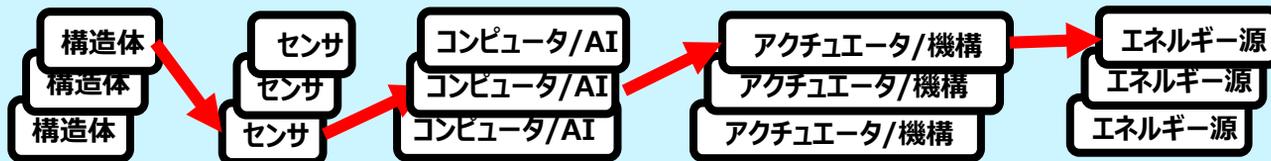
コミュニケーションは非効率

[3] システムインテグレーション問題

直列の悪魔（失敗に誘導する原因） 要素選択の冗長性

要素をどのように選択してシステム実現か？

既存SI技術には多様な解が存在



- ・一つの優れた要素開発で学术论文にはなるが、
ロボットの事業的評価はシステム全体の性能
- ・SIの科学が未熟のため、SIの技術が脆弱となり、
選択の誤りを誘発

[4] SI技術未熟問題

要素技術の成熟

- (1) コンピュータ/インターネット メモリ/演算速度の急速な進歩, ビッグデータ
- (2) センサ MEMSにより軽量化/小型化/低価格化 利用技術オープンソース化
- (3) 画像処理 小型/高速カメラ, 3Dカメラ開発加速 利用技術オープンソース化
- (4) アクチュエータ 材料開発や作り込み技術により電動モータW/g比向上
- (5) AI 変動環境への対応可能性

SI技術

- ・多くは当時あるものを寄せ集めて何とか形にしてきた60年の歴史
- ・現状のSI技術とは別の新しいSI技術開発が必要
- ・SI技術は学術論文になり難いので, 大学の貢献ほぼ皆無
(博士論文やPDのキャリアアップに研究課題とし難い)

力制御は未完成技術

[1] 理論の未完成性

$$\tau = J^T(q) [k_f(f_d - f) + \dot{f}_d]$$

f 力信号ではない
位相の遅れた信号

因果律(Causality)に反している

安定性の厳密は議論が不足 ゲイン調整は経験に依存

[2] ハードの未完成性

ロードセル式 壊れやすい 高価

重力との分離必要

剛体の力とトルクの集中計測では、柔軟物体には不十分

[5] 利用状況の多様性問題

目標システムは何か？

- ・人/環境フレンドリーと
ロボットフレンドリー境界の設定困難
- ・AI/ロボット利用境界設定重要

陸上移動は簡単に切り分け
車輪移動体 道路環境整備



並列の悪魔 (失敗に誘導する原因)

建設業

農業

製造業

食産業
食品工場

⋮

食産業
レストラン

医療

福祉

食品製造に限定しても条件は大きく異なる



目標システム設定の誤りを誘発

[6] 大学の研究テーマ設定問題

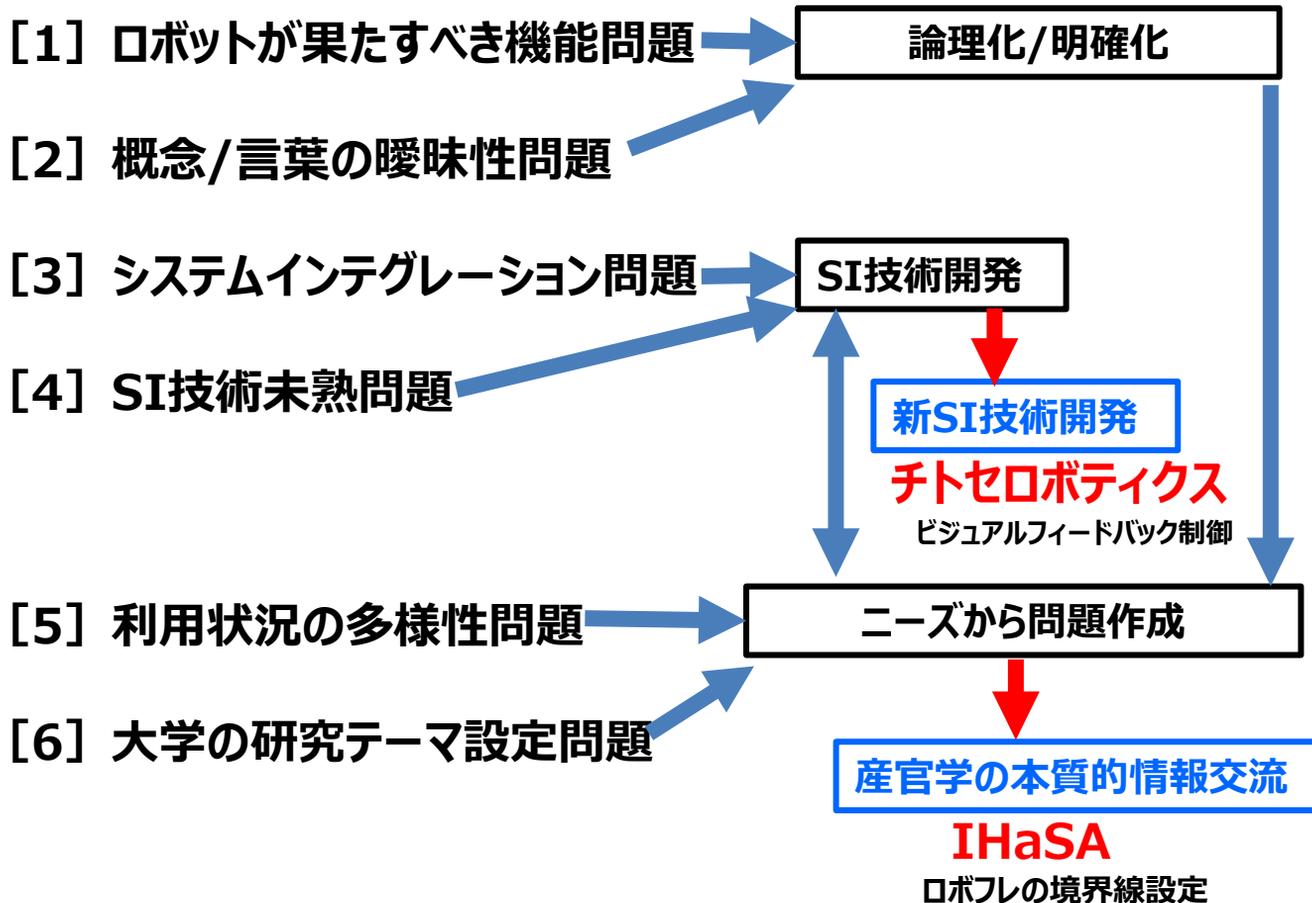
1. 事業化重要研究テーマ情報が大学に無い

- ・汎用性の高いロボットを実現する研究目標
- ・人を観察すれば，研究テーマはいくらでも思いつく
- ・実社会の正確なニーズは大学に入り難い
(研究者の消極性，企業の閉鎖性)

2. 事業化重要研究テーマを大学で実行できない

- ・問題が難しすぎて，論文化できない
- ・責任をもって若手研究者を育成できない
- ・予算獲得が難しい

阻害要因の解消法





産業用ハンドリングシステムアライアンス
Industrial Handling System Alliance

産官学の情報交換の場

ハンドリングシステムの
産のニーズを学に。
学のシーズを産に。

3年間会費無料
会員募集中

[動画コンテンツ](#) [エンドエフェクタDB](#) [会員プロフィール一覧](#) [会員情報の変更](#)

— End-effector Database

エンドエフェクタデータベース

[すべて >](#)

[センサ特徴型 >](#)

[大学発シーズ >](#)

[機構特徴型 >](#)



2023.10.26 sensor-s

SIP-S3

詳細情報なし

[詳しく見る](#)

IHaSA 産業用ハンドリングシステムアライアンス
Industrial Handling System Alliance

IHaSAについて 産官学マッチング イベント・セミナー コラム [入会案内](#)

ハンドリングシステムの
産のニーズを学に。
学のシーズを産に。

チトセロボティクス

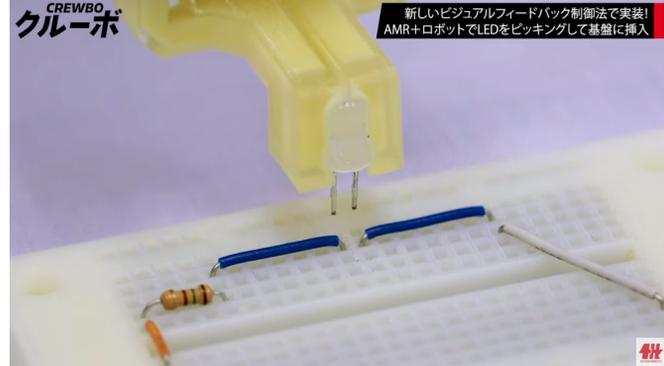
2018年3月1日 立命館大学 川村貞夫
同研究室卒業生 西田亮介 立花 京らにより起業



中小企業優秀新技術・新製品賞最優秀賞



東京都ベンチャー技術大賞で奨励賞および女性活躍推進知事特別賞



目次

1. 川村研究室 過去の研究紹介
2. 産業用ロボットの現状と新事業化課題
3. システムからの再考
4. おわりに

ロボットシステムインテグレーション方法の再考必要

①新性能を生み出すための欠落要素の発見と開発

- ・新材料利用
- ・新センサ利用
- ・・・

②システムインテグレーションの新しい方法の提案

- ・システムとしてメリットを生み出すインテグレーション法

以下

②の方法としてビジュアルフィードバック制御を例題とする

既存SI技術

ビジュアルフィードバック制御

完全な直線/完全な平面の**理想世界**を求める
幾何誤差の極小化（キャリブレーション）



- ①対象物位置を可能な限り正確にカメラ座標系で計測
- ②各座標系を正確に一致完全直角/完全平行を求める
- ③対象物位置姿勢をロボットベース座標系に変換
- ④逆運動学で関節角座標系で記述正確なリンク長さ/角度に近づける
- ⑤関節角座標系でフィードバック制御実施

現場の技術的問題

6自由度（関節）ロボット

カメラとロボットのキャリブレーションを十分に行っても、レンズひずみ、座標系変換誤差などから手先精度は 0.5mm～1mm程度

手先精度

0.5mm～1mm > 0.03mm程度

実現精度

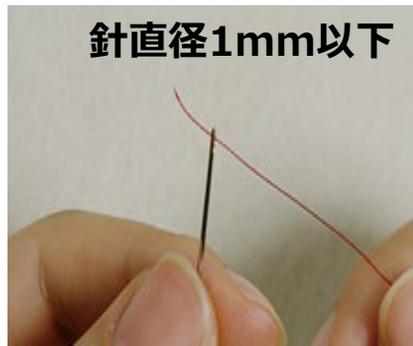
ロボット繰り返し精度

ロボット単体の位置再現性能は高くてもシステムの性能が低い

人は針穴に糸通しできる？

ロシア・アルタイ地方のデニソワ洞窟で5万年前（最古）の針発見 [Mandspels fra inuit i det østlige Sibirien - Man's parka f... | Flickr](#)
デニソワ人が針を使用 密閉性の高い防寒着を実現
デニソワ人がシベリアの極寒地に進出
シベリアを經由して日本に到達

5万年前に人類ができていたことを
21世紀のロボットができない



理想モデル主義

- ・モデルを想定
- ・誤差があれば修正して完全なモデルに近づける

要素還元主義

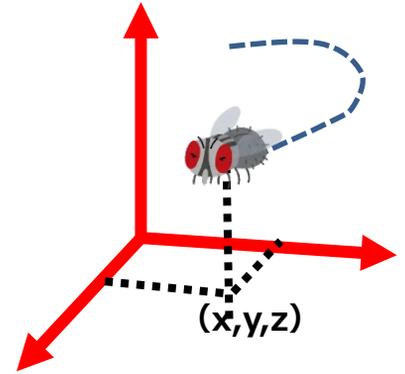
- ・大きなシステムは小さい要素に分解
- ・各要素ごとにモデルを設定し, パラメータ同定

要素還元逆課程による設計主義

- ・分解要素をモデル化してパラメータを同定した課程を逆に辿る設計

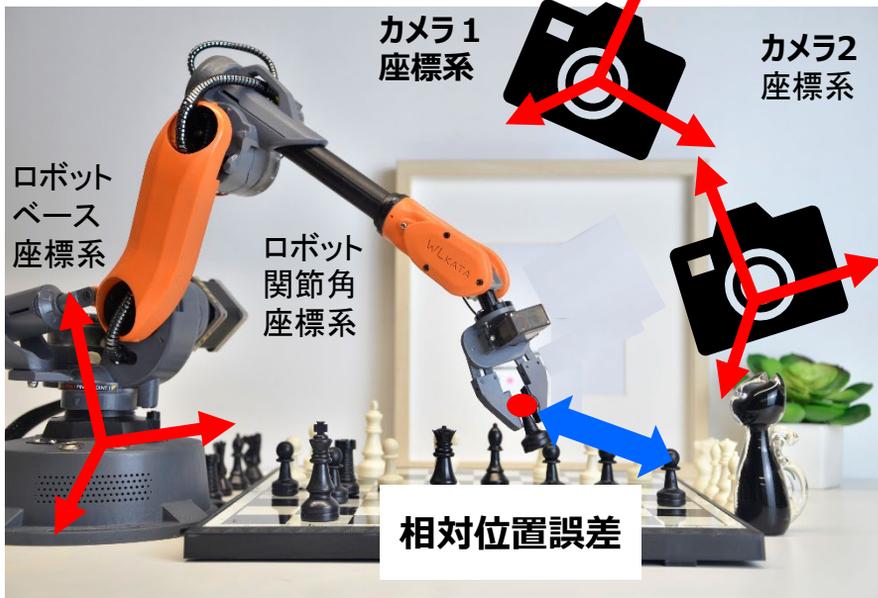


デカルト座標系



要素還元逆課程でない新しいSI法開発

対象物とロボットハンドの相対位置誤差のみの情報から制御



立命館大学
川村研2010年から
研究開始

各要素を理想モデルに近づけるので無く、
最終結果を目的に合わせる制御
途中の要素（座標系）は適当で正確でなくて良い

目標位置姿勢更新型の制御法 (2016年ごろ)

運動収束性はモデルに基づき数学的に証明可能

位置制御

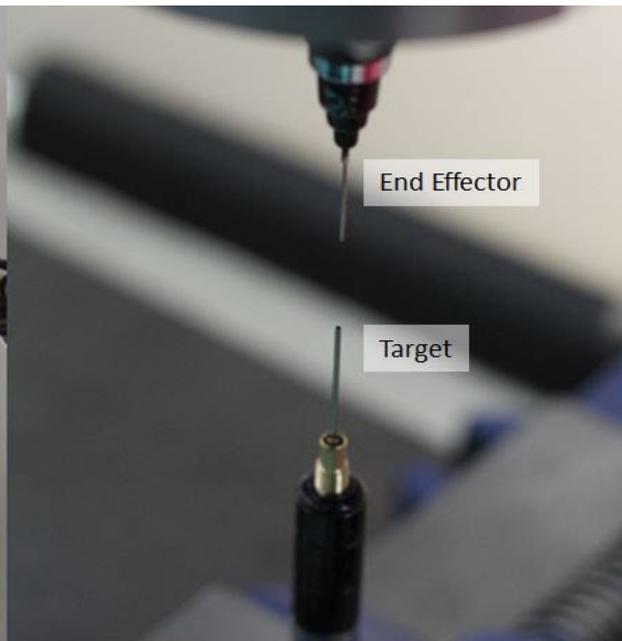
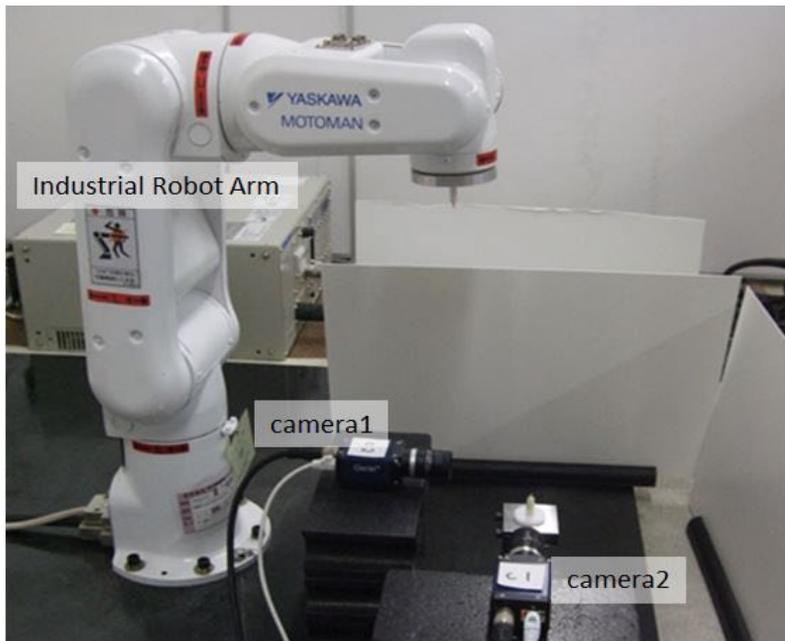
姿勢制御

$$\mathbf{x}_{vd}^{i+1} = \mathbf{x}_{vd}^i + (\tilde{\mathbf{x}}_{cd}^i - \tilde{\mathbf{x}}_c^i) \quad \mathbf{R}_{vd}^{i+1} = \mathbf{R}_{vd}^i (\tilde{\mathbf{R}}_c^{iT} \tilde{\mathbf{R}}_{cd}^i)$$

$\mathbf{x}_{vd}^i, \mathbf{R}_{vd}^i$: i ループ目のロボットの手先位置・姿勢(目標値)
(繰り返し精度が十分高いとして各ループで目標値に収束と想定)
 $\tilde{\mathbf{x}}_c^i, \tilde{\mathbf{R}}_c^i$: カメラで計測された i ループ目のロボットの手先位置・姿勢
 $\tilde{\mathbf{x}}_{cd}^i, \tilde{\mathbf{R}}_{cd}^i$: カメラで計測された i ループ目の目標手先位置・姿勢

2023年現在バージョンは連続的運動実現

20 μ mでの挿入作業実現



**工業用カメラ利用
固定せず安易に設置**

カメラ、ロボットの座標系キャリブレーション負担ない

新しいビジュアルフィードバック制御を開発



トップ > テクノロジー > 4台のロボットが協調して針に糸を通す、地味だけどすごい実証動画

テクノロジ 2023.09.08

4台のロボットが協調して針に糸を通す、地味だけどすごい実証動画

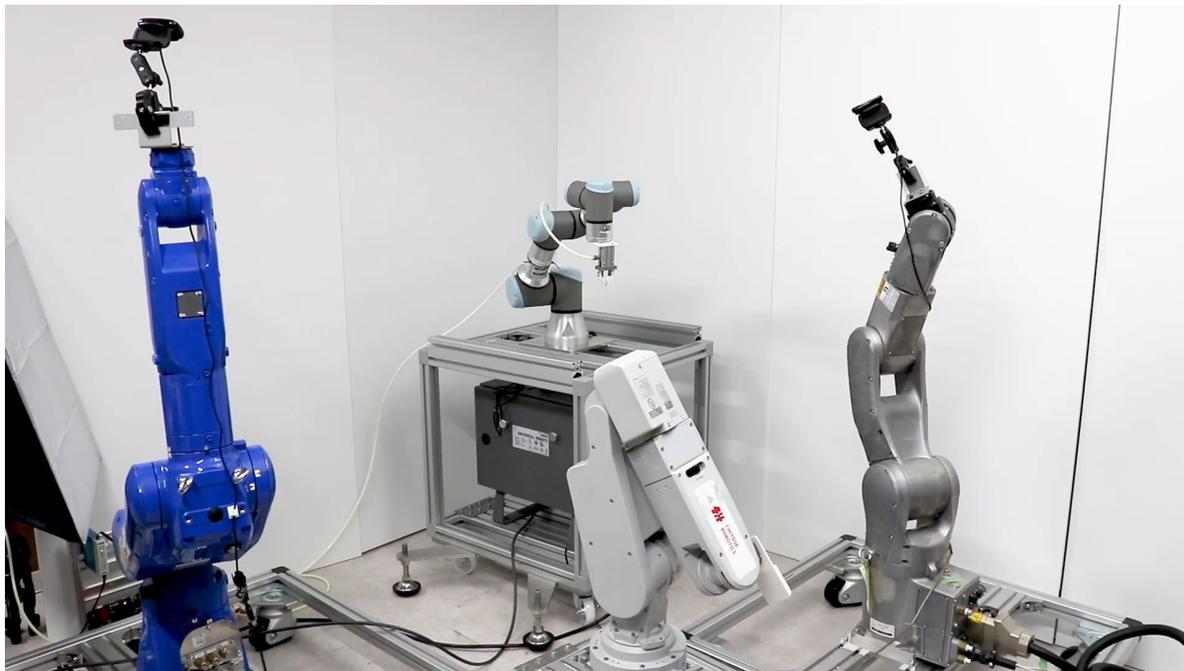
Forbes JAPAN Web-News | Forbes JAPAN編集部

記事フォロー

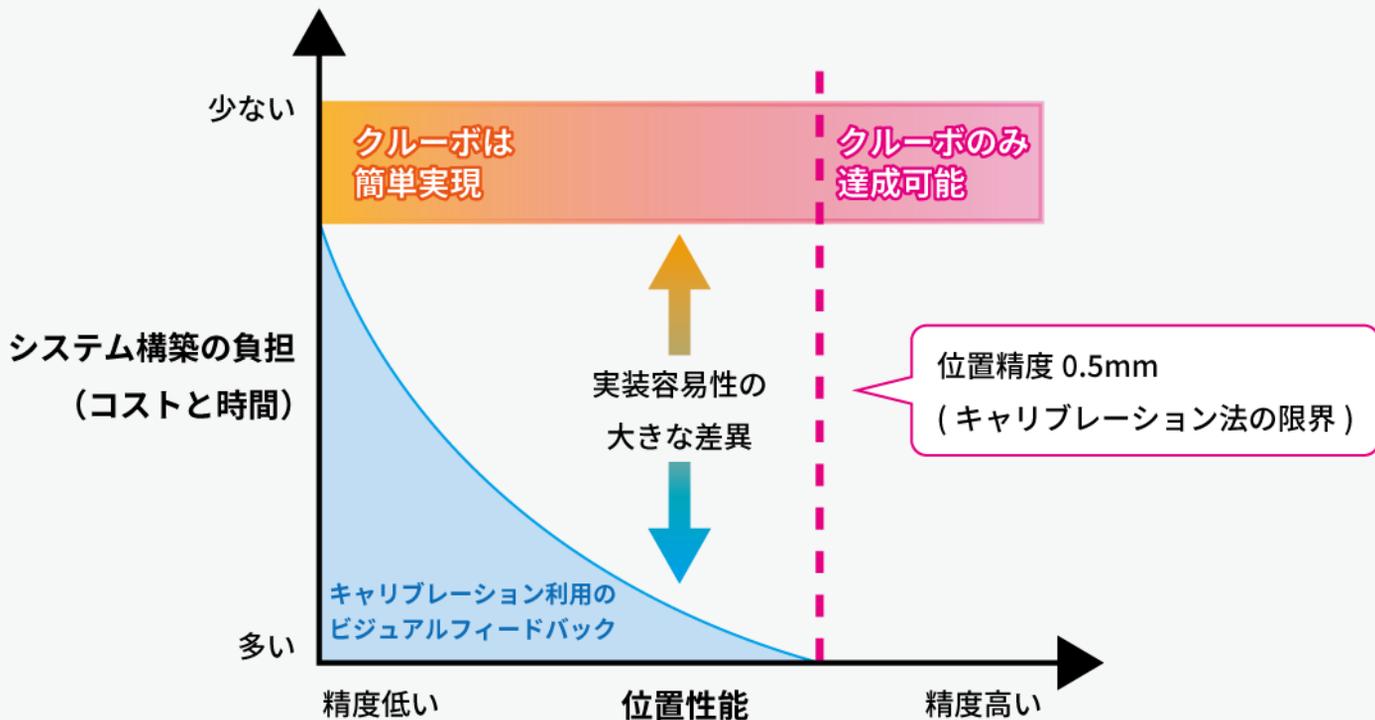
記事を保存

Forbes Japanに掲載 2023.9.8

チトセロボティクス 産業用ロボットに適用可能なソフトウェア（クルーボ） 販売中（詳細会社HP）



キャリブレーション利用法(従来方法)との比較



不定形ケーブルトラッキング作業



目次

1. 川村研究室 過去の研究紹介
2. 産業用ロボットの現状と新事業化課題
3. システムからの再考
4. おわりに

おわりに

- ・ロボティクスは、ようやく60年程度の学問
- ・発展途上であり、未完成部分が多く存在
特に、SI技術は再考する必要あり
- ・SI技術を支えるSI科学が重要
- ・現実世界のシステム全体を考えたSIが有用
(建設ロボットに合致したSI技術が有用)



アテナイの学堂 (ラファエロ作 バチカン宮殿)

Cyber空間 Physical空間



プラトン

アリストテレス

理想の美しい世界の追及 直線はひたすら真っすぐ

パルテノン神殿
理想世界に合わせ、直線に見えるように現実を曲げている



- しかし、現実には理想世界ではない
- ・曲がっている現実に合わせて方法必要
 - ・Cyberの道具をPhysicalに如何にして利用するかが重要