

急速なAI技術発展のなかでの ロボット開発の課題と現状 ＋ 課題解決の取り組み

**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
川村貞夫**

目次

〔 1 〕 川村研究室紹介

〔2〕 AIの様々な誤解と解決の努力

〔3〕 ロボット研究分類

〔4〕 人工知能によるロボット運動制御の考察

〔5〕 産業用ロボットへのLLM/VLM利用法の提案

〔6〕 おわりに

研究内容

繰り返し学習制御
ビジュアルフィードバック制御

空気圧駆動システム
ワイヤ駆動システム
水中ロボットシステム

制御

機構

システムインテグレーション

身体運動科学
合気道の科学

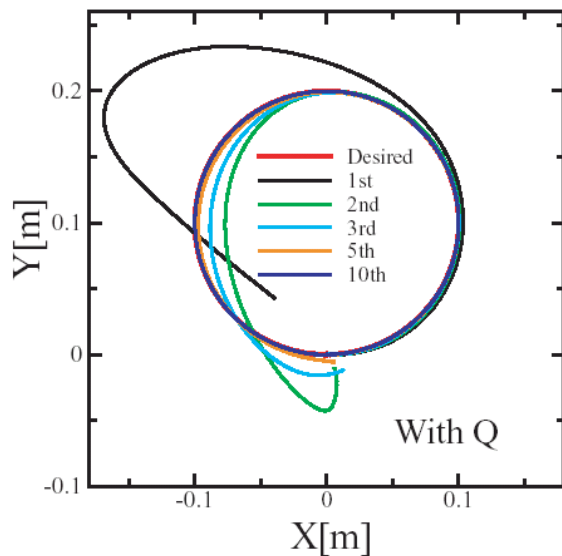
ロボットハンドリングシステム

繰り返し学習制御例

フィードフォワード入力の形成

運動の繰り返しを利用

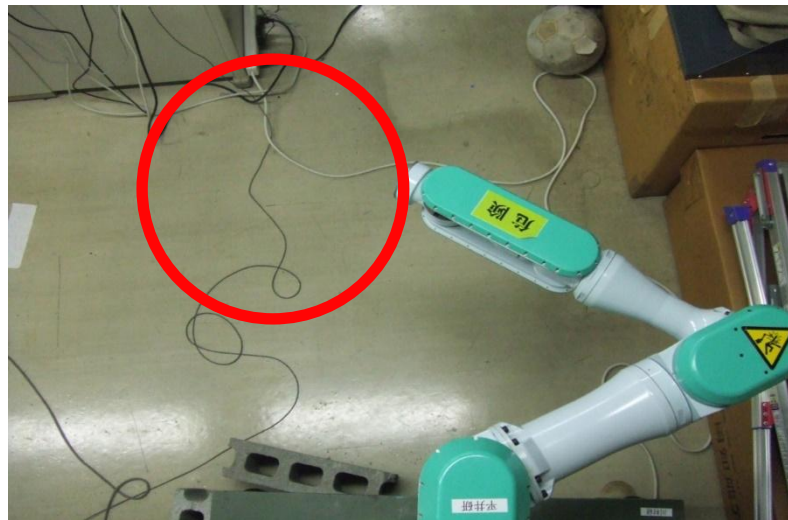
ダイナミクス/キネマティクスの情報不要



人の作業はいいかげんでも

ロボットは高速精度に運動することを厳密に証明

目標運動例



摩擦など補償困難な要素を含む場合も

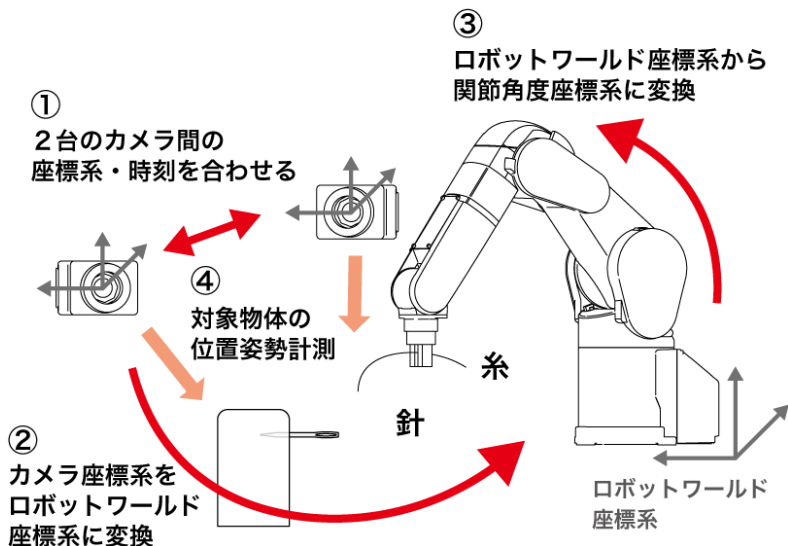
高速高精度な軌道追従を実現

ビジュアルフィードバック制御

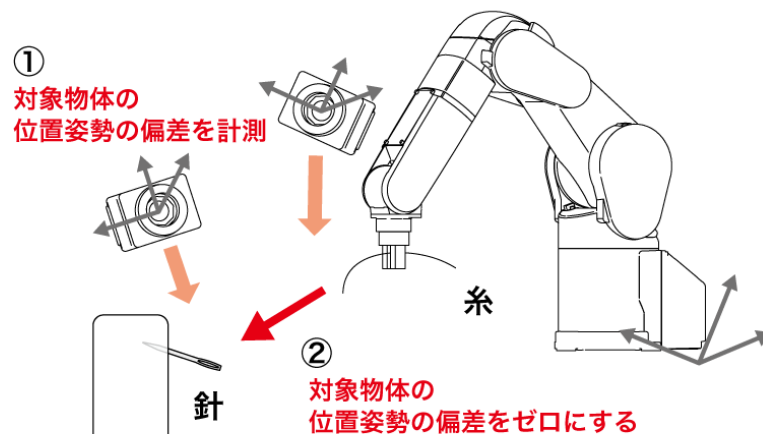
人の作業はいいかげんでも

ロボットは高速高精度に運動することを厳密に証明

従来方法



新提案法

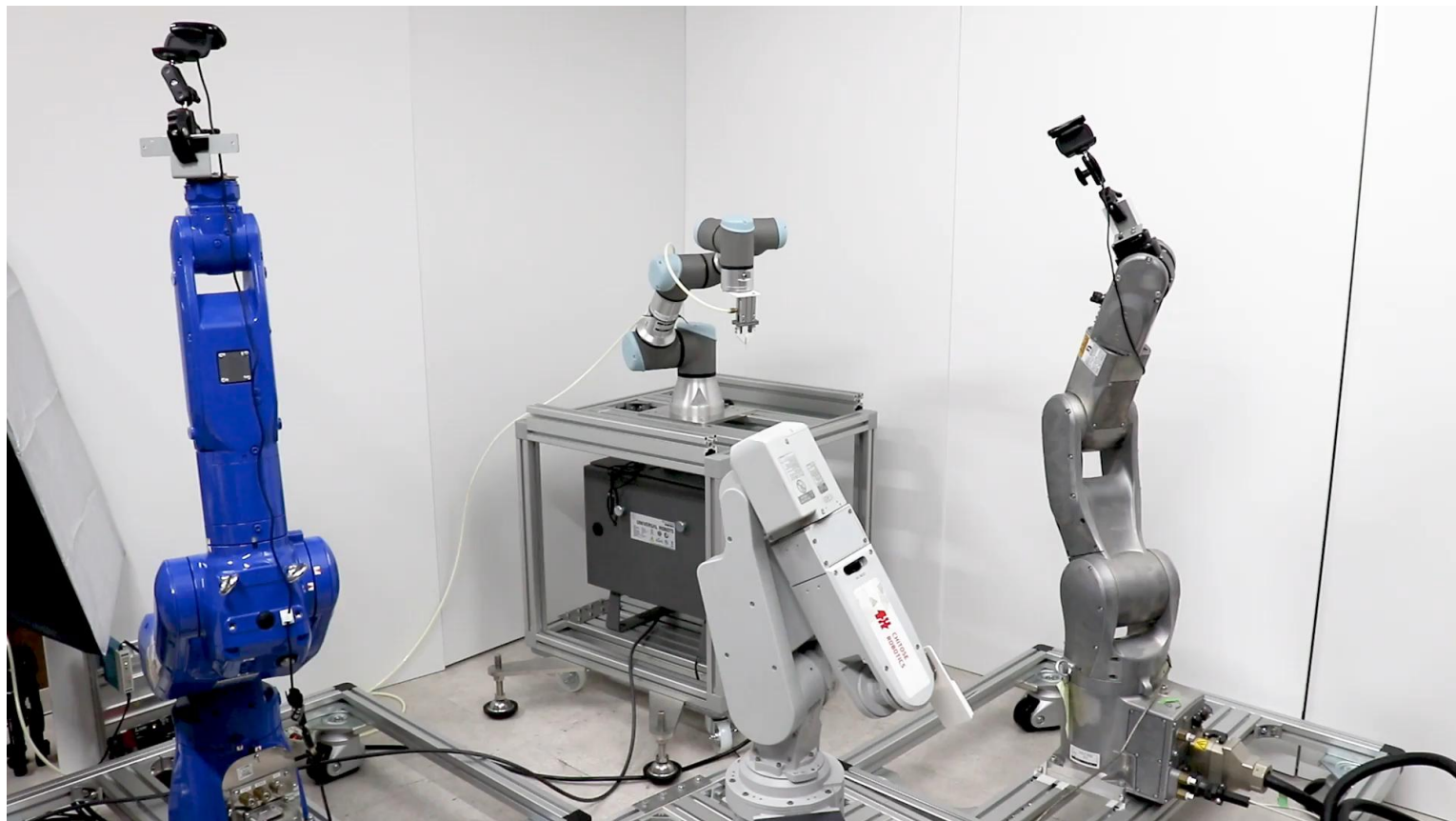


チトセロボティクスHPより抜粋

Chien Chern Cheah, Masanori Hirano, Sadao Kawamura and Suguru Arimoto, "Approximate Jacobian Control for Robots With Uncertain Kinematics and Dynamics" IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.19, No.4, pp.692-702, 2003

研究室の基礎研究から(株)チトセロボティクスの事業へ

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

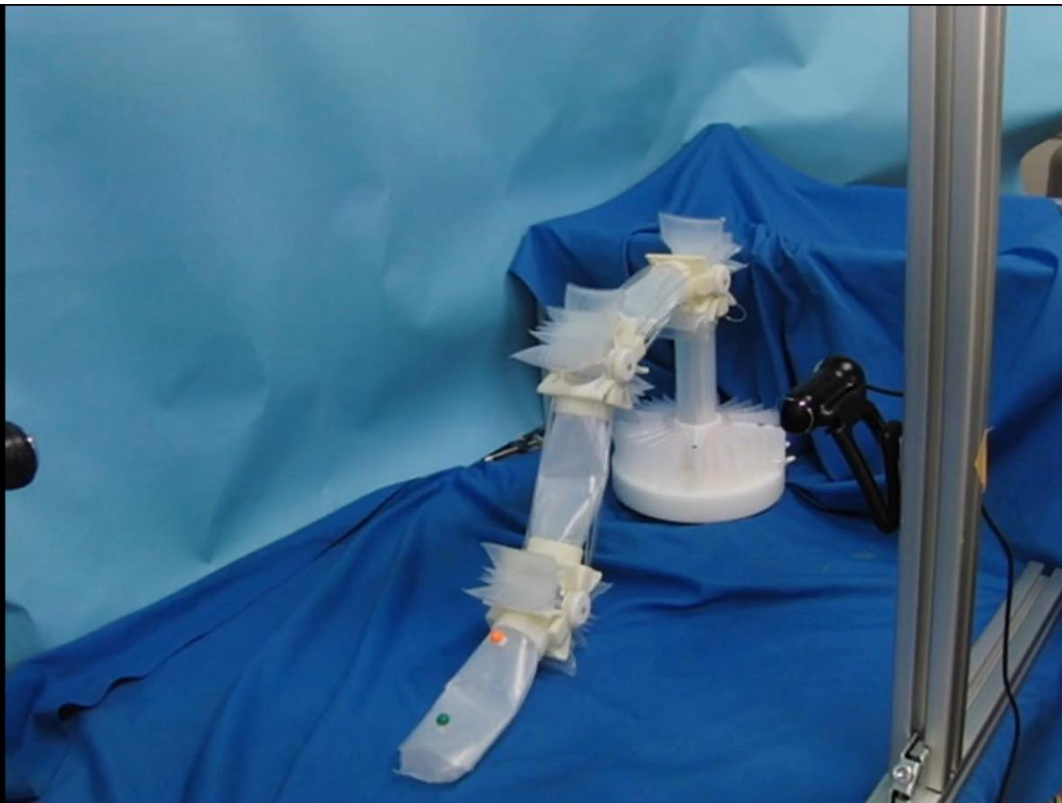




**株式会社チトセロボティクス 産業用ロボット制御ソフトウェア「クルーボ」
一般財団法人 機械振興協会主催「第59回（令和6年度）機械振興賞」
「中小企業庁長官賞」を受賞**

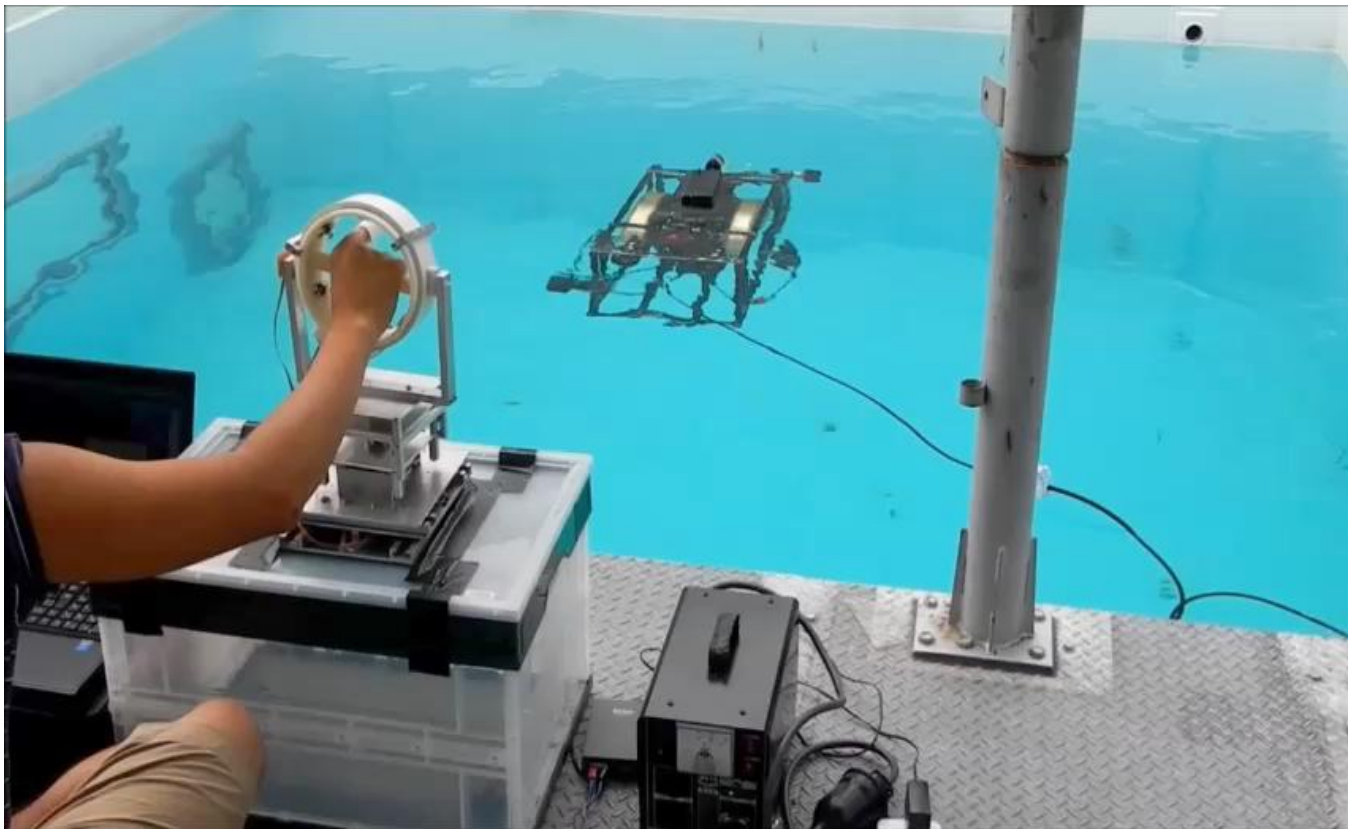


第59回機械振興賞表彰式(令和6年度) 令和7年2月20日(木) 於 東京プリンスホテル

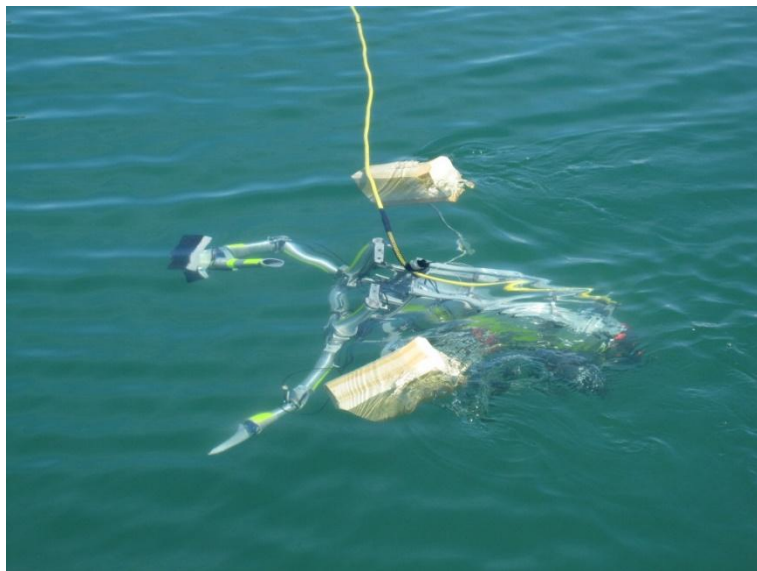


リンクやアクチュエータが、インフレータブル構造であるので、内部の空気を抜けば、小型化できる可能性があります。
Since the links and actuators have an inflatable structure, there is a possibility that they can be miniaturized by removing the air inside.

片手操縦可能水中ロボット“有手海”

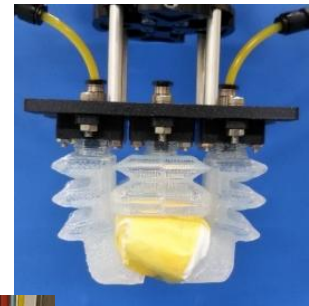


YouTube公開中



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

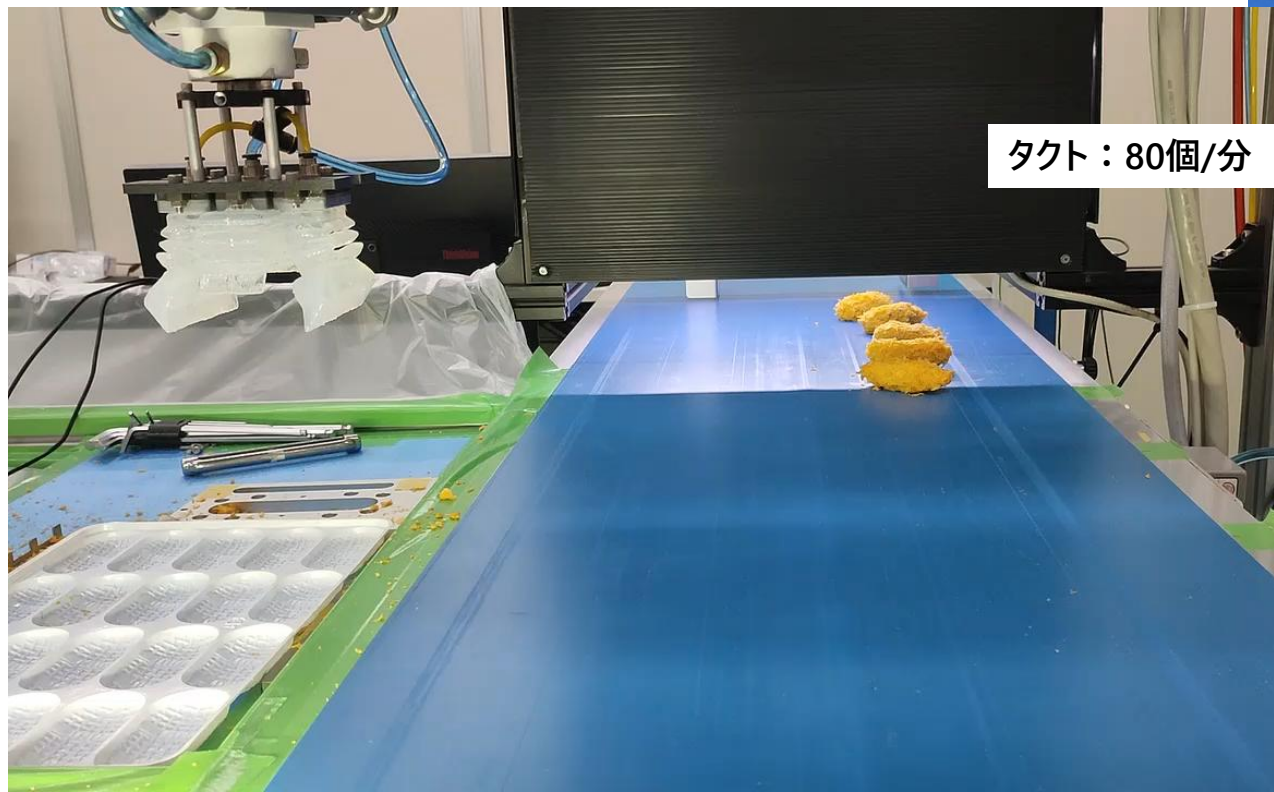
液体シリコン3Dプリンタ利用 ロボットハンド開発



カキフライ (40 g)



耐久性：100万回突破



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
- ・モバイルマニピュレ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



カメラ

MSM

制御用PC

PDH



- ・40人程度の被験者（食事者）の食後画像データを入手
- ・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

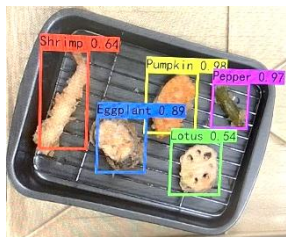


システム化技術開発例 食品盛り付け作業



- 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



人工知能による食品認識

人工知能による
目標盛り付け位置姿勢



目次

[1] 川村研究室紹介

[2] AIの様々な誤解と解決の努力

[3] ロボット研究分類

[4] 人工知能によるロボット運動制御の考察

[5] 産業用ロボットへのLLM/VLM利用法の提案

[6] おわりに

(1)人工知能＝高度なロボットの誤解

誤解例：「ターミネータ2」ストーリー

ターミネータ（T-800）からスカイネット誕生に繋がる

コンピュータ素子を，サイバーダイン社の技術者が開発

「コンピュータ素子」の開発が，革新的技術との説明

しかし，エネルギー源，アクチュエータ，構成材料などに

技術的ブレークスルーがなければ実現困難

ブルドーザなどが既にあるので，知能さえあれば，

ターミネータは実現できるとの誤解

機構と制御はレベルの低い技術で開発済み，

知能を加えればロボットは完成するとの誤解



<https://www.flickr.com/photos/31029865@N06/5845550732/>

(2)誤解解消の努力

ロボット

**センサ, コンピュータ, アクチュエータ, エネルギー源の統合体
(人工知能)**

という, 当たり前の事実を確認する必要あり



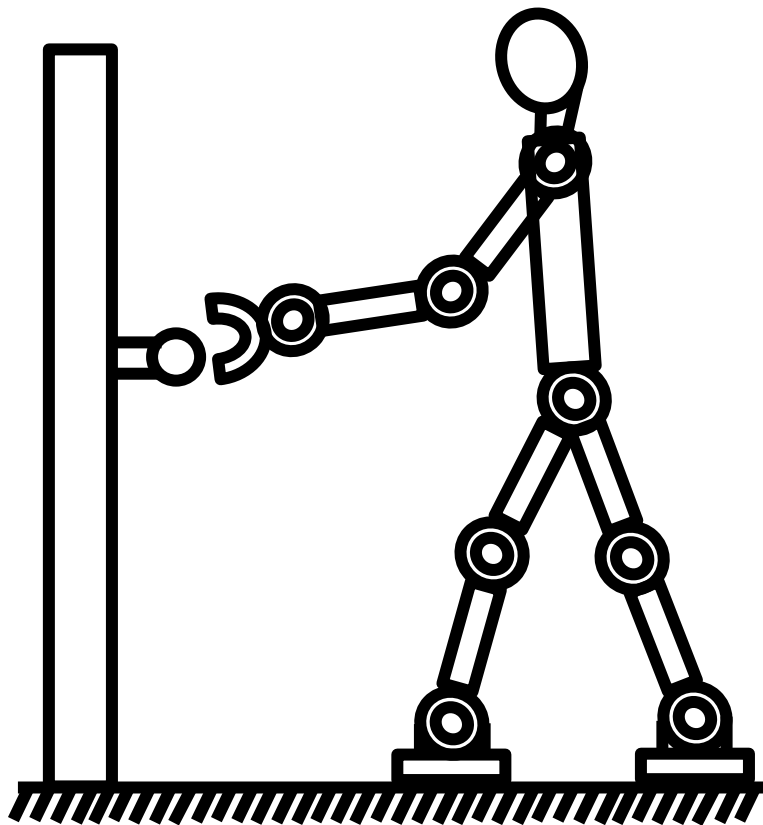
提言「より良い近未来創造のためのロボット/AIの理解と人材育成」

令和2年 日本学術会議 機械工学委員会 ロボット学分科会 委員長 川村貞夫

<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-24-t293-1-abstract.html>

(3) 運動制御は簡単との誤解

意識しない運動

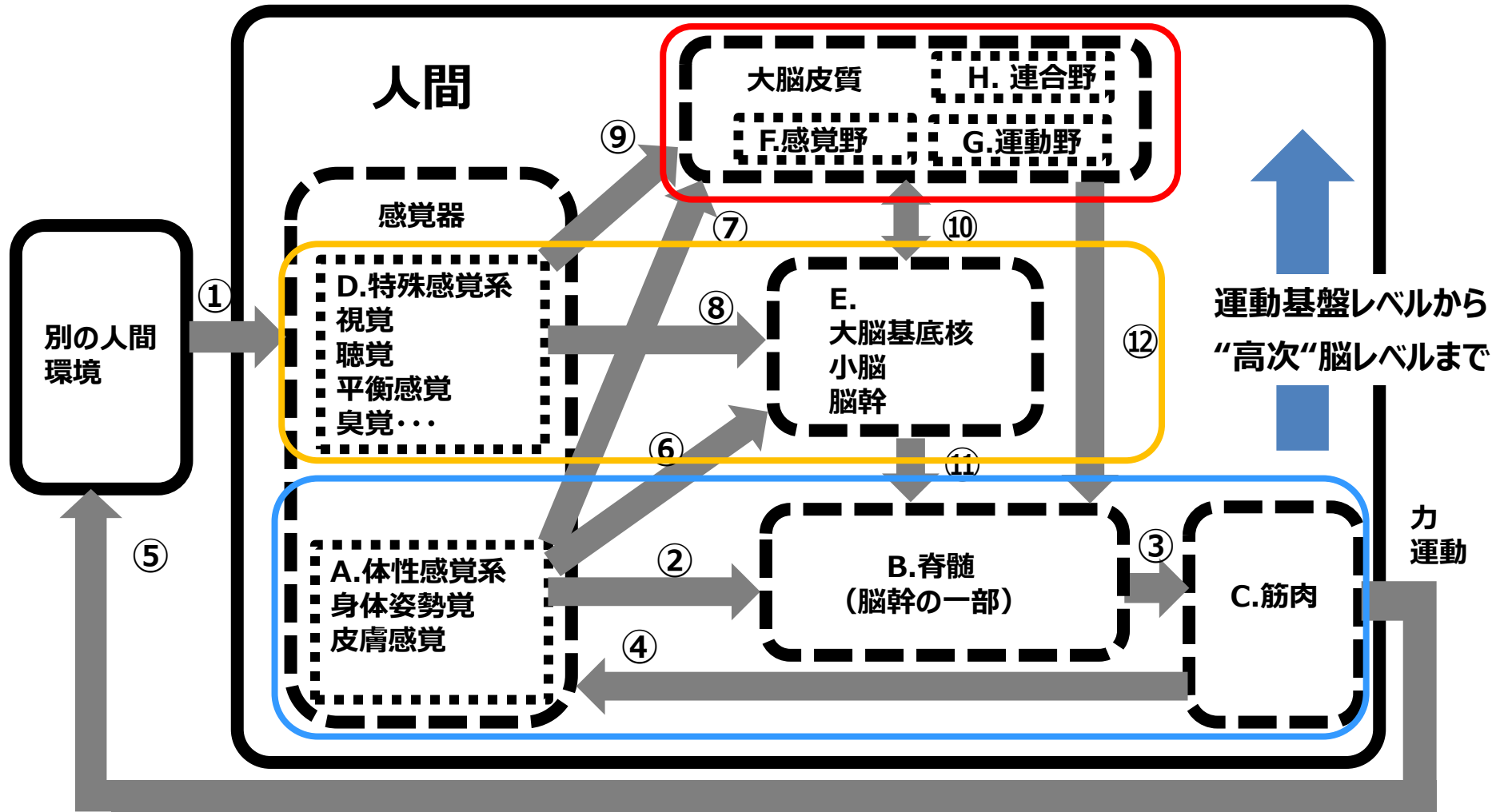


運動：ドアに接近して，ドアノブを把持

- ・ドアに接近する
- ・足をドアの前の適当な位置に止める
- ・腕を伸ばして，適当な肘角度とする
- ・ドアノブを把持して，ドアに力を加える
- ...

- ・接近時に右足か左足か決断したか？
- ・ドアの前の位置を意識したか？
- ・肘角度は妥当解のために計算したか？
- ...

重要な運動は意識しなくとも実行できる



脳の階層構造

反射 大脳が関与しない

歩行 無意識でも可能 意識もでき

- ・大脳への負担を低減し，高速運動を実現するために有利
- ・生物の進化の過程で，このような脳の発達となったと想定
- ・人は，意識せずに運動できるので，簡単にできると誤解
- ・「“低次レベル”の脳で運動は実現でき，“高次レベル”の脳が全体を制御する。」と運動を“低次”と認識した誤解

(4) ハード性能よりも高度AIが重要との誤解

産業用ロボット+代表的ハンド+**先端**AI

これで何とかなるか？ 脳だけ発達しても鳥は飛べない
機構について妥当な考察からハンドを選定または新開発

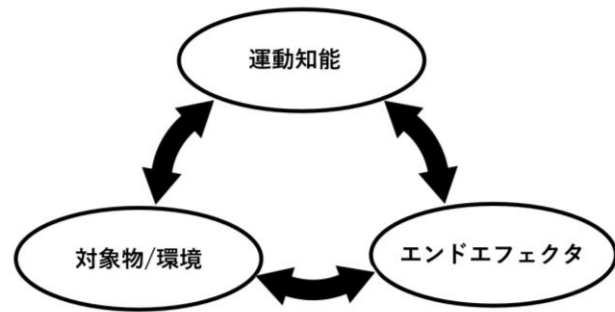
機構とAIの相補的システム統合

工学的視点でのハンドリングシステム設計

- ・対象物種類と目的を限定して

適切なハンドを選定/開発後に運動知能を構築

- ・機構の合理性を考慮しないデータ蓄積は非効率的



解決に必要な活動

①異なる機能/形状のロボットハンドのデータベース

ロボット革命産業IoT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 川村貞夫（23年～24年）原田研介（25年～）

<https://www.jmfrri.gr.jp/library/library-4828/>

- ・オープン化された生成AIにデータ提供
- ・AI利用ハンドリングシステム構築

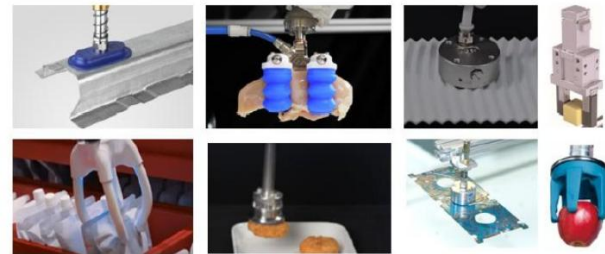


②新ロボットハンド開発

- ・ニーズに基づく新ハンド研究開発
- ・RRIニーズ・シーズ課題整理サブワーキンググループ
（ハンド以外の課題も検討）

2025年6月発足（企業会員募集中）

委員長 川村貞夫（25年～26年）



【ロボットハンドガイドブックRev 1 ダウンロード】

■はじめに ■基礎編 ■応用編（組立）
■応用編（多品種ピック） ■応用編（惣菜）

目次

[1] 川村研究室紹介

[2] 様々な誤解と解決の努力

[3] ロボット研究分類

[4] 人工知能によるロボット運動制御の考察

[5] 産業用ロボットへのLLM/VLM利用法の提案

[6] おわりに

ロボット研究の方向性

①生物/人の理解のための科学（科学）

脳研究 身体運動科学 生物進化 Analysis by synthesis

②機械（人工物）の科学（科学）

複雑な機械が巧妙に動く説明 具体的な社会課題は無くても良い

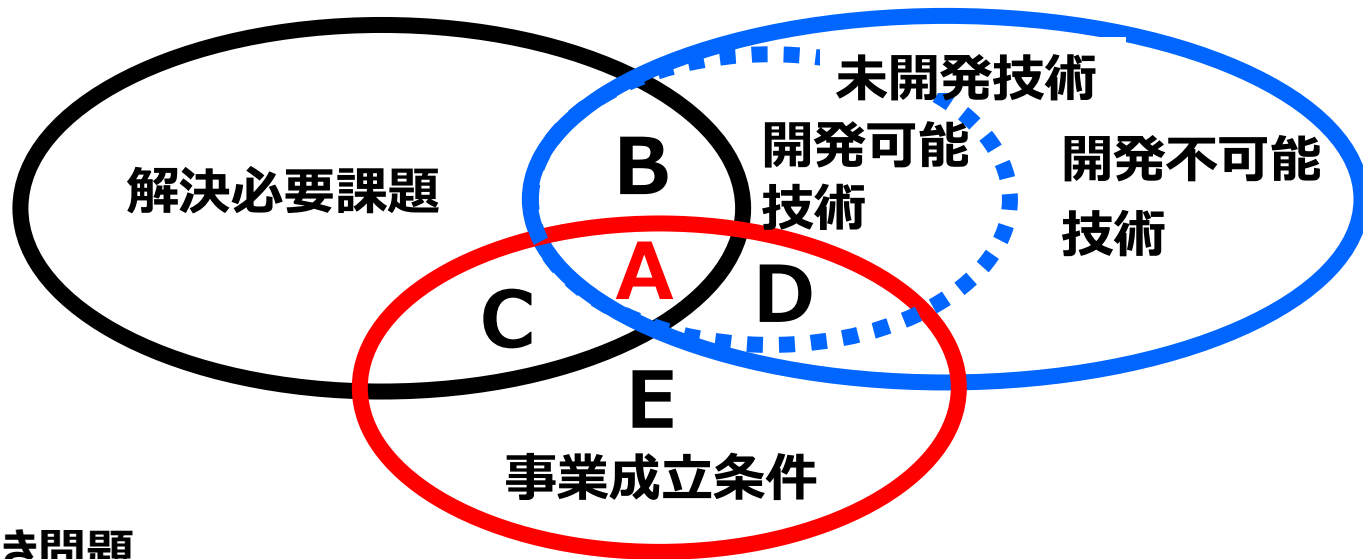
③高度な技術による社会課題解決（技術）（本講演の立場）

具体的社会課題解決 市場経済の中での事業化条件満足

重要点

- ・研究目的ごとに評価基準を分けるべき
- ・研究目的の軸がブレないことが重要
- ・③に集中する人材を増やすべき

事業化成立条件



A:明確化すべき問題

B:ニーズ/シーズのマッチングで成果であっても事業化できない成果

C:既存技術で事業化可能で，多くは既に企業が実施済み

D:ニーズ創生で新市場を形成できるが，これだけでは解決必要課題解決はできない

E:既存技術で事業化成立するが，解決必要課題解決できない

目次

[1] 川村研究室紹介

[2] 様々な誤解と解決の努力

[3] ロボット研究分類

[4] 人工知能による

ロボット運動制御の考察

[5] 産業用ロボットへのLLM/VLM利用法の提案

[6] おわりに

(1) 繰り返し学習制御 (1984年～)

- ・ロボットのフィードフォワード入力を時系列信号としてメモリ 運動制御にデータ利用
- ・一つの目標運動に対して繰り返し運動を利用 目標速度変化も実現可能
- ・高速高精度にロボット運動を実現
- ・パラメータ推定など不要で, 摩擦効果の変動にも対応可能

問題: 多様な目標運動に対して適用不可

モデルか, データか?
科学か工学か?

(2) メモリベースド学習制御 (1990年代～)

Moore, Atkeson and Schaal "Memory-Based Learning
for Control" CMU-RI-TR-95-18, 1995

- ・様々な目標運動/作業に対して入力をNNで構成
- ・逆動力学をNNで実現する方法
- ・摩擦などモデル化困難にも対応可能

$$\dot{x} = f(x, u)$$

問題: 高精度を要求すれば, NN構成の時間とコストの問題発生
モデルを過度に一般化したために, 現実的效果が低下

(3) 機械学習(強化学習/模倣学習)によるロボット運動制御 (1990年代～)

- ・エージェントが環境内で行動して報酬を受け取り,
報酬を最大化するように行動を調整**
- ・複雑な問題の設計が可能**
- ・2000年代以降：深層学習をロボティクスへ利用**
- ・2010年代からディープラーニング（深層学習）進展**

特徴

- ・視覚（カメラ画像）から行動を学ぶ「エンドツーエンド制御」**
- ・シミュレーションで学習して 現実に応用する「Sim2Real」**

機械学習によるロボット運動制御の問題

1. データ収集困難/高コスト問題

ロボットは実空間で動作して大量の試行錯誤が必要

2. シミュレーションと現実のギャップ（Sim-to-Real問題）

3. 計算資源とリアルタイム性の両立困難

大規模な計算資源とロボットのリアルタイム制御の不整合

4. 解釈性の欠如（ブラックボックス性）

産業応用で重要な説明責任困難

5. 汎化能力の不足

6. 報酬設計が困難

川村見解 「機械学習手法の直接/全面利用は、
工学としてのロボットの運動制御には不適」

(4) LLM/VLM (以下ChatGPTによる回答抜粋)

LLM : Large Language Model (大規模言語モデル)

多くのテキストデータを使って学習された自然言語処理 (NLP) モデル

GPT (OpenAI) BERT (Google) LLaMA (Meta) など

LLMの仕組み

- ・入力された単語や文をトークン (単語の単位) に分解**
- ・トークンの関係性 (文脈) を学習した重みを使って理解**
- ・次に来る単語を予測するように動作 (例 : 文章生成)**

VLM : Vision-Language Model (視覚言語モデル)

コンピュータビジョンと自然言語処理を統合した人工知能モデル

視覚情報も解釈できるようにした拡張モデル

Flamingo (DeepMind) PaLI (Google) BLIP/BLIP-2 (Salesforce)

GPT-4V (OpenAI) など

LLM/VLMによるロボットの運動制御

1.LLMを使った運動制御（言語ベース）

自然言語の指示を理解して運動計画を生成

例：「リンゴを冷蔵庫に入れて」を動作シーケンスに変換

モデル・システム名

SayCan（Google, 2022）

言語モデル（PaLM）＋実行可能性のスコアリング（Can）で家庭ロボットに「できそうな」動作を選択

Code as Policies (CaP)

LLMにロボット行動コード（Python）を直接生成させ動作に変換する

Robot Programming via LLMs

自然言語 → プログラムコード → モーターコマンド に変換することで柔軟な制御を実現

2. VLMを使った運動制御（視覚＋言語ベース）

画像や映像を理解し、自然言語での指示と照合して行動

モデル・システム名

RT-1（Google Robotics, 2022）

ロボットの実行データ＋画像＋言語のセットで学習されたモデル

RT-2（2023）

VLM（PaLI-X）を応用し、Web上のテキスト・画像知識をロボット行動へ転用

VIMA（Meta, 2023）

言語と視覚の入力からロボット操作を計画するマルチモーダルモデル

LLM/VLMによるロボット運動制御の技術的課題 (川村見解)

誤動作リスク

言語が曖昧で意図しない動作になる危険性

自然言語は空間的/幾何学的関係を表現する際に非常に曖昧

推論と計画のギャップ

LLMは計画が得意だが細かい物理制御は不得意

実行不意可能な計画を作り出す

センサとの統合能力低い

実世界のセンサデータ（触覚、力など）との統合が難しい

触覚などのデータ取得のためには実際に接触する必要あり

リアルタイムフィードバック制御不可

データ効率低い

実ロボットデータが少ないため模倣学習やシミュレーションが必要

データ取得のための学習過程で誤動作のため対象物/環境に衝突

目次

[1] 川村研究室紹介

[2] 人工知能とは？

[3] 様々な誤解と解決の努力

[4] ロボット研究分類

[5] 人工知能によるロボット運動制御の考察

[6] 産業用ロボットへの

LLM/VLM利用法の提案

[7] おわりに

高剛性/高速/高精度の産業用ロボットにどのようにAIを利用するか？

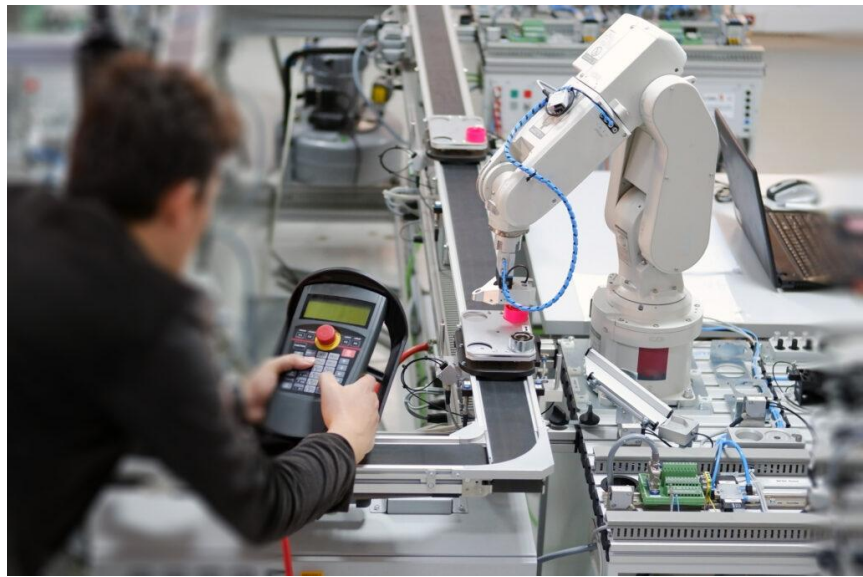
産業用ロボットアーム

- ・作業現場で誤動作は許容されない
- ・コントローラー位置フィードバック制御で高速高精度な運動は保証
- ・高剛性の精密機械であるので、機械的接触は避ける

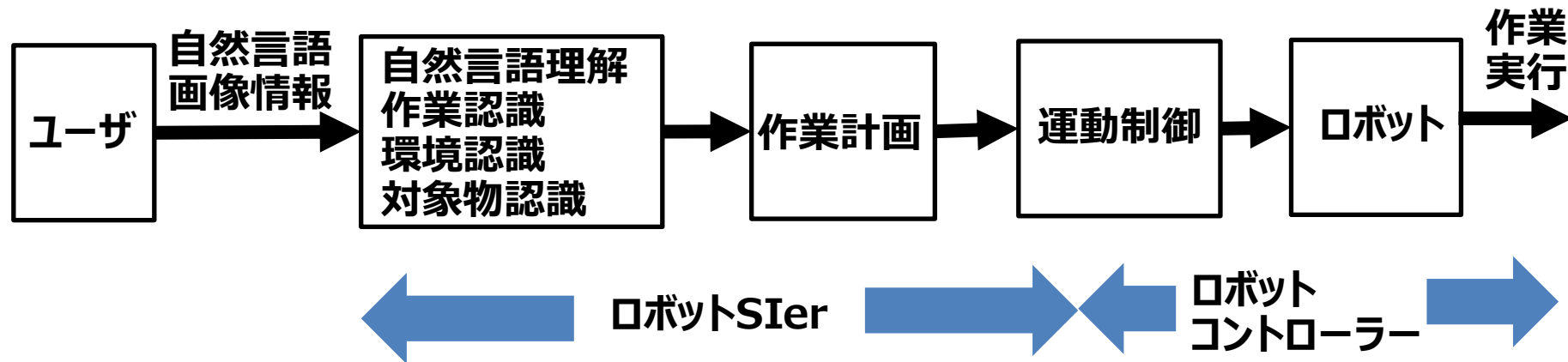
ニーズ

- ・外界の環境変化に対応したい
- ・教示再生の負担を無くしたい
- ・学習は可能な限り避けたい

産業用ロボット + AI ?



産業用ロボットの教示再生法

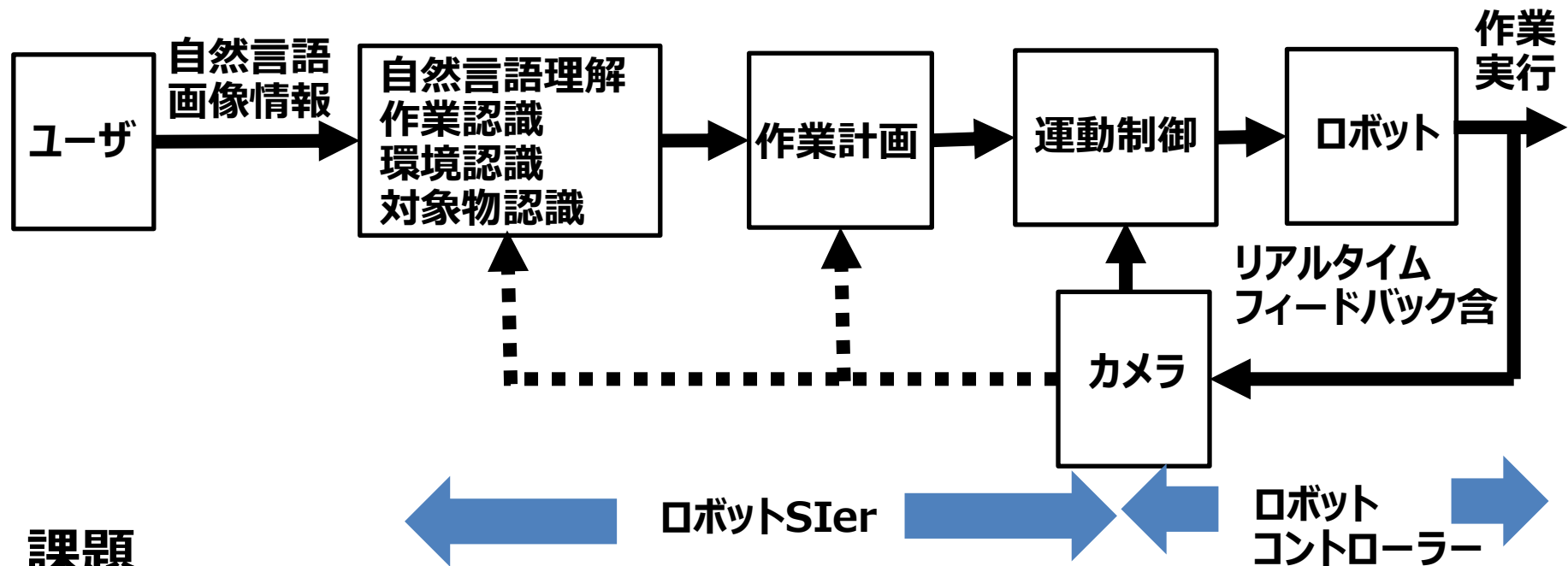


原理的には人の操縦型制御

課題

- ・環境変動に対応できない。カメラなど外部環境を認識必要
- ・ロボットSIerの教示の負担大 教示に有能なSIerも不足

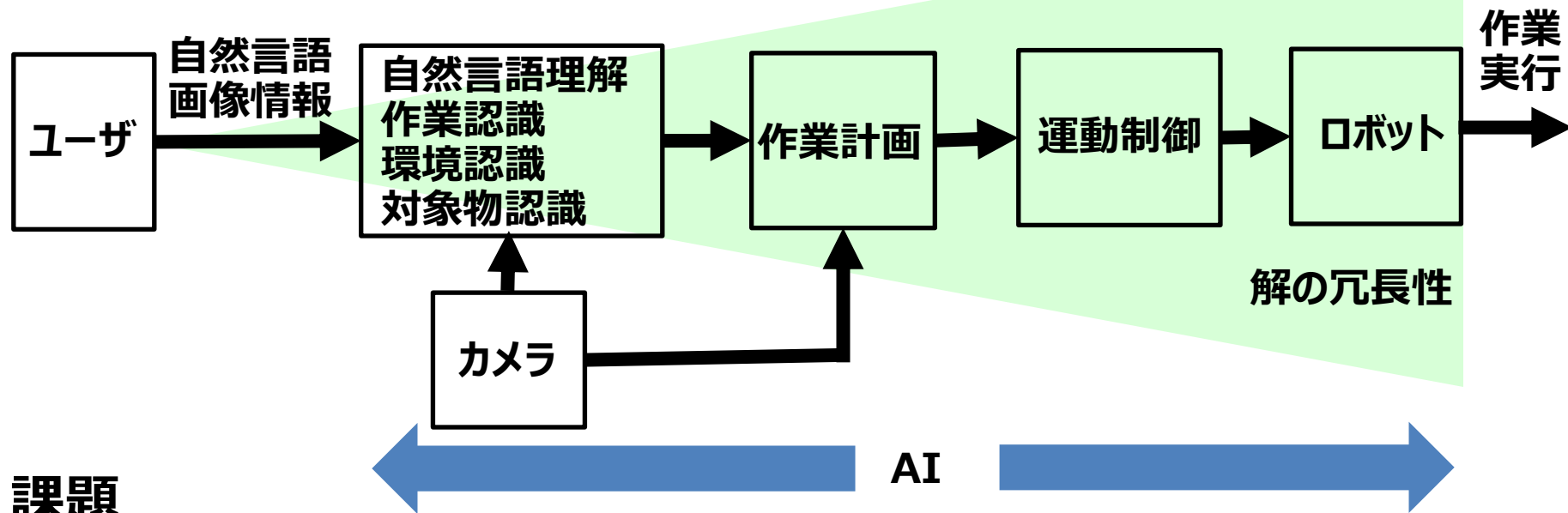
ロボット外界センサフィードバック制御法



課題

- ・ロボットSierに画像処理など高度なスキル必要 有能なSierは不足
- ・ロボットの智能化にエンジニアの負担増大

AI高依存型ロボット運動制御法 (End to End Learning)



課題

- ・リアルタイム性が無いので細かい環境変動に対して上流から修正必要
- ・汎用性を求めるために解の冗長性が莫大となり,
信頼性の高い作業実現に到達できない
- ・運動学/動力学の微細な調整をAIで実施（データの蓄積）は非効率的

AI部分利用型ロボット運動制御法

「LLM/VLMを用いた産業用ロボットの動作指示システムの提案」

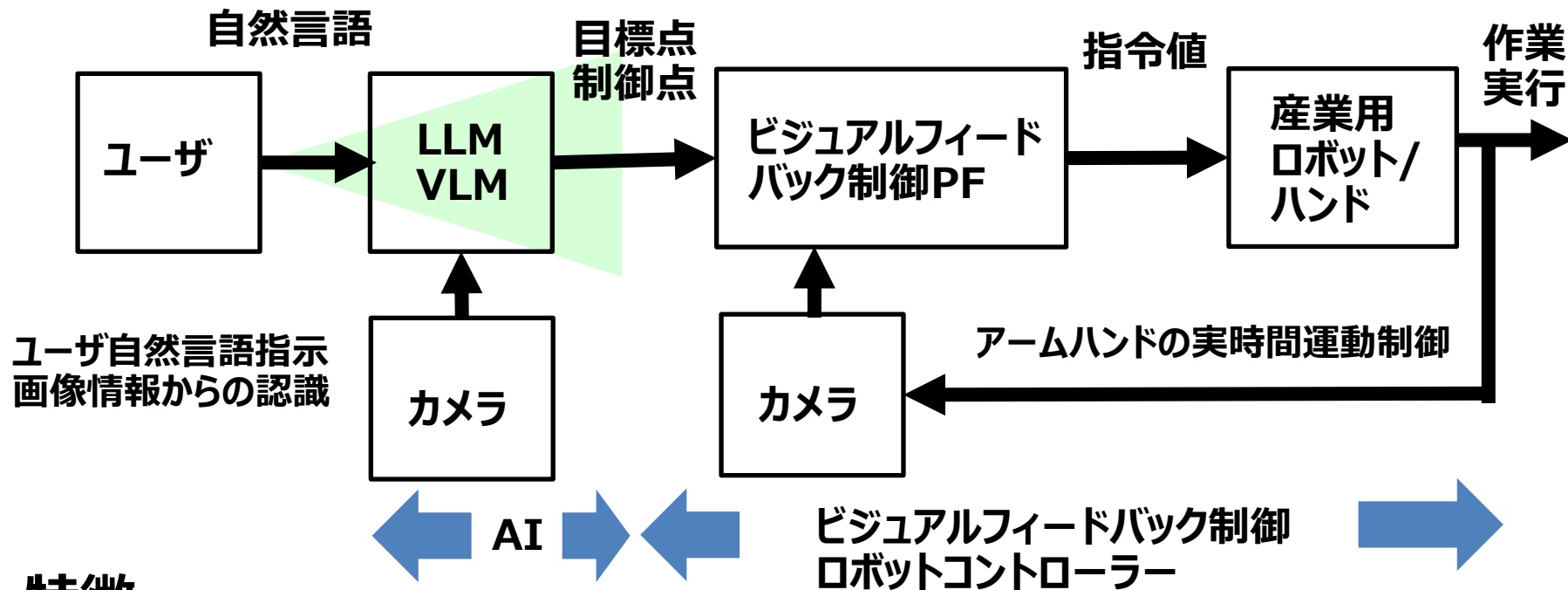
川村貞夫, 西田亮介, 加古川篤, 清水悠太, 島田伸敬

日本機械学会ロボティクスメカトロニクス学術講演会2025山形（2025.6.5）発表

（1）産業実用のための条件

- ・1年または2年以内に社会実装可能なシステム設計
 - ・作業限定（ピックアッププレイス作業）
 - ・精度/速度/コスト条件満足（位置精度1mm, 速度人と同程度以上）
 - ・完全自立型（教示時のみユーザ介在 実際の作業時は完全自律型）
 - ・既存産業用ロボットシステム利用（PLC, ハンド, コンベアなど）
 - ・実世界基盤としてシミュレータ不使用
 - ・一般ユーザ利用可能
- （ユーザにロボット操作の知識を求めず, 作業者への指示と同程度説明を要求）

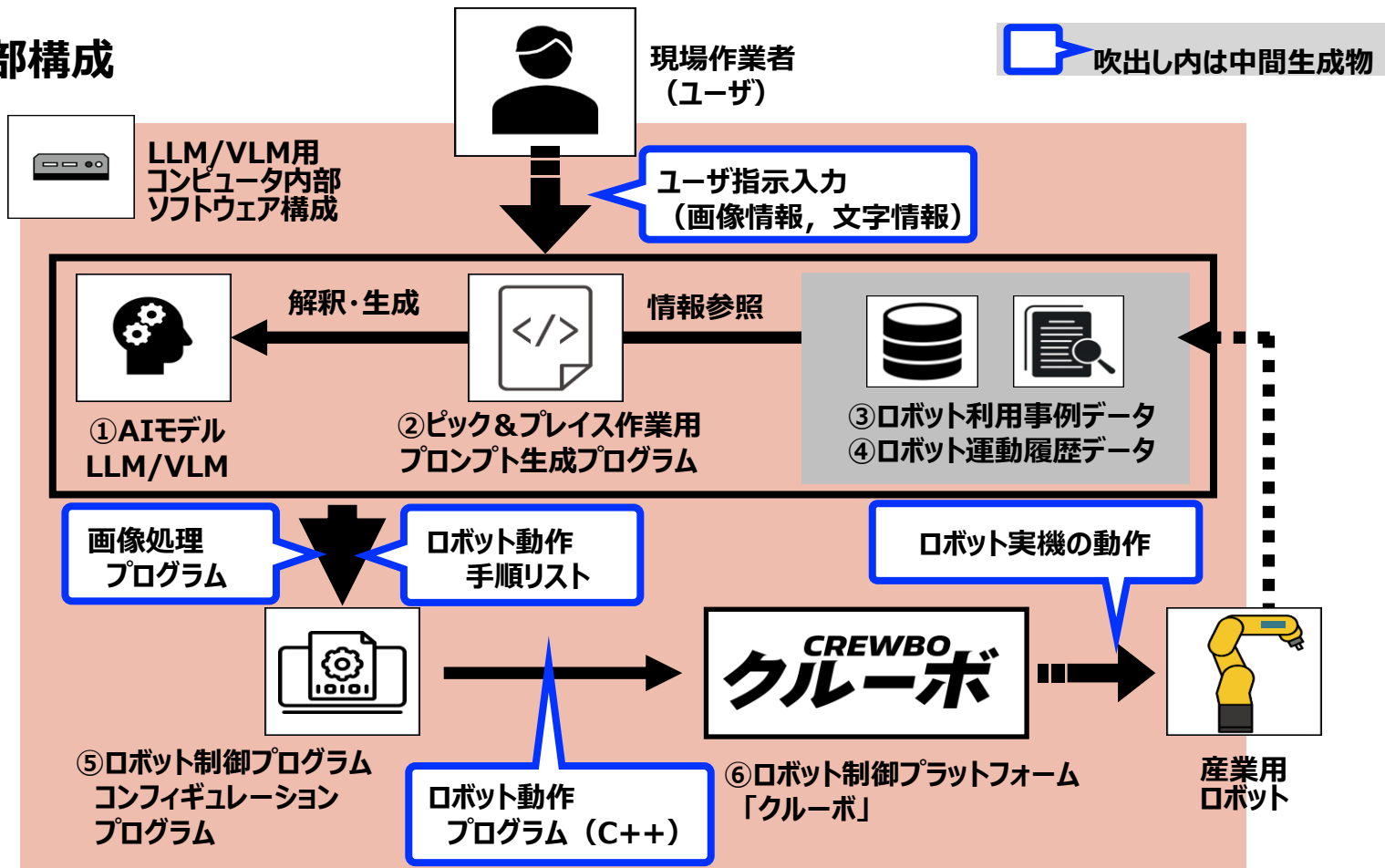
本提案 LLM/VLMがVF制御の目標点/制御点を与えるプログラム作成



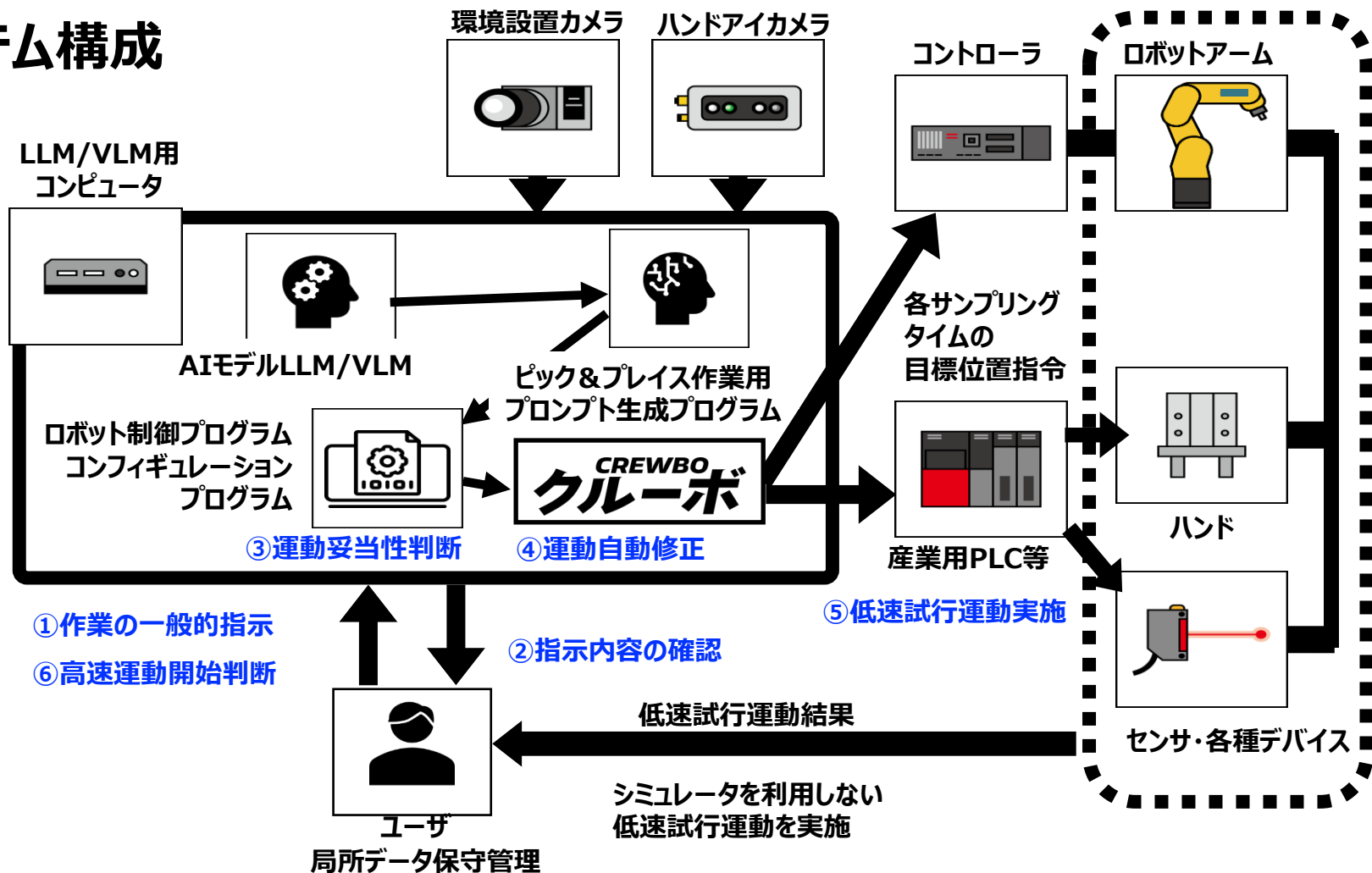
特徴

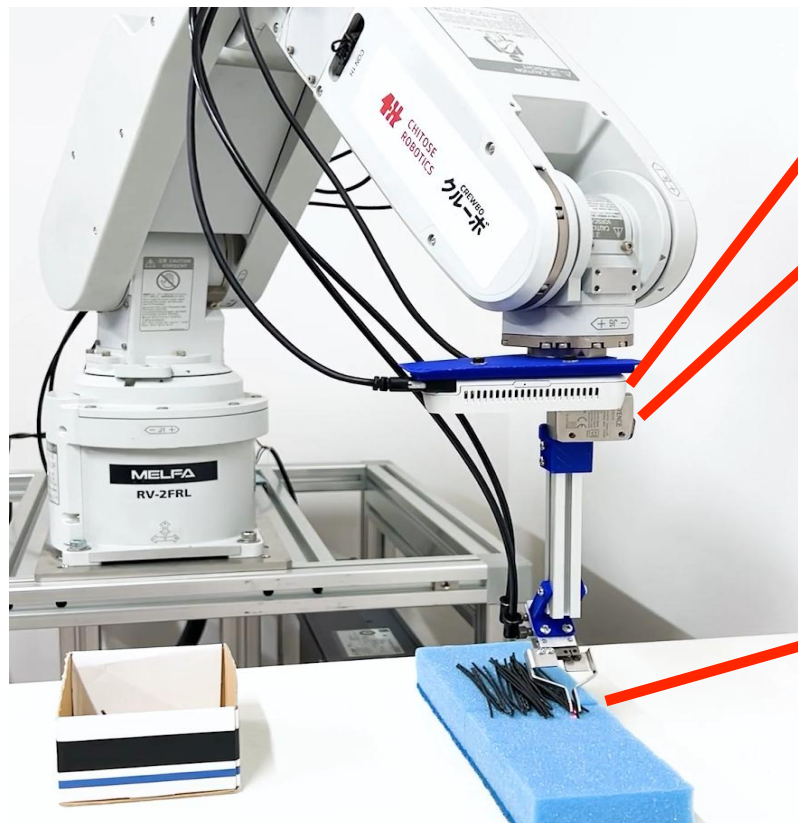
- ・作業限定により作業計画を圧縮
- ・実時間ビジュアルフィードバック制御により細かい環境変動に対応
- ・LLM/VLMはユーザからプログラム作成に限定

コンピュータ内部構成



システム構成

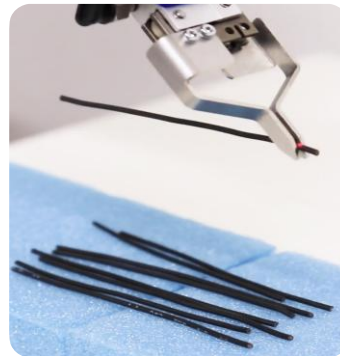




ハンドアイカメラ
Realsense D415

レーザセンサ
LR-ZB250AN

小型エアハンド



対象ワーク：
極細ワイヤ

実機実験

○作業の一般的指示

ユーザ入力

ロボットのカメラ画像には、青い電線が写っています。
青い電線をロボットでピックアップして横に置いてください。

○指示内容の確認

6 wires detected



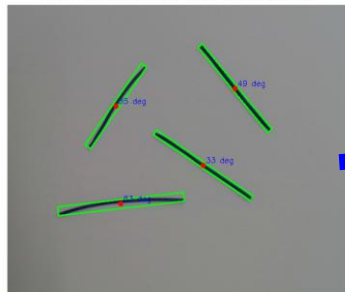
LLM/VLM 出力

画像中の**青い電線の中央付近の座標(画像ピクセル)**を以下の通り検出しました: 図中では、それぞれの電線の中央に緑の点を描画しています。

ユーザ入力

カメラ画像に写っている電線は4本です。
正しくありませんので再提案してください。

4 wires detected with orientation



生成内容の修正指示

○実機動作実施



タクトタイム: 4秒

指示から動作の時間: 約20分

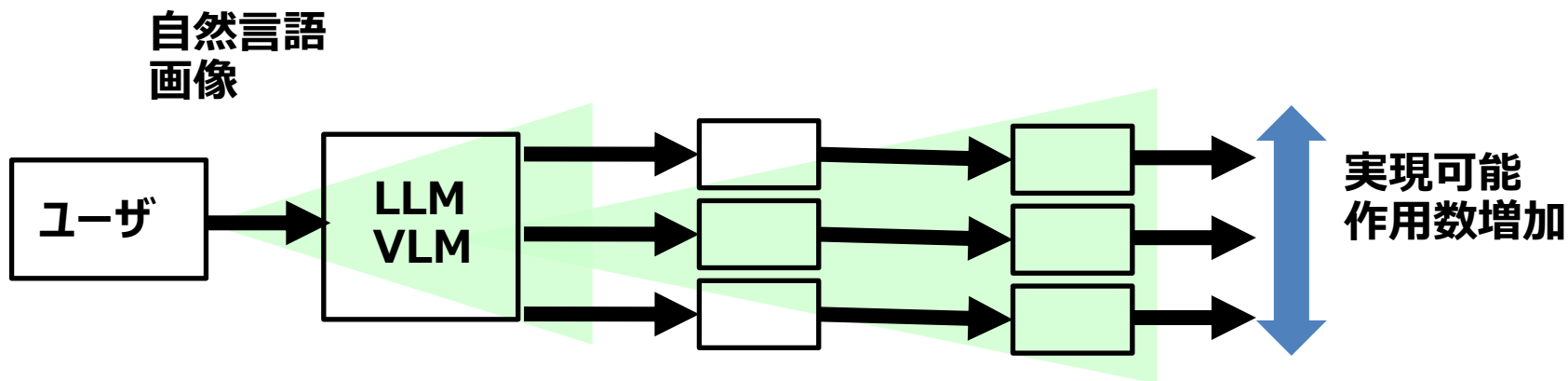
ロボット動作の流れ

1. 与えられた画像認識プログラムからビジュアルフィードバック制御
2. ピック&プレイス作業用エンドエフェクタと規定運動でワーク把持
3. プレイス位置まで移動してプレイシング動作

ユーザの自然言語指示と画像認識から
コーディング無しで
ビジュアルフィードバック制御実行を達成

作業特化AIロボット運動システム構築

- ・過剰に問題を一般化せず，単純な問題に限定
- ・LLM/VLMの長所を最大に引き出し，
短所を出さないシステムインテグレーション技術開発が有用
- ・解決できた単純な問題を複合することにより，
より高度なシステム構築を目指す



目次

[1] 川村研究室紹介

[2] 様々な誤解と解決の努力

[3] ロボット研究分類

[4] 人工知能によるロボット運動制御の考察

[5] 産業用ロボットへのLLM/VLM利用法の提案

[6] おわりに

飛行（羽ばたき vs 滑空）

エネルギー効率の良い滑空

例：アホウドリ「ダイナミック・ソアリング」

翼3.7メートル 一度も羽ばたかずに数千キロ滑空

第1次世界大戦後ドイツは連合国から動力機付き航空機開発を禁止
その結果、滑空の理論と技術が高度に発達し、その後の航空宇宙開発に貢献
（「大空への挑戦: 航空学の父カルマン自伝」に詳しく記載）



大鷲



<https://aviation.stackexchange.com/questions/21112/why-can-gliders-fly-for-so-long>

AI（全利用 vs 部分利用）

- ・フィジカル空間の物理法則を基礎とする方法とAIの合理的統合技術
- ・エネルギー効率の高いロボットシステムとして有用なAI技術開発
- ・マニピュレーションというフィジカル空間での制約条件が指針

**AI・ロボット
ロボット・AI
AI（ロボット）ではなくて、**

**ロボット(AI) AI in Robot
システムインテグレーションとして合理性の説明必要**