

実時間視覚フィードバックによる 高速ロボットの制御とその応用

High-speed Robot Control and its Applications Using Real-time Visual Feedback

山川 雄司 (Yuji Yamakawa)

東京大学 大学院情報学環・学際情報学府
生産技術研究所 (兼務)
大学院工学系研究科 (兼務)

 Yamakawa Laboratory, The University of Tokyo
High-speed Flexible Robotics
<http://www.hfr.iis.u-tokyo.ac.jp>

Agenda

- ❑ High-speed Vision System
- ❑ High-speed Robot beyond Human
 - Dynamic Manipulation
 - High-speed Running Robot - ACHIRES
- ❑ Intelligence of Industrial Robots
- ❑ Micro-manipulation by Human-Robot Collaboration

High-speed Vision System

- 高速カメラと高速画像処理技術の統合システム
- 高速 (1秒間に1,000枚) に画像を取得するとともに、画像処理が可能なカメラシステム
- 従来のカメラのフレームレート (1秒間に30枚) の約33倍であり、人間の目の33倍→普通の動きはスローモーション

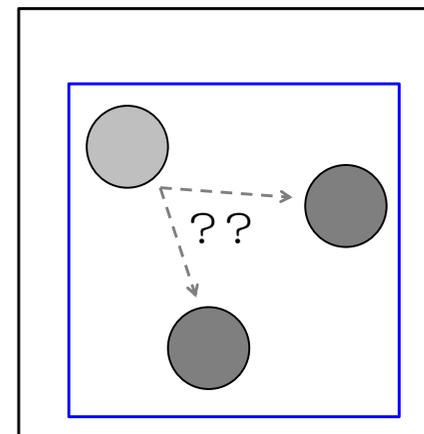


- 自動車 (約100km/h) では、1ミリ秒では約3cm !!
- 新幹線 (約300km/h) では、1ミリ秒では約8cm !!

Why can we achieve high-speed ?

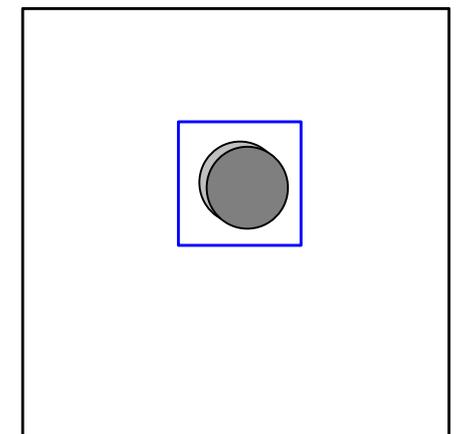
- : 前フレームでの対象
- : 現フレームでの対象

従来のカメラ



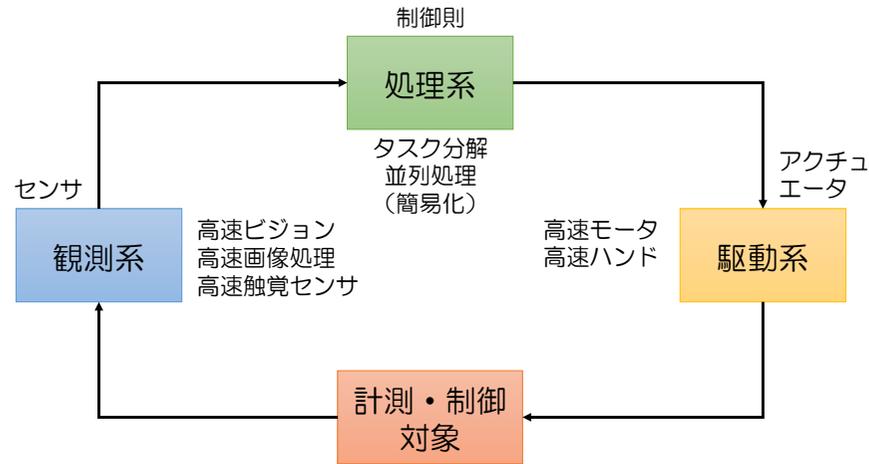
探索領域が広い→処理時間が長

高速カメラ



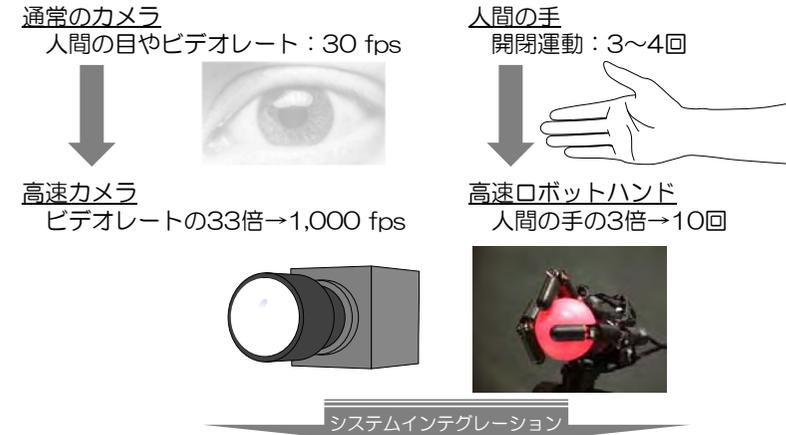
探索領域が狭い→処理時間が短

High-speed Intelligent System



常にボトルネックがどこにあるかに注意し、それを排除していく作業が不可欠！

High-speed Robot



高速ロボットシステム
トータルでは、**人間の100倍の高速性**
→人間の視覚認識行動系を超える超高速ロボット

Agenda

- High-speed Vision System
- High-speed Robot beyond Human
 - Dynamic Manipulation
 - High-speed Running Robot - ACHIRES

- **Intelligence of Industrial Robots**
- **Micro-manipulation by Human-Robot Collaboration**

Industrial Robots

- もっとも導入されているロボット
 - 繰り返し精度 数百マイクロメートル
 - 絶対精度 数ミリメートル
- 主な作業用途
 - 自動車や建設機械の溶接・塗装
 - 電気製品の組立
 - 部品の搬送
- 動作方法
 - 教示再生 (ティーチング)

位置決め精度が高く要求される。
繰り返し動作に限定することで、
高速性と高精度を実現。

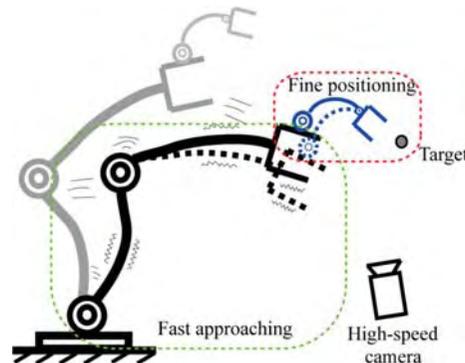
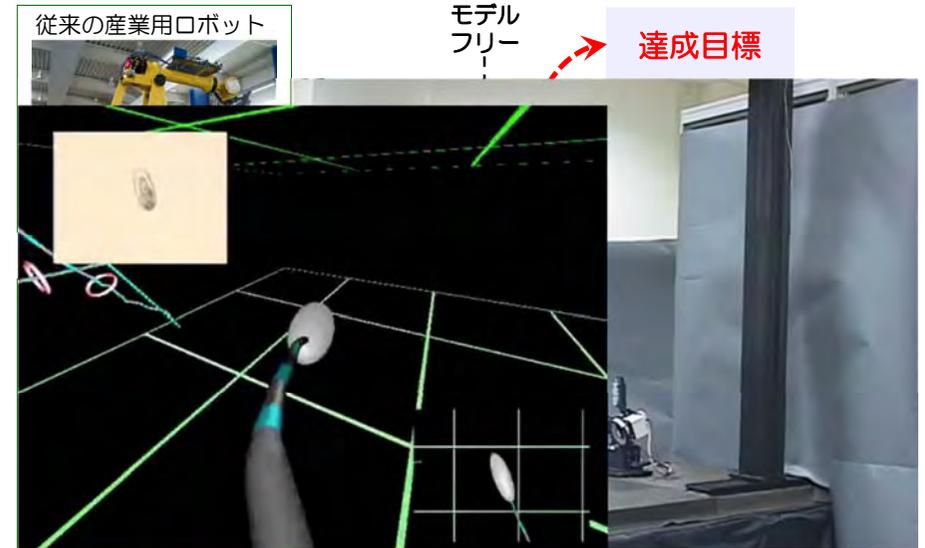
産業用ロボットによるトレーシング動作

- 溶接・溶断
- シーリング
- レーザー加工
- 塗装・塗布

基本的かつ重要なタスク

従来の制御方法

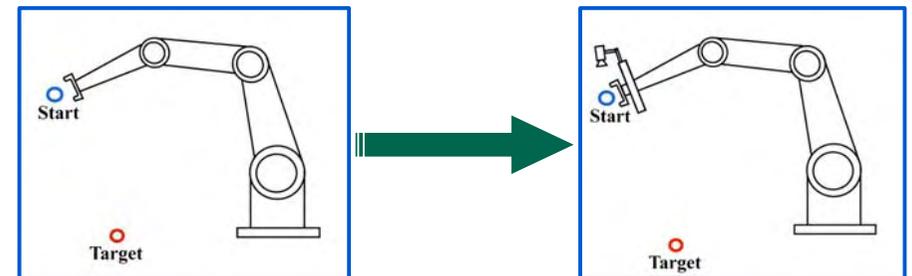
- 目標軌道に対して教示点を直接ティーチング
 - 実現しやすい
 - 外部からの不確定要素に対するロバスト性に欠ける
 - 複雑形状に対する教示作業が困難
- センサを用いたフィードバック制御によるトラッキング
 - ロボット自身の不確定性に対するロバスト性に欠ける
 - 高速動作時のロボットのダイナミクスによる不確定性により、高精度を実現するためには低い作業速度となる



- 高速と高精度の両立
- モジュールの追加だけで、従来のロボットの性能向上
- モデルフリー、ビジョンキャリブレーションレス
- システムや環境からの不確定性に対する補償

ユーザニーズ
2012-2013年度
JSMEロボメカ部門
ロードマップ委員会報告

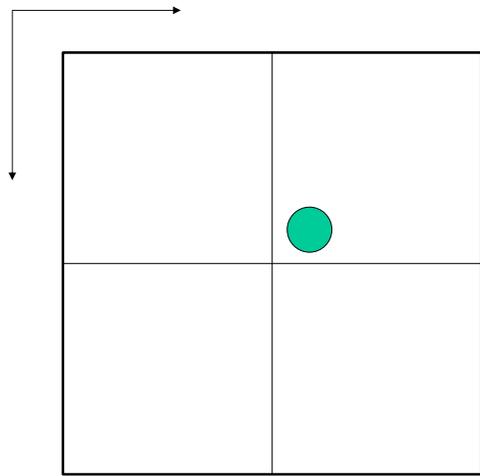
ロボットの製造業分野への導入における要求機能として、ビジュアルフィードバックが必要。
2018年目標「把持対象へ位置合わせ（位置決め精度0.1mm、サンプリング時間30ms）」
2023年目標「作用箇所へ位置決め（位置決め精度0.01mm、サンプリング時間1ms）」



ロボットモジュール：高速ビジョン+高速補償アクチュエータ
マニピュレータのダイナミクスを補償する帯域幅

ロボット制御を根底から変える制御
画像内での相対座標制御アルゴリズムを用いた視覚フィードバック制御
⇒ 高速・高精度での位置決めが可能に、msでμmオーダーの位置制御

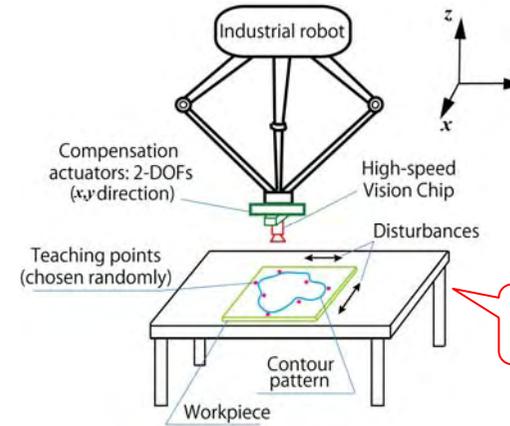
Dynamic Compensation



Tracing Task

- 産業用ロボットの教示はラフ
- 高速ビジョンの中心にラインが位置するように制御

- 従来：
- 熟練者による精密な教示
 - プレイバックによる繰り返し動作
 - 高精度でのワーク設置

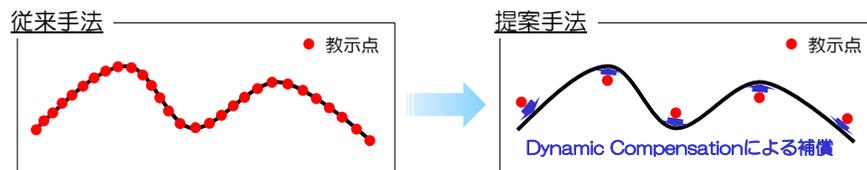


カメラ画像の中心にラインの中心が来るようにモジュールを制御

Tracing Task Using Dynamic Compensation

Coarse-To-Fine戦略

- 汎用の産業用ロボットが広範囲で大まかな位置決めを行う。
具体的には、補償機構により目標軌道をカバーできる程度のキーポイントをラフに教示し、産業用ロボットの軌道生成を行う。
- ビジョンから得られる画像特徴量に基づくローカルな**高速ビジュアルフィードバック**により、**補償機構で高速高精度に位置決め**する。
すなわち、産業用ロボット自身の不確実性および外部環境から生じる外乱の不確定要素に対して補償を行う。



- ロボットによる作業の高速化および高精度化
- 熟練者による教示作業をなくす、もしくは容易に
- ライン、タスク、ワーク、環境等の変化にロバストに対応

Dynamic Compensation Module

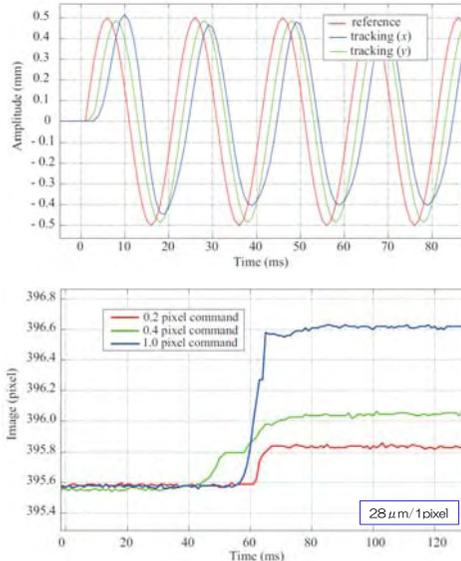
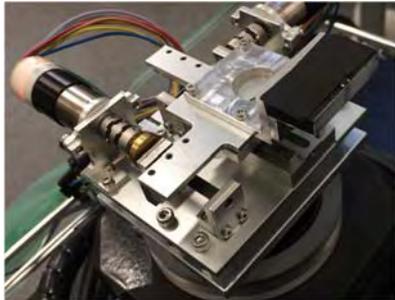
Dynamic Compensation モジュール



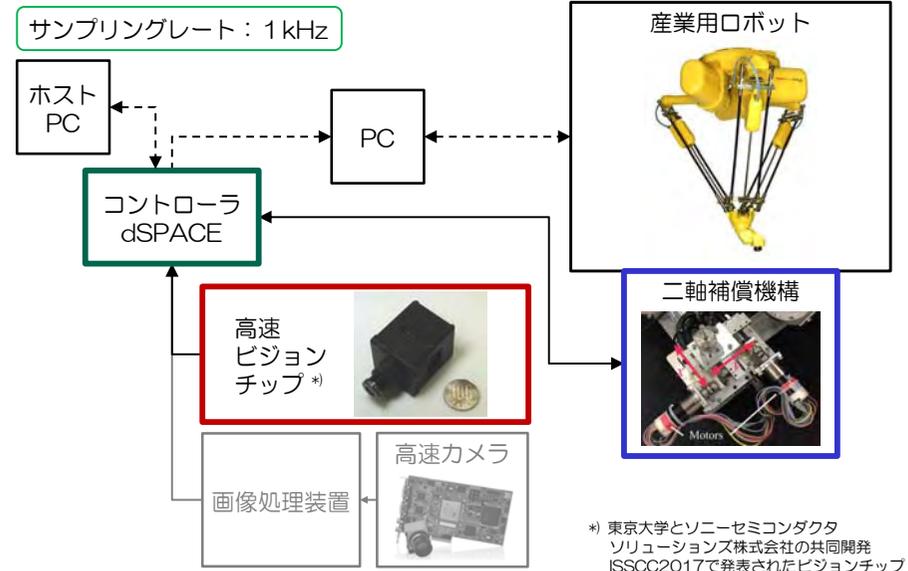
モジュールのダイナミクスは産業用ロボットのダイナミクスをカバーする帯域

Actuator System

- 小型サーボモータ
- ラックアンドピニオン
- 二軸を直交に配置
→独立した制御系
- ストローク 20mm
- 約6 μmの位置決め精度

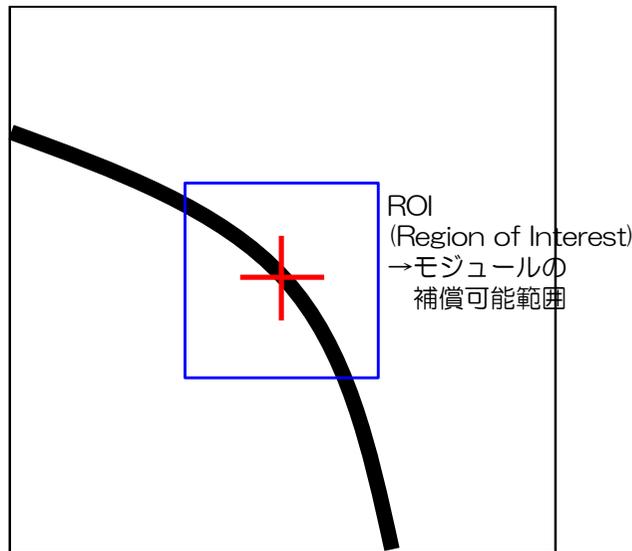


System Structure



High-speed Image Processing

ビジョンチップ内の画像処理 (1ミリ秒以内)



画像処理フロー

1. 2値化
2. モーメント計算
3. 重心計算

Control System

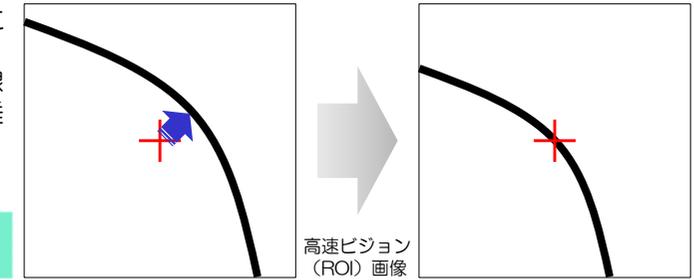
予測・学習は使わない! 複雑な処理はなし
アクチュエータの制御則は単純なPD制御

高速性により実現が可能

$$\tau(t) = k_p(r(t) - s(t)) + k_d\dot{\theta}(t)$$



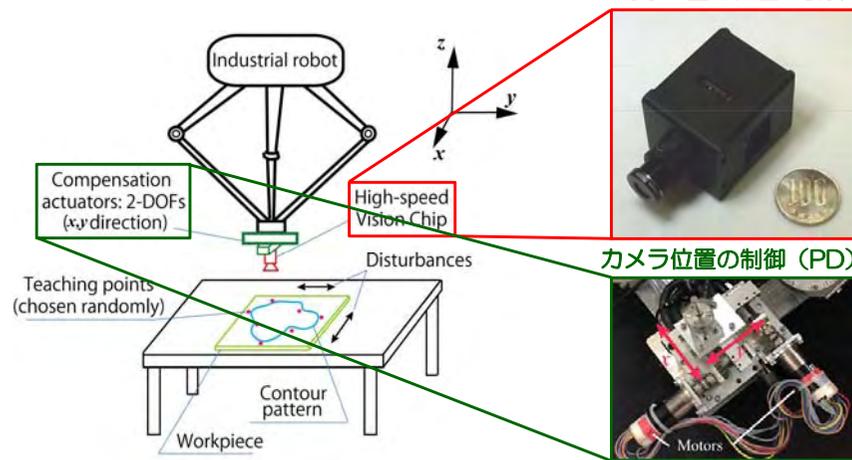
x, y軸で同時に補償するため、目標軌道の接線方向に対して垂直方向に動く。



最近では、各軸に重み付けして制御

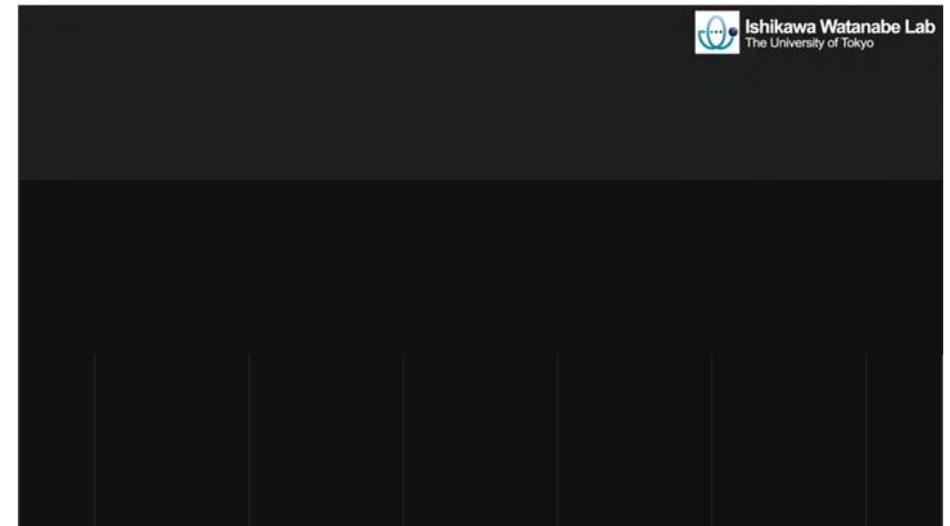
Tracing Task

- 産業用ロボットの教示はラフ
- 高速ビジョンの中心にラインが位置するように制御 **対象の重心位置の計算**



<https://www.k2.tu-tokyo.ac.jp/fusion/vcktracking/index-j.html>

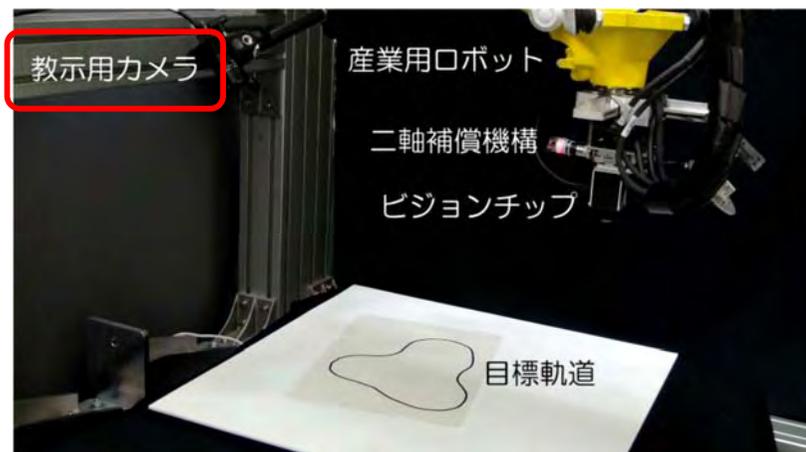
Experimental Result



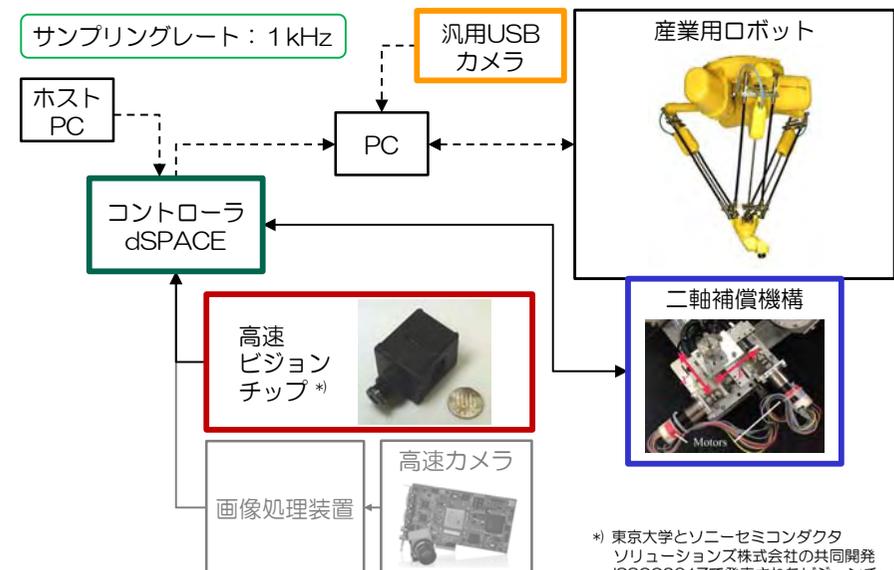
<https://www.youtube.com/watch?v=BMzIhKXoF5U>

Toward Teaching-less

- 外部カメラを用いて、輪郭を認識
- 輪郭の主要なポイントを抽出
- 抽出ポイントを産業用ロボットの教示点とする

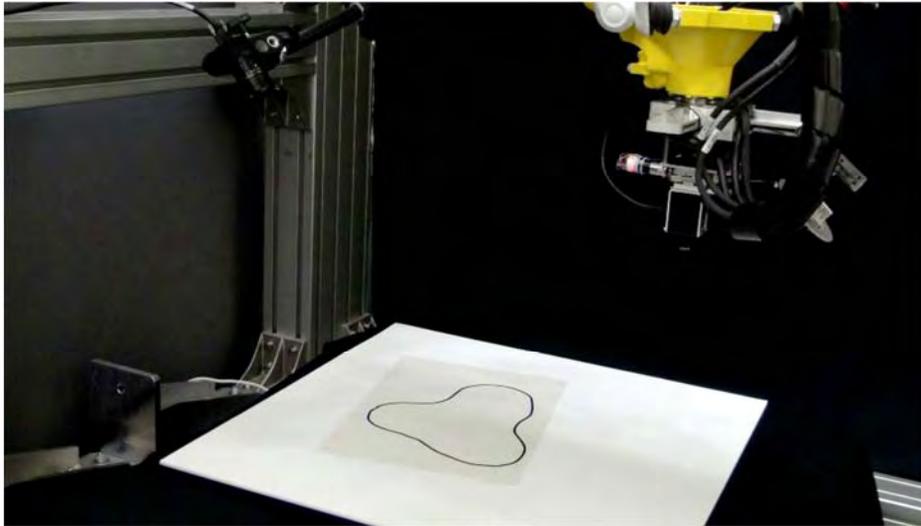


System Structure



*) 東京大学とソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社の共同開発
ISSCC2017で発表されたビジョンチップ

Experimental Result (x2)



Yuji Yamakawa (Univ. of Tokyo) <http://www.hfr.iis.u-tokyo.ac.jp>

25

What is changed?

- 画像内の相対座標系で制御するため、カメラキャリブレーションの手間を激減
 - 外部カメラまたは人間によるラフな教示で十分なため、教示の手間も激減
 - 対象（ワーク）や環境等の動的変化に対応！加えて振動にも対応
→コンベアで搬送される物体への操作
- ⇒生産ラインの変更に即時対応可能

- 多品種少量生産に適した生産ラインシステムの実現
■セル生産方式に適した人間-ロボット協調による作業の実現

ロボットの製造業分野への導入における要求機能として、ビジュアルフィードバックが必要。
2018年目標「把持対象へ位置合わせ（位置決め精度0.1mm、サンプリング時間30ms）」
2023年目標「作用箇所へ位置決め（位置決め精度0.01mm、サンプリング時間1ms）」

既に実現！

Yuji Yamakawa (Univ. of Tokyo) <http://www.hfr.iis.u-tokyo.ac.jp>

26

What is changed?

- 従来のロボット
 - 繰り返し精度 数百マイクロメートル
 - 絶対精度 数ミリメートル
- 高速にすればするほど悪化

高速化 ← トレードオフ → 高精度化

シリアルリンクロボットでは各関節の制御誤差の総和が全体の位置誤差に

Dynamic Compensationの導入

- あらゆるロボットを高性能に
⇒msオーダーでμmオーダー；高速高精度
- 追加コストはロボットモジュール（カメラとアクチュエータ）のみ
⇒新規ロボットへの設備投資は不要
- カメラ、アクチュエータ、レンズ等の組み合わせによって、様々な作業に適した仕様に変更可能
⇒システムとしての高い適応性

Yuji Yamakawa (Univ. of Tokyo) <http://www.hfr.iis.u-tokyo.ac.jp>

27

What is changed?

- 制御系を独自に開発可能！！

産業用ロボット：ブラックボックス

- 制御系は開発メーカーのコントローラを使用→変更困難
- 位置や速度を指定するだけで、細かい設定が困難
- 外部入力も低速で対応しているが・・・
⇒ 高速画像処理を導入できる環境でない

補償モジュール：自作可能

- 制御系を構築できるため、トルク制御の低階層まで調整可能
- 外部入力を含め、ピン配置もわかるため、独自のフィードバック系を構築できる
⇒ 高速画像処理が導入でき、アクチュエータの制御も最適化可能

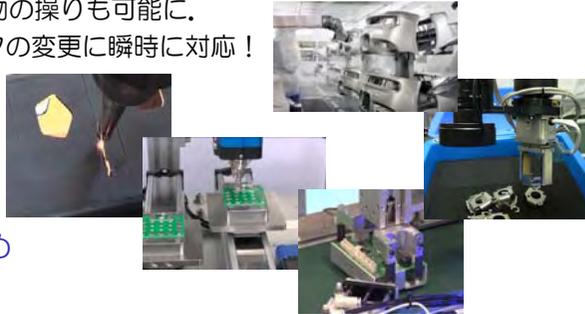
Yuji Yamakawa (Univ. of Tokyo) <http://www.hfr.iis.u-tokyo.ac.jp>

28

Applications

- 高精度自動教示システム
 - 産業用ロボットの教示に対してフィードバック量を加えることにより、産業用ロボットの教示を高精度に。
⇒従来の重量物の操りも可能に。
 - ラインやワークの変更に瞬時に対応！

- レーザー加工
- 溶接・溶断
- 塗装・塗布
- 搬送中のねじ締め
- 基板検査



高速なビジョンとアクチュエータをベースとした、ロボットの新しい制御法である「**Dynamic Compensation**」は生産現場を大きく変える技術

Introduction to Human-Robot Collaboration

Dynamic Compensation
産業用ロボットの高速化と高精度化

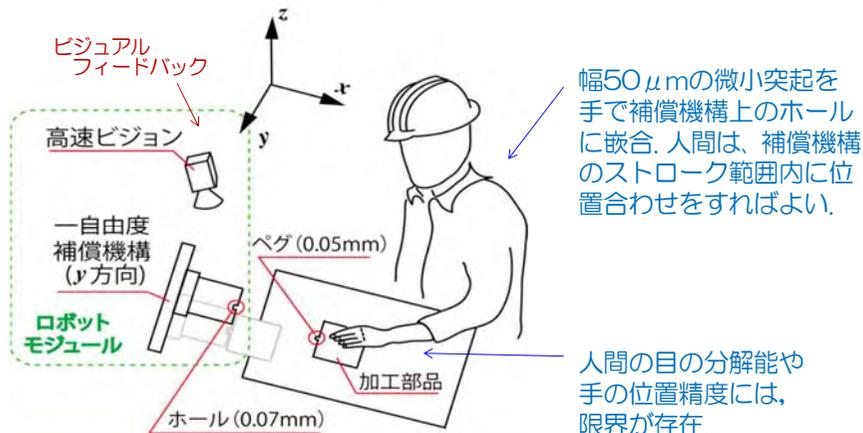
人間ロボット協調 (じゃんけんロボット)
高速制御で人間の動作に反応

操作対象と人間の運動とをタスクに合わせて適切に設定することにより人間だけでは実現困難なタスクを実現可能に

- 人間による
- ・ マイクロマニピュレーション
 - ・ 高精度ライトレーシング
 - ・ 微小物体キャッチ

機械の誤差を補償できるなら、人間の動きの誤差も補償できるはず！

Task Support System



応用先：

人間の作業を妨げることなくアシストしながら、超精密な作業を実現するロボット（組み立てロボット）等への応用が考えられる。

Conclusions

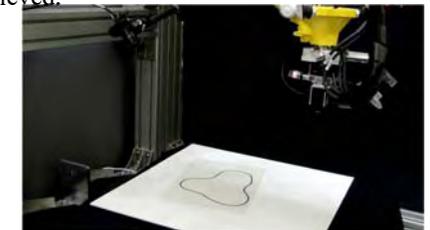
Using high-speed image processing, visual feedback and actuator control, we have achieved:

Intelligence of Industrial Robots

- High-speed
- High-precision
- High-functionality

Human-Robot Collaboration

- Task support
- Human Augmentation
- Collaborative task



Human-Robot Cooperation for Micrometer-Order Manipulation Using High-Speed Vision

- Janken (rock-paper-scissors) Robot with 100% winning rate
- High-speed running robot - ACHIRES
- Dynamic Manipulations