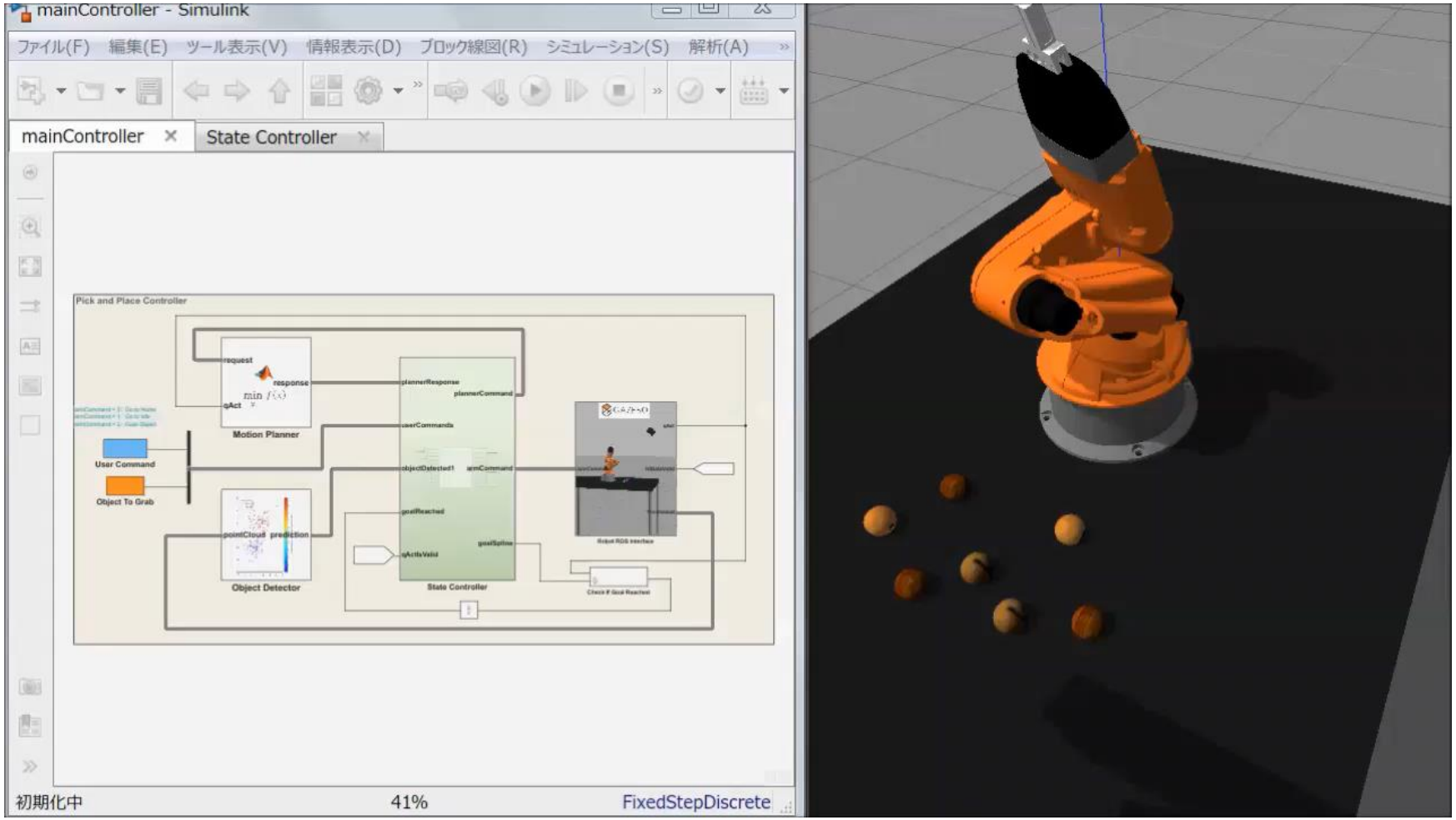
自律制御型ロボットアームの開発
～機械学習による物体認識と最適軌道生成～

MathWorks Japan
アプリケーションエンジニアリング部　信号処理・通信
木川田 亘

© 2017 The MathWorks, Inc.

アームロボットの自律制御　～物体の認識と分類～



※32倍速

MATLAB/Simulinkで効率的にロボットアプリケーション開発

高度なロボット開発にはさまざまな技術の組み合わせが必須

物体検出と位置推定 → **コンピュータービジョン**
機械学習
3次元点群処理

↓

軌道計画 → **ロボット工学**
順運動学・逆運動学
逆動力学・最適化計算

↓

システムへの統合 → **コンポーネントの制御ロジック**
環境シミュレーション
自動コード生成&配布

MATLAB/Simulinkは高度なロボット開発を単一環境で効率的に実現

アジェンダ

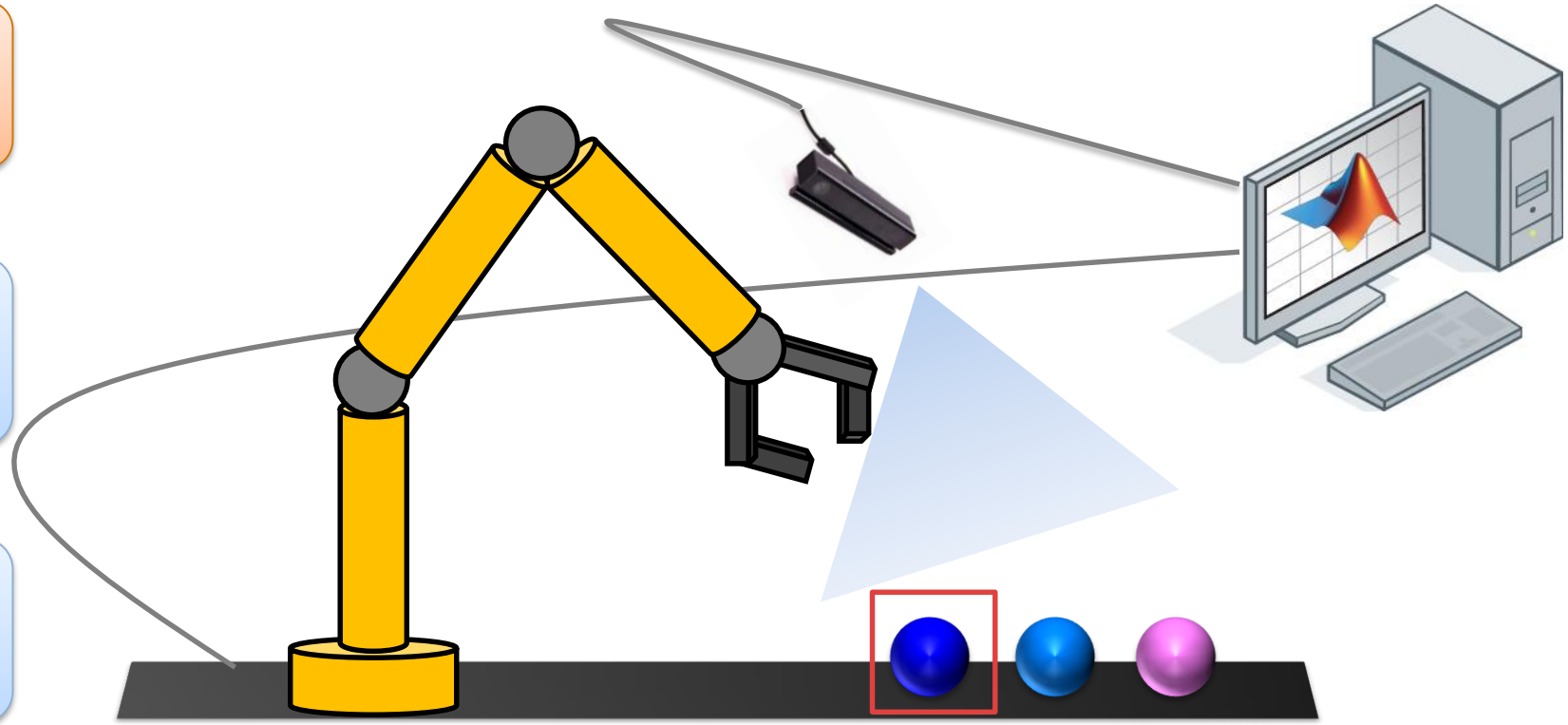
物体検出
位置推定

↓

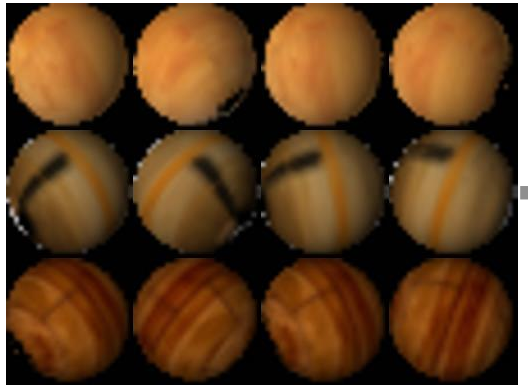
軌道計画

↓

システムへの統合



機械学習による物体検出器と点群処理による位置推定

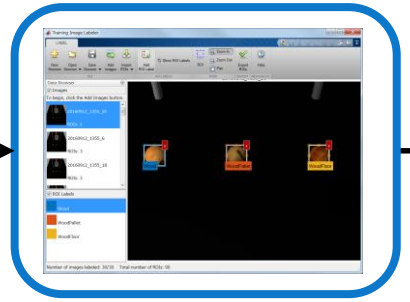


物体検出

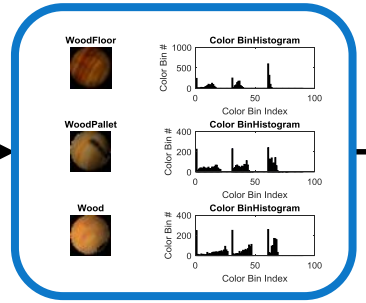
```
posObj1 =

    0.1200
    0.0100
    0.2500
```

物体検出と位置推定のワークフロー

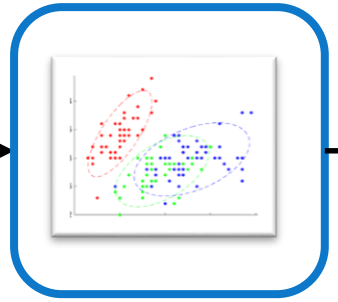
学習データの準備



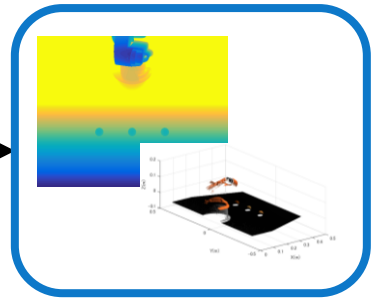
学習データのラベリング



特徴抽出

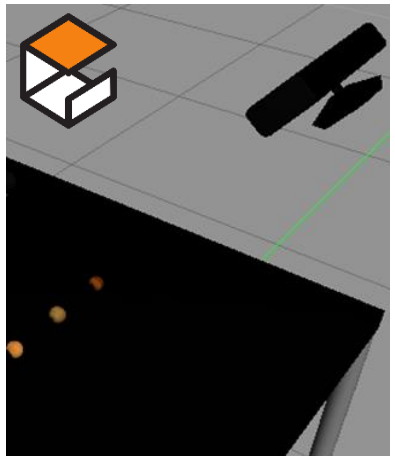


分類器の学習



3次元位置の推定

学習データの準備と確認



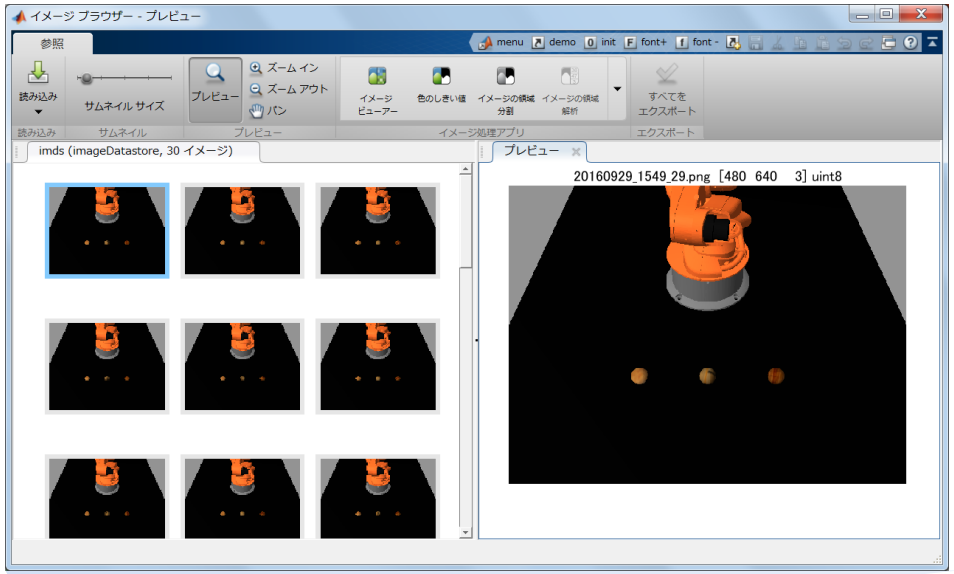
仮想環境 or 実機

Robotics System Toolbox™

ROS対応のシミュレータや実機から取得
記録しておいたROS bagから収集

Image Acquisition Toolbox™

直接カメラハードウェアから取得

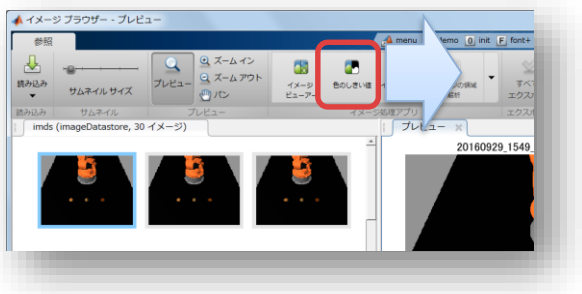


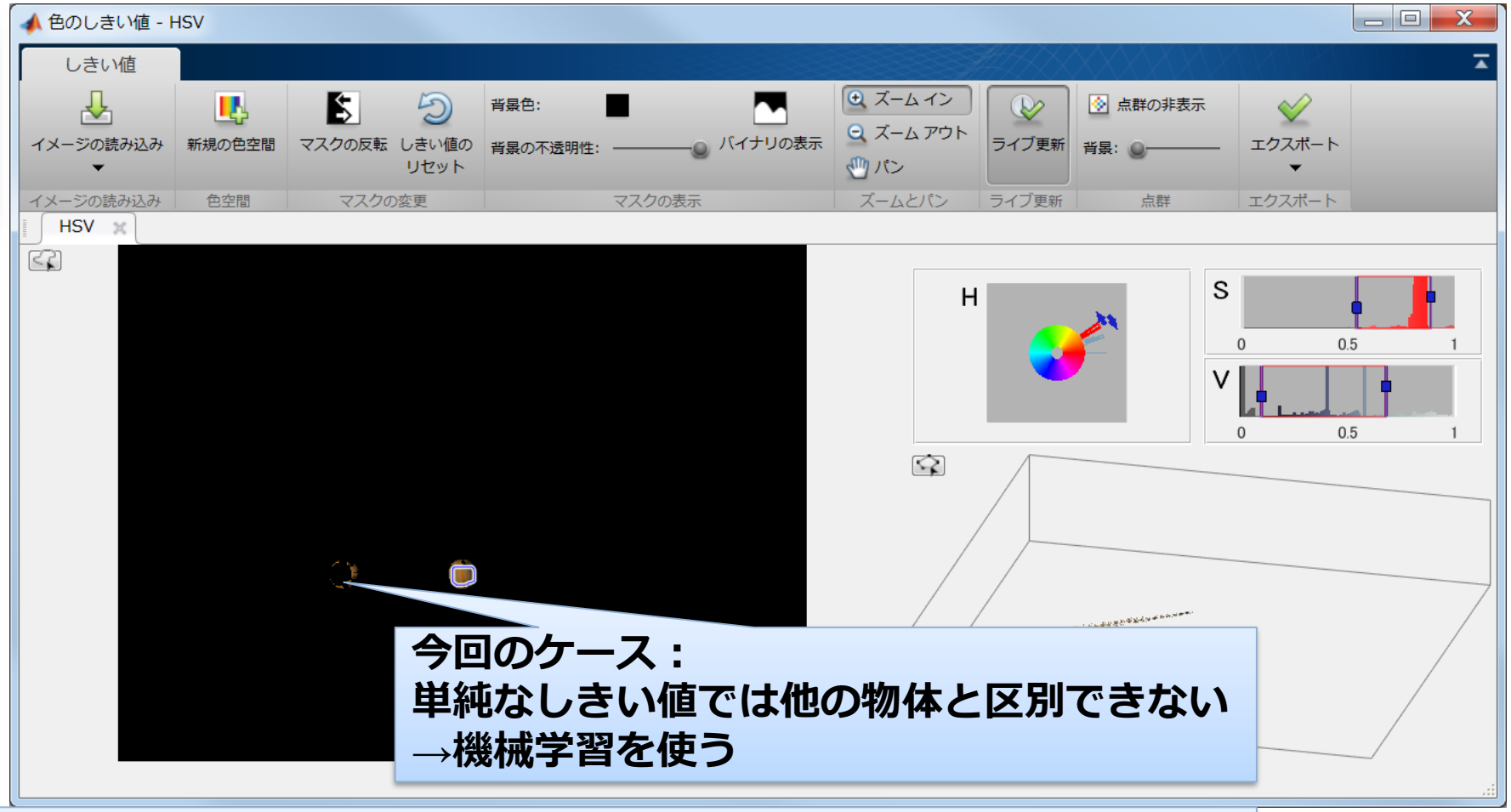
イメージブラウザー R2016b
アプリケーション
Image Processing Toolbox™

カメラや仮想環境から容易に画像データを取得し、可視化

補足：色のしきい値によるセグメンテーション

Image Processing Toolbox™



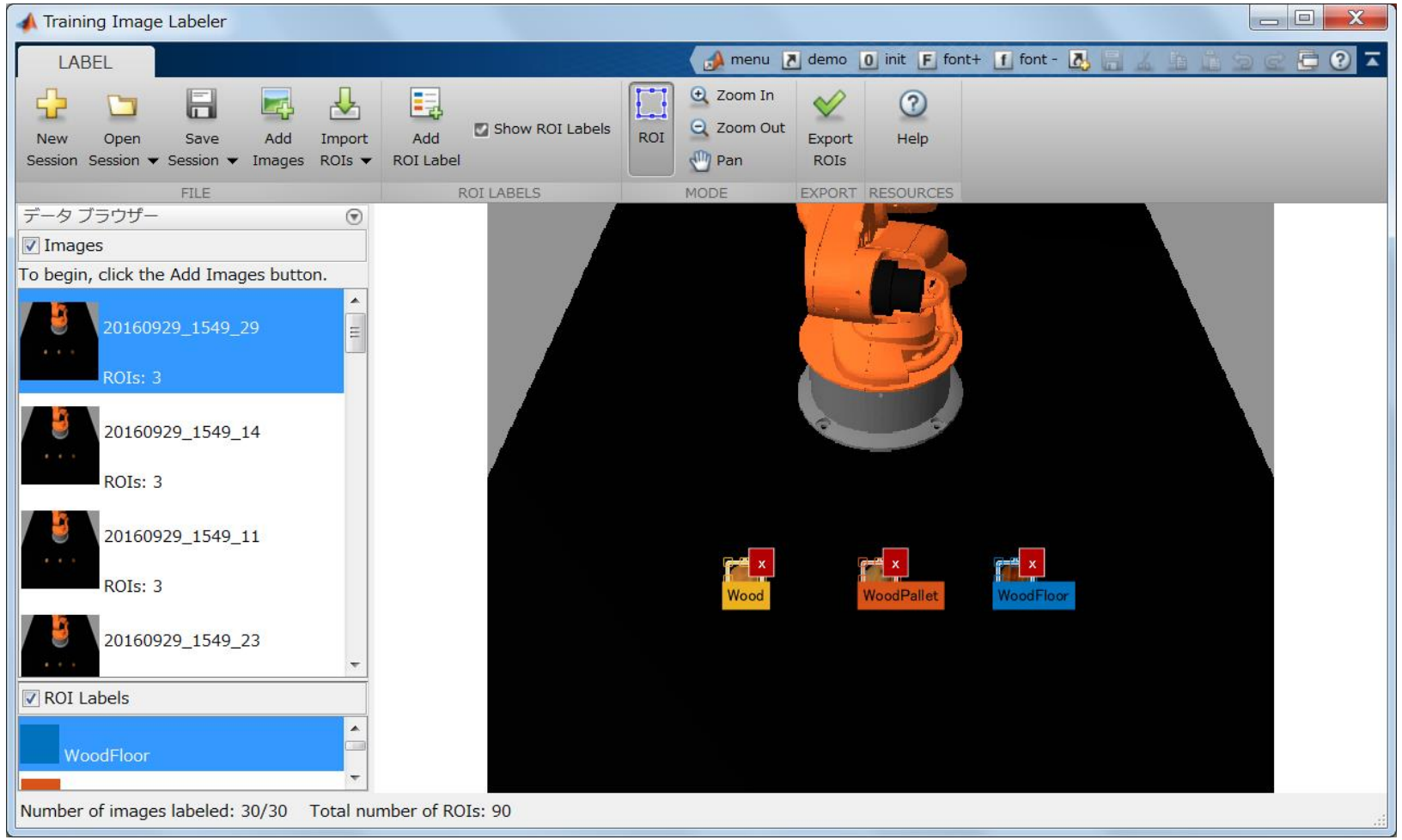


今回のケース：
単純なしきい値では他の物体と区別できない
→機械学習を使う

セグメンテーションや色のしきい値アプリケーションによる試行錯誤

学習データのラベリング

Computer Vision System Toolbox™

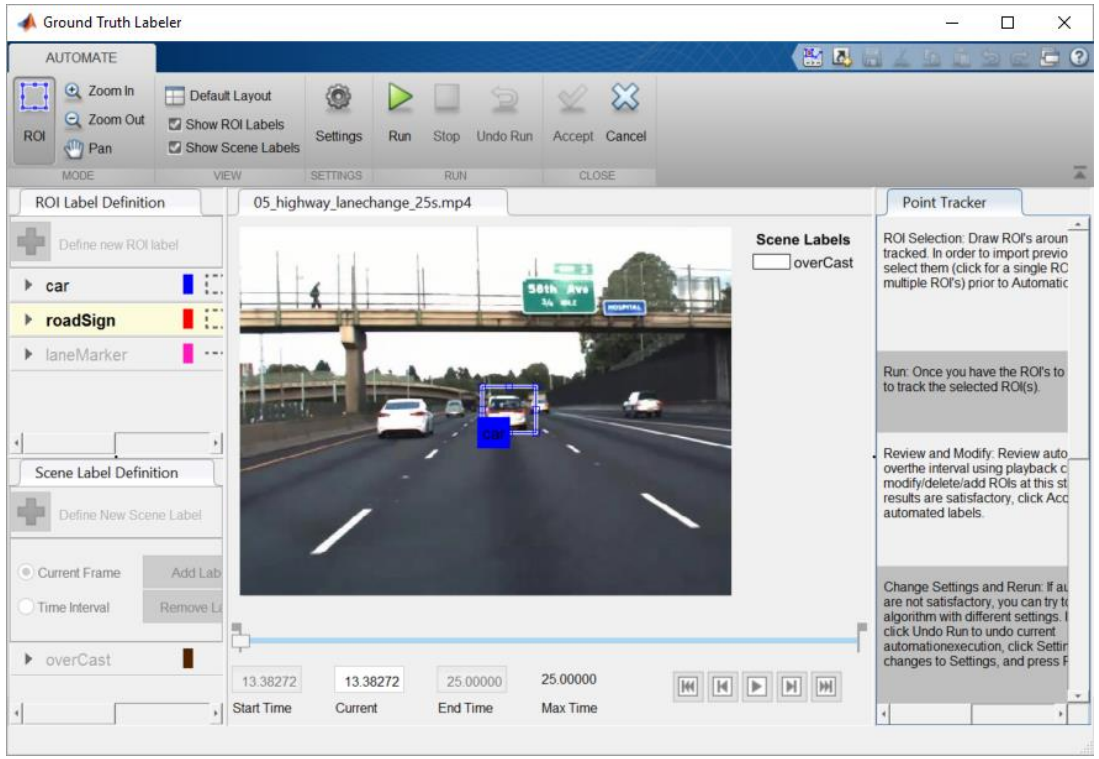


トレーニングイメージラベラー 効率的にラベル付け, 複数ラベリングに対応 R2016b

便利なアプリケーションでアルゴリズムを効率的に探索

補足：動画データを使った学習データのラベリング

Automated Driving System Toolbox™
R2017a



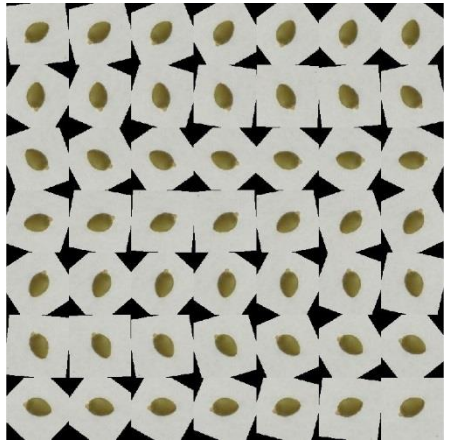
Ground Truth Labeler アプリケーション

- ラベリング用アプリケーションと真値検証
  - 動画のレビューのUI
  - 物体へのマーキング
  - 生成したラベル・ラベル定義のエクスポート・インポート
  - 可視化をカスタマイズするためのAPI
- 半自動化のアルゴリズム
  - 車検出器
  - 物体のトラッキング
  - 物体位置の時間的内挿
  - カスタムのアルゴリズムを追加するためのAPI

補足：学習用画像の拡張

Image Processing Toolbox™

左右反転



任意の反転

物体の外形の変形

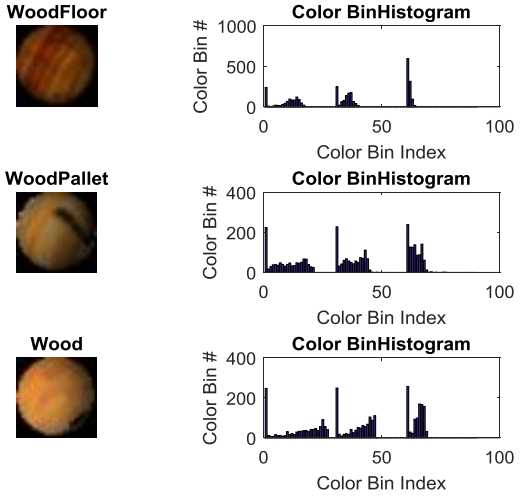
物体の色味の変更

画像処理関数を駆使して容易に学習用画像の拡張が可能

特徴抽出

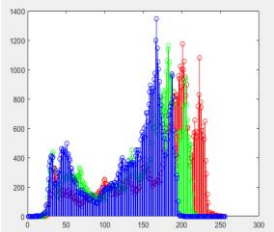
Image Processing Toolbox™
Computer Vision System Toolbox™

- RGBのヒストグラムで設計した特徴量

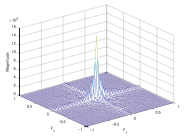


- さまざまな特徴量の取り扱い
  - 画像自体
  - RGB, HSVなどの色空間のヒストグラム
  - 周波数振幅、位相、ウェーブレット係数
  - 輝度勾配ヒストグラム(HoG)
  - エッジ
  - BRISK, FREAKなどの局所特徴量

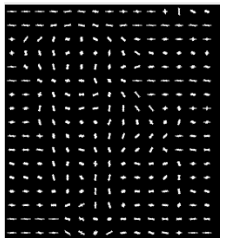
画像



色情報

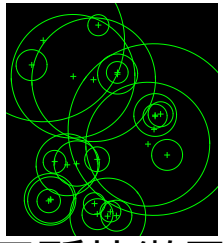


周波数成分



勾配ヒストグラム

エッジ



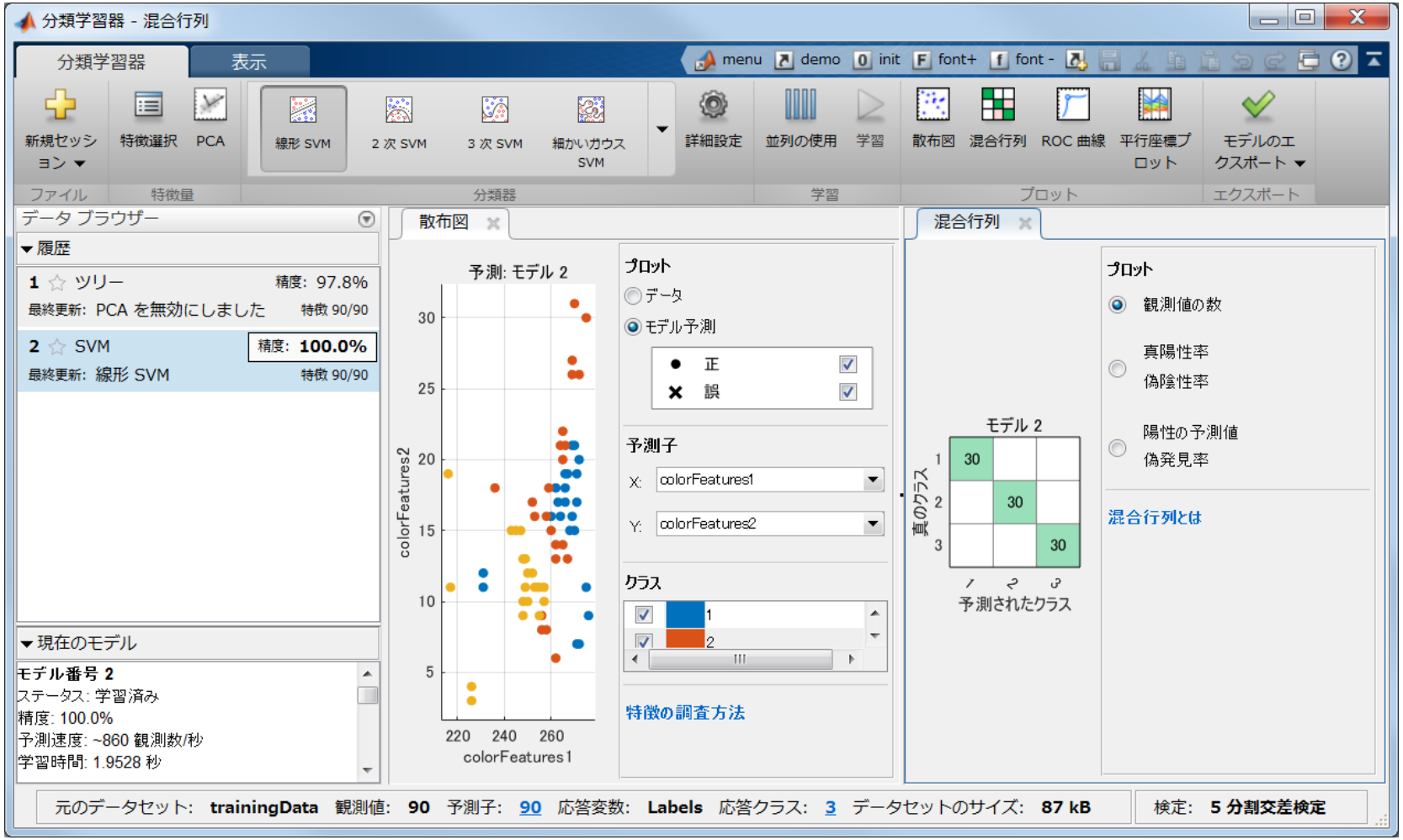
局所特徴量

密 → 疎

さまざまな画像特徴量を抽出、探索することが可能

分類器の学習

Statistics and Machine Learning Toolbox™



分類学習器アプリケーション

R2016b

SVM分類器と
ロジスティック回帰の
Cコード生成対応

R2016b

並列実行可能
(Parallel Computing Toolboxが必要)

R2017a

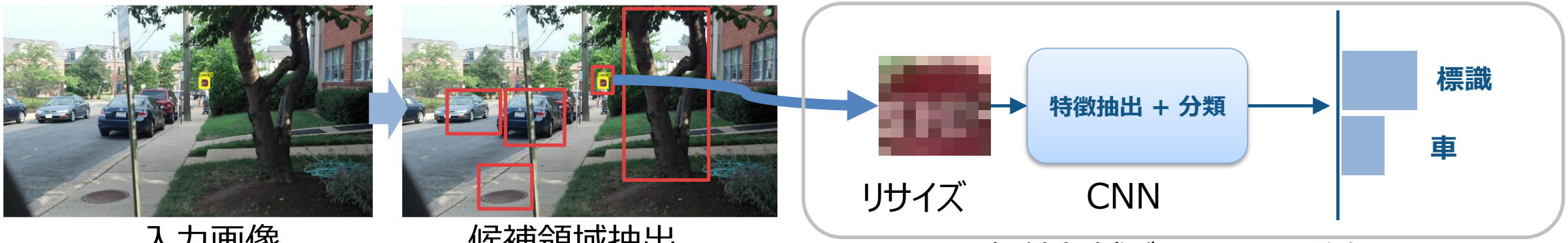
GUIで回帰モデルを探索できる回帰学習器アプリケーション

便利なアプリケーションでアルゴリズムを効率的に探索

ディープラーニングによる高度な物体検出

Neural Network Toolbox
Parallel Computing Toolbox
Computer Vision System Toolbox

- 物体検出に応用可能な領域ベースの畳み込みニューラルネットワーク(R-CNN) R2016b



入力画像　候補領域抽出　候補領域ごとにCNNで分類

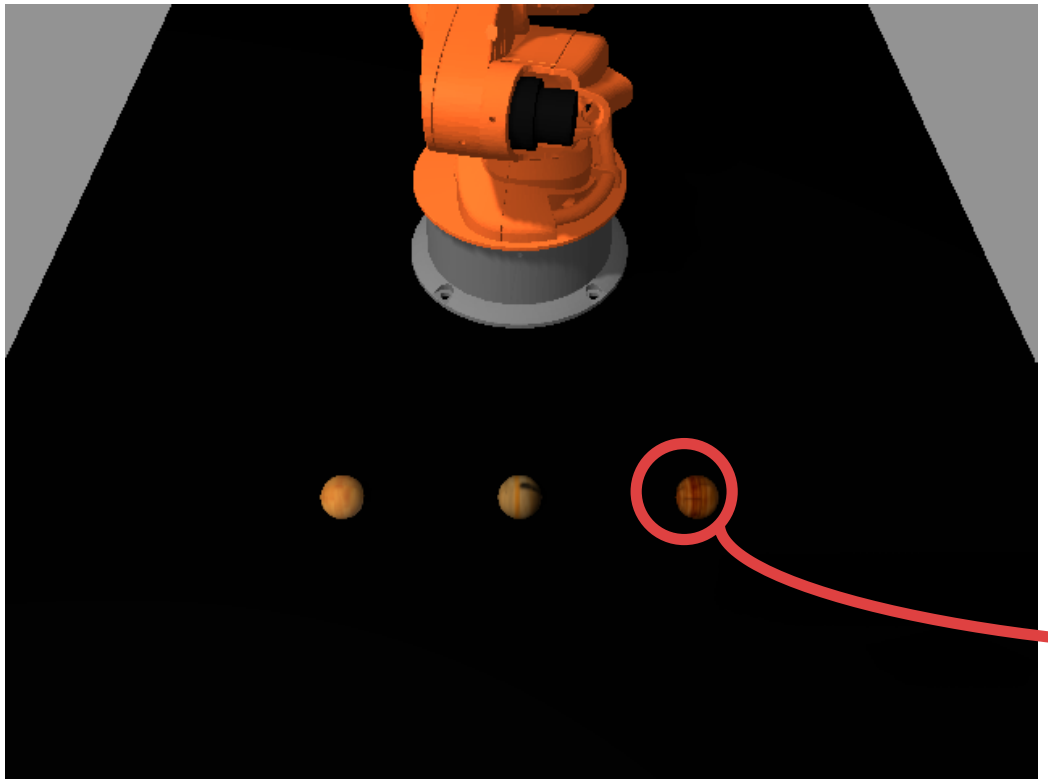
- より高速なFast/Faster R-CNNに対応 R2017a

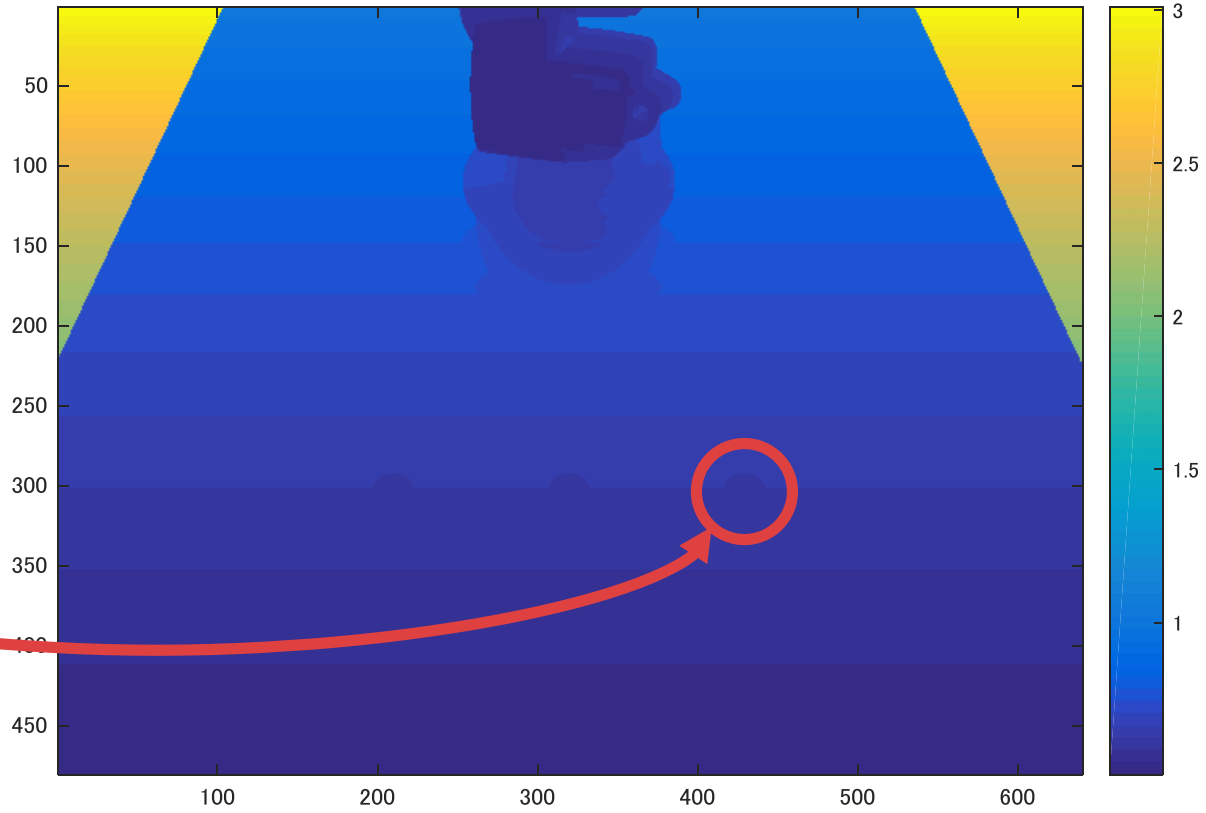
複数の標識を検出する例

ディープラーニングなどの高度な手法も探索

深度画像から奥行き情報の取得

Image Processing Toolbox™
Computer Vision System Toolbox™





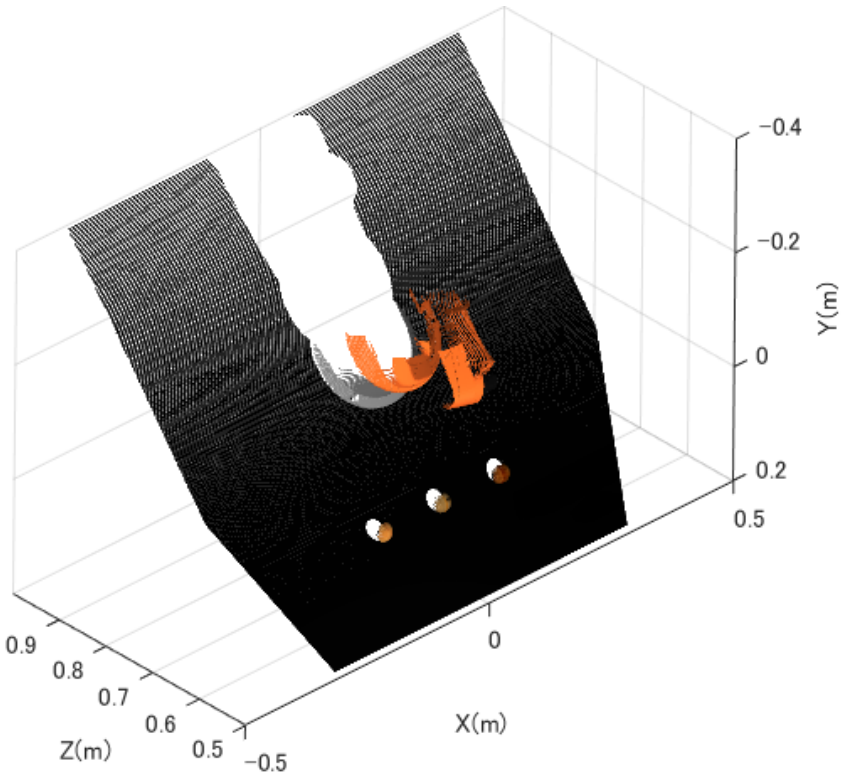
RGB画像で物体を検出

深度画像で対応する奥行きを取得

RGB-D画像の容易な取り扱いと可視化

補足：3次元点群処理と座標変換

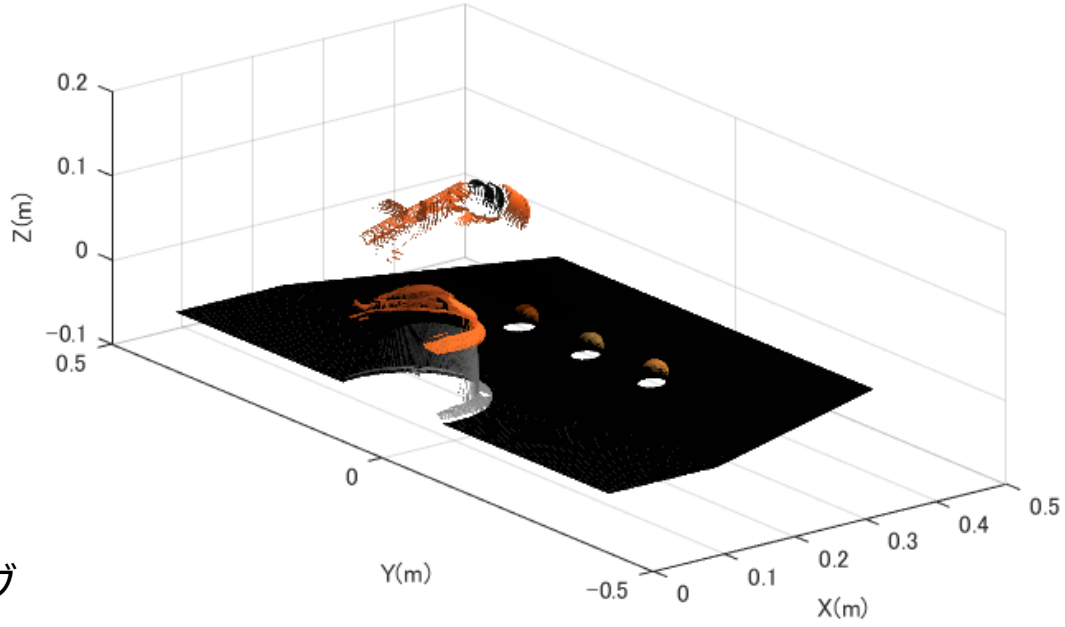
Robotics System Toolbox™
Computer Vision System Toolbox™



センサーの座標系

座標変換

さまざまな点群処理
- 位置合わせ
- マージ
- ダウンサンプリング
- ノイズ除去
- 平面や球体の形状フィッティング

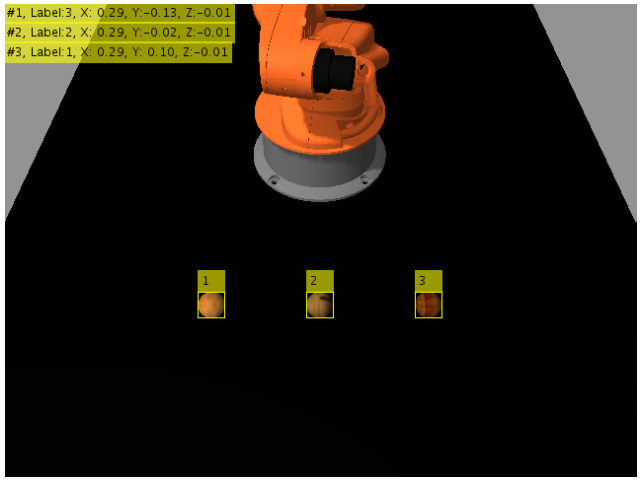


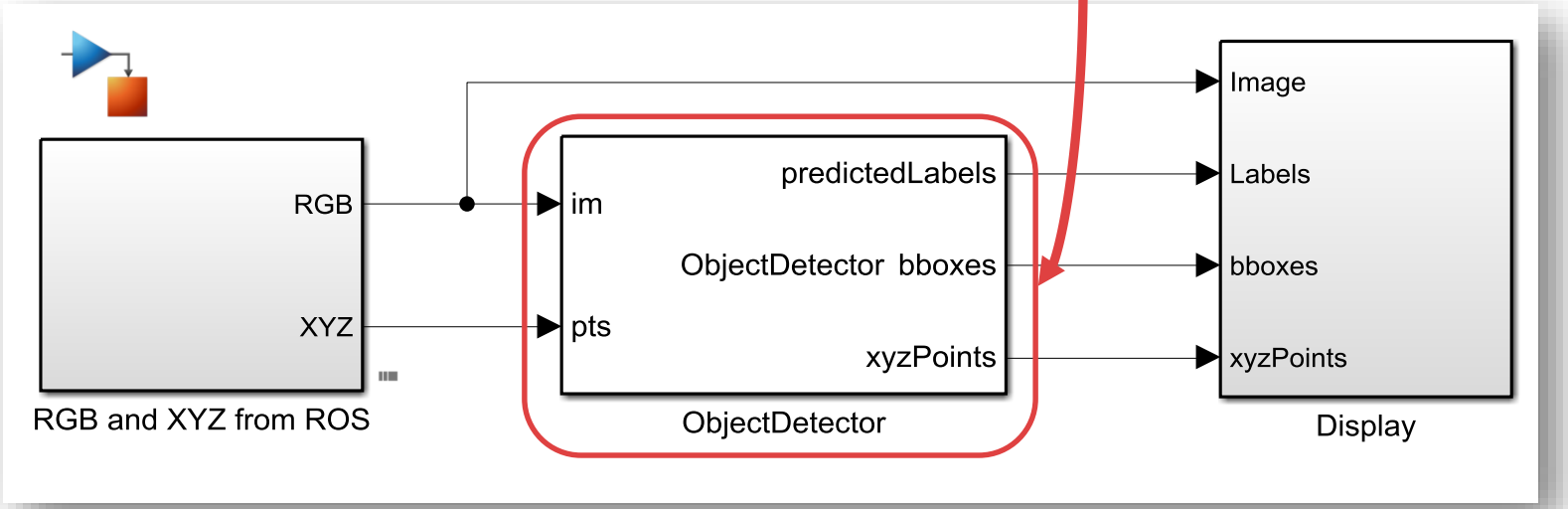
ロボットの座標系

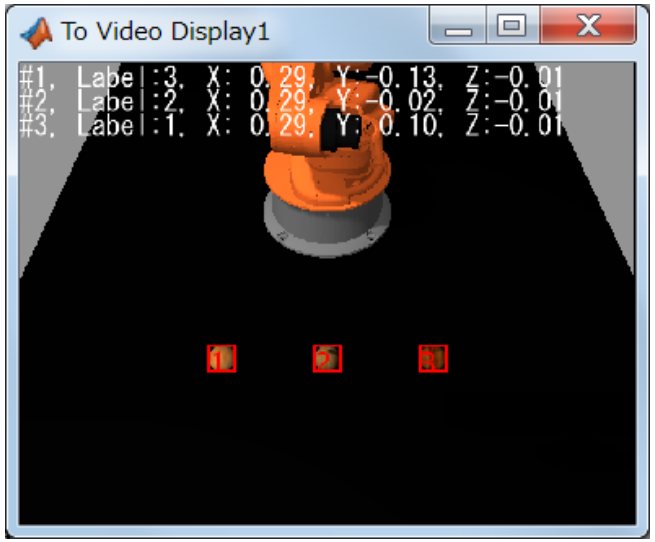
3次元点群(ポイントクラウド)の処理や可視化が容易

System Objectを使ったSimulink環境への統合

```
% Create a object detector
detector = ObjectDetector('tform',b_T_k);

% Estimate the position
[predictedLabels,bboxes,xyzPoints] = step(detector,I,pts);
```







MATLAB環境からSimulink環境にシームレスに移行

アジェンダ

物体検出
位置推定

↓

軌道計画

↓

システムへの統合

1. Robotics System ToolboxやImage Acquisition Toolboxを使った画像データの収集
2. Computer Vision System Toolboxを使った効率的なラベル付けや特徴抽出
3. Statistics and Machine Learning Toolboxを使った分類学習器の探索
4. 3次元点群(ポイントクラウド)を使って3次元位置推定

アジェンダ

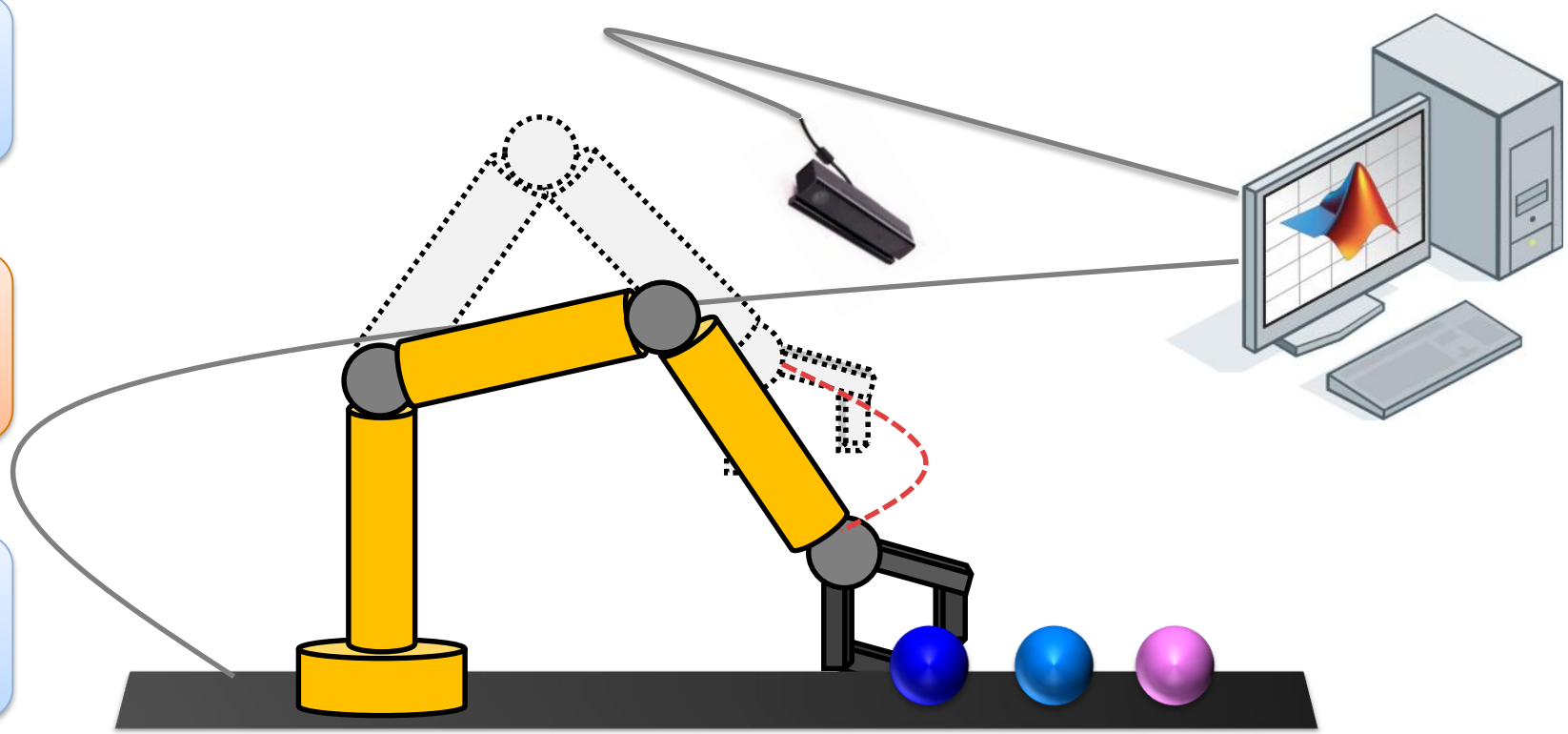
物体検出
位置推定

↓

軌道計画

↓

システムへの統合



ロボットアームの軌道計画

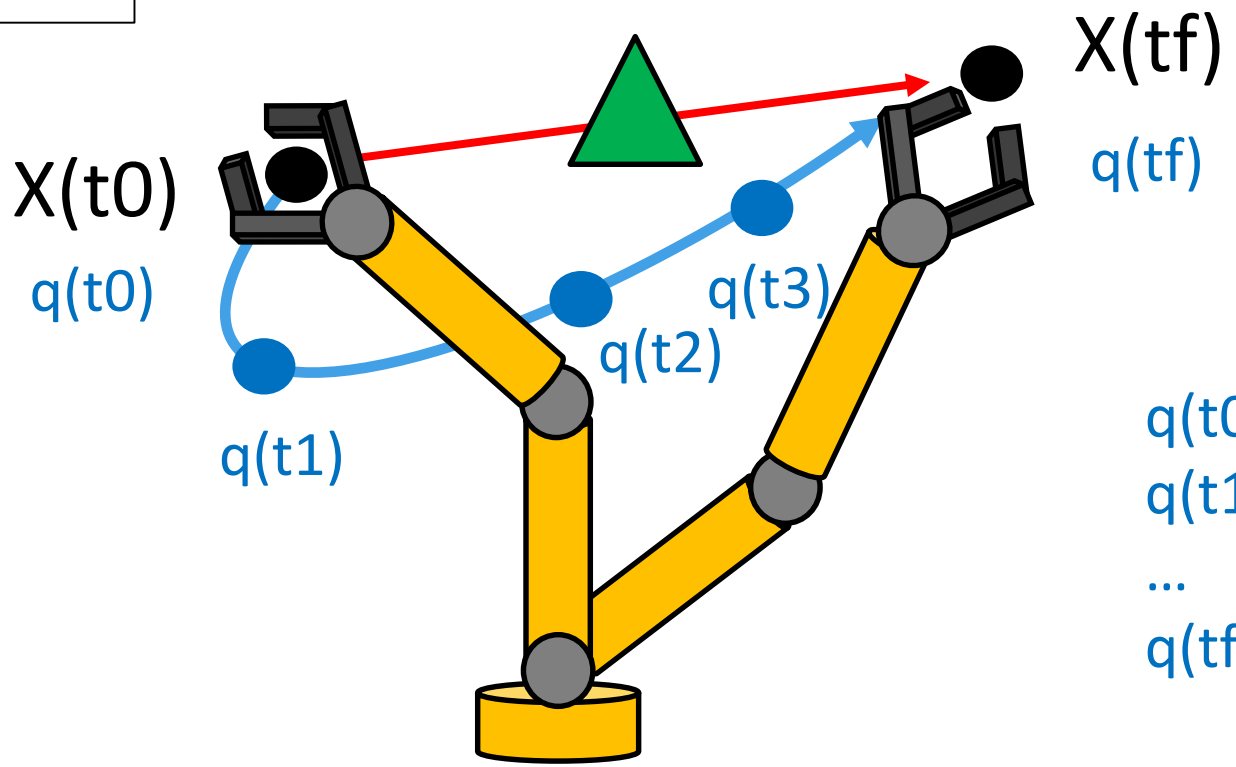
初期姿勢 X(t0)

最終姿勢 X(tf)

関節可動範囲

障害物

→ 軌道計画 → 関節軌道 Q(t)



q(t0)
q(t1)
…
q(tf)

3次スプライン補間パラメータ

ロボットアームの軌道計画

Robotics System Toolbox™
Simulink®
Simscape™ Multibody™
Optimization Toolbox™

初期姿勢 X(t0)

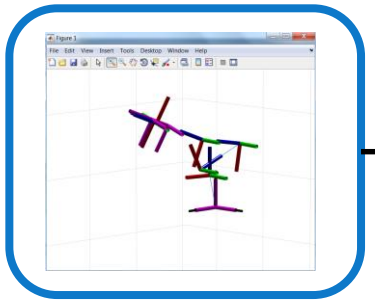
最終姿勢 X(tf)

関節可動範囲

障害物

→ 軌道計画 → 関節軌道 Q(t)

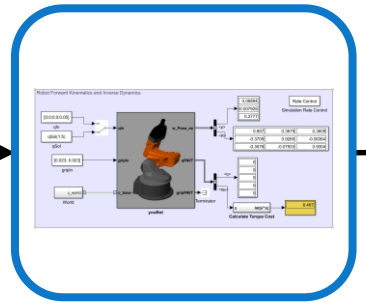
軌道計画のフロー



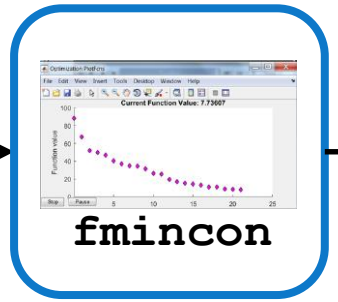
ツリー構造
ロボットの表現
R2016b

X(t0) → q(t0)
X(tf) → q(tf)

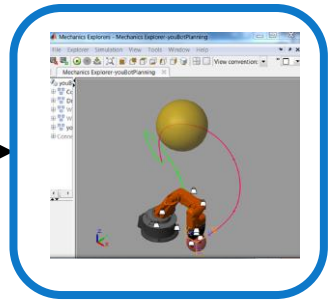
逆運動学(IK)に
よる関節角計算
R2016b



物理モデルを
コスト関数化



最適化計算



3次元スプライン
パラメータ

ツリー構造ロボットのアルゴリズム設計

Robotics System Toolbox™

```
>> puma = robotics.RigidBodyTree;
>> puma = importrobot('puma.urdf');
```

R2016b

R2017a

Puma 560 described with **MDH** parameters

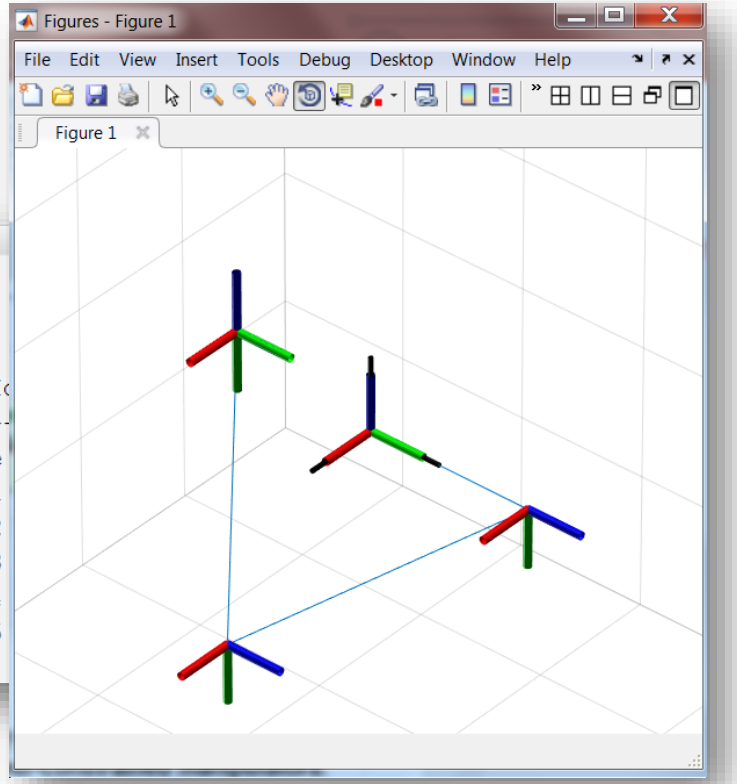
index	a (meter)	alpha (radians)	d (meters)	θ (radian)
1	0	0	0	-
2	0	-π/2	0.2435	-
3	0.4318	0	-0.0934	-
4	-0.0203	π/2	0.4331	-
5	0	-π/2	0.0	-
6	0	π/2	0.0	-

修正DHパラメータのインポート

Command Window

```
--------------------
Robot: (6 bodies)

 Idx    Body Name    Joint Name    Joint Type    Parent Name(Ic
 ---    ---------    ----------    ----------    --------------
   1           L1          jnt1     revolute              base
   2           L2          jnt2     revolute                L1
   3           L3          jnt3     revolute                L2
   4           L4          jnt4     revolute                L3
   5           L5          jnt5     revolute                L4
   6           L6          jnt6     revolute                L5
--------------------
```

アームロボットのモデル化



順運動学, ツリー構造の可視化

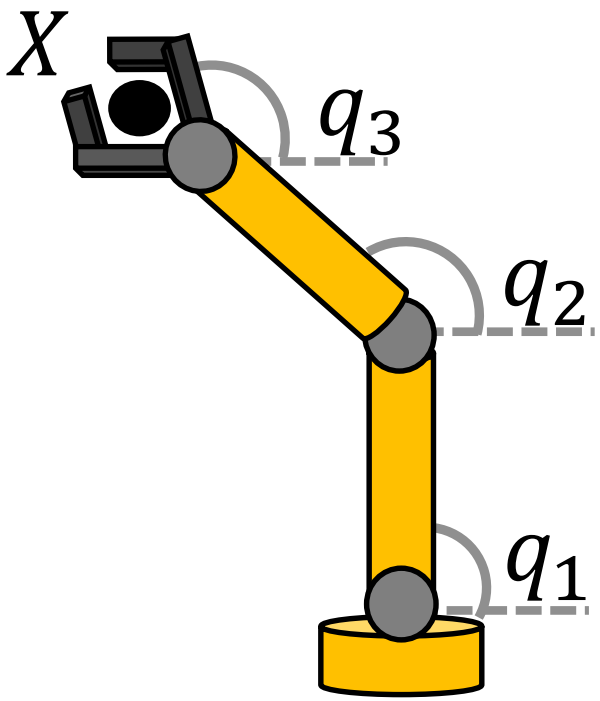
アームロボットアルゴリズムを容易に試行錯誤

逆運動学(IK)による関節パラメータの計算

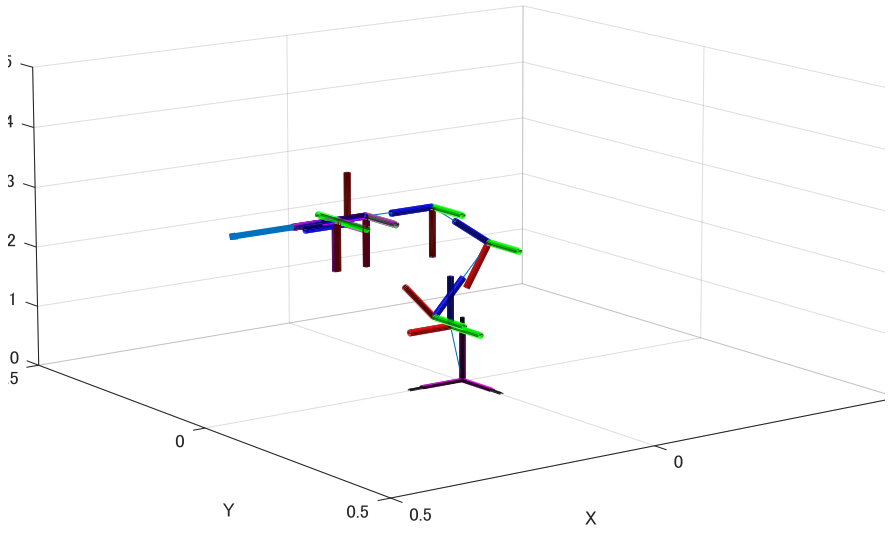
Robotics System Toolbox™

`robotics.InverseKinematics` R2016b
`robotics.GeneralizedInverseKinematics` R2017a

末端の位置姿勢 X → **逆運動学** → 各関節角 Q



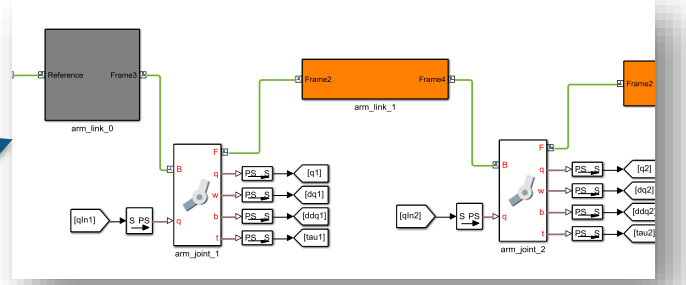
- 関節の稼動範囲を指定可能
- 特異点に対してロバスト
- 関節角度系や直交座標系での複合的な制約に対応 R2017a



Cコード生成をサポート R2017a

Simulinkモデルによるコスト関数の表現

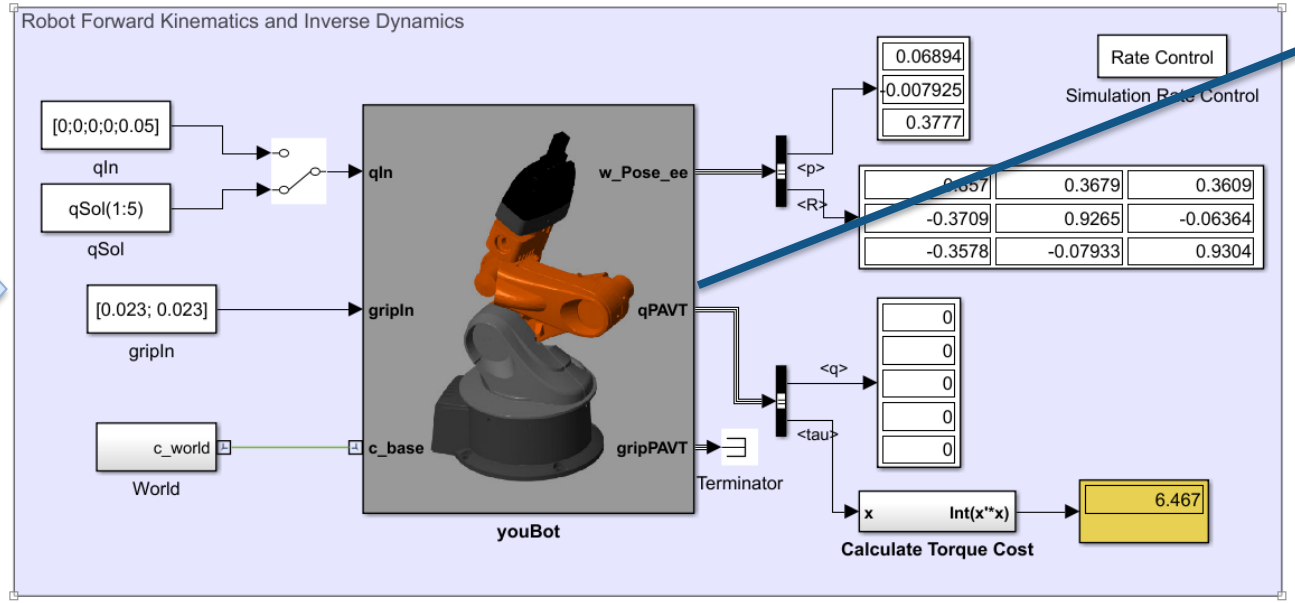
Simulink® Simscape™ Multibody™



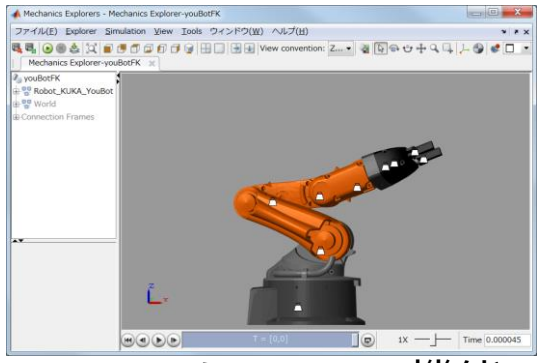
剛体・ジョイントを組合せて
マルチボディを容易に構築

CADモデル

CADモデルのインポート機能
各種CAD形式に対応



ロボットのモデル化
逆動力学シミュレーションによるトルクの計算



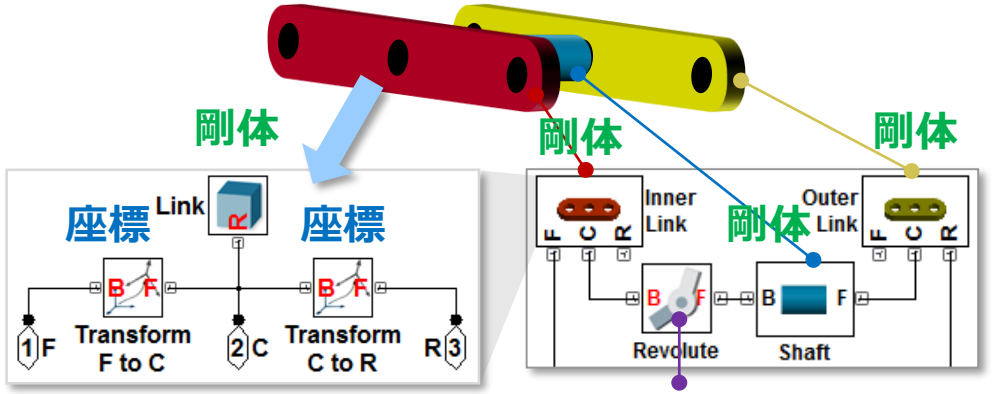
3Dアニメーション機能で
ダイナミクスを可視化

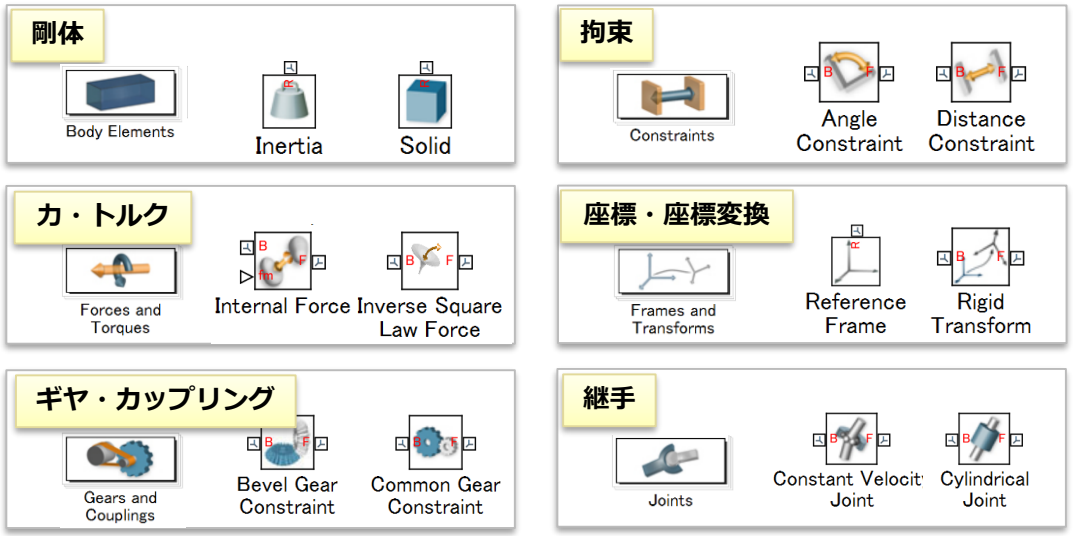
ロボットを物理コンポーネントで表現し逆動力学シミュレーション

補足：マルチボディのモデル化とシミュレーション、可視化

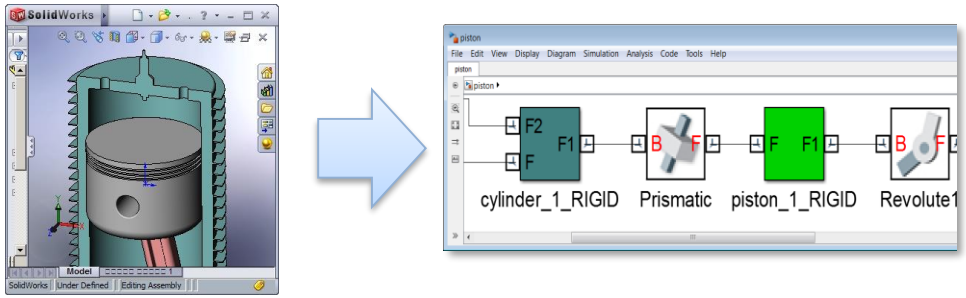
Simscape™ Multibody™

マルチボディを簡便に構築



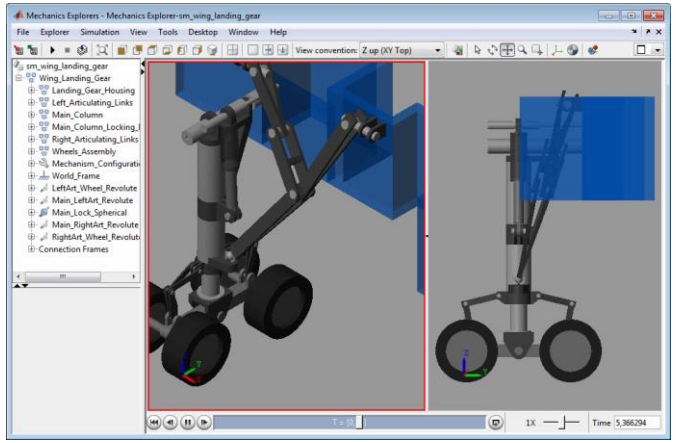


CADインポート機能



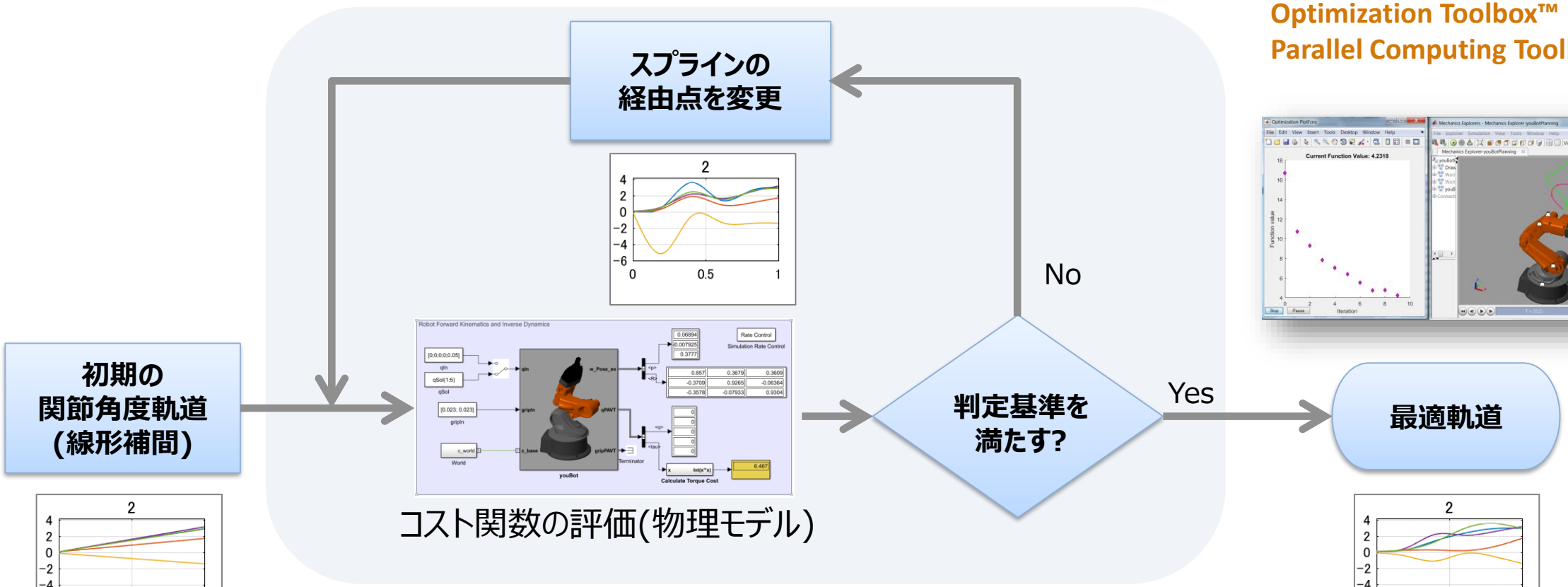
R2017a OnShapeからのインポートに対応

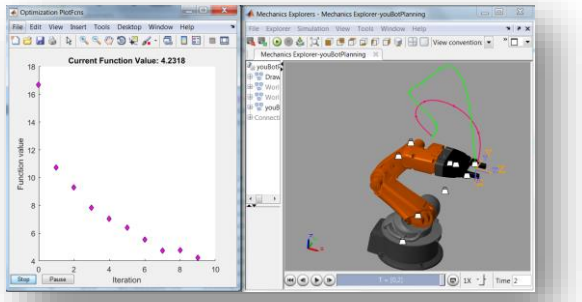
3Dアニメーション機能



最適化計算による軌道パラメータの決定

Robotics System Toolbox™
Simulink®
Simscape™ Multibody™
Optimization Toolbox™
Parallel Computing Toolbox™



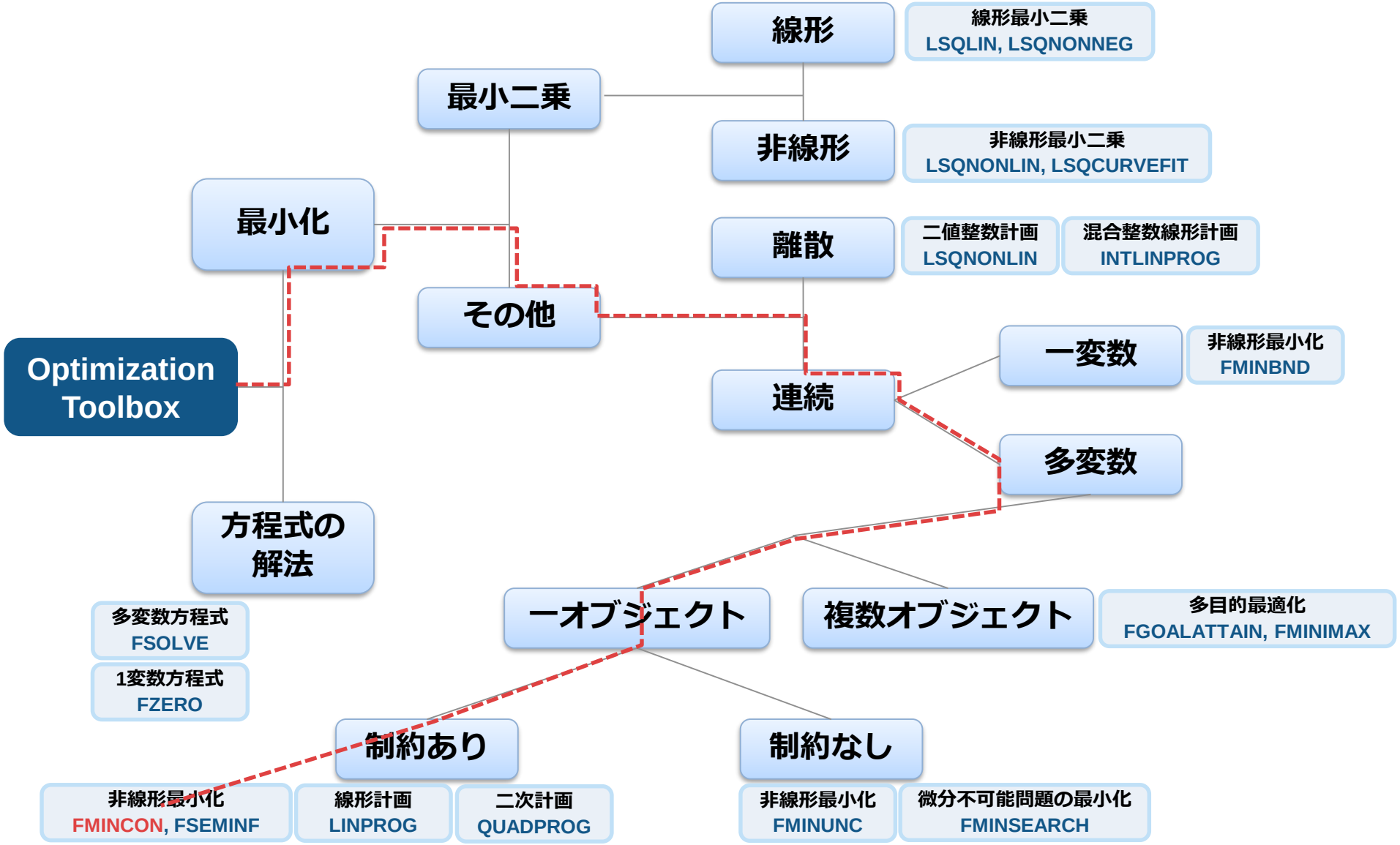


**制約付き非線形計画問題として
ソルバーを使って解く**

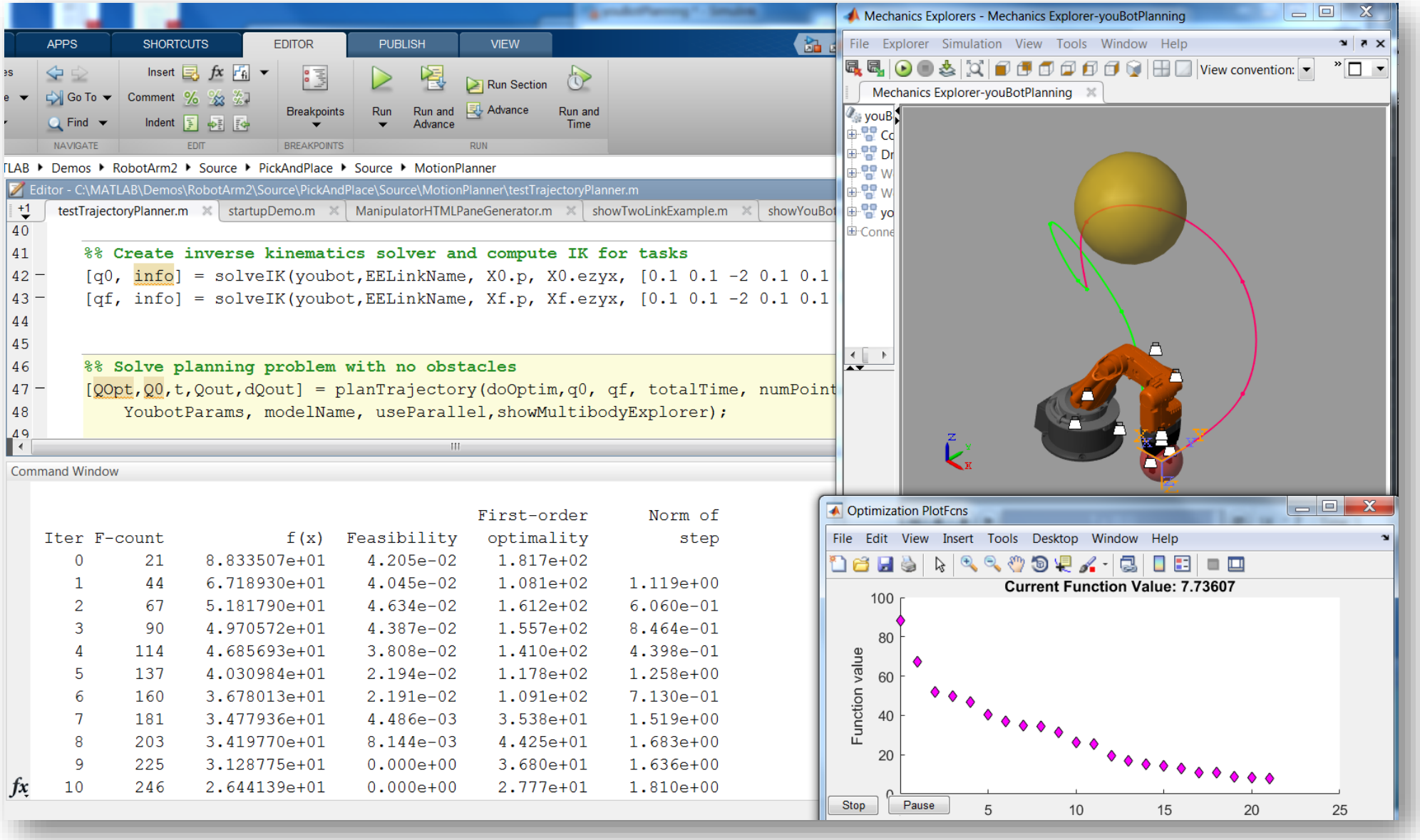
物理モデルと最適化エンジンを同一環境で取り扱うことが可能

補足：さまざまな最適化ソルバーのサポート

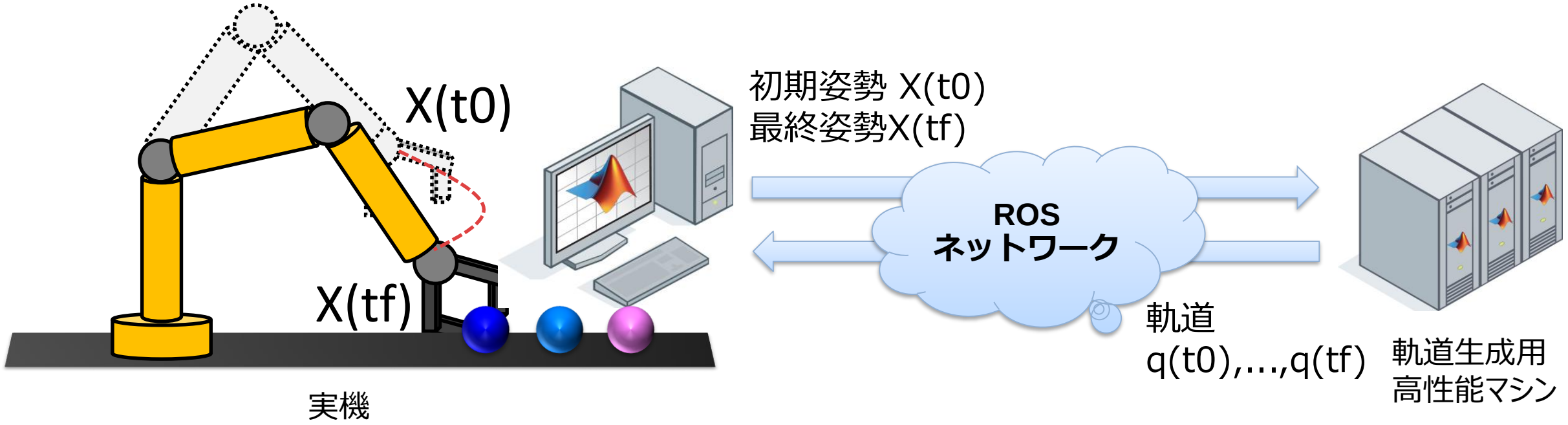
Optimization Toolbox™
Global Optimization Toolbox™



得られた軌道パラメータの可視化



補足：軌道計画のROSノード化



ROSのフレームワークで容易に処理を分散可能

アジェンダ

物体検出
位置推定

↓

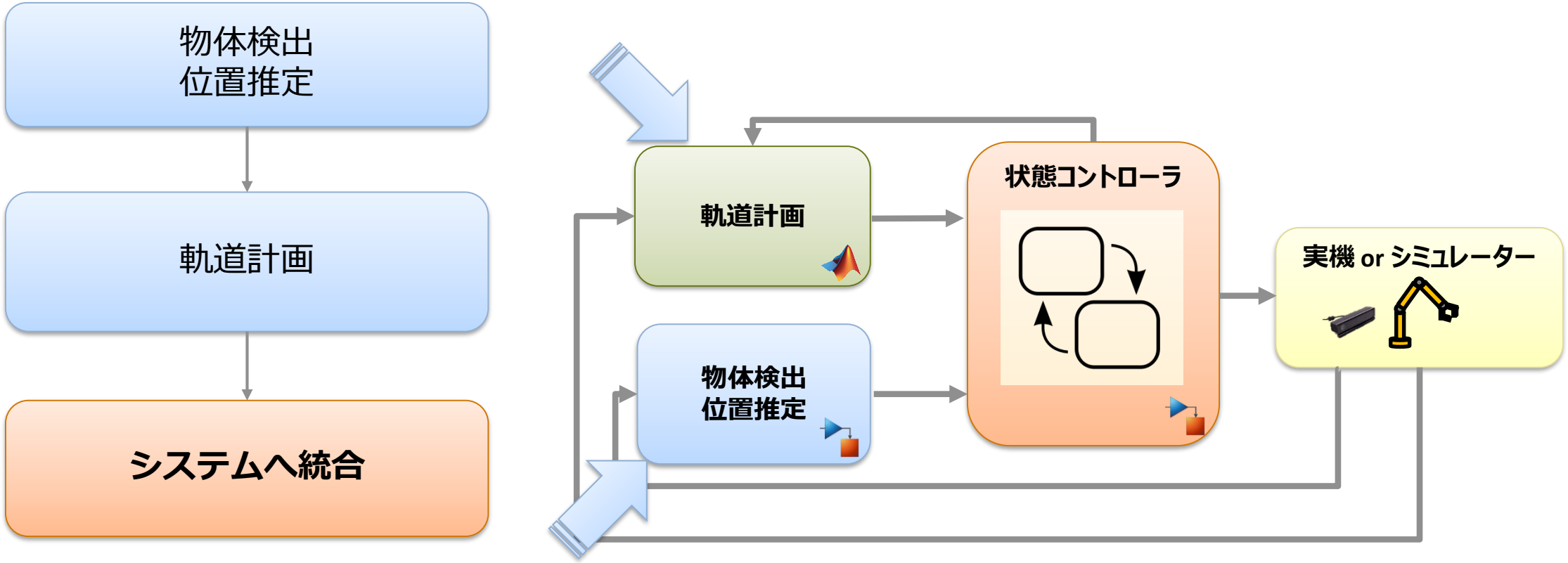
軌道計画

↓

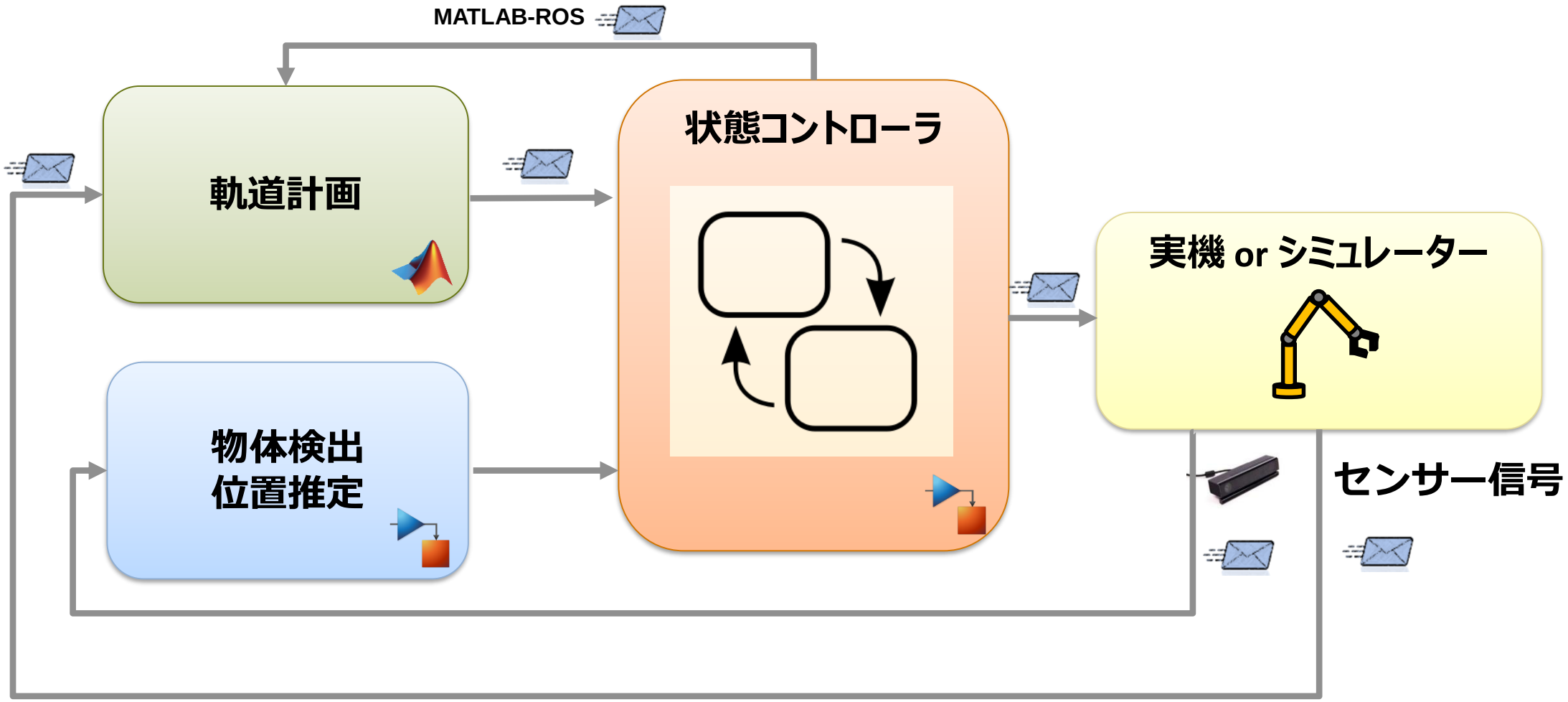
システムへ統合

1. Robotics System Toolboxによるツリー構造表現
2. Robotics System Toolboxによる逆運動学解析による関節角度計算
3. SimulinkとSimscape Multibodyによるロボットの物理モデル表現
4. Optimization Toolboxによる最適化問題への定式化

アジェンダ


物体検出
位置推定
軌道計画
システムへ統合
軌道計画
物体検出
位置推定
状態コントローラ
実機 or シミュレーター

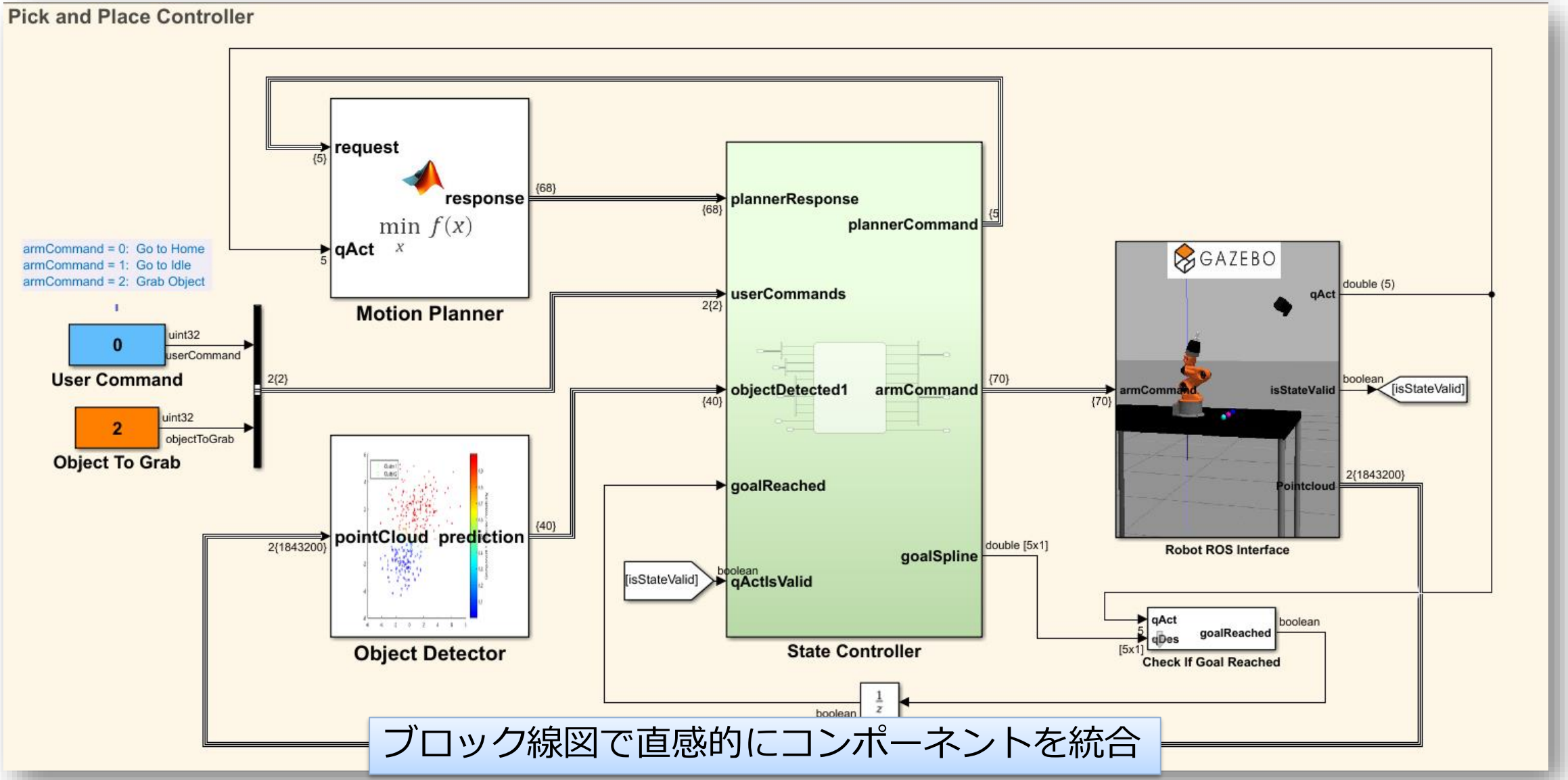
各コンポーネントをシステムに統合



複数のエンジニア/チームが作成したモデルを容易に統合

各コンポーネントをシステムに統合:完成形

Simulink® Stateflow®
Robotics System Toolbox™
Computer Vision System Toolbox™

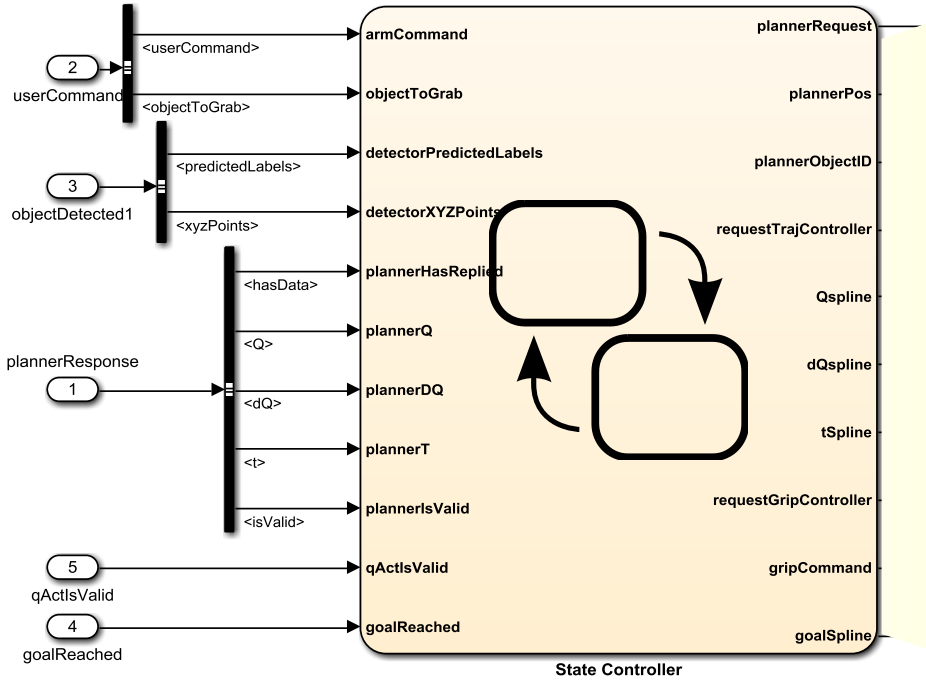


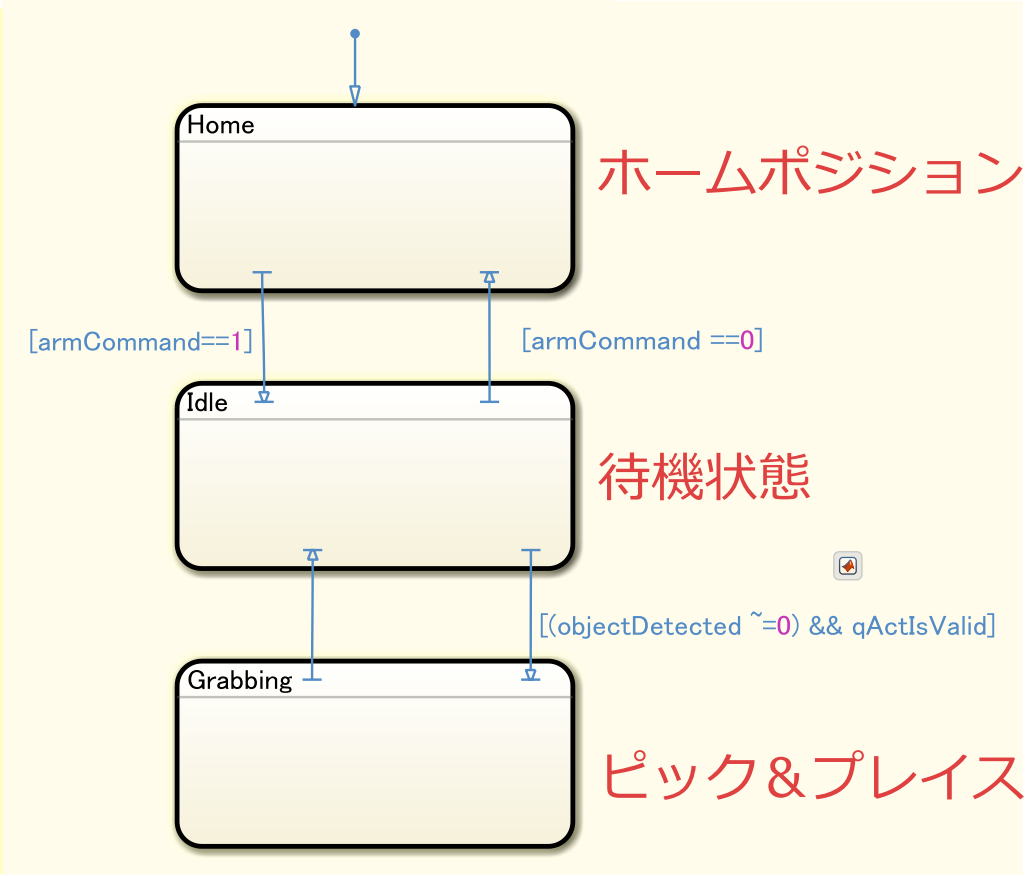
ブロック線図で直感的にコンポーネントを統合

各コンポーネントの制御とロボットの状態管理

Stateflow®

自律制御アームロボットの状態管理

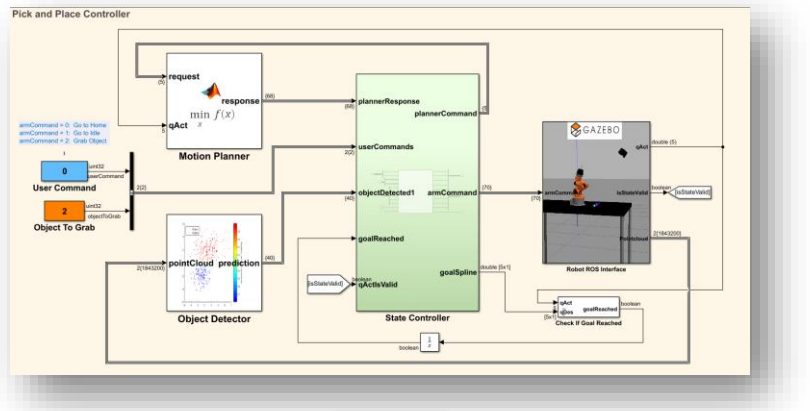




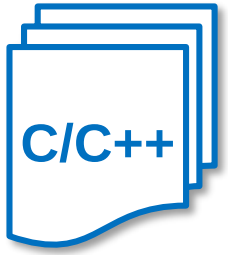
シーケンス・動作 / 制御モード変更等の記述に有効

コード生成&自動配布

MATLAB Coder™, Simulink Coder™
Embedded Coder™, Simulink Report Generator™

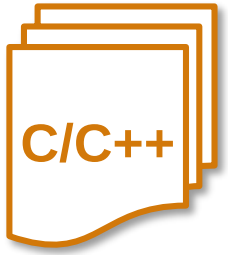


Cコード生成

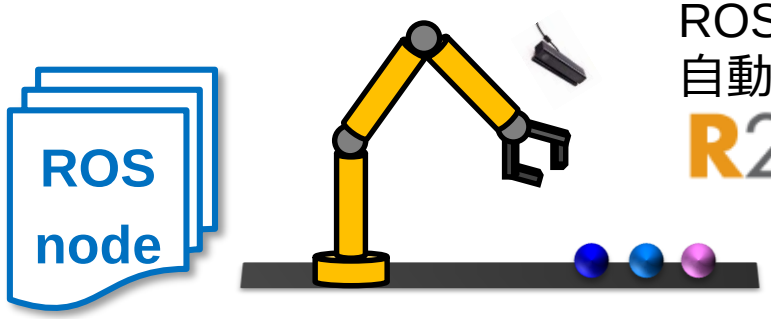


既存コードとあわせて
既存システムへの組み込み

+

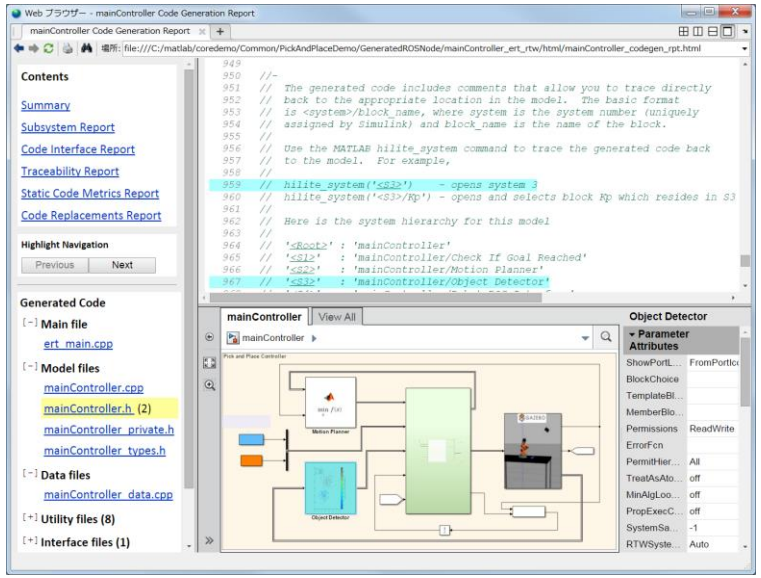


ROSノードとしてCコード生成



ROS対応ロボットやシミュレータに
自動配布してプロトタイピング

R2016b



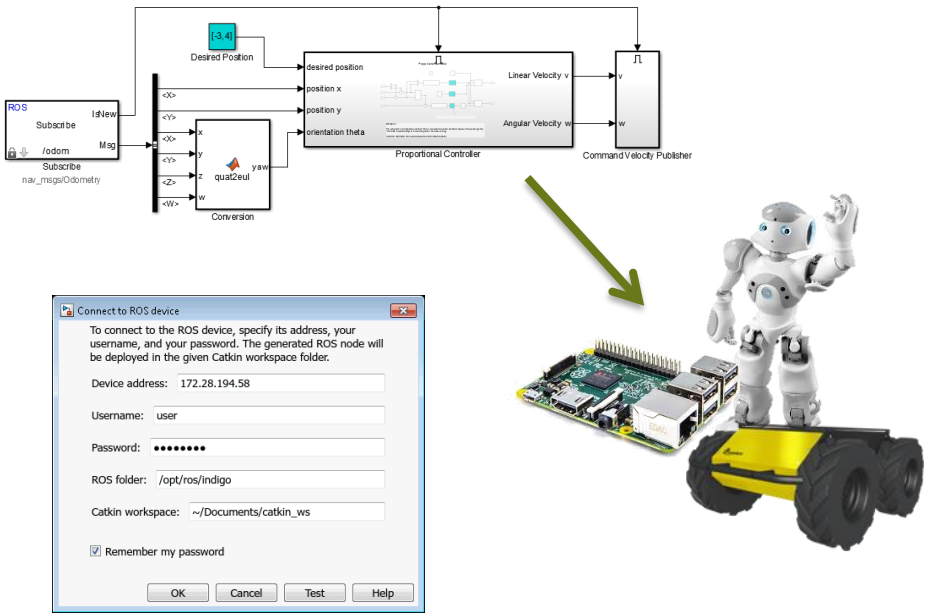
作成したモデルを自動コード生成機能を使って容易に実装

補足：ROSノードの自動生成&配布

Robotics System Toolbox
R2016b

ロボットやシミュレーターにSimulinkモデルからのROSノードの自動配布

- Simulinkモデルに対してROSロボットへの接続と実行形式のROSノード配布に対応
- Simulink上でROSのデバイスとの接続を確認することが可能
- ROSコアやROSノードを起動、停止するための**rosdevice**オブジェクトをサポート




```
>> device = rosdevice
```

» robotROSCodeGenerationExample

アジェンダ

物体検出
位置推定

↓

軌道計画

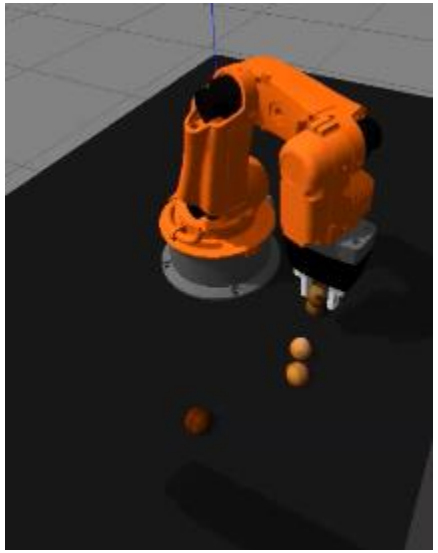
↓

システムへの統合

1. SimulinkとStateflowによるシステムの統合
2. Robotics System ToolboxのROS連携機能を活用して分散したプロセスと接続
3. モデルからのコード生成と自動配布

まとめ

- 高度なロボット開発にはさまざまな技術の組み合わせが必須
  - 自律制御アームロボットの開発
  - コンピュータービジョン、機械学習で物体認識や3次元位置推定
  - ロボット工学や最適化計算による軌道計画
- MATLAB/Simulinkは高度なロボット開発を単一環境で効率的に実現
  - 分野ごとの高度なツールボックスの関数を用意に組み合わせ可能
  - アプリケーションによるインタラクティブなアルゴリズムの探索
  - シミュレーションベースでのアルゴリズム検討とシームレスな実機実装



MATLAB/Simulinkを自律ロボット開発にお役立てください

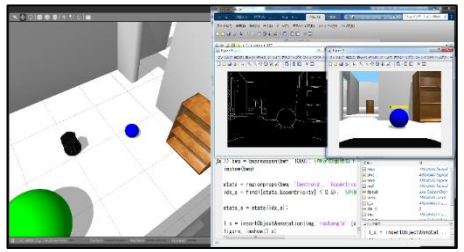
必要なツールボックスのご紹介

用途	必要なツールボックス
物体検出 (学習画像の収集、特徴量抽出、機械学習、点群処理)	MATLAB R2016b
	Robotics System Toolbox
	Image Acquisition Toolbox
	Image Processing Toolbox
	Computer Vision System Toolbox
	Statistics and Machine Learning Toolbox
	Neural Network Toolbox
	Parallel Computing Toolbox
軌道計画 (ロボットの物理モデルの構築、逆運動学解析、最適化計算)	Simulink
	Robotics System Toolbox
	Simscape Multibody
	Optimization Toolbox
	Parallel Computing Toolbox
システムへの統合 (制御ロジックの記述)	上記のツールボックスすべて
	Stateflow
ROSノード生成 (C/C++コード生成/組み込み用Cコード生成)	上記のツールボックスすべて
	Simulink Coder
	Embedded Coder

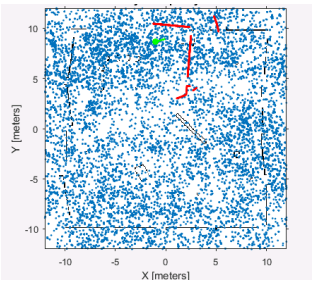
ロボットアルゴリズム開発ソリューション

Robotics System Toolbox

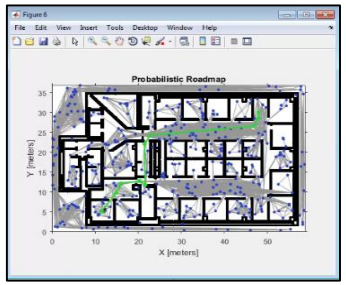
- ROSのインターフェイス提供
  - MATLABをROSマスター、ノードとして起動
  - 直接ROSネットワークに接続して検証
- ROSノード生成
  - SimulinkモデルからC++ ROSノードを生成
- ロボットアルゴリズム開発の支援
  - オイラー角、クォータニオン、座標変換などの便利な関数群
  - パスプランニング、VFH+、モンテカルロローカリゼーション(MCL)などの高度な移動用ロボットアルゴリズム
  - ツリー構造表現、逆運動学解析などのマニピュレーターアルゴリズム



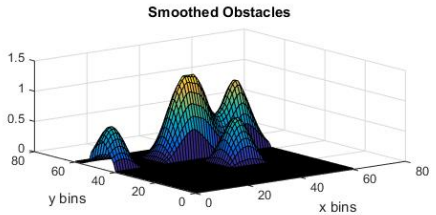
シミュレータや実機とのROS連携



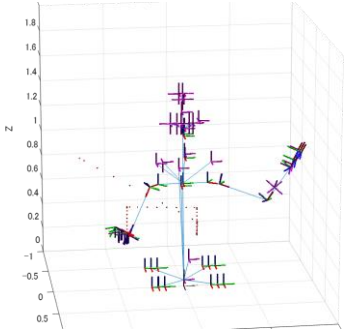
自己位置推定(AMCL)



確率的ロードマップ法(PRM)



衝突回避(VFH+)

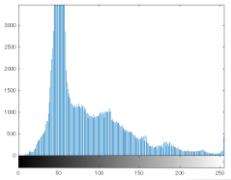


ロボットマニピュレーターアルゴリズム開発

画像処理・コンピュータービジョン・機械学習

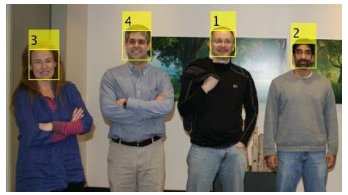
Image Processing Toolbox

- コーナー、円検出
- 幾何学的変換
- 各種画像フィルタ処理
- レジストレーション（位置合せ）
- セグメンテーション（領域分割）
- 画像の領域の定量評価



Computer Vision System Toolboxx

- カメラキャリブレーション
- 特徴点・特徴量抽出
- 機械学習による物体認識
- 動画ストリーミング処理
- トラッキング
- ステレオビジョン・３D表示



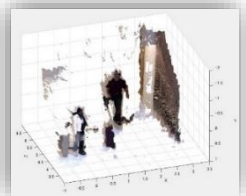
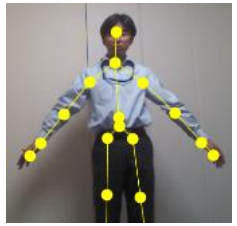


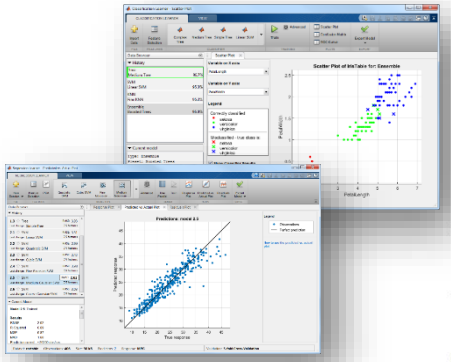
Image Acquisition Toolbox

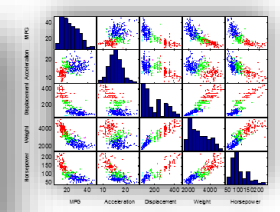
- デバイスから画像、動画直接取り込み
  - フレームグラバボード
  - DCAM, Camera Link®
  - GigE Vision®, Webカメラ
  - Microsoft® Kinect® for Windows®

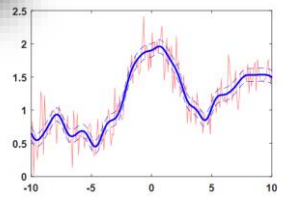


Statistics and Machine Learning Toolbox

- 機械学習
- 多変量統計
- 確率分布
- 回帰と分散分析
- 実験計画
- 統計的工程管理



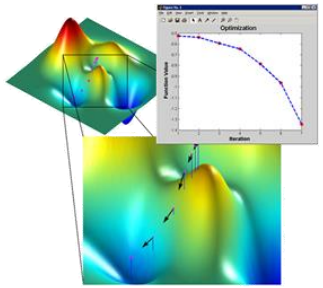




最適化・ディープラーニング・マルチコア・GPU実行

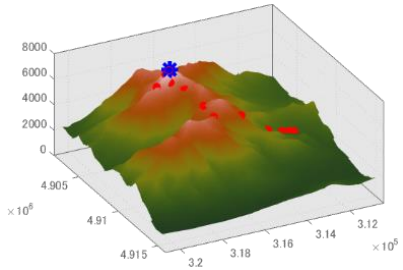
Optimization Toolbox

- 滑らかな目的関数の最適化
- 最適化のためのアプリ環境
- さまざまな最適化問題に対応する関数の提供
- 最適化計算の並列処理



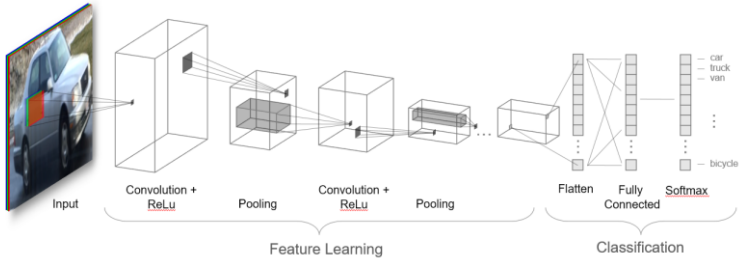
Global Optimization Toolbox

- さまざまな大域的最適化関数の提供
- アプリを使用した大域的最適化
- Optimization Toolbox で解を求めにくい目的関数に対応
- 最適化計算の並列処理



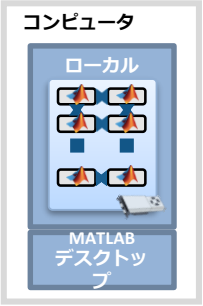
Neural Network Toolbox

- ニューラルネットワークの構築、学習
- データフィッティング
- クラスタリング
- パターン認識
- 深層学習
- GPUによる計算の高速化



Parallel Computing Toolbox

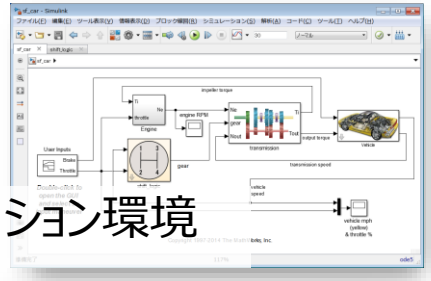
- MATLAB & Simulink と連携した並列処理
- 対話的な並列計算実行
- GPGPU による高速演算
- ジョブおよびタスクの制御

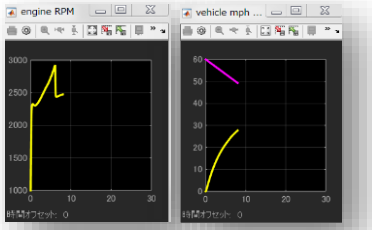


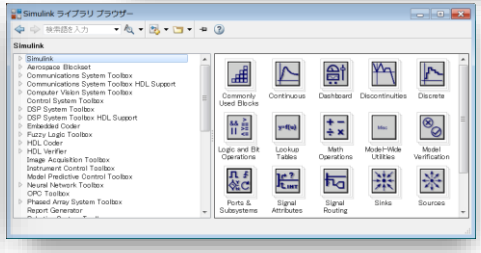
物理モデリング・制御ロジック

Simulink

- ブロック線図モデリング
- 豊富なブロックライブラリ
- 時系列の統合シミュレーション環境

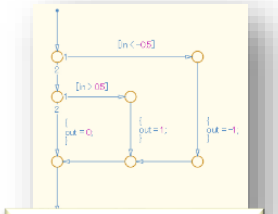




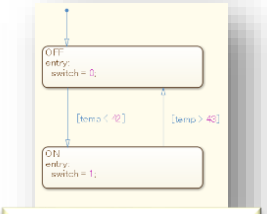


Stateflow

- モードロジックの素早い設計＆検証
- 状態遷移図、表、フローチャート機能
- コード生成、モデル検証オプション機能



フローチャート

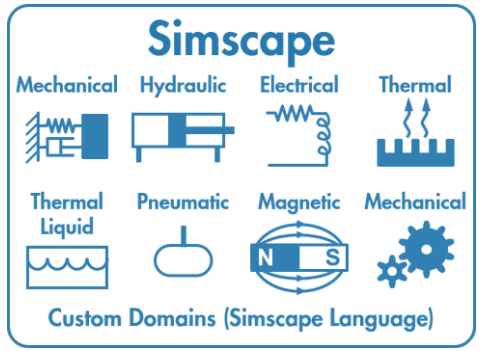


状態遷移図

状態遷移表

Simscape

- 複合物理領域のプラントモデリング

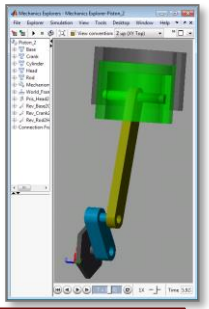


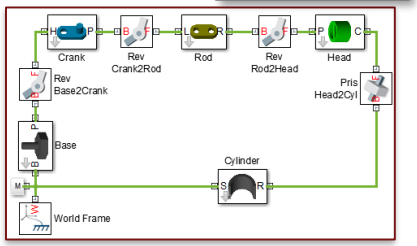
$$i = (C_0 + C_v v)\frac{dv}{dt} + \frac{v}{r_d}$$

```
Editor - C:\+MyComponents\LossyUltraCapacitor.ssc
40  equations
41    i == (C0 + Cv*vc)*vc.der + vc/Rd;
42    v == vc + i*R;
43  end
```

Simscape Multibody

- 機構（3-D）
- 剛体・ジョイント
- アニメーションによる可視化
- CADインポート機能
- 順動力学解析
- 逆動力学解析



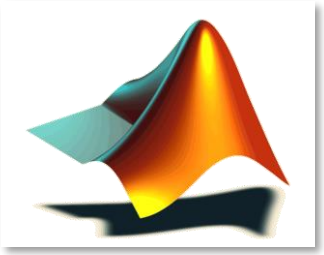


自動コード生成ソリューション

MATLAB Coder

MEX

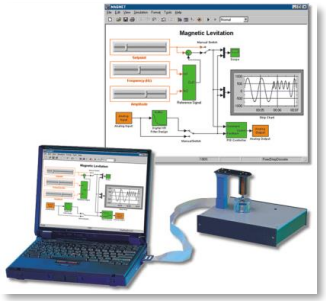
C



MATLAB

Simulink Coder

C



RCP/HILS

HDL Coder

HDL

FPGA/ASIC

Embedded Coder

C/C++

MCU/DSP

Simulink PLC Coder

ST

PLC

MathWorks

Accelerating the pace of engineering and science

© 2017 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See www.mathworks.com/trademarks for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.