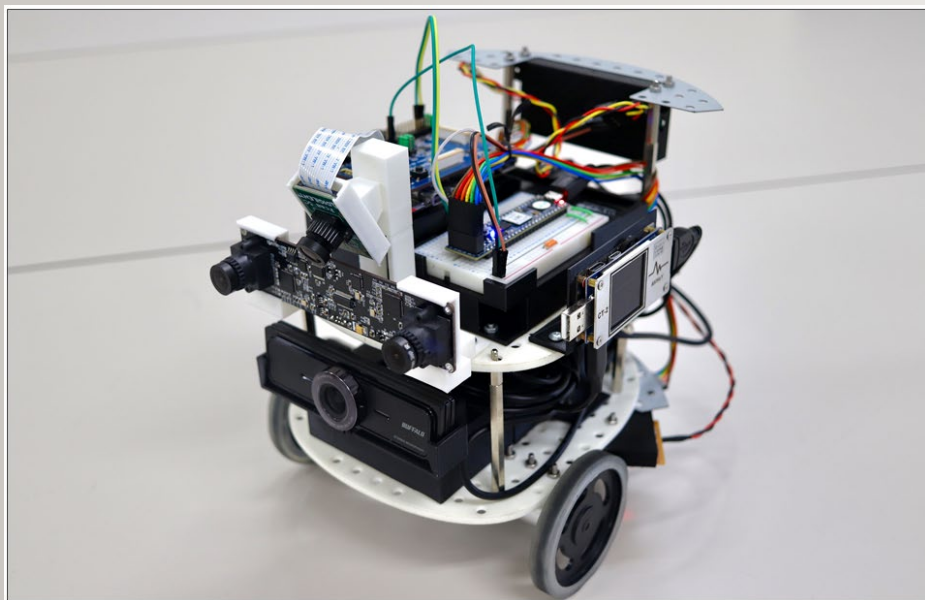


自律移動ロボットのアルゴリズムと コンピューティングプラットフォーム

Algorithms and Computing Platforms of Autonomous Moving Robots



泉 知論

工藤 裕也 高田 厚志 石田 祐太

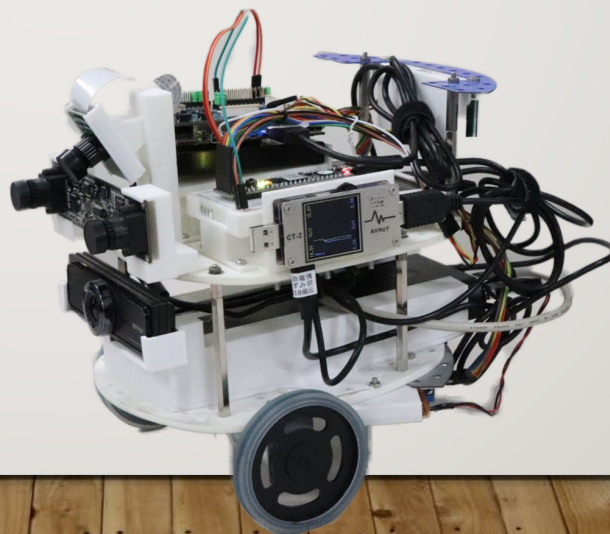
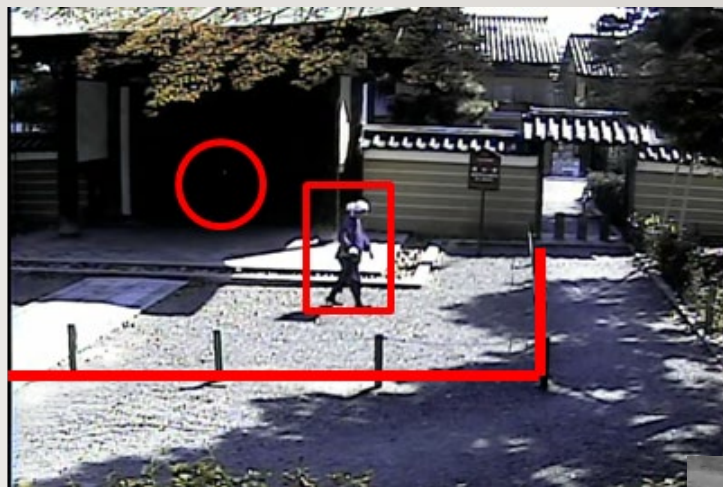
浅海 悠人 中村 宣彬 宮内 祐弥 竹中 元弥

立命館大学 工学部 電子情報工学科

大学院 理工学研究科 電子システム専攻

監視カメラの高度化

- 不審者判定・発報
- 不審行動判定
- 害獣認識、痕跡分析
- 顔画像の超解像
- 自律巡視車



自律移動の対象と特徴

- 専用工場・倉庫

ロボット向けに整えられ管理された環境。詳細地図が既知、補助設備有。
ロボットに併せて行動する人間

- 屋内・構内巡視

本来ロボット向けの環境ではない。既知詳細地図、補助設備可。人間向けの表示・操作、未知の障害物。不特定の人間が介在すると高難度。

- 一般道路

大まかな地図のみ、未知の地図。補助設備は期待できない。不特定の障害物や人。不測の事態が頻発。

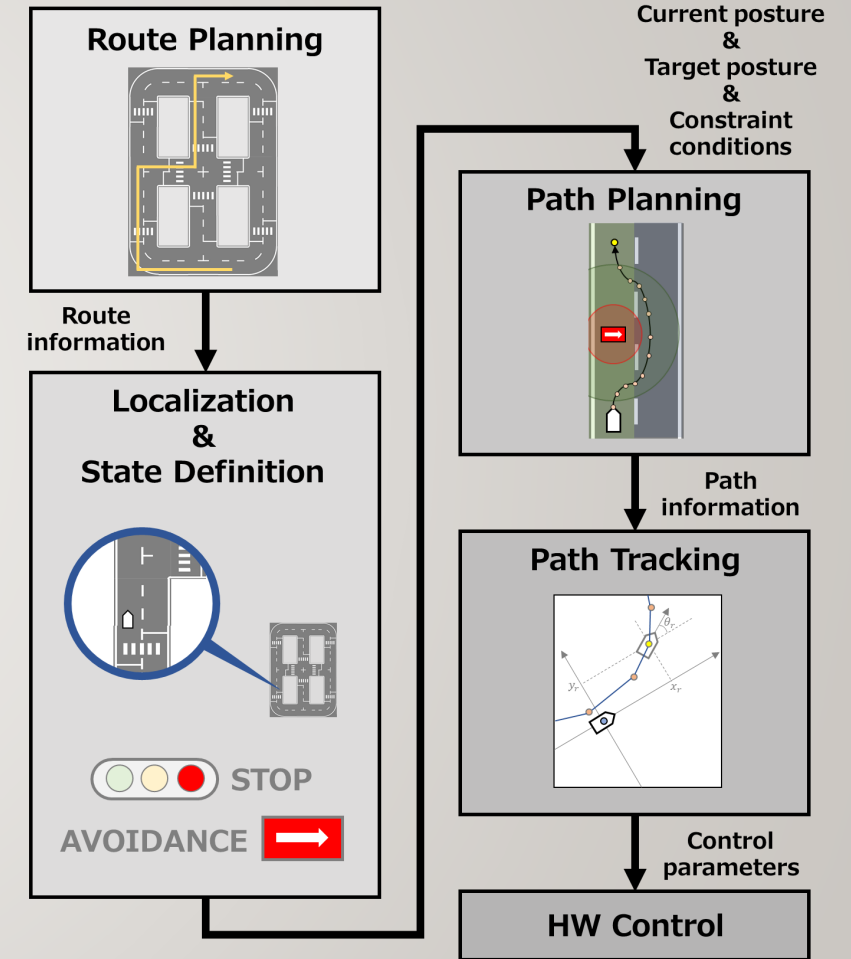
- 災害時支援、未踏地探査

全くの未整備・未知環境での状況認識と走破。



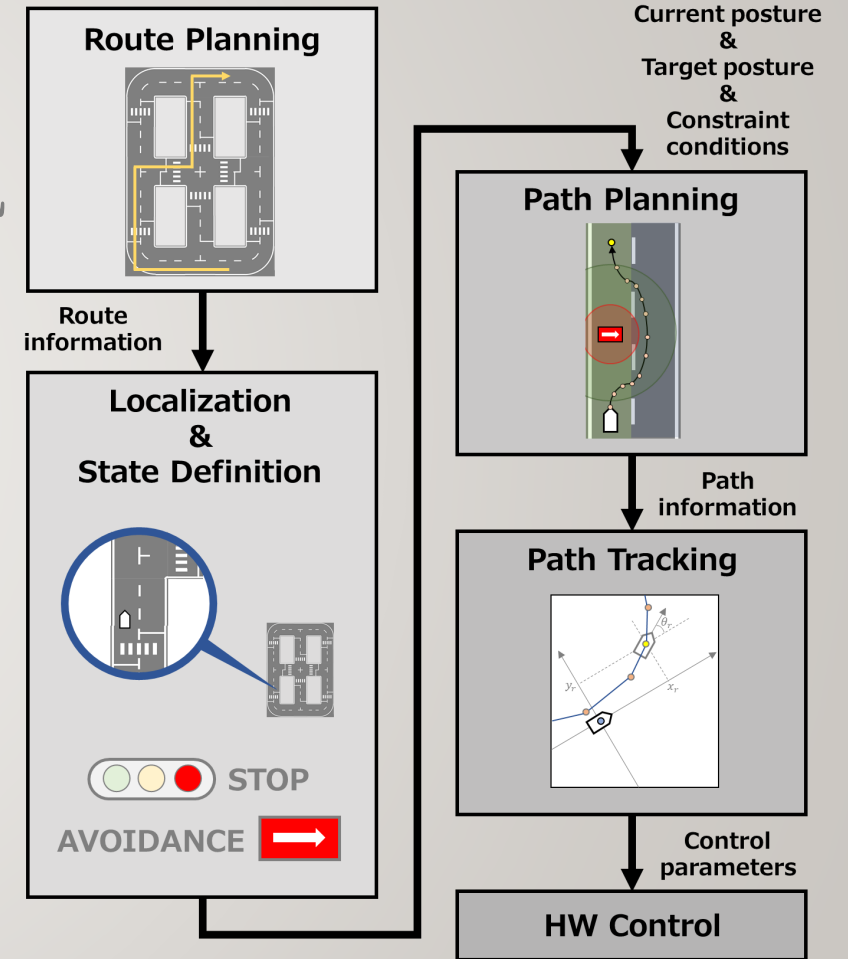
自律移動システムの構成

- 抽象度に基づいた階層構成をとる
- モジュール化により生産性・保守性の向上をはかる
- ライブラリ、IP、ミドルウェア、プラットフォームとしての展開を視野に入れる



自律移動システムの構成

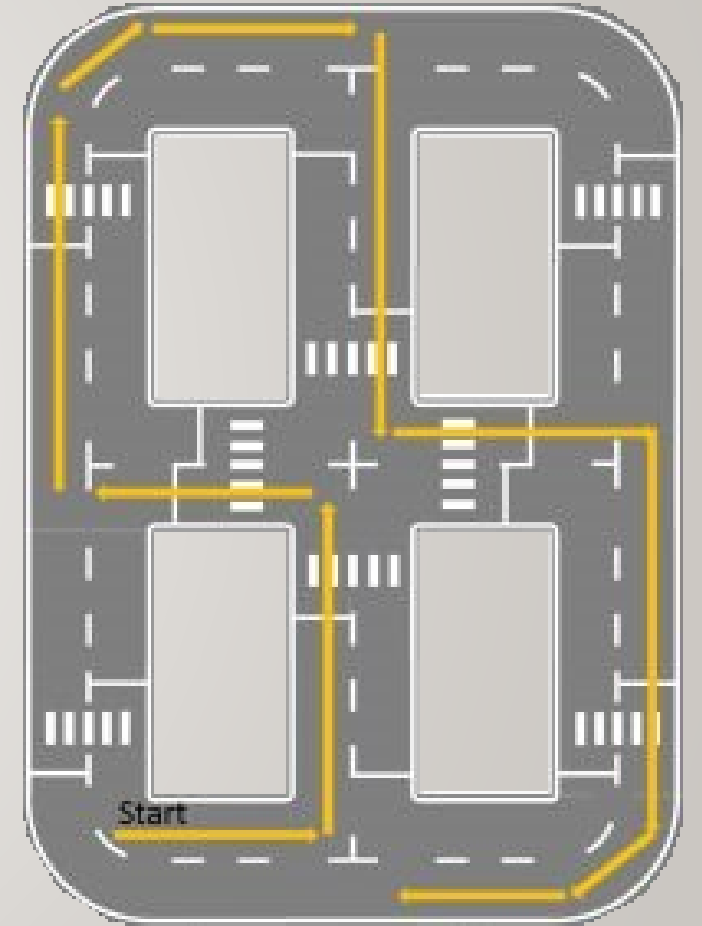
- 行動計画 … 移動順路や各地での動作を決定
- 自己位置推定 … 環境と地図を照合、地図を作成
- 状態決定 … 環境を認識し行動を決定
- 経路計画 … 移動経路を決定
- 経路追従 … 軌跡を算出
- 車体制御 … 車輪出力や舵角を制御



R 行動計画

RITSUMEIKAN

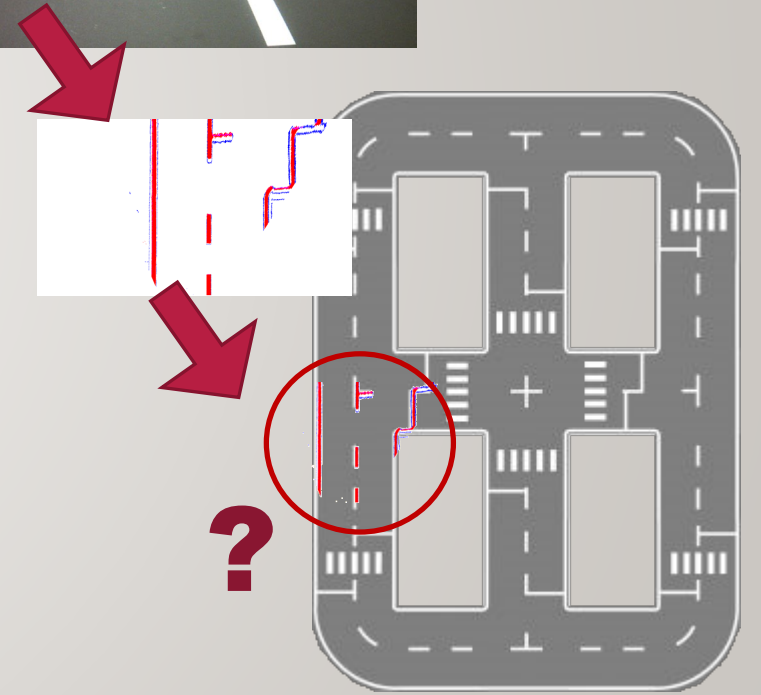
- 自身の行動を定める
 - 移動する道順
 - 場所と動作（注視・確認、荷物の積降、など）
- 予め指示される
- あるいは目的を与えられて計画（最適化）する



R 自己位置推定

RITSUMEIKAN

- 自身の位置と向きを推定する
- 地図と環境を照合する (Localization)
- 地図がない場合、同時に地図を作成する (SLAM: Simultaneously Localization And Mapping)
- 観測履歴と地図との最尤推定
- カメラ、慣性センサ、距離計 (車輪回転計)、超音波距離センサ、LiDAR、...
- 環境からの支援: マーカー、ビーコン、カメラ、...



多様なセンサ情報を統合した自己位置推定

- 多様なセンサ
 - 車輪回転センサ … 移動距離 $\leftarrow \Sigma$ 回転、向き $\leftarrow \Sigma$ 左右輪差
 - 慣性センサ … 位置 $\leftarrow \int \int$ 加速度、向き $\leftarrow \int$ 角速度
 - カメラ … 特徴抽出とマッチング
- センサ統合
 - カルマンフィルタ
 - 粒子フィルタ

R Wheel Odometry

RITSUMEIKAN

- ロータリーエンコーダを用いた移動量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$

- 対向二輪型のロボットを対象
- ある時刻 t におけるロボットの姿勢 X_t の定義

$$X_t = (x_t, y_t, \theta_t)$$

- 姿勢はロボットの2次元平面座標と向きで構成

ロータリーエンコーダ角度分解能: θ_{res}

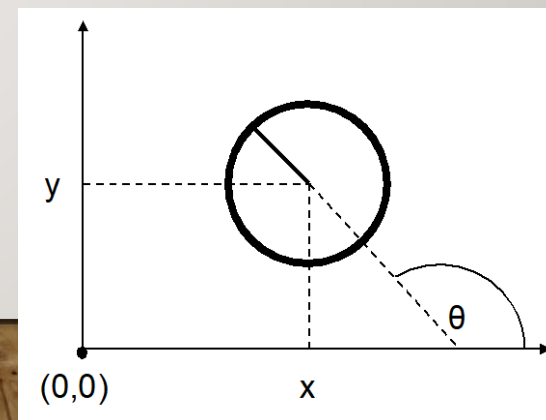
車輪半径: r

車輪間距離: $tread$

左右のロータリーエンコーダのカウント値: c_l, c_r

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 \\ \sin \alpha & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\alpha = \frac{r\theta_{res}(c_r - c_l)}{tread} \quad L = \frac{r\theta_{res}(c_r + c_l)}{2}$$



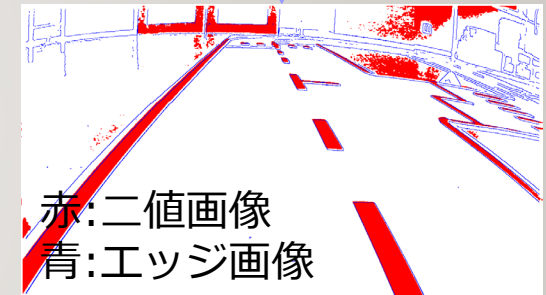
R Visual Odometry (I)

RITSUMEIKAN

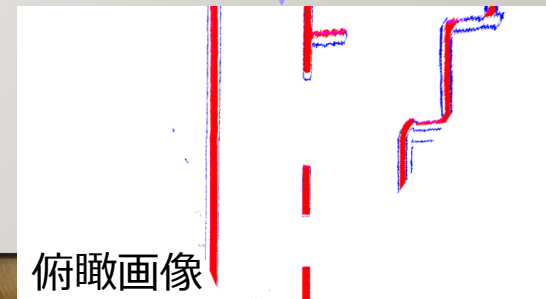
- イメージセンサを用いた移動量 ($\Delta x, \Delta y, \Delta \theta$)
- 前処理 (ハードウェア)
 - Cannyエッジ検出と二値化を並列実行
- 前処理 (ソフトウェア)
 - 歪曲収差補正・射影変換



Cannyエッジ検出
&
二値化



歪曲収差補正
&
射影変換

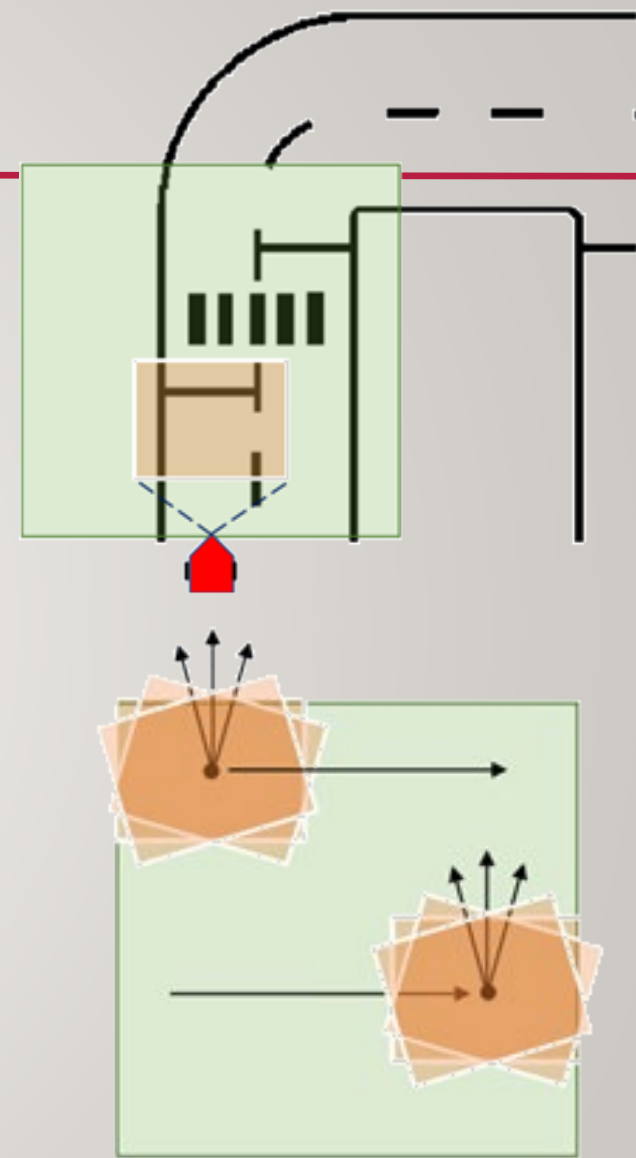


R Visual Odometry (2)

RITSUMEIKAN

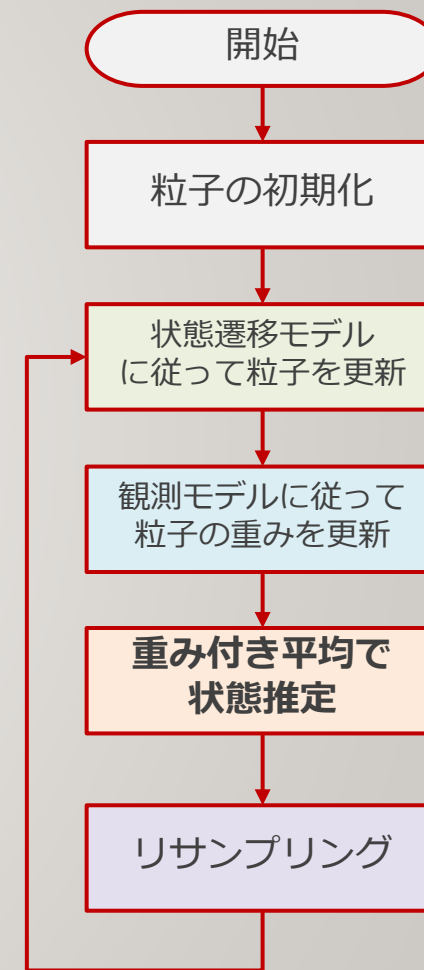
相互相関によるテンプレートマッチング

- 事前に地図を用意
- 自己位置付近の領域を抽出 (緑エリア)
- 俯瞰画像取得 (オレンジエリア)
- 緑エリア内を左上から角度を変えながら走査
- 現在保持している自己位置に対する $\Delta x, \Delta y, \Delta \theta$ を導出



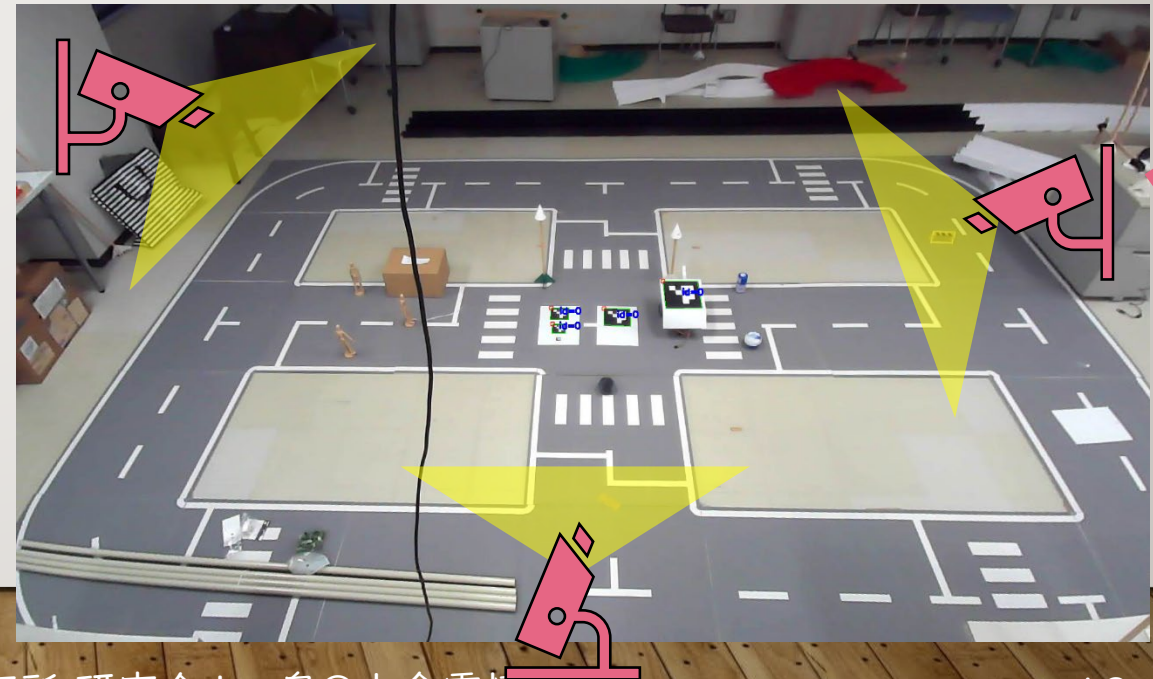
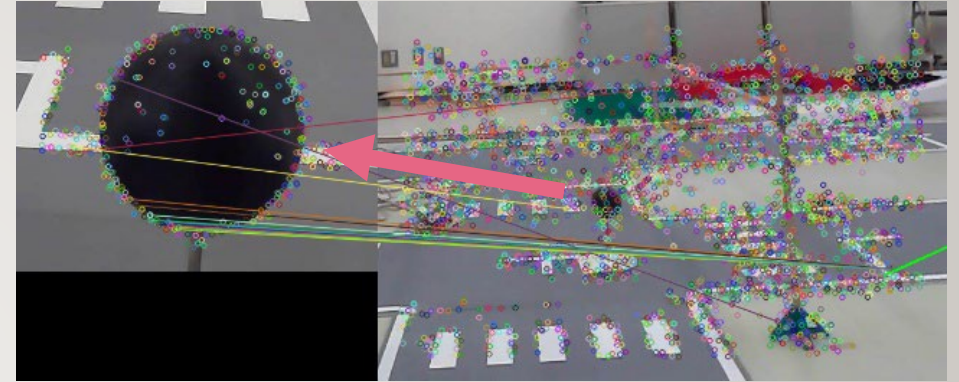
パーティクルフィルタ

- ある未確定な状態の推測を行う逐次ベイズフィルタの一種
 - 内部に多数の状態(粒子)を持つ
 - 粒子は重みを持つ
 - 全ての粒子は状態遷移モデルで遷移
 - **Wheel Odometry**を適用
 - 観測モデルで重みを更新
 - **Visual odometry**を適用
 - 重み付き平均で状態推定
 - リサンプリング
 - 重みがほぼ0である無意味な粒子の増大予防



環境補助による自己位置推定の高精度化

- 巡視領域の監視カメラと連携して位置推定精度を向上
- 特徴量抽出 (A-Kaze) と特徴点マッチング
- 多方向からの画像のマッチング
- 三角測量 & 最尤推定



自状態の決定

- 環境に応じた状態（詳細な行動）を決定する
- 環境認識と行動決定
 - 車線、停止線、交差点 → 直進、旋回、停止
 - 標識、信号 → 停止、発進、加速、減速
 - 障害物 → 回避
 - 警戒対象 → 注視、警報



R 物体検出・認識

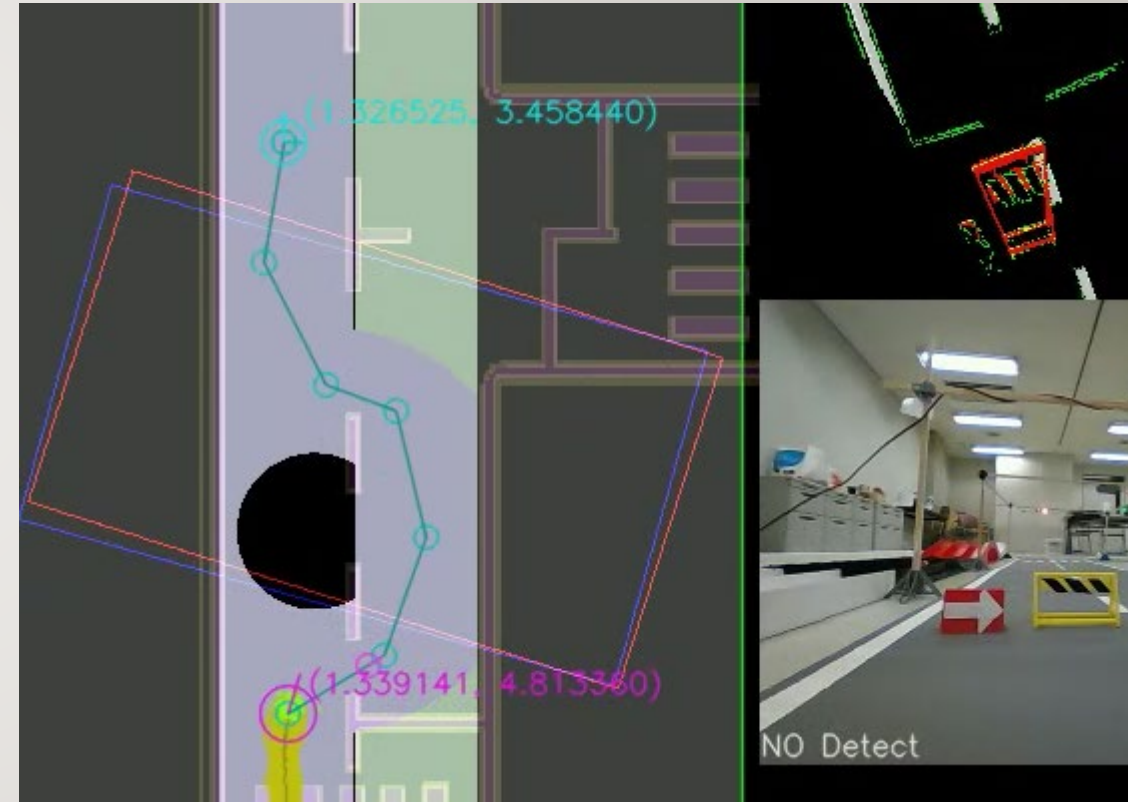
RITSUMEIKAN

- 古典的手法
 - 特徴抽出フィルタ+パターンマッチ
 - 特徴量抽出(SIFT, SURF, KAZE...) + 特徴マッチング
 - 認識、分類(SVM, NN, AdaBoost, random-forest)
- 深層学習

R 経路計画

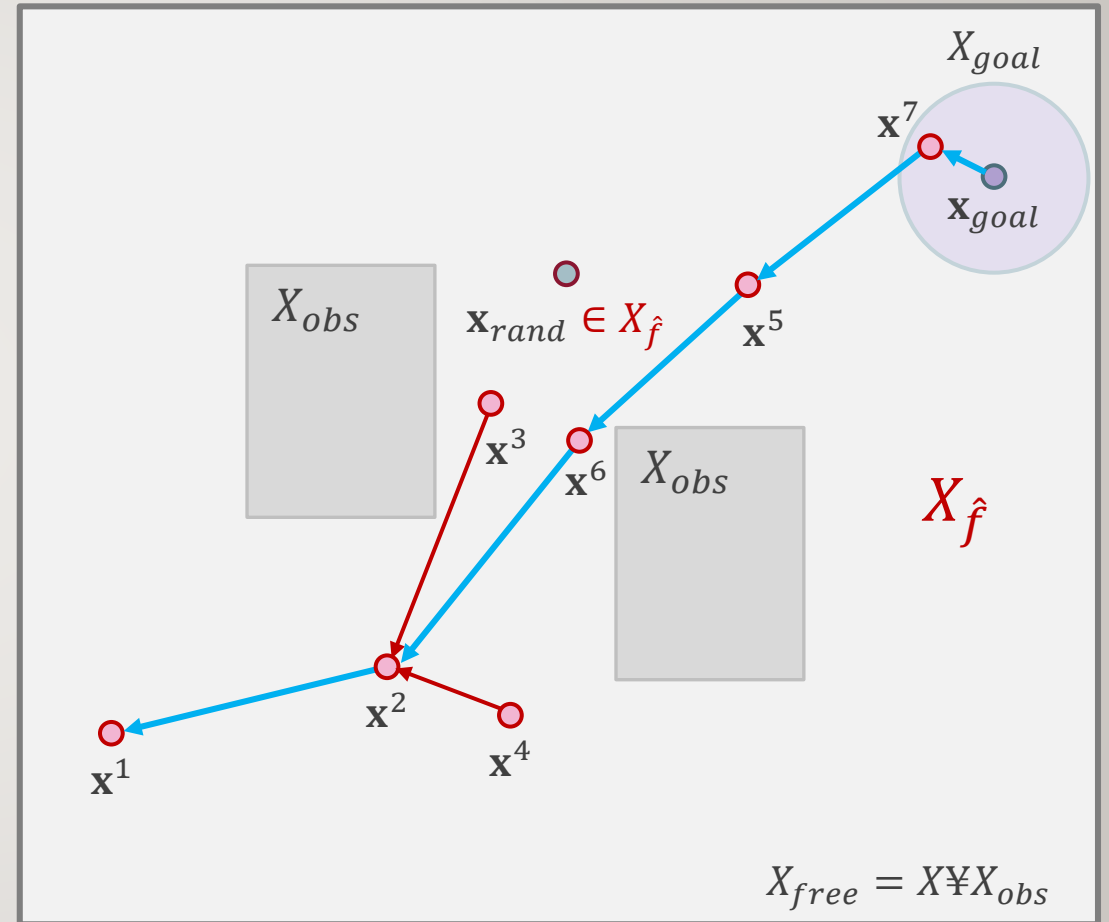
RITSUMEIKAN

- 現在地から目標までの経路を生成
- 位置 (+方位、速度など) 状態の列
- 障害物や禁止領域を避ける
- 距離や曲率などを最適化



R RRT (Rapidly-exploring Random Trees) & Variants

- 経路計画の確率的手法
- 最適性と計算時間のバランス
- 経路候補集合を始点からの最短距離木で表現
- 経由点候補を乱数生成 → 木に接続 → 木の再構成
- 目的地に達し、評価値が安定するまで繰り返す。



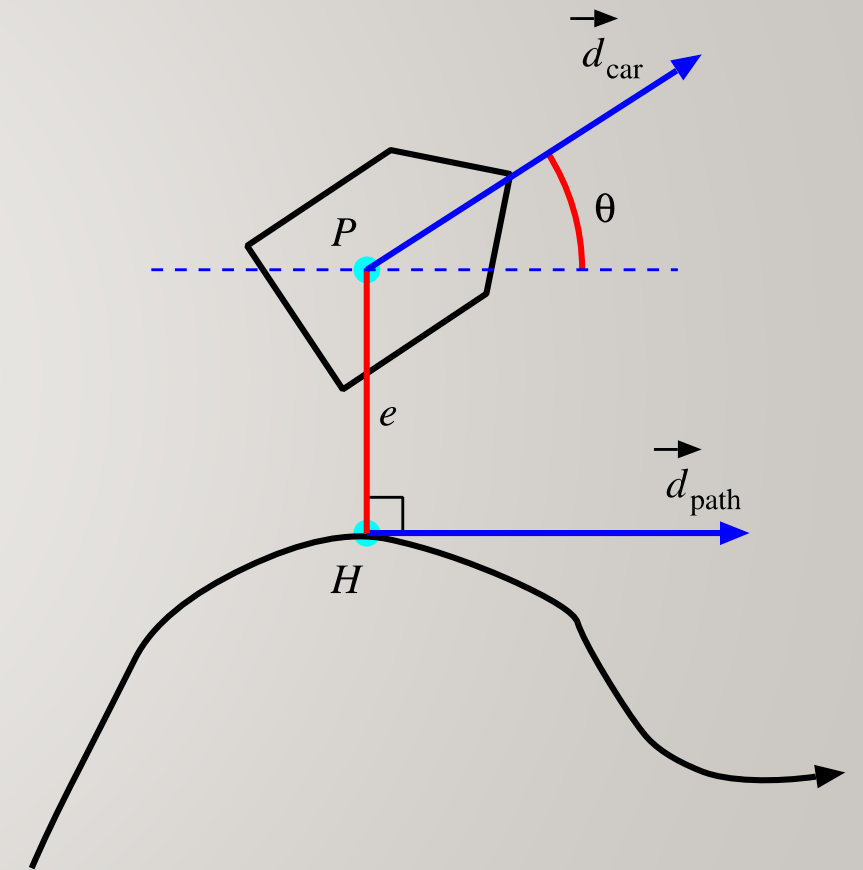
確率的アルゴリズムのための乱数生成

- 確率的アルゴリズムでは乱数生成を多用する
- デジタル回路による高効率化を狙う
- 基本となる一様乱数生成モジュール
- 乱数の質、回路規模、生産性を考慮
- 対象アルゴリズムに特化した生成
- 超楕円球内一様サンプリング
- ガウス、ポアソン、逆ガンマなどの分布に従う乱数

R 経路追従

RITSUMEIKAN

- 指定経路を追従するように操縦する
- 基本的にはフィードバック制御
- 現状態（位置・方向・車速など）と指定経路上の目標状態との差異から車輪回転速度や舵の状態を決定
- 環境変化、指定経路の変化、外乱、オーバーシュートにより変動する
- Pure-Pursuit, LQR, ...



R 計算環境の選択

RITSUMEIKAN

CPU (Central Processing Unit)

- いわゆる普通のコンピューター
- 扱いやすく広く普及、多くの設計資産が利用可能、汎用性のための機構が性能の足枷

GPGPU (General-Purpose Graphic Processing Unit)

- 画像処理用並列計算装置を流用したもの
- 高並列、行列・テンソル(多次元配列)の計算が得意、画像処理やAI向けのライブラリが豊富、消費電力大

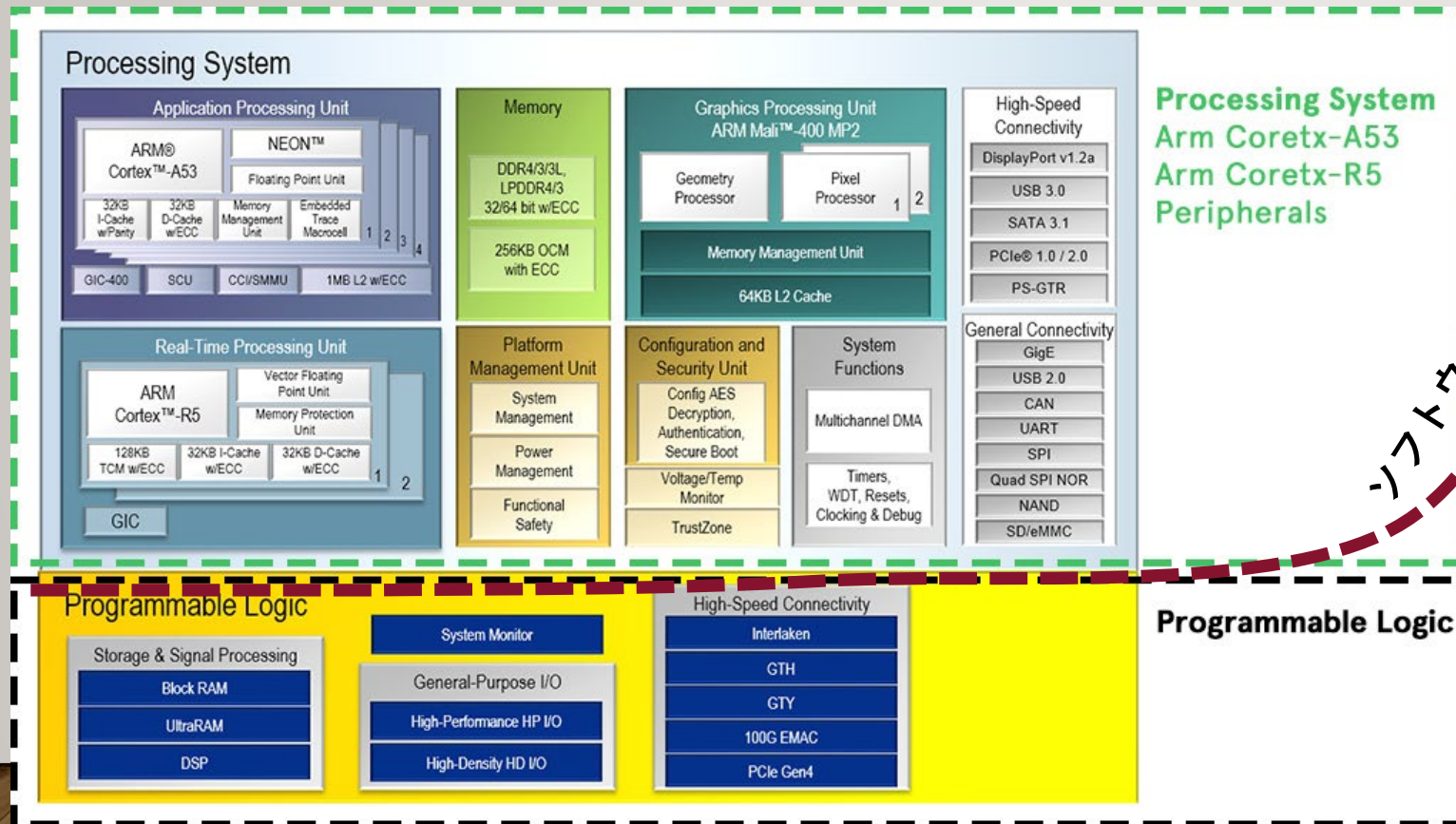
FPGA (Field-Programmable Gate Arrays)

R コンピューティング・プラットフォーム

RITSUMEIKAN

Ultra96 board
with Xilinx Zynq Ultrascale + MPSoC

狙い
ソフトとハードの効果的な
連携による高効率処理

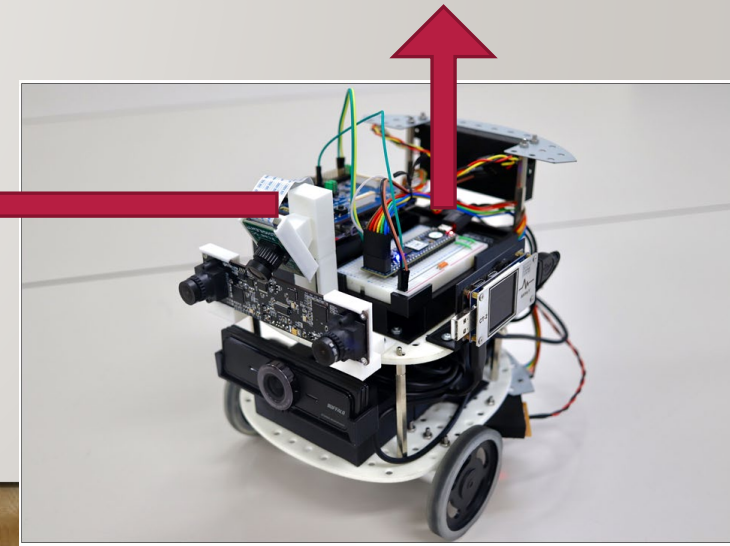


Processing System
Arm Cortex-A53
Arm Cortex-R5
Peripherals

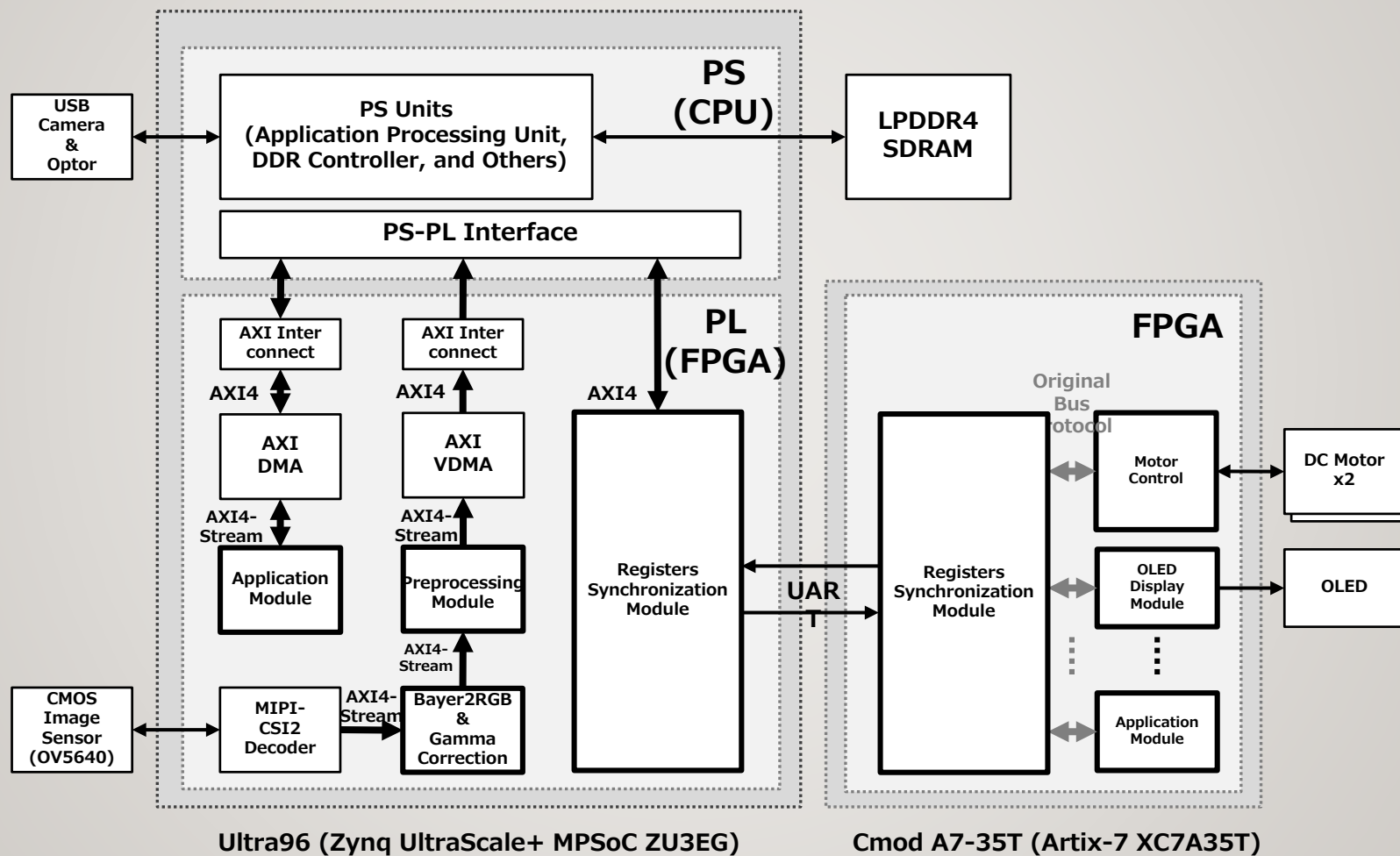
Programmable Logic

ソフトウェアプログラム
デジタル回路

Cmod A7 board
with Xilinx Artix FPGA



自律移動のシステムアーキテクチャ



- 画像処理技術と組込システム技術の安全安心への応用
- 自律移動ロボットのプロジェクト紹介
- 巡視ロボ … 既知領域を指定経路で巡視
- 自己位置推定、環境認識、経路計画、経路追従のアルゴリズム
- 確率的アルゴリズムと乱数生成
- プログラマブルロジックを活用した高効率処理を狙う
- ソフトとハードを連携させたシステムアーキテクチャ

