

LRF とパン・チルト回転機構上の RGB-D センサを用いた 人追従走行ロボットの開発

Development of a person following robot using a LRF and a RGB-D sensor on a pan/tilt-rotated mechanism

○学 村上 大希 (創価大)
樹 光明 (創価大)

岩見 幸一 (創価大)
崔 龍雲 (創価大)

Daiki MURAKAMI, Soka University
Kouichi IWAMI, Soka University
Mitsuaki TATSU, Soka University
Yongwoon CHOI, Soka University

Our purpose of this study is to develop a person following robot using a LRF and a RGB-D sensor on a pan/tilt-rotated mechanism. To acquire the position of the target to be followed, the target must be kept within the sensor's measurement range. Therefore, in this study, we combine both the methods of recognizing a person in the image by letting it orient the RGB-D sensor on a pan/tilt-rotated mechanism to the target direction and tracking the target of a person with an LRF-based particle filter. In controlling the robot, we have used the DWA method to avoid obstacles and the PI control for its direction change. The experimental results conducted with the combined method will be demonstrated for the effectiveness to the following robot system.

Key Words: Person following robot, LRF, RGB-D sensor

1 はじめに

人追従走行ロボットとは、カメラや深度センサなどを用いて人の位置を取得し、人を追従するロボットである。このロボットは、倉庫整理やホテルなどでの荷物運搬支援として運用されている [1]。また、家庭内の荷物を運ぶためや留守番している幼児を見守るためなど、日常生活での運用も可能であると考えられる。人追従走行を行うためには、人物追跡と走行制御が要求される。人物追跡とは、追従対象者の位置を検出及び追跡することである。走行制御とは、追従対象者の位置にロボットを移動させることである。

従来研究での人物追跡として、カメラと LRF を用いた手法 [2] や RGB-D センサを用いた手法 [3] がある。これらの手法では、カメラや RGB-D センサから得られる画像から人検出を行っている。しかし、カメラや RGB-D センサが固定されているため、取得できる画像が一方方向のみに限られる。そのため、人物追跡中に追従対象者がカメラや RGB-D センサの画角外に移動した場合、画像での人検出が困難になり、人追従走行ができない場合が考えられる。

そこで、本研究では、LRF とパン・チルト回転機構上の RGB-D センサを用いた人追従走行ロボットの開発を目的とする。本研究での人追従走行における人物追跡は、RGB-D センサからの人の位置を取得し、LRF の 2 次元点群を用いたパーティクルフィルタによる追跡と組み合わせることで行われる。また、RGB-D センサのパン・チルト回転機構により、追従対象者の方向にセンサを回転させることで、人認識の範囲を拡大することが可能となった。さらに、走行制御においては、経路生成アルゴリズムである Dynamic Window Approach(DWA)[4] による障害物回避と PI 制御による方向転換を組み合わせで行われる。

本稿では、開発したロボットや人追従走行システムについて述べ、検証実験で、RGB-D センサのパン・チルト回転制御の有無による動作比較と、追従走行の動作における有効性について確認

する。

2 人追従走行ロボットシステムの概要

開発したロボットの構成を図 1 に示す。ロボットは、対向 2 輪型移動ロボットに制御用 PC、LRF、パン・チルト回転機構上の RGB-D センサを搭載している。制御用 PC は、人追従走行システムの制御を行い、LRF と RGB-D センサは、追従対象者の位置の追跡に用いる。

開発した人追従走行システムのフローチャートを図 2 に示す。図 2(a) に示すように本システムでは、人物追跡 (Person Tracking) と走行制御 (Move Control) を行う。人物追跡では、LRF と RGB-D センサから得られたセンサデータをもとに追従対象者の位置を取得される。その後、追従対象者の位置にパン・チルト回転機構により、RGB-D センサを回転させる。走行制御では、人物追跡で取得された追従対象者の位置にロボットを移動させるために、DWA による障害物回避と PI 制御による方向転換を組み合わせで行われる。以下に図 2(b)、2(c) に示すようなシステムの各処理の詳細について述べる。

2.1 人物追跡 (Person Tracking)

図 2(b) に示すように人物追跡では、LRF からの 2 次元点群と RGB-D センサからの RGB 画像と 3 次元点群を処理することで人の位置を追跡する。人物追跡の処理は、検出、追跡、予測位置に基づいた検出の 3 つのステップからなる。以下に人物追跡の各ステップの詳細を述べる。

2.1.1 検出ステップ

検出ステップでは、LRF を基準とした追跡を行うために人の位置と点群を取得する。本ステップの様子を図 3 に示す。以下にその手順を述べる。本ステップでは、ロボットの前方にいる人を追従対象者とするため、パン・チルト回転機構上の RGB-D センサ

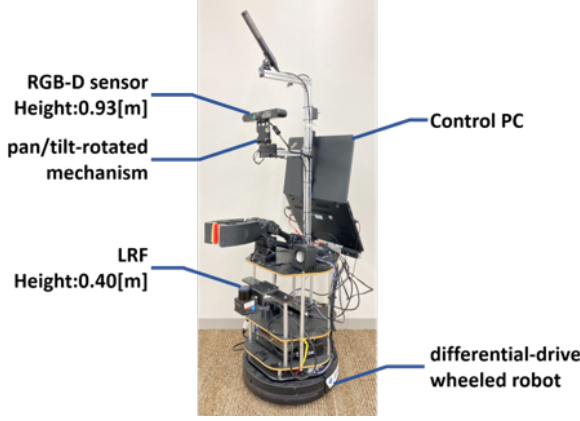


Fig.1: Overview of the robot

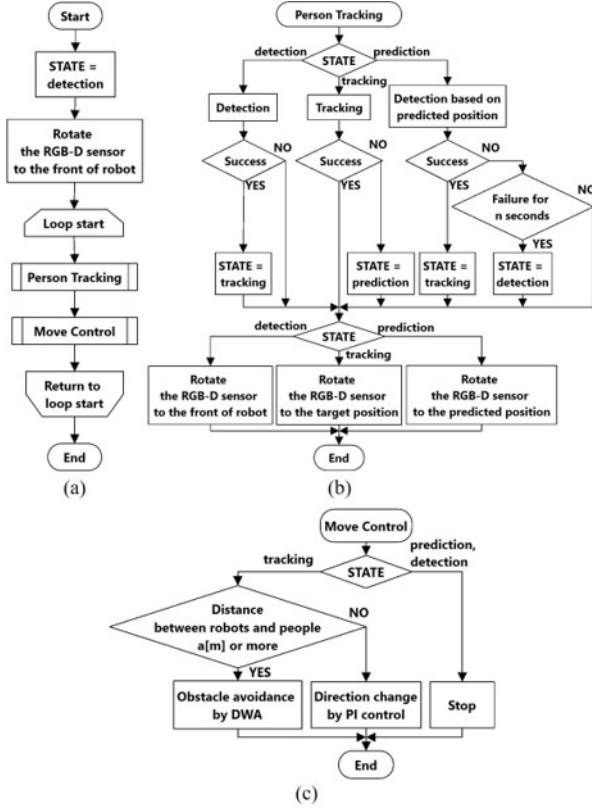


Fig.2: Flowchart of the person following system

を正面に固定する。まず、図3の左のように、RGB画像に対して深層学習を用いた物体検出 [5] で人を認識する。次に、図3の右のように、人認識結果のバウンディングボックスとRGB-Dセンサから得られる3次元点群を用いて、バウンディングボックスの中心の画素に対応している3次元点群上の点を抽出する。これにより、RGB-Dセンサを基準とした人の位置を取得する。そして、追跡を行うために、LRFを基準とした人の位置と点群を取得する。RGB-Dセンサを基準とした人の位置とLRFから得られる2次元点群を用いて、人の位置に最も近い2次元点群上の点を探索することで、人の位置を取得する。取得した人の位置の周辺にある2次元点群を人の点群として取得する。このとき複数の人が検出された場合、ロボットに一番近い人を追従対象者とする。さらに、追従対象者の方向と距離から、パン・チルト回転機構上のRGB-Dセンサをその方向に回転させる。

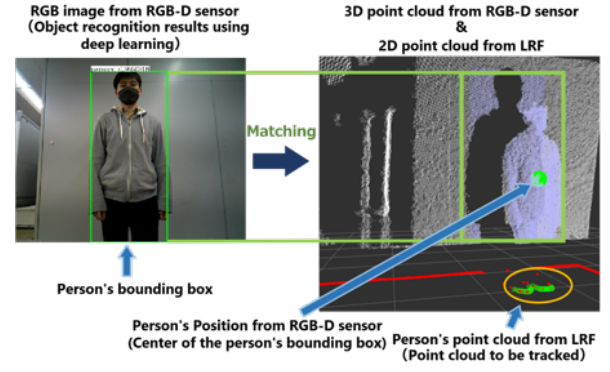


Fig.3: Person detection

2.1.2 追跡ステップ

追跡ステップではLRFを用いたパーティクルフィルタによる追跡と、RGB-Dセンサを用いた人認識を対応付けさせることで、追従対象者とした人の位置を更新する。パーティクルフィルタとは、追跡範囲内に配置した追跡対象の確からしさを重みに持つパーティクルの分布によって、位置を推定し、追跡を行う手法である。LRFを用いたパーティクルフィルタでは、追跡対象となるモデル点群 Q と時刻 t としたときのLRFにより観測した点群 Z_t とパーティクルの分布 P_t を用いて、追従対象者の位置の追跡を行う。モデル点群は、検出ステップから得た人の点群とする。LRFにより観測した点群 Z_t は、LRFからの点群に前処理としてノイズを除去し、クラスタリングによって大きな障害物が除去された点群とする。パーティクルの分布 P_t は、式(1)のように、任意の数 M 個のパーティクルで構成される。

$$P_t = (p_t^{[1]}, p_t^{[2]}, \dots, p_t^{[M]}) \quad (1)$$

1つのパーティクル $p_t^{[m]}$ は、2次元点群を追跡するため、式(2)のように、2次元の位置と姿勢の状態ベクトルで表される。

$$p_t^{[m]} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

そして、モデル点群 Q 、観測点群 Z_t 、パーティクルの分布 P_t を用いて、①リサンプリング、②予測、③重み付け、④状態推定の4つの処理を行う。これにより、現在の人の位置の状態ベクトル $r_t = (x, y, \theta)^T$ を推定することで追跡を行う。また、推定した位置から人の点群を取得し、モデル点群 Q を更新する。以下に①～④の各処理の詳細を述べる。

①リサンプリングは、追跡範囲にパーティクルを配置する工程である。初期状態では、検出ステップで取得した人の位置を中心に指定した平均値と分散をもつ正規分布を用いて一様に配置する。初期状態以降は、前の状態で推定した人の位置の状態ベクトル r_{t-1} を中心に一様に配置する。また、配置するパーティクルの数は、Kullback-Leibler divergence(KLD) サンプリング [6] により決まる。KLD サンプリングでは、パーティクルの分布が集中するほど、パーティクルの数が小さくなる。

②予測は、各パーティクルを状態方程式に基づいて移動させる工程である。パーティクルを移動させるための状態方程式は静止状態と移動状態の2つの方程式を用いる。これらの静止状態と移動状態の状態方程式をそれぞれ式(3)と式(4)に示す。移動前のパーティクルを $p_t^{[m]}$ とし、移動後のパーティクルを $\hat{p}_t^{[m]}$ とする。

$$\hat{p}_t^{[m]} = p_t^{[m]} \quad (3)$$

$$\hat{p}_t^{[m]} = p_t^{[m]} + (r_{t-1} - r_{t-2}) \quad (4)$$

各パーティクルは、指定した比率に基づいて、式(3)と式(4)のどちらかの式で移動させる。

③重み付けは、各パーティクルに重み $w_t^{[m]}$ を与える工程である。重み付けでは、以下の手順を各パーティクルで行う。まず、モデル点群 Q をパーティクル $\hat{p}_t^{[m]}$ の状態ベクトルに従って、配置させる。次に、配置したモデル点群 Q にある点 q_i を基準として、観測点群 Z_t の最近傍点 z_i を探索する。そして、 q_i と z_i の距離を用いて、尤度 l_i を計算する。式 (5) に尤度 l_i の計算式を示す。

$$l_i = \frac{1}{1 + |q_i - z_i|^2} \quad (5)$$

尤度計算をモデル点群 Q の全点に行い、全点の尤度の和がパーティクル $\hat{p}_t^{[m]}$ の重み $w_t^{[m]}$ となる。

④状態推定は、重み付けしたパーティクルから現在の人の位置の状態ベクトル r_t を推定する工程である。まず、全パーティクルの重みの和が 1 になるように正規化を行う。次に、正規化した重み $w_t^{[m]}$ とパーティクル $\hat{p}_t^{[m]}$ の状態ベクトルを用いて、現在の人の位置の状態ベクトル r_t を推定する。式 (6) に状態ベクトル r_t の計算式を示す。

$$r_t = \sum_{m=0}^M w_t^{[m]} \cdot \hat{p}_t^{[m]} \quad (6)$$

以上の①～④の処理を繰り返すことで、ロボットはパーティクルフィルタによる追跡が可能となる。パーティクルフィルタの追跡結果から、観測点群 Z_t のうち現在の人の位置の周辺にある点群を次の追跡対象となるモデル点群 Q として更新する。このとき、パーティクルフィルタの追跡結果が RGB-D センサの測域範囲内の場合、RGB-D センサを用いた人認識による補正を行う。追跡結果と人認識による人の位置との距離が、閾値以内ならば、人認識による人の位置を基準として、モデル点群 Q の更新を行う。閾値以上の場合、追跡失敗とする。

追跡ステップ中は、人認識による補正を広範囲で行うため、追跡対象者の方向と距離から、パン・チルト回転機構上の RGB-D センサをその方向に回転させる。また、予測位置に基づいた検出ステップを行うために、追跡対象者の移動量を求める。指数平滑法を用いて、追跡結果 r_t と時刻 $t-1$ の予測値 \hat{r}_{t-1} から、時刻 t の予測値 \hat{r}_t を計算する。式 (7) に時刻 t の予測値 \hat{r}_t の計算式を示す。ここで、 α は平滑化定数とする。

$$\hat{r}_t = \alpha \times r_t + (1 - \alpha) \times \hat{r}_{t-1} \quad (7)$$

そして、追跡対象者の移動量として、予測値 \hat{r}_t 、 \hat{r}_{t-1} から、移動距離と移動方向を求める。

2.1.3 予測位置に基づいた検出ステップ

予測位置に基づいた検出ステップでは、追跡ステップが失敗した場合に追跡対象者の再検出を行う。2.1.2 項の追跡ステップで求めた追跡対象者の移動量から失った追跡対象者の位置を予測し、予測位置に基づいた検出ステップを行う。図 4 に示すように、追跡ステップ失敗前の追跡対象者の位置から直前の追跡対象者の移動量だけ動かし予測位置とする。そして、2.1.1 項と同様の検出ステップを行い、予測位置を中心としてあらかじめ設定した検出範囲内で最も近い人を次の追跡対象者とする。これにより、見失った追跡対象者を再検出することが期待できる。このとき、設定した時間で人が検出されなかった場合は、検出ステップに戻る。また、予測位置に基づいた検出ステップ中は、予測位置の方向と距離から、パン・チルト回転機構上の RGB-D センサをその方向に回転させる。

2.2 走行制御 (Move Control)

図 2(c) に示すように走行制御では、DWA による障害物回避と PI 制御による方向転換を組み合わせることで、追跡対象者の位置にロボットを移動させる。DWA による障害物回避では、目的位置までの安全な経路を生成する。まず、ロボットの現在速度と加速度、速度制御範囲から、並進速度と回転速度で表される経路の予測

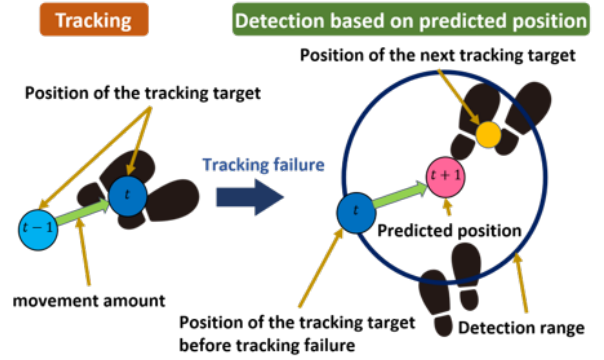


Fig.4: Detection based on predicted position

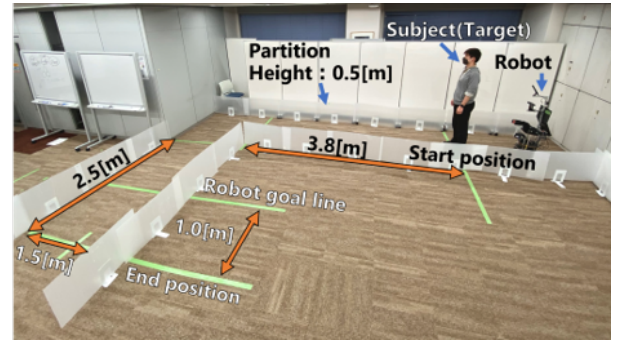


Fig.5: Experiment environment

を行う。次に目的位置、障害物位置、経路の速度を用いて、予測した経路を評価して最適経路を求める。目的位置は、2.1 節の人物追跡で得られた人の位置とする。障害物位置は、LRF から得られた点群に対して、人物追跡で得られた人の点群を除いた点群とする。また、障害物の指定した距離の周辺には、衝突する可能性がある領域としてコストを付与し、コストに重なる経路は評価しない。目的位置と障害物位置は、経路が生成されると更新される。

PI 制御による方向転換では、現在値と目的位置から目的位置までの回転速度 v_θ [rad/s] を求める。現在値 θ_t は、ロボットの方向とする。目的位置 θ_r は、人物追跡で得られた人の位置の方向とし、回転速度 v_θ が求められると更新される。そして、目的位置までの回転速度 v_θ を式 (8) により計算する。ここで、 K_p は比例定数、 K_i は積分定数とする。

$$v_\theta = K_p(\theta_t - \theta_r) + K_i \int (\theta_t - \theta_r) \quad (8)$$

走行制御では、追跡対象者とロボットの距離に対応して制御を切り替える。追跡対象者とロボットの距離が設定した距離より大きい場合は、DWA による障害物回避によりロボットが障害物を避けながら追跡対象者の位置にロボットを移動させる。追跡対象者とロボットの距離が設定した距離より小さい場合は、PI 制御による方向転換により追跡対象者の方向にロボットを回転させる。このとき、人物追跡で追跡ステップ以外の処理を行っている場合、ロボットを停止させる。

3 検証実験

3.1 実験概要

本実験の目的は、壁のある単純な環境において、開発した人追従走行ロボットシステムでの RGB-D センサのパン・チルト回転制御の有無による動作比較と、追従走行の動作を確認することである。実験環境は、幅 1.5[m] の L 字の廊下を想定し、高さ 0.5[m] のパーテーションを用いて、図 5 のような環境を構築した。以下の手順で実験を行う。まず、被験者は開始地点に立ち、その後ろにロボットを配置する。次に、被験者は開始地点から終了地点まで



(a) Person recognition results (b) System behavior

Fig.6: Without pan/tilt rotation



(a) Person recognition results (b) System behavior

Fig.7: With pan/tilt rotation

歩行し、ロボットが人追従走行を行う。そして、ロボットがゴールラインまで人追従走行が出来たかどうかを確認する。この手順をRGB-D センサのパン・チルト回転制御の有無でそれぞれ3回ずつ行う。被験者は10人とした。

3.2 実験結果と考察

実験の結果から、開発した人追従走行ロボットシステムにおいて、RGB-D センサのパン・チルト回転制御の有無による、それぞれの人追従走行について述べる。被験者10人の30回の試行のうち、ゴールラインまで人追従走行が成功した割合は、パン・チルト回転制御なしで10.0[%]、パン・チルト回転制御ありで80.0[%]となった。

パン・チルト回転制御なしでは、直線移動の追従走行は成功した。しかし、被験者が角を曲がる際に人物追跡の予測位置に基づいた検出ステップが失敗したため、ロボットが被験者を見失って停止した。これは、曲がり角で被験者がロボットに対して、横に移動したため、被験者がRGB-D センサの画角から外れたことが要因として挙げられる。2.1.3 項で述べた予測位置に基づいた検出ステップでは、RGB-D センサによる人認識で取得した人の位置と予測位置から追従対象者を再検出する。そのため、RGB-D センサの画角内に人を収める必要がある。曲がり角において、パン・チルト回転制御なしによる人追従走行の様子を図6に示す。曲がり角で被験者がロボットに対して、横に移動した際、図6(a)に示すようにRGB-D センサの画角内に人を収めることが出来なかった。そのため、図6(b)に示すように再検出が失敗し、ロボットが停止していることが分かる。

パン・チルト回転制御ありでは、被験者が角を曲がる際に予測位置に基づいた検出ステップが成功し、ロボットが被験者を見失わず、追従走行ができた。パン・チルト回転制御ありでの予測位置に基づいた検出ステップでは、ロボットが予測位置の方向にRGB-D センサを回転するため、予測位置の付近で人認識から人の位置を取得出来れば、再検出が可能となる。曲がり角において、パン・チルト回転制御ありによる人追従走行の様子を図7に示す。曲がり角で被験者がロボットに対して、横に移動した際、図7(a)に示すようにRGB-D センサの画角内に人を収めることが出来た。そのため、図7(b)に示すように被験者を再検出し、移動のための正し

い経路生成を行っていることが分かる。以上の考察から、パン・チルト回転制御をすることで人追従走行の成功確率が10.0[%]から80.0[%]に向上した。したがって、パン・チルト回転制御を含んだ本システムによる、曲がり角での走行においての有効性を確認できた。

被験者10人の30回の試行のうち、パン・チルト回転制御ありで人追従走行が失敗した20.0[%]の場合では、ロボットが壁に接近して停止した。このときの人物追跡は、単純な環境に1人の被験者のみがある状態で行ったため、正しく追跡が出来たが、走行制御は、DWAによる経路が生成されなかった。その要因として、経路生成では人物追跡で得た位置への経路が生成される。そのため、被験者が曲がり角を壁寄りに歩行すると、その位置に対して経路が生成され、ロボットが壁に接近する。そして、ロボットが障害物である壁のコストに入り、予測した全ての経路がコストと重なった。コストに重なる経路は評価されないため、最適経路を求めることが出来なかった。これにより、ロボットが途中で停止した。このことから、走行制御では、人の動きと障害物を考慮した制御により障害物への接近を防ぐ必要がある。

4 まとめ

本研究では、LRFとパン・チルト回転機構上のRGB-D センサによる人追従走行ロボットの開発を行った。人追従走行は、LRFとパン・チルト回転機構上のRGB-D センサを用いた人物追跡で人の位置を取得し、走行制御でロボットを移動させた。人物追跡は、画像による人認識とパーティクルフィルタによる2次元点群の追跡を組み合わせて行われた。さらに、RGB-D センサのパン・チルト回転機構により、追従対象者の方向にセンサを回転させることで、画像による人認識の広範囲化を可能にした。走行制御は、DWAによる障害物回避とPI制御による方向転換を組み合わせることで行われた。検証実験では、開発したロボットを用いて、本システムでは、パン・チルト回転制御が曲がり角での走行において有効であることを確認した。

今後は、人の動きと障害物を考慮した走行制御についての開発を進める。また、人物追跡の精度向上のために画像での人認識のみではなく、LRFから得られる2次元点群による人認識手法を組み合わせる。本実験では、有効性を検証するため、パーティションを用いた単純な環境で行った。そこで、家具や複数人が存在する複雑な環境での検証実験を行っていく。

参考文献

- [1] 株式会社 ZMP, “無人搬送・自動追従 (AGV) なら物流支援ロボット「CarriRo (キャリロ)」” (<https://www.zmp.co.jp/carriro> 参照 2020-12-10).
- [2] 栗井真志, 清水隆史, 山下淳, 金子透, 浅間一, “カメラ・LRF 搭載移動ロボットによる HOG 特徴量を利用した人物追跡と生成地図を用いた自律帰還”, 第24回自律分散システム・シンポジウム資料, pp.47-52, 2012.
- [3] 集美輝, 池田亮, 鹿島雅之, 佐藤則則, 渡邊睦, “人物の挙動認識に基づく自立移動型ロボット制御の研究”, 火の国情報シンポジウム2013 論文集, B-6-1, 2013.
- [4] Fox, D., Burgard, W. and Thrun, S., “The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance”, IEEE Robotics and Automation Magazine, vol.4, no.1, pp.23-33, 1997.
- [5] Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C., and Berg, A., “SSD: Single Shot MultiBox Detector”, European conference on computer vision, pp.21-37, 2016.
- [6] Fox, D., “KLD-sampling: Adaptive particle filters”, In Advances in Neural Information Processing Systems 14, pp.713-720, 2002.