

# 博士論文要旨

## 論文題名：SLAMにおけるキッドナッピングの検出 及びその復帰に関する研究

立命館大学大学院理工学研究科  
機械システム専攻博士課程後期課程

ティエン ヤン  
TIAN Yang

工場、病院、住宅などの様々な環境で移動ロボットが自律的に活動するための機能として自己位置推定が挙げられる。一般的な自己位置推定では、既知の環境マップ情報を用いて絶対座標系上でロボットの位置と姿勢を推定する。一方、このような自己位置推定が使えない未知の環境では、マップを随時構築しながらロボットの位置と姿勢を内界センサーや外界センサーによって収集し、それらのデータを基に自己位置を推定する技術“Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)”が報告されており、近年その技術が確立されつつある。しかし、SLAM技術によりロボットが自律的な動作を行っている間、何等かの要因によって別の場所に強制的に移動させられた場合、環境マップ内で正確な姿勢追従は困難となる。この問題はキッドナッピング(Kidnapping)と呼ばれており、これまでマップ内で絶対位置を直接推定して正しいロボットの位置や姿勢を取得する方法は提案されていたものの、未知の環境でキッドナッピングされたロボットには直接適用できないという課題が残されていた。

本研究では、まず未知の環境でロボットがキッドナッピングされた状況を二つに分類できることを明らかにした。一つ目はロボットがSLAMによって探索している間、探索領域内にキッドナッピングされた状況である。この状況では、既知の探索領域マップを利用した自己位置推定が解決策になり得る。二つ目はロボットがマップの無い新しい未知のエリアにキッドナッピングされた状況である。この状況では、新しいSLAMを実行する必要がある。しかし、ロボットがどちらの状況にあるかを確認する前に解決策を決定することはできない。そこで本研究では、SLAMにおけるキッドナッピング問題の解決方法として二つのアルゴリズム1) キッドナッピングの検出 (Kidnapping Detection) 及び2) キッドナッピングからの復帰 (Kidnapping Recovery) を提案した。

まず、キッドナッピング検出時に即座にキッドナッピングの種類を判別するため、Double Kidnapping Detection and Recognition (DKDR) と呼ばれる異なる測定基準を利用したキッドナッピング検出方法を提案した。この方法では、フィルタベースのSLAMの特性を利用してマッピングの結果を修正している。また、DKDRが既存のフィルタベースのSLAMアルゴリズムに簡単に適用できることを示すため、拡張カルマンフィルタに基づくSLAM (EKF-SLAM) とパーティクルフィルタに基づくSLAM (PF-SLAM) に適用し、シミュレーションと実験により有用性を検証した。さらに、広範囲の環境における誤認識を下げるために、

特徴位置とロボットの姿勢の確定性を組み合わせた Probabilistic Double Kidnapping Detection and Recognition (P-DKDR) と呼ばれるキッドナッピング検出方法を提案し、シミュレーションと実験によって、DKDR と P-DKDR の結果を比較した。

次に、キッドナッピング問題を解決するために二つのキッドナッピング復帰方法を提案した。車輪が空転したり滑ったりしてロボットが探索領域内でキッドナッピングされた場合、SLAM の生成マップの不確実性が考慮された Monte Carlo Localization (MCL) を適用し、ロボットの位置や姿勢を環境マップ内で再推定した。この手法では処理性能を上げるため、MCL 中の粒子の分散領域範囲を制限した。その他の状況においては、絶対座標系上で位置推定と SLAM を同時に実行し、統計学におけるエントロピーの概念を応用してロボットの姿勢を決定した。最後に実機実験によって提案した方法の有用性と性能を示した。

本論文では、キッドナッピングの検出方法とキッドナッピングからの復帰方法を提案し、実験によりその有用性を検証した。レーザーセンサーが正しく機能しないような反射率が不均一な環境やロボットが類似環境へ強制移動させられた時など特殊な状況を除き、提案手法がキッドナッピングを正確に検出し、復帰できることを明らかにした。

## Abstract of Doctoral Thesis

### **Title : Kidnapping Detection and its Recovery in Simultaneous Localization and Mapping**

Doctoral Program in Advanced Mechanical Engineering and Robotics  
Graduate School of Science and Engineering  
Ritsumeikan University

ティエン ヤン  
TIAN Yang

Mobile robots that autonomously execute tasks have been applied in various environments, such as factories, hospitals and houses. One of the basic fundamental functions required by the autonomous robot is localization. Localization is the solution to estimate the robot posture (position and orientation) in the world coordinates provided a known map of the environment. In an unknown environment, where both the robot posture and the environment map are unknown, a technique called "Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)" was proposed. Therein, a consistent map of the environment is built while simultaneously determining the robot posture within this map with data gathered by proprioceptive and exteroceptive sensors. While the mobile robot performs tasks autonomously, an unexpected movement, such as being moved to another place by a human, may happen due to the interaction with surroundings. This problem is known as "kidnapping" problem, which obstructs the robot to track its desired posture correctly within the environment map. Previous solutions of the kidnapping problem execute global localization within the map directly and periodically to obtain the correct robot posture. However, these solutions are not applicable to the robots kidnapped in an unknown environment due to unique situations of the kidnapping.

In this study, we found that there are two situations after kidnapping happened in an unknown environment. One situation is that the robot is kidnapped to the explored area during processing SLAM. In this situation, the map of the explored area is available to be utilized to perform global localization as a solution. Another situation is that the robot is kidnapped to a new area lacking an environment map. A new SLAM process should be carried out to realize localization in a new map. Since the solution cannot be determined before ascertaining under which situation the robot is, solutions about global localization cannot be directly applied. We thus propose two algorithms (kidnapping detection and kidnapping recovery) for the kidnapping solution in SLAM. Furthermore, the kidnapping categories are classified for increasing the efficiency of the solution.

A kidnapping detection framework, performing two checks before and after the update process which is called "Double Kidnapping Detection and Recognition (DKDR)" utilizes different metrics to detect the kidnapping and recognize the type of kidnapping in real time. To explain one of the principles of DKDR, we describe a property of filter-based SLAM that corrects the mapping result of the environment using the current observations after the update process. The Extend Kalman Filter SLAM (EKF-SLAM) and the Particle Filter SLAM (PF-SLAM) are modified in simulations and experiments to show that DKDR can be simply and widely applied in existing filter-based SLAM algorithms. Furthermore, an improved detection method called "Probabilistic Double Kidnapping Detection and Recognition (P-DKDR)" is proposed by combining probability of features' positions and the robot posture to reduce false alarms in a large-scale environment. Simulations and experiments were conducted for the comparison between DKDR and P-DKDR.

Based on the results from kidnapping detection, two kidnapping recovery methods are proposed to solve different types of kidnapping. If the robot is kidnapped to the explored area, such as being stuck or slip around a spot, an improved Mentor Carol Localization (MCL) method called "MCL with Map Uncertainty (MCL-MU)", which takes the map uncertainty produced by SLAM into the method, is applied to relocalize the robot posture within the environment map. Furthermore, the dispersive area of the particles in MCL is limited in a range to increase the efficiency of the method. In the situation that the robot is moved out of the sensor range, a method called "Known and Unknown Environment's Simultaneous Localization (KUESL)" is proposed to execute a global localization and a SLAM simultaneously to determine robot posture according to the probability of estimated results. Experiments were conducted to show their validity and performance.

With discussing the simulations and experiments results, we found that several failure cases exist due to the specification of sensors and specific environments, such as the reflection problem of laser range finder in different objects or the robot is kidnapped to a similar environment with the environment before the kidnapping. Besides these specific situations, the proposed kidnapping detection and kidnapping recovery methods can detect and recover the kidnapping events effectively.