

## クラウド環境を利用した移動ロボット遠隔ナビゲーション手法

A mobile robot navigation method using cloud computing environment

加藤 由花<sup>\*1</sup> 久保寺 史佳<sup>\*1</sup> 田中 麻美子<sup>\*1</sup>  
Yuka Kato Fumika Kubodera Mamiko Tanaka<sup>\*1</sup>東京女子大学

Tokyo Woman's Christian University

This paper studies the influence of network delay on mobile robot navigation using cloud computing environment. Here, we propose a delay-conscious control model that considers the difference between robot state in a real space and that on the cloud environment. In addition, we evaluate the influence of communication delay by conducting remote navigation experiment of a mobile robot with pseudo network delay inserted.

## 1. はじめに

近年、クラウドロボティクス [Kehoe 15] 等、ネットワークを利用したロボットサービスに関する研究が活発に行われている。ここでは、ネットワークの不確実さ・不安定性を前提としたサービス構築が不可欠であり、移動を伴うロボットでは特に、通信時間の遅れとその変動への対応が重要な研究課題となっている [Kato 16]。このような背景の下、本稿では、クラウド環境を利用した移動ロボット遠隔ナビゲーションのための、時間遅れ通信モデルを提案する。

時間遅れやその変動を伴う環境下での遠隔操作に関する研究は古くから行われており、時間遅れ一定という条件下で系の安定性を保証する散乱理論に基づく手法 [Anderson 89] や、これを時間遅れ変動環境下に拡張した手法などが提案されてきた [Yokokohji 00]。しかし、これら一連の研究は、不確実さの大きい実問題への適用は難しいことが指摘されており、クラウド環境での利用は困難であると考えられる。クラウドロボティクスに関する研究においては、観測を基にネットワークリソースのスケジューリングを行う手法 [Blumenthal 15] などが提案されているが、大部分の研究はクラウド環境への機能のオフローディングを考察したものである。

近年、ロボットの自律移動に関しては、不確実さを確率論の演算を用いて陽に表現する確率ロボティクスの考え方が主流である。本稿では、ロボティクスのための確率モデルをネットワークを包括した系にまで拡張し、「人間は通信遅延が存在する環境であっても慣れにより遅延に順応していく」という知見を通信モデルに取り込む。

## 2. 提案手法

本稿で想定する遠隔ナビゲーションシステムの構成を図1に示す。システムは、仮想空間（シミュレーションモデル）、実ロボット、サーバの3つの部分から構成される。遠隔操作におけるナビゲーションは、仮想空間を用いたオペレータの遠隔操作と、クラウド環境を用いた実ロボットの自律移動を、サーバ上でマッピングすることにより実現する。本稿ではこのうち、クラウド上で行われるロボットの位置推定について考える。

まず、実ロボットの状態を、時刻  $t$  におけるロボットの二次元座標  $(x_t, y_t)$  と姿勢  $\theta_t$  を用いて  $r_t = (x_t, y_t, \theta_t)^T$  と表し、実ロ

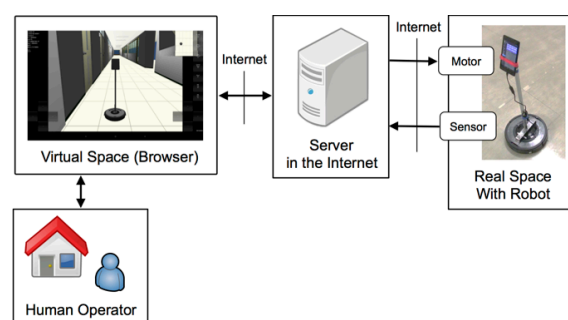


図1: 想定するシステムの構成

ボットの移動を、速度  $v_t$  と角速度  $\omega_t$  を用いて  $a_t = (v_t, \omega_t)^T$  と表す。実環境における制御の集合を  $a_{1:t} = \{a_1, \dots, a_t\}$ 、観測の集合を  $z_{1:t} = \{z_1, \dots, z_t\}$  とし、ランドマークの集合は地図  $m$  と表現する。確率分布として定義されるロボットの遷移モデルを  $p(r_t | r_{t-1}, a_t)$ 、状態が  $r_t$  のとき  $z_t$  が観測される確率である観測モデルを  $p(z_t | r_t, m)$  とする。

ここでは、移動命令  $a_t$  の結果として推定される状態  $r_t$  を、観測  $z_t$  により補正する。このとき、観測はサーバ上で行われるため、実際のランドマークの位置と観測時点での推定位置にずれが生じる。また、移動命令もサーバから送出されるため、送出時点と移動時点でのずれが生じる。本稿では、ping コマンド等を利用し、対象となるネットワークの遅延時間の平均値と分散をあらかじめ計測しておき、これを上記の遷移モデルと観測モデルに組み込むことでモデルを拡張する。

遷移モデルとしては、平均遅延時間に相当する、数ステップ前の移動命令から  $r_t$  を推定する。このとき、遅延時間は正規分布に従うと仮定し、各ステップごとの生起確率に応じた重み付き  $a_t$  の総和を  $A_t$  として利用する。  $t$  を連続時間と仮定すると、平均遅延時間を  $\mu$ 、分散を  $\sigma^2$  としたとき、

$$A_t = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot a_x dx \quad (1)$$

となる。観測モデルも同様に定義され、この条件の下で、 $A_{1:t}$ ,  $Z_{1:t}$ ,  $m$  から  $r_t$  を推定する。実ロボットの初期状態は既知であり、状態の更新は再帰的に行われると仮定する。このとき、状態  $r_t$  の確率分布は、ベイズ理論とマルコフ性の仮定を用いて以下で推定される。

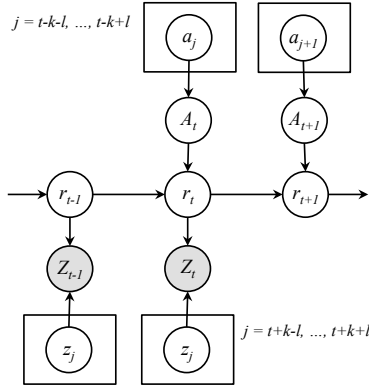


図 2: 構築したモデル

$$p(r_t|Z_{1:t}, A_{1:t}, m) = \alpha p(Z_t|r_t, m) \times \int p(r_t|r_{t-1}, A_t) p(r_{t-1}|Z_{1:t-1}, A_{1:t-1}, m) dr_{t-1} \quad (2)$$

実装時には時間を離散化する必要がある。ここでは、平均時間に相当するステップ数を  $k$ 、分散に相当するステップ数を  $l$  とし、 $r_t$  を  $\{a_{t-k-l}, a_{t-k-l+1}, \dots, a_{t-k}, \dots, a_{t-k+l}\}$  と  $\{z_{t+k-l}, \dots, z_{t+k+l}\}$  を用いて推定する。ここで、 $k = \lfloor \mu/\Delta t \rfloor$ 、 $l = \lfloor 2\sigma/\Delta t \rfloor$  である。グラフィカルモデルを図 2 に示す。

### 3. 実験

クラウド環境でのネットワーク遅延の影響を調査するために、簡易型ロボットを用いた遠隔ナビゲーション実験を行った。実験には、無線 LAN (同一セグメント) に接続された PC と簡易型ロボット (TurtleBot2) を用いた。ロボットは、外部からの移動命令に従い実験環境内を移動し、環境内での観測結果をセンサー情報 (Kinect の深度センサーより距離データを取得) として出力する。PC はサーバを模擬し、ナビゲーション機能 (ROS パッケージを利用) が実装され、可視化ツール rzi を用いてロボットの持つ地図情報と受信したセンサー情報を表示する。クラウド環境は、Linux の tc コマンドを利用し、PC とロボットの無線 LAN インタフェースからの出力パケットに遅延を挿入することで模擬する。遅延は、平均値と分散を指定した正規分布として与える。

実験ではまず、外部コマンドにより TurtleBot2 を環境内で移動させ地図を作成する。実験環境となる部屋と作成した地図を図 3 に示す。次に、可視化ツールを利用し、ナビゲーションのゴールを指定することによりロボットを移動させる。このとき、移動が完了した時点でのロボットの自己位置は、環境地図とセンサー情報から推定できる。この位置情報と、可視化ツール上で指定したゴールの位置情報を比較することで制御のずれを



図 3: 実験環境となる部屋 (左) と作成した地図 (右)

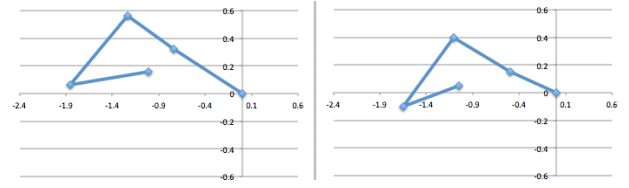


図 4:  $\mu = 0$  の移動軌跡 (左: 実座標, 右: 指定した座標)

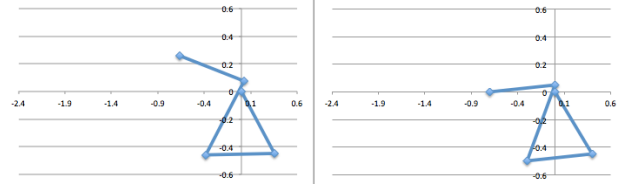


図 5:  $\mu = 100$  の移動軌跡 (左: 実座標, 右: 指定した座標)

測定する。この測定を 5 回行い、 $\mu = 0$  ms のときと  $\mu = 100$  ms のときの、ロボットの移動軌跡を比較した。

結果を図 4, 図 5 に示す。移動距離のずれには大きな差は無いが、移動軌跡の形に影響が出ていることがわかる。300 ms の遅延を挿入した場合はロボットの操作ができなくなった。以上より、遅延の影響により適切なナビゲーションが行えない可能性があることが推察される。

### 4. まとめ

クラウド環境を利用した移動ロボット遠隔ナビゲーション手法として、ネットワーク遅延を組み込んだ制御モデルを提案した。また、実機を用いた実験により、遠隔操作におけるネットワーク遅延の影響を示した。今後、提案モデルを組み込んだ評価実験、およびモデルの高度化を行う予定である。

### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 15K00137, 26330299 の助成を受けたものである。

### 参考文献

- [Anderson 89] Anderson, R. J. and Spong, M. W.: Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay, *IEEE Trans. on Automation Control*, Vol. 34, No. 5, pp. 494–501 (1989)
- [Blumenthal 15] Blumenthal, S., Hochgeschwender, N., Prassler, E., Voos, H., and Bruyninckx, H.: An Approach for a Distributed World Model with QoS-based Perception Algorithm Adaptation, in *Proc. IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2015)*, pp. 1806–1811 (2015)
- [Kato 16] Kato, Y. and Tanaka, M.: Performance Evaluation of Remote Navigation with Network Delay for Low-cost Mobile Robots, in *Proc. IEEE Intl. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI 2016)*, pp. 591–596 (2016)
- [Kehoe 15] Kehoe, B., et al.: A Survey of Research on Cloud Robotics and Automation, *IEEE Trans. on Automation Science and Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 398–409 (2015)
- [Yokokohji 00] Yokokohji, Y., et al.: Bilateral Control with Energy Balance Monitoring Under Time-Varying Communication Delay, in *Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2000)*, pp. 2684–2689 (2000)