

確率時間オートマトンを用いた自律移動ロボットの 振舞いのモデル化

小林佳正^{†1} 岡野浩三^{†2} 関澤俊弦^{†1}

概要: 近年、自律移動システムの開発が進んでいる。自律移動システムを搭載したロボットは物理環境下で動作する際、位置に誤差が生じる。ロボットは誤差検出及び誤差補正を行なっても座標には誤差が生じ、到達座標は確率的な分布をとる。このような確率的に振舞う系の信頼性を保証する研究は十分とは言えない。本研究では、離散的な状態で誤差検出及び補正を行なう系を具体的な対象とし、モデル検査による検証に向けて、ロボットの振舞いをモデル化する。既存研究では、ロボットの確率的な振舞いをマルコフ決定過程でモデル化し、確率モデル検査を用いて検証を行なっている。しかし、この検証では移動時間などの時間的な振舞いを考慮に入れた検証はなされていない。本研究では、より現実的なロボットの振舞いを対象とするため、確率的性質及び時間的性質を考慮に入れた振舞いのモデル化を行なう。ロボットの振舞いを確率的性質と時間的性質に分類し、それぞれの性質を併せ持つ要素を考えることで、確率的性質及び時間的性質を考慮に入れたロボットの振舞いを確率時間オートマトンで表現する。また、確率時間オートマトンで表現することにより、確率的性質及び時間的性質を考慮に入れた振舞いがモデル検査の検証対象となり得ることを示す。

キーワード: 自律移動システム, モデル検査, 確率時間オートマトン

Modeling of an autonomous mobile robot using probabilistic timed automaton

YOSHIMASA KOBAYASHI^{†1} KOZO OKANO^{†2}
TOSHIFUSA SEKIZAWA^{†1}

Abstract: In recent years, development of autonomous mobile system has been developed. Errors occur when a robot equipped with autonomous mobile system is operated under physical environment. Therefore, coordinates of the robot take probabilistic distribution even if the robot performs error detection and correction. Verification of reliability of such probabilistic systems are not yet sufficient. In this study towards model checking, we construct a model representing behaviors of an autonomous robot which performs error detection and correction in discrete states. In our previous study, probabilistic behaviors of a robot are modeled using Markov decision processes, and are verified by probabilistic model checker. However, the verification does not consider time related properties such as movement time. In this study, we construct a model in consideration of probabilistic and time related properties, for handling more realistic robot behaviors. For that purpose, robot behaviors are classified into probabilistic property and time related property. Then, a model expressed in probabilistic timed automaton is constructed in which both of these properties are considered. We also describe that robot behaviors consisting of probabilistic and time related properties can be verification target using model checking.

Keywords: Autonomous mobile system, Model checking, Probabilistic Timed Automaton

1. はじめに

近年、自動運転車等に組込まれている自律移動システムの開発が盛んである。しかし、物理環境下で動作する自律移動システムは、外乱等の影響により位置に誤差が生じてしまうため、誤差補正せずに継続的な動作を行なった場合、その位置は不確実性を増していく。このような不確実性は、自律移動システムの開発に際してリスク要因となり得る。したがって、自律移動システムの信頼性保証が必要であると考えられる。本研究では、自律移動システムの検証に向

けて、外部と通信せずに移動動作を行なう自律移動ロボットを対象とする。ロボットは、定められた経路計画のもと、センサを用いて自身の位置を計測し、生じた誤差を検出及び補正することにより、目的地に向かう。しかし、誤差の補正移動の際にも位置に揺らぎが生じ、ロボットの振舞いは確率的となる。このような確率的な動作を行なう系の信頼性を保証する研究はこれまでも取り組まれてきているが、十分になされているとは言いがたい。本研究では、離散的に誤差検出及び補正を行なう系が、モデル検査[1]の検証対象となり得ることを示すため、対象系のモデル化を行なう。モデル化では、確率的性質及び時間的性質を考慮に入れる。モデル化に際して、先行研究で提案されている確率的性質のモデル化[2]に加え、時間的性質のみに着目した

^{†1} 日本大学
Nihon University.
^{†2} 信州大学
Shinshu University

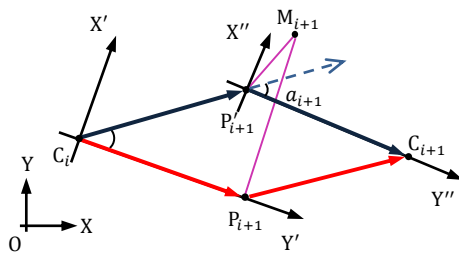


図1 ロボットの誤差検知と補正の振舞い
 Figure 1 Behavior of error detection and correction

モデル化を示す。次に両性質を併せ持つロボットの振舞いを確率時間オートマトン[3]でモデル化する。

本報告では、2章で対象系である自律移動ロボットの誤差の検出及び誤差補正手法を示し、3章では、本研究で用いる状態遷移系を示す。続く4章では、ロボットの振舞いのモデル化について述べる。5章でモデル検査の適用可能性とより現実的な振舞いのモデル化について議論し、6章でまとめる。

2. 自律移動ロボットの振舞い

本章では、検証対象となる自律移動ロボットの振舞い[4]について述べる。本研究では、XY座標平面を自律走行する車をロボットとして扱う。ロボットはスタート地点から経路を辿り目的地へ移動することを目的とする。経路には、通過点が設けられており、ロボットは通過点を継続的に通り続けることにより目的地へ向かう。しかし、ロボットは、外乱等の影響を受け移動距離や向きに誤差が生じる。誤差を含む動作を継続した場合、ロボットの位置は不確実性を増していくため、目的地に一定の誤差で到達するためには誤差を適宜補正する必要がある。本研究で考慮に入れる誤差は、移動距離と角度のみである。すなわち、ロボットのセンサ等の誤差は考慮に入れていないため、ロボットの次の動作は必ず行なわれるものとする。

ロボットは、スタート地点、目印、通過点、観測点及び目的地が地図情報として与えられているものとする。図1にロボットの補正移動の振舞いを示す。ここで、 M_{i+1} は目印、 C_i は通過点、 P_{i+1} は観測点、 P'_{i+1} は誤差により実際に到達した点である。ロボットは、通過点 C_i から観測地点 P_{i+1} を目指して移動を行なう。ロボットはセンサを用いて目印 M_{i+1} を検知し、実際に到達した点 P'_{i+1} を計測することにより、観測点 P_{i+1} との誤差を求める。次に、補正角度 $\alpha_{i+1} = \pi - \angle C_{i+1}P'_{i+1}C_i$ を求め、角度を補正する。観測点から通過点を向かう際にも誤差が生じるため、通過点 C_{i+1} を次の観測点 P_{i+2} とする。これにより、継続的な誤差補正及び補正移動を行ない、通過点近傍を通り続けることができる。

3. 準備

本章では、自律移動ロボットの振舞いのモデル化の準備

として、3.1節では、モデル検査の概要とモデル検査の検証手続きについて述べる。また、3.2節から本研究で用いる状態遷移系の概要を述べる。3.2節では確率オートマトン、3.3節では時間オートマトン、3.4節では確率時間オートマトンを述べる。

3.1 モデル検査

モデル検査[1]は、検証対象を表すモデル M と検証したい性質 φ が与えられたとき、 φ が M で成り立つか網羅的に検査する手法である。モデル検査の検証手続きは、モデル化、モデル検査の実行、及び、結果の解析に分けられる。モデル化とは、検証対象をモデル検査の入力となる状態遷移系によって記述することを意味する。検査式は、検証したい性質を論理式で表したものである。検証対象に関する検査項目の例として、安全性や活性がある。モデル検査の実行では、状態遷移系上で要求される性質が成り立つかどうかモデル検査器を用いて検証する。モデル検査器には様々な種類があり、確率的な振舞いや時間的な振舞いを示すモデルを検証する代表的なモデル検査器として、それぞれPRISM[5]やUPPAAL[6]が知られている。結果の解析では、状態遷移系上で検査項目が成り立つ場合は検証終了となる。一方、検査式が成り立たない場合、成り立たない証拠である反例を出力する機能を備えているモデル検査器も多い。

本研究では、自律移動システムの検証のため、自律移動ロボットの振舞いを検証対象とし、モデル検査で検証することを目指す。本研究の位置付けは、モデル検査の検証手続きのモデル化に相当する。

3.2 確率オートマトン

モデル検査で確率的な振舞いを検証対象とする場合、確率オートマトンで表現する方法が挙げられる。代表的な確率オートマトン[7]として、離散時間マルコフ連鎖 (Discrete Time Markov Chain: DTMC)、マルコフ決定過程 (Markov Decision Process: MDP)、連続時間マルコフ連鎖 (Continuous Time Markov Chain: CTMC) がある。マルコフ決定過程 MDP[3] M_M は4つ組 (S, s_0, Act, T) である。ここで、 S は状態の有限集合、 $s_0 \in S$ は初期状態、 Act はアクション集合、 $T: S \rightarrow 2^{Act \times Dist(S)}$ は遷移確率関数である。状態の遷移先はアクションと確率によって定まり、 $Dist(S)$ は状態集合 S 上の確率分布の集合である。確率分布は関数 $\mu: S \rightarrow [0,1]$ によって割り当てられ、 $\sum_{s \in S} \mu(s) = 1$ である。また、MDPはマルコフ性を満たすため、次の状態は現在の状態のみに依存し、過去の状態から独立である。

3.3 時間オートマトン

時間オートマトン (Timed Automaton: TA) [7]は、離散的なイベントと連続的な時間経過で記述されるオートマトンである。実時間システムを表現するモデルとして、動作タイミングの正しさを検証する際になどに用いられる。

時間オートマトンの時間領域 T は、非負の実数または自然数である。ここで、クロック変数の有限集合を C とする。

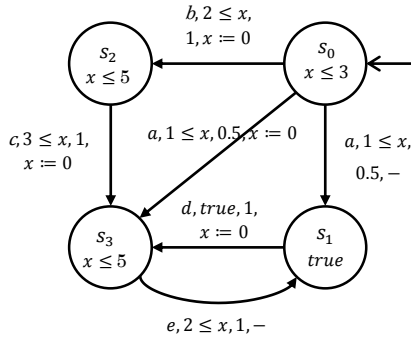


図 2 確率時間オートマトンの例

Figure 2 Example of probabilistic timed automaton

クロック変数 $x \in C$ は時間領域 \mathbb{T} から値を得る. 集合 C の要素であるクロック変数の初期値はすべて 0 である. 集合 C 上のクロック制約 ζ は以下の文法で記述される.

$$\zeta ::= x \sim c \mid x - y \sim c \mid \zeta \wedge \zeta \mid true$$

ここで, $c \in \mathbb{N}, x, y \in C$ であり, $\sim \in \{<, >, \leq, \geq\}$ である. 集合 C 上のクロック制約 ζ の集合を $CC(C)$ とする.

関数 $v : C \rightarrow \mathbb{T}$ はクロック評価であり, クロック変数の現在値を評価する. すべてのクロック評価の集合は $\mathbb{T}^{|C|}$ である. 時間経過は $v+t$ ($v \in \mathbb{T}^{|C|}, t \in \mathbb{T}$) と表す. $v[X := 0]$ は, $X \subseteq C$ にあるクロック変数を 0 にリセットすることを示す.

時間オートマトン M_T は 6 つ組 $(Loc, l_0, Act, C, E, Inv)$ である. ここで, Loc はロケーションの有限集合, $l_0 \in Loc$ は初期ロケーション, Act はアクション集合, C はクロック変数の有限集合, $E \subseteq Loc \times Act \times CC(C) \times 2^C \times Loc$ は遷移関係の集合, Inv は状態にロケーション不変条件を割り当てる関数である. TA の遷移は, 時間遷移と離散遷移が存在する. 時間遷移は, ロケーションが変動せず, 時間のみが経過する遷移である. 離散遷移は, 次の遷移先のロケーション不変条件を満たし, かつ, 遷移に付加されているガード条件 $g \in CC(C)$ を満たすとき, アクションが実行されると指定したクロックをすべて 0 にリセットする遷移である. 離散遷移は, 時間経過せずに次のロケーションに遷移する.

3.4 確率時間オートマトン

確率時間オートマトン (Probabilistic Timed Automaton: PTA) は, 離散的で確率的なイベントと時間的な挙動が相互に影響し合う動作を表現するオートマトンである. 確率を表現する確率分布と実時間を表現するクロック変数を用いて, 確率的性質と時間的性質を持つ振舞いを表現することができる.

確率時間オートマトン M_P は 6 つ組 $(Loc, l_0, \Sigma, C, prob, Inv)$ である. ここで, Loc はロケーションの有限集合, $l_0 \in Loc$ は初期ロケーション, Σ はイベント集合, C はクロック変数の有限集合, $prob \subseteq Loc \times CC(C) \times \Sigma \times Dist(2^C \times Loc)$ は確率エッジ関係の有限集合, Inv は状態にロケーション不変条件を割り当てる関数である. 図 2 に, PTA の例を示す. 図 2 においてロケーションは $s_i (0 \leq i \leq 3, i \in \mathbb{N})$ であり, 初期

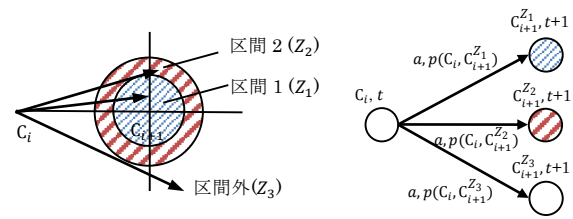


図 3 区間分割と確率遷移関数

Figure 3 Region partitioning and probabilistic transition function

ロケーションは s_0 である. ロケーション不変条件は, ロケーションの下にクロック制約 ζ で記述する. 例えば, ロケーション s_0 のロケーション不変条件は, クロック変数 x を用いて $x \leq 3$ で指定されている. ロケーション間の遷移には, アクション, ガード条件, 遷移確率, リセットを記述する. 例えば, ロケーション s_0 と s_1 間の遷移では, アクションは a , ガード条件は $1 \leq x$, 遷移確率は 0.5 であり, クロックのリセットは指定されていない.

4. 確率的性質および時間的性質を考慮に入れたロボットの振舞いのモデル化

本章では, 確率的性質及び時間的性質を考慮に入れたロボットの振舞いのモデル化を行なう. 論文[2]では, ロボットの確率的な振舞いを MDP で表現し, 到達可能性などを検証している. しかし, MDP は動作時間などの時間的性質を考慮に入れた振舞いは表現できないため, この検証で考慮されている時間的性質は離散時間のみである. 現実的なロボットの振舞いを考えたとき, 移動時間などの連続時間を考慮に入れた検証は重要と考えられる. この問題に対して, ロボットの振舞いを TA で記述することにより, 時間的性質を考慮に入れたモデルを記述する. 次に, 確率的性質及び時間的性質の双方を考慮に入れた振舞いを PTA で記述する. 本章では, 4.1 節で論文[2]で報告されているロボットの確率的な振舞いのモデル化を述べる. 4.2 節では時間的性質を考慮に入れたロボットの振舞いを TA で表現し, 続く 4.3 節では, 確率的性質及び時間的性質を考慮に入れたロボットの振舞いを PTA で表現する.

4.1 ロボットの確率的な振舞いのモデル化

本節では, 確率的なロボットの振舞いを MDP で表現した先行研究[2]を述べる. この論文では, 自律移動ロボットが動作する際に誤差が生じ, ロボットの座標には揺らぎが生じる系が扱われている. 確率的な動作を含む系ではロボットの座標は一点に定まらないため, 取り得る座標を状態とした場合, 状態数が無限となり MDP では表現できない. この問題に対して, ロボットが到達する座標を区間として区切り, これらの区間を状態とすることにより状態数を有限とする区間分割の手法が用いられている. 例えば, 各通過点に対して区間を 3 つ設けた場合, ロボットは通過点 C_i

より、通過点 C_{i+1} で設けた区間 1 (Z_1), 区間 2 (Z_2), 区間外 3 (Z_3) のいずれかに確率的に移動する. 図 3 に区間分割と確率遷移関数の関係を示す. ロボットの現在位置を通過点 C_i とする. 通過点 C_i でアクション a によりロボットは移動動作を行なう. ロボットは移動により位置に揺らぎが生じるため, 次の区間 C_{i+1} へ確率的に遷移する. 次の通過点に対して区間を 3 つ設けた場合, 初期状態から 3 つの区間へ遷移する確率はそれぞれ $p(C_i, C_{i+1}^{Z_1})$, $p(C_i, C_{i+1}^{Z_2})$, $p(C_i, C_{i+1}^{Z_3})$ となる.

論文[2]では単一のアクションのみが考慮されていることからアクションが記されていないため, ここでアクションを設定する. MDP の遷移は, 遷移確率関数 T で与えられることから, ロボットの移動と Act の関係を考える. ロボットの移動は, ロボットに対して制御信号が出力されることにより行われる. MDP における遷移は移動に対応することから, 移動に関する制御信号の集合を Act とする. MDP の定義とロボットの振舞いの関係を以下に示す. ここで, S は各区間の有限集合, s_0 はロボットの初期区間, $Act = \{a : \text{移動アクション}\}$ は移動に関する制御信号, T は遷移確率関数である.

4.2 ロボットの時間的な振舞いのモデル化

本節では, ロボットの時間的な性質を考慮した振舞いを TA で表現する. はじめに, 通過点 C_i から次の通過点 C_{i+1} へ移動するために行なう動作に着目することによりロケーションを考える. ロボットが次の通過点へ向かう際に行なう動作は, 移動, 検知, 補正である. また, これらの動作のために計算が行われている状態を停止動作とする. よって, ロボットが行なう動作は停止, 移動, 検知, 及び, 補正の 4 つである. ここでは, 各動作状態をロケーションとする. 次に TA の離散遷移について考える. ロボットは制御信号で動作すると捉え, それぞれの動作に関連する制御信号をアクションとして表現できる. ここで, 停止を除く動作は, 開始と完了に分けて考える. よって, $Act = \{a_s : \text{移動開始}, a_e : \text{移動完了}, b_s : \text{検知開始}, b_e : \text{検知完了}, c_s : \text{補正開始}, c_e : \text{補正完了}\}$ とする. クロック変数の集合 C , 遷移関係の集合 E , ロケーション不変条件 Inv は, 各動作の最長実行時間と最短処理時間を定めることで表現できる.

ここで, ロボットの振舞いから, TA の各要素を具体的に考える. ロケーションはロボットの動作に割り当てており, 動作は移動, 検知, 補正, 停止の 4 つであることからそれぞれの動作をロケーションとする. 移動, 検知, 及び, 補正の各動作の間に, ロボットは次の動作を処理するために停止する. この振舞いから, 移動, 検知, 及び, 補正の各ロケーションは停止ロケーションからそれぞれの動作を表すロケーションへの遷移とする. 次に, ロケーション不変条件, ガード条件, 及び, リセットを定める. ここで, ロボットは 1 つのクロック x を持つとする. ロケーション不変条件は, ロケーションが表す各動作に要する時間を満た

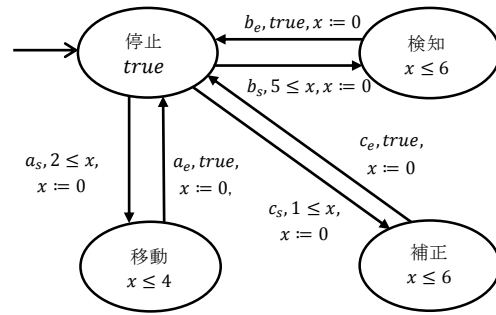


図 4 TA を用いた時間的な振舞いのモデル

Figure 4 TA model representing time related behaviors

す必要があることから, 各動作の最長実行時間とする. すなわち, 任意の動作 $act \in Act$ に対して, act の最長実行時間を $tmax(act)$ とすると, ロケーション不変条件は $x \leq tmax(act)$ と表現できる. ここで, 停止ロケーションを基準としてガード条件を考える. 停止ロケーションは次の動作に至るまでの処理時間を表しているが, 処理に要する時間は次の動作に依存する. この振舞いを表現するために, 停止ロケーションから各動作ロケーションまでの遷移に処理時間をガード条件として付加する. すなわち, ガード条件は停止ロケーションで次の動作を実行するための最短処理時間に相当する. 次に, リセットを定める. ロボットの動作が変化するとき, 各動作に要する時間を表すためにクロックをリセットする必要がある. したがって, 各遷移においてクロック x のリセットを行なう.

ロボットの振舞いとの関係を示すために, 図 4 に TA の例を示す. 図 4 において, 初期ロケーションは, 停止ロケーションである. 停止ロケーションで, 2 単位時間以上経過してアクション a_s が実行されたとき, クロック変数 x をリセットし, 移動ロケーションに遷移する. これは, 停止状態から移動動作を行なうための処理に 2 単位時間以上要することを表している. 移動ロケーションは, 4 単位時間以内に, アクション a_e により, 停止に遷移する. 次に, ロボットは目印を検知する動作を実行したとする. この振舞いは, 停止ロケーションから 5 単位時間以上経過後, アクション b_s の実行により, 検知ロケーションへ遷移する. 提案手法による TA の構成では, 通過点 C_i から次の通過点 C_{i+1} へ移動するために行われるロボットの動作に着目し, ロボットの時間的な振舞いを表現した. 2 章で述べた通り, ロボットは動作を順次実行する. しかし, 図 4 に示した TA では動作の実行順序は定められない点に注意が必要である. ロボットの動作順序を表現する場合, 停止以外の動作毎に停止ロケーションを用意する方法が考えられる. また TA モデルでは, ロボットの動作のみに着目しているため, 確率的な位置の揺らぎを表現できない.

4.3 ロボットの確率的・時間的な振舞いのモデル化

これまでのモデル化では, 振舞いの確率的性質と時間的

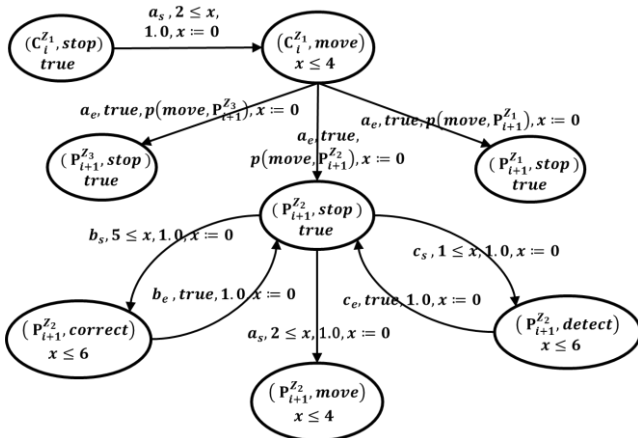


図 5 PTA を用いた確率的・時間的な振舞いのモデル
 Figure 5 PTA model representing probabilistic and time related behaviors

性質に分割し、それぞれ MDP と TA で表現している。本節では、PTA による確率的性質及び時間的性質を考慮に入れたロボットの振舞いのモデル化について述べ、ロボットの振舞いが PTA で表現可能であることを示す。

PTA のロケーションを考える際、確率的性質と時間的性質を併せ持つロケーションを考える必要がある。MDP モデルでは、通過点からの距離に応じて区間を設け、区間を状態とした。直感的に MDP モデルの状態は、時間的性質を考慮に入れていないロケーションと考えられる。一方、TA モデルではロボットの動作に着目し、停止、移動、検知、及び、補正のそれぞれの動作をロケーションとした。そこで、PTA における確率的性質と時間的性質を併せ持つロケーションとして、ロボットの停止動作に着目する。停止動作はロボットの停止している位置と関連付けられる。ロボットの位置は区間に分割されているため、区間と動作の組を PTA のロケーションとする。また、ロボットはスタート地点から動作を行なうため、スタート地点を表す区間とロボットの初期動作の組を初期ロケーションとする。

PTA のイベントは、MDP のアクションと TA のアクションを用いて表現する。MDP の Act は、移動アクションのみである。TA モデルの Act は、移動開始、移動完了、検知開始、検知完了、補正開始、及び、補正完了である。MDP の移動アクションは、TA の移動開始アクションに対応しているため、PTA のイベントを、移動開始、移動完了、検知開始、検知完了、補正開始、及び、補正完了とする。

PTA の確率エッジ関係では、確率的性質を確率分布で表現し、時間的性質をクロック制約の集合で表現する。ロボットは移動動作において到達する区間は確率的な分布をとるため、移動ロケーションから停止ロケーションへ遷移する際、各区間の確率分布で規定された確率を遷移確率とする。対象系では動作は必ず行われるとされていることから、停止ロケーションから各動作のロケーションへ遷移する際

の確率はすべて 1.0 とする。また、ロボットの検知動作、補正動作は、動作が完了すると次の動作処理のため必ず停止動作を行なう。よって、検知ロケーション、補正ロケーションから停止ロケーションへ遷移する確率は 1.0 とする。確率エッジ関係のクロック制約の集合は、直感的に遷移に付加されるガード条件を表している。TA モデルで示した通り、停止動作に伴うロボットの時間的な振舞いに対応するガード条件は、最短処理時間である。停止から各動作への最短処理時間を用いることで、確率エッジ関係のクロック制約の集合が表現できる。次に、PTA のロケーション不変条件を定める。TA モデルでは、ロボットの動作の最長実行時間をロケーション不変条件で表現した。PTA のロケーションでは、位置と停止動作を関連付けているため、各動作の最長実行時間を各ロケーションのロケーション不変条件とする。

上記の提案手法により、PTA の定義とロボットの振舞いを PTA で以下に示すように表現できる。ここで、 Loc は区間と動作の組の有限集合である。ロケーションを表現するため、PTA の定義に区間の有限集合 $point = \{C_i^z, P_i^z \mid i, j \in \mathbb{N}\}$ 、動作の有限集合 $motion = \{stop, move, detect, correct\}$ 、ロケーション評価関数 $eval : point \times motion \rightarrow Loc$ を加える。スタート地点と初期動作の組は、初期ロケーションである。 $\Sigma = \{a_s : \text{移動開始}, a_e : \text{移動完了}, b_s : \text{検知開始}, b_e : \text{検知完了}, c_s : \text{補正開始}, c_e : \text{補正完了}\}$ は各動作の開始、完了アクション、 C はクロック変数の有限集合、 $prob$ は確率エッジ関係の有限集合、 Inv はロケーション不変条件である。

図 5 にロボットの振舞いを表現した PTA の例を示す。ロケーションは、通過点または観測点の区間と $motion$ の要素の組で表現する。ロケーションは、区間から行なわれた動作を表す。例えば、 $(C_{i+1}^{z1}, stop)$ は、区間 C_{i+1}^{z1} で停止動作が行なわれている状態を表し、 $(C_{i+1}^{z2}, move)$ は、区間 C_{i+1}^{z2} から移動動作が行なわれている状態を表す。ロボットの現在のロケーションを $(C_i^{z1}, stop)$ とする。ロボットは、 $(C_i^{z1}, stop)$ で、2 単位時間以上経過し、アクション a_s が実行されたとき、区間 C_i^{z1} から行なわれる移動動作を表す $(C_i^{z1}, move)$ に遷移する。 $(C_i^{z1}, move)$ で、アクション a_e により、停止動作を行なうが、ロボットは移動により位置に揺らぎが生じるため、 $(P_{i+1}^{z1}, stop)$ 、 $(P_{i+1}^{z2}, stop)$ 、 $(P_{i+1}^{z3}, stop)$ のいずれかに確率的に遷移する。

本提案手法による PTA モデルでは、TA モデルと同様、動作の実行順序は定められないが、図 5 に示したモデルを拡張することによりモデル化可能である。

5. 議論

本研究では、ロボットの振舞いを確率的な振舞いと時間的振舞いに分けて考え、それぞれの性質を併せ持つ要素を考えることで確率的性質及び時間的性質を考慮に入れた

ロボットの振舞いが PTA で表現可能であることを示した。しかし、現実のロボットの振舞いの PTA モデルを構築するためには、移動に伴う確率分布や時間的制約の値が必要となる。今後は、対象系のロボットを実装し、実測データを得ることにより、確率分布やガード条件、ロケーション不変条件を求め、PTA で記述することが考えられる。また、モータ等の仕様から誤差が求められる場合、仕様から値を定めることも考えられる。

モデル検査は、検証対象を表す状態遷移系と仕様を表す検証式を入力として検証を行なう。PTA は状態遷移系のひとつであるため、確率的性質及び時間的性質を考慮に入れたロボットの振舞いはモデル検査の検証対象となり得る。ここで、検証項目について考察する。検証項目の例としては、対象系では通過点近傍を辿り目的地に到達することが期待される。また、実際に動作するロボットの仕様から動作に関する検査項目を抽出することも考えられる。確率的性質及び時間的性質を持つ仕様を表現できる論理として PTCTL (Probabilistic Timed Computation Tree Logic) [3]が挙げられる。

モデル検査器としては、PTA に対応している確率モデル検査器 PRISM が候補として考えられる。PRISM は積極的に開発が続けられているモデル検査器であるため、一定の性質は検証可能であると考えられる。しかし、PTA は扱う必要がある変数が多いため状態爆発問題が発生する可能性がある。この問題に対しては、PTA の確率的性質や時間的性質を分割し、PTA の確率的性質に対応した MDP、または時間的性質に対応した TA をそれぞれ記述することにより PRISM、または UPPAAL で検証する方法が考えられる。PRISM では、ステップ毎にロボットの現在地点から次の区間到達する確率などを検証し、UPPAAL では、動作が仕様によって定めた時間的性質を満たすかどうかについて検証する。

現実のロボットでは、角度や速度は時間の関数であり、ロボットの軌道は運動方程式などによって記述される。本研究の提案手法である PTA によるモデル化では、離散的な振舞いと連続時間を表現可能であるが、時間に対して変化する振舞いは表現することができない。このような離散系と連続系が混在するハイブリッドシステム[8]の検証に関する研究は積極的に取り組まれており、振舞いを表現できる状態遷移系としてハイブリッドオートマトンが知られている[9]。文献[10]は、ハイブリッドシステムとしてロボットを捉えたときの解析手法などについて言及しているため、検証項目の検討に有益と考えられる。

6. おわりに

本研究の目的は、自律移動ロボットの確率的及び時間的な振舞いをモデル化することである。この目的に対して、先行研究で報告されているマルコフ決定過程を用いた確率

的な振舞いのモデル化の拡張に加えて、時間的な振舞いに対して時間オートマトンによるモデル化を提案した。提案手法では、確率的な振舞いに対しては区間分割を適用することによって状態数を有限に抑え、かつ、時間的性質ではロボットの動作に着目することで状態を定める。これらの結果に基づき、確率時間オートマトンにより確率的及び時間的性質を併せ持つモデル化を提案した。確率時間オートマトンでのモデル化により、対象系はモデル検査の対象となり得る。

今後の課題として、モデル検査器を用いた自律移動ロボットの振舞い検証が挙げられる。確率的及び時間的性質を含む検証項目の記述には PTCTL (Probabilistic Timed CTL) による検査式の記述が考えられる。具体的なロボットを検証とする場合、確率分布などの値を定める必要があるため、対象系の実装による測定環境の構築も課題である。また、より現実的なロボットの振舞いを考えたとき、ロボットの振舞いは時間に依存し、運動方程式で表される。このような離散系と連続系が混在するハイブリッドシステムと対象を扱った際の検証も課題としたい。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 26330092 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Clarke, E. M. Grumberg, O. and Peled, D.. Model Checking. MIT Press, 1999.
- [2] Sekizawa, T. Otsuki, F. Ito, K. and Okano, K.. Behavior Verification of Autonomous Robot Vehicle in Consideration of Errors and Disturbances. In Proceedings of COMPSAC2015 Workshop: The 1st IEEE International Workshop on Dependable Software and Applications. 2015, p. 550-555.
- [3] Rutten, J. J. M. M. Kwiatkowska, M. Norman, G. Parker, D.. Mathematical Techniques for Analyzing Concurrent and Probabilistic Systems P.Panangaden and F.van Breugel (eds.). CRM Monograph Series, Amer Mathematical Society, 2004, vol.23.
- [4] 大槻文也, 伊藤和己, 岡野浩三, 関澤俊弦. 自律移動ロボットの振舞い検証に向けて. ウィンターワークショップ 2015・イン・宜野湾, 2015, p. 69-70.
- [5] Kwiatkowska, M. Norman, G. and Parker, D.. PRISM 4.0: Verification of probabilistic real-time systems. in Proc. 23rd International Conference on Computer Aided Verification (CAV'11), ser. LNCS, vol. 6806, Springer, 2011, p. 585-591.
- [6] "UPPAAL". <http://www.uppaal.org/>, (参照 2016-5-11).
- [7] Baier, C. and Katoen, J.-P.. Principles of Model Checking. MIT Press, 2008.
- [8] Schild, A. and Lunze, J.. Handbook of Hybrid Systems Control: Control design by means of embedded maps. Lunze, J. and Lamnabhi Lagarrigue, F. Eds., Cambridge University Press, 2009, ch. 6.5, p. 231-247.
- [9] Henzinger, T. A.. The theory of hybrid automata. IEEE Computer Society Press, 1996, p. 278-292.
- [10] 井村順一, 東俊一, 増淵泉. ハイブリッドシステムの制御. コロナ社, 2013.