

Dynagent™ — ロボットのフレキシブルな動作を実現するプランニングエージェント

Dynagent™ Planning Agent to Realize Flexible Robot Control

林 久志

■ HAYASHI Hisashi

プランニング技術は、与えられた目標（ゴール）を達成するためのアクション実行順序（プラン）を、そのときの状況に応じて決めるための技術である。しかし、実世界で計画的行動を行うプランニングエージェントは、最初に決められたようにプランを実行できるとは限らない。

東芝は、プラン実行中にも外界を監視し、状況変化に応じてプランを変更していく知能エージェントDynagent™を開発した。Dynagent™を搭載することにより、実世界でフレキシブルに計画的行動を行う知能ロボットの実現を目指す。

Given the current situation and a goal, a planner formulates a sequence of actions (namely, a plan) to achieve that goal. However, agents working in the real world are not always able to execute an initial plan.

Toshiba has developed an intelligent agent called Dynagent™. While executing a plan, Dynagent™ monitors the external world and modifies the plan when the situation unexpectedly changes. By installing Dynagent™ on a robot, we are aiming to realize intelligent robots that can flexibly execute plans in the real world.

1 まえがき

近年、与えられたタスクの実行手順を具体化する技術であるHTN (Hierarchical Task Network) プランニング^{(1), (2), (3)}が、ロボットやWebサービスなどの分野で注目されてきている。HTNプランニングでは、抽象的なタスクをより具体的なタスクに分解することによりプランを作成する。

HTNプランニングは、効率性や知識表現力が優れているだけでなく、動的な環境に対応しやすい。例えば、次に実行するタスクを実行直前に分解することにより、実行時の環境に対応できる。特に、実行する順番と同じ順番でプランのタスクを分解していく前向きHTNプランニングは、タスク分解時に、分解するタスクの実行直前の状態が簡単にわかり、条件の判定をしやすい。

しかし、前向きHTNプランニングをロボットなどに搭載し、実世界で用いるには、以下のような課題が残る。

- (1) 状況が変わり、実行中のプランが無効になる、あるいは、より良い新プランが有効になるような場合には、プランを変更すべきである。
- (2) プラン実行中に、緊急対応しなければならないこと（緊急ゴール）が生じるような場合は、実行中のプランを一時中断し、緊急ゴールのためのプランを割り込み実行し、その後、中断していたプランの実行を速やかに再開できないとしない。
- (3) プランを実行しながら、バックグラウンドで実世界の状況を監視する必要がある。プラン実行に影響を与えるよう

なイベントを観測できなければ、オンラインプランニング技術も役には立たない。

東芝は、前向きHTNプランニングの良さをベースに、これらの課題の克服を目指し、実世界で、自律的に、計画的に、かつフレキシブルに動作する知能エージェント（ソフトウェア）Dynagent™を開発した。そして現在、Dynagent™をロボットに搭載し、実世界でフレキシブルに動作する知能ロボットの実現を目指している。

以下に、Dynagent™の概要について述べる。

2 Dynagent™のプランニング

知能エージェントDynagent™のプランニングには、次の二つの特長がある。

- (1) 前向きHTNプランニングによりプランを作成し、状況に応じて、動的に実行中のプランを修正・変更する前向きオンラインHTNプランニングである。
- (2) プラン実行中でも、緊急ゴールに対応する割り込みプランニングである。

以下に、これらの概要を順に説明する。

2.1 前向きオンラインHTNプランニング

Dynagent™は、状況などを記録する信念（真であると考えている命題などの論理式の集合）を持ち、前向きHTNプランニングによりプランを作成する。すなわち、おおまかなプランの各タスクを実行する順番と同じ順番で、より詳細なサブプランに分解していくことにより、プランを作成していく。タスクの

分解方法は、そのタスクの実行直前の状態によって異なる。前向きHTNプランニングでは、タスクを分解するときには、それ以前に実行するアクション列が決まっているため、そのタスクの実行直前の状態を計算することは容易である。

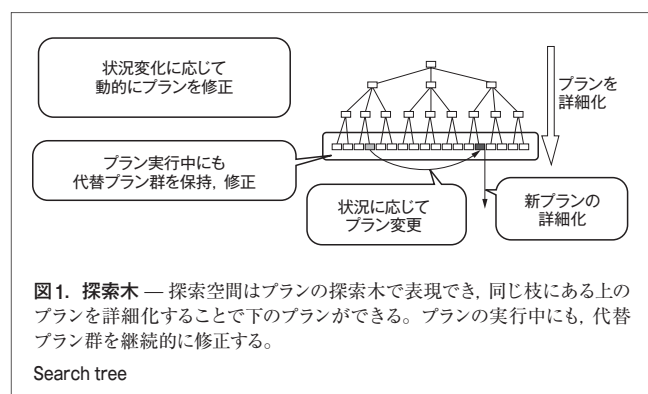
Dynagent_{TM}の前向きオンラインHTNプランニング⁽¹⁾の探索空間を図1に示す。一つのタスクの分解方法は複数ある場合もある。探索木の同じ枝にある上のプランのタスクを詳細化することで、下のプランができる。言い換えると、親プランを実行するためには、複数ある子プランのうちの一つを実行すればよいことになる。実行可能なレベルまで詳細化されたプランが一つできれば、ほかのプランの分解は中断してもかまわない。

Dynagent_{TM}の探索戦略としては、深さ優先、又は経路探索アルゴリズムとして有名なA*（エースター）のように、実行コストが低そうなプランのタスクを優先的に分解していく戦略を用いている。

プランの実行中にも、Dynagent_{TM}はほかの代替プラン群を継続的に修正する。まず、実行済みのアクションはほかの代替プランでも実行済みとみなす。また、一つのプランを実行していくと、ほかの代替プランが無効になることがある。無効になった代替プランは削除する。Dynagent_{TM}は代替プラン群を継続的に修正しながら保持しているので、たとえ状況が変化しても、実行済みアクションを考慮した代替プランをすばやく計算することが可能となる。

プラン実行中に状況が変化した場合には、実行中のプラン及びほかの代替プラン群の有効性をチェックする。このとき、無効になったプランは消去する。また、新たに有効になったプランは代替プラン群に追加する。例えば、ドアの開閉状態により、移動ロボットは現在の経路を通れなくなったり、逆に新経路ができたりする。これらの作業は探索木における枝の削除や追加に相当する。

次に実行すべきアクションが実行できない場合には、実行中のプランと、そのアクションを次に実行する代替プランを消去する。実行中のプランが無効になった場合、次に実行すべきアクションが実行できない場合、あるいは、コスト面で新プ



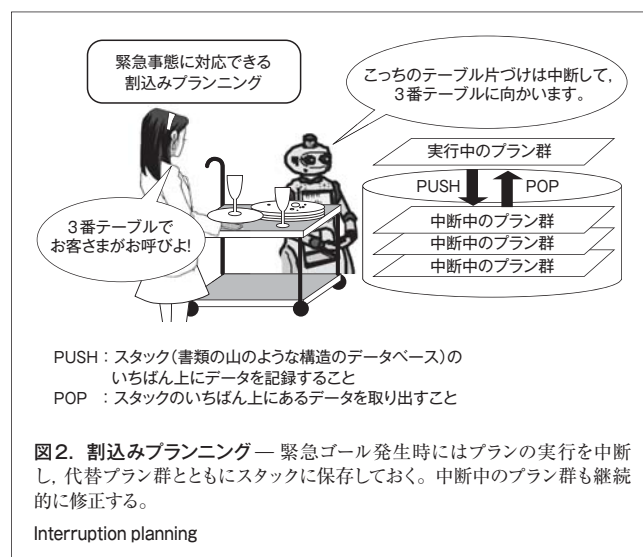
ランがより魅力的になった場合には、プランの実行を中止し、ほかの代替プランにスイッチする。このとき、必要に応じて新プランのタスクを更に分解していく。

2.2 割込みプランニング

通常のプランニングエージェントは、複数のゴールを扱う場合には与えられた順に実行するか、若しくは、ゴールの優先順位に従い、各ゴール達成のためのプランを順に実行する。あるゴールのためのプランの実行を開始したら、そのゴールを達成するまで、ほかのゴールのことは考えないのが普通である。

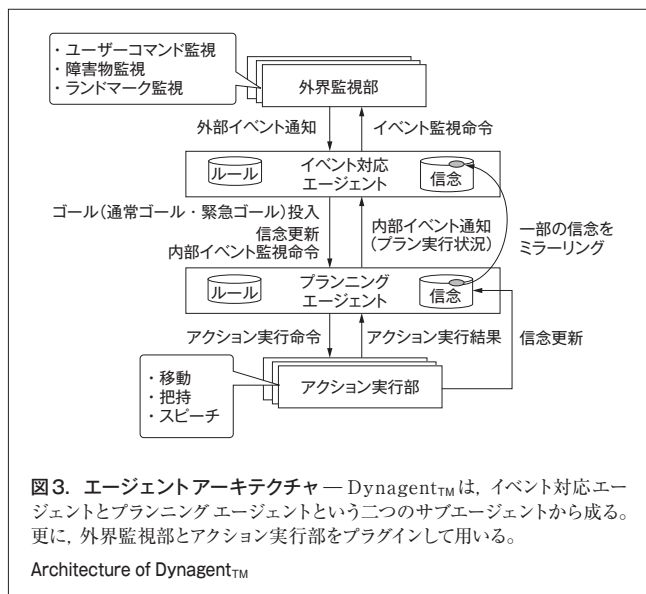
しかし、プランを実行している最中に、緊急に実行しなければならない別のゴールが発生する場合がある。ロボットのようにプランの実行時間が長い場合には、現在のプランの実行が済んでから緊急ゴールに対応しては遅い場合がある。例えば、博物館を案内している最中に、「トイレに行きたい」と言われた場合や、「今何時?」と聞かれた場合には、博物館の案内が終了する前に、トイレに案内したり現在の時刻を答えたりするべきである。

このような問題に対処するために、Dynagent_{TM}の割込みプランニング機能⁽²⁾を開発した。その概要を図2に示す。プラン実行中に緊急ゴールが発生した場合、Dynagent_{TM}は現在のプランの実行を中断し、代替プラン群とともに保存しておく。そして、緊急ゴールのためのプランを作成し、実行する。緊急ゴールのためのプランを実行している最中にも、Dynagent_{TM}は中断中のプラン群を継続的に修正する。そのため、中断していたプラン（あるいは代替プラン）の実行を速やかに再開できる。



3 エージェントアーキテクチャ

Dynagent_{TM}のアーキテクチャを図3に示す。Dynagent_{TM}はおおまかに、イベント対応エージェントとプランニングエージェ



ントという二つのサブエージェントから成る。更に、特定の外部イベントを監視する外界監視部をイベント対応エージェントに、また、特定のアクションを実行するアクション実行部をプランニングエージェントにプラグインして用いる。

各外界監視部やアクション実行部は、現在監視できるイベントや実行できるアクションの種類を答えるインタフェースを用意している。よって、イベント対応エージェントやプランニングエージェントは、適切な外界監視部やアクション実行部にイベント監視やアクション実行の命令を行うことができる。

イベント対応エージェントは、状況を記録する信念を持ち、外界監視部が通知する外部イベントや、プランニングエージェントが通知する内部イベント（プラン実行状況）に対応して、ルールベース推論を行う。そして、ゴール（通常ゴール若しくは緊急ゴール）をプランニングエージェントに与えたり、みずからの信念あるいはプランニングエージェントの信念を更新したりする。また、プラン実行状況に応じて、外界監視部が監視すべきイベントのコントロールを行ったりする。

特に、実世界で行動するロボットは、センサをオンにするだけでは欲しいイベントを監視できない。このため、現在監視できるイベントのうち、現在実行中のプランに影響を与えるような重要なイベントに絞って、適切なタイミングで監視するバックグラウンドセンシングコントロール⁽³⁾が重要である。

プランニングエージェントは、イベント対応部から与えられた各ゴール（通常ゴール）のためのプランを作成し、順に実行する。プランニングエージェントは、イベント対応部とは別の信念を持つが、一部の信念をイベント対応部の信念にミラーリングすることで共有する。

前章で述べたとおり、プランニングエージェントは、信念として記録されている状況に応じて、前向きオンラインHTNプランニングによりプランを作成し実行する。プランニングエー

ジェントは状況変化に応じ、実行中のプランをオンラインで修正又は変更する。緊急ゴールを受け取った場合には、割込みプランニングを実行する。

4 評価実験

ここでは、Dynagent_{TM}を移動ロボット ApriAttenda_{TM}⁽⁴⁾に搭載し、Dynagent_{TM}のバックグラウンドセンシングコントロールと、オンラインプランニングの効果を評価するための実験結果を示す。車輪で走行するロボットの足もとには超音波センサが搭載されており、障害物などを検知できる。また、首（可動）にはカメラが搭載されており、マーカを認識できるが、カメラを目隠しすると認識はできない。

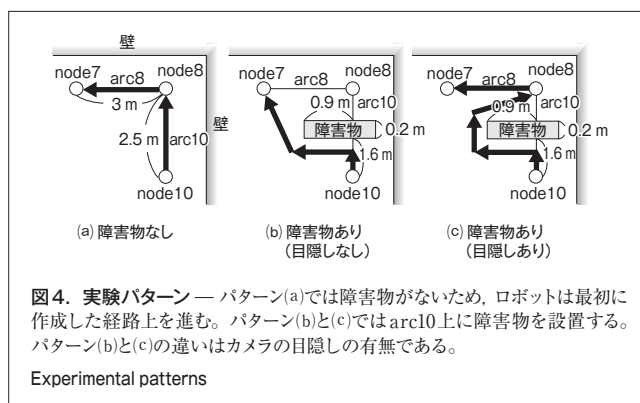
実験方法を図4に示す。node（ノード：ロボットが移動する際の経路地）はarc（アーク：ロボットが移動する経路）で結合され、ロボットは通常、アーク上を移動する。ロボットの初期位置はnode10、目的地はnode7である。

実験は3パターンで行った。パターン(a)では障害物はなく、ロボットは最初に作成した経路上を進む。パターン(b)と(c)ではarc10上に障害物を設置する。

パターン(b)では、バックグラウンドセンシングコントロールにより、障害物回避中に外界監視部がnode7のマーカを画像認識で発見し、イベント対応エージェントに通知する。イベントを通知されたイベント対応エージェントは、プランニングエージェントの信念を更新する。その結果、プランニングエージェントはプランの実行を中止し、直接node7へ向かうプランに変更する。

パターン(c)ではカメラを目隠ししているため、node7のマーカを認識できない。したがって、プランは変更されずに、node8経由で目的地に進むプランの実行を継続する。この場合、バックグラウンドセンシングコントロールやオンラインプランニングの効果はない。

ユーザーが「node7へ行く」というコマンドを外界監視部に入力すると、外界監視部はそのイベントをイベント対応部に通知し、イベント対応部は「node7へ行く」という通常ゴールを



プランニングエージェントに投入する。そして、プランニングエージェントは、次のような経路を進むプランを作成する。

node10 → arc10 → node8 → arc8 → node7

ロボットは、移動中には超音波センサを用いて障害物監視を行う。経路arc10上に障害物がある場合には、図4(c)のように、障害物を避けて次の経由地のnode8まで進む。

図4(b)の実験のようすを図5に示す。node7にはマークが設置され、そのマークを認識すると、自己位置を同定しながらnode7へ直接向かうことができる。大きく障害物を避ける場合には、node8以外のマーク（node7）を発見する可能性が高い。そのため、障害物回避中には、次の経由地以外に設置されているマークを探すようにコントロールする。なお、超音波センサを用いて障害物を避けている間はカメラを使わないため、よそ見をして次の経由地以外のマークを探すことができる。

実験結果を図6に示す。パターン(b)ではバックグラウンドセ

ンシングコントロールにより、障害物回避中にnode8以外のマークを発見し、オンラインプランニングにより、より良いプラン（移動時間が短い経路）に変更をしている。その結果、ロボットはパターン(b)の場合にもっとも早く目的地に着き、パターン(a)より1.5倍、パターン(c)より2.6倍早く目的地に着いた。これは、既存の受身のセンシングと異なり、プランの実行状況に合わせて欲しい情報を適切なタイミングでセンシングするようにコントロールする、バックグラウンドセンシングコントロールの有効性を示している。

5 あとがき

外界を適切に監視し、状況に応じてオンラインで実行中のプランをフレキシブルに修正又は変更する、知能エージェント Dynagent™のプランニング方法とアーキテクチャを示した。また、緊急事態に対応できる割込みプランニングの方法も示した。更に、実ロボット（Apri Attenda™）を用いて、バックグラウンドセンシングコントロールとオンラインプランニングの効果を確認した。

今後は、Dynagent™を実ロボットに搭載したときに出てくる課題を、着実に克服していく。

文 献

- (1) Hayashi, H., et al. "An Incremental Forward-Chaining HTN Planning Agent in Dynamic Domains". Post-proceedings of DALTO5, Selected and Revised Papers. LNAI 3904, Springer, 2006, p.171 - 187.
- (2) Hayashi, H., et al. "On-line Interruption Planning Using Dynagent: Integrating Deliberation and Emergency Deliberation". ICAPS07 Workshop on Moving Planning and Scheduling Systems into the Real World. Providence, USA, 2007-09. < <http://www.ai.sri.com/~nysmith/organizing/icaps07-workshop/> >, (accessed 2008-10-14) .
- (3) Hayashi, H., et al. "Background Sensing Control for Planning Agents Working in the Real World". Proceedings of KES AMSTA08. LNAI 4953, Springer, 2008, p.11 - 20.
- (4) Yoshimi, T., et al. "Development of a Person Following Robot with Vision Based Target Detection". Proceedings of IROS06. IEEE, 2006, p.5286 - 5291.

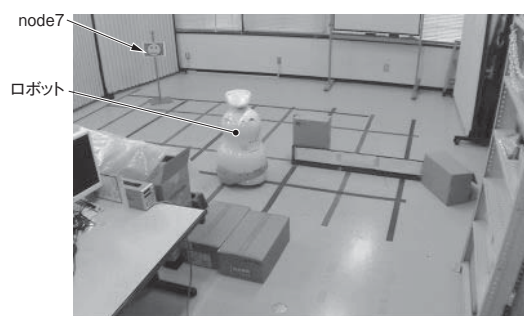


図5. 実験 (パターン(b))— パターン(b)の実験のようすを示す。障害物を避けている間にnode7のマークを発見した。

Pattern experiment (pattern (b) in Fig. 4)

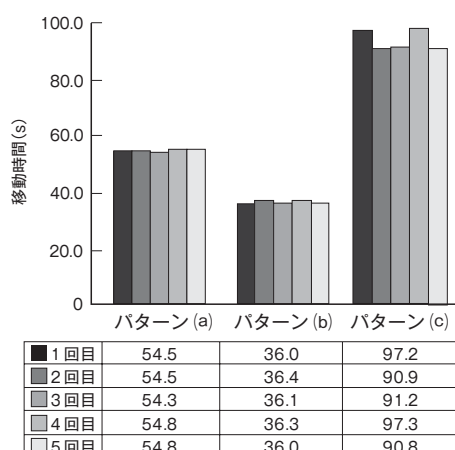


図6. 実験結果 — ロボットは、パターン(b)の場合にもっとも早く目的地に着いた。パターン(b)では、パターン(a)より1.5倍、パターン(c)より2.6倍早く目的地に着いた。

Experimental results



林 久志 HAYASHI Hisashi, Ph.D.

研究開発センター 知識メディアラボラトリー、博士。
プランニング、エージェントの研究・開発に従事。情報処理学会、電子情報通信学会、日本ソフトウェア科学会、人工知能学会会員。
Knowledge Media Lab.