環境推定・適応機能を有しオペレータ協調する自律型ロボットのための制御方策の確立

Controller Design for Operator-Cooperative Autonomous Robots with Ability to Estimate and Adapt Environment

2021007

研究代表者　大阪府立大学　工学域機械系学類 航空宇宙課程　助　教　金　田　さやか

［研 究 の 目 的］

本研究の目的は，未知環境においてオペレータ誘導により作業目的を達成する遠隔操作ロボットの実現である。既存の遠隔操作ロボットは，オペレータ指令を絶対とする。しかし，オペレータの取得情報には限りがあり，適切な制御指令を与えられるとは限らない。**環境情報を直接取得可能なロボットが，オペレータの欠損情報を補いながら作業目的を達成する仕組みが必要**である。そこで本研究では，環境中の不確かさと作業目的の両者を考慮した制御アルゴリズムの構築を目指す。本研究の成果を利用すれば，不確かさを多く含む社会環境においても，自然に協調作業できるロボットの実現に貢献し，人間と機械との相互作用に必要となる情報を明確にできる。

［研究の内容，成果］

人間が環境を整えること無く，ロボットが自律的に作業目的を達成するには，自身が未知環境に対して適応的な振る舞いを生成する必要がある。適応的な行動選択とは，未知環境における様々な不確かさのうち，目的達成に影響する特定の不確かさを推定するような行動（本書ではこのような行動を探索行動と呼ぶ）の選択を指す。本研究はロボットの環境適応性の実現を目的とし，**探索行動と目的達成行動とのトレードオフ関係に着目し，不確かさに依存した行動選択の設計原理を導出する**ことを目標とした。

環境に不確かさがある状況において確実に作業目的を達成するシステム原理を解明するために，題材として未知環境における移動ロボットの目的地への誘導問題に取り組んだ。環境と直接相互作用する移動ロボットが直接観測できる情報は局所的であるが解像度が高い。一方，オペレータはロボットを介して環境情報を取得するため，取得可能な情報は大域的だが解像度は低い。ロボットとオペレータが相互的に制御方策を変化させ，探査行動と知識利用行動とを柔軟に使い分けながら，選択的に不確かさを減少させることで作業目的の達成を実現するシステム原理を解明することとした。

以上のことから，本研究では以下のサブテーマを設けて研究を進めた。

1. 行動に関する不確かさの定量化

不確かさに依存した行動選択原理を設計するために，行動そのものに伴う不確かさを定量化する必要がある。ロボットの移動機構として，ホップ機構や車輪機構が挙げられるが，どちらも地面の物理特性が既知であったとしても，地面との接触状態に依存して運動が変化するため，移動にともない状態に関する不確かさが増加する。このような複雑な運動に関する推定器とし

て，複数のカルマンフィルタを含有したハイブリッド型の推定器を用いることが有効である。ホップ運動は，空中の重力のみに依存する運動と，地面との衝突による速度変化，ならびにホップ運動が収束した状態とに分割することができる。車輪による移動も地面との滑りの有無や，地面の掘り下げに至る運動に分類することができる。このような各運動を記述する方程式に則ったカルマンフィルタを用意し，最も観測量と合致する推定結果を用いることで運動状態の推定が可能である。逐次的に推定誤差の分散を伴った状態推定量を得ることができるため，これまでに確立した推定手法[発表論文 1] の推定結果や，サブテーマ 4 で構築するインタフェースでの推定誤差の提示に直接利用することが可能である。

本サブテーマは，ホップ移動するローバの位置同定法として数値実験による評価を行った。具体的には，探査機「はやぶさ」に搭載されていた探査ローバ「ミネルバ」を想定した。カルマンフィルタにより推定を行うこととし，時間伝搬のモデルを a. 小惑星上で静止状態，b. ホップ運動，c. 地表との衝突によるバウンド運動する 3 つを想定した。図 1 のように，これらの 3 つのカルマンフィルタを並列に処理し，もっとも確からしい位置を求める推定器を構築することとした。既存研究では，電波遅延時間を用いた位置同定はローバ移動を考慮できていなかった。本提案手法により，移動を考慮した高精度な位置同定の実現を目指した。本成果はロボット学会学術講演会にて発表予定である。

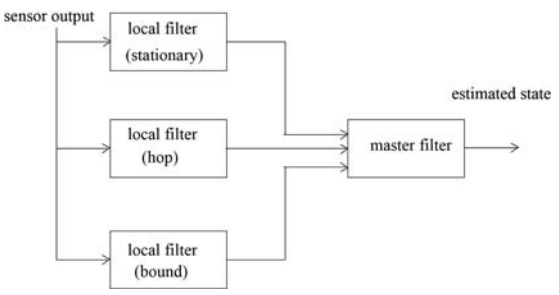

図 1　複数のカルマンフィルタ並列処理による推定モデル

2. 環境推定を目的としたロボットの振る舞い形成原理の解明

目的達成行動と探索行動とをパラメータとする選択行動モデルを構築するために，ロボットの選択行動により得られる作業目的達成への価値，選択行動による環境推定精度の変化，ならびに行動コストを定量化する必要がある。これまでの研究で構築した環境推定手法 [発表論文 2] ならびにサブテーマ 1 で定量化した行動に関する不確かさに関して，推定精度と選択行動による不確かさの増加量，行動実行に必要となるコストの関係を解明する。解明した推定コストと利益との関係から，適当な重みづけによってロボットの適応的行動則を導出する。具体的には，環境の不確かさが大きい状況においては探索行動を選択し，環境の推定精度が比較的高い状況においてはロボットが目的地へ向かって移動をするような目的達成行動を選択するよう，不確かさの推定精度に依存した行動選択設計則を実現するような適切な重み付けモデルを構築する。

本サブテーマに関して，飛行ロボットを想定し，数値実験による姿勢決定精度の評価を行った。ジャイロにより加速度，磁気センサにより磁気方位角，GPS 受信機により位置，気圧センサにより高度に関する計測値がそれぞれ得られるとした。従来，ジャイロと磁気センサを合わせた慣性計測装置（INS）と，GPS を融合した GPS-INS 複合航法が自律飛行制御に利用されてきた。図 2 に示すように，GPS 観測値の飛びは INS との融合により解消できることが分かる。

しかし，GPS-INS 複合航法は GPS 観測値への依存度が高く，GPS 衛星の隠蔽などによる GPS 観測値の欠損に対してロバストではない。気圧センサ（BARO）は高度方向に関して高い精度で計測値を得られるため，姿勢決定精度の向上，飛行安定性の向上が期待できる。そこで，GPS-INS-BARO 複合航法システムを構築法を提案，より安定性の高い自律航法が実現できる

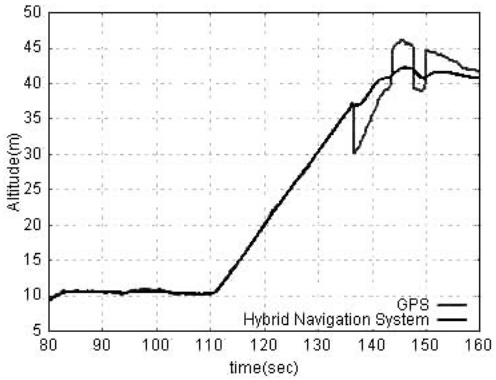

図２　GPS-INS 複合航法による推定精度向上の例：GPS 単独の出力値に飛びがあるのに対し，INS との複合により滑らかな推定値が得られていることが分かる

ことを示した。

3. 制御方策における合意形成を目的とした誘導における多目的関数化

未知環境下において，作業目的とロボットの実際の行動とが合致するには，サブテーマ２で明らかとした適応的振る舞いによる環境推定が，適切に作業目的に見合う不確かさの推定でなければならない。すなわち，ロボットの作業目的を把握しているオペレータと，直接環境と相互作用をもつロボットの間で何を目的とした行動か，という行動方策が一致していなければならない。一般に，オペレータの制御方策は，単一の基準ではなく複数の基準を持ち，これらの基準は多くの場合，互いに相反するため，オペレータはどの基準をどれほど優先するか，という選択を強いられる。このような意志決定過程は多目的評価関数の最適化過程としてモデル化でき，基準の優先関係を抽出することができる[発表論文 3]。そこで，各基準の優先関係により制御方策を表し，この優先関係をロボットと共有する。このことにより，オペレータの制御方策における選好を反映した行動選択を実現する。

4. オペレータとロボットが相互干渉可能な制御システム原理の解明

制御方策が共有されていても，ロボットはオペレータより詳細な情報を入手可能であるため，オペレータにとって未知の要因の影響によりその行動結果がオペレータの想定を超える可能性がある。このようなオペレータとロボット間の制御に関する齟齬を解消するには，ロボットが選択した行動による結果をオペレータが判断しやすい形で提示し，適切な介入を促すことが必要である。そこで，**ロボットの選択行動による予測状態をオペレータに提示**する。このことにより，オペレータは現在与えている行動方策の適切さを知ることができる。特に，環境の不確かさに起因した行動への影響がオペレータの許容範囲であるかを判断するために，予測に含まれる不確かさを提示することは重要である。このため，状態の予測値に加えて，予測に含まれる不確かさとして予測の分散をオペレータに提示することとする。サブテーマ３で明らかとしたオペレータとロボット間における制御方策の共有化のために定義した多目的関数を用いて，オペレータとロボット間で互いの目的間の選好関係を共有し，適切な介入により選好関係の変更を促すようなシステムを構築する。

［今後の研究の方向，課題］

サブテーマ３および４について，申請研究期間中には十分な研究成果が得られなかった。探索行動と目的達成行動とのトレードオフ関係が明確な課題設定として，サブテーマ２で取り組んだ飛行ロボットの経路設計が適切であると考える。これまで，飛行ロボットの搭載機器による高精度の位置・姿勢推定とその定量化に取り組んできた。現在，環境地図を作成するタスクを追加し，地図の精度と自己の位置・姿勢推定精度を同時に向上する問題に取り組んでいる。**地図の精度と自己状態の精度とはトレードオフ関係にあり，両者の精度向上には，より多くの基準となる情報が必要**である。たとえば，自己状態の算出に使うジャイロセンサはバイアス誤差があることが知られている。この誤差は時間

一定である。計測環境に動的障害物がほとんどなく，時間変化がないことを仮定すれば，長時間のジャイロセンサの計測値と広範囲の環境計測値からバイアス誤差を推定することができ，地図精度と自己状態の両方の推定精度を向上できる。同様のことが，ドリフト誤差や他のセンサ誤差に関しても成り立つ。

参考文献

［発表論文 1］ 金田さやか，中西弘明，椹木哲夫，吉光徹雄，中谷一郎：電波を用いた小天体探査ローバの位置同定，日本ロボット学会誌，Vol. 27, No. 9, pp. 1–8, 2009

［発表論文 2］ 金田さやか，中西弘明，椹木哲夫：往復伝播時間測定による小天体の自転運動およびローバ位置の推定法，計測自動制御学会論文集，Vol. 46, no. 5, pp. 296–305, 2010

［発表論文 3］ Sayaka Kanata, Hiroaki Nakanishi, Tetsuo Sawaragi : Accurate Localization for Space Rovers and Its Computational Reduction, Preprint of the 18th IFAC World Congress Milano, pp. 11233–11238, 2011

［成果の発表，論文等］

1 Hiroaki Nakanishi, Sayaka Kanata and Tetsuo Sawaragi : GPS–INS–BARO Hybrid Navigation System Taking into Account Ground Effect for Autonomous Unmanned Helicopter, CD–ROM (Paper ID=31), 2012

2 岡本鷹文，中西弘明，金田さやか，椹木哲夫，堀口由貴男：特異値分解による動作特徴抽出のための姿勢表現，2P1–N06, 2012

3 金田さやか，中西弘明，椹木哲夫：自律型無人ヘリコプタのための GPS–INS–BARO 複合航法，第 30 回ロボット学会学術講演会論文集，RSJ2012 AC4F3–1，2012

4 中西弘明，金田さやか，椹木哲夫：自律型無人ヘリコプタによる高精度 3 次元地形計測のための姿勢推定第 55 回自動制御連合講演会講演論文集，pp. 761–765, 2012. 11. 17–18

5 岡本鷹文，中西弘明，金田さやか，椹木哲夫，堀口由貴男：力学的パラメータ認知のための動作の環境適応成分の抽出，第 55 回自動制御連合講演会講演論文集，pp. 551–556, 2012. 11. 17–18

6 角江政俊，中西弘明，金田さやか，椹木哲夫：3 次元地形情報収集のための一般化 Rod rigues parameters を用いた姿勢推定，第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集，pp. 693–697, 2012. 12. 18–20