ランダム探索と力学フィルタを統合した誘導システムの初期評価

Preliminary Evaluation of Flight Path Generation Method Using Random Search and Dynamics Filtering

○ 西野友貴, 正 米本浩一, 伊多倉京士朗, 松本剛明 (九工大)

Yuki NISHINO, Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensui, Tobata, Kitakyushu, Fukuoka
 Kyoshiro ITAKURA, Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensui, Tobata, Kitakyushu, Fukuoka
 Takaaki MATSUMOTO, Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensui, Tobata, Kitakyushu, Fukuoka
 Koichi YONEMOTO, Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensui, Tobata, Kitakyushu, Fukuoka

Key Words: Random Search, Dynamics filtering,

I. はじめに

近年, 無人宇宙往還機[1]や無人惑星探査航空機[2]の研究開発が盛んに行われている. これらが要求するミッションにおいて, 障害物回避軌道や多観測点経由軌道の生成は極めて重要な課題となる. また, これらの課題を克服するためには従来のような事前の経路計画に基づく飛行ではなく, リアルタイムの軌道生成による飛行が望ましい. これまで, Richards らによる混合整数計画法を用いた障害物回避軌道の生成[3]や, 横山らによる遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて飛行経路を生成した例[4]等があるが, そのほとんどが障害物の無い, もしくはごく僅かに存在するような制約が低い環境下での最適軌道生成問題を取り扱う研究であった. このような従来研究では, 最適性の満足のために経路探索と解軌道の生成を同時に行うため, 制約が大きい飛行環境下では積分した解の多くが条件を満たせず捨てられる場合が多い. このため計算コストが膨大となり, リアルタイムでの軌道生成が困難となる.

本研究では, 飛行不能領域や経由する観測点が膨大である高制約環境下を想定したリアルタイム軌道生成を目指す. そこで, 経路の探索と解軌道の生成を分離することによりこれを実現する. 本稿では, 提案手法のコンセプトと提案手法を用いた軌道生成を行った初期評価の結果について述べる.

II. ランダム探索と力学フィルタを用いた飛行軌道生成

A. コンセプト

本研究において鍵となる着想は, 経路探索と軌道生成を分離することである. はじめに, 障害物回避経路を計算コストの低いランダム探索アルゴリズムを用いて高速に探索する. ここで得られる幾何軌道は飛行可能となるための力学的整合性を持たない. そこで, 得られた幾何軌道に力学フィルタ処理を行い力学的整合性の付与を行うことによって飛行可能な軌道に微修正する. 探索中には積分計算を行わず, 最後に1度だけ力学フィルタを通すことにより, 高制約環境下でも飛行軌道を高速に生成することが可能となる. 従来の最適化手法と提案手法の概念図をそれぞれ Fig.1 と Fig.2 に示す.

Fig.1. Conventional method

Fig.2. Proposed method

B. ランダム探索

RRT-Connect(Rapidly-Exploring Random Tree)の経路探索の流れ[4]

1. 探索域内にランダム点を生成
2. スタート地点から成長するツリーのうち最も近いノード(節)を選択
3. ランダム点に向けてエッジ(枝)を伸ばす
4. ゴール地点から成長するツリーに結合を試みる
5. ゴール地点から成長するツリーについて 1. ~ 3. を実行
6. スタート地点から成長するツリーに結合を試みる
7. 1. ~ 6. を結合するまで繰返す

C. 力学フィルタ

力学フィルタは, 力学的整合性を持たない幾何経路に対して飛行可能となる軌道へ微修正することを目的とする. ロボット工学の研究において, モーションキャプチャなどから得た人間の動きをヒューマノイドロボットにリアルタイムで再現させる手法として「力学フィルタ」が研究されている[6]. 人間とロボットはダイナミクスや制約条件が異なるため, 人間の動作をロボットが正確に再現すると転倒などが発生してしまう. そこで, 人間の動作に対し力学フィルタを通してロボットに適した運動へと微修正する. これにより, ロボットが自身の力学的整合性を満足しつつ人間の動作に近い動きを再現することが可能となる. 本研究の力学フィルタでは, ランダム探索で生成された幾何軌道から得られる目標の並進加速度, 方位角速度と機体の運動により生じるそれらの誤差に対する P (Proportional) 制御を入力として与え, 軌道の生成を試みる. 以下に力学フィルタのアルゴリズムを示す.

まず, RRT-Connect で得られる幾何経路に対して位置誤差による P 制御を加速度の入力として質点を制御する (質点力学フィルタ). 質点力学フィルタにより幾何経路を簡易的に滑らかにすることで, 航空機力学による力学的整合性の付与を容易にすることを目的とする. 式(1)~(3)に質点力学フィルタの式を示す.

次に, 質点力学フィルタの軌道から得られる並進加速度と経路角速度を目標値として, 航空機のダイナミクスへの入力を与える (航空力学フィルタ). ここで, 入力目標値と現在値の誤差による P 制御として与える. この処理により, 航空機のダイナミクスを大きく逸脱することのない力学的整合性を付与することができる. 式(4),(5)に航空力学フィルタの式を示す. ここで, P は質点の位置を表し添字 *target* は RRT-Connect によって得られた幾何経路を意味す

る. また, $V, m, \rho, S_w, C_L, g, \phi, \gamma, \psi$ はそれぞれ速度, 質量, 大気密度, 基準面積, 揚力係数, 重力加速度, バンク角, 経路角, 方位角とする. ただし, 本稿では, 高度方向の運動を考慮せず, ダウンレンジとクロスレンジ平面の運動のみを考慮する. そのため, $\gamma = 0$ とする.

$$\ddot{P}_{ref_n} = K_{p1}(P_{target(i)} - P_{ref_n-1}) \quad (1)$$

$$\dot{P}_{ref_n} = \dot{P}_{ref_n-1} + \ddot{P}_{ref_n} \Delta t \quad (2)$$

$$P_{ref_n} = P_{ref_n-1} + \dot{P}_{ref_n} \Delta t \quad (3)$$

$$\frac{V_{n+1} - V_n}{\Delta t} = \frac{1}{mV_n} \left\{ \frac{1}{2} \rho V_n^2 S_w C_L \cos \phi - mg \cos \gamma_n + K_{p4}(\ddot{y}_{ref_n} - \ddot{y}_n) \right\} \quad (4)$$

$$\frac{\psi_{n+1} - \psi_n}{\Delta t} = \frac{1}{mV_n \cos \gamma_n} \left\{ \frac{1}{2} \rho V_n^2 S_w C_L \sin \phi + K_{p3}(\ddot{\psi}_{ref_n} - \ddot{\psi}_n) \right\} \quad (5)$$

III. 結果

計算に用いるモデルは, 著者らが開発を進める有翼ロケット実験機 (Fig.3) とする. 主要諸元を Table.1 に示す. 探索域は, 1000m×1000m の矩形領域として直径 160m の障害物 (灰色円) を 10 個ランダムに配置する. $(x, y) = (0, 0)$ をスタート地点とし, $(x, y) = (1000, 1000)$ をゴール地点と想定する. Fig.4 および Fig.5 に本アルゴリズムによる 2 種類の障害物回避についての計算結果を示す. RRT-Connect による幾何経路を黒の実線, 質点力学フィルタおよび航空力学フィルタの計算結果をそれぞれ赤色白抜きの丸線, 青色の点線で示す.

Fig.3. Winged rocket

Table.1. Specification of winged rocket

Total Mass	[kg]	49.2
Total Length	[m]	1.7
Body Diameter	[m]	0.33
Wing Span	[m]	1.1
Center of Gravity	[%]	65

Fig.4. Simulation results (obstacle pattern 1)

Fig.5. Simulation results (obstacle pattern 2)

結果より, 質点力学フィルタは RRT-Connect による幾何経路を滑らかに表現していることがわかる. また, 航空力学フィルタは質点力学フィルタによって生成された軌道をさらに緩やかに表現しており, 機体が飛行可能となるような修正が施された軌道になっていることが確認できる.

IV. 結論と今後の課題

本稿では, 提案手法のコンセプトと提案手法を用いた軌道生成を行い, その初期評価を行った. その結果, 多数の障害物を設けた環境下において, 障害物回避軌道を生成することが可能であることを示した. 今後は, 提案手法により生成された軌道为目标軌道として, 空力舵面制御による 6 自由度飛行シミュレーションを行い, 生成された軌道の有用性を検証する. また, 力学的整合性を付与する上で, 各ゲインの調整方法は検討すべき重要な課題である.

文 献

- 1) 松本剛明, 米本浩一: 「サブオービタル宇宙輸送システムの開発計画およびリカバリシステムの検証実験」, 第 20 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, A1, (2011).
- 2) 大山聖, 藤井孝蔵: 「火星探査用飛行機用翼型設計の最適化」, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, G405, (2005).
- 3) Richards, A and How, J.P: "Aircraft trajectory planning with collision avoidance using mixed integer linear programming", Proceedings of American Control Conference, pp.1936-1941, (2002).
- 4) 横山信弘, 鈴木真二: 「遺伝的アルゴリズムを用いた最適制御問題の数値解析」, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 51, (2003), pp. 207-214.
- 5) Kuffner, J.J., Jr. and Lavalley, S.M: "RRT-connect: An Efficient Approach to Single-query Path Planning" Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.995-1001, (2000).
- 6) Yamane, K. and Nakamura, Y: "Dynamics Filter – Concept and Implementation of On-line Motion Generator for Human Figures". Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA, April, (2000).