A14 横滑りを考慮した屋外型飛行船ロボットの自動着陸制御

Landing Control of an Outdoor Blimp Robot with Lateral Slip

○学 佐伯 一夢 (神戸大), 正 深尾 隆則 (神戸大)

Hitomu Saiki, Kobe University, 1-1 Rokkodai, Nada, Kobe, Hyogo 657-8501 Japan

Takanori Fukao, Kobe University

Abstract: A surveillance system is required to gather the suffering information in the stricken area safely after large-scale disasters. An autonomous blimp is the best option for this purpose. This paper proposes a control design method for automatic landing of outdoor blimp robots with lateral slip. The landing method consists of stabilizing control in horizontal plane and longitudinal control for letdown-velocity and pitching motion of the blimp. A stabilizing controller considering wind is designed by inverse optimal control. Some simulations are performed to confirm the usefulness of the proposed method.

Key Words: *Outdoor Blimp Robot, Rescue, Underactuated Robot, Automatic Landing, Inverse Optimal Control, Lateral Slip.*

1. 緒言

阪神淡路大震災, アメリカ同時テロを契機に, 災害後のレスキュー活動におけるロボットの必要性が認識され, 迅速な状況把握と救援活動計画策定のために, 詳細な情報を確実に自動収集するシステムが必要とされている. 地震災害においては, 瓦礫に埋もれた被災者の生存率が 72 時間を過ぎると急速に低下すること⁽¹⁾が知られており, 情報収集の遅れが大きな問題となっている. しかしながら, 災害地域では, 建物の崩壊, 道路の寸断, 交通渋滞などの影響により, 地上での情報収集には限界がある. したがって, このような災害下では, 上空からの情報収集が有望であると考えられる.

本研究グループでは, 被災地上空を自動巡回し, 情報収集する飛行船ロボットを用いるシステムを提案している⁽¹⁰⁾. 飛行船は浮力を利用して飛行するため, 高いエネルギー効率で長時間滞空することができ, さらに, 安全で騒音も少なく, 低空で飛行することができる. このため, ヘリコプタや飛行機といった他の航空機に比べ, 安全性, 情報収集のための低空飛行, 航続時間, 静粛性に関して優位であり, 被災地における情報収集システムとしての活躍が期待できる.

これまでの研究で, 全長 12m の屋外型飛行船において上空での自動巡回がある程度の風速下で可能となった^(3,8). 現在, 本システムの実用化に向けた重要な課題として, 自動離着陸の実現が挙げられており, 昨年度, 状態変換による屋外型飛行船ロボットの自動着陸制御法を提案し, 実機による低風下での自動着陸に成功した⁽⁹⁾. しかし, 強風時には船体が風に流されてしまい, 自動着陸を行うことが困難であった. これは安定化制御において, 風外乱により非常に大きな力を受けるため, そのロバスト性に限界があったと考えている. また, 飛行船は, その空力特性を考えると, 横方向への移動損失が大きいため, 横方向への直接的

な力を持たない劣駆動システムであるが, 強風下では, 風を受けて船首が振られたり, 船体が横滑りすることが多く, それらを考慮することは非常に重要である.

そこで, 本論文では, 横滑りを考慮した屋外型飛行船ロボットの自動着陸制御法を提案する. 制御系設計にあたり, 飛行船の運動を水平面方向と縦方向に分離して考える. 水平面方向において飛行船を着陸地点上空に安定化すると同時に, 縦方向における降下速度, ピッチング運動を制御し, 自動着陸を行う. 先に述べた理由により, 本論文では安定化制御は用いず, 対地速度が 0 [m/s] である場合も, 対気速度は風速と同様になることを考慮し, 対気速度が風速とうまく釣り合うようにトラッキング制御を行う. これにより, 結果的に着陸地点における安定化を行うこととなる. また, 飛行船の横滑りを考慮した制御系設計を行うとともに, ロバスト性の高い逆最適制御法⁽²⁾を適用する.

2. 自動着陸制御

Fig. 1 Landing procedure

飛行船の自動着陸を図 1 および以下に示すプロセスで行う. 図 1 は, 飛行船の着陸の様子を示したものである. 飛行船の性質より, 飛行時のローリングおよびピッチング

運動が微小かつ安定であると仮定し、水平面方向と縦方向の運動に分離する。飛行船の船首を風上に向けて自動着陸モードに入り、水平面内で着陸地点上空に安定化させながら、縦方向における降下速度および、ピッチング運動を制御し、着陸を完了させる。水平面方向については、風が吹いている前提のもとで、以下に示す逆最適トラッキング制御系により、目標地点へ安定化させる。

3. 水平面内における安定化

本章では、飛行船の水平面内における安定化法について述べる。

3-1. 運動学モデル 水平面方向の飛行船の座標系を図2に示すように、風上に向かって x 軸をとる。 x 軸を基準とした飛行船のヨー角を $\theta[\text{rad}]$ 、横滑り角を $\beta[\text{rad}]$ とし、飛行船の重心における並進速度および回転角速度を、それぞれ $v[\text{m/s}]$ 、 $\omega[\text{rad/s}]$ とすると、飛行船の水平面上の運動学モデルは次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} + \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta + \beta) & 0 \\ \sin(\theta + \beta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

Fig. 2 Configuration of blimp in horizontal plane

3-2. 飛行船ロボットの逆最適トラッキング制御 劣駆動システムである飛行船ロボットのトラッキング問題を考える。この問題の目的は、図3に示されるような参照飛行船ロボットに追従することである。本研究では、非ホロミック移動ロボットのロバストな制御手法として知られている逆最適制御⁽²⁾により逆最適トラッキングコントローラを設計する。逆最適問題は直接的な最適問題とは違い、コントローラを設計した後に、そのコントローラが最小化するある意味を持った評価関数が決定する。この逆最適設計のアプローチにおいて、コントローラはある種の柔軟性を持つ Control Lyapunov Function(CLF) と Sontag の形式^(7,6) を使って設計される。

逆最適設計

最適制御問題はシステム

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (2)$$

に対して、次の特性を持つフィードバック制御則 $u(x)$ を

Fig. 3 Reference blimp robot and real blimp robot

見つけることである。

1. $u(x)$ は平衡点 $x = 0$ において漸近安定化を達成する。
2. $u(x)$ は次の評価関数を最小化する。

$$J = \int_0^\infty (l(x) + u^T R(x)u) dt \quad (3)$$

ただし、すべての x に対して $l(x) \geq 0$ 、 $R(x) > 0$ 。

この問題を解くには次の Hamilton-Jacobi-Bellman 方程式の解を求める必要がある。

$$l(x) + L_f V(x) - \frac{1}{4} L_g V(x) R^{-1}(x) (L_g V(x))^T = 0, \quad V(0) = 0 \quad (4)$$

ここで、 $V(x)$ は半正定関数である。

しかし、この方程式を解くことは一般的には容易ではない。

そこで、逆最適化のアプローチをとる。つまり、安定化フィードバック則を先に設計し、その後に式(3)のような評価関数に対して最適であると示される。

次の Control Lyapunov Function(CLF) の概念が重要な役割を果たす。

定義 1 (Control Lyapunov Function)

すべての $x \neq 0$ に対して次の関係を満足する滑らかで正定かつ放射状に非有界な関数 $V(x)$ は、システム(2)に対する Control Lyapunov Function (CLF) と呼ばれる。

$$L_g V(x) = 0 \Rightarrow L_f V(x) < 0 \quad (5)$$

ここで次のことが明らかとなっている。

定理 1 (CLF からの最適制御)

Sontag の形式による制御則

$$u(x) = -p(x)b(x), \quad b(x) \neq 0 \quad (6)$$

は次の評価関数に対して最適な安定化フィードバック則で

ある。ただし、 $b(x) = 0$ のとき、 $u(x) = u_r(x)$ 。

$$J = \int_0^\infty \left(\frac{1}{2} p(x) b^T(x) b(x) + \frac{1}{2p(x)} u^T u \right) dt \quad (7)$$

ここで、 $a(x), b(x), p(x)$ は CLFV(x) に対して次のように定義される。

$$a(x) = L_f V(x) \quad (8)$$

$$b(x) = L_g V(x) \quad (9)$$

$$p(x) = \begin{cases} c_0 + \frac{a(x) + \sqrt{a^2(x) + (b^T(x)b(x))^2}}{b^T(x)b(x)}, & b(x) \neq 0 \\ c_0, & b(x) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

3-3. 逆最適トラッキング制御 飛行船ロボットを追従させたい仮想的な参照ロボットの運動学モデルを以下のよう表す。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r + \dot{\beta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r + \beta_r) & 0 \\ \sin(\theta_r + \beta_r) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで、添字 r 付きのパラメータは参照ロボットの座標を示す。

参照ロボットと実ロボットの相対誤差は次のように定義できる。

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta + \beta) & \sin(\theta + \beta) & 0 \\ -\sin(\theta + \beta) & \cos(\theta + \beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ (\theta_r + \beta_r) - (\theta + \beta) \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここで、 e_1, e_2, e_3 はそれぞれ実ロボットに対する位置、方向の誤差を表す。

上式を時間に関して微分すると、誤差方程式は次のように導かれる。

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos e_3 \\ v_r \sin e_3 \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & e_2 \\ 0 & -e_1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (13)$$

このとき、逆最適トラッキングコントローラを設計するために、文献(4)で構成された Lyapunov 関数を参考にし、CLF を選ぶ。

まず、次のような関数を定義する。

$$h(z) = \frac{z}{1+z^2} \quad (14)$$

ここで、 $zh(z) > 0, \forall z \neq 0$ と $h(0) = 0$ を満足する。

次に、関数 $h(z)$ を用いて座標変換を行う。

$$\tilde{e}_3 = e_3 + h(e_2 v_r) \quad (15)$$

よって

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{e}}_3 &= \dot{e}_3 + \dot{h}(e_2 v_r) \\ &= \omega_r - \omega + h'(v_r^2 \sin(\tilde{e}_3 - h(e_2 v_r)) \\ &\quad - e_1 v_r \omega + e_2 \dot{v}_r) \end{aligned} \quad (16)$$

となり、制御対象の誤差方程式は以下のように表せる。ここで、 $h' = \frac{1-(e_2 v_r)^2}{(1+(e_2 v_r)^2)^2}$ である。

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{\tilde{e}}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos(\tilde{e}_3 - h(e_2 v_r)) \\ v_r \sin(\tilde{e}_3 - h(e_2 v_r)) \\ \omega_r + h'(v_r^2 \sin(\tilde{e}_3 - h(e_2 v_r)) + e_2 \dot{v}_r) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$+ \begin{bmatrix} -1 & e_2 \\ 0 & -e_1 \\ 0 & -1 - h'e_1 v_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$\equiv f + \begin{bmatrix} g_1 & g_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$$

さて、次のような CLF の候補を選ぶ。

$$V(e_1, e_2, \tilde{e}_3) = \frac{1}{2} K_1 e_1^2 + \frac{1}{2} K_2 e_2^2 + \frac{1}{2} K_3 \tilde{e}_3^2 \quad (18)$$

ここで、 K_1, K_2, K_3 は正定数である。

CLF の条件(5)を満足するか確かめる。

$$L_{g_1} V = -K_1 e_1 \quad (19)$$

$$L_{g_2} V = K_1 e_1 e_2 - K_2 e_1 e_2 - K_3 \tilde{e}_3 (1 + h'e_1 v_r) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} L_f V &= K_1 e_1 v_r \cos(\tilde{e}_3 - h(e_2 v_r)) \\ &\quad + K_2 e_2 v_r \sin(\tilde{e}_3 - h(e_2 v_r)) \\ &\quad + K_3 \tilde{e}_3 (\omega_r + h' v_r^2 \sin(\tilde{e}_3 - h(e_2 v_r)) + h' e_2 \dot{v}_r) \end{aligned} \quad (21)$$

式(19)、(20)から $L_g V = 0$ は $e_1 = 0, \tilde{e}_3 = 0$ を導く。

また、 $e_1 = \tilde{e}_3 = 0$ のとき、

$$\begin{aligned} L_f V &= K_2 e_2 v_r \sin(-h(e_2 v_r)) \\ &= -K_2 e_2 v_r \sin(h(e_2 v_r)) \end{aligned} \quad (22)$$

$e_2 \neq 0$ かつ $v_r \neq 0$ のとき、 $h(z)$ の定義より $e_2 v_r h(e_2 v_r) > 0$ を満足する。したがって、 $h(e_2 v_r)$ は $-\pi < h(e_2 v_r) < \pi$ という関係を満たすので、簡単に $e_2 v_r \sin(h(e_2 v_r)) > 0$ が示される。

上述のように、 $v_r \neq 0$ のとき、 $V(e_1, e_2, \tilde{e}_3)$ は条件(5)を満足する。したがって、 $v_r \neq 0$ という仮定の下で、式(6)のような逆最適トラッキング制御則を選ぶことができる。さらに、 $\lim_{t \rightarrow \infty} [|e_1(t)| + |e_2(t)| + |\tilde{e}_3(t)|] = 0$ より $\lim_{t \rightarrow \infty} e_3(t) = 0$ となる。なぜなら、 $\lim_{t \rightarrow \infty} h(e_2 v_r) = \lim_{z \rightarrow 0} h(z) = 0$ であり、 $e_3 = \tilde{e}_3 - h(e_2 v_r)$ という関係があるからである。

3-4. 風速に応じた安定化 本節では、トラッキングコントローラにより飛行船を水平面に安定化する方法について述べる。まず、飛行時に風が吹いており、着陸制御を行う間は、風速 (W [m/s])、風向が一定という仮定を定義する。いま、風速 W が 8.0 [m/s] であるとき、参照ロボットの対気速度 v_r [m/s] を図4のように与えることを考える。仮定から、参照ロボットは制御開始後 50[s] 後に、初期位置から 20[m] 前方に安定化することができる。

すなわち、図4を例として参照ロボットの v_r [m/s] を風速に応じて与えることで、実ロボットが定常偏差なくトラッキング制御を達成したときに水平面に安定化できることになる。図5、6に、図4に示した v_r [m/s]、 $\omega_r = 0.0$ [rad/s]、 $x(0) = 0.0$ [m]、 $y(0) = 1.0$ [m]、 $\theta + \beta = 0.0$ [rad]、

Fig. 4 Air speed of the reference blimp robot

$x_r(0)=y_r(0)=0.0[\text{m/s}]$, $\theta_r+\beta_r=0.0[\text{rad}]$, $K_1=K_2=K_3=1.0$, $C_0=10.0$ としたときのシミュレーション結果を示す. e_1 , e_2 , e_3 がそれぞれ定常偏差なく収束しているのがわかる.

Fig. 5 Simulation results of errors

4. 結言

本論文では、横滑りを考慮した屋外型飛行船ロボットの自動着陸制御法を提案した。今後は、風が一定でないことを考慮した上で、屋外における実機実験により、提案手法の有効性の検証を行う。

Fig. 6 Simulation results of control inputs

謝辞

本研究は、(財)セコム科学技術振興財団の助成により実施された。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) 大都市大地震災害軽減化特別プロジェクト 平成 17 年度成果報告書, 2006.
- (2) T. Fukao. Inverse optimal tracking control of a nonholonomic mobile robot. *In Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, 2004.
- (3) T. Fukao, A. Yuzuriha, T. Suzuki, T. Kanzawa, T. Oshibuchi, K. Osuka, T. Kohno, M. Okuyama, Y. Tomoi, and M. Nakadate. Inverse optimal velocity field control of an outdoor blimp robot - blimp surveillance systems for rescue -. *IFAC World Congress*, 2008.
- (4) Z. P. Jiang and H. Nijmeijer. Tracking control of mobile robots: A case study in backstepping. *Automatica*, Vol. 33, No. 7, pp. 1393–1399, 1997.
- (5) G. A. Khoury and J. D. Gillet. *Airship Technology*. CAMBRIDGE UNIVERCITY PRESS, 1999.
- (6) M. Jankovic R. Sepulchre and P. Kokotovic. *Constructive Nonlinear Control*, chapter 3. Springer-Verlag, 1996.
- (7) E. D. Sontag. *Mathematical Control Theory: Deterministic Finite Dimensional Systems*, chapter 5. Second Edition, Springer-Verlag, 1998.
- (8) 宮島, 深尾, 大須賀, 河野. 屋外型飛行船ロボットの角度場制御に関する研究. 第 26 回日本ロボット学会学術講演会, 2008.
- (9) 佐伯, 深尾, 石森, 宮島, 大須賀, 河野. 屋外型飛行船ロボットの自動着陸制御. 第 14 回ロボティクスシンポジウム, pp. 526–533, 2009.
- (10) 深尾, 鴛渕, 大須賀, 河野, 友井, 奥山, 中館. 屋外型飛行船ロボットの制御系設計法. 第 13 回ロボティクスシンポジウム, pp. 401–408, 2008.