

マニピュレータとの協調動作を考慮したヘリコプタの飛行制御 Flight Control of Helicopter for Cooperation Motion with Manipulator

80717484 平野雄哉 (Yuya Hirano) Supervisor: 村上俊之 (Toshiyuki Murakami)

1 序論

ヘリコプタは低速飛行や全方位性など、優れた移動能力を有し、現在、監視、軍事、災害地における救助など、様々な場面で利用されている。本論文では、この移動に優れたヘリコプタの応用性を拡張することを目的とし、他のロボットとの協調動作、特に作業能力に優れたマニピュレータとの協調動作を考える。具体的にはヘリコプタからロープによって吊り下げられた物体の受け渡し作業を想定し、把持作業のために吊り下げ物体とマニピュレータ手先位置の相対距離の制御を行うコントローラの設計を目指す。この場合、マニピュレータの作業範囲を考慮することが課題となる。高精度に位置決め制御が可能なマニピュレータは作業範囲に限界があるため、ヘリコプタの位置により動作の切り替えが必要となる。本論文では重み付き擬似逆行列の重みの設計により、動作の切り替えを行う手法を提案する。ヘリコプタの位置に基づいて重みゲインの設計を行うことで、近接したときのみマニピュレータが協調的に動作する制御系の構築を行う。最後に、実験によりこれらの有効性を確認する。

2 モデリング

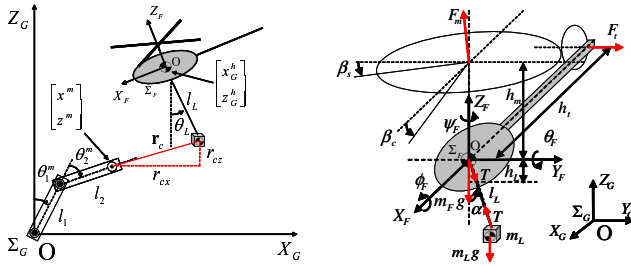


図 1: モデリング (左: 協調制御系, 右: ヘリコプタ)

本研究で対象とする協調制御系のモデルと吊り下げ物体を含むヘリコプタのモデルを図 1 に示す。図 1 に示すモデルに基づき、物体とマニピュレータ先端位置の相対距離に関しての運動学を導出する。このシステムは相対距離に関して冗長自由度を有する。

作業空間 (相対距離) $r_c = [r_{cx} \ r_{cz}]^T$ と関節空間 $p_c = [\theta_1^m \ \theta_2^m \ \theta_L \ x_G^h \ z_G^h]^T$ の速度関係は協調ヤコビアン J_c を用いて表すことができる。

$$\dot{r}_c = J_c \dot{p}_c \quad (1)$$

さらに、上式を時間微分することで、加速度次元の関係式を求めることができる。ただし、ヤコビ行列の時間微分を含む項による影響は十分小さく無視できるものとする。次に、逆運動学を導出する。冗長自由度を持つため、逆運動学は重み付き擬似逆行列を用いて導出される。

$$\ddot{p}_c = J_c^\# \ddot{r}_c + (I - J_c^\# J_c) \eta \quad (2)$$

$$J_c^\# = W_c^{-1} J_c^T (J_c W_c^{-1} J_c^T)^{-1} \quad (3)$$

ここで、(2) 式における右辺第 2 項は冗長性による零空間を表し、理論上では作業空間に対して非干渉な項となる。また、 η は任意ベクトルであり、作業空間とは非干渉な関節空間の制御を行うことが可能である。

次に、ヘリコプタの動力学を考える。本研究では $X_G - Z_G$ の 2 次元で協調作業を考える。(4), (5) 式は機体の並進方向、

(6), (7) 式は吊り下げ物体の動力学を表す。

$$m_F \ddot{x}_F^h = F_m \beta_c + m_F g \theta_F - T \theta_L \quad (4)$$

$$m_F \ddot{z}_F^h = F_m - m_F g - T \quad (5)$$

$$m_L l_L^2 \ddot{\theta}_L = m_L l_L \ddot{x}_G^h \cos \theta_L - m_L l_L (g + \ddot{z}_G^h) \sin \theta_L \quad (6)$$

$$T = m_L (g + \ddot{z}_G^h) \cos \theta_L + m_L \ddot{x}_G^h \sin \theta_L \quad (7)$$

回転方向の動力学を (8) 式に示す。 u_{ele} はサイクリックピッチ指令を表す。この式はブレード、スタビライザのフラッピングの動力学から導出される。

$$\dot{\theta}_F = \frac{(a'_0 + a'_1 s) \exp(-Ts)}{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + b_3 s^3} u_{ele}, \quad (8)$$

式中の a', b は定数項を表し、ブレード、スタビライザの物理量から構成される。 T は通信による時間遅れを示す。

3 ヘリコプタとマニピュレータの協調制御

マニピュレータは作業範囲に限界がある。そのため、ヘリコプタの位置によって制御の主導権の切り替えを考える必要がある。本論文では、重み行列の設計による協調アルゴリズムを提案する。図 2 に全体の制御系のブロック線図を示す。

3.1 相対距離制御と零空間制御

作業空間では相対距離の制御を行う。 K_{pr} は比例ゲイン、 K_{vr} は微分ゲインを表している。

$$\ddot{r}_c \text{ ref} = K_{pr} (r_c \text{ cmd} - r_c \text{ res}) + K_{vr} (\dot{r}_c \text{ cmd} - \dot{r}_c \text{ res}) \quad (9)$$

零空間では関節空間の動作を安定化するため、速度フィードバックを行う。

$$\eta = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{1n}^m \\ \ddot{\theta}_{2n}^m \\ \ddot{\theta}_{Ln} \\ \ddot{x}_{Gres}^h \\ \ddot{z}_{Gres}^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\ddot{\theta}_{1res}^m \\ -\ddot{\theta}_{2res}^m \\ 0 \\ -\ddot{x}_{Gn}^h \\ -\ddot{z}_{Gn}^h \end{bmatrix} \quad (10)$$

これらの加速度参照値は (2) 式に基づき、それぞれのロボットに分配される。その際の分配量を、(3) 式における重み行列 W_c の設計により操作することで、制御の主導権の受け渡しを実現することが本論文における提案手法である。

3.2 重み行列 W_c の設計による協調アルゴリズム

重み付き擬似逆行列はその重み W_c を慣性を持つシステムの運動エネルギーを最小にするような逆運動学解を与えるという性質を持つ。この性質を利用し、加速度参照値の分配量操作のために重み行列を設計する。重み行列 $W_c = \text{diag}[w_m \ w_m \ w_L \ w_h \ w_h]$ において、 w_L, w_h を固定し、 w_m を変化させたときの分配量の変化の様子を図 3 に示す。この結果を基に、重み係数は以下のように設計する。この重みゲインにより、相対距離が遠い場合はヘリコプタに制御の主導権が、近接状態においてはマニピュレータに主導権が移る。

$$w_m = \begin{cases} 10^{\left(\frac{3(X_{Gres} - l_{work})}{l_{start} - l_{work}} + 1.0\right)} & (0.01 < w_m < 10000) \\ 0.01 & (w_m \leq 0.01) \\ 10000 & (w_m \geq 10000) \end{cases} \quad (11)$$

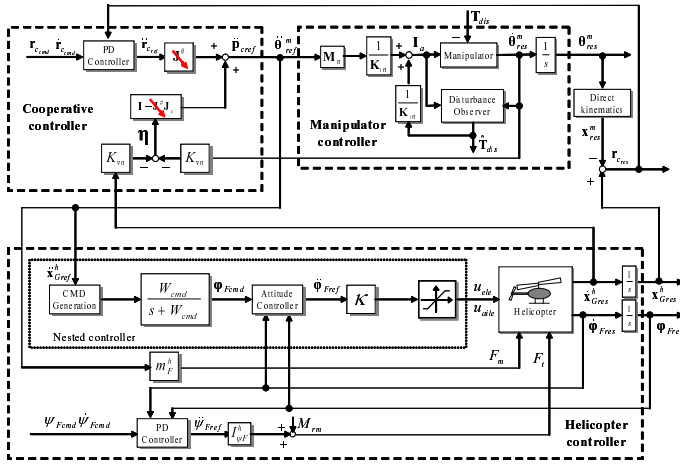


図 2: 制御系の構成

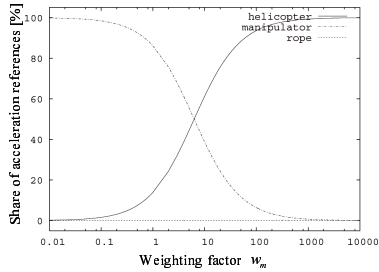


図 3: 重みゲインの変化による加速度参照値の分配比率

4 入れ子型制御器による飛行制御

本章では、協調制御器により設計された加速度参照値にしたがって、ヘリコプタを制御する方法について述べる。ヘリコプタは劣駆動系であるが、同時に動力学的な非ホロノミック拘束を持つシステムであり、入力を適切に決めることで全自由度の制御が可能となる。このようなシステムに対し、姿勢角指令値生成に基づく入れ子型制御器による飛行制御法を提案する。

4.1 姿勢角指令値生成

位置制御器（ここでは協調制御器）により設計された加速度参照値 \ddot{x}_{Gref}^h を実現するため、幾何学的関係よりピッチ角の指令値 θ_{Fcmd} を以下のように生成する。ここで、ヘリコプタの安定性を考慮し、指令値にはローパスフィルタを通過させ、リミットを設けている点に注意されたい。

$$\theta_{Fcmd} = \begin{cases} \frac{W_{cmd}}{s+W_{cmd}} \left(\tan^{-1} \left(\frac{\ddot{x}_{Gref}^h}{g} \right) + \theta_{comp} \right) & \\ \theta_{max} & (\theta_{Fcmd} > \theta_{max} = \theta_{comp} + \theta_{lim}) \\ \theta_{min} & (\theta_{Fcmd} < \theta_{min} = \theta_{comp} - \theta_{lim}) \end{cases} \quad (12)$$

ここで θ_{comp} は重心位置のずれに由来するホバリング状態のずれを表す。 W_{cmd} はローパスフィルタのカットオフ周波数である。

4.2 入れ子型制御器の構築

前述のように設計した姿勢角の指令値に基づき、内側のループで姿勢角制御を行うことでヘリコプタの位置制御が達成される。姿勢角制御は一般的な線形制御器である PD コントローラを用いて行う。

$$\ddot{\theta}_{Fref} = K_{ph} (\theta_{Fcmd} - \theta_{Fres}) + K_{vh} (\dot{\theta}_{Fcmd} - \dot{\theta}_{Fres}) \quad (13)$$

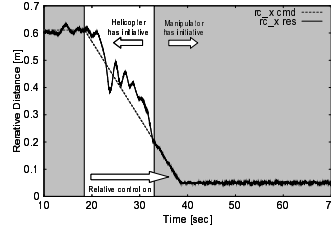


図 4: 相対距離

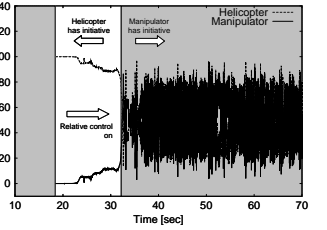


図 5: 制御量分配比率

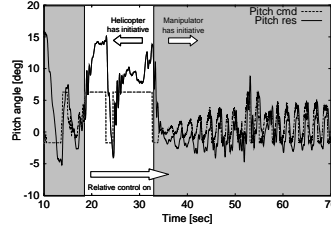


図 6: ピッチ角応答

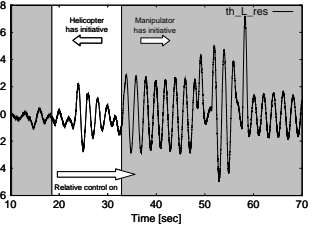


図 7: ロープ振動角

これらの加速度参照値はスケールファクタ κ を乗ずることにより、サイクリックピッチ入力 δ_{ele} に変換される。

$$\delta_{ele} = \frac{\ddot{\theta}_{Fref}}{\kappa} \quad (14)$$

ここで、 κ は、同定によって求めたサイクリックピッチから姿勢角へのダイナミクスにおける、利得の最大値の逆数を選んだ。

5 実験

提案手法の有効性を確認するため、実験を行った。相対距離を初期値から 20 秒かけて 5cm まで変化させるよう指令値を与えた際の結果を図 4~7 に示す。

図 5 から、ヘリコプタの位置により制御の主導権がヘリコプタからマニピュレータへ移行していることが分かる。図 4 を見ると、ヘリコプタが近いときにだけマニピュレータが動作することで、相対距離の制御が精度良く達成できていることが分かる。図 7 から、受動関節であるロープは振動したままであるが、重み行列の設計により制御の主導権を操作することで、吊り下げ物体が振動していても相対距離の制御を行うことができた。

6 結論

本論文では、マニピュレータとの協調動作を考慮したヘリコプタの飛行制御法を提案した。協調制御のアルゴリズムとして、重み行列を用いた相対距離制御の主導権切り替え手法を提案した。さらに、劣駆動系、非ホロノミックシステムであるヘリコプタに対し、入れ子型制御器による飛行制御法も提案した。これらの有効性を実験により確認した。

参考文献

- [1] Jinok Shin, Kenzo Nonami, Daigo Fujiwara and Kensaku Hazawa: "Model-based optimal attitude and positioning control of small-scale unmanned helicopter" *Cambridge University Press*, Vol. 23, pp. 51-63, 2005
- [2] Damir Omrcen, Leon Zilajpah and Bojan Nemec: "Autonomous motion of a mobile manipulator using a combined torque and velocity control" *Cambridge University Press*, Vol. 22, No. 7, pp. 623-632, 2004
- [3] So-Ryeok Oh, Kaustubh Pathak, Sunil K. Agrawal, Hemanshu Roy Pota, and Matt Garratt: "Approaches for a Tether-Guided Landing of an Autonomous Helicopter" *IEEE Trans. on Robotics*, Vol. 22, No. 3, pp. 536-544, June, 2006
- [4] 鈴木智, 野波健蔵ほか: "ホビークラス約 5kg 無人ヘリコプタの解析的モデリングと自律ホバリング制御" 日本機械学会論文集, C 編, 73 巻, 726 号, pp. 200-207, Feb., 2007