

DaVinci プロジェクト報告書, ポスター集 (平成 21 年度)



2010 年 6 月

鳥取大学 工学部

DaVinci プロジェクト 実践グループ

<メンバー>

教員:川添 博光, 西村 正治, 大澤 克幸, 小田 哲也, 和田 信敬, 松野 隆, 赤尾 尚洋,
山田 剛治

院生:斎藤 裕介, 西村 祐樹, 瀬戸山 正和

学生:川口 幹祐, 内田 匡隆, 大西 威徳, 山本 和弘

一般講演会発表用前刷り原稿・卒論

1 緒言

これまで、操作性に関しては、操作力に依存した可変ダンピング制御など操作性を向上させる研究、あるいは表面筋電位などの生体信号を利用してインターフェイスの操作性を評価する研究などが行われている [1][2]. しかし、対象とする操作に対して操作感を多次元の軸として設定し、操作感覚を定量的に示すことを目的とした研究は見あたらない. それで、本一連の研究では、任意の操作感を実現できる調整器のモデルを設計することを最終的な目標とした. そして、先行研究で操作感を推定し、モデル化を行った [3]. さらに、操作感と関係のある物理量を明確にするため、エネルギーの観点から物理量を求めることを目的として研究を行った [4].

しかし、これらの結果は、まだまだ人間の感性を適確に表現できているといえるものではなかった.

そこで、アンケート項目を再度検討し、操作感実験を実施した. さらに、実験より得られたデータを基に操作感を支配的に占める感覚がなにかについて検討を行い、操作感のモデル化を再度試みた.

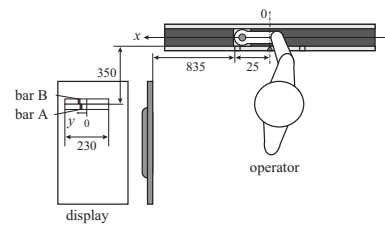
2 試験装置と実験方法

本研究では、Fig.1 に示したような装置をマンマシンシステムのインターフェイスとして使用する. この装置では、操作者の前方方向を正とし、操作端の変位を x 、人が操作端に与える力を f_h とした. これらは、操作端下部に設置した力センサとリニアモータ本体のエンコーダにより測定できる. 実験では、インターフェイスのインピーダンスモデルを、バネ・マス・ダンパ系とした. 制御は、任意の動特性パラメータ (質量 m_d [kg], 粘性 c_d [N·s/m], 剛性 k_d [N/m]) が与えられたとき、式 (1) で表される特性を操作端で実現するインピーダンス制御を行った.

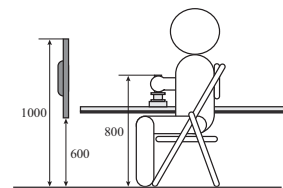
操作者に課すタスクをランダムに動く目標操作点 $barB$ へ操作端 $barA$ を追従させる追従操作とした. 被験者は 11 名で、実験条件は装置の動特性パラメータの組み合わせによる 18 条件について実験を行ったこのとき、実験条件は先行研究 [3] のものとすべて異なるものに設定した. そして、実験の後に操作感についてのアンケートを実施した. 実験手順を以下に示す.

$$L(s) = \frac{X(s)}{F_h(s)} = \frac{1}{m_d s^2 + c_d s + k_d} \quad (1)$$

1. 装置と平行になるように操作者に着席してもらう.
2. 実験内容、操作法について説明を行う.
3. 実際に操作してもらい操作者に慣れてもらう.
4. 追従操作実験を行う (30 秒間).
5. アンケートに回答してもらう.



(a) top view



(b) side view

Fig.1 Experimental apparatus

3 主成分分析によるアンケート項目の決定

先行研究 [3] で、操作に対して感じる多くの操作感を表現する 34 対の形容詞をアンケート項目として、16 名の操作者に予備実験を実施し、アンケートに回答してもらった. その結果を用いて主成分分析を行い、少数の操作感因子に集約した. そして主成分分析の結果、第一主成分が「総合的に悪い、総合的に良い」という表現となった.

しかし、これは操作感を表現する因子としては包括的であり、操作者の感覚を具体的に表現できているといえるものではなかった. このことは、アンケート項目として用いた形容詞対に「良い、悪い」「好き、嫌い」「良好な、駄目な」「満足な、不満な」といった、あまり具体的な感覚を表現するものではないものが含まれていたことが理由として考えられる.

そこで、先行研究 [3] で用いたアンケート項目の中から、これら上記の 4 対の形容詞を除いたデータで主成分分析を新たに行った. そして、操作感因子を Table 1 に示した $E_1 \sim E_5$ の形容詞対で表現されると仮定し、操作感実験におけるアンケート項目とした. また、上記の 4 対の形容詞を意味するものとして、「総合的に悪い、総合的に良い」という項目を加えた計 6 項目を操作感についてのアンケートを実施した.

Table.1 Operation feeling factors

No.	a pair of words	
E_1	不快な	⇔ 快適な
E_2	動きが鈍重な	⇔ 動きが機敏な
E_3	手応えのない	⇔ 手応えのある
E_4	動きが緩やか	⇔ 動きが険しい
E_5	特徴的で飽き難い	⇔ 単調で飽き易い

4 実験結果

まず操作感因子 $E_1 \sim E_5$ の総合評価との関係を相関分析した。その結果求めた相関係数を Table 2 に示す。

Table.2 Correlation coefficient

	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
F	0.827	0.408	-0.108	0.285	0.0283

この結果より、総合評価 F に対する操作感因子 $E_1 \sim E_5$ の相関関係はわかった。しかし、任意の操作感に制御するためには、インターフェイスの動特性を制御パラメータとして制御する必要がある。そのため、次に各操作感因子と関係のある動特性を調べた。

本研究で用いたインターフェイスのインピーダンスモデルは、バネ・マス・ダンパ系である。それで、質量を m 、バネ弾性係数 k 、粘性係数 c 、人がインターフェイスに与える力 f_h とすると、運動方程式を

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = \frac{f_h}{m} \quad (2)$$

と表せる。

また、先行研究⁽³⁾では、インターフェイスの動特性 m 、 c 、 k によって操作感を制御できる可能性を確かめた。これらのことから、注目すべき物理量を m 、 ζ 、 ω_n とした。

5 操作感のモデル化

本研究の目標を達成するためには、操作感の総合評価と各操作感因子の関係をモデル式にする必要がある。そこで、操作感の総合評価を F 、操作感因子を $E_1 \sim E_5$ とし実験で得たアンケート結果から F と $E_1 \sim E_5$ との関係を線形式によって求めた。このとき F を目的変数、 $E_1 \sim E_5$ を説明変数として重回帰分析を行った。しかし、 E_4 と E_5 の係数の値は微小となり、 $E_1 \sim E_3$ だけで重回帰分析を行った結果重回帰式の精度を表す決定係数が 0.722 となり精度の劣化は見られなかった。そのため総合評価と操作感因子 $E_1 \sim E_3$ の重回帰式 (3) とした。

$$F = 0.804E_1 + 0.0268E_2 + 0.0558E_3 + 0.327 \quad (3)$$

次に、操作感因子 $E_1 \sim E_3$ と物理量 m 、 ζ 、 ω_n との関係を同じく重回帰分析によって求めた式を以下に示す。

$$\begin{aligned} E_1 &= -0.0048m - 0.057\zeta + 1.21\omega_n + 3.63 \\ E_2 &= -0.094m - 1.32\zeta - 0.89\omega_n + 9.69 \quad (4) \\ E_3 &= 0.081m + 1.21\zeta + 0.69\omega_n - 0.55 \end{aligned}$$

このときの E_2 と E_3 の決定係数はそれぞれ 0.751、0.747 となり、この式で十分に操作感因子と物理量の関係を表せている。しかし、 E_1 の決定係数は 0.355 となり、操作感因子と物理量の関係を表せていない。そこで、減衰比 ζ が E_1 とどのような関係にあるのかを固有角周波数 ω_n の値別に減衰比の値によって E_1 の評価点がどのように変化しているかを Fig. 2 で示した。

Fig. 2 より、減衰比 ζ は E_1 との関係が線形では表せないことがわかる。そのため、 E_1 との関係式において決定係数が低い値となることがわかった。

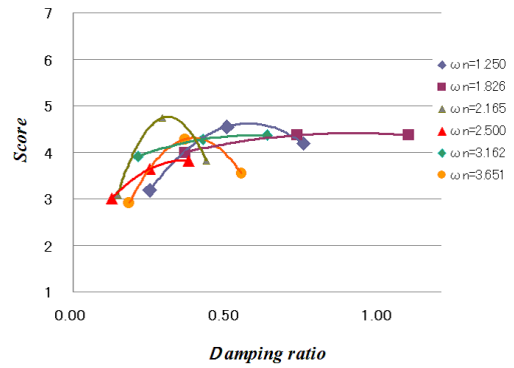


Fig.2 Damping ration

6 結言

本研究は、新たな操作感因子を定め、新たな実験条件における操作感実験を行い、操作感のアンケートを実施した。

その結果から、操作者が感じる操作感の総合評価と操作感因子の関係において、重回帰分析より、どの操作感因子が総合評価にどれほど影響を与えているかがわかった。さらに、操作感因子と物理量との関係についても同様に分析を行った。その結果、 E_2 、 E_3 と物理量 m 、 ω_n 、 ζ の関係は重回帰式で十分表せることがわかった。しかし、 E_1 と物理量との関係については、この重回帰式において最も重回帰係数の大きい物理量 ζ が、 E_1 の操作感評価に対して最適値を持つような物理量であるために、この関係を重回帰式で表せないことがわかった。

それで、今後の課題を以下に示す。

- 操作感実験の実験条件を再検討し、減衰比 ζ の持つ最適値を調べる。
- 実験によって得られる計測値とアンケート結果の関係から、操作者がどのような操作を行う際、どう感じているかを調べ、モデル式を求める。
- 実時間で感性値を制御するための制御器の設計。

参考文献

- (1) 武居直行, 菊植亮, 佐野明人, 望山洋, 澤田英明, 藤本英雄, 位置決め作業アシストのための操作力依存可変ダンピング制御, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.2, pp.306-313(2007)
- (2) 池浦良淳, 南京政信, 猪岡光, 筋電位を用いた操作器の操作性評価法, 計測自動制御学会論文集, Vol.29, No.8, pp.949-955(1993)
- (3) 金森直希, 永尾浩之, 伊藤和寿, 西村正治, 人間-機械協調作業系における操作感, 第12回日本感性工学会大会予稿集 CD-ROM, P01-38, 2008
- (4) 瀬戸山正和, 金森直希, 西村正治, マンマシンシステムの操作における感性要素の同定, 日本機械学会中国四国支部第47期総会・講演会講演論文集, No.095-1, p.495-496(2009)

マン・マシンシステムの操作における感性要素の同定

Identification of Feeling Factor for Man-Machine System Operation

学○瀬戸山 正和 (鳥取大院) 正 金森 直希 (鳥取大) 正 伊藤 和寿 (鳥取大) 正 西村 正治 (鳥取大)

Masakazu SETOYAMA, Naoki KANAMORI, Kazuhisa ITO, Masaharu NISHIMURA

Tottori University, Koyama, Tottori 680-8552

Key Words: operation feeling, maneuverability, man-machine interface, human-robot system

1. 緒言

これまで、操作性に関しては、操作力に依存した可変ダンピング制御など操作性を向上させる研究、あるいは表面筋電位などの生体信号を利用してインターフェイスの操作性を評価する研究も行われている [1][2]。しかし、対象とする操作に対して操作感を多次元の軸として設定し、操作感覚を定量的に示すことを目的とした研究は見あたらない。それで、本研究では、インターフェイスの操作と多次元の操作感に関する基礎研究を行っている。先行研究で操作感を推定し、モデル化した [3]。この結果、ある程度操作感覚を推定することができるようになった。しかし、より高精度なモデル化をするためには操作感覚と相関関係があるとはっきり判断できるパラメータを見つける必要がある。

そこで、本研究では、先行研究の実験から得られたデータを用いてエネルギーの観点から物理量を求め、操作感覚と相関関係の強い物理量を求めることを目的として研究を行った。

c_d [N·s/m], 剛性 k_d [N/m]) が与えられたとき、式 (1) で表される特性を操作端で実現するインピーダンス制御を行った。

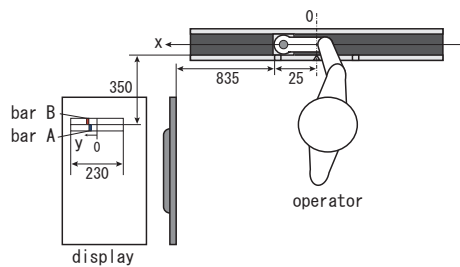
$$L(s) = \frac{X(s)}{F_h(s)} = \frac{1}{m_d s^2 + c_d s + k_d} \quad (1)$$

3. 操作感因子

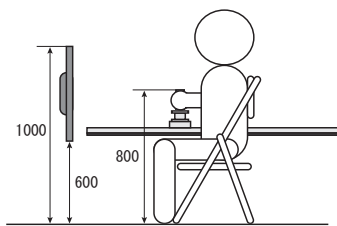
ここで、操作に対して感じる多くの操作感の中から、16名の操作者のアンケート結果を用いた主成分分析により、少数の操作感因子に集約した。そして、今回の操作に対する操作感が Table 1 に示した $Z_1 \sim Z_5$ の形容詞対で表現されると仮定した。ここで仮定した形容詞対 Z_1 の含む意味が不鮮明であるのでその含む意味を Table 2 に示した。

Table 1 Operation feeling factors

No.	a pair of words	
Z_1	総合的に悪い	⇔ 総合的に良い
Z_2	動きが鈍重な	⇔ 動きが機敏な
Z_3	手応えのない	⇔ 手応えのある
Z_4	動きが緩やか	⇔ 動きが陰しい
Z_5	特徴的で飽き難い	⇔ 単調で飽き易い



(a) top view



(b) side view

Fig.1 Experimental apparatus

2. 試験装置の構成

本研究では、Fig.1 に示したような装置をマン・マシンシステムのインターフェイスとして使用する。この装置では、操作者が操作端 (グリップ部) に加えた力 f_h と操作端の変位 x を、それぞれ操作端下部に設置した力センサとリニアモータ本体のエンコーダにより測定できる。実験では、任意の動特性パラメータ (質量 m_d [kg], 粘性

Table 2 1st principal component

良い	⇔	悪い
快適な	⇔	不快な
好き	⇔	嫌い
良好な	⇔	駄目な
満足な	⇔	不満な
気持ち良い	⇔	気持ち悪い
易しい	⇔	難しい
安心な	⇔	不安な
疲れしない	⇔	疲れる
気軽な	⇔	気重な
動きが滑らか	⇔	動きが粗い
清々しい	⇔	鬱陶しい
緩やか	⇔	きつい

4. 実験方法

インターフェイスに任意の動特性パラメータ (質量 m_d [kg], 粘性 c_d [N·s/m], 剛性 k_d [N/m]) を与え、操作者に課すタスクをランダムに動く目標操作点 $barB$ への追従操作とした。被験者は 6 名で、実験条件は装置の動特性パラメータと目標操作点 $barB$ の速度の組み合わせによる 36 条件について実験を行い、アンケートをとって各実験条件の操作感覚を、被験者一人一人から得た。

5. 物理量と操作感覚の相関関係

操作端下部に設置した力センサとエンコーダによって操作端に与えられた力 f_h と変位 x のデータを計測し、サンプリングタイムあたりの仕事、つまり仕事率 P を求めた。そして、その値を試行時間について積分した。ただし、値が負をとる区間では絶対値をつけてすべて正の値として計算した。つまり、仕事率の絶対値の総和を求めた。この物理量を新たな評価関数 E_{all} と定義し、これを表す式を式 (2) とする。このとき T は試行時間を示し、今回は 30[s] である。

次に、操作感 $Z_1 \sim Z_5$ それぞれについて 7 段階で評価した結果と E_{all} の相関関係を調べた。操作感 $Z_1 \sim Z_3$ と E_{all} との関係を相関図にしたものを Fig.2, Fig.3, Fig.4 に示す。このとき相関図は、すべての実験条件に対する全被験者のアンケート結果と評価関数 E_{all} の関係を示している。このとき、 E_{all} の値は被験者 6 名のそれぞれの E_{all} の値を平均化したものである。横軸はアンケートの評価点数であり、 Z_1 では点数が低い程総合的に悪く、高い程総合的に良い、 Z_2 では点数が低い程動きが鈍重、高い程動きが機敏、 Z_3 では点数が低い程手応えのない、高い程手応えのある操作感覚であるという評価になる。また図中の縦線は平均した値の標準偏差を示している。

$$E_{all} = \int_0^T |P| dt = \int_0^T |f_h \cdot \dot{x}| dt \quad (2)$$

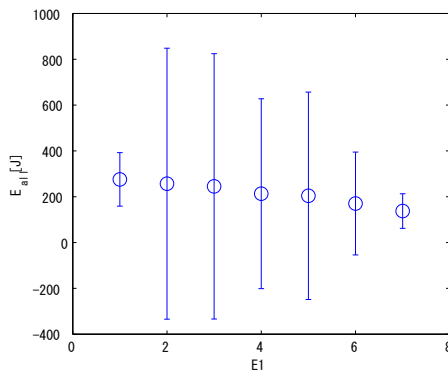


Fig.2 Correlation diagram of E_{all} and $Z1$

Fig.2より、 E_{all} の値が大きい程悪い評価で、小さい程良い評価となるという相関関係があるといえる。また、操作端を操作するときに仕事が多いと不快感や、不満や、疲れると感じ、操作感が悪いと感じているという評価になっていることがわかる。逆に、少ない仕事で操作できるなら疲れにくく、不満もなく、快適だと感じるということがわかる。

Fig.3からも E_{all} の値が大きい程悪い評価で、小さい程良い評価となるという相関関係があるといえる。そして、大きな仕事を与える必要があるときは重く、素早く操作できないので操作感が鈍重であると感じることがわかる。また逆に、与える仕事が少ないならば軽く、動きが機敏な操作感覚であると感じることがわかる。

Fig.4からは E_{all} の値が大きい程良い評価で、小さい程悪い評価となる相関関係がわかる。このことは、与える仕事が多いならば手応えのある操作感だと感じ、逆に仕事が少ないならば手応えがないと感じていることがわかる。これは、Fig.3の結果と合わせて考えても正しいといえるだろう。

これらの結果から、評価関数 E_{all} は操作感 $Z_1 \sim Z_3$ と相関関係をもつことがわかった。また、図中に示した標

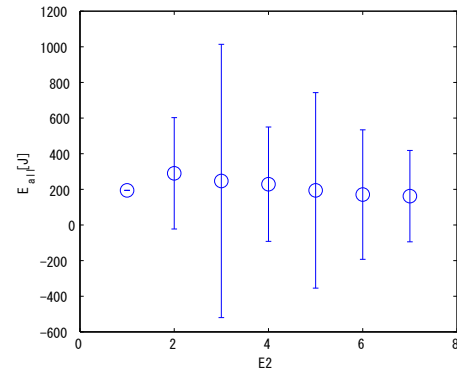


Fig.3 Correlation diagram of E_{all} and $Z2$

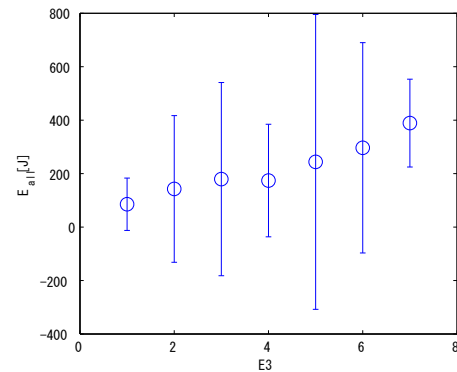


Fig.4 Correlation diagram of E_{all} and $Z3$

準偏差の幅が大きいことから、同じ操作感を感じていてもそのときの E_{all} の値が人によって大きく異なることもわかる。

6. 結言

本研究は、マン・マシンシステムの機械系の動特性を様々に設定した場合の操作感を得るために行った実験の計測値から新たな評価関数 E_{all} を求め、操作感覚との相関関係を調べた。その結果として、 E_{all} と操作感 $Z_1 \sim Z_3$ との間で相関関係を見ることができた。しかし、同じ操作感を感じていてもそのときの E_{all} の値が人によって大きく異なることがわかった。

参考文献

- [1] 武居直行, 菊植亮, 佐野明人, 望山洋, 澤田英明, 藤本英雄, 位置決め作業アシストのための操作力依存可変ダンピング制御, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.2, pp.306-313(2007)
- [2] 池浦良淳, 南京政信, 猪岡光, 筋電位を用いた操作器の操作性評価法, 計測自動制御学会論文集, Vol.29, No.8, pp.949-955(1993)
- [3] 金森直希, 永尾浩之, 伊藤和寿, 西村正治, 人間-機械協調作業系における操作感, 第12回日本感性工学会大会予稿集 CD-ROM, P01-38, 2008

1 緒言

本研究では災害時の救助作業の補助、高所における試料採取などの軽作業を目的とするマニピュレータを搭載した空中作業用ロボットの開発を進めている [1]。特に、本研究では、マニピュレータにより対象物体との接触を伴う作業を行うことを想定し、マニピュレータ手先による力制御を行うことを目指している。飛翔体には厳しいペイロード制限があるため、アームに要求される力を出力させるには軽量の減速機付モータを用いる必要がある。減速機付きのモータには図 5 に示すような摩擦やヒステリシスなどの非線形性が含まれるが、通常は出力トルクをトルクセンサより検出し、これを用いてフィードバック制御系を構成することにより、非線形性の影響を抑制し、力制御が実現される。

本研究では、装置重量の低減を目指し、トルクセンサを用いることなく力制御を行うことを目指している。そのために、まずは基礎研究として、トルク制御系設計の際に必要な減速機付 DC モータの数理モデルを作成し、物理パラメータの同定を行い、数理モデルの妥当性の検討を行い、PI 制御によるトルク制御器の設計、評価を行った。

2 減速器付 DC モータの数理モデル

図 1 に減速機付 DC モータの構成図を、図 3 に減速機付 DC モータの全体の数理モデルを示す。なお、 G_1, G_2, G_3 はある伝達関数であり、各記号は以下のとおりである。

i : 供給電流 ϕ : 軸回転角度
 V : 供給電圧 r : ギア半径
 V_e : 逆起電力 T_f : ギア軸受けクーロン摩擦
 L : 電機子インダクタンス F_g : ギア接触部の接線方向力
 R : 電機子抵抗 N : ギア比
 k_τ : トルク定数 k_s : ロードセル剛性
 τ_m : モータ出力トルク l_a : アームの長さ
 T_d : 出力軸発生トルク x_g : アーム先端部変位量
 k_e : 逆起電力定数 x_t : 対象物変位量
 J : ギアの慣性モーメント D : ギアの粘性係数

モータ部、減速機部、出力部の運動方程式を導出しラプラス変換表現を用いまとめると、以下のような式となる。

$$\tau_m = k_\tau G_1(s)(V - G_2(s)\phi_g) \quad (1)$$

$$\phi_g = G_3(s)[N\tau_m - T_d - T_f] \quad (2)$$

$$T_d = l_a k_s (l_a \phi_g - x_s) \quad (3)$$

ただし、

$$G_1(s) = \frac{e^{-\tilde{L}s}}{Ls + R}, G_2(s) = k_e N s$$

$$G_3(s) = \frac{1}{(J_g + J_m N^2)s^2 + (D_g + D_m N^2)s}$$

また、軸受け部のクーロン摩擦は次式でモデル化する。

$$T_f = \begin{cases} T_{fr} \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_g) & \text{if } \dot{\phi}_g \neq 0 \\ \tau_a & \text{if } \dot{\phi}_g = 0 \text{ and } |\tau_a| \leq T_{fs} \\ T_{fs} \operatorname{sgn}(\tau_a) & \text{if } \dot{\phi}_g = 0 \text{ and } |\tau_a| > T_{fs} \end{cases} \quad (4)$$

ただし、 $\tau_a \cong N\tau_m - T_d$ であり、 T_{fs} は最大静摩擦力によるトルクであり、また T_{fr} は最大動摩擦力によるトルクを表す。

3 減速器付 DC モータの物理パラメータの同定

今回使用する減速機付 DC モータはサーボモータ (KRS-4014HV: 図 2) からサーボドライバをはずしたものである。使用されている DC モータの特性、すなわち電気的定数、トルク定数、逆起電力定数、端子間抵抗の値を測定実験により、減速機部の回転系ダイナミクス、軸受け部クーロン摩擦を数値シミュレーションによる同定により求めた。値は以下ようになる。

$$\begin{aligned} R &= 3.63[\Omega] & L &= 5.206 \times 10^{-5}[\text{H}] \\ \tilde{L} &= 1.572 \times 10^{-5}[\text{s}] & k_e &= 4.448 \times 10^{-3}[\text{Vs/rad}] \\ k_\tau &= 4.448 \times 10^{-3}[\text{Nm/A}] & N &= 381.2 \\ J &= 0.008[\text{kg} \cdot \text{m}^2] & D &= 0.009807 \\ T_{fr} &= 0.21[\text{N} \cdot \text{m}] & T_{fs} &= 0.2291[\text{N} \cdot \text{m}] \\ k_s &= 136.2 \times 10^3[\text{N/m}] \end{aligned}$$

また、図 5 に実験結果とシミュレーションの結果を示す。なお、実験結果とシミュレーション結果の傾きと出力トルクの値が異なっているのは、ギア部の剛性などによる影響、ばね定数が実験装置と異なっているためと思われる。また、作成した数理モデルより、ヒステリシス特性を得ることができることが示された。

4 トルク制御器の設計と評価

トルク制御器は、出力トルク T_d が観測可能であるものとし、これをフィードバック信号として用いることにする。また、定常偏差なく目標トルク T_r に追従させるため PI 制御を用いるものとした。なお、各フィードバックゲイン K_p, K_i は数値シミュレーションより試行錯誤的に決定し、 $K_p = 5, K_i = 3$ とした。

また、設計した制御器について、シミュレーションにおいて正弦波状の目標トルク入力に対し、制御器の有無によりどれだけヒステリシス特性を抑制できたかによる評価を行った。図 6 に結果を示す。

以上より、フィードバックによる PI 制御によるヒステリシスに対する有用性は確かめられた。

5 結言

本研究では、空中作業用マニピュレータの開発の前段階として、減速機付 DC モータの数理モデル化を行い、シミュレーションによりそのモデルにおいてヒステリシス特性が得られることを示し、設計した PI 制御によるトルク制御器によりヒステリシス特性の抑制が可能である見通しが得られた。

今後の課題としては、

- トルク制御器の応答性の改善
- 設計したトルク制御器を用いた 2 リンクアームの力制御が挙げられる。

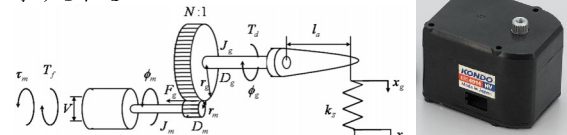


Fig.1 減速機付 DC モータ構造図



Fig.2 サーボモータ

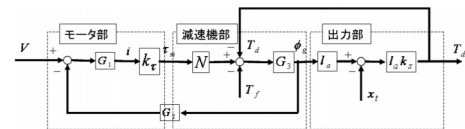


Fig.3 減速機付 DC モータ数理モデル

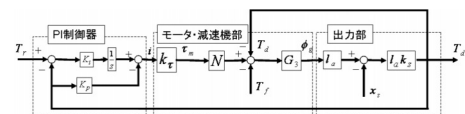


Fig.4 PI 制御ブロック線図

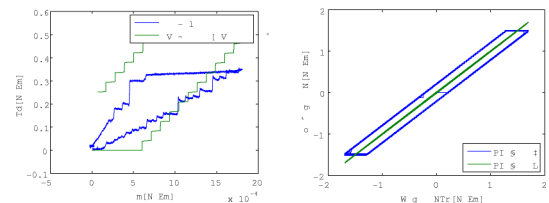


Fig.5 実験結果とシミュレーション結果 Fig.6 目標トルク T_r と出力トルク T_d

参考文献

- (1) 豊田章悟, “空中作業用マニピュレータに関する基礎研究”, 鳥取大学院平成 18 年度 修士学位論文 (予定), (2007)

空中作業用マニピュレータの力制御 (減速機付 DC モータを用いた 1 リンクアームのモデリング)

学 内田 匡隆 (鳥取大) 正 西村 正治 (鳥取大) 正 金森 直希 (鳥取大) 正 和田 信敬 (鳥取大)

1. 緒言

本研究室では災害時の救助作業の補助, 高所における試料採取などの軽作業を目的とするマニピュレータを搭載した空中作業用ロボットの開発を進めている [1]. 特に, 本研究では, マニピュレータにより対象物体との接触を伴う作業を行うことを想定し, マニピュレータ手先による力制御を行うことを目指している. 飛翔体には厳しいペイロード制限があるため, アームに要求される力を出力させるには軽量の減速機付モータを用いる必要がある. 減速機付きのモータには図 1 に示すような摩擦やヒステリシスなどの非線形性が含まれるが, 通常は出力トルクをトルクセンサより検出し, これを用いてフィードバック制御系を構成することにより, 非線形性の影響を抑制し, 力制御が実現される.

本研究では, 装置重量の低減を目指し, トルクセンサを用いることなく力制御を行うことを目指している. そのために, まずは基礎研究として, トルク制御系設計の際に必要な減速機付 DC モータの数理モデルを作成し, その物理パラメータの同定を行った.

2. 減速機付 DC モータの数理モデル

図 3 に減速機付 DC モータの構成図を, 図 4 に減速機付 DC モータの全体の数理モデルを示す. なお, G_1, G_2, G_3 はある伝達関数であり, 各記号は以下のとおりである.

- i : 供給電流
- V : 供給電圧
- V_e : 逆起電力
- L : 電機子インダクタンス
- R : 電機子抵抗
- k_τ : トルク定数
- τ_m : モータ出力トルク
- T_d : 出力軸発生トルク
- k_e : 逆起電力定数
- J : ギアの慣性モーメント
- ϕ : 軸回転角度
- r : ギア半径
- T_f : ギア軸受けクーロン摩擦
- F_g : ギア接触部の接線方向力
- N : ギア比
- k_s : ロードセル剛性
- l_a : アームの長さ
- x_g : アーム先端部変位量
- x_t : 対象物変位量
- D : ギアの粘性係数

モータ部, 減速機部, 出力部の運動方程式を導出しラプラス変換表現を用いまとめると, 以下のような式となる.

$$\tau_m = k_\tau G_1(s)(V - G_2(s)\phi_g) \quad (1)$$

$$\phi_g = G_3(s)[N\tau_m - T_d - T_f] \quad (2)$$

$$T_d = l_a k_s (l_a \phi_g - x_s) \quad (3)$$

ただし,

$$G_1(s) = \frac{e^{-\tilde{L}s}}{Ls + R}, G_2(s) = k_e N s$$

$$G_3(s) = \frac{1}{(J_g + J_m N^2)s^2 + (D_g + D_m N^2)s}$$

また, 軸受け部のクーロン摩擦は次式でモデル化する.

$$T_f = \begin{cases} f_r \operatorname{sgn}(\phi_g) & \text{if } \phi_g \neq 0 \\ \tau_a & \text{if } \phi_g = 0 \text{ and } |\tau_a| = f_s \\ f_s \operatorname{sgn}(\tau_a) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ただし, $\tau_a \cong N\tau_m - (D_g + D_m N^2)\dot{\phi}_g - T_d$ であり, f_s は静摩擦の最大値であり, また f_r は動摩擦の最大値を表す.

3. 減速機付 DC モータの物理パラメータの同定

本研究ではサーボモータ (KRS-4014HV, 近藤科学社製) のサーボドライバを外したものを使用しており, 出力軸側に角度検知用のポテンシオメータを, 減速機は平衡軸歯車減速機構を備えている. 減速比は 381.2:1 である. 使用されている DC モータの特性, すなわち電氣的時定数 $\frac{L}{R}$, トルク定数 k_τ , 逆起電力定数 k_e , 端子間抵抗 R の値を測定実験により求めた. 端子間抵抗 R は, モータ軸を固定した状態で電圧を流した際の電流値を計測することにより求め, 結果として図 5 が得られ $R = 3.63[\Omega]$ となる. 電氣的時定数 $\frac{L}{R}$ と無駄時間 \tilde{L} はモータに抵抗を

直列に設置し, モータ軸を固定した状態でステップ状に電圧を印加し, その際の抵抗に掛かる電圧を測定し, 応答電圧の最高値の 63.2% のに達するまでの時間より求め, 結果として図 6 が得られ $\frac{L}{R} = 1.890 \times 10^{-5} [H/\Omega]$, $\tilde{L} = 1.572 \times 10^{-5} [s]$ となる. 逆起電力定数 k_e はモータを外力のみで回転させ, その際発生する逆起電力と回転数より求め, 結果として図 7 のようになり $k_e = 4.448 \times 10^{-3} [Vs/rad]$ となる. また, 逆起電力定数 k_e とトルク定数 k_τ は値が等しいため $k_\tau = 4.448 \times 10^{-3} [Nm/A]$ となる.

4. 結言

本研究では, 減速機付 DC モータの数理モデル化と物理パラメータの同定実験を行った.

今後の課題としては,

- G_3, T_f の物理パラメータの同定
- トルク制御器の設計, 評価が挙げられる.

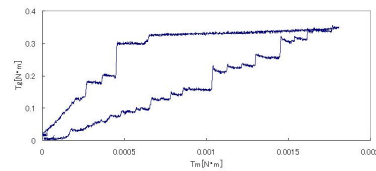


Fig.1 モータトルクと出力軸トルク Fig.2 サーボモータ

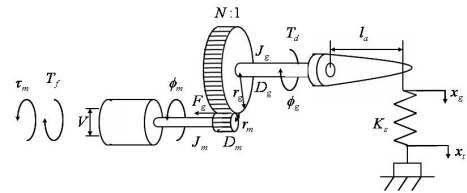


Fig.3 減速機付 DC モータ構造図

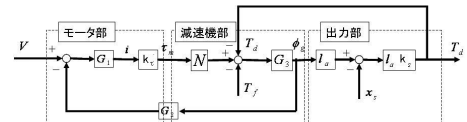


Fig.4 減速機付 DC モータ数理モデル

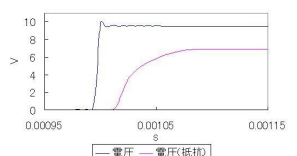
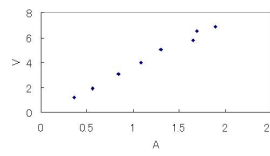


Fig.5 印加電圧と電流 Fig.6 印加電圧と抵抗電圧

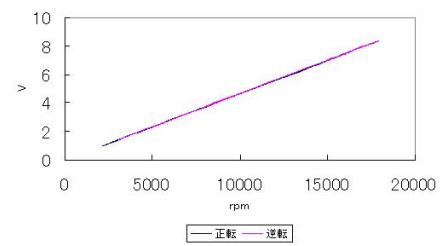


Fig.7 逆起電力と回転数
参考文献

- [1] 山際俊裕, “飛翔体とマニピュレータの特性を考慮した制御システムの設計”, 鳥取大学院 平成 20 年度 修士学位論文

1 緒言

近年, UAV[Unmanned Aerial Vehicle] は様々な場面で活躍が期待されてきている. その中で, 回転翼型の UAV は垂直離着陸やホバリング飛行などの運動が可能であり, 災害などの際に地上から侵入困難な地帯で偵察や救難活動を行える可能性がある. しかし, これらの実現には, 荒天時での飛行を可能とするような飛行安定性の向上や機体のコンパクト化が必要である. また, 回転翼型 UAV はメインロータの回転により反トルクが生じてしまうため, その反トルクを打ち消すための機構が構造的に必要となってくる.

そこで本一連の研究では, ジャイロ効果を生かしたままで, 飛行安定性が高く従来よりもコンパクトな新しい回転翼型 UAV の提案を目標としている. 昨年度までに, ピッチコントロール可能な後置静翼 (以降, 静止翼) にメインロータからの吹き降ろしの風を受けさせることによって制御の可能性が示唆されている [1][2].

本研究では, メインロータからの吹き降ろしを変化させることによって, 静止翼の性能にどのように影響するのかを検討する.

2 静止翼による姿勢制御の原理

静止翼による姿勢制御の原理について, 静止翼の概念図との断面図 (Fig.1) を用いて説明する.

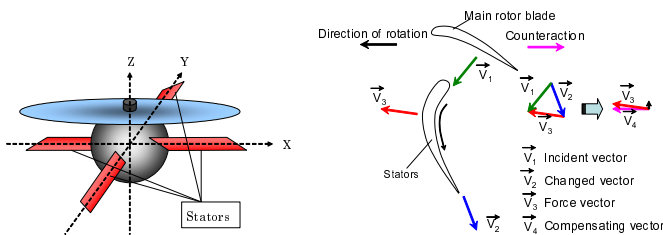


Fig.1 Conceptual diagram and Side view of stators

メインロータの下部に円弧状の静止翼を設けることで吹き降ろしの風によって静止翼に揚力が発生する. この力を利用して反トルクを補償することが可能となる.

3 静止翼性能試験

3.1 実験装置

試験装置を Fig.2 に示す.

ピッチコントロールが可能なメインロータをモータで回転させ, 推力, 回転トルクなどはモータの下に設置した 6 軸力覚センサで計測している.

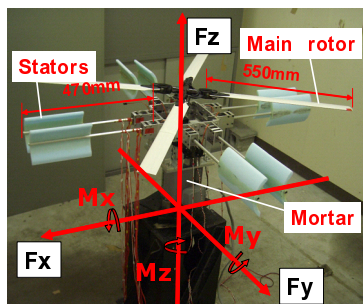


Fig.2 Experimental arrangement

メインロータの下には静止翼を 2 枚 1 組として 4 方向に取り付けた. 軸は回転中心を Z 軸, 静止翼と平行な方向をそれぞれ X 軸と Y 軸, 原点を試験機本体の測定機器上にとっている. M_z は, 反トルクと補償トルクの和を表しており, 反トルクの回転方向を正ととしている.

3.2 静止翼ピッチ角

静止翼の角度は, Fig.3 のように静止翼の中心の接線が Z 軸方向に平行である状態を 0deg とし, 反時計まわりに回転する角度を正としている.

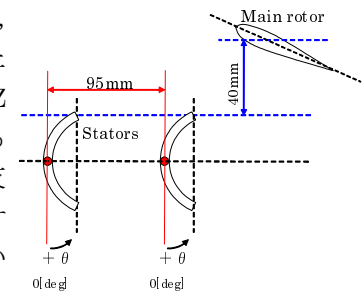


Fig.3 Definition of stators pitch

3.3 試験結果

静止翼はすべての取付角を同じとして -30deg から 50deg まで, メインロータのピッチ角は 0deg から 12deg まで変化させて測定した. メインロータを 1000rpm で回転させたときの補償トルクの測定結果を Fig.4 に示す.

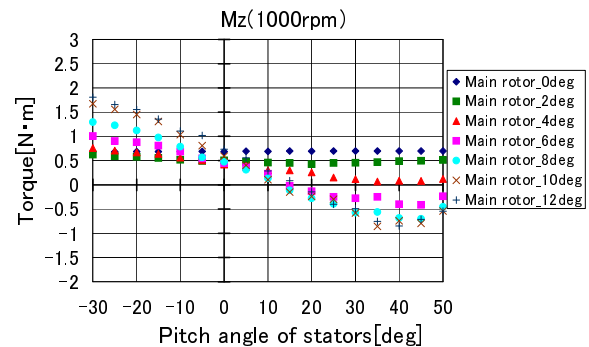


Fig.4 Compensating torque on 1000rpm

メインロータのピッチ角が 0deg~4deg では吹き下ろしの風があまり発生しておらず, 補償トルクは十分に得られていない. メインロータのピッチ角が 6deg 以上の範囲では, それぞれ静止翼の角度が約 15deg 付近で反トルクと補償トルクがつり合っており, 約 35deg 付近では補償トルクが最もよく得られているのがわかる.

4 結言

吹き下ろしが十分得られている領域では, 反トルクと補償トルクが釣り合う静止翼の角度や, 得られる補償トルクが最大である角度はメインロータのピッチ角には依存しないことがわかった. また, ここには示していないが, 静止翼による推力の減少は, 静止翼無しの状態に比べて約 10~20%程度である.

今後の課題としては, 静止翼の断面形状の最適化や, 静止翼の動的変化による機体への影響を明らかにすることなどが挙げられる.

参考文献

- (1) “中国四国学生会第 38 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集”, 社団法人日本機械学会, p.128, 2008 年
- (2) “中国四国学生会第 39 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集”, 社団法人日本機械学会, p.309, 2009 年

後置静翼による UAV 姿勢制御機構の開発 (メインロータピッチ角の変化による影響の検討)

学※大西 威徳 (鳥取大) 正◎西村 正治 (鳥取大) 正 和田 信敬 (鳥取大)

1. はじめに

近年, UAV[Unmanned Aerial Vehicle](自律無人飛行体)は様々な場面で活躍が期待されてきている. 中でも回転翼型 UAV は垂直離着陸やホバリング飛行が可能であり, 災害などの際に地上から侵入困難な地帯で偵察や救難活動を行える可能性がある. しかし, これらを実現するためには, 荒天時での飛行を可能とするような飛行安定性を向上や, 従来の UAV よりもコンパクトにする必要がある. また, 回転翼型 UAV はメインロータの回転により反トルクが生じてしまうため, 機体にはその反トルクを打ち消すための機構が構造的に必要となる.

そこで一連の研究では, ジャイロ効果を生かしたままで, 飛行安定性が高く従来よりもコンパクトな新しい回転翼型 UAV の提案を目標としている. 昨年度までに, ピッチコントロール可能な後置静翼 (以降, 静止翼) にメインロータからの吹き降ろしの風を受けさせることによって制御の可能性が示唆されている [1].

本研究では, メインロータからの吹き降ろしを変化させることによって, 静止翼の性能にどのように影響するのかを検討する.

2. 姿勢制御機構

静止翼による姿勢制御の原理について, 静止翼の概念図との断面図 (Fig.1) を用いて説明する.

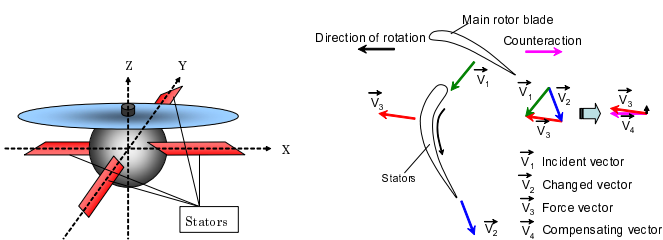


Fig.1 Conceptual diagram and Side view of stators

メインロータの下部に円弧状の静止翼を設けることで吹き降ろしの風によって静止翼に揚力が発生する. この力を利用することで反トルクを補償することが可能となる.

3. 静止翼性能試験

3.1 実験装置

試験装置を Fig.2 に示す.

ピッチコントロールが可能なメインロータをモータで回転させ, 推力, 回転トルクなどはモータの下に設置した 6 軸力覚センサで計測している. メインロータの下には静止翼を 2 枚 1 組として 4 方向に取り付けた.

軸は回転中心を Z 軸, 静止翼と平行な方向をそれぞれ X 軸と Y 軸, 原点を試験機本体の測定機器上にとっている. M_z は, 反トルクと補償トルクの和を表しており, 反トルクの回転方向を正ととっている.

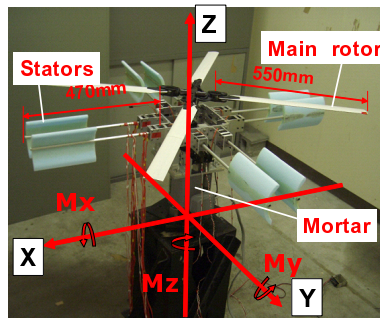


Fig.2 Experimental arrangement

3.2 静止翼ピッチ角

静止翼の角度は, Fig.3 のように静止翼の中心の接線が Z 軸方向に平行である状態を 0deg とし, 反時計まわりに回転する角度を正として

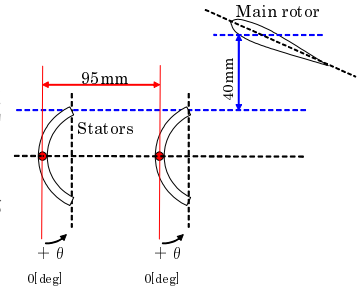


Fig.3 Definition of stators pitch

3.3 試験結果

静止翼は 1 組の静止翼の角度を同じとして -30deg から 50deg まで, メインロータのピッチ角は 0deg から 12deg まで変化させて測定した. メインロータを 1000rpm で回転させたときの補償トルクの測定結果を Fig.4 に示す.

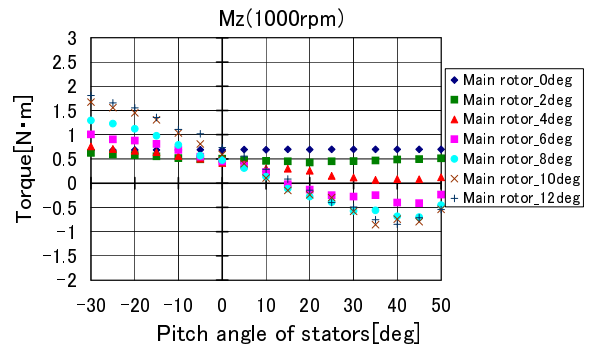


Fig.4 Compensating torque on 1000rpm

メインロータのピッチ角が 0deg~4deg では吹き下ろしの風があまり発生しておらず, 補償トルクは十分に得られていない. メインロータのピッチ角が 6deg~12deg の範囲では, それぞれ静止翼の角度が約 15deg 付近で反トルクと補償トルクが釣り合っており, 約 35deg 付近では補償トルクが最もよく得られているのがわかる.

4. 結言

吹き下ろしが十分得られている領域では, 反トルクと補償トルクが釣り合う静止翼の角度や, 得られる補償トルクが最大である角度はメインロータのピッチ角には依存しないことがわかった. また, ここには示していないが, このときの推力は静止翼の角度にほとんど影響しないことがわかった.

今後の課題としては吹き下ろしが少ないときの補償トルクの確保や, 静止翼の動的変化による機体への影響を明らかにすることなどが挙げられる.

参考文献

- [1] 丸石和弘, 西村正治, 金森直希, 伊藤和寿, UAV 姿勢制御用後置静翼の開発 (反トルク補償の可能性に関する検討), 日本機械学会中国四国学生会第 38 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, p.128, 2008 丸石 和弘

1. 緒論

ダヴィンチプロジェクトでは、垂直離着陸が可能な未来ビークル開発のために、より高比出力なマイクロエンジンを必要としている。しかしマイクロエンジンはピストンの圧縮のみで燃焼が行われ、多点で同時に自己着火させる機関であるため着火時期制御が難しいとされている。負荷条件の変更、燃焼促進剤としてのニトロ比率の変更を行い、当量比別出力と熱効率の関係を調べることで、高比出力化の検討と同時にマイクロエンジンの圧縮時着火燃焼形態を把握する。

2. 実験装置

(1) 出力測定方法

Fig.1 に出力測定方法を示す。エンジン出力軸にファンブレーキを取付け、ファンブレーキ回転数から(1)式によって出力 W(PS)を算出する。

$$W = C \gamma A D^3 \left(\frac{n}{1000}\right)^3 \quad (1)$$

C: ファンブレーキ形状によって決定される係数(=54.5)
 γ : 空気密度(=1.2(kg/m³)), A: 翼投影面積(m²)
 D: 刃先円直径(m), n: 回転数(rpm)

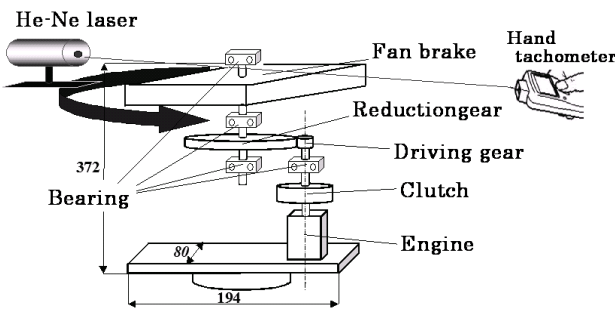


Fig.1 Experiment apparatus.

(2) 燃料流量測定方法

電子天秤を使用し、タンク内の燃料の減少を 2 秒ごとにパソコンに出力することで、燃料流量を求めた。

(3) 空気流量測定方法

サージタンクの入り口に丸型ノズルを設け、空気がノズルを通過してタンク内に流入するときの外部の大気圧 P₁(N/m²)とサージタンク内の圧力 P₂(N/m²)の差より空気流量 G(kg/s)を測定した。ノズルは管路入り口に設け直接大気を吸入する。

$$G = \alpha F \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)} \quad (2)$$

α : 流量計数(=0.822), F: 絞り板の開口面積(m²)
 ρ : 空気密度(kg/m³)

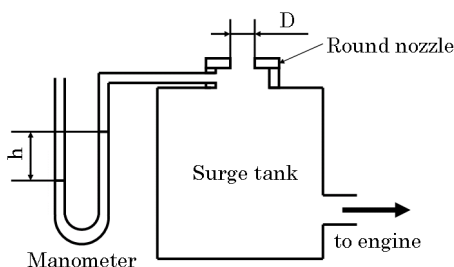


Fig.2 Air flow meter.

3. 実験方法

スロットル開度 1/4 一定のもとで、負荷条件を小と大の 2 種類、圧縮比を 10, 燃料をニトロメタン比率 15, 23, 30% の 3 種類として実験を行った。また当量比の変更は燃料調量ニードルの変更によって行った。

4. 実験結果

今回は負荷条件を小と大、圧縮比を 10, ニトロメタン比率を 15, 23, 30%として、当量比と出力、熱効率の関係について調べた。

Table.1 Palameter and symbols in Fig.3 and Fig.4.

Palameter	Nitromethane ratio	Symbol
Horse power	15%	Blue diamond
	23%	Green triangle
	30%	Red circle
Thermal efficiency	15%	Blue diamond
	23%	Green triangle
	30%	Red circle
Fuel flow rate	15%	Blue diamond
	23%	Green triangle
	30%	Red circle
Air flow rate	15%	Blue diamond
	23%	Green triangle
	30%	Red circle

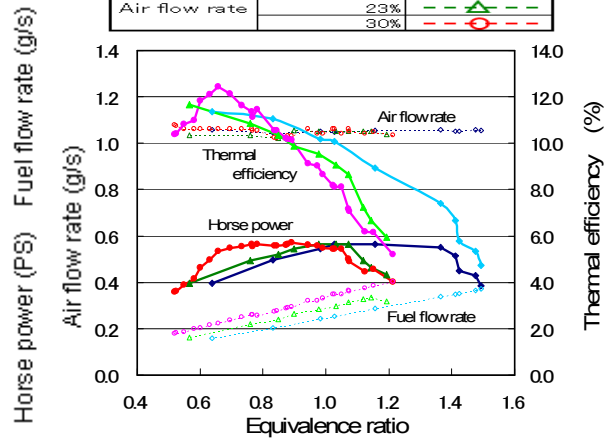


Fig.3 Horse power and thermal efficiency at low load.

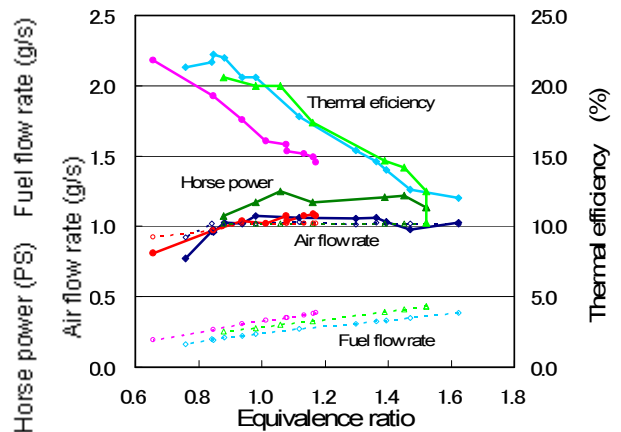


Fig.4 Horse power and thermal efficiency at high load.

5. 結論

- (1) 負荷が高いほうが、熱効率が向上する。
- (2) 燃料中ニトロ比率の増加は、必ずしも出力増加につながるとは限らない。
- (3) 燃料ごとに出力、熱効率が最大となる当量比領域が存在する

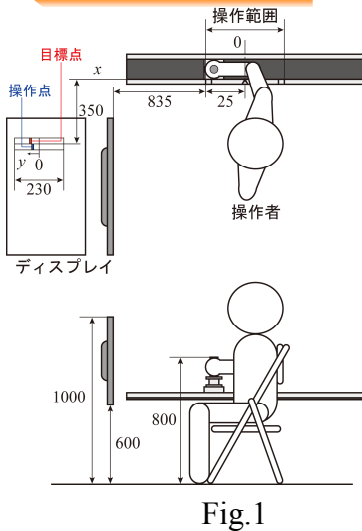
その他(ポスター用原稿)

マンマシンシステムの操作における感性要素の検討

I. 研究目的・概要

- 操作感を多次元の軸として設定し、操作感覚を定量的に示し、任意の操作感を実現すること。
- 総合評価と操作感因子との関係を表すモデル式、操作感因子と物理量の関係を表すモデル式を求めた。

II. 操作感実験



本研究ではFig.1に示した装置を実験装置として用いている。このインピーダンスモデルをバネ・マス・ダンパ系とし、 m, c, k の値を実験パラメータとして18条件について操作感実験を行った。

操作内容は、目標点に操作点を合わせる追従操作とした。そして、各条件別に操作感についてアンケートを実施した。アンケート項目はTable.1で示した6項目である。

Table.1 操作感因子

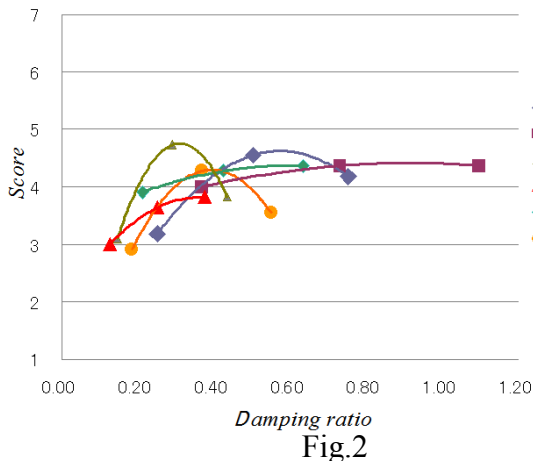
E_1	快適な	↔	不快な
E_2	動きが機敏な	↔	動きが鈍重な
E_3	手ごたえのある	↔	手ごたえのない
E_4	動きが緩やか	↔	動きが険しい
E_5	特徴的で飽き難い	↔	単調で飽き易い
E_6	総合的に良い		総合的に悪い

III. 操作感のモデル化

アンケート項目の E_6 を F とし、操作感実験のアンケート結果から F と $E_1 \sim E_5$ の関係式、 $E_1 \sim E_5$ と物理量の関係式を重回帰分析によりモデル化した。このときの物理量は装置のインピーダンスモデルがバネ・マス・ダンパ系なことから質量 m 、減衰比 ζ 、固有各周波数 ω_n とした。その結果を以下に示す。

$$\begin{cases} F = 0.803E_1 + 0.0268E_2 + 0.0558E_3 + 0.283 & (1) & \text{決定係数} 0.722 \\ E_1 = -0.0048m - 0.0574\omega_n + 1.209\zeta + 3.626 & (2) & \text{決定係数} 0.355 \\ E_2 = -0.0941m - 1.316\omega_n - 0.893\zeta + 9.694 & (3) & \text{決定係数} 0.751 \\ E_3 = -0.0810m + 1.206\omega_n + 0.689\zeta - 0.509 & (4) & \text{決定係数} 0.747 \end{cases}$$

V. 考察・結言



固有各周波数別に操作感因子 E_1 の平均点と減衰比 ζ の関係をFig.2に示した。このグラフから E_1 と ζ の関係は線形関係ではなく、 ζ は最適値を持つことが推測される。

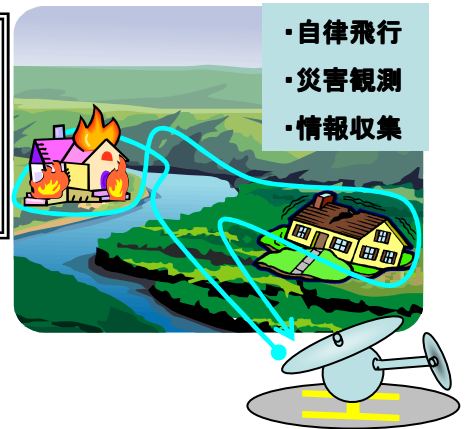
本研究で用いた分析手法は線形式で関係式を求める重回帰分析であった。そのため、この2つの関係を表すことができなかったと考えられる。

以上のことより、本研究では F と $E_1 \sim E_5$ の関係式、 $E_1 \sim E_5$ と物理量の関係式を重回帰分析によりモデル化できたが操作感因子 E_1 と減衰比 ζ の関係式についてはモデル化できなかったといえる。今後はこの関係を明確にすることが課題として考えられる。

後置静翼による UAV 姿勢制御機構の開発

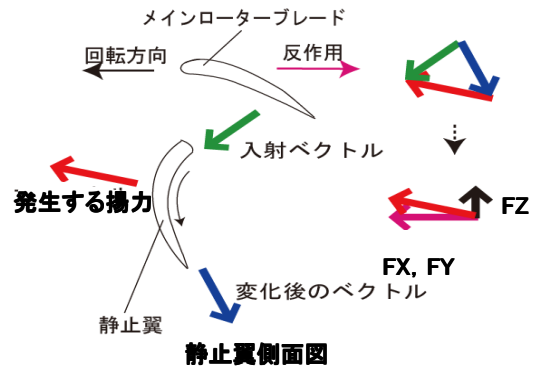
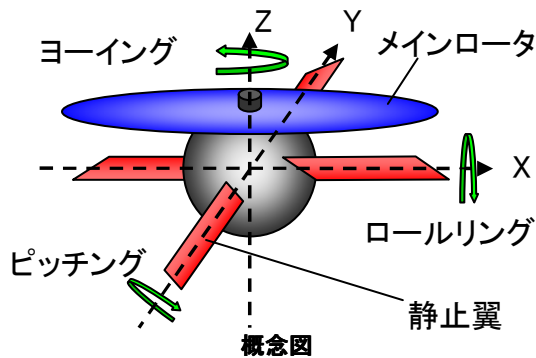
はじめに

現在、様々なUAVが多く開発されるようになってきている。そこで本研究ではUAVの利用をより幅広いものにするため、従来よりもコンパクトで飛行安定性のよい回転翼型UAVの提案を目的とする。



～静止翼を用いた制御機構～

新しい姿勢制御機構として、メインロータの下部に静止翼を取り付け、その静止翼に発生する揚力を利用して反トルクを補償するものが考えられた。

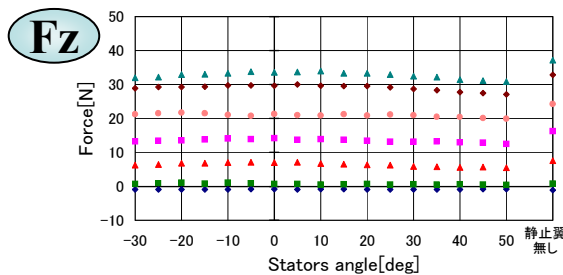
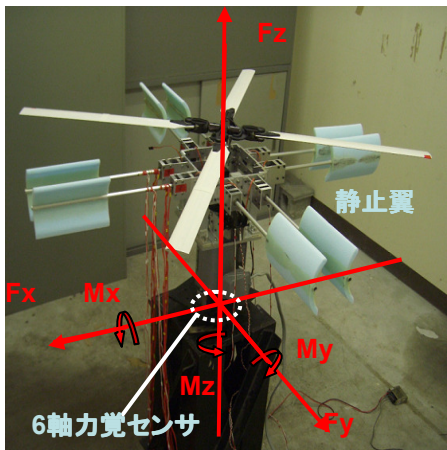


静止翼を用いる利点

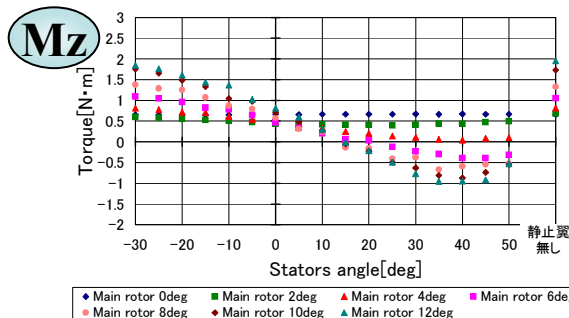
- ・ジャイロ効果による飛行安定性を有効利用できる。
- ・メインロータ半径の内側に姿勢制御機構があるので、より狭い空間で飛行が可能。
- ・メインロータからの吹き下ろしを主に用いるので多少の外乱には影響されない。

～静止翼の性能試験～

メインロータのピッチ角と、静止翼の取付角を変化させ、取り付けしている6軸力覚センサより6軸成分(Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz)を測定。



- ・静止翼の設置による揚力の減少は少ない
- ・浮上する条件においても反トルクを十分に補償できている



静止翼による姿勢制御の可能性が示された。

連絡先

西村正治教授

TEL/FAX: 0857-31-5198

E-mail: mnishimura@mech.tottori-u.ac.jp