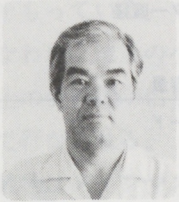
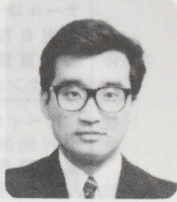


産業用無人ヘリコプタ R-50



スカイ事業部技術部

久富



暢

佐藤

彰



松田篤志



技術本部要素研究部

神谷剛志

はじめに

日本で空中散布と云えば有人ヘリコプタによる散布が殆んどであり、88年度では水田のみで約174万haに空中散布が行なわれている。

これは全国の水田のわずか29%程でしかない。近年ではドリフト(飛散)等による公害問題により年々空中散布の出来る面積は減少している。

こうした情勢のなかで、農林水産省の下部組織である農林水産航空協会が、昭和55年に無人の空中散布装置(Remote control aerial spray system)の開発に取り組み、ヤマハ発動機も昭和58年よりこの開発に参加し64年度の最終年まで開発を担当して来た。

当初のRCASSは、2重反転型の無人ヘリコプタで、飛行姿勢制御によりコントロールする様に考えていた。昭和62年～63年にかけてフライトテストに成功したが、複雑な構造、及び制御系機器等によるcostの上昇、重量のup、信頼性の作り込み困難等の障害が大きく研究開発の域より抜け出られないままとなっている。

このような状況の中で、より商品化へ早く到達出来る形としてシングルロータのR50の開発に着手し今日販売が出来るまでになっている。

R-50は少量散布(8倍液)で1haの面積を1回(8ℓ/ha)のフライトで散布出来る様な能力をもち、そのフライト時間は約6分で1haを散



写真1 2重反転式無人ヘリコプタ RCASS



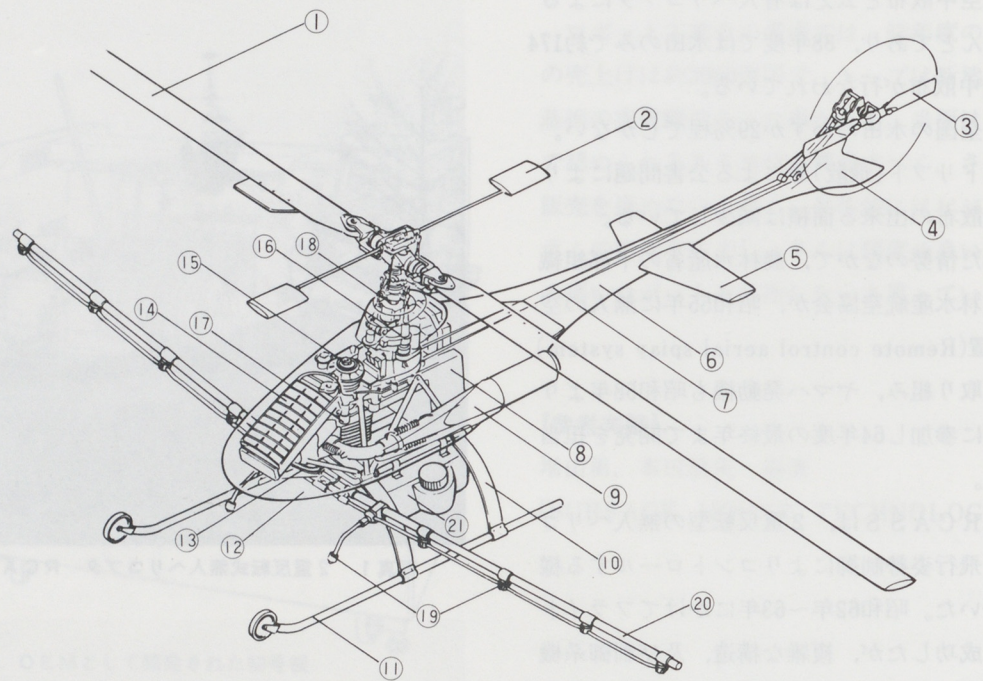
写真2 無人ヘリコプタ R-50

布出来る。この能力は地上での人力による散布に比べると脅威的に短い時間での散布を可能にしている。さらにドリフト(飛散)は実機ヘリコプタの散布に比べるとはるかに少く、音も静かであり公害問題は当然少くなり、現在空中散布の出来ない地方の殆んどに無人ヘリなら空中散布が可能になると思われる。

表－１ 農業用無人ヘリコプター R-50 の主要諸元

機 体	全長(メイン、テールローター含む)	3,565mm
	胴 体 長	2,555mm
	全 幅	640mm
	全 高	1,000mm
	メインローター直径	3,000mm
	テールローター直径	550mm
	運用自重	44kg
性	離陸重量	67kg
	燃料タンク容量	4ℓ
能	実用ペイロード	20kg
	飛行時間	30分
	高度限界	100 m
	制御範囲	200 m (目視範囲)
エ ン ジ ン	種 類	水冷・2 サイクル
	総 排 気 量	98cc
	最高出力	12ps
	使用燃料	ガソリン・オイル混合

1. 産業用産人ヘリコプタ R-50の構造



- ①メインロータブレード
②スタビライザーブレード
③テールロータブレード
④垂直尾翼
⑤水平尾翼
⑥テールボディー
⑦テールロータドライブベルト
- ⑧燃料タンク
⑨マフラ
⑩リーフ
⑪ランナー
⑫カウリング(左右)
⑬ウォータポンプドライブベルト
⑭ラジエタ
- ⑮スタータナット
⑯スライドサーボ
⑰エンジン
⑱メインマスト
⑲ノズルアセンブリ
⑳ブーム
㉑薬剤タンク

図 1

エンジンは水平に置かれ、クランクシャフトの軸心は上下方向に配置されている。エンジン回転

は遠心クラッチを経てギヤ減速によりメインロータ、及びテールローターへ伝えられる。

基本骨格は、ミッションケースをフレームの一部としたパイプフレームとモノコック(FRP)のテールボディより出来ている。リーフはFRP製でスプリング効果をもっている。

操縦は無線で行なわれ、地上のパイロットが送信機を操作し、機上の受信機が信号を受けて5ヶのサーボを動かして行なわれる。

散布装置等の搭載物はメインマストの直下に配置出来る様になっており、重心の変化により飛行特性の変ることを防いでいる。

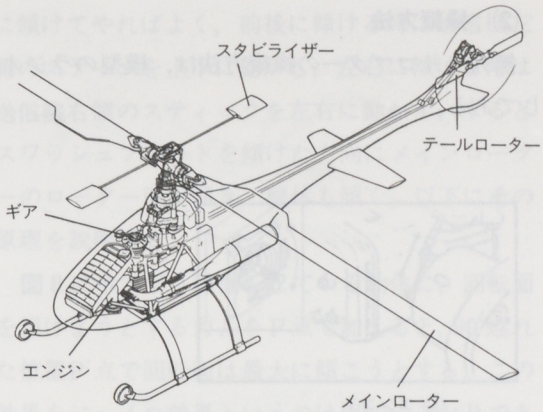


図2 無人ヘリ操縦の基本要素

2. 産業用無人ヘリコプターの飛行について

(1) 飛行原理

無人ヘリコプターの飛行原理は通常の有人ヘリコプターと同じである。

エンジンにより発生した動力をギヤにより減速させて、メインローターを回転させる。これによって揚力を発生させて飛行させる。(図2参照)

ところが、空中でメインローターをエンジンの力で回転させると、その反動トルクによりヘリコプターがメインローターの回転方向と逆の方向に回ってしまうため、テールローターによりそれを打ち消す。

またスタビライザーは、ヘリコプター固有の不安定性を緩和させるためにつけられているものである。

ローターから発生する揚力は、ローター面にはほぼ垂直に発生するため、ローター面を傾けてやればその方向に進む力が発生する。(図3参照)

またヘリコプターを回転させるには、前述のテールローターの推力を加減してやることにより、その発生トルクと反動トルクの差が生じ回転させることができる。

以上によりヘリコプターは前後、左右、上下に自由に飛行することができる。

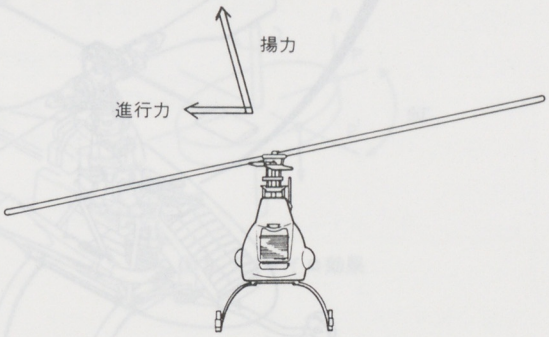


図3 進行力の発生

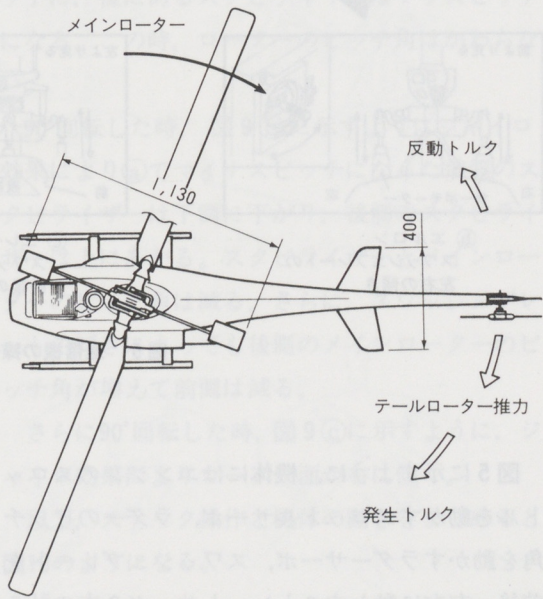


図4 回転トルクの発生

(2) 操縦方法

無人ヘリコプターの操縦方法は、模型のラジオコントロール(通称ラジコン)ヘリコプターと基本的に同じである。

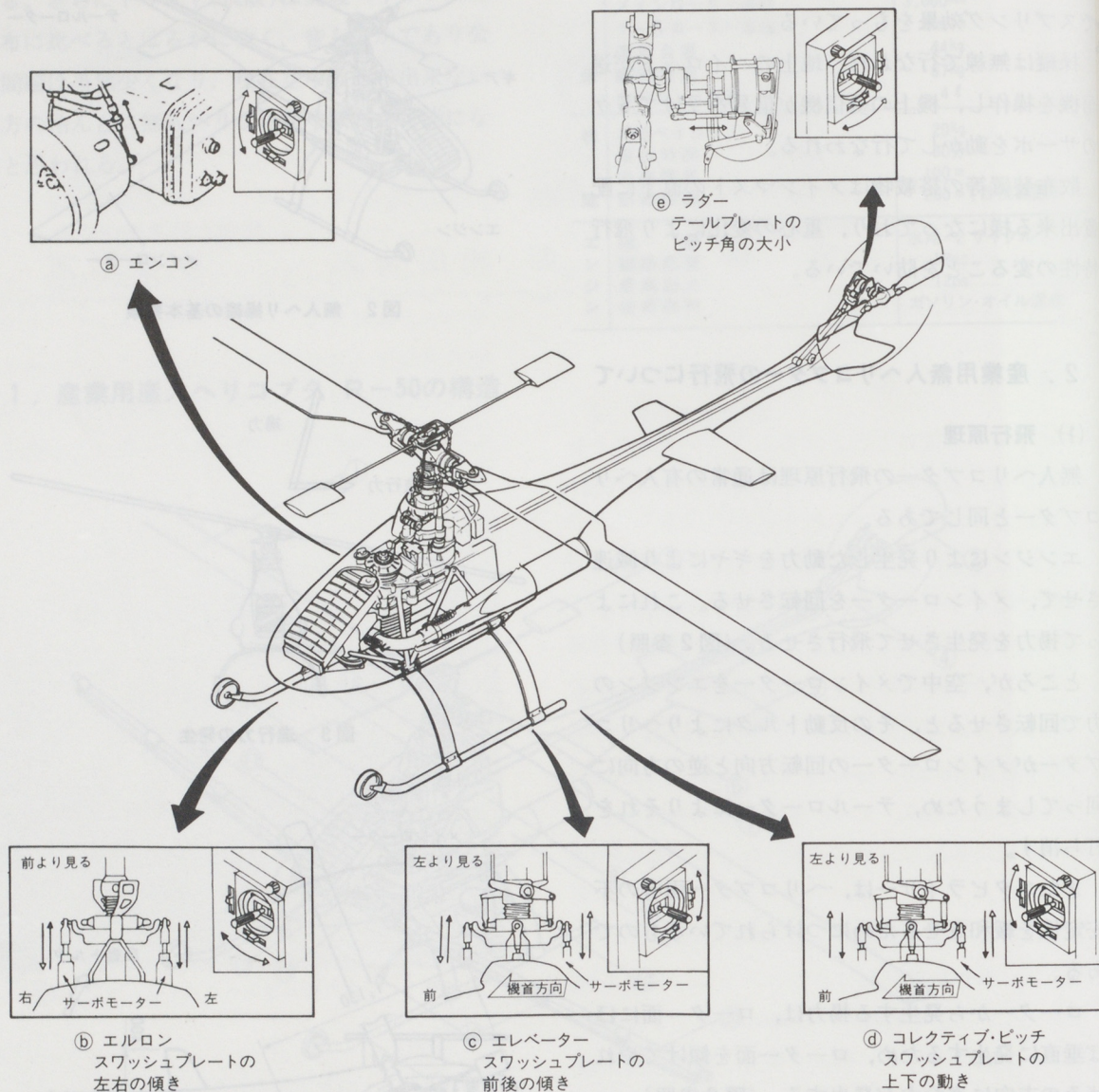


図5 送信機の操作とサーボモーターの動き

図5に示すように、機体にはエンジンのスロットルを動かすスロットルサーボ、ラダーのピッチ角を動かすラダーサーボ、スワッシュプレートを前後・左右に動かすストレートサーボ3本の計5個のサーボモーターが使用されており、これらは

送信機のステックを動かすことにより操作することが出来る。

以下にスティック操作と機体の運動を示す。

(図は動作がわかりやすいように簡素化して示してある。)

①上昇，下降

機体を上昇させたい時は、図5(a)(d)に示すように送信機右側のスティックを上動かす。するとスワッシュプレートが上昇し、図6に示すようにメインブレードのコレクティブピッチ角が大きくなり、揚力が増大するので機体は上昇する。

またこの時、プレートに加わるトルクも増えるので、エンジンスロットルを連動して開ける。下降させたい時はスティックを下動かす。

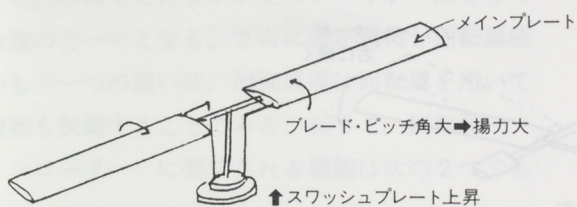


図6 上昇

②回転

機体を時計まわりに回転させる時は図5(e)に示すように、送信機左側のスティックを右に倒す。するとテールブレードのピッチ角が大きくなり、テールローターの推力が増えるので機体は時計まわりに回転する。(図7参照)

反時計まわりにまわしたい時は、スティックを左に倒す。

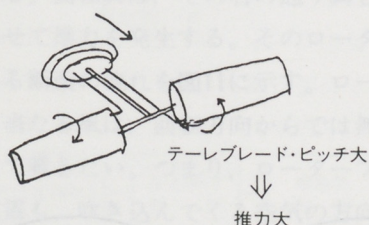


図7

③傾き

機体を傾け、その方向に進めるためには、図5(b)(c)に示すようにスワッシュプレートをその方向

に傾けてやればよく、前後に傾ける時は送信機左側のスティックを上下に動かし、左右に傾ける時は送信機右側のスティックを左右に動かす。するとスワッシュプレートを傾けた方向にメインローターのローター面が傾き、機体も傾く。以下にその原理を説明する。

図8に示すように回転している物体に、回転面を傾けようとする力AをP点で加えると、90°遅れた位置P'点で回転面は最大に傾こうとする。この効果をジャイロ効果というのは周知のとおりである。

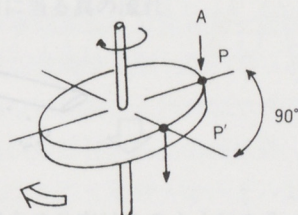


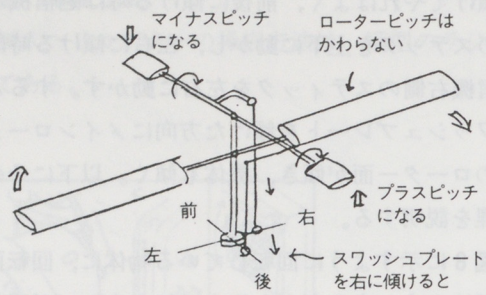
図8 ジャイロ効果

図9(a)に示すように、スワッシュプレートを右に傾けると前にあるスタビライザーはマイナスピッチに、後にあるスタビライザーはプラスピッチになる。この時、ローターのピッチ角はかわらない。

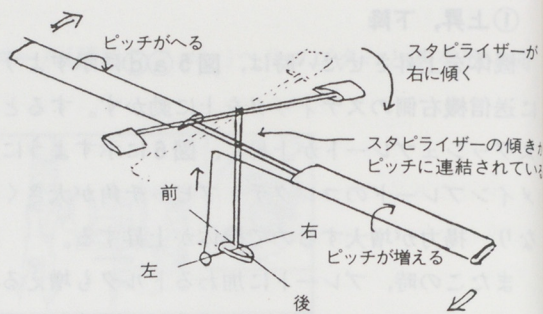
90°回転した時、図9(b)に示すようにジャイロ効果により(a)でマイナスピッチになった前側のスタビライザーは下側に下がり、後側のスタビライザーは上にあがる。スタビライザーとメインローターのピッチ角は減る。さらに、スワッシュプレートの傾きによっても後側のメインローターのピッチ角が増えて前側は減る。

さらに90°回転した時、図9(c)に示すように、ジャイロ効果によりローター面が右に傾く。

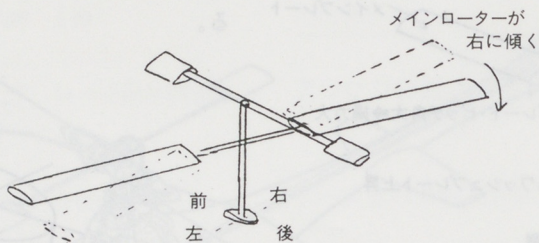
以上、スティック操作と機体の動きをまとめると図10のようになる。



① スワッシュプレートを右に傾ける
→スタビライザーのピッチが変化

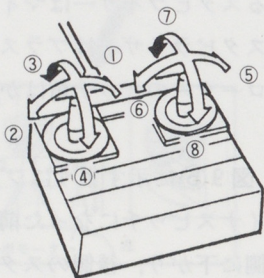


② スタビライザーが右にかたむく



③ ローター面が右に傾く

図 9



- | | |
|--------|-----|
| ①ラダー | 右 |
| ②ラダー | 左 |
| ③エレベータ | ダウン |
| ④エレベータ | アップ |
| ⑤エルロン | 右 |
| ⑥エルロン | 左 |
| ⑦エンコン | ハイ |
| ⑧エンコン | ロー |

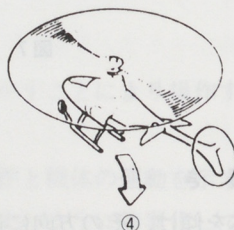
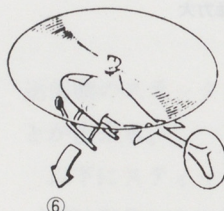
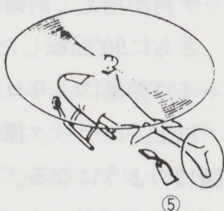
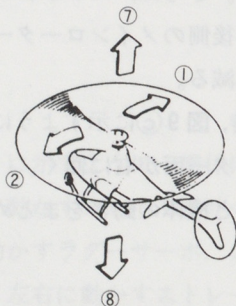
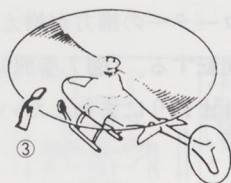


図10 スティック操作と機体の動き

3. メインローターの役割

(1) メインローターの機能

航空機には2つのタイプがあり、固定翼機と回転翼機とに分類される。固定翼機は主翼を備え、これが機体と一緒に空気中を進むことによって揚力と抗力を発生する。一方回転翼機は、翼を単独で空気中を進ませて揚力と抗力を発生する。この発生する揚力と抗力の比を揚抗比と呼び、揚抗比を如何に高くとれるかが空力デザイナーにとって永遠のテーマとなる。さらに固定翼機と回転翼機のもう一つの違いは、回転翼機は回転翼を用いて運動も制御することにある。従って、回転翼（メインローター）に要求される機能は次の2つである。

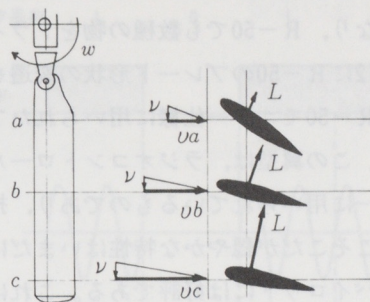
①推力（機体を浮上させる揚力）の発生。

②機体の運動の制御。

この2つについて以下に紹介する。

(2) 推力を発生するメカニズム

流体の運動の変化は、その変化の起こるポイントだけで完結せず、その回り相当広い範囲に影響を与える。従って、ある一部分の形状を決定するためには全体との関係から考えることが不可欠となる。例えば翼端の形状を変えただけで翼根の流れが変わってしまう場合がある。ここに翼設計の難しさがある。回転翼は、その名の通り翼を強制的に回転させて推力を発生する。そのローターブレードのある断面の流れを図11に示す。ローターブレードに当たる風は、回転方向からでは無いことに注意して載きたい。つまり、ローターブレードのどの位置も、吹き込んでくる空気の方および速度が異なる。この状況の中で、ローターブレード各断面にわたって揚抗比を最大限にする設計となる。これに前進速度が加わると、ローターブレード回りの流れは複雑際まりなく、ここまで細部にわたった最適設計は残念ながらまだ当社では確立できていない。現R-50に於いては、実際の



w : ローター断面の回転による空気との相対速度

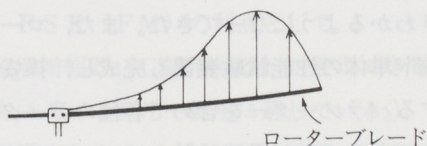
ν : ローターが推力を発生することにより誘導されさ吹き下し速度

V : 翼断面に当る真の流れ

L : 揚力



この結果揚力の分布はこのようになる



(参) 固定翼

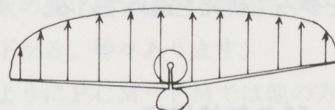


図11 推力発生メカニズム

使用状況に合うと思われる条件を限定して設計を行なっている。

(3) R-50について

揚抗比を司るのは、大まかに言って翼型形状と平面形状である。翼型形状は翼上面と下面の基本的な圧力差を作り、平面形状はその圧力差の分布を決める。この2つの諸元を如何に組み合わせて

揚抗比をあげるか、というのがブレード空力設計の目標となり、R-50でも数種の物をトライしている。図12にR-50のブレード形状の変遷を示す。

a) は、R-50モニター仕様用に用いられたブレードである。この翼型は、ラジオコントロールのヘリコプターに用いられているものであり、推力性能こそそこそこだが穏やかな特性はいまだに飛ばし易いとパイロットには好評である。これに対して推力アップを狙った物がb)で、a)に比べ約7%の向上を見、現在のR-50生産モデルに採用された物である。翼後縁部が少し反り上がった翼型と、テーパー形状の平面形が特徴であるが、開発当時はまだデータも少なく定量的最適設計が難しい状況にあったので、簡単な性能計算と定性的な経験にて決めた形状がこの特徴的な翼型と平面形状である。推力的にはほぼ目標値に達したが、操安性的にはいま一歩と言うところである。

現在は、推力性能は電算シミュレーションでかなりわかるようになってきた。また、ローターブレード単体の性能試験装置も完成し、操安性に影響するパラメーターを含めて各種のデータを蓄積しつつある。まだ最適設計とはいいがたいが、いずれ実機並のローター効率を持つ小型無人ヘリが出来る日を夢みて研究を進めている。

4. R-50の無線操縦

(1) 無線操縦器の構成

R-50の無線操縦器はPCM(Pulse Code Modulation)-FM方式を用いており、その構成は図13(a), (b)のようになります。

送信機は、ジョイスティックの操作された位置をポテンションにより電気的に読みとり、A/Dコンバータでデジタルのデータに変換します。デジタルのデータはマイクロコンピュータによりPCM変換されます。PCM変換では、A/D変換により量子化されたジョイスティックの位置データの他にデータの識別コードや誤り検出のための

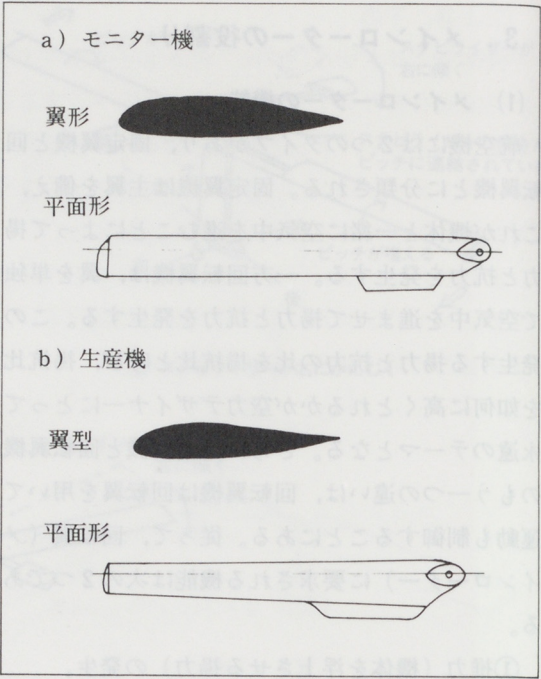
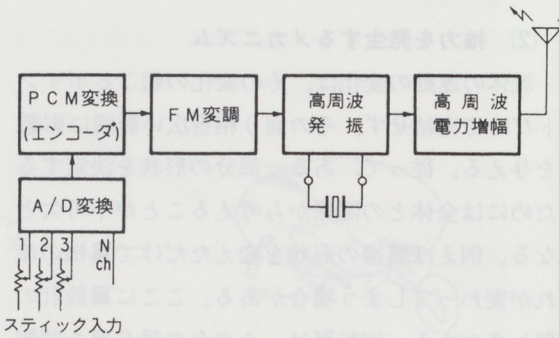
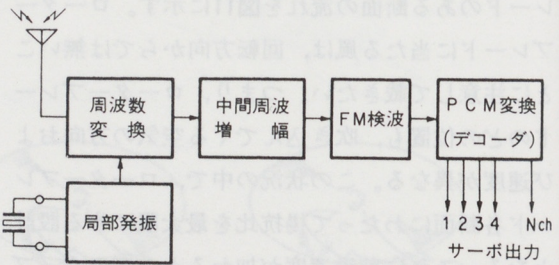


図12 R-50ブレード形状の変遷



(a) 送信機



(b) 受信機

図13

データ、受信側でデコードを行なうために必要な同期信号等を加え“0”と“1”のパルス列にしてFM変調器に送ります。FM変調、高周波発振では、入力したパルスの状態(“1”or“0”)に応じて発振周波数を変化させます。この出力を高周波増幅器により増幅しアンテナに送り空間へ電波として放出します。

機体に搭載された受信機では、アンテナにより電波を拾い局部発振器からの信号と混合し電波の周波数と局部発振の周波数の差の周波数を中間周波増幅へ送ります。中間周波増幅では、送信機から送られた特定の周波数帯のみを増幅し、FM検波器でもとのパルスの状態“0”、“1”を検出します。この“0”と“1”のパルス列を再びマイクロコンピュータによりPCM変換し、各チャンネルのサーボモータに指令値を出力します。

以上のようにして常時ジョイスティックの操作量が機体上のサーボモータへ伝えられます。

(2) PCM-FM方式の利点

現在のラジコンシステムでは通常PCM-FM方式が利用されていますが、その理由として以下のような利点があります。

《PCMの利点》

- 1) デジタルのデータ列となっているので信号の時間密度は均一であり、一定の周波数成分内に収めることができる。このため一定の周波数帯域を連続的に使用できる現在の周波数分割によって構成される無線システムではその利用効率が良い。
- 2) 符号化により誤り制御ができる。

《FMの利点》

デジタルデータの変調方式は図14のように大きく分けて3種類あります。ASKはAMと同じで振幅でデータの判別をします。FSKがFMと同じで周波数を変化させデータの判別を行ないます。PSKはデータの状態により搬送波(電波と

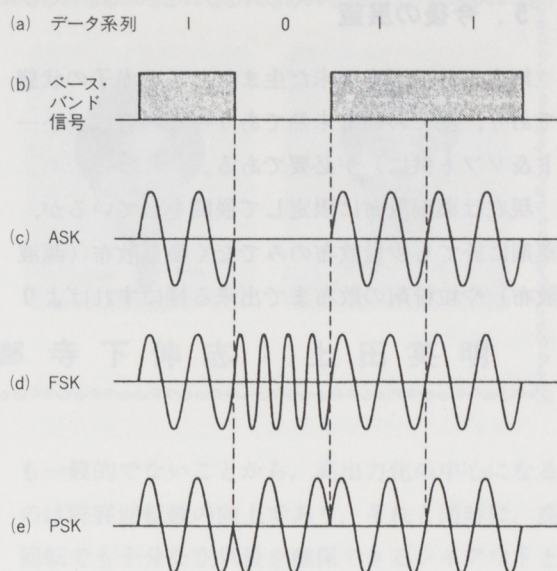


図14

して放出する特定の周波数の波)の位相を変化させます。FSK(FM)の利点として

- 1) 非線形増幅器(C級増幅器)が使用でき電源効率が良い(バッテリー使用に適している。)
- 2) 定振幅のためフェージング(周囲の状況によって生じる電波の強弱)に強い。
- 3) 周波数の変化量を大きくするとデータ誤りの発生率が下がる。等々あります。

以上のようにPCM-FMでは他の方式に比べデータの誤りが発生し難い、小型軽量にできる等の特徴があります。

5. 今後の展望

無人ヘリコプタは未だ生まれたての赤子の状態であり、全ての面で未熟であり今後の育成（ハード&ソフト共に）が必要である。

現在は薬剤散布に限定して展開をしているが、薬剤に於ても少量散布のみでなく微量散布（源液散布）や粒粉剤の散布まで出来る様にすればより

広がりが期待出来る。

又、空中撮影等他についても、その機器の開発と安全基準の整備により用途の広がりが考えられる。

この様に用途の広がりと同時に、底辺の広がりを期待する為に、姿勢制御、自動操縦等の相当高度な技術についても今後開発を進めて、操縦の容易化を計って行きたいと考えている。

