

電算機による植物生育プロセス制御の基礎的研究 (III)

温湿度制御におけるフィードフォワード・フィードバック・アルゴリズム¹⁾船田 周*・橋本 康*・大政 謙次*
岡田 耕二*・安保 文彰*

愛媛大学農学部農業工学科*

本論文では温湿度二変数制御系における過渡特性が議論されている。すなわち、実測値からえられた湿度操作の特性にもとづき湿度制御系へのフィードフォワードアルゴリズムの導入が検討されている。本論文でとりあげられた相対湿度一定、温度 5°C ステップ変動の二変数制御モデルでは、温湿度ともそれぞれフィードバック制御の場合には相対湿度の変動幅は 6~8% RH であり、その制御の安定性は悪い。これに反し、湿度に上記のフィードフォワード制御を導入したフィードフォワード・フィードバック制御では、相対湿度の変動幅が 2% RH 以内と改善される。その制御の安定性は定常制御における振幅以内の良好な制御結果となっている。

1974年3月25日受付

1. まえがき

植物生育プロセス制御を電算機で行ういわゆるDDCシステムの特徴の一つには、従来のフィードバック制御のみでなく、制御変数間の複雑な相互関係を前もって計算し、与えられた目標値や外乱に対処して予測的に制御を行ういわゆるフィードフォワード制御を可能とする点がある。前報¹⁾では温度変数につき検討を加えたので、本報では湿度変数に着目し、その特性を考慮して温湿度制御で大きな壁となっている温湿度の過渡特性の改善につき行った研究を報告する。

2. システムの概要と特性

対象としたシステムの温湿度系は既報²⁾ Fig. 1 に示したように、2段切り換えの冷却除湿機 (0.75 kW×2) と電気ヒータ (7+3 kW) ならびに蒸気噴射ユニットで構成され、制御された空気は風向、風速もほぼ均一に整流されて制御対象に帰還されるシステムになっている。この

システムの制御は、一定の冷却除湿を前提とし、加温加湿に対して、種々の制御式により電気ヒータおよび蒸気噴射ユニットの容量調節を行う方式になっている。それゆえ、計算機を用いたいわゆるDDCシステムにおいては、各種のフィードバック制御はもちろんのこと、温湿度操作における諸量の関係が実測から把握されると前もってその関係をコンピュータで演算し、予測的な制御が可能となる。すなわちフィードフォワード制御による容量調節が実現できる。それゆえ、湿度について実測により求めた本システムの諸量の関係を以下に示す。

Fig. 1 に冷却コイルの除湿量: B (g/sec) から求めた実用加湿量: S_w (g/sec) を示す。縦軸には、実用加湿量、横軸にはプロセス操作部への制御動作信号のフルビットに対する割合を P (%) で示した。この P は弁の開度を表わす。測定した除湿量は、十分定常になったときのものであり、これを実用加湿量と称すれば、真の加湿量: S (g/sec) から定常状態での除湿量以外の外乱 (植物体からの蒸散は除く): D_s (g/sec) を差し引いたものとして与えられる。

$$S_w \Leftarrow B \\ = S - D_s \quad (1)$$

Fig. 2 に、種々の開度における加湿蒸気圧: S_{TP} (kg/cm²) および蒸気発生器内温度: S_{TP} (°C) を示す。Fig. 3 に開度一定の場合の制御対象内の温度: T (°C) と相対湿度: φ (%) および絶対湿度: x (kg/kg) の関係を示す。これは、植物が入っていない場合の関係であり、植物が入

¹⁾ Shu FUNADA*, Yasushi HASHIMOTO*, Kenji OMASA*, Koji OKADA* and Fumiaki ABO*: Fundamental Studies on Biological Process Control by means of Digital Computer. (III) Feedforward-feedback Algorithm in Temperature and Humidity Control.

* Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Ehime University, Matsuyama.

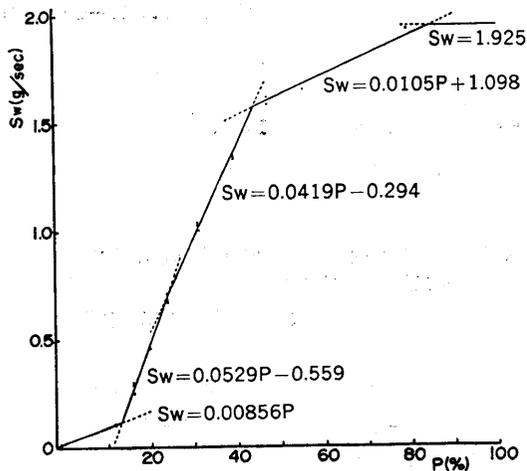


Fig. 1 Relation between humidifying water (S_w g/sec) and manipulating characteristic of humidity (P %).

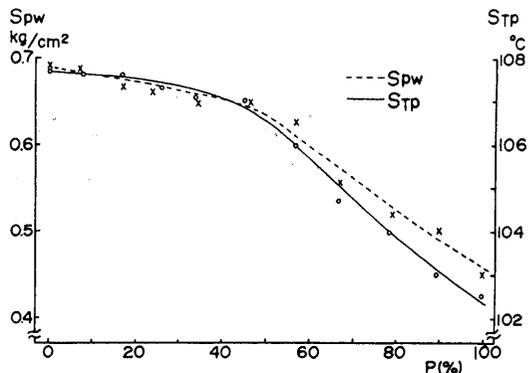


Fig. 2 Gauge pressure (S_{PW} kg/cm²) and temperature (S_{TP} °C) in steam generator.

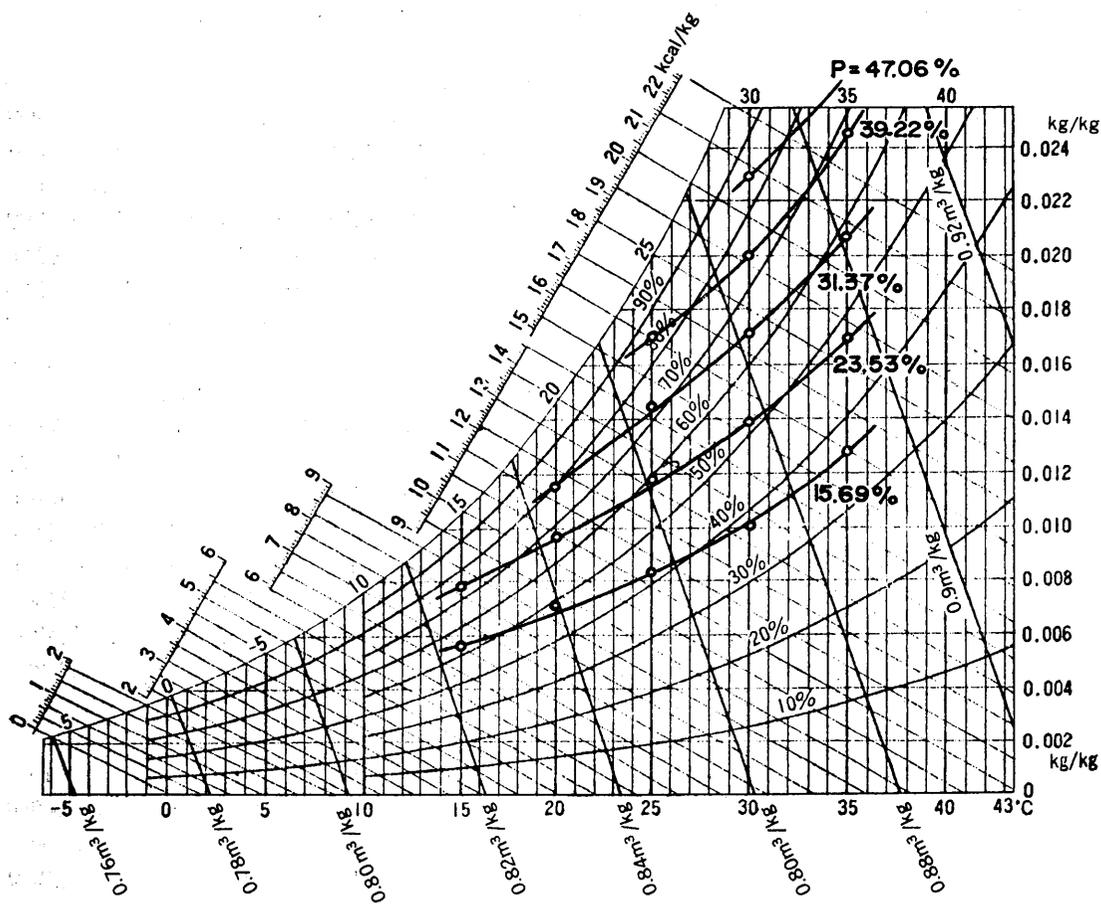


Fig. 3 Manipulating characteristic of humidity on t-x chart.

っている場合にも一般的に適用するために、Fig. 3 の関係を制御対象内の温湿度と除湿量の関係として再定義する。これにより、制御対象内の温湿度状態が決まれば、植物の有無に関係なくその状態の除湿量を求めることができる。Fig. 4 にこの関係を示す。縦軸に除湿量、横軸に温度をとり、等絶対湿度線を用いて表わした。

3. 温湿度系のフィードバック制御

温湿度のフィードフォワード制御の議論を進める前に、温湿度のDDCによるフィードバック制御について記す。前報⁷⁾で温度について示した位置形サンプリングPIDアルゴリズムを温湿度系に適用しフィードバック制御を行った。

本システムでは、制御量および制御動作信号を8ビットで量子化したので、温度および相対湿度を制御変数として与えれば、温度については 0.15625°C 、相対湿度については 0.31250% が1ビットに対応する。そして、

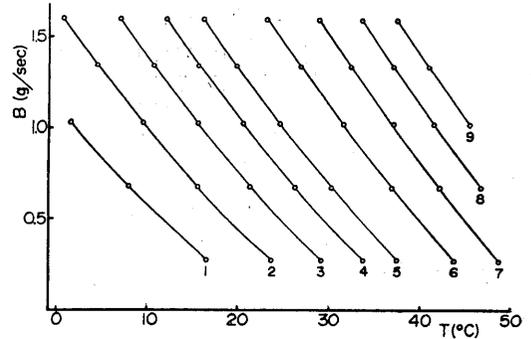


Fig. 4 Characteristic of dehumidifying water (B g/sec).

- | | |
|--------------------|--------------------|
| 1. $x=0.006$ kg/kg | 6. $x=0.018$ kg/kg |
| 2. $x=0.008$ " | 7. $x=0.022$ " |
| 3. $x=0.010$ " | 8. $x=0.026$ " |
| 4. $x=0.012$ " | 9. $x=0.030$ " |
| 5. $x=0.014$ " | |

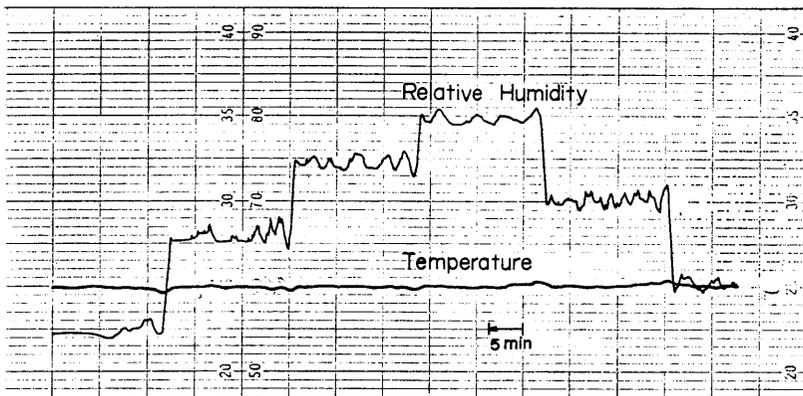


Fig. 5 Pattern of temperature and humidity control; temperature and humidity are controlled by PID algorithm.

この系のPID係数には、連続系で調節した値を目安として適切な値を実験的に探査し与えた。Fig. 5 に制御結果の一例を示す。この場合の諸係数は、温度が $K_P=4$ 、 $K_I=0.04$ 、 $K_D=6$ 、湿度が $K_P=2$ 、 $K_I=0.02$ 、 $K_D=3$ 、また、 $\tau=2$ sec である。以上より、定常状態では温度が 0.5°C 、相対湿度 3% 以内の制御が可能である。

4. 温湿度系のフィードフォワード・フィードバック制御

一つのティピカルで重要な例として相対湿度一定で、温度をステップ応答させた場合がある。Fig. 6 の空気線図にフィードバック制御で相対湿度 60% 、温度 25°C から 30°C にステップ応答した場合の経路 (b) として示

した。この場合、目的とする経路 (a) から大きくはずれる。これは温度のステップ変動に対して相対湿度が大きな影響をうけるためその影響の度合いは前もってわかる。そこで温度はフィードバック制御とし、相対湿度についてはフィードフォワード制御を加える制御方式を今、フィードフォワード・フィードバック制御と称すると、この方式の採用により経路 (c) のように飛躍的に改善される。そこで以後、このフィードフォワード・フィードバック制御について述べる。

1) フィードフォワードアルゴリズム

この温度系の伝達マトリックスは、実験的にプロセス内の一つの状態における目標値に対して、等価的にむだ時間を持った2次遅れプロセスとして次式のように近似

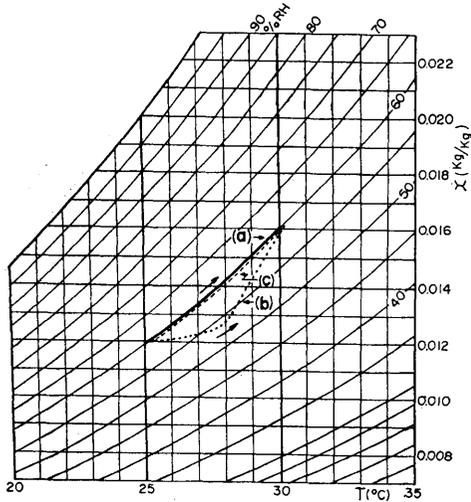


Fig. 6 Transient characteristic of state variable on t-x chart by feedback or feedforward-feedback control.

- (a) Desired value.
- (b) Temperature feedback algorithm and humidity feedback algorithm.
- (c) Temperature feedback algorithm and humidity feedforward-feedback algorithm.

できる。

$$G^{*(T)}(S) = \frac{\omega_n^2 \cdot e^{-L_T \cdot S}}{S^2 + 2\zeta \cdot \omega_n \cdot S + \omega_n^2} \quad (2)$$

ただし、 ω_n : 固有周波数, ζ : 制動比, L_T : むだ時間

固有周波数および制動比は、状態ベクトルおよび入力ベクトルの関数となり、一般には線形ではないが、ここでは、近似的に定数として各状態に応じた値を与える。以上の温度系モデルを用いて、湿度制御における操作量を演算する。

温度目標値をステップで変化させてから、 $j \cdot \tau$ ($j=1, 2, \dots$)なる時間が経過したときの1サンプリング周期の間に变化する温度を $\Delta T_j(\tau)(^\circ\text{C})$ とすれば、この温度変化に対するプロセスの必要水分量: $W_n(\Delta T_j)(\text{g})$ は、一般に次式で与えられる。

$$W_n(\Delta T_j) = \Delta A_j(\Delta T_j) + (B_j + F_j + D_j) \cdot \tau \quad (3)$$

ただし、 $\Delta A_j(\Delta T_j)$: ΔT_j の温度変化に伴う湿り空気の必要水分量 (g)

B_j : $j \cdot \tau$ における平均除湿量 (g/sec)

F_j : $j \cdot \tau$ における植物の平均蒸発散量 (g/sec)

D_j : 上記以外の平均外乱 (g/sec)

ここで、 B_j と D_j は加湿量として実用加湿量を用いれば

$$(B_j + D_j) \cdot \tau \rightleftharpoons \frac{B_j \cdot \tau + \Delta D_j(\Delta T_j)}{S_w} \quad (4)$$

となる。ただし、 $\Delta D_j(\Delta T_j)$ は ΔT_j の温度変化に伴う $D_j \cdot \tau$ の変化量である。

次に、 F_j についてみると定常およびゆるやかな過渡変化にはフィードバック制御で十分であるので、フィードフォワードを考える場合には植物を入れた場合の外乱は状態変化に伴う比較的早い過渡変化だけを考えればよい。これを ΔT_j の温度変化に伴う変化量として、 $\Delta F_j(\Delta T_j)$ とする。

以上より(3)式は、

$$W_n(\Delta T_j) = \Delta A_j(\Delta T_j) + \Delta D_j(\Delta T_j) + \Delta F_j(\Delta T_j) + B_j \cdot \tau \quad (5)$$

となる。そして、 $\Delta D_j(\Delta T_j)$ と $\Delta F_j(\Delta T_j)$ は、 ΔT_j の変化に対する過渡的な変化量であり、 $\Delta A_j(\Delta T_j)$ に比較して小さい場合、(5)式は近似的に次式で示される。

$$W_n(\Delta T_j) \approx \alpha \cdot \Delta A_j(\Delta T_j) + B_j \cdot \tau \quad (6)$$

本システムでは、比較的植物が少ない場合には実験値を考慮して $\alpha \approx 1$ とできる。湿り空気中の ΔT_j の温度変化に伴う絶対湿度の変化量 $\Delta x_j(\Delta T_j)(\text{g/kg}')$ およびキャビネット内湿り空気重量: $V(\text{kg}')$ を用いれば、

$$\Delta A_j(\Delta T_j) = V \cdot \Delta x_j(\Delta T_j) \quad (7)$$

(6),(7)式より、サンプリング時刻 $j \cdot \tau$ において1サンプリング間に必要な水分量 $W_j(\text{g})$ は、

$$W_j \approx W_j = \alpha \cdot \left(\sum_{l=1}^{In(m_1)} \Delta A_{j-l+1} + D_B(m_1) \cdot A_{j-In(m_1)} \right)$$

$$\cdot \tau / tr + B_{j-In(m_2)} + \sum_{l=In(m_2)+1}^{In(m_3)} k \cdot (l - In(m_2)) \cdot \tau^2 \cdot \Delta B_{j-l+1} \quad 0 \leq k(l - In(m_2)) \cdot \tau \leq 1 \quad (8)$$

$$m_1 = tr / \tau \quad (9)$$

$$m_2 = L_w / \tau \quad (10)$$

$$m_3 = (1 + k \cdot L_w) / k \cdot \tau \quad (11)$$

ただし、 tr : キャビネット内空気が一巡する時間(sec)

k : 除湿の遅れを表わす定数

L_w : 除湿のむだ時間(sec)

$k(l - In(m_2)) \cdot \tau \cdot \Delta B_j$: 温度変化に伴う除湿量の変化量 (g/sec)

$In(m_i)$: m_i の整数部

$D_B(m_i)$: m_i の小数部

ゆえにこの W_j なる量をフィードフォワード的に補ってやればよい。すなわち、湿度プロセスの一つの状態における目標値に対して湿度系の伝達関数 $G^{*(H)}(S)$ を、む

だ時間を持った一次遅れとして次式のように近似する。

$$G^{*(H)}(S) = \frac{K_H \cdot e^{-L_H \cdot S}}{1 + T_{CH} \cdot S} \quad (12)$$

ただし、 T_{CH} : 時定数 (sec)
 L_H : むだ時間 (sec)
 K_H : ゲイン

したがって、サンプリング時点 j におけるフィードフォワード量 $M_H(j\tau)$ は、

$$M_H(j\tau) = \frac{1}{K_H} \left[W'(j\tau + L_H) + \frac{T_{CH}}{\tau} \left\{ W'(j\tau + L_H) - W'((j-1)\tau + L_H) \right\} \right] \quad (13)$$

で与えられる。

2) 制御結果

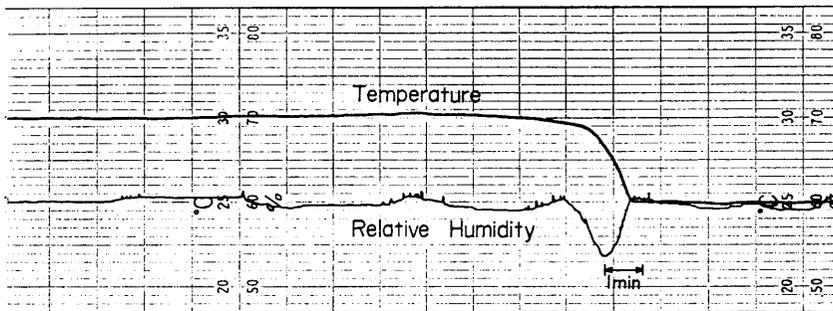
Fig. 7, Fig. 8 の (a) にフィードバック制御, (b) にフィードフォワード・フィードバック制御の例を示す。Fig. 7 が $\varphi=60\%$, $T=25 \rightarrow 30^\circ\text{C}$, Fig. 8 が $\varphi=60\%$, $T=30 \rightarrow 25^\circ\text{C}$ の場合である。その他, $T=20 \rightarrow 25^\circ\text{C}$ で相対湿度を $\varphi=50\%$, $\varphi=60\%$, $\varphi=70\%$ と変えてもほぼ同様の結果を得、さらに温度ステップを 5°C から 10°C へ変えても同様の結果を得た。使用した諸係数

は, $\varphi=50 \sim 70\%$, $T=20 \sim 30^\circ\text{C}$ の制御において, $\zeta=0.7 \sim 0.8$, $W_n=0.019 \sim 0.048$ (rad/sec), $T_{CH}=50 \sim 60$ (sec), $L_T=L_H=L_W=15$ (sec), $k=0.05$ である。以上から、フィードバック制御では相対湿度が $6 \sim 8\%$ RH も変動するのに、フィードフォワード・フィードバック制御では 2% RH 以内に改善されたことが判明する。

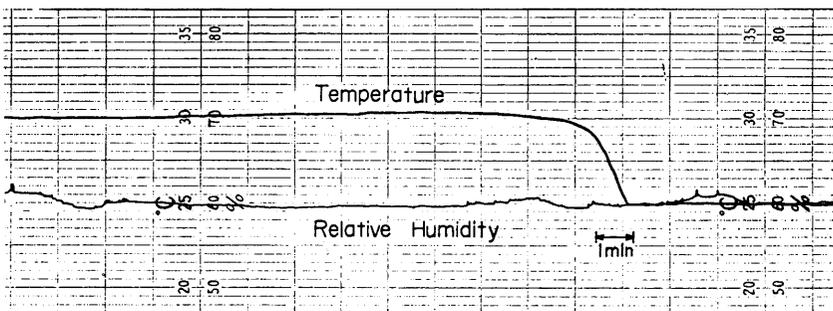
なお、このために要した電算機の記憶容量に対する影響はフォートランで約 300 ステップであり、一般的な PID 制御に比較し電算機に対する負担は大きい。しかし、ディスクオペレーティングシステムを採用すると、それほど大きな障害とはならない。したがって、この方式は実用的にみても充分実現できる。

5. あとがき

DDC における特徴の一つは制御アルゴリズムの多様性にある。特に、フィードフォワード制御に着目し従来、フィードバック制御では困難とされていた温湿度二変数制御系の過渡特性を一つのモデルとして選び検討を行った。このモデルでは温度をステップ、相対湿度を一定という過渡を設定するが、相対湿度が温度と絶対湿度との関数であるため、温度の 5°C ステップ入力に対し

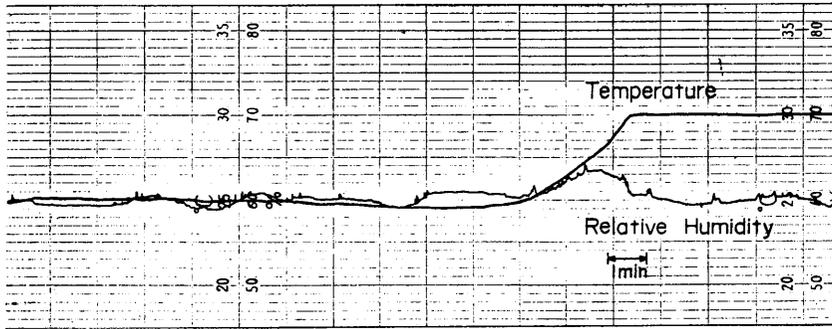


(a) Temperature feedback algorithm and humidity feedback algorithm.

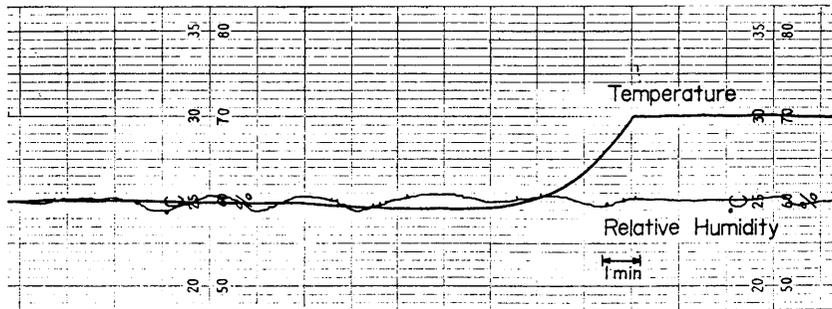


(b) Temperature feedback algorithm and humidity feedforward-feedback algorithm.

Fig. 7 Pattern of temperature and humidity control: temperature, $25^\circ\text{C} \rightarrow 30^\circ\text{C}$; humidity, 60% RH.



(a) Temperature feedback algorithm and humidity feedback algorithm.



(b) Temperature feedback algorithm and humidity feedforward-feedback algorithm.

Fig. 8 Pattern of temperature and humidity control: temperature, 30°C → 25°C; humidity, 60% RH.

て相対湿度はフィードバック制御のみでは6~8%RHも変わりうる。しかし、湿度の方に本論文で検討を加えたフィードフォワード制御を導入してやると、2%RH以内すなわち定常振幅内に安定化された。この研究を土台とすることにより、次段として温湿度の状態空間上で任意のパスに沿った温湿度制御が可能となる。それ故、植物生体からの情報処理にもとづき上記の特性を利用して種々の温湿度の適応制御や最適制御が可能になる。この点については続報でとりあげたい。

文 献

- 1) 船田 周 他, 1974, 電算機による植物生育プロセス制御の基礎的研究 (II), 生物環境調節 11 (4): 147-155.
- 2) 船田 周 他, 1973, 電算機による植物生育プロセス制御の基礎的研究 (I), 生物環境調節 11 (3): 117-125.

Summary

In this paper, characteristics of transient response in two-variable control system composed of temperature and relative humidity is discussed. Adaptation of feedforward algorithm to humidity control system is investigated on the characteristics of humidity manipulated in this process control system. On the condition of two-variable control system in this paper where desired value of relative-humidity is constant and desired value of temperature is 5°C step function, the corresponding changes in relative-humidity is 6~8% RH in the case of temperature feedback algorithm and relative-humidity feedback algorithm. On the other hand, in the case of feedforward-feedback algorithm where temperature control is feedback algorithm and humidity control is feedforward-feedback algorithm, the corresponding changes in relative-humidity is smaller than 2% RH. Stability of humidity control is good in transient control as well as in steady-state control.

(Received March 25, 1974)