

電動モデルトラクタにおける基本制御系の開発

著者	佐藤 邦夫, 田尻 功郎, 伊佐 務, 東 久男
雑誌名	三重大學農學部學術報告 = The bulletin of the Faculty of Agriculture, Mie University
巻	63
ページ	257-266
発行年	1981-12-01
その他のタイトル	Development of the Basic Control System for the Electric Model Tractor
URL	http://hdl.handle.net/10076/3112

電動モデルトラクタにおける基本制御系の開発

佐藤邦夫・田尻功郎・伊佐 務・東 久男

Development of the Basic Control System for the Electric Model Tractor

Kunio SATO, Isao TAJIRI, Tsutomu ISA and Hisao AZUMA

I 緒 言

農用トラクタが走行及び作業時に消費するエネルギーを節減するためには、原動機、動力伝達装置、舵取装置、タイヤなど各要素について低エネルギー消費化を計る必要がある。筆者らはこのうち、主に動力伝達装置及び舵取装置の面から研究を進めるために、4輪駆動モデルトラクタを試作した(写真1)。

試作モデルトラクタは、種々の実験が行なえるように駆動系、操舵系共に各車輪について独立に制御する。このため基本的に全く同一の駆動及びステアリングユニットを4組搭載し、4輪独立駆動、4輪独立ステアリングとした。各ユニットには駆動モータとして定格出力1[kW]の直流電動機(ホイールインモータ)、ステアリングモータとして定格出力180[W]の直流電動機(サーボモータ)、更に制動装置としてディスクブレーキを配している(図1)。なお駆動モータ用サイリスタチョップ式可変速装置、ステアリングモータ用パワーアンプ、及び24[V]バッテリー電源はトラクタ本体に内蔵されている。主要諸元は軸距1650[mm]、輪距(前後共)1370[mm]、重量1200[kg]である。



写真1 モデルトラクタ

ところで、モデルトラクタの各車輪は基本的な機能しか持たず、一般の車両のような差動装置や舵取用リンク機構なども存在しないので、これを操作するためには全体を総合的にコントロールする制御系を必要とする。このような制御系はアナログ演算回路やシーケンサを用いても構成することができると考えられるが、行なおうとする実験の多様性、実験結果の管理の面などから、マイクロコンピュータを使用するものとした。

マイクロコンピュータは、近年制御機器及び演算装置の延長として発展して来たが、CPU以外の周辺機器やソフトウェアも整備され、各方面において機械語プログラムの開発及びデータの処理などが行なわれるようになった。本研究では試作モデルトラクタを評価するために、汎用8bitマイクロコンピュータZ-80 CPUを用いて、基本的な開ループ制御系、すなわちフィードバックを行なわない制御系を構成し、一応の目的が達成された。本報では制御系のハードウェア及びソフトウェアを中心に

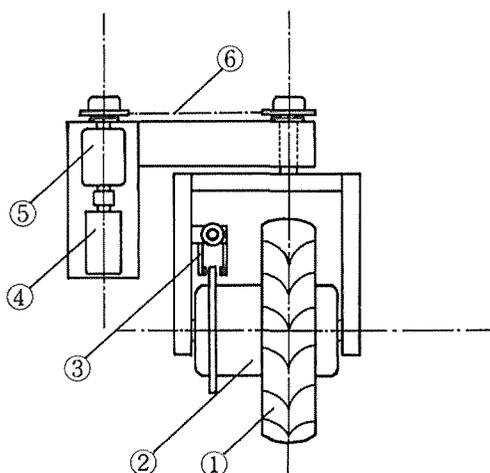


図1 駆動及びステアリングユニット

- ①タイヤ ②ホイールインモータ ③ディスクブレーキ
- ④ステアリングモータ ⑤減速機 ⑥チェーン

基本的な制御方式並びに実験結果について報告する。

II 車載制御システム

1. システム概要

モデルトラクタの制御方法としては、搭乗者によるマニュアル制御とコンピュータによる自動制御の2つのモードが可能である。いずれのモードにおいても各車輪の駆動制御、ステアリング制御を独立に行なうために、駆動及びステアリングモータを直接制御するのはマイクロコンピュータシステムである(写真2)。

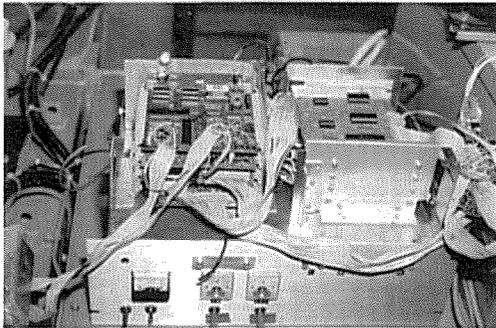


写真2 車載マイクロコンピュータシステム

マニュアル制御モードでは、搭乗者がトラクタのフロント部にあるアクセルとハンドル及び前後進レバーを操作し、マイクロコンピュータに希望の速度と方向を伝達する。また自動モードでは、速度及び方向のデータがコンピュータシステムのメモリに、シーケンスプログラムとして格納されている。ハンドル及びアクセル、またはシーケンスプログラムにより与えられた速度並びに方向のデータは制御プログラムに取り込まれ、これを基にして各車輪の駆動及びステアリング制御量を計算し、出力する。

マニュアル制御モードは車庫の出し入れや実験場への移動など、自動制御モードで行なうことのできない動作や、人間・トラクタ系について実験を行なう場合に使用し、自動制御モードは時間及び制御量を正確に管理する必要のある実験に対して用いる。

次に本研究において構成した、マイクロコンピュータシステムの概要を図2に示す。図中、Z-80 CPU及びメモリ回路はコンピュータ・リサーチK. K. 製CRC-80及びCRC-80Mを使用している。本研究ではROM(Read Only Memory)として標準モニタ1kbyteのほかに、カセット磁気テープ用入出力ルーチン及び基本的な演算ルーチンを書き込んだ1kbyteを実装している。な

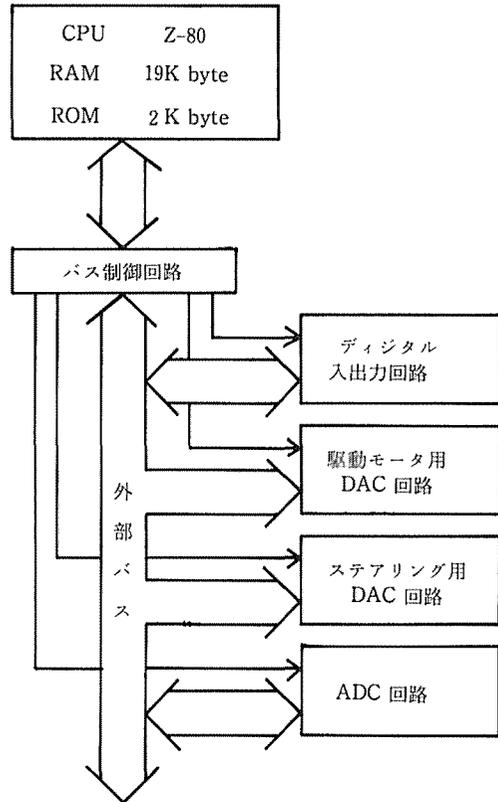


図2 車載システム概要

お、Z-80 CPUが直接扱うことのできるメモリ64kbyteのメモリマップ(memory map)は表1のように設定した。

表1 メモリマップ

ADDRESS	容量	RAM & ROM	
FFFF ↓ C000	16K (byte)	RAM	データ領域
BFFF ↓ 8C00	13K		空 き
8BFF ↓ 8000	3K	RAM	プログラム領域
7FFF ↓ 0800	30K		空 き
07FF ↓ 0400	1K	ROM	カセットプログラム
03FF ↓ 0000	1K	ROM	モニタ

図2において、バス制御回路はデータバス、アドレスバス、その他の信号線の制御と出力の強化を行なう回路である。CPUボードは信号線の補強を行っていないので、外部に入出力機器を接続する場合、信号線をバスドライバにより強化して、ファンアウト (fan out) を増す必要がある。図3にバス制御回路を示す。74367及びi8212は単方向バスドライバ、i8216は双方向バスドライバとして使用している。なお本回路では上記の機能のほか、74154などによりアドレスバスをデコード (decode) し、後述の入出力機器の選択を目的とする信号も生起している。

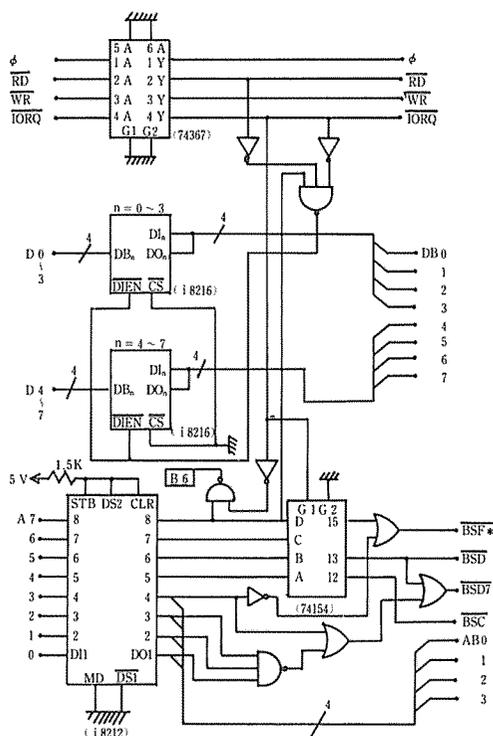


図3 バス制御回路

2. 情報の入力

本システムのマニュアル制御モードにおけるプログラム実行時の主な入力情報は、アクセル量、ステアリング量、前後進レバー及びブレーキの4種類である。

前二者はいずれもポテンショメータを使用したアナログ電圧信号で、これをアナログ・デジタル変換器 (以下AD変換器と略す) に入力する。AD変換器はマイクロサイエンス K.K. 製 DAS-1608で、16チャンネルマルチプレクサを内蔵した逐次比較形AD変換器である。本器は入力電圧に対し、10Vの基準電源を持つが、多数の

外部機器に基準電源を供給する必要性からこれを取り外し、外部から電流容量の大きい8[V]電圧を導入してこれをフルスケール基準電源とした。なおAD変換器のI/O番地としてD7H (Hは16進数を表わす) を割り当てた。

AD変換器は、アクセル及びステアリングのアナログ値を入力し、それぞれ

$$0 \leq A \leq 255, \quad 0 \leq \Phi \leq 255$$

のデジタル値をCPUに出力する。ここでA=0はアクセル指示0、Φ=128はハンドル切角0 (中央) に対応するものとする。

また前後進レバーは搭乗者が駆動モータの正逆転または中立をCPUに指示するための2bitデジタル入力、またブレーキ入力にはブレーキが踏まれたことをCPUに知らせるための1bitデジタル入力である。これらの入力には、後述のデジタル入出力用ボード (図6) におけるi8255のポートCを使用する。他の入力も含め、デジタル入力のI/O番地はDEHである。

3. 駆動モータの制御

駆動モータに関しては、電源及び回転数の2項目を制御する必要がある。

電源の制御は、各モータについて前進及び後進用の電磁接触器をON-OFFすることであり、マイクロコンピュータのデジタル出力により、各電磁接触器前段のリレーをON-OFFする。図4は1車輪に対するリレー結線図で、マイクロコンピュータとのインターフェースはi8255のポートAを使用する。なお電源制御に使用するI/O番地はDCHである。

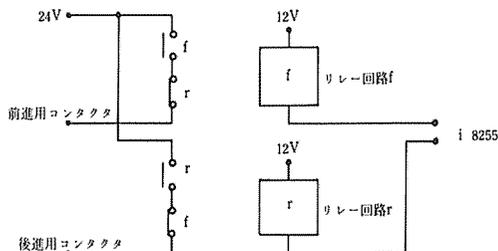


図4 リレー結線図

次に、駆動モータの回転数の制御はサイリスタチョップ式制御装置に対するアクセル制御電圧により行なう。制御電圧は最大値4[V]の正電圧であり、これをデジタル・アナログ変換器 (以下DA変換器と略す) により出力する。図5はDA変換部の回路であるが、制御精度並びに回路の簡潔性を考慮して、入力ラッチ付8bit

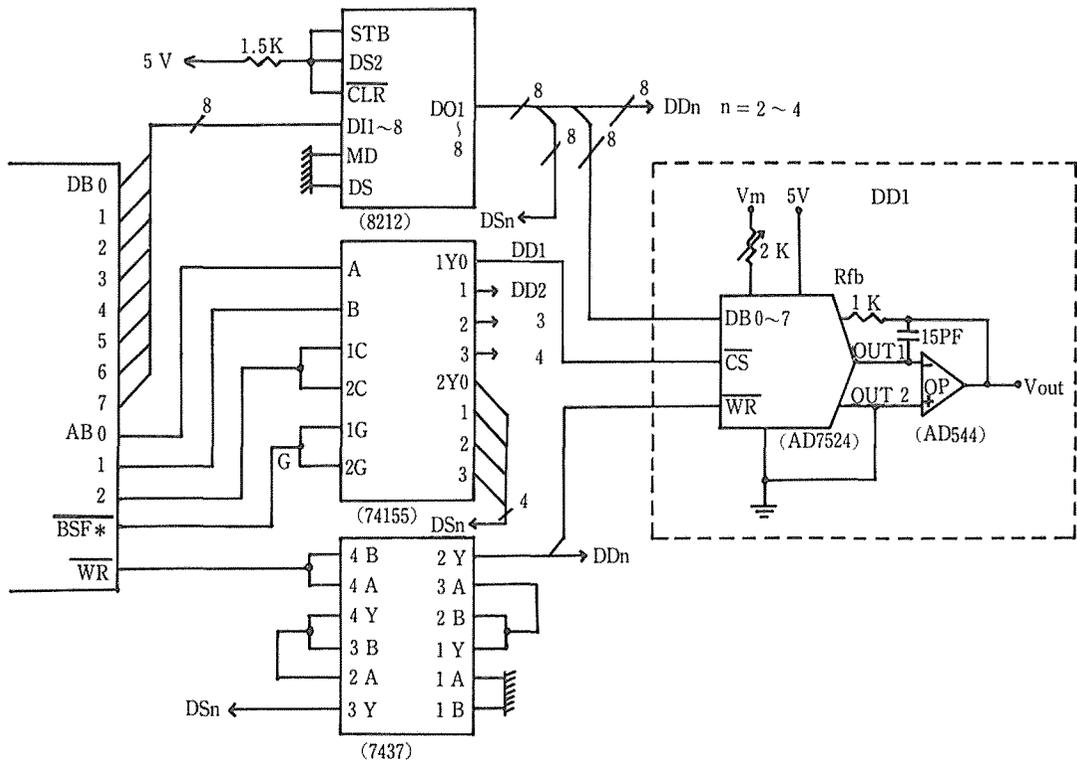


図5 駆動モータ用DA変換回路

DA変換器AD7524を採用した⁹⁾。本回路はデジタル値
 $0 \leq \alpha_i \leq 255$ (i は車輪番号：図10参照)
 に対応して

$$V_i = V_m \frac{\alpha_i}{256} \quad [\text{V}] \quad (i = 1 \sim 4) \quad \dots(1)$$

で表わされるように、基準電圧 V_m (4 [V]) をフルスケールとする256段階のアナログ電圧を出力する。本回路において、I/O番地はF4HからF7Hまでの4番地である。

なお、サイリスタチョップ式制御装置には回転数制御機構が付属していないので、今回のようにマイクロコンピュータによるフィードバックを行わない場合には、電流通率制御となる。この場合、使用している直流直巻電動機の特長から、トルク制御に近似した制御が行われる。

4. ステアリングモータの制御

ステアリング用サーボモータは回転角制御電圧により制御される。制御電圧は0 [V] を中心とした ± 5 [V] の双極性電圧で、DA変換器によりサーボアンプへ出力される。DA変換器は駆動モータ用と同様にAD7524を

使用した。本回路ではデジタル値
 $0 \leq \phi_i \leq 255$
 に対応して

$$V_i = V_m \frac{\phi_i - 128}{128} \quad [\text{V}] \quad (i = 1 \sim 4) \quad \dots(2)$$

で表わされる256段階の出力電圧(フルスケールは $V_m = 5$ [V]) が得られる。今、サーボ系が理想的であるとする、車輪の舵角範囲が ± 90 [度] の場合、最小設定角約0.7 [度]、精度 ± 0.1 [度] となる。なおI/O番地はF0HからF3Hまでの4番地である。

5. オーディオ磁気テープインターフェース

車載のマイクロコンピュータシステムには、データの処理及びASSEMBLERによるプログラムの作成機能は存在しない。従って地上の支援システム(後述)が必要となり、車載システムとの間にデータ及びプログラムの伝達手段を設けなければならない。ここでは屋外での使用を考慮して、オーディオ用カセット磁気テープ(CMTと略す)を採用した。

マイクロコンピュータに対するCMTインターフェースには種々のものがあるが、本研究ではプログラ

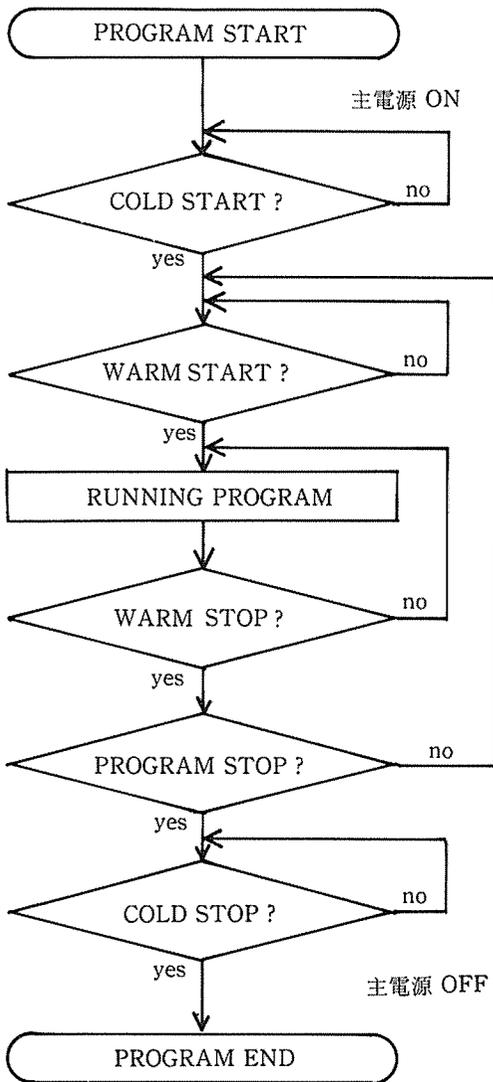


図7 制御プログラムのフローチャート

動及び操舵系をコンピュータ制御するような車両に対しては同様な考慮が必要になると思われるので、マニュアル制御の場合の一般的な制御手順について、以下に考察する(図7)。

1. 起動手順

制御プログラムはRAM(Random Access Memory)に存在するため、マイクロコンピュータ及び制御プログラムが起動する前にトラクタ駆動電源を投入すると暴走する危険がある。従ってまず前回の停止時の舵角が全車輪とも0であるとして、制御プログラム起動直後に舵角0の制御電圧(デジタル値では $\varphi_i=128$)及び通流率0

のアクセル制御電圧($\alpha_i=0$)を出力し、その後トラクタの駆動及び操舵用電源(以下主電源と略す)を投入する。

次にプログラム起動後のトラクタの発進は、駆動系と操舵系の制御を個別に行なう必要がある。制御プログラム起動直後においてアクセル量A、及びハンドル切角 Φ が

$$A=0, \quad \Phi=128 \quad \dots(3)$$

である保証は無いので、この状態で走行プログラムに移行するのは危険である。そこで制御プログラムは条件(3)が満たされ、前後進レバーが中立になるまで待機し、これらが全て満たされた後、舵角制御電圧 φ_i が Φ に追従するようにする。本研究ではこの一連の手続きをCOLD STARTと呼ぶ。

この後、前後進レバーで進行方向が設定され、かつ $A=0$ が満たされている場合、各駆動モータは前進または後進の状態で起動し、以後 α_i はAに従属する(以上 WARM STARTと呼ぶ)。

2. 走行中の制御

本モデルトラクタのように4輪が独立に駆動及び舵取される場合、各車輪が相互に力学的な矛盾を起こさないように制御する必要がある。このような制御が行なわれない場合、エネルギー消費が増大し、更に各機構及びタイヤの損耗が早まり、車両の破損や暴走に至る。本研究の目的には、このような力学的矛盾を故意に起こし、その場合の消費エネルギーを計測することも含まれており、種々の制御プログラムが考えられる。

一般的には α_i 並びに φ_i は車両速度、各車輪の回転数、A及び Φ などの関数として設定すべきである。しかしここでは基本的なマニュアル制御プログラムとして、駆動モータについて4輪等トルク制御、操舵系については幾何学的に矛盾しない舵角制御を行なうプログラムを作成した。この場合

$$\alpha_i=A, \quad \varphi_i=g_i(\Phi) \quad (i=1\sim 4)$$

としたが、関数 g_i についてはIVで述べる。

3. 停止手順

マニュアル制御において走行中にブレーキが踏まれた場合、または前後進レバーの状態が変化した場合、トラクタは停止する必要がある。多くの電動車両同様本モデルトラクタはクラッチ機構が無い場合、車両の停止時には駆動モータも停止していなければならない。またブレーキ動作時にアクセル制御電圧が0となっている保証は無いので駆動モータの電源を切る必要がある。ここでは電気回路(ハードウェア)と停止プログラム(ソフト

ウェア)の2系統で電源を制御して安全を計った。

この停止プログラムでは次に再発進(WARM START)することを前提としているため、操能系は走行プログラムと同様Φに追従する(以上 WARM STOPと呼ぶ)。なお前後進レバーが走行中に変化した場合も WARM STOP が起動する。再発進の場合にはアクセル A、ブレーキ及び前後進レバーが適切な状態であることが必要であるため、プログラムの制御は WARM START へ移される。

次に WARM STOP からトラクタの主電源を切るためには、次の COLD START 時の便宜を考慮して、A = 0、Φ = 128、更に前後進レバーを中立にすることが要求され、これが全て満たされた後 CPU は停止状態となる(以上 COLD STOP と呼ぶ)。

最後に、COLD START の時と同様な理由により、主電源の後に制御系の電源を切る。

地上支援システムは制御プログラム、舵角データの作成及び得られたデータの処理を行なうマイクロコンピュータシステムである。本研究で使用したシステムはシャープ K. K. 製 MZ-80 C 及びフロッピーディスク、プリンタ、CMT インターフェース、P-ROM WRITER 等で構成される(写真4)。



写真4 地上支援システム

前述のように、システム間の情報伝達は CMT により行なうが、そのインターフェース回路を図8に示す。なお i 8255 は P-ROM WRITER 用インターフェースとして使用する。本システムにおいて、制御プログラムの

IV 地上支援システム

1. システム概要

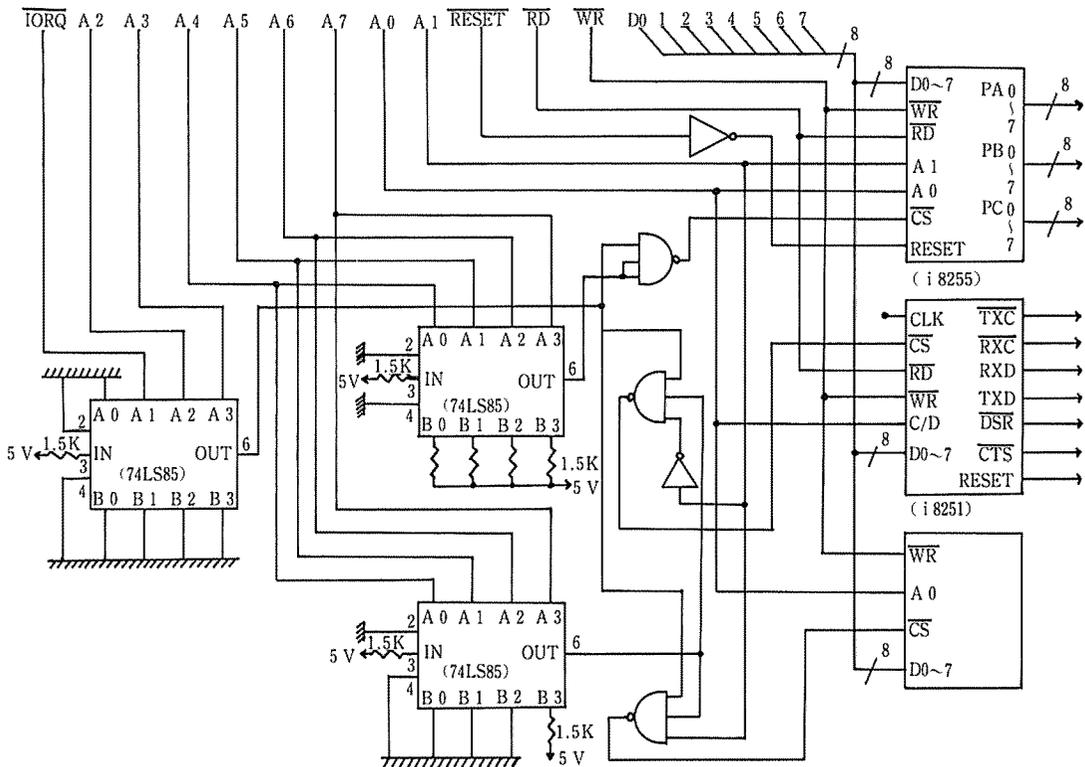


図8 支援システムインターフェース

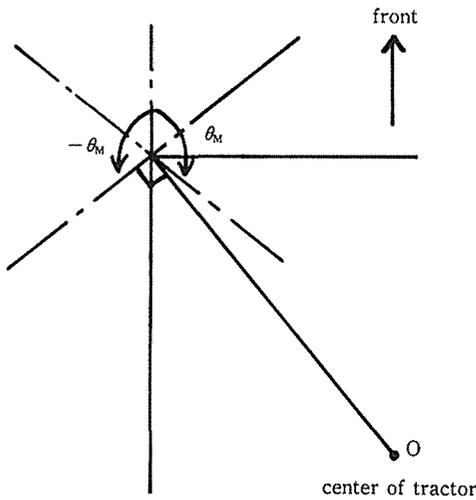


図9 車輪1の可動範囲

作成には ASSEMBLER, 走行データの作成及びデータの処理には BASIC を使用している。

2. 舵角データの作成

各車輪の制御量 α_i , φ_i ($i = 1 \sim 4$) はそれぞれ A 及び Φ に依存するが, 舵角に関しては前述のように各車輪が幾何学的に矛盾しないような関数 $\varphi_i = g_i(\Phi)$ を構成する。この場合種々の方式が考えられるが, 何れにしても走行しながらこれを計算するのは現在の車載システムの能力を超える恐れがある。そこで Φ は256段階の値しか取らず, 1段階について各車輪の必要とするデータは8 bitであることを考慮して, ここでは合計1 kbyteの舵角データを車載のRAM上に格納し, Φ に対応してこれを参照しながら走行する方式を採った。なお普通に行なわれる左右対称の舵角制御では, 0.5 kbyteの容量で十分であるが, 車載システムにおける演算機能の負担を軽減するために1 kbyteとした。

図9はモデルトラクタにおける車輪の可動範囲で, 図のように車輪1(左側前輪)を例にとると, 前進方向を中心(0)として左回りは回転軸の延長線が車両中心Oを通る角度 $-\theta_M$ まで, 右回りは左回りと対称に θ_M まで, 計 $2\theta_M$ の回転が許容されており, この範囲で制御電圧のフルスケール, 従って最大回転角を任意に決めることができる。このことは他の車輪も全く同様である。

図10において旋回中心がy軸に平行な直線 $x = x_r$ 上を移動するとき, 旋回半径 y_r を優先的に Φ と対応させる方法も考えられるが, ここでは図のように $x_r < 0$ で右旋回

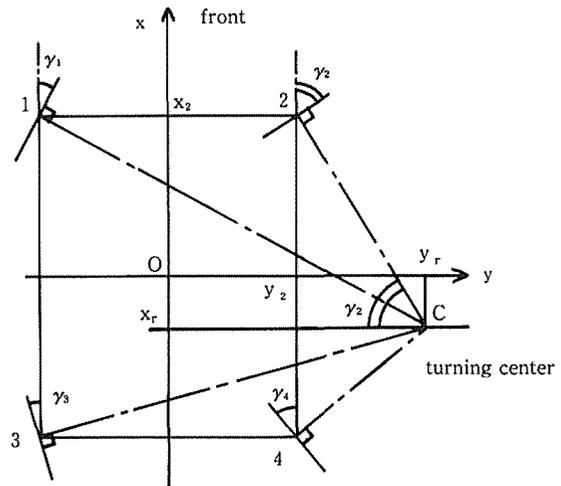


図10 旋回中心と各車輪の関係

注) 番号は車輪番号を表わす

の場合, 車輪2を基準車輪として $\varphi_2 = \Phi$, 更に他の車輪の舵角出力は

$$\varphi_i = -\frac{\gamma_i + \theta}{\theta} \times 128 \quad \dots(4)$$

ただし, $y_r = y_2 + (x_2 - x_r) \cdot \cos \gamma_2$

(γ_2 は(4)式より計算する)

$$\gamma_i = \tan^{-1} \left(\frac{x_i - x_r}{y_r - y_i} \right), \quad (i = 1, 3, 4)$$

により計算されるデジタル値 φ_i となるようにした。また旋回中心がxy平面の他の象限に存在するときは, その象限とy軸に関して対称な象限内にある車輪を基準車輪として同様な計算を行なう。ここで γ_i は各車輪の実舵角, θ はデジタル値 $0 \leq \varphi_i \leq 128$ に対する角度, (x_i, y_i) は各車輪の位置の (x, y) 座標値である。舵角データ作成プログラムでは, 任意に設定された x_r, θ に対し, 前述の計算を行ない, 最終的にCMTにデータを出力する。

V 基本走行実験

本研究で構成したマニュアル制御方式を評価するために, 基本的な直進走行及び旋回実験を行なった。ここで用いた舵角データは $\theta = 90$ [度], $x_r = 0$ [cm] としてIVで述べた方法により得られたものである。なお駆動方式は4輪駆動, 供試タイヤは農用 AGS 5.00-12, 路面は乾燥アスファルト路面である。

直進走行実験では20 [m] の助走の後に距離10 [m]

を走行するのに要した時間を計測して定常走行速度を計算した(図11)。これによると、計測範囲においてアクセル指示値と定常走行速度には図のような直線関係が認められ、指示値 4 AH (10進数では74) の付近で速度は 0 となる。駆動モータの電流通流率は制御電圧に比例するので、4 AH 以下に対応する通流率による駆動力は走行抵抗を下回ると考えられる。この場合の走行抵抗はタイヤ

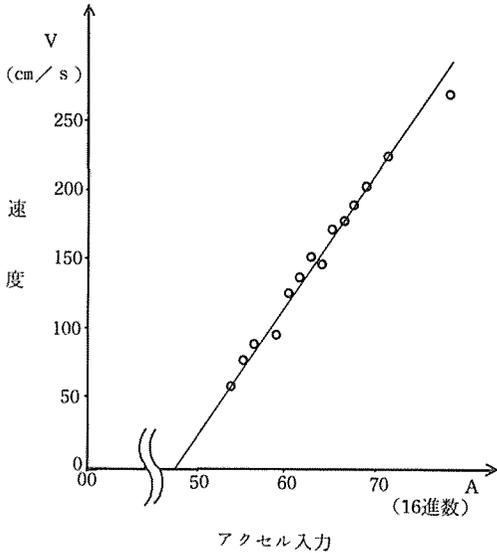


図11 アクセル入力と速度の関係

の変形などによる純粋な走行抵抗のほか、ホイールインモータの減速機による動力損失なども含む。なおデータの変動の原因として、計測誤差以外に搭乗者のハンドリングによる蛇行が考えられる。

次に旋回実験ではアクセル指示値を55Hとして、低速定常円旋回運動(左旋回)を行ない、各ステアリング指示値における内側後輪中心の旋回半径を計測した。計測は着色粉末によるわだちの直径を計る方法を採用した。図12は内側後輪の旋回半径について、実測値と理論式

$$R = \frac{82.5}{\sin \gamma_3} \quad [\text{cm}] \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{ただし} \quad \gamma_3 = \frac{\Phi - 128}{128} \times 90 \quad [\text{度}]$$

を比較したものである。これによると実測値のばらつきは少ないが、全体的に理論値より10 [cm] 程度大きい値が得られた。この傾向の原因として、各駆動モータの発生するトルクが異なることが挙げられる。本研究では駆動モータは等トルク制御に近似した方法で制御するが、

モータ回転数が大きく異なる場合この近似は成立しない。従って左右輪で舵角差が大きい程、すなわち旋回半径が小さい程、トラクタ内自己矛盾が大きくなり、理論値との差の割合も大きくなると考えられる。

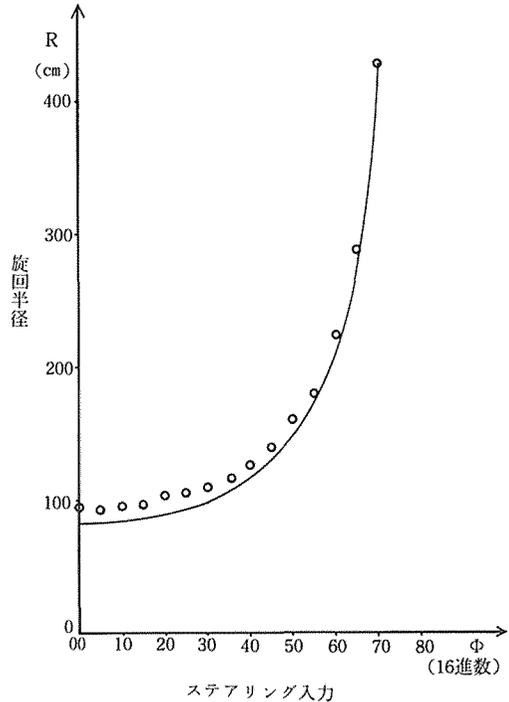


図12 旋回実験結果と理論値(実線)の比較

VI 考察及び今後の課題

本研究で構成した制御回路は、台上試験及び基本走行実験の結果正常に動作することが分かった。特に主電源と制御電源を完全に分離した結果、サイリスタチョッパのノイズによるマイクロコンピュータの誤動作は全く起きていない。また地上支援システムも正常に機能し、特に屋外での情報伝達手段として CMT の有効性が確認された。

次に制御プログラムについて、今回作成されたものは、モデルトラクタの移動及び基本動作の確認等の目的を満たし、更にもその安全性についても確かめられた。しかし旋回実験でも示されたように、主に駆動モータの制御において、力学的に理想的であるとは言えない。また、現状の人間・トラクタ系では速度 2 [m/s] 以上で直進性に多少問題があり、蛇行する場合も生ずる。これは、ハン

トル・ポテンシオメータ間の減速比などのハードウェア的側面、及び舵角データによる遊び角や舵角データを作成する関数の改良などのソフトウェア的側面の両面から改善する必要がある。

本モデルトラクタ製作の目的は、力学的に最適な制御も含め、種々の方式について実験することであるが、これを実現するためには各車輪の実舵角、回転数、及び発生動力等をマイクロコンピュータにフィードバックする制御を行わなければならない、制御回路、プログラム共に今後の改良が必要である。

VII 摘 要

農用トラクタの走行エネルギーをシミュレートするために作られた、電動モデルトラクタにおける基本的な制御系を構成した。この制御系はマイクロコンピュータ(Z-80 CPU)、デジタル入出力ポート、AD変換器、DA変換器等を使用する。本報では CPU によるフィードバックを行わない制御方式を採り、安全な起動及び停止法を考慮した制御プログラムを作成した。

次に、本研究で作成した制御系を用い、モデルトラクタの基本的な走行及び旋回実験を行なった。その結果、本制御系は当初の目的を満たすことが分かった。しかし

駆動モータの制御に対し、今後の改良の必要性も確かめられた。

付 記

本研究は文部省科学研究費(昭和55年度エネルギー特別研究(2))の助成を得て行なわれた。また、モデルトラクタの製作に当たり、東洋運搬機 K.K.並びに日立製作所 K.K. より多大の協力を得た。ここに深謝致します。

参 考 文 献

- 1) 近藤政市：基礎自動車工学，前期編，東京，養賢堂，1965.
- 2) 半澤正夫・中野光雄：電気工学概論，電力工学編，東京，森北出版，1971.
- 3) 村田 裕：マイクロコンピュータの本格的応用，東京，CQ 出版，1977.
- 4) 山賀 威・白石 肇：ロジック IC 応用技術読本，東京，オーム社，1975.
- 5) Analog Devices 社：Data acquisition products catalog, 1978.
- 6) 鬼頭孝治：自脱型コンパインの自動制御に関する研究，三重大学農学部修士論文，1981.

Summary

A basic control system was developed for the electric model tractor, which was manufactured for the purpose of simulating the running energy of the agricultural tractor.

This control system consists of a micro-computer (Z-80 CPU), digital I/O ports, AD converters, DA converters, and others. In this paper, the control method which uses no feedback to the CPU was employed, and the control program was constructed take account of the safe starting and stopping of the tractor.

Then, using the control system as developed, basic running and turning tests of the model tractor were carried out. As a result of the tests, it became clear that the control system satisfies the fundamental requirements.

However, the driving motor control system should be studied more carefully in the future.