

農業機械の姿勢・振動制御技術の開発

中西 洋介, 浦池 隆文, 鈴木 慎一, 小林 幸徳*, 星野 洋平*, 江丸 貴紀*

Posture and Vibration Control of Agricultural Machinery

Yohsuke NAKANISHI, Takafumi URAIKE, Shinichi SUZUKI,
Yukinori KOBAYASHI*, Yohei HOSHINO*, Takanori EMARU*

抄 録

近年、本道では生産性を高める目的で、急速な勢いで農場の大規模経営化が進んでおり、農作業の効率化を図る必要に迫られている。農作業は作業機を高速走行させることで作業効率が向上するが、その反面、姿勢が乱れ、振動が激しくなる。特に農薬散布機においては散布用作業アームが長いいため、車輪が僅かな地面の凹凸に乗り上げるだけでアームが上下方向に大きく振動する。また、播種機においては走行速度が大きくなるに従ってオーブナに対する土壌反力が大きくなるため機体全体の振動が激しくなり、播種深さを一定にすることが困難になる。本研究では、農作業機械の姿勢を一定に保持し、振動を低減するための機構設計開発技術および振動を効率的に抑制するためのアクティブ制御技術に関する研究に取り組み、農薬散布機と播種機に適用したので報告する。

キーワード：運動解析, 振動, 制御, CAE, ダイナミックシミュレーション

Abstract

In Japan, especially in Hokkaido, productive large-scale farming is needed to keep a competitive power in market of domestic farm products against the low-cost farm products from foreign countries. To run the large-scaled farm, high working efficiency is needed to agricultural machinery. One of the way to make agricultural machinery work-efficient is to drive them faster than ever. But, vibration and postural instability is getting up, in proportion to the velocity of the vehicle. In this paper, deflective vibration control of the arm of boom sprayer and development of the mechanism to keep the arms of boom sprayer horizontal are shown. Measuring deflective vibration by acceleration sensors and using optimal regulator, deflective vibration of the arm can be kept down effectively. And designing the mechanism using CAE dynamics simulation in advance, development of the mechanism of posture control of the arms can be gone ahead smoothly. And also in this paper, the new method to analyze the vibration of seed planter, which takes account of the viscoelasticity of the soil, is shown. Using this method, the mechanism to keep down the vibration of the seed planter is able to be designed.

KEY-WORDS : Motion Analysis, Vibration, Control, CAE, Dynamic Simulation

1. はじめに

近年、国は国産農産物の低コスト化を促進するため、生産性の高い大規模農場経営への移行を促しており、特に北海道においては大規模農場経営化に向けた農作業の効率化が求められている。農作業の効率を向上させる方法として作業機を

高速走行させることが考えられるが、一般に走行速度に比例して作業機の姿勢が乱れ易くなるとともに振動が激しくなる。例えば農薬散布機においては、散布用作業アームが長いいため、弾性たわみ振動が励起されやすくなる。さらに、作物列をまたいで走行する都合上、車輪トレッドが1.2mに制限されており、片輪がわずかな地面の凹凸に乗り上げるだけで長さ10

* 北海道大学大学院工学研究院 * Graduate School of Engineering, Hokkaido University

事業名：重点領域特別研究

課題名：大規模農業に向けた走行安定化機能を搭載した高速農作業機械の開発

m内外の作業アームの先端が上下方向に大きく揺動し、最悪の場合、先端が地面に接触して破損するなどの不具合が生ずる。本稿では、作業アームの弾性たわみ振動については、固定端片持梁の3次モードまでの曲げ振動を考慮し、各振動モードの状態フィードバックを施すことで振動を抑制することを試みた。また、アーム先端の上下方向の揺動、すなわち、ロール方向の回転揺動に関しては、アームがロール方向に回転揺動しにくい機構をCAE (Computer Aided Engineering) の機構シミュレーション機能を活用して設計・開発した。

一方、播種機においては、作物の種を土壤中に巻く必要があるため、オープナと呼ばれる板を土壤に突き刺し土壤を掻き分けながら走行する。したがって、土壤から大きな反力を受けるため、播種機の機体振動および播種深さを精度良く解析するためには、土壤の粘弾性特性を元に計算する土壤反力を考慮した解析モデルが必要となる。本稿では、播種機の振動解析において土壤粘弾性特性を考慮した解析手法を考案し、同手法を用いて播種深さを一定保持する機構を開発したので報告する。

2. 農薬散布機作業アームの姿勢・振動制御



図1 農薬散布機 (マウント型)

図1にトラクタ後部にマウントするタイプの農薬散布機を示す。アーム長は8~15mで、折り畳み式のヒンジ構造となっており、根元支持部のモーメントを軽減するために先端に向かって断面が小さくなっているなど複雑な構造をしている。なお、図1に示すタイプのアームの断面は、水平方向に比して鉛直方向の剛性が高くなっている。すなわち、鉛直方向(上下方向)は、重力による弾性たわみ量を抑えるために断面寸法を大きくして剛性を高めている。一方、水平方向は軽量化のために薄い断面寸法としている。したがって、水平方向では弾性たわみ振動が励起されやすい。本稿では図1に示す断面形状のアームを有する農薬散布機を対象とし、水平方向には弾性たわみ振動を抑制する制御を施し、鉛直方向は弾性たわみ振動を考慮せず、アーム全体を剛体として姿勢保持

する機構を搭載することで上下方向の揺動を抑制し、アームの地面に対するロール方向傾斜角が一定の角度を超過した場合に、アームを初期位置に戻す制御を施すことにした。

2.1 農薬散布機作業アームの弾性たわみ振動制御

図2に弾性たわみ振動を抑制するための室内実験装置を示す。長さ4mであり、中間部に折り畳み式のヒンジを有し、断面を先端に向かって小さくする等、実物を模擬した構造と

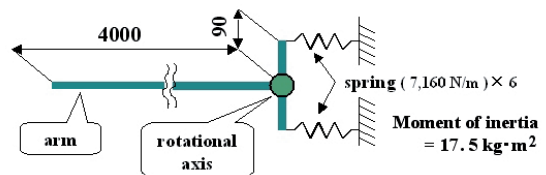
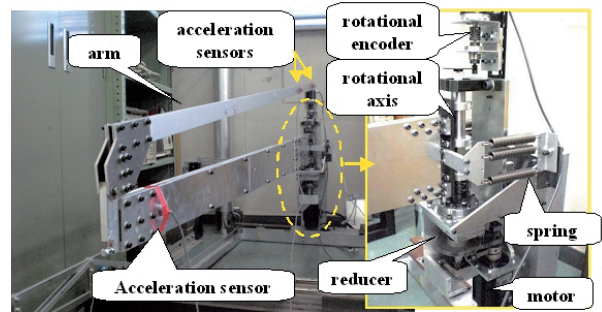


図2 弾性たわみ振動抑制実験装置

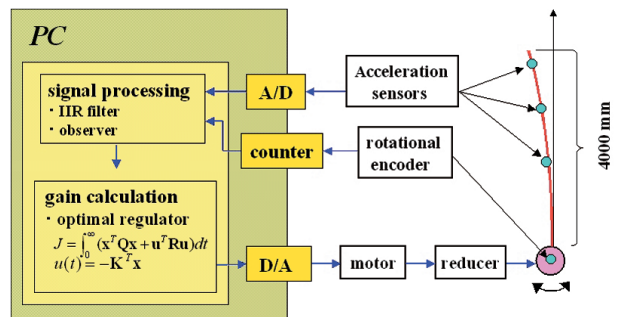


図3 アクティブ制御ブロック図

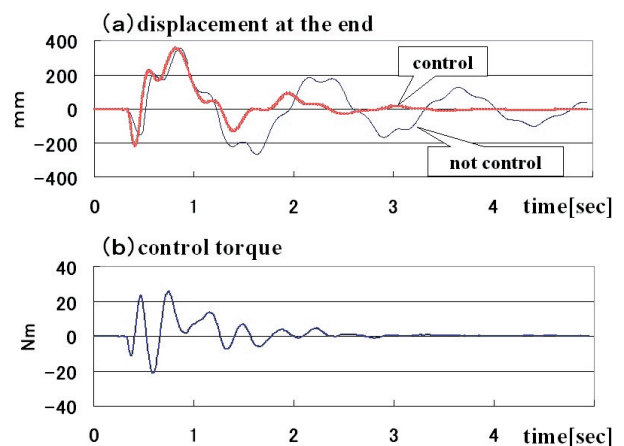


図4 アクティブ制御実験結果

している。根元回転軸には減速比20の減速機を介して出力400Wのサーボモータと剛体回転角を検出するためのロータリーエンコーダを設置し、さらに、アームの3次モードまでのたわみ振動を検出・制御するために、アーム上に3個の加速度センサを設置している。これらのセンサ情報にオブザーバ、IIRフィルタ等のフィルタリング処理を施した後、最適レギュレータで算出した制御ゲインを元に操作量を計算し、アームにアクティブ制御を施した^{1), 2), 3), 4), 5)}。図3に制御方法のブロック図を示す。なお一般に、根元を回転駆動することで柔軟アームのたわみ振動成分にアクティブ制御を施した場合、たわみ振動ではない回転軸回りの剛体回転角が大きくなる傾向がある。試作したアームは長さ4m、質量6.3kgであり、根元回転軸回りの慣性モーメント ($17.5\text{kg}\cdot\text{m}^2$) が大きく、この傾向が強くなる⁶⁾。したがって、ここではアーム根元に静的バネ定数7160N/m (カタログ値) のコイルバネを6本設置し、アクティブ制御時の剛体回転角を小さくした。なお、一般に動的バネ定数は静的バネ定数の1.5~3倍の値となる。したがって、ここでは制御ゲインを算出する際、アーム振動係数モデルに静的バネ定数値の2.5倍の値を設定して制御ゲインを算出した。

図4(a)にアクティブ制御時および無制御時のアーム先端変位を、(b)にアクティブ制御時の制御トルクを示す。図より、アームにアクティブ制御を施すことで、約350mmの先端初期変位が約2秒で収束し、制御に要した制御力は高々25Nm程度であることが分かる。以上より、アーム根元をバネ支持し、モータで回転駆動することで4mアームの弾性たわみ振動を効率的に抑制できることが分かった。⁷⁾

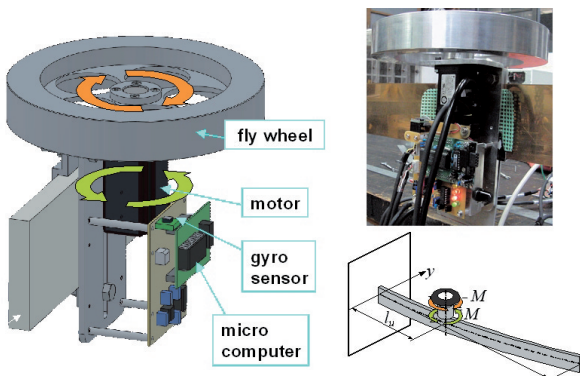


図5 振動抑制ユニット (北海道大学)

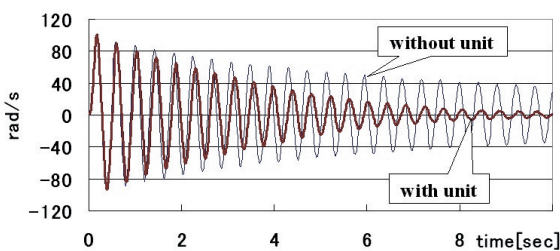


図6 振動抑制ユニット振動抑制実験結果

また、本研究では、アームへの実装時の利便性や低コスト化を考慮し、アームに設置することでたわみ振動を抑制するコンパクトな振動抑制ユニットを開発した。⁸⁾ 図5に開発した振動抑制ユニットを示す。ジャイロセンサで検出したアームのたわみ角速度に応じて、モータ軸に設置したフライホイールを駆動する極めて簡便な構造となっている。一定の慣性を有するフライホイールをたわみと逆方向に駆動することで、その反モーメントが振動抑制力としてアームに作用する原理となっている。図6に振動抑制ユニットによるアームのたわみ振動抑制実験結果 (ジャイロセンサ出力値) を示す。ユニットを設置することで振動が効率的に抑制されていることが分かる。

2.2 鉛直方向姿勢保持機構および姿勢制御

農薬散布機は農薬散布用作業アームが長い場合、アームが車体に固定されている場合、高々数cm程度の地面の凹凸による車体のロール方向傾斜で作業アーム先端が上下方向に大きく揺動する。⁹⁾ したがって、本研究では、アームを重心位置近辺で車体に一点で回転支持する機構を検討した。この場合、アームに対してロール方向の外乱モーメントが作用しない限り、車体が傾斜してもアームは自己慣性で常に一定姿勢を保持することが期待できる。さらに、外乱モーメントによりアームが傾斜した場合でも、アーム支持位置を重心位置近辺に設けることで、アームを初期位置に復帰させるために使用するアクチュエータの駆動トルクを極力小さくすることが期待できる。ここではまず、アームを重心位置で車体に一点で回転支持した場合にアームを駆動するために必要とされる制御トルクをシミュレーションで検討した。

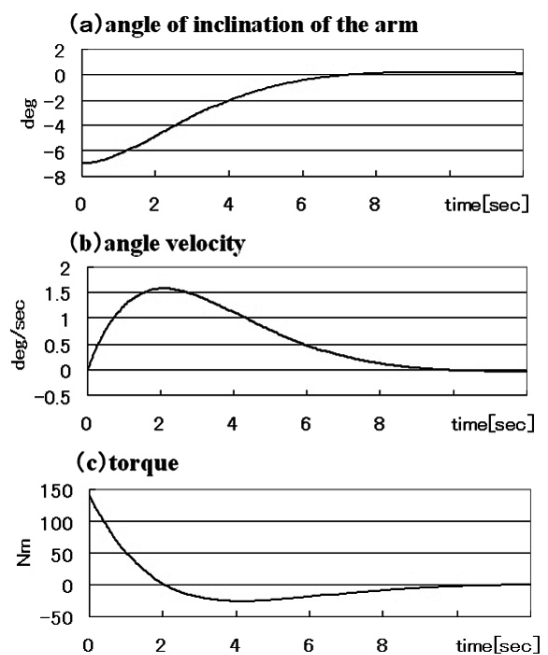


図7 アーム初期値応答および制御トルク (シミュレーション, 初期傾斜角 = 7度)

図7に重心位置で点支持された作業アームについて、7度傾斜した状態から水平状態（初期位置）に復帰させた時の初期値応答（Solidworks Motionシミュレーション結果）を示す。(a)は傾斜角、(b)は傾斜角速度、(c)は駆動トルクである。アームは実機を想定し、全長22m（片腕10m）、全質量269kg（第1アーム=66kg、第2アーム=20kg、支持点回りの慣性モーメント=4,270kg・m²）としている。なお、駆動トルクTは、傾斜角を θ 、傾斜角速度を ω として式(1)で計算した。

$$T = -20\theta - 60\omega \quad \dots(1)$$

なお、 θ と ω に対するフィードバックゲインは、応答を確認しながら試行錯誤で決定した。

図7(a)より、 θ と ω に対して式(1)のようにゲインを設定して制御トルクを計算することで、アームはオーバーシュートすることなく、滑らかに水平状態に復帰することが確認できる。なお、図7(b)、(c)より、アームの傾斜角速度の最大値は毎秒約1.6度、制御トルクの最大値は約140Nmであることが分かる。

表1 DC24V 400W モータ仕様
(高岳製作所(株)：MPTF040-0225BN)

rated torque	Ta	1.91 Nm
rated speed	Na	2000 rpm
reduction ratio	i	400
efficiency of gears	η	0.5
output torque	Tb = $\eta i Ta$	382 Nm
output speed	Nb = Na / i	5 rpm

表1にDC24V 400W モータ（㈱高岳製作所製）の定格トルクと定格回転数、さらに、減速比を400、ギヤの機械効率を0.5とした時のギヤ出力軸でのトルクと回転数を示す。トラック等では電源としてDC24Vバッテリーを使用することが一般的であり、車載用オルタネータ（発電機）も容易に入手可能である。

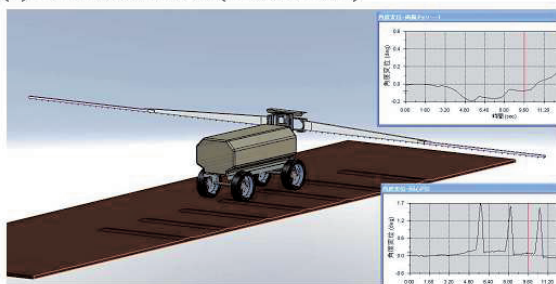
表1より、減速比を400とした場合、ギヤの機械効率を0.5と見積もっても、ギヤ出力軸では最大382Nmのトルクが出力可能であり、実機レベルの全長21mのアームを駆動するために必要とされるトルク（140Nm）の約2.7倍となっていることが分かる。さらに、減速後のギヤ出力軸回転数は5rpm（毎秒30度）となっており、シミュレーション結果（毎秒1.6度）を大きく上回る。したがって、ここでは制御の利便性を考慮し、アーム駆動用アクチュエータとして上記モータを使用することを前提に開発を進めた。

2.2.1 CAE走行シミュレーション

以上より、本研究では通常走行時はアームを重心位置近辺で点支持することでアームの自己慣性で姿勢保持し、ロール方向の外乱によりアーム傾斜角が大きくなった場合、適宜、電気モータで初期位置に復帰させるものとした。具体的には、モータとアーム支持軸の間にクラッチを設け、通常走行時はクラッチを開放してアームの自己慣性で姿勢を保持し、アーム傾斜角が一定値を超過した場合、クラッチを連結してモータ駆動でアームを初期位置に復帰させるものとした。

なお、本研究では試作機製作に先立ち、上記のアーム姿勢保持機構を搭載した農薬散布機走行時のアームの動的挙動を、

(a) CAE simulation (SolidWorks)



(b) Angle of inclination of the arm

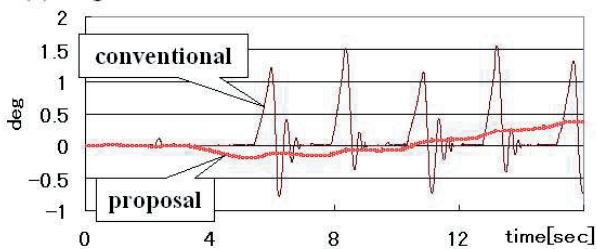
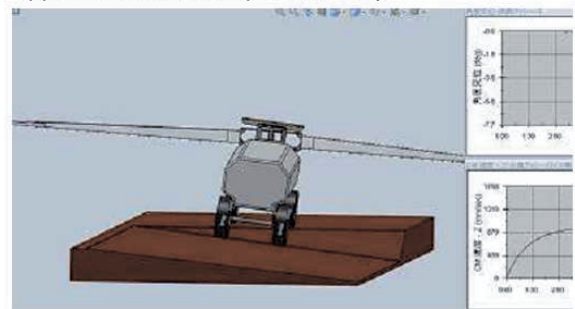


図8 CAEシミュレーション（凹凸路面走行）

(a) CAE simulation (SolidWorks)



(b) Angle of inclination of the arm

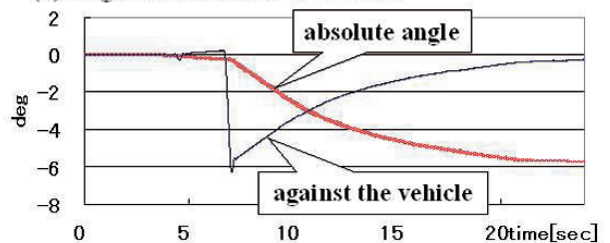


図9 CAEシミュレーション（傾斜地走行）

ダイナミクスを考慮したCAE機構シミュレーション解析で確認した後、試作機を製作し実証試験を行った。¹⁰⁾

図8(a)に、高さ6cm、ピッチ2mの連続凸部を有した路面を走行した時の農薬散布機作業アームの挙動をCAE機構解析ソフトSolidworks Motionで解析している様子を、(b)に既存機構(アーム固定型)と提案した姿勢保持機構でのアーム傾斜角解析結果(絶対水平からの傾斜角)を示す。図より、既存機構では車輪が凸部に乗り上げる毎にアームが1.2~1.5度程度傾斜するのに対して、提案機構ではアームはほとんど傾斜しないことが確認できる。

また、図9(a)に、提案機構を搭載した農薬散布機が傾斜地(傾斜角が0度から6度に変化)を走行した時のアーム挙動解析の様子を示す。(b)はその時のアーム傾斜角(絶対水平からの傾斜角)と車体に対するアーム傾斜角である。車体に対するアーム傾斜角を θ とし、 θ が1度を超過した場合、 θ を制御量として(1)式で制御トルクを計算し、アームが車体鉛直軸に対して垂直となるように制御している。なお、 θ が1度以下に復帰した場合、駆動トルクの付加を停止している。このようにアームを制御することで、傾斜地においてアームを傾斜地と平行に保持することが可能である。

図9(b)において、約7秒付近で車体に対する傾斜角 θ の値が0度から-6度に急変している。これは、車両が傾斜角6度の傾斜地に突入した時点では、まだアームが絶対水平姿勢を保持しており、車体のみが6度傾斜していることを意味する。その後、 θ 値を0とすべく(1)式でアームが制御され、ゆっくりと θ 値が0に収束し、これに伴い、アーム傾斜角(絶対水平からの傾斜角)が-6度に収束している。これは、アームが傾斜地と平行となっていることを意味する。

本シミュレーションを行うことで、本提案機構と制御方法にてアームが局部的な地面の凹凸に影響されことなく一定姿勢を保持すること、さらに、傾斜地においてはアームが地面の傾斜角変化に追従し、傾斜地に対して平行姿勢を保持することが確認できた。以上のように、試作機製作前にCAE走行シミュレーションを行うことで、制御方法を含めた本機構の妥当性を確認することができ、試作機製作後の各種パラメータ調整時間の短縮が可能となった。

2.2.2 試験車両

図10にシミュレーションで得られた知見を元に設計した姿勢保持機構搭載型試作機(けん引型)の図面を、図11に製作した試作機を示す。4mのアーム(図2)を左右に搭載し、アーム全体を重心位置近辺で作業機本体に一点で回転支持している。アームはクラッチと減速機を介して400W DCモータで駆動可能である。また、車体に対するアームの傾斜角を検出するため、アーム支持軸(回転軸)にポテンショメータ(以下、Pot)を設置した。さらに、アームに設置したジャイロセンサ出力値を積分してアーム傾斜角を求め、車体に設

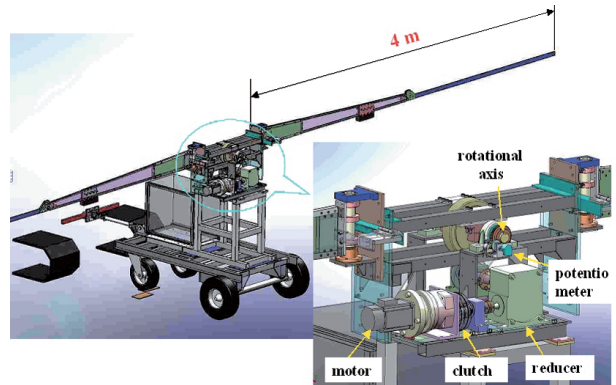


図10 姿勢保持機構搭載型農薬散布機試作機図面



図11 姿勢保持機構搭載型農薬散布機試作機

置した光ファイバジャイロ(以下、FOG)で車体傾斜角を計測した。なお、ジャイロセンサ積分値とFOG出力値の初期値は、各々アームと車体に設置した傾斜角センサの走行開始直前(車両停止時)の出力値で初期化した。

2.2.3 走行試験結果

図12に時速8kmで凹凸の激しい芝生上(平地)を約50m走行した時の既存機構(アーム固定型)と提案機構のアーム傾斜角(ジャイロセンサ積分値)を示す。既存機構ではアームが激しく振動しているのに対し、提案機構ではアームはほとんど振動していないことが分かる。50m走行試験を十数回繰り返した結果、アーム傾斜角は常に±1度以内であり、ほぼ水平状態を保持することを確認した。¹¹⁾

図13に傾斜角2~4度の傾斜地を時速9kmで約100m走行した時の実験結果を示す。(a)はアーム傾斜角(ジャイロ積分値)と車体傾斜角(FOG値)、(b)は車体に対するアーム傾斜角を表すPot(ポテンショメータ)生出力値とその過去2秒間の平均値、(c)はモータの制御トルクである。図12(a)より、車体は激しく高周波で振動(1~3Hz)しているのに対し、アームの高周波振動は抑制されていることが分かる。

先述したように、本走行試験では、通常走行時はクラッチを開放してアームの自己慣性でアームの姿勢を保持している。ロール方向の外乱モーメント等によりアームが傾斜し、Pot

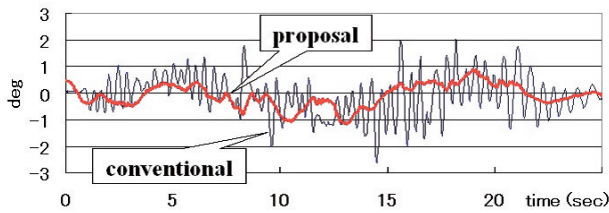


図12 平地走行時アーム傾斜角
(ジャイロセンサ積分値, 車速= 8 km/時)

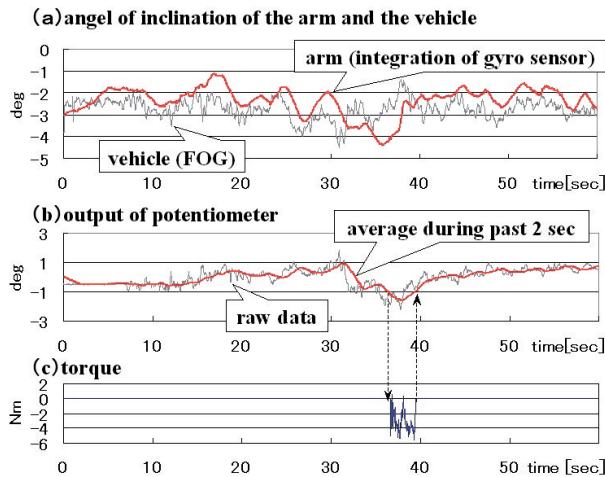


図13 傾斜地走行試験結果
(傾斜角 2 ~ 4 度, 車速 = 9 km/時)

値(絶対値)の過去2秒間の平均値が1度を超過した場合にクラッチを連結し、Pot値を制御量としたPID制御でアームをモータ駆動して初期位置に戻している。図13(b), (c)より、走行開始後36秒付近でPot値平均値が1度を超過したため、5 Nm程度の制御トルクがアームに作用し、その結果、アームが初期位置付近(Pot値=0度)に復帰していることが確認できる。なお、39秒付近ではPot値平均値が1度以下となったため、クラッチを開放して制御を停止している。

車体に対するアーム傾斜角を表すPot値を制御量としてアームにフィードバック制御を施すことで、アームを車体鉛直軸に対して垂直に保持することができる。この場合、Pot値の生出力値を一定値(本試験では1度)と比較してアームの制御を開始した場合、車体が単発的な凸部に乗り上げPot値生出力が一時的に一定値を超過した場合も制御が開始され、アームが一時的に大きく傾斜した車体鉛直軸に対して垂直姿勢を保持するように駆動されてしまう。しかし、この場合、制御が開始されることなくアームは自己慣性で姿勢保持することが望ましい。Pot値生出力ではなく、Pot値の過去2秒間の平均値を一定値と比較して制御を開始することで、単発的な突部乗上時においてアームの制御は開始されないことを確認した。

以上から、本提案機構と制御方法にてアームが地面の凹凸

に影響されることなく一定姿勢を保持すること、さらに、傾斜地においてはアームが地面の傾斜角変化に追従し、傾斜地に対して常に平行姿勢を保持することを確認した。

3. 播種機播種深さ解析

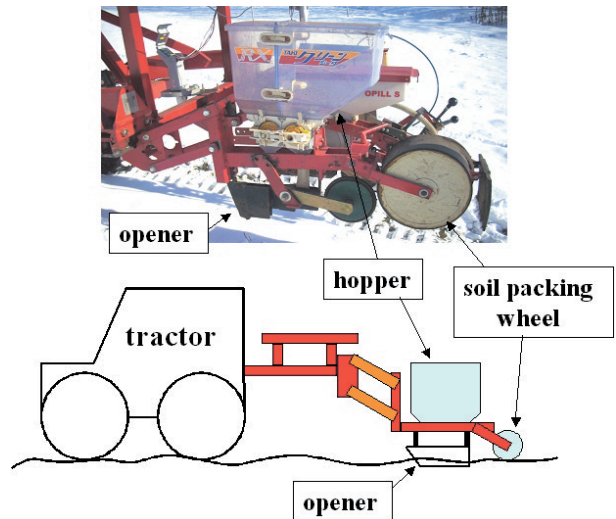


図14 播種機(従来播種機, 平行リンクタイプ)

播種機はオープナと呼ばれる板を土壤に差込みながら掻き分け、ホッパーから種を播種した後、覆土、鎮圧する。図14に平行リンク機構を介してトラクタにけん引されるタイプの播種機(従来播種機)を示す。したがって、高速走行時には、オープナに対する水平方向の土壤反力が大きくなるため機体の振動が激しくなり、一定の播種深さを保持することが難しくなる。さらに、前節の農薬散布機に比して機体全体の質量が小さいため、鎮圧輪(soil packing wheel)等の土壤との接触部位が受ける鉛直方向の土壤反力の影響で機体が大きく上下に振動する。したがって、播種機の機体振動、さらにはオープナによる播種深さを解析するためには、土壤反力を精度良く把握する必要があり、そのためには土壤の粘弾性特性を求める必要がある。したがって、本研究では播種機走行時のシミュレーション解析を行うに先立ち、土壤粘弾性モデル同定試験を行った。

3.1 土壤粘弾性モデル同定試験

土壤に車輪あるいは鎮圧輪等の一定の質量を有する物体が落下した場合、その物体は土壤から反力を受ける。土壤反力を計算する粘弾性モデルとしては、(2)式に示すvoigtモデル(線形モデル)が広く知られている。

$$F = kx + cv \quad \dots(2)$$

ここで、 F [N]は土壤反力、 x [m]は変位(土壤に埋まった深さ)、 v [m/s]は速度、 k [N/m]はばね定数、 c [Ns/m]は粘性係数である。一方、本研究では、4次までの弾性項を

考慮した非線形モデルを提案する。

$$F = k_1x + k_2x^2 + k_3x^3 + k_4x^4 + cv \quad \dots(3)$$

(2), (3)式の妥当性を評価するため、土壌の粘弾性特性を求める実験を行い、各式と実測値を比較・検討した。ある一定の質量を有する物体を任意の高さから土壌に落下させ、その時の土壌反力Fと土壌に埋まった深さxを実測することで、土壌の粘弾性特性を求めることができる。実測値を(2), (3)式で最小自乗近似することで各式の妥当性を評価することができ、さらに各式の未定係数を求めることができる。

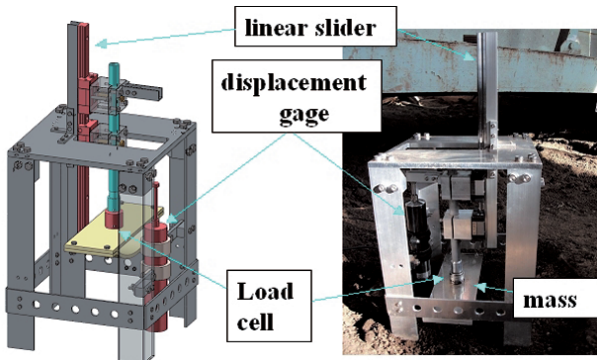


図15 土壌粘弾性特性測定装置

図15に土壌の粘弾性特性を求めるために製作した実験装置を示す。鎮圧輪を想定した平板状のおもりを、土壌に対して常に垂直に当たるようにリニアスライダに沿って落下させる。その時に発生する落下衝撃力（土壌からの反力）をロードセルで測定し、平板状のおもりが地面に埋まる深さを変位計で測定する構造となっている。

図16に土壌粘弾性の実測値と、実測値をvoigtモデル(2)式と提案モデル(3)式で最小自乗近似した結果を示す。横軸は変位（平板が土壌に埋まった深さ）、縦軸は土壌反力である。図より、線形voigtモデルに比して、4次までの弾性項を考慮した非線形提案モデルにて実測値をより正確に近似できて

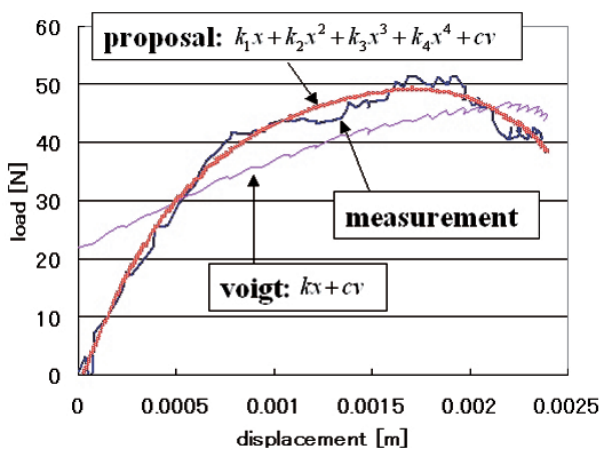


図16 土壌粘弾性モデル実測値とモデル式

いることが分かる。したがって、ここでは土壌粘弾性モデル式として、(3)式を用いて播種機走行時のシミュレーション解析を行った。

3.2 播種機播種深さ解析シミュレーション

播種機の機体振動、さらにはオープンナによる播種深さを解析するためには、土壌の粘弾性特性より導かれる土壌反力を考慮した解析が必要となるが、市販CAE解析ソフトウェアでは解析困難である。したがって、本研究では解析に土壌反力の影響を反映させるため、前節の土壌粘弾性モデルを含めた播種機走行時の力学モデルを考案した。図17に播種機走行時の力学モデルを示す。図に示す力学モデルを元に播種機走

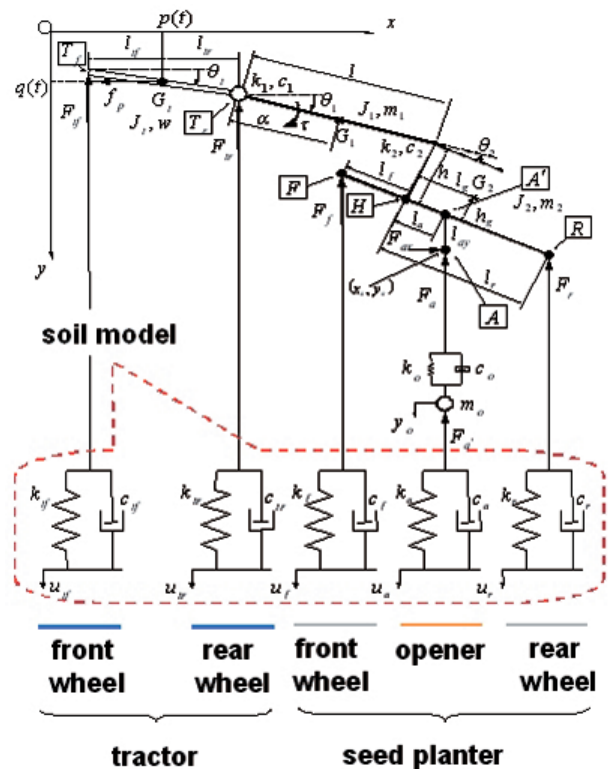


図17 播種機走行時力学モデル

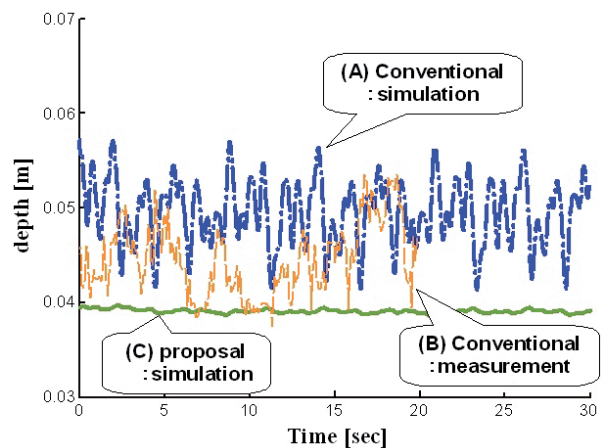


図18 土壌粘弾性モデル実測値とモデル式

行状態を表す運動方程式を導き出し、状態方程式として定式化した後、ルンゲクッタ法を用いて播種機の機体振動、さらには播種深さを解析し、一定の播種深さを得るための機構を提案した。

図18Aに本解析手法を用いて計算した従来播種機(図14)の播種深さを、Bに従来播種機の播種深さ実測値を示す。Cは播種深さを一定にするための提案機構による播種深さ解析値である。AとBを比較すると、振幅および振動数が同傾向であることから本解析手法の妥当性が確認できる。また、Cより、提案機構にて振動の少ない一定の播種深さが得られていることが確認できる。本解析手法を用いることで、一定の播種深さを得るためのリンクの長さ、設置するバネのバネ定数、さらにはリンクのどの位置にバネを設置するのが効果的か等の検討を行うことが可能となった。

4. まとめ

本研究では以下の要素技術を農業機械に適用し、高速走行時においても姿勢の乱れや振動の少ない作業機の開発を試みた。

- (1) アクティブ制御技術
- (2) CAE(機構解析機能)を活用した作業機設計技術
- (3) ダイナミクス解析技術

その結果、農業散布機作業アームにおいては前後方向に発生する弾性たわみ振動が効率的に抑制されること、アームが地面の凹凸に影響されることなく一定姿勢を保持すること、さらに、傾斜地においてはアームが地面の傾斜角変化に追従し、傾斜地に対して常に平行姿勢を保持することを確認した。

また、播種機においては、土壌粘弾性特性を考慮した播種深さ解析手法を開発し、同解析手法を用いることで高速走行時においても一定の播種深さを保持する機構を提案した。

今後は共同研究企業と連携し、実用化に向けた製品開発を行う予定である。なお、上記要素技術は、XYテーブルやロボットアーム等の位置決め、各種搬送作業車の動的挙動解析等、運動を伴う装置一般の解析・制御に適用できる汎用的な技術であり、今後は一般・電気機械器具製造業への展開も図る予定である。

謝辞

本研究で振動の計測・データ処理に使用した機械性能評価システムは、財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。また、CAEシミュレーション解析に使用した3次元CAD解析システムは地域産学官共同研究拠点整備事業により整備されました。記して感謝致します。

引用文献

- 1) 中西洋介ほか2名：モーダル解析を用いた柔軟作業アームの制振制御，北海道立工業試験場報告，No307，pp13-19，(2008)
- 2) 長南征二・高橋和彦：弾性ロボットアームのフィードバック位置決め制御，日本機械学会論文集(C編)，Vol.55 No.513，pp.1215-1220，(1989)
- 3) 福田俊男：フレキシブルロボットアームの制御，日本機械学会論文集(C編)，Vol.51 No.468，pp.2140-2144，(1985)
- 4) 近藤晋司ほか2名：柔軟構造物の振動制御におけるセンサおよびアクチュエータの位置，日本機械学会論文集(C編)，Vol.55 No.513，pp.1206-1214，(1989)
- 5) 福田俊男ほか4名：太陽電池パドルのフレキシビリティ制御，日本機械学会論文集(C編)，Vol.51 No.465，pp.979-984，(1989)
- 6) 中西洋介ほか3名：柔軟作業アームの制振制御，北海道立工業試験場報告，No305，pp25-38，(2006)
- 7) 中西洋介：モーダル解析を用いた長尺作業アームのアクティブ制振制御，第67回農業機械学会年次大会講演論文集，pp297-298，(2008)
- 8) 梅田遼平，星野洋平，小林幸徳，江丸貴紀，中西洋介：適応アクティブ制振ユニットの開発とブームスプレーヤーへの適用，第42回計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文誌，pp.27-30，(2010)
- 9) 中西洋介，吉川毅，浦池隆文，鈴木慎一，小林幸徳，星野洋平，江丸貴紀：農業散布機作業アームの姿勢・振動制御，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会講演論文集(CD-ROM)，1A1-B10，(2010)
- 10) 中西洋介，浦池隆文，小林幸徳，星野洋平：軽量型農業散布機作業アームの安定化制御技術，農業環境工学関連学会2009年合同大会講演論文集(CD-ROM)，G71，(2009)
- 11) 中西洋介，吉川毅，浦池隆文，鈴木慎一，小林幸徳，星野洋平，江丸貴紀：農業散布機作業アームの姿勢・振動制御(大規模農業に向けた走行安定化機能を搭載した高速農作業機械の開発)，第69回農業機械学会年次大会講演論文集，pp224-225，(2010)