

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06220

研究課題名(和文)分散配置型マイクロ動吸振器アレイによる超低振動高効率大型ブームスプレーヤの実現

研究課題名(英文) Realization of Ultra Low Vibration in Large Boom-Sprayers with High Operation Efficiency by Distributed Micro Active Mass Damper Array

研究代表者

星野 洋平 (Hoshino, Yohei)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：90374579

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：動吸振器アレイ化を実現するために軽量化ならびに小型化が課題であった回転型アクティブ動吸振器(Active Wheel Damper)AWDに対し、制御システムを簡素化したうえで動的量子化器と呼ばれる手法を導入して除振性能を維持しつつ、慣性力発生用のフライホイールを大幅に小型化すると同時に小型低出力で低コストのDCモーターでの動作を可能とすることで大幅な小型軽量化を実現し、複数のAWDを構築した。また、除振性能評価実験を行い、制御対象のすべて周波数帯域において定常的かつ効果的に振動が抑制されており、小型軽量化されたAWDは定常加振力に対しても十分な除振性能を発揮することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

回転型アクティブ動吸振器(Active Wheel Damper)AWDに対し、回路やコントローラーで構成される制御システムを簡素化するだけでなく小型で低コストのDCモーターでの動作を可能とすることで小型軽量化を実現し、最終的な研究目的を達成するために必要な小型低出力のAWDを構築した。そして、ブームスプレーヤのブームが農薬散布作業時に風により加振される場合を想定し、風による流体力により定常加振される場合の除振性能の評価を実施し、定常応答振幅ならびに時間周波数解析の評価によって十分な除振性能が示された。この研究で得られた成果はブームスプレーヤの低振動化を実現するために工学的に大きな意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：Downsizing and lightening of the Active Wheel Damper (AWD) was necessary for realizing effective vibration suppression by constructing an array of active mass dampers. This study simplifies the control system of the AWD and introduces the dynamic quantizer to enhancing control performance on low cost controller. Moreover, significant downsizing and lightening of the AWD are achieved by downsizing the fly-wheel of the AWD, which generates inertial force (inertial moment), and by adopting small and low cost DC motor. Conducting experiments for evaluating the damping performance, the experiments showed that the vibrations are effectively suppressed in steady-state through the wide frequency bandwidth by the downsized AWD system.

研究分野：機械力学

キーワード：ブームスプレーヤ 回転型アクティブ動吸振器 小型低出力除振装置 強制振動 除振

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、日本では農業従事者の高齢化や新規就農者の減少が進んでおり、全国的に農作物の生産量が減少しつつある。北海道では農地の集約化と大規模化が特に進んでおり(図 1)、農地が 100 ha を超える経営体も存在する。このような大規模農業を実現するためには農作業の省力化や自動化が強く求められる。北海道では大規模な農地の管理作業のため、図 2 に示すような農地農薬散布用のブームスプレーヤが広く用いられている。ブームスプレーヤは片側 15 m(左右のブームで 30 m 以上)におよぶ長大で柔軟なブームにスプレーのノズルが取り付けられており、広範囲に農薬を散布することを可能とする農作業機械である。しかしながらブームが柔軟であるため、トラクターを高速走行させつつ農薬散布を行うと、車体の振動によってブームが振動し、農薬が均一に散布することができなくなるだけでなく、振動によりブームが農地や作物に接触や衝突することによってブームの破損や農作物を痛めてしまう可能性があるため、現在は時速 3~4 km/h 程度の低速での作業が行われている。しかしながら、例えば図 3 に示すように、散布幅 30 m のブームスプレーヤで、長さ 2 km 幅 500 m の 100 ha の農地の農薬散布作業では、最も作業が効率的に進む想定でも、最短で 8.5 h の作業時間を要し、ブームの高さや散布量の細かい調整を行いながら、集中力が必要な長時間の重労働となることが分かる。平坦な農地における大規模農業では省力化のために RTK-GPS を利用した自動操縦や自動操舵トラクターの導入が進んでいるが、低速での自動操縦・自動操舵作業では問題とならないブームの振動が将来的に作業速度を高速化するにつれてトラクターの直進安定性の低下を招く結果となることが予想されるため、ブームの振動低減は自動操縦による作業の高速化を実現するために重要な課題となることが考えられる。



図 1 北海道で実施されている大規模な農業

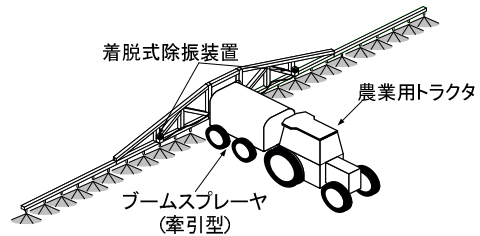


図 2 ブームスプレーヤへの除振装置の適用

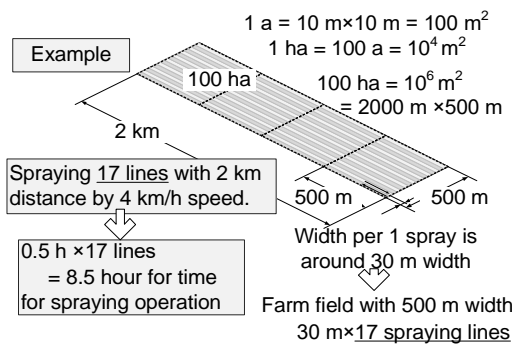


図 3 スプレーヤの散布作業に要する時間

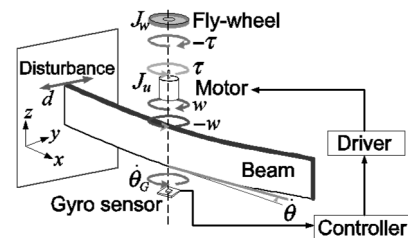


図 4 Active Wheel Damper (AWD) の除振原理



図 5 Active Wheel Damper(AWD)試作装置

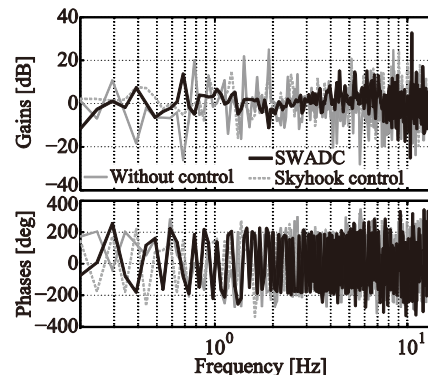


図 6 走行実験による性能比較

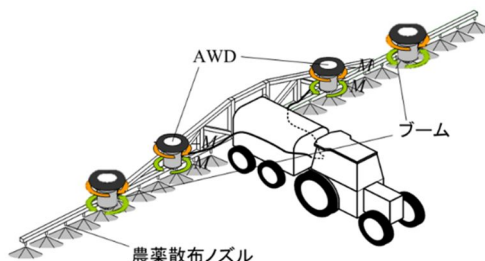


図7 AWD (Active Wheel Damper)アレイによるブームスプレーヤの振動制御

一般的なアクティブ動吸振器はセンサで振動系の状態を観測し、質量  $M$  [kg]の慣性質量をアクチュエータの発生力  $f$  [N]によって加速度  $a$  [m/s<sup>2</sup>]で加速する際に発生する反作用  $-Ma$  [N]を利用して制振効果を得る除振装置であり、すでに多くの研究が発表され、実用化されているが、十分な制振効果を得るためには、質量  $M$  を大きくするか加速度  $a$  を大きく（つまり大きなストロークを確保）する必要がある。一方、本研究課題の研究代表者が提案している回転型除振装置 Active Wheel Damper (図4)は、モータとフライホイールから構成され、慣性質量の役割を持つフライホイールの回転をモータにより加速し、発生する反トルクを利用して制御対象を制振する。回転型とするメリットは、高慣性の慣性質量を軽量で実現できるため、装置の重量比で大きな制振力を生み出すことが可能であり、さらに慣性質量の運動に要するストロークを無限に確保できることである。そのため、制振装置の小型・軽量化が可能である。

本研究課題の研究開始当初の背景としては、試作した AWD(図5)を実験用模擬スプレーヤに取り付けて走行時の除振性能試験を行った結果(図6)、AWDなし(灰色)と比較してAWD稼働時(黒)のように、例えば2Hz付近のピークなどにおいて振動が-20dB程度(およそ1/10程度)に抑制されることが分かった。これを応用して図7に示すように農業用ブームスプレーヤに小型化した低出力のアクティブ動吸振器を多数配置することでマイクロ動吸振器アレイを形成することができれば、今後ブームがさらに大型化・長大化された場合においても、ブームの長さに合わせて除振装置を配置することで必要な振動エネルギーの吸収率を確保することが可能となり、より低振動で安定かつ超大型なブームスプレーヤの実現が可能となると考えられるため、大規模農業において問題となる農薬散布作業の効率化に役立つ技術の基盤となると考えた。

## 2. 研究の目的

この研究の目的は、前述のとおり、農業用ブームスプレーヤに図7に示すように小型低出力のアクティブ動吸振器を多数配置することでマイクロ動吸振器アレイを形成し、必要な振動エネルギーの吸収率を確保することで、より低振動で安定かつ超大型なブームスプレーヤを実現可能な技術を研究し、大規模農業において問題となる農薬散布作業を格段に効率化することである。

## 3. 研究の方法

除振装置とブームの運動モデルを図8に示す。除振装置の取り付け位置のブームのたわみ角を $\theta$ 、除振装置の回転角を $\theta_u$ とし、フライホイールの慣性モーメントを $J_w$ 、フライホイールを除く除振装置の慣性モーメントを $J_u$ とすると、 $\theta = \theta_u$ であるため、除振装置を取り付けたブームの運動方程式は

$$(J + J_u)\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = \tau + d \quad (1)$$

となる。なお、 $\tau$ は制御入力、 $d$ ははりに作用する外乱である。また、本研究では外乱は突発的な衝撃などに起因する過渡的外乱と、持続的外乱の二つの特性を有するものと仮定し、前者にはフィードバック制御、後者にはフィードフォワード制御を適用することが効果的である。そのため、制御入力 $\tau$ は

$$\tau = \tau_{fb} + \tau_{ff} \quad (2)$$

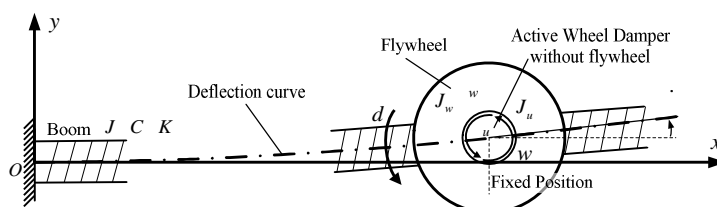


図8 除振装置 AWD とはりの運動モデル

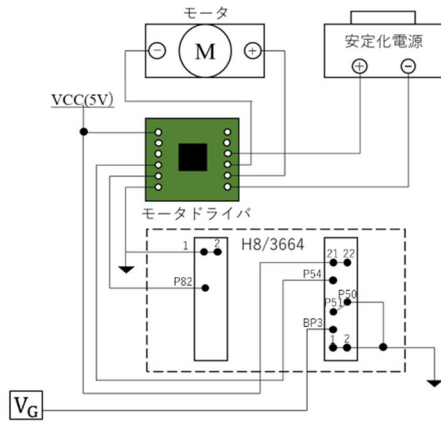


図 9 小型化された AWD の回路構成

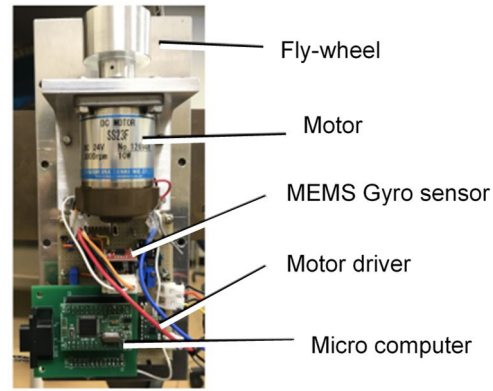


図 10 小型化された AWD

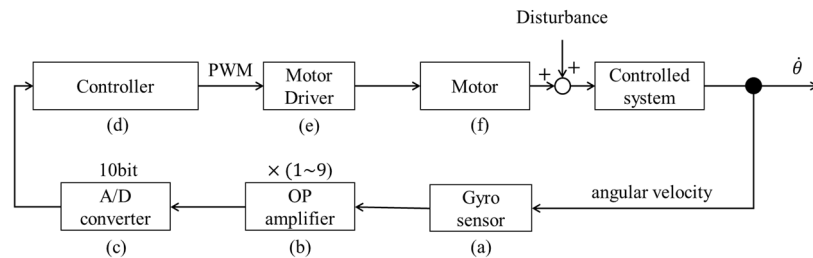


図 11 制御系のブロック線図

とする。なお、 $\tau_{fb}$ はフィードバック制御入力、 $\tau_{ff}$ はフィードフォワード制御入力である。

#### 4. 研究成果

この研究では、はじめに試作の AWD 除振装置の小型化と低コスト化を実施した。ここでマイコン(H8/3664F)、ジャイロセンサ(LPY503AL)、モータドライバ(pololu-2136 DRV8801)、DC モータ(SS23F-DC24V)を用いて AWD を小型化した。この研究の中で、低コスト化の際の除振装置の分解能の低下による除振性能の低下を緩和するために、動的量子化器を適用することで制御性能の回復が可能であることが示され、低い分解能の制御系においても高分解能の制御系と比べて遜色ない制御性能が得られることが分かった。この手法は、回転型除振装置の低コスト化だけでなく、低コストな制御系の構築に対して応用可能である。構築した低コスト小型 AWD を 図 9、図 10 に示す。モータは PWM により制御しており、ジャイロセンサの出力に比例してデューティ比を変更することで発生トルクを制御する。ジャイロセンサは 1.23 V を基準として 0~3.3 V の範囲で角速度の信号を出力するが、マイコンの AD 変換ポートの範囲が 0~5 V であり、マイコンのダイナミックレンジを最大限利用するため、オペアンプにより作成したアナログ回路によりオフセット成分を差し引いたのち信号を 4 倍に増幅してマイコンの AD 変換ポートにより計測を行っている。フィードバック系のブロック線図を図 11 に示す。

そして、構築した小型 AWD の除振性能を評価するため、トラクター走行中の車両の振動に起因する加振力や風による加振を想定した定常加振時の除振性能を評価した。実験については、風による流体力により定常加振される片持ちはりに小型 AWD を適用した場合の除振性能評価を行った。

実験では、図 12 に示すような幅 85 mm、長さ 1200 mm、厚さ 3 mm の真鍮製のはり、電源装置(AD-8735A)、オシロスコープ(TBS 1072B)、送風機(F-40VG1)を用いた。はりは長さが 890 mm となる位置で固定し片持ちはりとした。この片持ちはりに対して、羽根の直径が 40 cm で、電源周波数が 50 Hz での風量が 74 m<sup>3</sup>/min の送風機を用い、流体力により定常的に加振した。風洞の出口の大きさは約横 41 cm 縦 31 cm とした。振動の計測にはオシロスコープで増幅後のジャイロセンサの信号を測定して小型 AWD の除振性能を評価した。

非制御時とスカイフック制御適用時の角

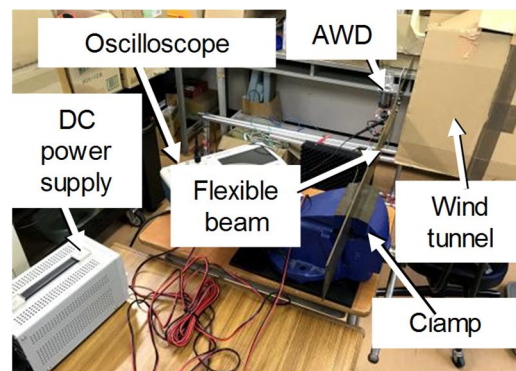


図 12 実験装置

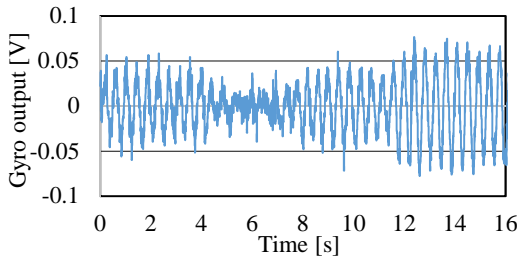


図 13 AWD 停止時の時刻歴応答

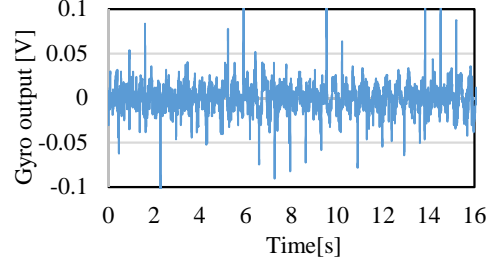


図 14 AWD 稼動時の除振性能( $K_{sky} = 10$ )

表 1 図 13 と図 14 の角速度振幅の RMS 値とたわみ角変位振幅の換算値

	Without control (Fig.13)	Sky-hook control (Fig.14)
RMS of angular velocities	0.642010 V (around 4 Hz)	0.554642 V (around 40 Hz)
Calculated amplitudes of deflection angle	$2.554 \times 10^{-2}$	$2.207^{-3}$

速度信号をそれぞれ図 13 および図 14 に示す。図 13 と図 14 それぞれについて角速度の RMS を計算した結果を表 1 に示す。図 13 と図 14 を比較するため、表 1 には、角速度の振幅の RMS 値が変位振幅  $A$  と主要な周波数成分の円振動数  $\omega_p$  の積で与えられると仮定し、変位の振幅を

$$A \text{ (Calculated amplitude of displacement)} = \frac{\text{(RMS amplitude of gyro-sensor signal)}}{\omega_p \text{ (Principal circular frequency of gyro-sensor signal)}} \quad (3)$$

で換算して得られた変位振幅相当値も示した。さらに得られた結果に対して時間周波数解析を行った(図 15、図 16)。図 15、図 16 は縦軸が周波数、横軸が時間を示しており、振動計測結果に含まれる周波数成分の時間変化を示したものである。赤色で示されるほど周波数成分が大きいことが分かる。制御時(図 16)では非制御時(図 15)と比較して、特に 13~16 秒の間の 30~50 Hz で振幅が小さくなっていることが読み取れる。制御時の図 16 において 0.8 秒付近で赤色で示される振幅の大きな周波数成分が見られるが、原因は回転型除振装置 AWD の始動時に生じる入力のためと考えられる。これらの結果から制御有りの場合(図 16)の振幅が小さくなっており定常的な加振力が作用した場合においても小型 AWD の有効性が示された。

本研究課題により得られた成果を以下にまとめる。動吸振器アレイ化を実現するためには軽量化ならびに小型化が課題であった回転型アクティブ動吸振器(Active Wheel Damper)AWD に対し、回路やコントローラで構成される制御システムを簡素化し、慣性力発生用のフライホイールを大幅に小型化すると同時に小型低出力で低コストの DC モータでの動作を可能とすることで、大幅な小型軽量化を実現した。そして小型の片持ちはりに対する単体の動作によって十分な除振性能を発揮できることを確認し、複数台の AWD 装置を構築した。そして、ブームが風により加振される場合を想定し、風による流体力により定常加振される片持ちはりに小型 AWD を適用した場合の除振性能評価を行った。この実験により小型軽量化された AWD は定常加振力に対しても十分な除振性能を発揮することが示された。さらに、周波数に着目した AWD による除振性能評価実験を行った。ここでは、AWD を作動させた場合とさせない場合について、周波数成分を時間周波数解析によって評価することで、制御対象のすべての周波数帯域において定常的かつ効果的に振動が抑制されていることを確認した。研究期間中に得られた成果はブームスプレーヤの低振動化を実現するために工学的に大きな意義を持つ。

今後は、この小型 AWD システムを実用化し、ブームスプレーヤへの適用により超大型のブームスプレーヤの実現、ならびに自動操縦・自動操舵トラクターの高速化時の走行安定性に与える影響について研究を進めることで、ブームスプレーヤの大型化と高作業効率化に寄与することを目指す。

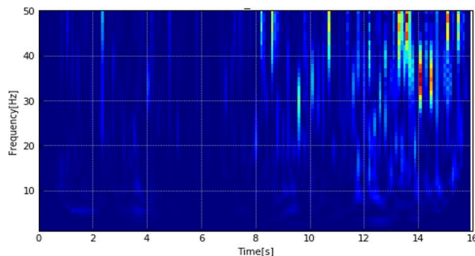


図 15 AWD 停止時の時間周波数解析

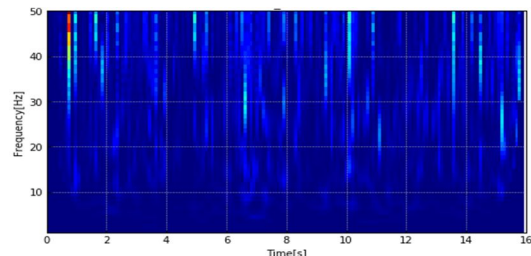


図 16 AWD 稼動時の時間周波数解析

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 石崎衛, 星野洋平, 楊 亮亮, 曹 贏
2. 発表標題 回転型除振装置(Active Wheel Damper, AWD)による除振装置アレイの構築とブームスプレーヤの除振性能評価
3. 学会等名 日本機械学会北海道学生会 第48回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 星野洋平, 安藤恭平, 鈴木聡一郎, 楊 亮亮
2. 発表標題 低分解能アクティブ制御系を適用したスプレーヤブーム用除振装置Active Wheel Damperの性能評価法と制御系設計
3. 学会等名 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会 Dynamics and Design Conference 2017 (D&D2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yohei Hoshino, Soichiro Suzuki, LiangLiang Yang and Ying Cao
2. 発表標題 Novel Performance Evaluation and Controller Design Method for Low-Resolution Active Control System Realized by Dynamic Quantizer
3. 学会等名 International Symposium on Engineering Research 2018 (ISER2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 星野 洋平, 楊 亮亮, 曹 臧, 石崎 衛, 湯口 香烈
2. 発表標題 丘陵農地における高効率大規模農業実現のためのブームスプレーヤ除振・免振システムと除振性能評価
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度 年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	楊 亮亮 (Yang Liangliang)  (90773739)	北見工業大学・工学部・助教  (10106)	
研究分担者	高井 和紀 (Kazunori Takai)  (50271755)	北見工業大学・工学部・准教授  (10106)	
研究分担者	羽二生 博之 (Hiroyuki Haniu)  (70172955)	北見工業大学・工学部・教授  (10106)	
研究分担者	鈴木 聡一郎 (Suzuki Soichiro)  (30250541)	北見工業大学・その他部局等・学長  (10106)	削除：2019年3月18日