

氏 名（本籍地）	鄭 小蘭（中国）		
学 位 の 種 類	博士（工学）		
報告・学位記番号	甲第400号（甲工第106号）		
学位記授与の日付	平成28年9月25日		
学位記授与の要件	本学学位規程第3条第1項該当		
学 位 論 文 題 目	索構造機械の制振制御に関する研究		
論 文 審 査 委 員	主査	客員教授	工学博士 西 郷 宗 玄
	副査	教授	工学博士 大久保 俊 文
	副査	教授	工学博士 吉 田 善 一
	副査	成蹊大学准教授	博士（工学） 岩 本 宏 之

【論文審査】

申請論文は、クレーンを代表とする索構造機械の制振制御に関して、多くの従来研究のアプローチとは異なる視点からの新しい試みの報告である。クレーン制御の従来研究が固有振動モードを基本とする振動制御法であるのに対して、本研究は波動伝搬に基づいた制振制御法に関する独創的な研究である。

本論文は5章構成で、第1章は序論、第2章は懸垂索の波動制御、第3章は懸垂多重単振子系の波動制御、第4章はクレーン索荷質量系の波動制御、第5章は結論を記述している。

第1章では、第1節で研究の背景と目的、第2節で波動制御研究の概観、第3節で索構造機械の制振研究の概観、第4節で本研究の概観を記述している。

第1節では、波動制御と振動制御の制御法の違いを懸垂多重振子系を例として Fig. 1-1 に図示している。波動制御は、懸垂系支持端の水平運動を制御することにより、あたかも制御すべき懸垂系が仮想的な懸垂系に懸垂されている状態を生成して、制御対象の振動エネルギーが仮想的な懸垂系に波動伝搬する状態を制御対象に対して実現し、振動エネルギー吸収を行う方法である、と記している。実際の物理的なエネルギー吸収は、支持端水平運動の制御を行うアクチュエータで吸収することになる。

第2節では、波動制御の従来研究の文献調査を記述している。波動制御研究が活発になったのは1990年代からで、機械構造物の基本要素「はり」と「索」やそれらの組み合わせ構造（トラスなど）を対象にした研究の文献調査を幅広く行い、波動制御法の考え方を調

査した結果を記している。また、「はり」や「索」の分布定数系とは異なる、ばね・質量（・減衰）系としての集中定数系での波動伝搬制御研究の調査も行っている。分布定数系と集中定数系では波動現象は類似しているが、両者は力学的には異質のものであり、制御アプローチが異なることを確認している。本研究の基礎となる、「はり」の差分近似制御則を用いた境界近傍制御法についても調査している。

第3節では、クレーンの制振制御研究の文献調査結果を記している。クレーンの振れ止め制御研究は、振動制御に基づく制御として従来から大学や企業で多くの研究者に取り組まれているが、ロープ長変動を如何にして制御に取り込むかが最大の課題である、と記している。初期の最適制御則ではロープ長をパラメータとした可変ゲイン系が研究され、その後、ゲインスケジュールド制御の原理を用いて可変ゲインを連続させる安定性が研究された。また、搬送軌道を設定した終端時間制御やタワー・ロープ振動系としての制振問題が扱われた。走行による吊り荷の振れ振動と走行特性を利用した制振問題も研究された。しかし、これらの取り組み方法の基本には、制御対象の運動を予め想定していることがあり、突風や障害物との接触など想定外の外乱には制御性が低下するのではないかと指摘している。一方、制御対象モデルにそれほど依存しないクレーン制御手法の研究も調査した。Fuzzy 制御やニューラルネット制御を適用した研究や、最近では、Input Shaping 制御が研究されている。クレーン制御は可変長単振子の自由振動の制御であり、精密な制御を要求されなければ複雑な制御でなくても実用的には制振は可能であるはずで、Input Shaping 制御はその特性を利用していると記している。また、多自由度振動系の波動伝搬制御をクレーンに応用する研究調査も行った。本研究課題の基礎となる、Saigo らの多重懸垂単振子系の波動伝搬特性を利用したクレーン振れ止め制御法を調査した。

第4節では、本研究のイメージを図示している。第2章の懸垂索制御は、上端を固定したクレーン索自体の質量を考慮したモデルで、索の横振動が波動を伝搬することを利用して索系全体の振動エネルギーを吸収する考え方であることを示している。下端に荷質量が無い場合と有る場合を対象としている。第3章の多重懸垂体の波動制御と第4章のクレーン索荷質量系の波動制御では、索質量は無視して荷質量のみを考慮する振子モデルであること、また、振子が多重に懸垂されている場合の波動伝搬特性を利用する制御法であることを記している。

第2章は懸垂索の波動制御の記述である。第1節で緒言、第2節で制御則、第3節で制御シミュレーション、第4節で制御則の特性、第5節で結言を記述している。

第1節は、懸垂索の運動方程式の特徴と差分近似の問題点の記述である。波動制御に必要な波動伝搬解を導出するために差分近似を用いたこと、懸垂索の下端自由境界条件が微分方程式の境界値問題として特異で数学的には解明されていないことなど、懸垂索の力学的特異性を記している。

第2節は制御則の記述である。第1項では、差分モデルと下端自由境界条件の設定法の検討と、差分モデルの節点と境界の取り方の妥当性の検討を記述している。第2項は波動伝搬解の記述である。最も合理的と判断した差分モデルについて波動伝搬解を導出している。厳密な波動伝搬解を求められないため、隣接3節点変位を剛性項に含む節点運動方程式で、剛性の変化を中央節点で代表する近似を行って波動伝搬解を求める方法を考案している。ラプラス変換した方程式で波動が上方（反重力側）に伝搬する解を求め、ラプラス逆変換することで時間軸応答計算ができる波動伝搬解を導出している。近似解の精度を差分運動方程式の数値解との比較で検証している。懸垂索制御は上端固定近傍で行うため、波動伝搬解としての精度は、次節で用いた50自由度で十分であることを確認している。ここで、近似解は、隣接節点変位差で表現する差分運動方程式から求めているが、下端質量が十分大きい場合差分節点番号が十分大きい場合には、節点変位で表現する差分方程式で運動方程式が近似できるため、求めた近似解をさらに近似することができる。2つの近似解の精度の差は上述の精度検証ではほとんど確認できない程度である。第3項は制御則の記述である。制御則は、境界条件の影響を受ける境界節点方程式を、境界条件の影響を受けない内部節点方程式と力学的に等価とする制御項（制御力）として導出している。境界節点方程式で起こる反射を除去することで、境界近傍の力学状態を仮想的に境界のない状態とする制御力によって波動吸収する手法である、と説明している。

第3節は制御シミュレーションの記述である。第1項で、集中質量を有しない下端自由境界の場合のシミュレーション結果を記している。導出した差分制御則によって、差分集中定数索（差分モデル）でも分布定数索でも、1 m 懸垂索の下端の0.1 m 初期変位が3 s 程度で整定することを確認している。分布定数索の計算では懸垂索の振動解がベッセル関数で与えられることを用いている（波動伝搬の解析解は知られていないが振動解はある）。波動制御は伝搬変位を吸収する手法であるため、境界近傍制御変位が大きくなる傾向にある。実用的には索に過大な応力を与えることになる。そこで、制御変位に制限を与えた場合を分布定数索について確認している。振動1周期当たりの制御時間が減少するため整定時間が長くなるが（上記の例では約2倍）安定に制振できることを検証している。下端を加振した場合の強制振動制御応答も調べている。集中定数差分索と分布定数索の1次固有振動応答が十分一致していることを確認している。2次固有振動数以上の固有振動数加振の制御応答では両者に差異が認められるが、分布定数索の自由端の力学特性が複雑であるため誤差が大きいのではないかと、考察している。クレーン索制御は自由振動制御が実用的には重要であり、強制振動については1次固有振動数制御応答が確認できれば問題はないと思われる。第2項で、集中質量を有する下端自由の場合のシミュレーション結果を記している。下端集中質量を有する場合の分布定数振動解は知られていないので差分索計算のみである。下端質量を有する場合は制振性が悪く、1 m 索に索質量の100倍の質量を付

加した場合の0.1 m 初期変位に対する整定時間が約20 s である。制御変位に制限を与えた場合も計算しているが、約80 s の整定時間である。これらの結果から、下端質量を有する懸垂索の制振法としては本手法は適切でなく、次章以下の振子モデルとしての取り扱いが妥当であると、記している。下端質量がある場合の制振性の悪さの原因、つまり、索系のポテンシャルエネルギー（初期速度を与えると運動エネルギーも含む）を波動伝搬として吸収する本手法のどこがネックになっているのかの考察がほしいところである。

第4節では本制御則の特性について考察している。1 m 索に索質量の2 倍の質量を付加した場合の0.1 m 初期変位に対する自由振動制御応答で、制御力による印可エネルギーと制御変位の関係を Fig. 2-21 と Fig. 2-22 に示している。本制御は、変位ゼロの状態から変位が大きくなる時間に索系にエネルギーを印可し、極大変位から変位が減少する時間にエネルギーを吸収していることを、見つけている。印可エネルギーと吸収エネルギーの差が系のエネルギーを吸収することになる。Fig. 2-21 と Fig. 2-22 は、隣接節点変位差表現の差分方程式から求めた近似解と隣接節点変位表現の差分方程式から求めた近似解の応答の差を示しているが、変位差表現式の近似解の方が制振性が若干良いことが確認できる、と考察している。一方、制御変位に制限を与えた場合の応答 Fig. 2-23 と Fig. 2-24 では、変位差表現式での近似解では制御が発散し、変位表現式の近似解は安定に制振している。制限を与えた場合も、上述の制御特性（変位ゼロの状態から変位が大きくなる時間に索系にエネルギーを印可し、極大変位から変位が減少する時間にエネルギーを吸収する）は確認しており、索系全体の波動伝搬特性が、制限を与えた場合の制振性に影響を与えることを見出している。この考察は非常に興味深い。この現象と下端質量を有する場合の制振特性の解明に対する今後の研究を期待する。

第3章は多重単振子系の波動制御の記述である。第1節で緒言、第2節で制御則、第3節で3自由度単振子系の波動制御、第4節で3自由度単振子系の支持点位置制御、第5節で実験、第6節でシミュレーションとの比較、第7節で非均質多重単振子系の波動伝搬特性を記述している。

第1節では多重単振子系の波動伝搬を利用した Saigo らの従来研究の問題点を述べている。Saigo らの手法は、制御対象の懸垂体が仮想的に多重懸垂体に懸垂された状態を支持点加速度によって実現して波動伝搬状態を生成するもので、仮想的な多重懸垂体は制御器内に数学モデルとして構築してオンラインで挙動を演算している。仮想懸垂体の波動伝搬特性を利用しているが、仮想懸垂体モデルの支持点では波動反射が生じるため随時「初期化」を行って変位と速度をゼロとしている。初期化時に波動伝搬状態が不連続になるため制振性が劣化している、また、仮想懸垂体の適応的な変更が煩雑であると考えられる、と指摘している。本研究では、Saigo らの手法に類似した、制御対象懸垂系が仮想懸垂系に懸垂される状態を生成することになるが、仮想懸垂系としての扱いではなく波動伝搬解に

よる波動吸収の視点であることを、強調している。さらに、質量と振子長さが全て同一の「均質振子系」と、質量は同一であるが長さが異なる「非均質振子系」の特性を利用する、と述べている。一般的には質量が不均質の場合もあるが、波動制御として利用しやすい特性を確認できなかったため全質量を同一とする場合のみを対象とすること、単振子系質量は下端荷質量と見做せばよいので制御則は荷質量には依存しない、ことを補足している。

第2節は制御則に関する記述である。第1項で、質量と振子長の異なる一般非均質単振子系の支持点加速度による仮想系接続条件の導出と制御則を記述している。第2項では均質振子系の近似波動伝搬解の導出を記述している。運動方程式は、第2章の懸垂索の場合の変位表現差分方程式と同じであるので、近似手法も同じである。隣接3振子の振れ角を剛性項に含む運動方程式で、剛性の変化を中央振子振れ角係数で代表する近似を行って波動伝搬解を求める方法である。ラプラス変換した方程式で波動が上方（反重力側）に伝搬する解を求め、ラプラス逆変換することで時間軸応答計算ができる波動伝搬解を導出している。非均質近似解を求めるのは困難であるが、今後の課題としてほしい。さらに、第2章の懸垂索の差分モデルでは自由度数が50の場合を扱ったが、振子モデルでは3～5自由度系が対象であるため波動伝搬限界が問題となる、と記している。ラプラス変換特性方程式が波動伝搬解をもつ条件である。第3項では、波動伝搬解の精度を、固定端で反射を起こさない時間内の33自由度懸垂単振子系自由振動応答との比較（Fig. 3-3）で検証している。同図では、最下端振子長 l_1 とそれ以外の振子長 l とが異なる非均質系での精度を検証していて、振子長 l の振子が3振子連続する場合には、導出した近似解が精度的に制御に有効に利用できることを確認している。

第3節は、振子長比 $\lambda = l/l_1$ をパラメータとした3自由度単振子系の波動制御特性の記述である。振子長比 λ によって制御特性が大きく変わり、波動伝搬限界が $\lambda \approx 5$ であること、均質振子系 $\lambda = 1$ が最も制振性がよいことを、記述している。また、 $\lambda = 4$ では波動伝搬限界内であるにも拘らず制振性の低下が確認できることを記している。

第4節は、シミュレーション計算による支持点フィードバック係数の制振性に与える影響についての検討の記述である。制御則は振れ角制御を支持点横加速度制御として行うため、振れ角がゼロとなる時点で支持点位置の変動や支持点速度が残った状態で制御が終了する可能性があり、支持点横加速度として位置と速度のフィードバック量を重畳した加速度を実際の制御量としている。フィードバック特性も振子長比 λ によって大きく変わり、 $\lambda = 0.2, 1, 4$ で比較すると、制御性能は均質系の $\lambda = 1$ よりも $\lambda = 0.2$ の方がよいことが示されている。これは第3節の結果と矛盾するわけではなく、振れ角の制振には均質系が最も有利であるが、支持点変位も合わせて制御するには非均質系の方が有利であることを示している。従来の波動制御では均質系が最も波動伝搬がよいので理想的であると考えられてきたが、剛体位置も制御する場合にはその常識が崩れることを見出したことは、非常に興味

深い。また、 $\lambda=4$ ではフィードバック効果が殆ど見られないとしている。第3節で分かった、 $\lambda=4$ の波動伝搬特性の低下が改善できない理由の検討は今後の課題であろう。

第5節は実験に関する記述である。均質3振子系と、2振子と1索荷質量系の非均質系の制御実験結果を記述している。実験結果より、制御則が実験系で有効に作用することを実証している。

第6節は実験結果のシミュレーション結果との比較の記述である。シミュレーション計算では、制御パラメータは実験系と同一であるが、実験系の減衰を考慮していないため一見応答が異なるように見える。しかし、実験系で3s程度で減衰している3次固有振動成分を除けば、ほぼ実験結果とシミュレーションは一致している。ここで重要なことは、実験とシミュレーションの一致よりは、本制御法が非減衰系をモデルに波動制御則を導出したにも拘らず、制御対象が減衰を有していても十分に機能することである、との考察は非常に評価できる。

第7節は非均質多重懸垂単振子系の波動伝搬特性に関する記述である。第3節で明らかにした、非均質多重懸垂単振子系で $\lambda=4$ では波動伝搬限界内であるにも拘らず制振性が低下することに関して固有振動特性から考察を行っている。固有モードを検証すると、 λ が大きい場合、第1振子がよく振れて第3振子が静止状態に近いモード形が現れて、いわゆるモード局所化 (Mode Localization) が発生する。本制御法は懸垂系上端での制御であるため、モード局所化の発生した固有振動の波動吸収は極めて悪くなる。モード局所化が発生する固有振動数は自由度数が増えても固有モード形が類似なのでほとんど変化がなくて、5自由度系でも同様の現象が発生することを確認している。

第4章はクレーン索荷質量系の波動制御の記述である。第1節で緒言、第2節で制御則、第3節でフィードバック係数の制振特性、第4節でクレーン巻上げ巻下しの索長変化に対する設計法、第5節で実験を記述している。

第1節では、第3章の3自由度振子系制御との関連を説明している。3自由度振子系の支持点側2振子の運動を数学モデルとして制御器内に構築し、この数学モデルに波動制御則を適用することで波動制御系を生成することを記述している。導出した波動制御則が均質3振子系で精度が保証される解であるため数学モデル2自由度系が必要であり、下端1振子がクレーン索荷系であると説明している。

第2節では、制御則を記述している。方程式系は第3章の3自由度系制御と同じである。

第3節は、クレーン索長 l_1 、数学モデル振子長 l と、数学モデル振子長 l とクレーン索長 l_1 との比 $\lambda=l/l_1$ をパラメータとしたフィードバック係数の最適値の探索に関する記述である。 $l_1=1\text{ m}$ に対する $l=0.1, 1, 10\text{ m}$ の場合と、 $l_1=10\text{ m}$ に対する $l=1, 10, 100\text{ m}$ の場合について、 $K_a=1$ 、 $0.2 < K_v < 13$ 、 $0.2 < K_p < 10$ の範囲で3種類の時刻における、振れ角と支持点位置の値を等高線図として表示している (K_a 、 K_v 、 K_p は、それぞれ、波動制御、支持

点速度、支持点位置のフィードバック係数)。 $l_1=1\text{ m}$ の場合は時刻10 s、20 s、50 sにおける値を、 $l_1=10\text{ m}$ の場合は時刻30 s、50 s、100 sにおける値を表示している。また、支持点を移動させる場合の特性も表示している。特性は l_1 の値によって異なり、効果的(effective)なフィードバック係数として以下の考察をしている。

$\lambda \leq 1$ の場合では効果的なフィードバック係数 K_v 、 K_p が小さい。 $\lambda=10$ の場合では効果的なフィードバック係数 K_v 、 K_p が大きく、 $\lambda \leq 1$ 場合より効果的なフィードバック係数 K_v 、 K_p 値の範囲の制御時間に対する拡大の程度が大きい。つまり、 $\lambda \leq 1$ より $\lambda=10$ の方が制振性がよい。 $l_1=1\text{ m}$ の場合と $l_1=10\text{ m}$ の場合を比較すると、索長さが長い方が効果的なフィードバック係数 K_v 、 K_p 値の範囲が狭い。

第3章7節で考察したように、非均質3自由度懸垂単振子系の支持点での波動制御は $\lambda \approx 5$ に存在する波動伝搬限界のため $4 \leq \lambda$ で制振性が非常に低下し、支持点の速度と位置のフィードバックでは制振特性は改善されない。しかし、本節で検討した1自由度懸垂単振子が2自由度懸垂単振子系に懸垂されている3自由度懸垂単振子系で1自由度単振子の支持点で制振制御を行う場合は、支持点の速度と位置のフィードバックが系の波動伝搬特性を変化させて、 λ が大きいほど制御性が向上するフィードバック係数が存在し、振子長が変化する上側振子位置でのフィードバック制御が系の波動伝搬特性を大きく変えていると理解できる、と記している。この現象は極めて興味深い発見である。非均質波動伝搬特性の理解の手掛かりになりそうである。今後の研究を期待したい。

第4節はクレーン巻上げ巻下しの索長変化に対する設計法として、第3節で求めた効果的なフィードバック係数を設計に組み込む方法を提案している。クレーン索が $l_1=1\text{ m}$ から $l_1=10\text{ m}$ の間で変化すると仮定して、最適な数学モデル振子長 l とフィードバック係数の選定であるが、 $l=1\text{ m}$ では、 $l_1=1\text{ m}$ の場合と $l_1=10\text{ m}$ の場合で共通の効果的なフィードバック係数の範囲が狭く、 $l=10\text{ m}$ では、 $l_1=1\text{ m}$ の場合と $l_1=10\text{ m}$ の場合の共通の効果的なフィードバック係数がなく、 $l=100\text{ m}$ では、 $l_1=1\text{ m}$ の場合と $l_1=10\text{ m}$ の場合の共通の効果的なフィードバック係数は容易に選定できることを考察している。すなわち、 $l_1=1\text{ m}$ から $l_1=10\text{ m}$ の間で変化すると仮定した場合は $l=100\text{ m}$ とするのが最適設計であると結論している。本結果は一例であるが、制御系設計法としては实际的であると考えられる。

第5節は実験結果と対応するシミュレーション結果の記述である。数学モデル振子長 $l=0.12, 1, 10, 100\text{ m}$ の各場合に対して、効果的なフィードバック係数を用いた、クレーン索長 $l_1=1\text{ m}$ の場合の結果を示している。実験結果とシミュレーション結果は支持点の変位の大きさを除いてほぼ完全に一致している。さらに、 $l_1=0.3 \sim 1\text{ m}$ での巻上げ巻下し実験結果とシミュレーション結果も一致することを検証している。これらの結果から開発した制御手法の実用クレーンへの適用の可能性を検証した、と記している。

第3章と第4章の実験とシミュレーションの一致から開発手法が実用機に適用できる可

能性は検証できたものと判断できる。

第5章では本研究の纏めとして、波動制御を基本とした速度と位置のフィードバック制御を重畳するクレーン支持端の加速度制御法の基本的な有効性と、懸垂索制御のクレーン索の空荷状態の制振に対する基本的有用性の検証を行ったと記している。

本論文で報告された技術は、走行クレーン制御で運搬位置と吊り上げ高さが決まれば、最小の揺れで目標位置に静止する運転シーケンスを自動的に生み出す制御アルゴリズムと、長大懸垂ロープの制振法である。走行クレーン制御は、運搬途中の外乱には、多少の運搬時間の遅れを生じるが、影響を受けない。従来の自動走行クレーンは走行と揺れの運動を予め予測して制御しているが、本研究は、波動制御を用いたことにより、走行による揺れも外乱による揺れも区別することなく絶えず制振しながら目標位置に向かって移動する制御で、制振と移動が一体となった制御アルゴリズムである。さらに、波動制御に基づいているため、制御対象が連なった複数個の荷の場合もアルゴリズムを変更することなく適用できる。制御パラメータの決定にはシミュレーションによる計算が必要であるが、本研究で提案された手順に従えば容易に決定できる。正確な運動予測に基づく制振制御よりは性能が低い場合があるかもしれないが、外乱の影響を受けにくいロバスト性（頑強性）が最大の長所である。懸垂ロープ制御法は基礎研究レベルであるが、クレーンよりは将来の宇宙構造物などで使われる可能性が期待できる技術であると思われる。研究を通じて波動伝搬現象の興味ある課題も発見されていて、今後の研究展開を期待するものである。

【審査結果】

受理論文の記述内容は概ね良好であると認められるが、記述の不明瞭な箇所や適切な図による説明が必要である個所が散見されるため、第1回審査委員会において、修正が必要な箇所の指摘を行った。

第1章に関する主な指摘点は次の通りである。(1) 研究テーマ（懸垂索と多重振子の波動制御）の基本概念を分かりやすく示す図が必要である。Fig. 1-1とFig. 1-2は分かりにくい。(2) 図1-1はFig. 1-1のように記述すべきである。(3) 論文全体を通じて、1頁内で図の上下に文章を配置するのは好ましくない。(4) 1.1節で「…多自由度振動系を自由度数個の独立な…」の意味が不明である。(5) 1.1節で「…質量と剛性の変更…対応できないことがあり」の意味が明確でない。(6) 1.1節で「実用化を見通せる」の意味が明確でない。(7) 1.1節で「クレーンに比べて実用的な制御が限定的である」の意味が明確でない。(8) 1.1節で、「…振動数、周期、波長、波数…」の記述で独立でない量は括弧表示すべきである。(9) Fig. 1-3の evanescent 波は本論文では扱っていないので、図は変更した方がよい。(10) 1.2節で、各波動制御研究に関する締め括りの文が消極的であり、積極

的な記述が望ましい。(11) 1.2節の波動制御研究の調査で時系列に不正確な点がある（例えば、filtered-x LMS アルゴリズムは1980年代に確立している）。(12) 1.3節の Input Shaping の説明に誤解がある。適応 PD 制御とは無関係である。(13) ニアフィールド解の説明が不正確である。この解は伝搬しないが振動成分である。(14) 1.4節で「局所制御」、「加速度制御」などの専門用語は簡単な定義が必要である。(15) 参考文献の著者名の表記が統一されていない。

第2章に関する主な指摘点は以下の通りである。(1) 2.1節に、2章の研究概念や手法に関する図が必要である。(2) 2.4節の33、34頁の記述が分かりにくい。(3) グラフの座標軸には、軸名、シンボル記号、単位を記述すべきである。(4) 英略語が多く分かりにくい。記号表が望ましい。(5) 文字変換ミスがある(P. 24時刻暦、p. 25制御即、等)。(6) 章・項・目以下の細分表示はなく、2.3.1.1等は不適切である。目の段落で見出して区別すべきである。

第3章に関する主な指摘点は以下の通りである。(1) 3.1節の書出し部は、2章と3章の内容が混在していて分かりにくい。(2) 従来研究での仮想系初期化の説明が分かりにくい。図が必要である。(3) 3.5節の実験装置図は信号線が記載されていない。(4) 実験装置と実際のクレーン装置との対応が分かりにくい。(5) 3.6節で、実験結果とシミュレーション結果の不一致をシミュレーションパラメータの違いに言及しているが、シミュレーションを実験パラメータに合わせるべきである。(6) 実験条件として、畳み込み積分演算(FIR フィルター)の項数とサンプリング時間は詳細に記すべきである。(7) 実験結果とシミュレーション結果に関連して、非減衰系を対象に設計した制御則が減衰系である実験で有効に作用する理由を記述すべきである。(8) 3.4節で、評価関数に J を用いているが、ベッセル関数 J_2 と紛らわしいので変更すべきである。

申請者に、以上の点に関して第2回審査委員会までに修正する旨、指示した。

第2回審査委員会において、第1審査委員会での指摘事項の修正を確認した。また、以下の追加の修正個所の指摘を行った。(1) 図表の表記で軸目盛はE形式指数表示は避けた方がよい。(2) グラフ図のカラー表示が見難い。また、時刻歴モード形の本数が多すぎるためイメージが湧きにくい。

第3回審査委員会において、第2回審査委員会での指摘事項の修正を確認した。

全3回の審査委員会での審議により、修正された提出論文の論文内容と記述書式が博士学位論文として妥当であると判断した。また、工学研究科（機能システム専攻）の博士学位審査基準に照らしても妥当な研究内容であると認められる。従って、所定の試験結果と論文評価に基づき、本審査委員会は全員一致を以って鄭小蘭氏の博士学位請求論文は、本学博士学位を授与するに相応しいものと判断する。