

京都大学	博士 (工学)	氏名	王 鉄華
論文題目	Modeling and Nonlinear Control of Quadrotor UAVs for Inspection and Manipulation Tasks (検査や操作など多様なタスク遂行のためのクワッドローター飛行ロボットのモデリングと非線形制御)		

(論文内容の要旨)

近年、垂直離着陸できる UAV(Unmanned Aerial Vehicle)は、視認検査や物品運搬のようなタスクから、環境や対象物体との相互作用が生じる打音検査や物体の組み立てのようなタスクまで、様々なタスクへの適用が期待されている。特に、プロペラを4つ持つクワッドローターUAVは、構造が簡単でコスト面でも優位であり、制御や応用に関して多くの研究がなされている。本論文でも、その制御に関して以下の課題を扱っている。まず、クワッドローターUAVを環境との相互作用を生じないタスクに適用する場合には、風などの外乱や運搬物体などを含めた機体の質量と慣性モーメントなどの物理パラメータの不確かさを考慮したロバストな制御系を構築する必要がある。また、マニピュレータを搭載したクワッドローターUAVが環境との相互作用を生じるタスクを実行する場合には、環境との接触を表す幾何学的な拘束条件を考慮して、マニピュレータの手先の位置と力を同時に制御することが必要になる。さらに、バッテリーの消耗を少なくし、稼働時間を延ばすために、機体のみならずマニピュレータにも軽量化が求められる。しかし、マニピュレータの軽量化が弾性振動を引き起こし、制御性能を低下させるため、その解決が課題となっている。

本論文では、これらの課題を研究し、以下のような成果を報告している。まず、クワッドローターUAVによる環境との相互作用がないタスクのために、風などの外乱や機体の質量と慣性モーメントの不確かさを考慮したロバストな制御系を提案している。また、クワッドローターUAVに搭載されたマニピュレータの手先が望ましい位置姿勢を達成しつつ環境に目標の力を与えることができる位置と力のハイブリッド制御を実現している。さらに、1自由度柔軟マニピュレータを搭載したクワッドローターUAVの安定化制御器を常微分方程式(集中定数系)と偏微分方程式(分布定数系)が干渉した非線形混合定数モデルに基づいて導出している。これらの制御系の有効性を数値シミュレーションあるいは実機実験により検証している。

本論文は5章からなり、各章の要旨は以下の通りである。

第1章は序論であり、飛行ロボットにおけるクワッドローターUAVの位置づけ、および、関連研究についてまとめている。また、クワッドローターUAVの適用範囲を拡大するための課題と、その解決指針について述べている。さらに、本論文の構成を述べている。

第2章では、視認検査や物品運搬などの環境との相互作用がないタスクにクワッドローターUAVを適用する場合を考えている。風などの外乱や運搬物体を含めた機体の質量と慣性モーメントの不確かさを考慮した制御則を提案している。それは、機体全体の質量を適応アルゴリズムで推定し、外乱と慣性モーメントの不確かさに対してはスライディングモード制御により安定性を保証するロバストな制御系である。また、その有効性を数値シミュレーションと屋内実機実験により確認している。

第3章では、剛体マニピュレータを搭載したクワッドローターUAVにより、構造物の打音検査や物体の組み立てなどの環境との相互作用が生じるタスクを実現することを考えている。マニピュレータの手先は環境の拘束面上では目標の軌道に追従し、拘束面の法線方向には目標の力・モーメントを与えることが求められる。この制御目的を達成するために、剛体マニピュレータの運動とクワッドローターUAVの運動が干渉する非線形ダイナミクスに基づいた、位置と力のハイブリッド制御系を設計している。また、提案制御則の有効性を示すために、マニピュレータの手先で壁に所望の力を与えながら、滑らかな壁に沿って手先を移動させるタスクが実現できることを数値シミュレーションにより検証している。

第4章では、マニピュレータを搭載したクワッドローターUAVにおいて、軽量化によ

京都大学	博士 (工学)	氏名	王 鉄華
<p>るマニピュレータの低剛性化に起因する弾性振動を抑制する制御系設計について考えている。具体的には、2次元空間を運動する1自由度柔軟マニピュレータを搭載したクワッドローターUAVを制御対象としている。まず、クワッドローターUAVの運動と柔軟マニピュレータの運動と振動を表す、常微分方程式と偏微分方程式が干渉した非線形混合定数モデルを導出している。つぎに、その非線形混合定数系に対して、実装が容易な出力フィードバック制御則を提案している。さらに、リアプノフの方法と作用素解析およびラサールの定理を用いて、提案する制御則の無限次元システムに対する大域的リアプノフ安定性と局所的漸近安定性を数学的に証明している。また、数値シミュレーションにより提案制御則の有効性を検証している。</p> <p>第5章は結論であり、本論文のまとめと、今後の課題について述べている。</p>			

氏 名

王 鉄 華

(論文審査の結果の要旨)

垂直離着陸でき、プロペラを4つ持つクワッドローターUAV(Unmanned Aerial Vehicle)は構造が簡単でコスト面でも優位であり、制御や応用に関して研究がなされている。本論文では、クワッドローターUAVによる視認検査や物品運搬などのタスクのために、風などの外乱や機体の質量と慣性モーメントの不確かさを考慮したロバストな制御系を提案した。また、クワッドローターUAVに搭載された剛体マニピュレータの手先が望ましい位置姿勢を達成しつつ環境に目標の力を与えることができる位置と力のハイブリッド制御を実現した。さらに、1自由度柔軟マニピュレータを搭載したクワッドローターUAVの安定化制御器を常微分方程式(集中定数系)と偏微分方程式(分布定数系)が干渉した非線形混合定数モデルに基づいて導出した。主な成果は以下の通りである。

1. 視認検査や物品運搬などの環境との相互作用がないタスクにクワッドローターUAVを適用する場合を考え、風などの外乱や運搬物体を含めた機体の質量と慣性モーメントの不確かさを考慮した制御則を提案した。それは、機体全体の質量を適応アルゴリズムにより推定し、外乱と慣性モーメントの不確かさに対してはスライディングモード制御により安定性を保証するロバストな制御系である。また、その有効性を数値シミュレーションと屋内実機実験により確認した。
2. 剛体マニピュレータを搭載したクワッドローターUAVにより、構造物の打音検査や物体の組み立て作業など、環境との相互作用が生じるタスクを実現するための制御系を設計した。これらのタスクを実行する場合、マニピュレータの手先は環境の拘束面上では目標の軌道に追従し、拘束面の法線方向には目標の力・モーメントを与えることが求められる。この制御目的を達成するために、マニピュレータの運動とクワッドローターUAVの運動が連成する非線形ダイナミクスに基づいた、位置と力のハイブリッド制御系を設計した。さらに、提案制御則の有効性を示すために、マニピュレータの手先で壁に所望の力を与えながら、滑らかな壁に沿って手先を移動させるタスクが実現できることを数値シミュレーションにより検証した。
3. クワッドローターUAVに搭載するマニピュレータの軽量化による剛性低下に起因した弾性振動を抑制する制御系を設計した。具体的には、2次元空間を運動する1自由度柔軟マニピュレータを搭載したUAVを制御対象としている。まず、クワッドローターUAVの運動と柔軟マニピュレータの運動と振動を表す、常微分方程式と偏微分方程式が干渉した非線形混合定数モデルを導出した。つぎに、得られた非線形混合定数システムに基づき、実装が容易な出力フィードバック制御則を提案した。さらに、リアプノフの方法と作用素解析およびラサールの定理を用いて、提案した制御則の無限次元システムに対する大域的リアプノフ安定性と局所的漸近安定性を数学的に証明した。また、数値シミュレーションにより提案制御則の有効性を検証した。

以上要するに、本論文は多様なタスク遂行のためのクワッドローターUAVの制御系設計論について有用な知見を与えたものであり、その成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年8月5日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日： 年 月 日以降