

## 論文内容の要旨

博士論文題目      周期運動に対するエネルギー効率に優れたパワーアシスト制御法に関する研究

氏 名      畑田 和良

(論文内容の要旨)

近年、医療や工業をはじめとする様々な分野への応用を目指したパワーアシストに関する研究が活発に行われている。最も素朴なアシスト方法は、人間の力の瞬時値を計測し、その値に比例した力を機械によって発生させて加えることによって人間の運動を補助するものであろう。規則性のない運動を補助する場合にはこの手法を用いるしかないが、周期運動にこれを適用した場合は周期力の脈動を増幅させることになり、結果的にむらのある運動が実現されてしまうことがある。このような運動は効率の点からも望ましくないと考えられる。そこで本論文では、いかなるパワーアシスト法が周期運動に対してエネルギー効率の意味で最適となるかを検討している。

まず、周期運動の一つである自転車のペダリング動作について考える。自転車のペダリングに関する力学モデルを導出し、それをもとにしてエネルギー効率が最適となる条件を求める。その結果、考察している周期運動に対しては入力トルクの脈動を除去することが有効であるという指針が得られる。これは、人間のペダリングトルクをある種の周期外乱と捉え、繰返し制御の適用によってその脈動を除去するという従来研究の正当性を裏付けるものである。また、繰返し制御をある種の有限インパルス応答 (FIR) フィルタと捉え、いわゆる一般化 Kalman-Yakubovich-Popov 補題に基づいて設計する手法が知られているが、これに対し本論文では無限インパルス応答 (IIR) 型制御器を用いることにより所望の周波数特性を満たしつつ、従来のそれより次数の低い制御器の設計法を提案する。さらに、数値シミュレーションおよび実験結果を通じて設計法の有効性と最適条件の正当性を示す。

次に、提案手法を船舶のエンジン回転数制御へ応用する。規則波中を航行す

る船舶は、波から受ける周期的な力とプロペラから発生する推力の二つの力が入力となって運動している。この状況は上述の電動アシスト自転車のペダリング運動と類似のものである。この観点から、上記の提案手法を船舶のエンジン回転数制御へ応用し、数値シミュレーションによって燃費の改善を行っている。

(論文審査結果の要旨)

近年、医療や産業分野への応用をにらんだパワーアシスト技術の研究がさかんに行われている。自律移動を想定したアシスト機器では、バッテリーによる長時間駆動が求められる。したがってアシスト制御にとって、エネルギー効率の改善は本質的な要請である。本論文は、実現すべき運動を周期運動に限定し、その特性を活かしたエネルギー効率の改善方法を、制御系設計理論の立場から検討し、実験および数値シミュレーションによってその有効性を検証したものである。周期性を仮定することによって、一周期前の挙動から今回の挙動を予測することが可能となる。この予測可能性を礎に、瞬間的な力の増幅では実現できない高効率化を図ることが、本発想の核といえよう。

第2章で関連する繰返し制御、(一般化) KYP 補題等に関する数学的準備をおこなった後、第3章では電動アシスト自転車为例にとって、まず移動に関するエネルギー効率の定量的な評価を試みている。「速度変動を抑えることによって移動効率を最適化できる」という事実を理論的に示すことで、従来の直感的な設計指針に対して数学的根拠を与えており、一定の評価ができる。強弱が変化する人間のペダリングを外乱とみなせば、速度変動を抑えることは、繰返し制御における周期外乱抑制に酷似している。第3章の後半では、この着想を発展させて、FIR フィルタ型および IIR フィルタ型繰返し制御器によるアシスト制御について考察している。これらはある種の周波数整形法として分類できるが、状態空間法の枠組みにおいては、閉ループ系の周波数特性 ( $H_\infty$  ノルム条件) の特徴づけに対しては、いわゆる Kalman-Yakubovich-Popov 補題を用いるのが一般的である。しかし、ここではその発展形である有限周波数 KYP 補題を用いることで、特定の周波数帯域で満たすべき条件だけを考える、よりタイトな設計を試みている点に興味深い。さらには、机上の検討に留まらず、実際の電動アシスト自転車を用いた実験をおこなっている点も評価できる。線形制御理論の範疇では取り扱うことのできないリミッタ等の存在により、必ずしも理想的な性能は発揮できないものの、バッテリーの電位降下履歴からエネルギー効率の改善効果を実証しており、提案の有効性が裏づけられているといえる。また、第4章では、同様の発想が規則向波中を航行する船舶のエンジン回転数制御にも適用可能であることを示している。数値シミュレーションによる燃費の改善効果は数パーセントに留まるが、提案手法の普遍性を示唆する例としては、妥当であると思われる。

以上の観点から総合的に検討した結果、本論文は博士(工学)の学位に値するという結論に達した。