

氏名（本籍）	土井 達也（岐阜県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第 358 号
学位授与日付	平成 21 年 3 月 25 日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	作業支援用パワーアシスト装置に関する研究 (Study on a power assist system for work support)
学位論文審査委員	(主査) 教授 山田 宏 尚 (副査) 教授 谷 和 男 教授 山本 秀 彦 教授 佐々木 実

論文内容の要旨

本研究では、パワーアシスト装置のうち工場などで最も使用されているロボットアーム型の作業支援用パワーアシスト装置を対象とし、その中でも空気圧シリンダをアクチュエータとした空気圧式パワーアシスト装置、及び AC モータをアクチュエータとした電気式パワーアシスト装置の 2 機種を用いて研究を行った。本作業支援用パワーアシスト装置は、産業用ロボットなどの自律動作システムとは異なり、作業ループに人間が介在しているため、従来の物理モデルのみに基づくシミュレーションでは、設計段階で操作力の波形やその最大操作力などの性能を十分に評価することが困難であった。また、人間の特性を制御要素に加えて考慮されたシミュレーションについて十分に議論されている報告はほとんどなされていない。このため、開発現場では開発者の経験により試行錯誤的に作業支援用パワーアシスト装置の設計・開発がなされている。もし人間を制御要素に加えた数学モデルが構築でき、それを用いてパワーアシスト装置を操作した際の操作力の波形やその最大操作力などの性能が設計段階で得られるならば、開発コストの削減及び開発時間の短縮が可能になるものと期待される。

一方で、近年、空気圧式パワーアシスト装置よりエネルギー損失が小さい電気式パワーアシスト装置を導入する工場が増加している。しかしながら、本研究で対象としている電気式パワーアシスト装置は制御コントローラの問題により、空気圧式パワーアシスト装置の操作性より劣っているため、より操作性に優れた電気式パワーアシスト装置の制御コントローラが求められている。

以上の背景に基づき本研究では、人間を制御系に含めて考慮した作業支援用パワーアシスト装置の数学モデルを提案し、システムの設計に利用可能なシミュレーションの構築を目指した。本研究で構築した人間の制御系モデルは、人間が操作対象の特性を学習するという特徴を持たせるために、ニューラルネットワークを用いたパワーアシスト装置の逆ダイナミクスモデルによるフィードフォワード制御、及び PD 制御器によるフィードバック制御から成るものである。

本シミュレーションの妥当性を検討するために、空気圧式パワーアシスト装置及び電気式パワーアシスト装置を用いて、作業の典型的な動作である上下動作の際の操作力や操作加速度などの計測とシミュレーションをそれぞれ行った。その結果、負荷質量や操作性の異なる機種に変更した場合においても、操作力波形及び最大操作力のシミュレーション値は、人間が操作した際の計測値と良好な一致を示し、本シミュレーションの妥当性が確認された。

次に、本研究において開発されたシミュレーションが設計ツールとして有効であることを示すために、本シミュレーションを用いて、従来よりも良好な操作性を実現できる電気式パワーアシスト装置の制御設計を行った。電気式パワーアシスト装置の制御コントローラとしては、①比較的単純なオープンループ制御、②負荷質量が未知であっても使い勝手が損なわれない位置制御型インピーダンス制御の 2 種類について検討を行った。コントローラの各ゲインはシミュレーション上で設計し、その操作力波形について検討を行った。その結果、それらの制御則を用いた場合のシミュレーションにおける電気式パワーアシスト装置の操作力波形は、操作性に優れた空気圧式パワーアシスト装置の操作力波形に近いことが確認された。次に、シミュレーションにより設計した制御則を電気式パワーアシスト装置の制御コントローラに実装し、操作実験を行った。その結果、設計に用いたシミュレーションと実験は良く一致した。また、操作力の波形及び操作者の感想により、概ね空気圧式パワーアシスト装置の操作感に近い良好な操作感が得られることが確認された。

以上のことから、本研究で提案した人間を制御系に含めたシミュレーションは、操作性の改善に役立てることが可能であり、実用上有用な評価ツールとして活用可能であることが確認された。また、電気式パワーアシスト装置は、従来よりも良好な操作性に改善できることが確認された。

論文審査結果の要旨

本研究では、パワーアシスト装置のうち工場などで最も使用されているロボットアーム型の作業支援用パワーアシスト装置を対象とし、その中でも空気圧シリンダをアクチュエータとした空気圧式パワーアシスト装置、及び AC モータをアクチュエータとした電気式パワーアシスト装置の 2 機種を用いて研究を行った。本作業支援用パワーアシスト装置は、産業用ロボットなどの自律動作システムとは異なり、作業ループに人間が介在しているため、従来の物理モデルのみに基づくシミュレーションでは、設計段階で操作力

の波形やその最大操作力などの性能を十分に評価することが困難であった。また、人間の特性を制御要素に加えて考慮されたシミュレーションについて十分に議論されている報告はほとんどなされていない。このため、開発現場では開発者の経験により試行錯誤的に作業支援用パワーアシスト装置の設計・開発がなされている。もし人間を制御要素に加えた数学モデルが構築でき、それを用いてパワーアシスト装置を操作した際の操作力の波形やその最大操作力などの性能が設計段階で得られるならば、開発コストの削減及び開発時間の短縮が可能になるものと期待される。

一方で、近年、空気圧式パワーアシスト装置よりエネルギー損失が小さい電気式パワーアシスト装置を導入する工場が増加している。しかしながら、本研究で対象としている電気式パワーアシスト装置は制御コントローラの設計の問題により、空気圧式パワーアシスト装置の操作性より劣っているため、より操作性に優れた電気式パワーアシスト装置の制御コントローラが求められている。

以上の背景に基づき本研究では、人間を制御系に含めて考慮した作業支援用パワーアシスト装置の数学モデルを提案し、システムの設計に利用可能なシミュレーションの構築を目指した。本研究で構築した人間の制御系モデルは、人間が操作対象の特性を学習するという特徴を持たせるために、ニューラルネットワークを用いたパワーアシスト装置の逆ダイナミクスモデルによるフィードフォワード制御、及びPD制御器によるフィードバック制御から成るものである。

本シミュレーションの妥当性を検討するために、空気圧式パワーアシスト装置及び電気式パワーアシスト装置を用いて、作業の典型的な動作である上下動作の際の操作力や操作加速度などの計測とシミュレーションをそれぞれ行った。その結果、負荷質量や操作性の異なる機種に変更した場合においても、操作力波形及び最大操作力のシミュレーション値は、人間が操作した際の計測値と良好な一致を示し、本シミュレーションの妥当性が確認された。

次に、本研究において開発されたシミュレーションが設計ツールとして有効であることを示すために、本シミュレーションを用いて、従来よりも良好な操作性を実現できる電気式パワーアシスト装置の制御設計を行った。電気式パワーアシスト装置の制御コントローラとしては、①比較的単純なオープンループ制御、②負荷質量が未知であっても使い勝手が損なわれない位置制御型インピーダンス制御の2種類について検討を行った。コントローラの各ゲインはシミュレーション上で設計し、その操作力波形について検討を行った。その結果、それらの制御則を用いた場合のシミュレーションにおける電気式パワーアシスト装置の操作力波形は、操作性に優れた空気圧式パワーアシスト装置の操作力波形に近いことが確認された。次に、シミュレーションにより設計した制御則を電気式パワーアシスト装置の制御コントローラに実装し、操作実験を行った。その結果、設計に用いたシミュレーションと実験は良く一致した。また、操作力の波形及び操作者の感想により、概ね空気圧式パワーアシスト装置の操作感に近い良好な操作感が得られることが確認された。

以上のことから、本研究で提案した人間を制御系に含めたシミュレーションは、操作性の改善に役立てることが可能であり、実用上有用な評価ツールとして活用可能であることが確認された。また、電気式パワーアシスト装置は、従来よりも良好な操作性に改善できることが確認された。

以上の研究内容は、学位論文として十分であると判定された。

最終試験結果の要旨

最終試験においては、博士論文の内容に従い、人間を制御系に含めて考慮した作業支援用パワーアシスト装置の数学モデルを提案、システムの設計に利用可能なシミュレーションの構築について発表が行われた。本研究で構築した人間の制御系モデルは、人間が操作対象の特性を学習するという特徴を持たせるために、ニューラルネットワークを用いたパワーアシスト装置の逆ダイナミクスモデルによるフィードフォワード制御、及びPD制御器によるフィードバック制御から成る。本シミュレーションの妥当性を検討するため、空気圧式パワーアシスト装置及び電気式パワーアシスト装置を用いて、作業の典型的な動作である上下動作の際の操作力や操作加速度などの計測とシミュレーションをそれぞれ行った。その結果、負荷質量や操作性の異なる機種に変更した場合においても、操作力波形及び最大操作力のシミュレーション値は、人間が操作した際の計測値と良好な一致を示し、本シミュレーションの妥当性が確認されたことについて発表が行われた。

また、本研究において開発されたシミュレーションが設計ツールとして有効であることを示すために、本シミュレーションを用いて、従来よりも良好な操作性を実現できる電気式パワーアシスト装置の制御設計を行った。電気式パワーアシスト装置の制御コントローラとしては、①比較的単純なオープンループ制御、②負荷質量が未知であっても使い勝手が損なわれない位置制御型インピーダンス制御の2種類について検討を行った。コントローラの各ゲインはシミュレーション上で設計し、その操作力波形について検討を行った。その結果、それらの制御則を用いた場合のシミュレーションにおける電気式パワーアシスト装置の操作力波形は、操作性に優れた空気圧式パワーアシスト装置の操作力波形に近いことが確認されたことについて述べた。次に、シミュレーションにより設計した制御則を電気式パワーアシスト装置の制御コントローラに実装し、操作実験を行った。その結果、設計に用いたシミュレーションと実験は良く一致した。また、操作力の波形及び操作者の感想により、概ね空気圧式パワーアシスト装置の操作感に近い良好な操作感が得られることについて発表がなされた。以上の内容について、審査委員により質疑が行われ、妥当な応答が得られたことから、最終試験結果も合格と判定された。