

電動車いすと身体系の動的適合性評価に関する研究

学位論文内容の要旨

電動車いすの利用者数が年々増加しており、初心者を含めた利用者層の拡大が続いている。それに伴い事故件数の増加が著しく操作性/安全性の向上に関する要望が高まっている。電動車いすの利用者は、高齢化による操作反応時間の遅延、操作デバイスの不慣れなどがあり、また重度の障害を有している場合には、体幹の調節が得意でないなどの理由により電動車いすの運動に影響を受けやすく、実用的な利用におけるユーザビリティを満たすことが困難となっている。このような電動車いすの動特性と利用者の身体特性の相互作用を通じた操作性/安全性の向上に関する評価やその方法論は未だに整備されていない。

以上の認識の下、本学位論文は両者の間にはいかなる物理的な特徴が存在するかという相互作用の計測問題と、実際の使用に際して相互作用が引き起こす操作不能状態や転倒に対する事故防止問題への解決を試みた研究結果をまとめたものである。両者の相互作用の計測問題では、移動ロボットの知見を利用するために必要である要件と従来不足している電動車いすの動的な資料を明らかにし、これらに応じたセンサー系と制御系の構築を行い計測実験を行っている。事故防止問題では運動に起因する操作不能状態について分析し、その抑制策を提案している。さらに、電動車いすの転倒安全速度を提案し有効性について明らかにしている。

はじめに相互作用の計測問題では、従来不足している運動の資料と事故防止問題の解決に応じた電動車いすの設計及び製作を行い、計測を行っている。目的の運動は直線加減速運動とし、アスファルト、タイル、砂利道の3種類の環境における両者の相互関係を明らかにしている。また、人間の操作限界を調査する目的で、3種類の加速度を用いた計測では、加速度が大きくなるにつれて両者の不一致性が顕著になるという知見を得ている。また、電動車いすの運動に起因して生じる操作不能状態に注目し計測を行っている。ここでは一旦操作不能になった電動車いすを通常走行に戻す手法について提案するとともに、ジョイスティックの操作不感帯と腕の粘性係数を考慮した計算機実験を行い、提案手法の適用範囲及び得られた操作限界範囲の妥当性について明らかにしている。更に事故防止問題として、傾斜地における重心移動を考慮した転倒安全性を評価する手法を導出している。ここでは、従来のような転回運動中の体幹調節による転倒安全性の問題や、傾斜地における体幹調節の苦手なユーザへの対応に関する問題に対して、4足ロボットの転倒安全性のアナロジーを適用しユーザの重心位置推定法の提案を行い、実験により手法の有効性及び適用範囲を明らかにしている。

本学位論文は、以上に述べたように、電動車いすの操作性/安全性の向上を実現するため、身

体系を考慮した動的適合性の評価手法を提案したものであり、これをシミュレーションと実機、双方からその妥当性を検証したもので、各章の内容は以下のように要約できる。

第1章では、本学位論文に至った経緯と、電動車いすの挙動変化が考慮されていない現状の結果、生ずる問題点をまとめ、研究の目的と意義を述べている。

第2章では、搭乗者を含んだ電動車いすの動的挙動を計測するために計測用車両を開発しており、必要な装備とシステム構築について述べている。

第3章では、計測用車両を用いた計測を行い、3種類の加速度と3種類の環境において人間-車いす系の直線加減速運動と転回運動を計測している。得られた資料から、身体特性と車両特性との間に不一致性が存在していることを明らかにしている。この不一致性は加速度を大きくしていくにつれて顕著になり、搭乗者の身体に意図しない挙動を生じさせ、ジョイスティックを握っている腕にまで影響を与え、入力系に意図しない操作を加えることとなる。こうした過程が電動車いすの振動走行を引き起こし操作不能になることを実験的に示している。

第4章では、第3章で得られた振動走行の力学的な説明を行なうために、人間-車いす系の数学モデルを導出し現象の理解を行なっている。計算機実験によって振動走行はリミットサイクル状の固定位相差に引き込まれることが判明し、一度振動走行に陥ると再び通常走行を行なうことが困難であることを明らかにしている。モデルの上から調節可能なパラメータを選定し、振動走行が発生する物理量の条件について述べている。また、利用者の運転技術の改善に役立つ目的で、発生する危険性を内在する環境・状況を指摘している。

第5章では、電動車いすの転倒防止を目的に搭乗者の重心変化を考慮した動的な転回安定速度について述べている。4足ロボットの「鉛直投影面上において支持脚が構成する三角形の中に重心が留まっていれば転倒しない」とする事実から、左右輪の接地点を転倒点とみなし、両輪間で変動する人間-車いす系の重心位置推定法を提案している。これと転回運動の遠心力とのつりあいの関係から動的な転倒安全速度を導出し、第3章での計測資料を基に計算機実験を行った結果と諸検討を示している。同様の計算機実験によって、傾斜地における人体の傾斜方向の影響を論じており、体幹の調節が得意でない利用者への繊細な対応を可能とし、将来への波及性について述べている。

第6章では、本学位論文の結論を述べている。また今後の課題として、環境/機械/操縦者が相互作用を行い移動行動を成立させるとする観点から、移動機械としての脚型と車輪型の総括を行い、相互作用に含まれる三者を一つの実体として評価する手法に関して展望を述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 和 田 充 雄
副 査 教 授 大 森 隆 司
副 査 教 授 嘉 数 侑 昇
副 査 教 授 大 内 東

学 位 論 文 題 名

電動車いすと身体系の動的適合性評価に関する研究

電動車いすの利用者数が年々増加しており、初心者を含めた利用者層の拡大が続いている。それに伴い事故件数の増加が著しく操作性/安全性の向上に関する要望が高まっている。これらの単独事故のほとんどは転倒・転落であるが、単独事故の発生する理由については誤操作によるものと結論付けられている。このため、電動車いすには、高齢化による操作反応時間の遅延、操作デバイスの不慣れや、また重度の障害を有している場合には体幹の調節ができないなど、利用者の身体特性の相互作用を考慮した操作性/安全性の向上技術に関する計測並びに評価法を確立し、実用場面での多様なユーザビリティを満たす製品作りが求められている。

本学位論文は、電動車椅子のこれらの動的な使用状況下において、車椅子と身体系の動的な挙動と、その相互作用による操作性へ影響を実環境下でリアルタイムに計測できる実験車を開発し、これによって電動車椅子-身体系の相互作用の計測問題、及び実際の使用に際して相互作用が引き起こす難操作性問題や、転倒・転落に対する事故防止問題へ適用評価し、電動車椅子の操作性、安全性に関する技術の向上に資することを目標として実施したものである。

具体的には、相互作用の計測問題では、従来不足している動的挙動のデータ収集に関しては、アスファルト、タイル、砂利道の3種類の環境における実使用における電動車椅子-身体系の3次元空間における速度、角速度、加速度センサーにより計測し、2剛体系として両者の相互関係を評価している。また、人間の操作限界を測るために、3種類の加速-一定速-減速の走行パターンを用意し、加速度が大きくなるにつれて両者の相互作用が強まり、高度な操作性が要求されることを示している。この極端な例として、電動車いすの挙動に起因して生じる操作不能の異常振動状態が生じることを観測し、計測データからジョイスティックの操作不感帯と腕の粘性係数を考慮した計算モデルのシミュレーションを行い、これが一旦生じるとその脱出が困難となることを明らかにしている。更に転倒事故防止問題に対処するため、人間工学から得られた重心移動を考慮し、搭乗者を含めた転倒安全性を評価する手法を導出している。ここでは、転回運動及び傾斜面での旋回における

転倒安全性の問題に対して、ロボットの転倒安全性、人間工学からの重心位置推定に基づく提案を行い、実験にその有効性及び適用範囲を明らかにしている。

本論文での主要な知見を以下にまとめる。

1 計測用車両を用いた計測を行い、3種類の加速度走行パターンと3種類の実環境において人間-車いす系の直線加減速運動と転回運動を計測し、従来不足している人間-車いす系の加速度や角速度の動的な相互作用に関する資料を得た。この中で、加減速走行中の身体特性と車両特性との間に相互作用が大きくなると乗り心地に影響を与えると共に、それが反転する位相差になるとジョイスティックによる操作に影響を与え、入力系に意図しない操作を加えることとなる。こうした過程が電動車いすの振動走行を引き起こしたり、操作不能になることを実環境実験から明らかにした。

2 計測実験からの結果である振動走行を誤操作の一要因として扱える数学モデルを示し、シミュレーションから計測資料との対応を検討し操作性向上に適用できる手法を提案した。これらから入力と出力の関係が固定位相差に引き込まれる領域を明らかにし、振動走行の防止策を提示した。

3 誤操作の発生する要因を考慮しても環境や利用者によっては、電動車いすは転倒を起こすことを考慮し、転倒防止を目的に搭乗者の重心変化を考慮した動的な転回安定速度について提案した。ロボットの姿勢制御の知見から左右輪の接地点を転倒点とみなし、両輪間で変動する人間-車いす系の重心位置推定法を示し、これと転回運動の遠心力とのつりあいの関係から動的な転倒安全速度を提示した。このことから体幹の調節によって転倒安全限界速度をわずかではあるが回避できることなどを定量的に評価した。さらに、傾斜地における人体の傾斜方向の影響を論じており、シーティングの段階で体幹が傾いている利用者、能動的に力を入れづらい利用者に対応ができる電動車いすの安定性向上技術について示した。

これを要するに、本論は、電動車椅子と搭乗者身体系における動的な適合性の評価を対象にして、ロボット工学、人間工学を基礎に、実環境での多様性を持つ人間が機械を操る過程を踏まえたトータルなシステム技術として展開し、その有効性を示したものであり、システム情報工学、福祉工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。

よって筆者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。