

論文内容の要旨

歩行は人間にとって、自立生活だけではなく健康維持にも必要な最も基本的な日常活動である。少子高齢社会において、若年人口の減少による労働人口不足が進んでおり、一方、加齢や事故などにより、下肢障害者は益々増えている。そのため、介護者がいない場合でも、下肢障害者の健康を維持するために、自立した走行を支援することが必要である。したがって、申請者の所属する研究グループでは、自立走行が困難な人に対して、なるべく下半身の運動機能をいかす歩行支援ロボットを開発している。下肢障害者は、自立生活を行うために、歩行支援ロボットのサポートを受けながら、様々な生活環境の中で走行する必要がある。特に、室内における移動の時、家具や壁などにより、ロボットの移動可能な空間が狭くなるため、つまり狭い場所でも、ロボットが自由自在に移動できる機能を持つことが必要である。そこで、開発した自立歩行支援ロボットは、メカナムホイールを用いて、狭い場所でも移動できる全方向移動機能を備えた。

歩行支援ロボットは、要支援者を支援するには、要支援者の意図にしたがって、周りの移動できる空間により、走行径路・軌道を定め、径路・軌道に追従し、要支援者を目標位置まで支援する必要がある。しかし、歩行支援を実施する時、適切な制御をしないと、軌道・経路の追従誤差が生じる。その結果、目標径路から離れて目標位置に到達できないだけでなく、屋内にある家具、ドア、壁などに衝突する危険もある。さらに、ロボットが実際の走行速度が目標速度より速くなったり遅くなったりすることにより、要支援者は転倒事故が発生する可能性がある。従って、使用者が目標位置までに安全に到達できるように、高精度な軌道・経路追従制御法を開発することが必須である。

申請者は、軌道・経路追従精度に影響を与える各要因を考察した。メカナムホイールが受ける摩擦力は進行方向と機体の向きとのなす角度に依存する非線形で時变的である。この摩擦力は、経路・軌道追従精度に悪影響を与えている。そのほか、歩行支援機を使用する時、下肢障害者の障害の種類や障害の度合いによって、歩行支援ロボットに掛ける等価負荷と重心位置が違ふことが考えられる。したがって、本論文では、非線形摩擦力、荷重変化と重心位置変化に対して、適切な運動制御法を開発することで、追従精度を保証する。そのため、まず、ロボットの動力学方程式を導出し、非線形摩擦力に対処する、非線形デジタル加速度制御法を開発した。デジタル加速度制御系を設計する時に必要となる歩行支援ロボットの慣性モーメントは、荷重と重心位置により変化する。次に、荷重変化と重心位置変化に対して、最小二乗法により、提案したデジタル加速度制御則のロボットの慣性モーメントを同定することで、制御精度を向上させる。しかし、デジタル加速度制御系では、ロボットの非線形カップリングに対処するために導入した非線形デカップリングマトリックスの中に、重心位置の情報がある。重心位置の変化により制御精度が影響される。この問題に対処するため、荷重変化と重心位置変化の影響は全て慣性モーメントの中を含められるように、駆動力がロボットの中心位置を直接作用する動力学方程式を導出する。この新たなモデルに基づいて、非線形デカップリングマトリックスを単純化し、デジタル加速度制御則を改善する。最小二乗法により、新たなロボットの慣性モーメントを同定することで、径路追従精度を更に向上させる。以上により、歩行支援ロボットの走行精度を保証する。次に、要支援者の方向意図を認識する。加速度センサと歩行支援機のアームレストの下に荷重センサにより要支援者の動作を計測し、距離型ファジィ推論法に基づいて、要支援者の歩行意図を同定する。最後に、提案した制御法を用いて、歩行支援ロボットが要支援者の方向意図に追従し、有効性を実験により検討する。具体的な研究成果は、次の五点に纏められる。

① デジタル加速度制御法に基づいて歩行支援ロボットの運動制御法の開発

メカナムホイールが受ける摩擦が機体の向きに対する進行方向に依存し非線形かつ時变的である。この摩擦力は経路追従制度に悪影響を与える。先行研究では、非線形摩擦力による影響に対処する方法として、P (Proportional - Integral) 制御法を用いたが、特定な方向及び一定な地面条件により特定な摩擦しかよい精度を得られなかった。全方向においてまた地面条件が一定ではない場合でも高精度な経路追従制御の結果を得るために、制御入力の中に非線形摩擦力を含んでいるというメカニカルシステムの物理的運動本質に着目して、加速度信号を利用すれば非線形摩擦力をキャンセルできることを発見した。この考え方に基づいて、本論文は、加速度信号を利用することにより、非線形摩擦力に対処するデジタル制御法を提案した。

デジタル加速度制御のアルゴリズムを設計するために、歩行支援ロボットのモデルを導出することが必要である。まず、床からの非線形摩擦力、荷重変化と重心位置変化を考慮した、歩行支援ロボットの動力学方程式を導出する。この歩行支援ロボットの動力学は非線形カップリングシステムである。従って、本研究は、まず、歩行支援ロボットの非線形カップリングに対して、非線形デカップリングマトリックスを導入し、制御入力と制御量との非線形カップリングをデカップリングした。次に、非線形摩擦に対して、デジタル加速度制御法を開発した。開発したデジタル加速度制御法は、外力を変化する瞬間、メカニカルシステムの位置、速度と非線形摩擦力は瞬時に変化しない。この性質を利用して非線形摩擦をキャンセルさせる。さらに、システムの安定させるために、制御パラメータの範囲を求めた。最後に、シミュレーションと実験により、制御法の有効性を検証した。シミュレーション実施する時、非線形摩擦の有無にも関わらず、精度の高い経路・軌道追従結果が得られた。実験を実施する時、異なる地面条件でも、PI 制御より、精度高い経路・軌道追従結果を得られた。

② 運動方程式における慣性モーメントのオンライン同定法

前述のデジタル加速度制御法を設計する時、ロボットの慣性モーメント情報が必要であるが、慣性モーメントが既知であると仮定して、制御力を導出した。実験において、直線経路を追従したので、慣性モーメントの精度は低くでも、有る程度追従できることが判る。しかし、複雑な経路を追従する場合、経路・軌道追従精度が低下した。その原因として、歩行支援ロボットの慣性モーメントは、要支援者の病症や体重により異なり、制御する前に把握することが困難である。もし、オンラインで慣性モーメントにおける各要素の値を同定しながら制御することができれば、制御精度を向上することが可能であり、より汎用性の高い歩行支援ができるようになる。したがって、本論文では、制御側にあるロボットの慣性モーメントを逐次最小 2 乗法を用いてオンラインで同定することで、ロボットの追従精度を向上させた。シミュレーション及び実験において、前述のデジタル加速度制御と比較し、荷重と重心位置が変化しでも、直線と円形経路の経路・軌道追従結果がよく得られた。

③ ①駆動力が中心位置に作用する動力学式の導出とその制御系の構成

導出した歩行支援ロボットの動力学方程式には、駆動力はロボットの重心位置に作用する。この動力学モデルに基づいて、開発した非線形デジタル加速度制御法において、デカップリングマトリックスの中に、ロボットの重心情報が含まれる。重心位置の変化によりデジタル加速度制御系の制御精度が影響される。ここでは、歩行支援ロボットの運動精度を更に高上させるために、荷重変化と重心位置変化の影響は全部慣性モーメントの中に含まれるように、駆動力が中心位置に作用する動力学方程式を導出した。この動力学方程式に基づいて、新しいデジタル加速度制御系を構成する。新しい非線形デカップリングマトリックス中に、歩行支援ロボットの向き、ロボット長さ、幅だけが必要である。ロボットの向きはオンラインで測定することができる。ロボットの長さ、幅が一定である。デジタル加速度制御側にある慣性モーメントの値を逐次最小 2 乗法を用いて同定する。以上により、制御側に必要な物理量が全てわかる。この制御方法により、非線形摩擦、荷重変化と重心位置変化の影響を全部対処した。実験により、適切な制御パラメータを設定することにより、地面条件が一定なくても、使用者の病態や体重が異なっても、歩行支援ロボットの運動制御を保證できることが示された。

④ 下肢障害者の移動方向意図の同定

歩行支援ロボットによる歩行支援時、歩行支援ロボットが要支援者の移動方向意図を認識する必要がある。適切な歩行支援を行うために、歩行支援ロボットが要支援者の意図を理解する方法を開発する。そこで、歩行支援ロボットのアームレストの内側に力センサを四か所に設け、要支援者からの等価荷重と重心の位置を測定する。また、加速度・姿勢センサを下肢障害者頭の上に付け、歩行する時、使用者の傾き方向を測定する。計測した荷重と加速度情報を利用し、距離型ファジィ推論法に基づいて要支援者の行こうとする方向意図を同定する。統計的に計測された腕荷重及び使用者の傾き方向と方向意図との相関性に基づいて方向意図の同定を実現した。実験により、同定方法の有効性を検証した。

⑤ 開発した制御法を用いて、ロボットが要支援者の方向意図に追従結果の検討

距離型ファジィ推論法を用いて、要支援者の方向意図を同定した。要支援者が自分の意図にしたがって歩き、歩行支援ロボットが要支援者の歩行意図を認識し、その方向に追従する、歩行支援の有効性を実験により検討する。実験方法として、まず、下肢障害者は歩行支援ロボットにより、指定された目標径路に従って歩く。提案した同定方法により、下肢障害者の歩行意図を同定し、目標軌道・径路を計画する。次に、ロボットが提案した運動制御法に基づいて、計画した目標軌道・径路を追従し。最後に、ロボットの走行結果と指定された目標径路と比較することにより、歩行支援ロボットの有用性を検討した。

以上の五点を纏める。本論文では、要支援者の安全な自立生活を実現するために、歩行支援ロボットを移動軌道・経路に高精度な追従させるように、追従制御法を開発してきた。基礎研究として、以下のような研究成果が得られた。まず、追従誤差を生じる主な原因となる非線形摩擦力、荷重変化と重心位置変化に着目し、非線形デジタル加速度制御法に基づいて、歩行支援ロボットの運動制御法を開発した。次に、運動精度を向上させるため、逐次最小2乗法を用いてデジタル加速度制御則の中にある歩行支援ロボットの慣性モーメント値を同定した。更に、制御の精度を向上させるため、重心に関する動力学方程式を中心に関する動力学方程式に変形した。この動力学に対して、新たなデジタル加速度制御系を設計し、逐次最小2乗法を用いてデジタル加速度制御則の中新たな慣性モーメントを同定した。また、距離型ファジィ推論法に基づいて、荷重と加速度情報を利用して要支援者の移動方向意図を推定した。最後に、歩行支援ロボットが提案した制御法を用いて、同定した要支援者の移動方向意図に追従し、歩行支援ロボットの有効性を実験により検討する。