

学位論文内容の要旨

本研究はヒューマノイドの任意環境における環境適応性の向上、並びに義足や装具などのヒトが装着する福祉機器の開発に有用な知見の獲得を目指し、生物が神経系の周期信号により任意環境に適応した歩容を生成することに着目して、三次元二足受動歩行ロボットの新たな安定化制御手法を解析的に検討し、実験的に検証した。

はじめに、歩容の安定化を図るためには、ロボットの三次元歩行運動を立脚の切り替え運動と遊脚の振り子運動に分割した場合、両運動の周期の一致が必要十分条件であることを実験的に明らかにした。さらに歩行路の斜度が変化しても安定した歩容が得られる場合は、歩行周期はほぼ一定値となることを示した。

この実験結果を基に、任意に斜度が変化する歩行路において、脚部の受動的な運動を妨げずに歩行の安定化を図るため、ロボットの上半身に機械的な振動子を取り付け、その周期運動で発生する周期的な制御入力を利用する歩行制御システムを提案した。この振動子の目標軌道は、Van der Pol 方程式による強制引き込み現象を利用して常に立脚の切り替え運動と同調し、振幅は立脚の切り替え運動と遊脚の運動の周期の差に比例するよう設定した。さらに位相差についてはエネルギー変化率の解析から $\pm \pi/2$ [rad] に設定することで、立脚の切り替え周期を増減できることを明らかにした。ロボットの歩行中において斜度変化などの影響により歩調が変化しても、振動子の目標軌道がオンラインで適切に設定された結果、安定化制御が可能となることを数値シミュレーションにより明らかにした。

さらに提案する制御手法の有効性を実験的に検証することを最終的な目標とし、歩行成功率の高い三次元二足受動歩行が実現できるとともに、振動子などのコントローラの搭載が可能となる高い拡張性を有する受動歩行プラットフォームを設計・製作した。従来の二足受動歩行ロボットの歩行成功率が数%程度であったのに対し、製作したプラットフォームは歩行路の斜度に応じて 30~60% という高い成功率を示した。このプラットフォームの三次元モデルを作成したうえで、振動子による安定化制御の数値シミュレーションを実施した。この結果、リミットサイクルによる安定性解析により、安定した歩容が獲得できる歩行路の設定条件が、振動子を用いない場合と比較して拡大することを示した。

以上の結果、ヒトの歩容を規範とする三次元二足受動歩行を、周期入力により安定化する有効な手法を提案することができた。本手法は、ロボットが外部から受けた力学的作用による歩容変化を基に、制御入力をオンライン生成できるところに大きな特徴あり、ヒューマノイドの環境適応性の向上や、義足やパワーアシスト装具の BMI (Brain Machine Interface) を利用した制御に有効である。

論文審査結果の要旨

本研究は、ヒューマノイドや義足などの歩行機械の性能向上を目指し、生物を規範とした受動歩行の安定化制御手法を解析的、並びに実験的に検討したものである。

はじめに、斜度が増える歩行路において三次元受動歩行の安定化を図るためには、ロボットの立脚の切り替え運動と遊脚の運動を一定の周期で一致させることが必要十分条件であることを実験的に明らかにした。具体的には以下の通りである。任意の歩行路において、この条件に適合させるために、ロボットの上半身に設置した機械的な振動子で歩行を制御する。次に、振動子の目標軌道を、Van der Pol方程式の強制引き込み現象を利用して、立脚の切り替え運動に同期するように設定する。さらに、振幅を立脚の切り替え運動の周期と遊脚の周期の差で決定し、位相はエネルギー変化率から $\pm \pi/2$ [rad]に設定することで、立脚の切り替え運動を効率よく増減できることを示した。

このシステムを搭載した歩行制御実験を行うため、歩行成功率の高いロボットである受動歩行プラットフォームを開発した。従来の二足受動歩行ロボットの歩行成功率が数%程度であったのに対し、本プラットフォームは最大約60%もの高い成功率を示した。提案する制御手法の有効性を検証するために、振動子による歩行制御シミュレーション並びに歩行制御実験を実施した結果、リミットサイクルによる安定性解析を行うことにより、安定した歩容が獲得できる歩行路の設定条件が拡大することを示し、実験的にも安定化を図ることが可能であることを証明した。

以上のように、本研究では、三次元二足受動歩行を、周期入力により安定化する有効な手法を提案している。提案した手法は、ロボットが環境による歩容変化をもとに、制御をオンラインで達成できるところに大きな特徴があり、ヒューマノイドの環境適応性の向上や、義足などの生体信号を利用した制御に非常に有効である。

以上の結果より、本論文は工業的にも価値の高い研究と判断され、博士後期課程学位論文として十分価値があるものとして認められる。