

Title	状態にジャンプを有する線形化運動方程式に基づくり ミットサイクル型動歩行の解析と制御
Author(s)	肖, 軒
Citation	
Issue Date	2015-12
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/13008">http://hdl.handle.net/10119/13008</a>
Rights	
Description	Supervisor:浅野 文彦, 情報科学研究科, 博士

氏名	肖 軒		
学位の種類	博士(情報科学)		
学位記番号	博情第 333 号		
学位授与年月日	平成 27 年 12 月 24 日		
論文題目	<b>Analysis and Control of Limit Cycle Walking Based on Linearized Equation of Motion with State Jump</b> (状態にジャンプを有する線形化運動方程式に基づくリミットサイクル型動歩行の解析と制御)		
論文審査委員	主査	浅野 文彦	北陸先端科学技術大学院大学 准教授
		丁 洛榮	同 教授
		前園 涼	同 准教授
		徳田 功	立命館大学 教授
		佐藤 訓志	広島大学 助教

## 論文の内容の要旨

Limit cycle walking which is proposed to measure and ensure stability by releasing the constraints of walkers, has a high energy efficiency because of zero or low feedback gains required for sustained local stability, and thus has more freedoms to increase versatility in optimizing walking state generation. To increase the ability of handle disturbance, however, limit cycle walking needs to bring high feed gains, which affects the energy efficiency. Considering all closed-loop control systems, the energy consumption by the feed-forward control system which can often significantly justify the extra cost, time and effort required to implement the technology is substantially lower than others. Therefore, if the mathematical model of limit cycle walking which is the requirement of the feed-forward control can be built, the feed-forward control can be proposed as the solution. In addition, the mathematical analysis of limit cycle walking can help to discover and generate the optimal walking states.

First, a general method is proposed to build the mathematical model of limit cycle walker driven by all the settling-time control systems. Through the analysis of discrete control systems, the general formula is proposed for all discrete control systems. Thus when the control input of the continuous control systems is discretized, the mathematical model of the continuous control systems can be built by the general formula of the discrete control systems. Based on the mathematical model, gait properties are analysed, critical and optimal walking states are discovered mathematically and target walking states are generated. All the results are verified by numerical simulations.

Second, feed-forward control is proposed based on the mathematical model of the combined rimless wheel (CRW). Thus, gait properties of state error are analysed and limit cycle walking at target constant walking speed is generated successfully. In addition, the ability of handle disturbance of the feed-forward control is tested by numerical simulations.

Finally, the limit-cycle-walking-based feed-forward control system is extended to the underactuated rimless wheel with torso (URW), a two-DoF limit cycle walker. The optimal walking state, deadbeat mode, is analysed mathematically and generated by numerical simulations. In addition, a constant speed walking is generated on the uneven ground by the feed-forward control system.

keywords: Feed-forward control, Limit cycle walking, Optimal state analysis, Target walking states generation, Mathematical model.

## 論文審査の結果の要旨

運動と衝突を記述する二つの方程式により定式化されるリミットサイクル型動歩行運動は、状態にジャンプを有する局所的に安定な周期軌道として形成される。その一般的な歩行モデルがもつ身体的特徴はポイントフットであること、すなわち接地点回りに駆動力をもたないことであり、この劣駆動性と非線形ハイブリッドシステムがもつ複雑さが歩行特性の解析を困難なものにしている。しかしながら近年の研究の進捗により、衝突姿勢拘束を達成する（同じ姿勢で 1 自由度の剛体として倒れ込む）歩行系に関しては、運動の近似線形化に基づく状態誤差遷移関数の近似解析解の導出法が確立され、数値積分を実行することなく歩行運動の局所安定性を知ることが可能となった。本論文では、この最新理論を更に発展させ、運動の線形化が有効かつ衝突姿勢拘束を達成するリミットサイクル型歩行系を対象として、その離散的挙動の制御を実現する基礎理論の構築を目的とした。

第一に、一切のフィードバック情報を必要としない歩行制御法に関して以下の結果を得た。定数指令値として与えられる一定の（フィードバック情報を含まない）制御入力信号により駆動される 1 自由度の歩行系に対して、定常歩容において成立する二つの境界条件から定常歩行周期の近似解析解を導出する方法、およびその逆算に基づく目標歩行速度制御法を開発した。次にこの方法を、整定時間を考慮した定数指令値あるいは連続時間関数として記述される一定の制御入力信号により駆動される 1 自由度歩行系へと拡張し、任意の信号波形に対し適切な標本化を行うことで数値積分を必要としない、かつ十分な計算精度を達成する目標歩行速度制御系の実現が可能であることを示した。第二に、上記の方法を、現実的なフィードバック情報を考慮した以下の制御法へと拡張した。離散状態量（衝突直後の支持脚角速度）を計測可能である歩行系においては、この情報に基づき衝突ごとに定数指令値を更新することで、歩行速度に関する過度状態を含まない目標歩行速度制御系の実現が可能であることを示した。また、単脚支持期において一定の短い周期で状態量（支持脚角速度）を計測可能である歩行系においては、関節粘性や外乱の存在下でも強いロバスト性をもつ歩行運動の離散的挙動の実現が可能であることを示した。更には、出力追従制御を伴う 2 自由度の劣駆動歩行系に対しても理論拡張が可能であることを示し、運動解析によりその有効性を確認した。

以上、本論文は、リミットサイクル型動歩行運動に対する数値積分に依存しない目標歩行速度制御法の基礎理論および現実的応用手法を提案し、その有効性を示したものであり、学術的に貢献するところが大きい。よって博士（情報科学）の学位論文として十分価値あるものと認めた。