

Title	受動的動歩行の適応的なふるまいに着目した脚歩行口 ボットの設計と制御に関する研究
Author(s)	浦, 大介
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/76540
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

受動的動歩行の適応的なふるまいに着目した 脚歩行ロボットの設計と制御に関する研究

浦 大介

2020年01月07日 大阪大学大学院工学研究科

目次

第1章	はじめに	13
1.1	受動的動歩行について	13
1.2	提案する設計・制御手法	18
第 2 章	受動的動歩行の適応的なふるまいを利用した脚歩行口ボットの設計方法	23
2.1	はじめに	23
2.2	受動的動歩行の性質を利用した脚歩行口ボット設計	25
	2.2.1 受動的動歩行の適応的なふるまい	25
	2.2.2 受動的動歩行動作の安定性を確保する物理的パラメータ選定	25
	2.2.3 適応的なふるまいを利用した脚歩行口ボット設計	28
2.3	動力学シミュレーションによる検証	30
	2.3.1 提案する設計手法による設計例	30
	2.3.2 設計結果の検証	34
	2.3.3 設計結果に関する検討	39
2.4	おわりに	40
第3章	受動的動歩行の適応的なふるまいを利用した所望の制御性能の漸近的実現	43
3.1	はじめに	43
3.2	提案する設計手法	45
3.3	動力学シミュレーションによる設計	46
	3.3.1 脚長変化を用いた設計	47

4 目次

	3.3.2 重心位置変化を用いた設計	51
3.4	考察	56
3.5	結言	57
第 4 章	受動的動歩行のダイナミクスを利用した脚歩行口ボット制御の実機検証	61
4.1	はじめに	61
4.2	提案する制御手法	62
4.3	開発した歩行ロボット	63
4.4	開発したロボットを用いた歩行制御実験	66
4.5	考察	68
4.6	おわりに	69
第 5 章	おわりに	73
参考文献		77
謝辞		85
業績一覧		89

表目次

2.1	Physical parameters of the sample compass robot models used in Fig. 2.1;	
	The hip and foot weight does not change even the walker getting larger.	28
2.2	Physical parameters of the walker models in the experiment; In the begin-	
	ning, the walker is small. The adjustable parameter of the walker changes	
	while walking. These parameters should satisfy the given design goals.	
	The adjustable parameter is designed while walking. In this case, we	
	finally designed parameters shown in the right of the table	32
3.1	Initial parameters of the passive dynamic walker with the growth of leg	
	length; it only legs length changes. It is unchangeable that any other	
	physical parameters	50
3.2	Designed leg lengths of the walker and error ratios of between leg angle	
	desired and designed; almost error rates are below 1.0 $\%$. In the case of	
	0.8 and 0.85 , the rates relatively large because the walker has two periodic	
	gaits.	50
3.3	Parameters of the walker with changing the CoM by weights moving	53
3.4	Designed weight positions and error ratios	55
4.1	Physical parameters of the robot	63

図目次

1.1	McGeer's 2-dimensional passive walker; the walker has no actuators for	
	swinging legs. It has only actuators for shortening or lengthening legs. It	
	makes clearance between the slope and the robot's foot to swing the legs.	
	(cite from $[1]$)	14
1.2	Bifurcation of the step period of the passive walker; The step period has	
	bifurcation as the slope angle increasing. (cite from [2])	16
1.3	Concept of proposed method; The parameters of a robot will change while	
	walking. If the change is small, the robot regulates its gait to keep walking.	18
1.4	Block diagram of the proposed method; When we want to control some-	
	thing, we usually design a controller such as C_g in the figure, and the	
	system is controlled. That way often takes the system's passivity away.	
	In the proposed method, the system has two types of parameters. One	
	is the physical parameters such as length or mass. Another one is the	
	variable parameters such as stride or walking velocity. In passive dynamic	
	walking, the variable parameters are dictated by the physical parameters.	
	Therefore, we can control the variable parameters by changing the physical	
	parameters	19

图目次

1.5	Topics of the book; In chapter 2, we verified the feasibility of the proposed method in dynamics simulation. In the verification, we use a feed-	
	forward approach; in other words, it is what removed a feedback signal	
	from Fig. 1.4. In chapter 3, we try to design or control the robot's gait	
	using the method. To control the variable parameter, we calculate Δx	
	by the feedback signal and change its physical parameter. In chapter 4,	
	we design the robot in physical and to verify the proposed method via	
	walking experiments	20
2.1	The relation between the physical property and the basin of the attraction	
	of the passive walker; (a) has shown the walker has two legs, and they have	
	an arc shape foot. The foot has attached with an offset shown on the right	
	side. (b) has demonstrated that the basin of attraction is getting small	
	as the walker becomes large. It means the larger walker is challenging to	
	walk than the smaller walker	27
2.2	The conceptual diagram of the proposed legged robot designing and that	
	procedure; At the beginning, the robot has shorter legs. It grows up the	
	parameters converge to desired ones. If the robot falls over, it means that	
	growth trajectory does not exist. In other words, the walker cannot walk	
	with those physical parameters. In such a case, we should change the	
	trajectory	29
2.3	The conceptual diagram of the proposed designing procedure; it has shown	
	the behavior of the robot during the transition. The walker changes small	
	to large. After, it produces knee joints.	33
2.4	Quasi-passive walking phase; the slope angle is decreasing when the walker	
	growing up has done. The walker stride is decreasing as the slope angle	
	decreasing. Then the ankle torque is increased to keep the walker's stride.	35

2.5	Comparison between the two cases: with the torque and without. When	
	not applying torque, this robot falls over at around 0.025 rad. On the	
	other hand, by input ankle torque for putting back the stride, this robot	
	walking even at 0.0 rad flat surface	37
2.6	The relation between ankle torque and slope angle; the torque increase	
	as the slope angle decreasing. It has shown the walker walked on a flat	
	surface in finally.	38
2.7	Leg angle trajectory two conditions; in the 1200th to 1210th step, the leg	
	angles show symmetry trajectory about both the outer and inner legs.	
	In the 1990th to 2000th step, when walking on the plane surface, the	
	trajectory is distorted. In this case, this result shows that the robot gait	
	has two strides	38
3.1	A model of the passive dynamic walker; the walker has 2 D.O.F. and has	
	arc foot	47
3.2	Leg length and leg angle of the walker in a design example; the leg length	
	of the walker is changed while walking to achieve the desired leg angle.	
	The leg angle converged to the desired ones. We got a walker that walks	
	with the desired leg angle. In this case, K_P is 0.7	48
3.3	Result of a plant changing control applying the passive dynamic walker; in	
	this design experiment, we design the leg angle while walking via changing	
	leg length. When trying the first two desired values, the gait of the walker	
	had shown bifurcation. About the last three desired leg angles, the leg	
	angle converged without bifurcation. In this case, $K_P = 0.7$	49
3.4	One of the verification of the result of designing; the desired leg angle is	
	0.6 deg. It has shown the walker walking with an almost desired leg angle.	51

10 図目次

3.5	Weights loaded walker; the weight attaches to each leg. The weights can	
	adjust its position by motors and ball-screws. Therefore, the CoM of the	
	walker moves as weights moving. Each foot has the shape of part of a	
	sphere	52
3.6	Strides and weight position of the Passive Dynamic Walker applying CoM	
	position control; the first desired stride is 0.09 m, when over 500 sec, the	
	desire has changed to 0.05 m. $(K_P = 1.0)$	54
3.7	Stride and weight position of the walker that is applying weights position	
	control; the first desired stride is 0.10 m, and when over 500 sec, it has	
	changed to 0.05 m. $(K_P = 0.5, K_I = 0.2)$	55
3.8	Result of an experiment for verifying designed walker; in this experiment,	
	weight position was fixed. The error ratio that is between the desired one	
	and output is 13.6 %	56
4.1	Appearance of the robot; the black-colored boxes that were attached the	
	leg can move by ball-screw actuated by DC-motor. The weight is put	
	in those boxes. Therefore, position of the center of mass as a physical	
	parameter will change. The walker has 2 D.o.F	65
4.2	System block diagrams of the developed robot; it has two processors. One	
	is the Raspberry Pi 3B+ that calculates how the weights move. Another	
	one is A micro-controller Genuino101 that attached to each leg. It receives	
	the command and controls their weight position. It communicates between	
	Raspberry Pi and Genuino101 via ROS	66
4.3	Stride and weight position during the walking experiment; the stride shows	
	two periodic walkings. It has changed the weight position while walking.	67
4.4	Experimental results of stride and angular velocity; it distinguished the	
	right leg and left leg. It seems bifurcated due to parameter different from	
	the right and left.	69

第1章

はじめに

1.1 受動的動歩行について

脚歩行には自身の機構と歩行している環境との相互作用のみによって発現するものが存在し、これは受動的動歩行と呼ばれる。最もシンプルな受動的動歩行器は、アクチュエータやセンサ、制御といったものを一切使用しないもので、環境とロボット自身のダイナミクスとの相互作用を利用して緩やかな下り坂を歩行することができる[1]. 単に2つの棒を回転関節で繋げただけのものであっても、適切な角度を持った坂道と脚の振り抜きの際のクリアランスの確保、そして適切な初期条件を与えると歩行が発現する.

受動的動歩行ロボットを体系づけて研究を始めたのは McGeer である [1]. この文献では, 円弧形状の足底を持った受動的動歩行ロボットをモデリングし, その歩容解析を行っている. また, **Fig. 1.1** のような実機を製作して歩行実験も行っている. 14 第1章 はじめに

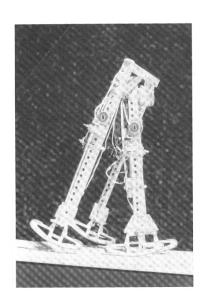


Fig. 1.1 McGeer's 2-dimensional passive walker; the walker has no actuators for swinging legs. It has only actuators for shortening or lengthening legs. It makes clearance between the slope and the robot's foot to swing the legs. (cite from [1])

受動的動歩行はそのパラメータを変化させることで様々な歩容が生まれることが知られている。Goswami らは [2] において、受動的動歩行ロボットを 2 重振り子としてモデリングし、その歩幅が坂道角度を増加させるにつれて増加し、やがて分岐、さらにカオス的なふるまいを見せることを示した。このように歩容が分岐することは、実機においても同様に発現することが確認されている [3]. 分岐現象は、パラメータや坂道の角度に依存して見られることが知られている [4,5,6]. 4 脚の受動的動歩行器では動物の歩行で見られるウォークやトロット、ペースなどの歩容が歩行環境やパラメータに依存して制御なしに発現することが確認されており、生物の歩行のメカニズム解明のアプローチとしても期待される [7].

また、コンパス型の受動的歩行ロボットをリムレスホイールとしてモデリングし解析を行っている研究も多くある。McGeer[1] もリムレスホイールについて、歩行速度が坂道角度に対応すること示している。Asanoらは[8]において、車両のホイールをリムレスホイールに置き換えたようなモデルにおいて、直接的にホイールを駆動させるのではなく、車体中央に揺動質量を持たせ、それを適切に制御することで歩行スピードを向上させている。さらに、その質量と位相差によって分岐を起こすことも観察されている。

少し変わったところでは両脚が地面から離れるフェーズが存在する受動走行に関する研究も行われている。これは実機実験において発現することが確認されている [9, 10]. [10] では, ばねを取り付けたリムレスホイールを用いた受動走行器に関して実機実験および数値シミュレーションを行っている。ここではスロープが大きくなると歩行から走行に遷移し,この走行がいわゆるスキップのようにふるまうことを示している。さらにこのスキップ走行について安定解析を行い,平衡点が非常に安定性が高いことを特徴として述べている。起こし回転型と呼ばれる1本の棒のみで構成される受動走行器では,その平衡点の解析も行われており坂道角度が大きくなるとより安定に走行できることが示されている [11].

また、脚歩行にとって足底は環境とのインタラクションを担うインターフェイスになるため、その形状は歩行について非常に重要な意味を持つ。これは受動的動歩行でも例外ではなく、様々な足底形状が提案・検証されている。円弧形状 [12,13] やリムレスホイール・コンパスモデルのような点形状 [14,15] は単純な形状であるため最もよく見受けられる。また、人間に近い足底形状として偏平足形状 [16,17,18,19] や 2 点支持形状 [20] なども提案されている。

近年では、佐野らが受動的動歩行を利用した歩行アシスト機械を開発した [21]. これは、佐野らが研究を行った受動的動歩行器をより安定に歩行させるための、膝折れやつまずきを防止するような機構を応用して作られたもので、腰一下腿に装着し、バネによって脚を前に振り出すことで歩行を補助するものである。受動的動歩行の研究は役に立ちにくい研究として見られがちだが、このように福祉応用に成功した例もある。

一切の制御がないにも関わらず歩行が発現するという現象については、受動的動歩行ロボットと歩行環境との相互作用中にフィードバック構造が内在し、このフィードバック構造が歩行を安定化する制御器の役割をしていることが杉本らによって示されている [4, 22].

16 第1章 はじめに

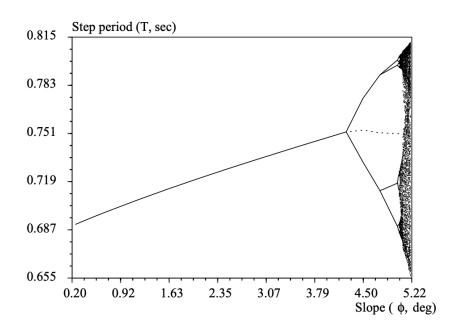


Fig. 1.2 Bifurcation of the step period of the passive walker; The step period has bifurcation as the slope angle increasing. (cite from [2])

さて、受動的動歩行には入力が存在しないため、その歩容は脚歩行ロボットと環境のパラメータによって決定される [2, 23]. そのため、ロボットが持つパラメータを変えるだけでその歩幅や歩行速度は変化する. この性質から、受動的動歩行ができるだけでは従来の脚歩行ロボットのような自在な歩行を行うことは難しく、これを克服するために受動的動歩行ベースに制御やアクチュエーションを加えた準受動的動歩行ロボットの研究もなされている [24, 25, 26]. このような受動的動歩行規範のロボットにおいてよく知られている特徴として、歩行時のエネルギ効率が良いことや歩行動作がなめらかであることがよく挙げられる [27, 28].

さて、受動的動歩行の持つ特筆すべき特徴として、適応的なふるまいが挙げられる.これは、歩行中に環境の変化が生じても、それが小さなものであれば歩容を変化させて歩行を継続するといったふるまいである.この適応的なふるまいについてはシミュレーションや実機実験においてその存在が確認されている [29, 30, 31].

以上のように、受動的動歩行には脚歩行ロボットのハードウェアとしての応用や、生物の移動メカニズムの解明などが期待されている. しかしながら、そもそも安定に受動的動歩行する

ロボットハードウェアを設計することが難しく、その設計方法に言及している文献は多くない. うまく歩くハードウェアが設計できなければそれをうまく制御する制御器を設計することはできない. 制御によって安定な歩行を実現する手法についていくつか提案されているものの[32, 14, 33]、「歩行しやすいハードウェア」として受動的動歩行をみた場合、そもそもの骨組みであるハードウェア部分が歩行しやすいものになっていることが望ましい. 受動的動歩行ロボットの設計法はいくつか提案されているものの[34, 35]、多自由度になると設計に関する知見は少ないために未だに試行錯誤ベースになることが多い.

ところが、受動的動歩行の吸引領域は膝関節が追加されるだけでも小さくなることが知られており、実験を行う際にはまず歩行できる初期条件を探索するところから始まる。この探索では開発した受動的動歩行ロボットを様々な坂道角度で歩かせながら歩きやすいところを探していくことになるが、同時に初期条件の与え方も探索する必要があり、これは非常に時間がかかる作業となる。特に実機実験になると足底の摩擦やその材料特性、坂道表面の状態など考慮すべきパラメータは膨大になる。このように、現状では受動的動歩行が可能なハードウェアに関して自在な設計が可能であるとは言いがたい。

また,所望の歩容で歩行させたいとき,なんらかの方法で制御を行う必要がある.しかしながら,安易に関節部にトルクを加えるように直接アクチュエータを配置すると,モータの粘性や歯車列により最大の特徴である受動的な性質が失われかねない.

そこで本論文では、受動的動歩行の適応的なふるまいを用いた脚歩行ロボットハードウェア の設計・制御を提案する. 18 第1章 はじめに

1.2 提案する設計・制御手法

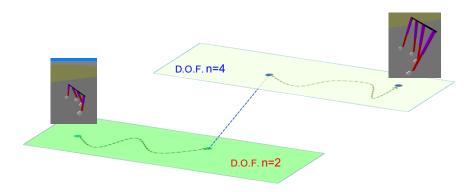


Fig. 1.3 Concept of proposed method; The parameters of a robot will change while walking. If the change is small, the robot regulates its gait to keep walking.

提案する設計手法の概念図を Fig. 1.3 に示した.まず,比較的歩行させやすいことが既知である小さなコンパス型の受動的動歩行器を用意し歩行を開始させ,歩行中に所望のハードウェアへと徐々にパラメータを変化させていく.このパラメータ変化が小さければ受動的動歩行器は適応的なふるまいの効果で歩行を継続できる.最終的に所望の設計条件を満たすパラメータを有するハードウェアに到達すれば設計完了となる.この方法では,設計したハードウェアは受動的動歩行が可能であることが保証され,さらに設計中に歩行を行っているときのどのタイミングの状態を切り出しても歩行開始可能な初期条件となりうる.

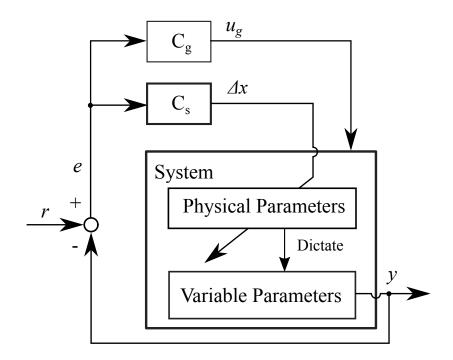


Fig. 1.4 Block diagram of the proposed method; When we want to control something, we usually design a controller such as C_g in the figure, and the system is controlled. That way often takes the system's passivity away. In the proposed method, the system has two types of parameters. One is the physical parameters such as length or mass. Another one is the variable parameters such as stride or walking velocity. In passive dynamic walking, the variable parameters are dictated by the physical parameters. Therefore, we can control the variable parameters by changing the physical parameters.

Fig. 1.4 に提案する方法のブロック図を示した.システムが可調整となっている一種の適応システムとして構成されていることがわかる [36].一般に、何らかのシステムを制御したいときには図上部のように、コントローラを通して制御対象に入力を与え、アクチュエータを動作させることで制御目標を達成する.この方法では制御対象にはアクチュエータや歯車列などによる抵抗が生まれ、結果として受動的動歩行機の関節は硬くなりその最大の特徴である受動性は失われることになる.

20 第1章 はじめに

そこで,まず本稿では受動的動歩行システムは 2 種類のパラメータを持つシステムとして定義する.一つは脚長や脚質量といった「物理的パラメータ」,もう一つは歩行の結果として得られるような歩幅や歩行速度といった「変数的パラメータ」である.変数的パラメータに関して,厳密にはこれは出力であるためパラメータではないが,設計という目的から物理的パラメータと同等に扱うため便宜上パラメータとしてみている.制御器を持たない受動的動歩行において,変数的パラメータは物理的パラメータのみによって値が決定される.つまり,物理的パラメータを適切に操作することで所望の変数的パラメータを得られる,つまり制御することができる.そして,この図中の Δx の信号が 0 になるようにすると物理的パラメータの変化は停止する.これはまさに設計の意味を持つ.

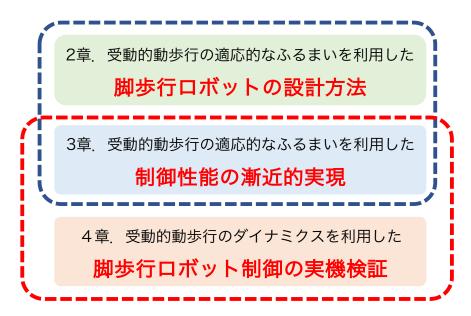


Fig. 1.5 Topics of the book; In chapter 2, we verified the feasibility of the proposed method in dynamics simulation. In the verification, we use a feedforward approach; in other words, it is what removed a feedback signal from **Fig. 1.4**. In chapter 3, we try to design or control the robot's gait using the method. To control the variable parameter, we calculate Δx by the feedback signal and change its physical parameter. In chapter 4, we design the robot in physical and to verify the proposed method via walking experiments.

Fig. 1.5 に本論文の構成を図示した.赤枠で囲われた部分がシミュレーションを用いた検

証部,青枠で囲われた部分がシミュレーションにて用いた方法について実機実装を行い,実際に歩行実験を行い検証した部分というふうに分けることができる。2 章では受動的動歩行の適応的なふるまいを利用した受動的動歩行器の設計方法の提案とシミュレーションを用いた設計を行う。ここでは Fig. 1.4 のフィードバック信号を切断した状態,すなわちフィードフォワードによる設計を行う。さらにそのハードウェアによる平地でのリミットサイクル歩行の実現について述べる。3 章では Fig. 1.4 のフィードバック信号を接続し,所望の歩容を実現するような設計・制御方法を検証する。4 章では 3 章で述べる設計と制御に関して,実際にロボットを製作し,歩行実験を通して検証を行う。5 章でまとめとする。

第2章

受動的動歩行の適応的なふるまいを 利用した脚歩行ロボットの設計方法

2.1 はじめに

従来の脚歩行ロボットに関する研究では、Zero Moment Point (ZMP) を転倒防止のための姿勢制御の規範として使用し、産業用ロボットと同様の設計手法で製作された脚歩行ロボットに対して能動的に動作制御を行うものが多く見受けられる [37][38][39][40].

これらの脚歩行ロボットでは脚の動作を各関節の角度制御による位置姿勢制御で実現している。その理由には、これらのロボットが産業用ロボットの製造技術を基盤にしていることや、ロボットの姿勢制御が位置情報である ZMP を規範としているために位置制御に対して親和性が高いことなどが挙げられる。このようにして開発されたロボットの歩行動作は、脚部リンク構造の特異点回避のために腰の位置を一定の高さに拘束する必要があり、それがロボット特有のぎこちない歩行動作の一因となっている。

そういった動作のぎこちなさを克服するための研究もみられるが [41, 42, 43], それらは関節角度制御の性能が高いハードウェアを用いることで実現する「制御方法」に関するものが多い.

このような脚歩行ロボットの制御では、必要な関節駆動トルクを得るために高い減速比を有する減速機を使用し、関節角度制御の性能向上のために高ゲインなフィードバック制御系を構

成することになる [44]. これは、脚歩行ロボットの設計方法が産業用ロボットのそれから発展してきた歴史を考えると自然なことではあるが、歩行動作時のエネルギー効率の低さの原因となっているため、解決すべき問題点のひとつである [27].

ところで、制御対象の構造系(ここでは主に機構系を示す)と制御系の同時設計に関する研究が従前より行われている [45]. これはハードウェアとそれを制御する理論の整合性を最初から意識して全体設計を行うという理にかなった考え方を具体化するものである. この考え方を参考にして脚歩行ロボットの設計を考えるならば、現在の産業用ロボットの設計方法を規範とした設計方法を用いるのではなく、「脚歩行ロボットの制御との親和性」を考慮した脚歩行ロボットハードウェアの設計方法を適用することが自然であると考えられる. 例えば、上述したZMP 規範型の制御方法を主体として考えるならば、歩行動作時の関節の軌道演算が高速に終了が可能で、かつ各関節の位置決め精度が高い特性を持つロボットハードウェアを設計することになるであろう.

しかしながら、歩行を行うことが前提の脚歩行ロボットを設計する場合、上述の構造系と制御系の同時設計の概念を意識するならば、位置制御に適した脚歩行ロボットハードウェアを設計するのではなく「脚歩行に適した構造・構成となっている脚歩行ロボットハードウェア」を設計する方が自然である。そして脚歩行に適したハードウェアとは、極限まで制御を取り除いてもなお歩行が可能なものであると考えられる。このような脚歩行ロボットハードウェアで実現される歩行が"受動的動歩行"である。

受動的動歩行は、機構のみで歩行が可能であることに加え、歩行時のエネルギー効率の高さや動作の滑らかさが特長として挙げられ [27]、上述の「脚歩行に適した構造・構成となっている脚歩行ロボットハードウェア」の候補と考えられる。この受動的動歩行が実現可能な脚歩行ロボットを定量的に設計する方法と、設計した脚歩行ロボットの動作制御に適した制御方法を確立できたならば、構造系と制御系の同時設計の概念に沿った脚歩行ロボット設計とその動作制御系の設計が実現でき、より良い脚歩行ロボットの設計が可能となる。ところで、受動的動歩行が可能な脚歩行ロボットの設計方法は、従来研究でもいくつか提案されているが [46,30]、それらに対して本研究では脚歩行ロボットの最適設計としての構造系と制御系の同時設計という観点から、受動的動歩行が可能な脚歩行ロボットの具体的な設計方法の確立を試みる。本章は、受動的動歩行に発現する適応的なふるまい [30] を利用して受動的動歩行が可能なハードウェアの設計を行い、さらに設計したハードウェアを用いて、平地でのリミットサイクル歩行

への展開を試みることで本設計手法による設計可能性を提示するものである.

2.2 受動的動歩行の性質を利用した脚歩行口ボット設計

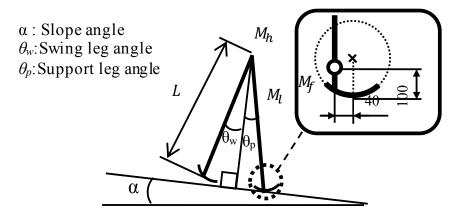
2.2.1 受動的動歩行の適応的なふるまい

脚歩行ロボットが受動的動歩行を開始して周期的な歩行動作に引き込まれた後、その歩行を継続させたまま系の物理的パラメータを少しずつ変化させる。すると、その系の変化にともなって歩容が少しずつ変化しながらも歩行動作を維持しようとする、まるでロボット自身が歩行動作を継続しようとする適応的なふるまいが確認できる。例えば、受動的動歩行動作を行っている脚歩行ロボットが歩行する路面の傾斜角度を少しずつ大きくしていくと、その傾斜角度の変化にともない歩行動作中にその歩幅が連続的に少しずつ大きくなるといったふるまいである。そしてその適応的なふるまいを引き起こす物理的パラメータは、脚歩行ロボットを構成する部品の質量や脚長などのロボット自身が持つものや、歩行路面の傾斜角度という環境的なものなどの受動的動歩行を記述する運動方程式中に含まれる全てのパラメータが関係する。この受動的動歩行に発現する環境変化に対する適応的なふるまいは、計算機シミュレーションと実機実験によってその存在が確認されている[30,47,48]。したがって、受動的動歩行を行っている脚歩行ロボットに対して、その系を構成する物理的パラメータに意図を持って変化を与えることで、所望の歩行動作や脚歩行ロボットの実形状を与えられる可能性が高い。

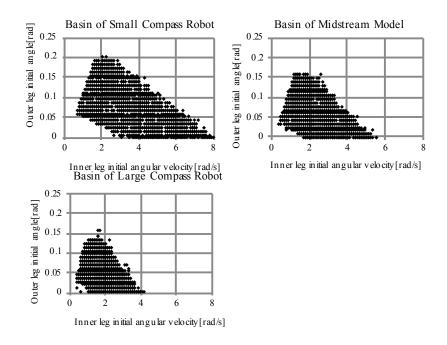
2.2.2 受動的動歩行動作の安定性を確保する物理的パラメータ選定

受動的動歩行での歩行動作の安定性は、動作中の支持脚と遊脚が入れ替わる瞬間をポアンカレ写像の断面ととらえ、その断面上の状態変数の摂動が収束するか否かで判断できる [1,49,50]. そして、コンパス型の脚歩行ロボットでの受動的動歩行では先行研究の結果より、重心位置が腰部に近いほどその動作の安定度が高く、吸引領域が広くなることが知られている [30]. これは、受動的動歩行系では脚の動作を周期的な歩行軌道へ強く引き込む性質があるため、受動的動歩行が可能な歩行開始状態(初期条件)の空間が大きくなることを意味している。その一例として、ロボットの大きさと吸引領域の広さの関係を動力学シミュレーションによって求めたものを Fig. 2.1 に示した。Fig. 2.1(a) に脚歩行ロボットの外観を,Fig. 2.1

(b) に物理計算エンジン Open Dynamics Engine を使用したシミュレーションによって実験的に求めた受動的動歩行が可能な初期条件の組み合わせを示し,使用したロボットモデルの物理的パラメータを Table 2.1 に示した.それぞれ小さいコンパスロボット,大きなコンパスロボット,その中間の大きさのコンパスロボットのものを表している.なお,このときの初期条件は $\theta_p, \theta_w, \dot{\theta}_p, \dot{\theta}_w$ の 4 つの状態変数のうち $\theta_w, \dot{\theta}_p$ をそれぞれ 0 とした拘束下で求めた値である.この結果より,腰部と脚部の質量比が大きい脚歩行ロボットでは受動的動歩行の動作の安定性が高く,かつ動作開始可能な初期条件の空間が大きいことが確認できる.以上より,受動的動歩行が可能となる確率が高いコンパス型の脚歩行ロボットを設計するには,腰部と脚部の質量比が大きな構成となる設計をすればよいことがわかる.それにより受動的動歩行が開始可能な初期条件の空間を大きくとることが可能となり,周期的な歩行動作に引き込む傾向が高いコンパス型の受動的動歩行ロボットの物理的パラメータ群を得ることが可能となる.



(a) Detail of the model of compass type passive walker



(b) Volumes of the basin of attraction the passive walker

Fig. 2.1 The relation between the physical property and the basin of the attraction of the passive walker; (a) has shown the walker has two legs, and they have an arc shape foot. The foot has attached with an offset shown on the right side. (b) has demonstrated that the basin of attraction is getting small as the walker becomes large. It means the larger walker is challenging to walk than the smaller walker.

Table 2.1 Physical parameters of the sample compass robot models used in **Fig. 2.1**; The hip and foot weight does not change even the walker getting larger.

	Small Compass	$\operatorname{MidStream}$	Large Compass
	Robot		Robot
M_h [kg]		0.05	
M_l [kg]	2.05	3	3.95
M_f [kg]		0.14	
L m	0.4	0.55	0.7

2.2.3 適応的なふるまいを利用した脚歩行口ボット設計

2.2.1 節で述べたように受動的動歩行を行う脚歩行ロボットでは、その歩行動作中に任意の物理パラメータ(脚長、質量、慣性モーメント、等)を推移させても、歩行が継続される。また 2.2.2 節で述べた内容より、受動的動歩行を行う傾向が強い脚歩行ロボット、すなわち歩行開始可能な初期条件パラメータ空間が大きく、歩行動作に引き込む傾向が強い脚歩行ロボットの実現方法も明らかになった。したがってこれらの結果を結合することで、受動的動歩行が可能な脚歩行ロボットの設計方法を提案することが可能になる。その概念図を Fig. 2.2 に、具体的な手順を以下に記す。

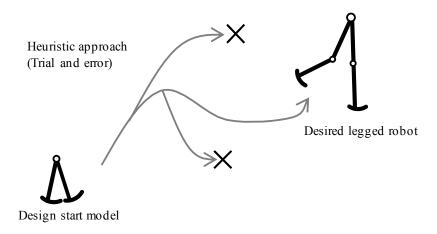


Fig. 2.2 The conceptual diagram of the proposed legged robot designing and that procedure; At the beginning, the robot has shorter legs. It grows up the parameters converge to desired ones. If the robot falls over, it means that growth trajectory does not exist. In other words, the walker cannot walk with those physical parameters. In such a case, we should change the trajectory.

- 1. 受動的動歩行を行うことが既知な脚歩行ロボットを用意し、これを設計開始モデルとする. 物理的パラメータは上述したような、歩行開始可能な初期条件が広いものが望ましい.
- 2. 設計開始モデルを使用して受動的動歩行を開始したあと、このモデルの脚長や質量等の 物理的パラメータを設計仕様に近づくよう徐々に推移させる. このとき、歩行を行なっ ているロボットは適応的なふるまいをみせ、環境が変化しても歩行を継続することが期 待される.
- 3. 歩行中に転倒してしまう場合は、物理的パラメータを歩行を行なっていたときのものに戻し、推移させる物理的パラメータやその大きさを変化させ別の推移ルートを探索する.
- 4. 脚歩行ロボットの物理的パラメータが設計仕様を満たしたとき,設計完了となる.

この手順を実行することにより、受動的動歩行が可能な脚歩行ロボット、すなわち歩行動作に適した設計仕様を満たす脚歩行ロボットが設計できることが期待される.

設計仕様となる物理的パラメータには脚長や質量・関節位置などさまざまなものが考えられ

るが、これらの物理的パラメータは2種類に分類できる.1つは設計者が指定する設計の条件となる固定された物理的パラメータで、もう1つは本設計法により設計される物理的パラメータである。例えば、「全高が500 mm、全幅が200mmで半径40 mmの円弧形の足底を持ち膝関節のある、受動的動歩行が可能な脚歩行ロボット」を設計したいとする。このとき本設計手法では、これらの固定された設計条件を満足し、歩行が可能な「質量・膝関節の位置」の設計を行うことになる。つまり、この例で設計される物理的パラメータは各部質量と膝関節の位置ということになる。

手順 d) が設計完了プロセスとなっているが,設計の条件となる固定された物理的パラメータや設計開始モデルによっては設計完了することが出来ないことも考えられる.これは解決すべき問題であるが,本章は提案手法による設計可能性の提示が目的であるため今回は考慮しないものとする.

ところで、上述の設計手順では脚歩行ロボットの物理的パラメータの設計は可能であるが、脚歩行ロボットの関節自由度に関しては考慮されていない. しかしながら、この設計方法を適用することで脚歩行ロボットの関節自由度を所望の数に設計できるならば、提案する設計方法は脚歩行ロボットの大きさや質量だけでなく関節自由度を含むロボットの形状そのものを設計できることになる. これは、1つの設計開始モデルを明らかにできたならば、歩行可能な任意の形状の脚歩行ロボットが設計可能となることを示すこととなり、脚歩行ロボットの設計問題に対して非常に大きな意味を持つことになる. これについては次章以降で検証する.

2.3 動力学シミュレーションによる検証

2.3.1 提案する設計手法による設計例

本節では 2.2.3 節で提案した設計方法の検証を行う. その検証作業では歩行動作中に脚長の伸縮や質量の増減が可能な脚歩行ロボットが必要となるが,実機を製作し実験を行うことは非常に困難であるため, Open Dynamics Engine[51] を用いた動力学シミュレーションにて検証する.

動力学シミュレーションでの検証に使用する脚歩行ロボットの設計開始モデルの物理的パラメータ・所望の物理的パラメータ・そして実際に設計された脚歩行ロボットの物理的パラメータの詳細を **Table 2.2** に示した. 設計開始モデルは腰部と脚部の質量比が大きくなっており、

設計目標モデルは脚長が伸びた分だけ脚質量が増えるため、その質量比が小さくなる。表中 Desired legged robot のうち、Adjustable になっている項目を設計した。それ以外の物理的パラメータは固定された設計条件として、設計者が意図的に指定しており、設計されるロボットは必ずこの設計条件を満たす必要がある。また、設計目標モデルは膝関節の自由度が増えており、系全体の自由度は2自由度から4自由度に増加する。このとき、設計可能な物理的パラメータである全質量が20kg以下という設計目標にしている。この条件を満たすように大腿と下腿の質量が設計される。

この設計開始モデルから設計完了モデルまでの、物理的パラメータの推移と関節自由度の増加を、2.2.3 節で述べた手順にしたがって実施する歩行路面の傾斜角度は約 0.0436 rad (2.5 deg) とする。その成功時の動作の様子を繋ぎあわせた図を Fig. 2.3 に示す。図中の左端が設計開始モデルの外観を示しており、右方向へ順に設計による遷移中の動作モデル、所望の寸法に遷移終了した動作モデル、最後に自由度が増加した動作モデルとなっている。

Table 2.2 Physical parameters of the walker models in the experiment; In the beginning, the walker is small. The adjustable parameter of the walker changes while walking. These parameters should satisfy the given design goals. The adjustable parameter is designed while walking. In this case, we finally designed parameters shown in the right of the table.

	Design	Desired	Designed
	start	legged	legged
	model	robot	robot
Width [mm]	800		
Height [mm]	400	700	700
Arc foot radius [mm]	45		
Leg length [mm]	300	600	600
Thigh length [mm]	-	300	300
Shank length [mm]	-	300	300
Total mass [kg]	8.81	Adjustable	16.4
Leg mass [kg]	8.20	Adjustable	15.8
Thigh mass [kg]	-	Adjustable	13.2
Shank mass [kg]	-	Adjustable	2.60
Foot mass [kg]	0.56		
Hip mass [kg]	0.05		
D.O.F.	2	4	4

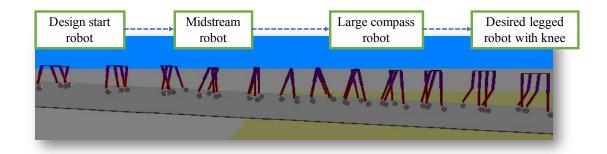


Fig. 2.3 The conceptual diagram of the proposed designing procedure; it has shown the behavior of the robot during the transition. The walker changes small to large. After, it produces knee joints.

次に本設計例での物理的パラメータの推移方法について述べる。本試行では、歩行開始 10 歩後から 10 回のパラメータ推移を経て設計を行った。この時、大腿・下腿の長さ及び質量は 2 歩に 1 度接地の瞬間に増加させ、直前の状態変数を再現しシミュレーションを行っている。このとき、各パラメータの 1 度あたりの変化量はそれぞれ一定とした。そして転倒するたびにスタートモデルに戻し、質量の推移値を変更して再び歩行を開始する。なお、変化 1 回あたりの変化量は一定値としているため、脚長・質量は線形な単調増加を行う。つまり転倒して次の試行に移るまで変化量は変更されず常に一定である。転倒後、次の試行時の変化量の指定は手動で行っている。

本試行では推移の回数を 10 回としているため、1 度あたりの変化量とその回数からロボットの最終的な物理的パラメータは一意に決まり、一見すると単純な総当り的な設計法に見える。これは推移時にロボットの各パラメータを単調増加させていることに起因しており、変化量はより歩きやすい形状へ推移できるようなものを用いることが望ましく検討の余地がある。しかしながら、本章では本設計手法の実現可能性の検証が主目的であるため、変化量の決定法については議論せず単純な変化量として線形な単調増加を採用した。

膝関節の生成による関節自由度の増加について述べる.歩行開始時には大腿部と下腿部の中間点,人間の脚で言うと膝に当たる部分を非常に硬いトルクばねで固定している.上述の物理的パラメータの推移が完了し大腿・下腿の質量の設計が完了したあと,膝関節の生成を開始する.具体的には膝に取り付けられたトルクばねのばね定数を徐々に弱くしていく.この関節のばね定数を2歩に1度小さくしていき,最終的にフリーな膝関節を生成する.このとき,膝折

れによる転倒防止のため、可動範囲は -1~90 deg に拘束する.

以上の方法で設計を行った結果, **Table 2.2** の Designed legged robot に示したように所望のロボットの設計を行うことに成功した. 提案する設計手法を適用することで, 受動的動歩行が可能でかつ所望の物理的パラメータを有する脚歩行ロボットが得られ,以上より提案する設計手法が実現可能であることが検証できた.

2.3.2 設計結果の検証

前節で行った検証より、受動的動歩行が可能な脚歩行ロボットの物理的パラメータ群と周囲環境、初期条件を求めることができた.これは、発見的な方法ではあるが、脚歩行ロボットの寸法、形状、質量、慣性モーメント等を決定する作業であることより、工学的な観点から考えると物理的な設計作業そのものである.この設計作業の結果、「脚歩行に適した構造・構成となっている脚歩行ロボットハードウェア」を設計できたのかどうか、検証作業を試みる.

検証は 2.3.1 節で設計した脚歩行ロボットモデルの足首部にトルクを発生可能な能動関節を配置したシミュレーションモデルを使用し、設計した脚歩行ロボットモデルに能動的に足首トルクを印加することで脚歩行が可能かどうかを確認することで行う.

検証作業の概要を Fig. 2.4 に示す. 足首に印加するトルク量とその印加方法は, 3.2.3 節の方法を意識して決定する. 受動的動歩行時の歩行路面の傾斜角度を少しずつ小さくしていくと, 角度の減少にともなって脚歩行ロボットの歩幅は減少する. その歩幅の減少を補填しつつ歩行動作を継続するように足首トルクの印加量を少しずつ増加させていくと, 傾斜角度のない歩行路面上での歩行動作が可能な足首トルク量を決定できる. この方法で決定した足首トルク量を設計した脚歩行ロボットに印加し, 傾斜が無い歩行路面での歩行可能性を検証する

足首トルクは足先が接地して支持脚となってから離地するまでの間,足部が全体を蹴り出す力を発生するように印加される。傾斜角度が小さくなることで歩幅が小さくなると,その減少に伴ってトルクを増加させていく。i 歩目に発生させる蹴り出しトルク τ_i は以下の Eq. (2.1) で与えられる。

$$\tau_{i} = \tau_{i-1} + \operatorname{sgn}(\theta_{d} - \theta_{i}) \Delta \tau$$

$$\tau_{0} = 0$$

$$\operatorname{sgn}(\theta_{d} - \theta_{i}) = \begin{cases} -1 & (\theta_{d} < \theta_{i}) \\ 0 & (\theta_{d} \simeq \theta_{i}) \\ 1 & (\theta_{d} > \theta_{i}) \end{cases}$$

$$(2.1)$$

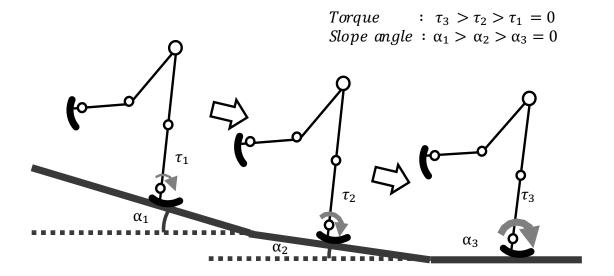


Fig. 2.4 Quasi-passive walking phase; the slope angle is decreasing when the walker growing up has done. The walker stride is decreasing as the slope angle decreasing. Then the ankle torque is increased to keep the walker's stride.

トルク増減の計算は1歩ごとに行われ、直前の1歩が目標の歩幅よりも小さければ蹴り出しトルクを大きく、逆に歩幅が大きすぎる場合は蹴り出しトルクを小さくする. 歩行路面が0 rad になった時点でトルクの増減を停止させた.

ここで θ_d は目標とする歩幅, θ_i は i 番目の接地時の歩幅, $\Delta \tau$ はトルクの調整量を示している。本検証では θ_d を約 0.0436 $\mathrm{rad}(2.5~\mathrm{deg})$ の路面で歩行を行っているときの 10 歩の平均値を採用し, $\Delta \tau$ は $0.01~\mathrm{Nm}$ とした。また,トルクの加算値が 0 となる範囲である不感帯 $\theta_d \simeq \theta_i$ については $\theta_d \pm 0.0261~\mathrm{rad}(1.5~\mathrm{deg})$ とした。坂道角度が大きすぎるとうまく

蹴り出しトルクを伝えられないまま印加トルクが $\mathbf{Eq.}$ (2.1) によって増大していく傾向が見られたため、蹴り出しトルクの計算・適用を開始する坂道角度は約 $0.0349 \operatorname{rad}(2.0 \operatorname{deg})$ とした. この検証を、トルクを印加せずに実施したときとトルクを印加したときの歩幅と歩行路面の坂道角度を $\mathbf{Fig.}$ 2.5 に示す。また、トルクを印加した際の印加トルクと坂道角度の関係を $\mathbf{Fig.}$ 2.6 に示す。

Fig. 2.5 より、足首トルクを印加しない場合は坂道角度が 0 rad に達する前に転倒してしまっているが、足首トルクを印加したシミュレーションでは坂道角度が 0 rad の路面、つまり平面での歩行に成功している。また、 **Fig. 2.6** を見るとそのときの印加トルクは坂道角度の減少に伴って増加していることが確認できる。

一般に、脚歩行ロボットの歩行制御には精密な関節角度制御や姿勢制御を行う必要があるが、離地する方の脚の蹴り出しトルクを「歩幅の大きさを一定にする」というごく単純な指標を規範に調整するという、非常に単純な制御方法でリミットサイクル歩行を実現している。これは設計された脚歩行ロボットが定性的にではあるが、歩きやすいハードウェアになっていることを示している。それはすなわち、提案された手法で設計された脚歩行ロボットが「脚歩行に適した構造・構成となっている脚歩行ロボットハードウェア」となっていることを示唆している。

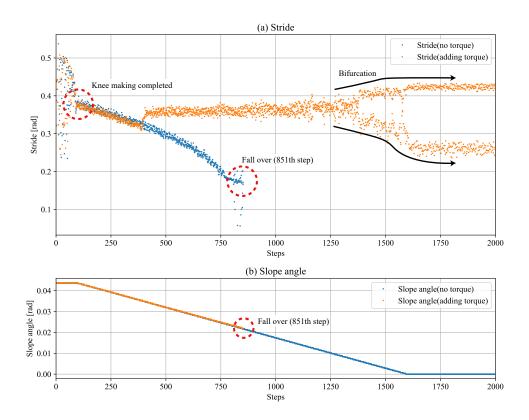


Fig. 2.5 Comparison between the two cases: with the torque and without. When not applying torque, this robot falls over at around 0.025 rad. On the other hand, by input ankle torque for putting back the stride, this robot walking even at 0.0 rad flat surface.

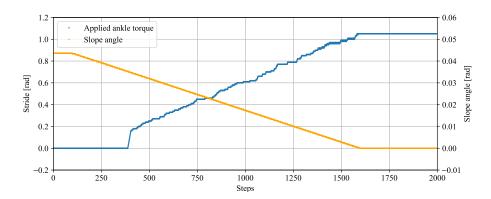


Fig. 2.6 The relation between ankle torque and slope angle; the torque increase as the slope angle decreasing. It has shown the walker walked on a flat surface in finally.

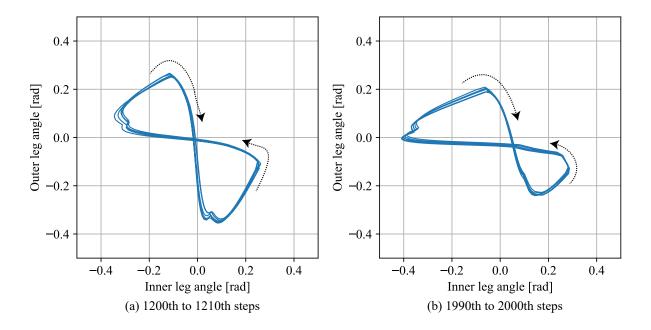


Fig. 2.7 Leg angle trajectory two conditions; in the 1200th to 1210th step, the leg angles show symmetry trajectory about both the outer and inner legs. In the 1990th to 2000th step, when walking on the plane surface, the trajectory is distorted. In this case, this result shows that the robot gait has two strides.

しかしながら、**Fig. 2.5**、**Fig. 2.7** を見るとわかるように 0.0115 rad (0.66 deg) の路面で歩行を行なっている際には歩幅は 1 つの値に収束している (**Fig. 2.7**(a)) のに対して 0 rad の路面で歩行を行なっているときには 2 種の歩幅 (**Fig. 2.7**(b)) が出ていることがわかる.脚歩行ロボットの設計ということを考えると歩幅の周期についても自在な設計ができる必要があるだろう.

2.3.3 設計結果に関する検討

受動的動歩行では系の状態変数に適切な初期条件を与え、周期軌道に引き込む必要がある. この周期軌道に引き込むことが可能な初期条件を発見することは一般的に困難であり、受動的 動歩行の実験やシミュレーションを行う際には初期条件を試行錯誤で探索することに時間を費 やすことになる.特に、膝関節を設けるなどした、より自由度の高いロボットモデルでは取り 得る初期条件の組み合わせが飛躍的に増加するためこの問題は顕著に現れる.

それに対して本研究で提案する設計手法では、受動的動歩行の適応的なふるまいを使用することにより、受動的動歩行が可能な設計開始モデルを1つ以上持つことで、所望の環境と物理的パラメータの組み合わせを有する脚歩行ロボットが受動的動歩行を行う状態へ推移させることが可能となる。これは、受動的動歩行の力学系を構成する環境と物理的パラメータが変化することで、元の系が異なる力学系へ連続的に推移する性質を有することを示している。すなわち、異なる力学系間で条件が整った場合に、それらの力学系が連結されるという性質の存在を示している。この性質を陽に利用することが本研究で提案する設計手法となる。

また、受動的動歩行中の任意のタイミングでの状態変数の値が、どの瞬間の値を切り出して も歩行開始可能な初期条件となりえることは明らかである。したがって受動的動歩行が可能な 初期条件は、連続的に遷移可能な条件の範囲において必ず得られることがわかる。よって、す でに適切な初期条件が得られている系から、初期条件が未知の系へ推移させることで実験時に 脚歩行ロボットに与えるべき初期条件を得ることができる。実際の操作時には、この歩行開始 可能な初期条件の組の中から、操作者が脚歩行ロボットに与えやすい状態変数の組を選ぶこと になる。

さらに,本研究で提案している設計手法を使用することにより,受動的動歩行,またはそれ と同様の周期解を有する非線形力学系の解の探索問題に対して単純な設計開始モデルさえ用 意できれば、発見的ではあるが明確に1つ以上の解を与えることが可能となることが期待される.

2.3.1 節の結果より、受動的動歩行を行う脚歩行ロボットの関節自由度の数を変化させることが可能であることもわかった。ここから、動作する力学系の条件を整えることができるならば、上述した力学系間の連結部を推移することにより、様々な形状や自由度構成を有する脚歩行ロボットの受動的動歩行が可能となることがわかる。例えば、2 脚ではなく多脚での受動的動歩行が可能な脚歩行ロボットや、腰部よりも上部の自由度を有する、すなわち上半身を持つ脚歩行ロボットの設計への拡張、さらには通常の考えでは思いもよらない形状への変化も期待できる。

ただしこの設計手法は,発見的に得られた結果の応用であるため,今後はこの手法の数理的な表現方法を構築する必要がある.

2.4 おわりに

本章では、脚歩行ロボットのハードウェア設計に関する概念と、その実現のために受動的動 歩行の性質を利用した設計手法について述べた.

従前の受動的動歩行が可能な脚歩行ロボットの設計は試行錯誤による発見的な手法が多く、力学系としてみたときの意味も意識されることは少なかった。本設計手法も試行錯誤的ではあるが、これまでの試行錯誤的な設計とは明確な差がある。これまでの設計法ではまず脚歩行ロボットの物理的パラメータを過去の経験などから決定し、実験を繰り返し、操作者の感覚で物理的パラメータを変更していくことで歩行可能なパラメータや初期条件の探索を行うことが多かった。それに対して本章では力学系の連結を意識しロボットモデルを徐々に推移させることで「確実に受動的動歩行を行う脚歩行ロボット」の物理的パラメータを得ることが可能であることが確認できた。この方法では、得られたロボットの歩行開始可能な初期条件も同時に得られていることから、従来の試行錯誤的な設計方法に対して優位であると言える。そして、この結果は受動的動歩行が持つ適応的なふるまいが脚歩行ロボットの設計において強力な設計ツールとなることを意味している。

また,本章で扱ったモデルについて力学系の連続性が示唆されたが,設計開始モデルによって到達する最終モデルに差異が生じる可能性があることや設計中に転倒した回数が重要な指標

2.4 おわりに **41**

となり得る. 現時点ではこの点について詳細に論ずることは難しいが, 設計指標として非常に重要な意味を持つことは間違いないだろう.

ただし、本手法に用いた適応的なふるまいについては数理的な検証が必要であり、また、本 設計手法で設計を行なったロボットの実機製作による設計検証が必要となることは間違いな く、これは今後の課題である.

第3章

受動的動歩行の適応的なふるまいを 利用した所望の制御性能の漸近的 実現

3.1 はじめに

受動的動歩行は脚歩行ロボットのハードウェアとしての応用や、移動メカニズムの解明などが期待されているものの、そもそも安定に受動的動歩行するロボットハードウェアを設計することは難しく、その設計方法に言及している文献は多くない。制御によって安定に歩行させる手法も提案されているものの [32, 14, 33]、「歩行しやすいハードウェア」として受動的動歩行を見た場合、そもそもの骨組みが歩行しやすいものになっていることが望ましい。この方法は、歩行を行いながらロボットの持つハードウェアパラメータを徐々に変化させることで設計を行う方法であった。受動的動歩行の吸引領域は非常に狭いことが知られており [52, 53]、特に膝関節を持つなどして自由度が増えると途端に歩行させることが難しくなる [31]。そのため設計を行った脚歩行ロボットハードウェアが歩行可能かどうかを検証することすら非常に困難であるが、提案手法では歩行を行いながら設計を行うため、設計が完了した脚歩行ロボットは歩行可能である保証がある。

第2章では動力学シミュレーション上において小さなコンパス型脚歩行ロボットから大きな

膝付き脚歩行ロボットの設計を行った.これは、**Fig. 1.4** におけるフィードバック部を切断した「どのタイミングでどのくらいの変化が起きるか」を予め決定しておくフィードフォワード的な方法になっていた.これは、歩行中における自由度変化に対する適応的なふるまいの発現、及び提案設計手法の実現可能性の検証を行うため、シンプルな構造にするためであった.そのため、設計目標についても「受動的動歩行可能な脚歩行ロボットハードウェア」となっており、その歩行性能については深く掘り下げることはしなかった.

本章では **Fig. 1.4** のようにフィードバックを用いることで、所望の制御性能を持った、つまり所望の変数的パラメータで歩行が可能な受動的動歩行口ボットハードウェアの設計手法を提案する.

本手法のパラメータについて再掲する.脚長・脚質量・関節の摩擦・坂道角度などのパラメータを「物理的パラメータ」,脚角度・歩幅・歩行周期などの歩行の結果得られる出力をパラメータとみなして「変数的パラメータ」として定義する.変数的パラメータは物理的パラメータによって変化するため予め決定することは難しく,一般には制御を加えることで達成される.第2章のようなフィードフォワード的な設計であると,物理的パラメータについては設計が可能であるが変数的パラメータに関しては歩行の結果得られるものであるため,設計することは困難である.

本設計手法は、上述の「物理的パラメータ」を変化させることで「変数的パラメータ」が変化することを利用する。具体的には歩行中に変数的パラメータを観測し、その観測結果に基づいて物理的パラメータを変化させることで結果的に変数的パラメータを設計する手法である。このとき、変化させる物理的パラメータの選び方とその変化量によって設計したい変数的パラメータの変化量、つまり感度が変わる。例えば脚長をほんの少し変化させるだけで歩幅は大きく変わるが、脚角度ではほとんど変化が起きないという様なことである(これは一例であり一般論ではない)。設計における「物理的パラメータ」と「変数的パラメータ」の組み合わせは、「脚長・脚質量の両方を変化させて歩幅を設計する」、「脚長・脚質量・腰質量を変化させて歩幅と歩行速度の両方を設計する」など非常に多く考えられるが、本章では簡単のため1対1の設計について考える。

3.2 提案する設計手法

Fig. 1.4 に提案する設計手法を図示した.システムは物理的パラメータと変数的パラメータを包含しており,変数的パラメータは物理的パラメータによって決定される.一般的な制御系ではこの偏差 e をもとにコントローラを通して制御入力 u_g を与えアクチュエータを駆動することで出力を調整し,制御目標を実現する.提案手法ではアクチュエータへ入力を与える代わりに,物理的パラメータに変化量 Δx を与えることで間接的に変数的パラメータの出力値 y を調整し,システム自体が持つ制御性能を調整することで設計を行う.

本章では 2 自由度のコンパス型受動的動歩行口ボットを対象とし,目標とする変数的パラメータを実現するような制御性能を有する受動的動歩行口ボットの設計手法を提案する.最初に設計の起点とする受動的動歩行可能なハードウェアを用意する必要があるが,ここでは第 2 章の方法を用いて所望の物理的パラメータを持ったものを用意するところから始める.もっともシンプルな受動的動歩行器はアクチュエータを持たないため,**Fig. 1.4** 中の C_g は存在せず,変数的パラメータを変化させるためには物理的パラメータを変化させる必要がある.

設計は以下の手順で行う.

- 1. 受動的動歩行口ボットの歩行を開始させる
- 2. 変数的パラメータの出力値と設計目標値を比較し、歩行を行いながら対象の物理的パラメータに変化を与える
- 3. 与えた変化に対する変数的パラメータの変化をフィードバックし、変化量の調整を行う

これを繰り返すことで徐々に変数的パラメータを目標値に近づけていく.ここで,制御対象に与える物理的パラメータの変化として脚歩行ロボットの脚長や脚質量,脚の重心位置の変化や関節数の増減などが挙げられる.このとき受動的動歩行ロボットは歩行を行いながら自身を変化させることになるが,前述の適応的なふるまいによって歩行を継続することが期待される.

設計したい変数的パラメータの目標値 y_d と出力値 y との偏差を e と置く.変化させる物理的パラメータを x とし,変化を生じさせる周期ごとに x の一度あたりの変化量 Δx の計算を行う.今回は歩行を取り扱うため,n 歩に 1 回対象を変化させる,といった形で行う.本章で

はこの n 歩を計算周期と呼ぶ. k 回目の計算において、変数的パラメータの出力値を y_k 、目標値を y_{dk} とし、 y_{dk} と y_k の偏差を e_k とすると、その時の脚歩行ロボットの物理的パラメータ x_k は以下の式で与えられる. ただし、 x_0 は物理的パラメータ x の初期値である.

$$x_k = \sum \Delta x_k + x_0 \tag{3.1}$$

$$\Delta x_k = K_P |e_k| \operatorname{sgn}(\Delta x_{k-1}) \operatorname{sgn}(|e_{k-1}| - |e_k|)$$
(3.2)

$$e_k = y_{dk} - y_k \tag{3.3}$$

つまり対象の脚歩行ロボットの物理的パラメータxはn歩ごとに変化し,その変化量 Δx は変数的パラメータをフィードバックすることで得られる目標値 y_d との偏差 e_k によって決定されることになる.このとき,変化させる脚歩行ロボットの物理的パラメータと変数的パラメータとの間は非線形な関係を持つことが予想される.従って本章では以下のように探索的に物理的パラメータの変化量を決定する.まず,物理的パラメータの変化を与え,偏差が増加したのか減少したのかを確認して次の変化時の物理的パラメータの増減を決定する.よって, $|e_k|>|e_{k-1}|$ となった場合,物理的パラメータの変化方向を逆転させる.このとき例えば,k-1回目で増加だったのなら,k回目では減少ということになる.

3.3 動力学シミュレーションによる設計

提案する設計手法を動力学エンジン Open Dynamics Engine (ODE) [51] を利用し検証を 行った. 本章では

- 1. 物理的パラメータである「脚長」の変化によって変数的パラメータである「脚角度」を設計する.
- 2. 物理的パラメータである「脚の重心位置」の変化によって変数的パラメータである「歩幅」を設計する.

の2種類を考える. なお、本章では脚角度とは2脚間のなす角度の大きさを指し、歩幅とは1歩ごとの腰位置のX-Y平面上における移動量を指す. このとき、X-Y平面は路面と平行にとるものとし、ロボットの初期姿勢における進行方向をX軸($\mathbf{Fig.~3.1}$ 参照)、これに直交す

る紙面奥方向へ向かう軸を Y 軸とする. なお、登場するロボットの関節は摩擦が働かないフリーな関節となっている.

3.3.1 脚長変化を用いた設計

歩行中に脚長(物理的パラメータ)を変化させることで所望の脚角度(変数的パラメータ)で歩行可能な脚歩行ロボットの設計を行う.

■使用するロボットモデル 使用するロボットモデルを Fig.~3.1 に、設計開始時の物理的パラメータを Table~3.1 に示す。円弧形状の足底を取り付けた 2 つのリンクを回転関節で拘束しており、移動は進行方向と上下のみに制限されるため歩行は 2 次元平面上に拘束される。ODE には円弧形状が用意されていないため、円弧形状は箱型のオブジェクトを複数個繋ぎ合わせている。脚長は時変であり歩行中に変化させることができる。歩行時の脚角度の出力値と目標値との比較を行い、脚長へとフィードバックすることで脚角度の設計を行う。脚角度はFig.~3.1 中の θ である。脚長の変化は、遊脚が着地して支持脚となり次の遊脚が離地するタイミングで与え、支持脚の接地点を支点に増減させた。

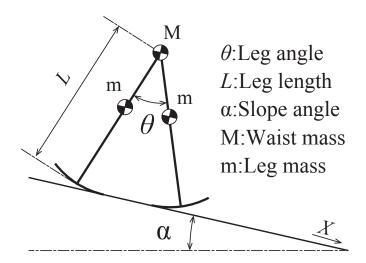


Fig. 3.1 A model of the passive dynamic walker; the walker has 2 D.O.F. and has arc foot.

■設計例 物理的パラメータの変化量 Δx の計算周期 n は 11 歩,ゲイン K_P は 0.7 とし,脚角度の出力値 y には最新 5 歩の平均値を用いた.つまり,k 回目の時の偏差 e_k は目標値 y_a と最新 5 歩の平均値 y_a との差になる.設計シミュレーション時間は 300 秒間,歩行する環境は 0.5 deg の坂道とし,目標値とする脚角度は 0.7 rad である.ある程度歩容が収束してからの変化を行うために脚長変化の適用は 100 歩時点からとした.シミュレーションの結果得られた歩行時の脚角度の出力値と目標値,脚長の変化を $\mathbf{Fig.~3.2}$ に示した.歩行を行いながら脚長が変化し,それに伴って脚角度が変化していることが確認できる.最終 100 歩分の絶対誤差率の平均値は 0.25 % であり,最終 100 歩分の脚長の平均値である 0.790 m を設計された脚長とし,設計が完了した.

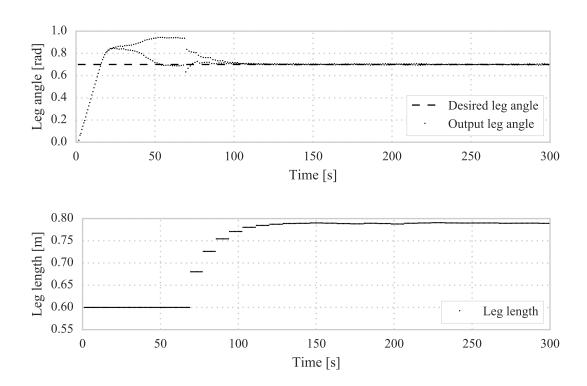


Fig. 3.2 Leg length and leg angle of the walker in a design example; the leg length of the walker is changed while walking to achieve the desired leg angle. The leg angle converged to the desired ones. We got a walker that walks with the desired leg angle. In this case, K_P is 0.7.

次に、目標値が 200 s おきにステップ状に変化する条件のもとで設計シミュレーションを行った。設計シミュレーションに関する条件は全て先述のものと同様である。歩行時の脚角度の出力値と目標値の変化を **Fig. 3.3** に示した。

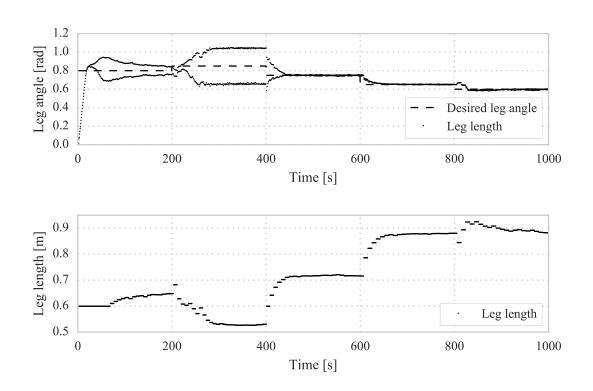


Fig. 3.3 Result of a plant changing control applying the passive dynamic walker; in this design experiment, we design the leg angle while walking via changing leg length. When trying the first two desired values, the gait of the walker had shown bifurcation. About the last three desired leg angles, the leg angle converged without bifurcation. In this case, $K_P = 0.7$.

Fig. 3.3 に示すように歩行を行いながら脚長を変化させ、所望の脚角度を実現する脚長を持つロボットへと脚長変化を行っていることがわかる。目標値が 0.8 rad, 0.85 rad の時には 2 周期歩行が出るなどして目標値に収束してはいないものの、0.75 rad, 0.65 rad, 0.6 rad の時には目標値に近い出力値が得られている。

それぞれの最終 100 歩の絶対誤差率と脚長の平均値,及び前節でのそれをまとめて表

Table 3.2 に示した.以上により,ある坂道において所望の脚角度(変数的パラメータ)を実現するような脚歩行ロボットの物理的パラメータを連続的に決定し,所望の変数的パラメータを持つ受動的動歩行ロボットを設計することが出来た.

Table 3.1 Initial parameters of the passive dynamic walker with the growth of leg length; it only legs length changes. It is unchangeable that any other physical parameters.

Parameter	Value	
Leg length	0.60	m
Center of mass(from the floor)	0.40	m
Ark foot radius	0.55	m
Leg mass	0.20	kg
Waist mass	0.10	kg
Total mass	0.50	kg

Table 3.2 Designed leg lengths of the walker and error ratios of between leg angle desired and designed; almost error rates are below 1.0 %. In the case of 0.8 and 0.85, the rates relatively large because the walker has two periodic gaits.

Desired leg angle [rad]	Leg length [m]	Error ratio [%]
0.60	0.881	0.67
0.65	0.882	0.23
0.70	0.790	0.25
0.75	0.715	0.49
0.80	0.651	4.4
0.85	0.641	9.4

■設計した脚歩行ロボットの歩行検証 上記の試行で得られた物理的パラメータを用いて脚歩行ロボットを設計し、実際に設計の目標値を満たしているかの検証を行う.対象とするのは、Table 3.2 中にある変数的パラメータである脚角度が 0.60 rad の脚歩行ロボットである.表

中通りの脚長で歩行シミュレーションを行い、設計時と同様の坂道角度 $0.5 \deg$ で歩行実験を行った.その結果得られた歩行中の脚角度の出力値の変化を $\mathbf{Fig.~3.4}$ に示した.このとき、最終 100 歩の脚角度の平均値は約 0.60 rad となり、同じく最終 100 歩の絶対誤差率の平均値は 0.5% となった.以上より、動力学シミュレーション内において所望の脚角度(変数的パラメータ)を実現する脚歩行口ボットハードウェアを設計できていることが確認できた.

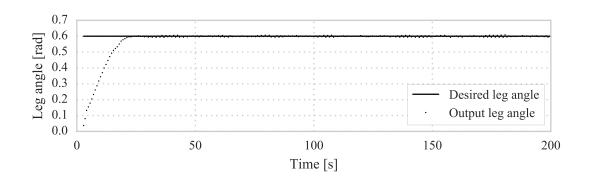


Fig. 3.4 One of the verification of the result of designing; the desired leg angle is 0.6 deg. It has shown the walker walking with an almost desired leg angle.

3.3.2 重心位置変化を用いた設計

次に,重心位置の変化を用いた設計を行った.重心位置の変化はおもりを可動させることで 実現でき,次章で行う実機実験での実現を考慮しこれを採用した.

■使用するロボットモデル 使用するロボットモデルの外観を Fig. 3.5 に、物理的パラメータを Table 3.3 に示した。おもりは足底部を除いた脚部の中心に取り付けられており、そこを中心に脚に沿って上下に移動を行うことで重心位置を変化させる。物理的パラメータである重心位置が変化するとロボットはその歩容を変化させる。その際に歩幅の目標値と出力値を比較し、おもり位置をフィードバック制御することで歩幅の設計を行う。つまり、陽に変化させる物理的パラメータはおもり位置である。本設計例では実機での実現を想定しているため、足底の衝突回避のため3次元の歩行を考え、足底を球面形状とした。なお、おもりの可動方向について足底方向を負の方向とする。

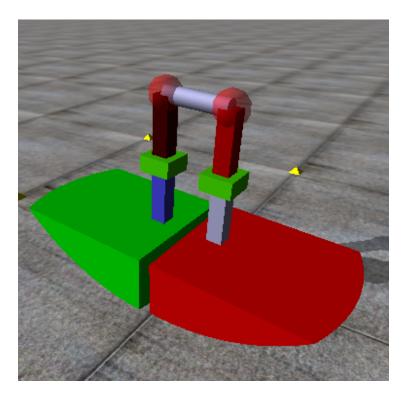


Fig. 3.5 Weights loaded walker; the weight attaches to each leg. The weights can adjust its position by motors and ball-screws. Therefore, the CoM of the walker moves as weights moving. Each foot has the shape of part of a sphere.

Table 3.3 Parameters of the walker with changing the CoM by weights moving

Value	
0.6	m
0.7	m
0.2	m
0.45	m
0.2	kg
0.3	kg
$-0.156 \sim 0.156$	m
0.3	kg
1.3	kg
	$0.6 \\ 0.7 \\ 0.2 \\ 0.45 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ -0.156 \sim 0.156 \\ 0.3$

■設計例 本試行では先述のとおり、1 歩ごとの腰位置の X-Y 平面上における移動量を歩幅として定義してこれを注目する変数的パラメータとし、所望の変数的パラメータを実現するおもり位置(物理的パラメータ)を決定することを目標とした。 K_P は 1.0 とした。 坂道角度は 1.2 deg,歩幅の目標値は 0 から 500 秒までが 0.10 m,500 秒以降は 0.05 m とし,1000 秒までの試行とした。物理的パラメータの変化量 Δx の計算周期 n は 5 歩とし,変数的パラメータである歩幅の出力値 y は最新 3 歩の平均値を用いた。 設計シミュレーションの結果,得られた歩幅の目標値・出力値の変化とおもり位置の変化を $\mathbf{Fig.}$ $\mathbf{3.6}$ に示した。 目標値に一致するまでは至らないものの,概ね追従している様子が確認できる。 このとき,それぞれの目標値における最終 100 歩の誤差率の平均がそれぞれ 18.6 %, 8.66 % だった。

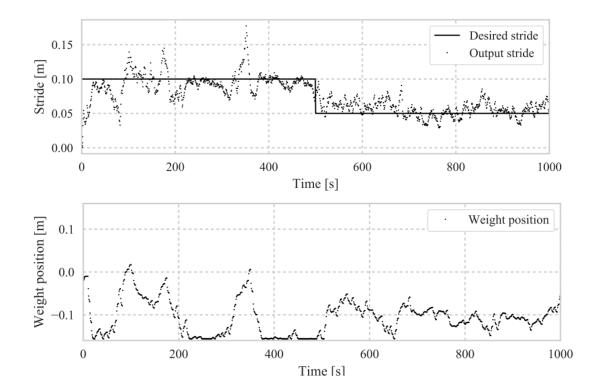


Fig. 3.6 Strides and weight position of the Passive Dynamic Walker applying CoM position control; the first desired stride is 0.09 m, when over 500 sec, the desire has changed to 0.05 m. $(K_P = 1.0)$

ここで、より良い設計を行うために偏差の積分値を変化量に加え (1),(2) 式の設計則を以下 のように変更する.

$$x_k = \sum \Delta x_k + x_0 \tag{3.4}$$

$$x_{k} = \sum \Delta x_{k} + x_{0}$$

$$\Delta x_{k} = (K_{P}e_{k} + K_{I} \sum_{k=1}^{k} e_{k}) \operatorname{sgn}(\Delta x_{k-1}) \operatorname{sgn}(|e_{k-1}| - |e_{k}|)$$
(3.4)
$$(3.5)$$

この条件のもとで再度設計を行った. なお, K_P は 0.5, K_I は 0.2 としたが, これ以外の設 計条件は全て先ほどと同様である.この試行における歩幅の出力値・目標値の変化とおもり 位置の変化を Fig. 3.7 に示した. それぞれの目標値における最終 100 歩の誤差率の平均がそ

れぞれ 7.76~%, 3.58~% と, K_P ゲインのみの場合と比してより誤差が少なくなったことがわかる.

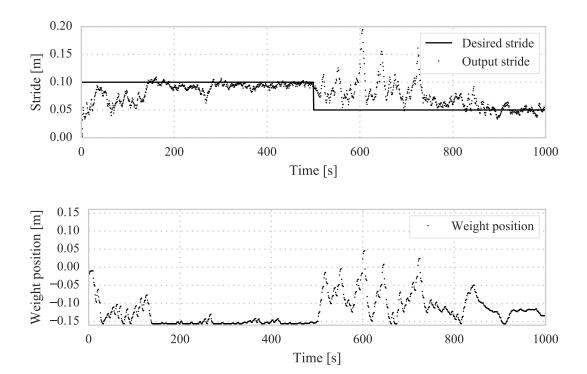


Fig. 3.7 Stride and weight position of the walker that is applying weights position control; the first desired stride is 0.10 m, and when over 500 sec, it has changed to 0.05 m. ($K_P = 0.5, K_I = 0.2$)

それぞれの目標値における後半 100 歩の絶対誤差率とおもり位置の平均値を **Table 3.4** に示した. このようにして得られた位置でおもりを固定すれば, 脚歩行ロボットの設計は完了する.

Table 3.4 Designed weight positions and error ratios

Desired stride	Weight position	Error ratio
0.05 m	-0.121 m	7.76 %
0.10 m	-0.155 m	3.58 %

■設計した脚歩行ロボットの歩行検証 得られた物理的パラメータを用いて脚歩行ロボットを設計,歩行させて実際に設計の目標値を満たしているか検証を行った.対象とするのは, Table 3.4 中にある 0.05 m での歩行を行う脚歩行ロボットである. おもりの位置を表中の値で固定して歩行シミュレーションを行った. その結果得られた歩行中の歩幅の目標値と,出力値の変化を Fig. 3.8 に示した. このとき,最終 100 歩の目標値である 0.05 m と歩幅との絶対誤差率の平均は約 13.8 % となり,目標値に近い歩幅(変数的パラメータ)で歩行する脚歩行ロボットが設計できていることを確認した.

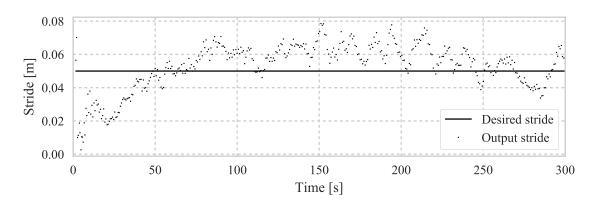


Fig. 3.8 Result of an experiment for verifying designed walker; in this experiment, weight position was fixed. The error ratio that is between the desired one and output is 13.6%.

3.4 考察

3.3.2 節において,1 歩ごとの歩幅にばらつきが出ているがこれは進行方向である X 方向以外,すなわち Y 方向にも進んでいることが原因として考えられる.例えば進行方向に対して $90 \deg$ 逸れると歩行を行うことすら出来なくなるように,進行方向によっても歩幅は変化する.これは,3 次元の歩行器になっているためであり,進行方向は初期条件や接地条件などに 左右されるためである.

ところで、これらの設計例において目標値を時間変化させることを行っている. Fig. 3.2, Fig. 3.6, Fig. 3.7 を見ると、設計中に目標値が変化してもその目標値に適した物理

3.5 結言 57

的パラメータへ変化していることからもフィードバックを導入した効果が確認できる.この結果からある時間の物理的パラメータを抜き出して固定すれば設計は完了となるが,この過程全体を俯瞰してみるとこれは脚歩行ロボットの制御を行っていることに他ならない.つまり,設計対象の物理的パラメータ変化を入力として与えることで変数的パラメータを制御しようとしているようにみえ,目標値が時間的に変化する場合は設計よりもむしろ制御として見る方が自然であろう.特に,重心位置変化モデルは現実での実装が比較的容易であり,このとき,おもりを固定せずに動作するようにしておけば,受動的特性をそのままにロボットの歩幅や脚角度などの制御が可能になるであろう.これについては第4章にて議論を行う.このように「設計」ではなく「制御」として本手法をとらえた時,制御対象を変化させることで制御を行うシステムになっていると捉えられる.一方で,適応制御では一般にフィードバックによってコントローラを変化させることで制御を行っており,提案手法ではこのフィードバックが還る場所が「コントローラ」から「制御対象」に変化しているように見える.このように、制御として見た場合の議論については今後検討すべき重要なポイントである.

3.5 結言

本章ではロボット自体が持つ物理的パラメータにフィードバックをかけて変化させることで変数的パラメータが目標値を実現するような設計手法を提案し、確かに所望の変数的パラメータを有するロボットハードウェアを設計できることを確認した。従来研究ではフィードフォワードな設計であったため脚長や脚質量などの物理的パラメータを設計できても、歩行の結果得られるような直接操作の難しい値の設計は出来なかったが、本章では所望の歩幅や脚角度といった直接の設計が困難な設計仕様を「変数的パラメータ」として捉え、フィードバック要素を加えることで仕様を満たした設計を行った。

本設計手法が制御として見えることを述べたが、そうして捉えた時に重要になることの1つは実現可能性である。たとえば歩行中に質量の調節を行うことは非常に難しい。よって、本章では実現可能性が高い重心位置の調整を用いた。ただし緒言でも述べたように、設計、もしくは制御したい出力によって、変化させるべき物理的パラメータが変わるため、対象のどの物理的パラメータを可調整とするのかをどのようにして決定するか考慮する必要がある。制御として見た時、通常の制御では入力信号・出力信号ともに変数であることが一般的であるが本章で

は物理的パラメータの変化を入力信号の代わりに用いているように見える. これは系自体が変化していることになり,この点で安定性など理論的議論に関して適応制御との関連が期待される.

3.5 結言 59

第4章

受動的動歩行のダイナミクスを利用 した脚歩行ロボット制御の実機検証

4.1 はじめに

繰り返しになるが、本論文では、受動的動歩行を形成している各種パラメータを2つに分類する(Fig. 1.4). まず、脚長や質量・坂道角度といったロボット自身や環境の物理的なパラメータが考えられる. これらを「物理的パラメータ」と呼ぶ. また、歩行を行った結果から、そのときの歩幅や歩行速度のような出力を得られる. これらを「変数的パラメータ」と呼ぶ. さて、完全に無動力の受動的動歩行において、歩行時の変数的パラメータは物理的パラメータのみによって決定されることは既に述べた. つまり、変数的パラメータを変更するためには物理的パラメータを変更する必要があるということである.

そこで、本手法では変数的パラメータを直接操作するのではなく、物理的パラメータを操作することによって間接的に変数的パラメータを制御する手法を提案してきた.この手法を用いると、受動的動歩行の優れた機械的特性を活かしたまま、望みの変数的パラメータを実現することが可能になる.本章では提案する制御手法を、新たに開発した歩行ロボットを用いた歩行実験を通して検証を行った.開発した歩行ロボットは受動的動歩行を行うが、脚には移動可能なおもりが取り付けられ、重心位置の変更が可能である、この物理的パラメータの変化によってハードウェアのダイナミクスを変化させることで、受動的動歩行の背後に隠れた制御則を調

整し,変数的パラメータの制御を試みる.

4.2 提案する制御手法

本章では具体的な制御手法について述べる。本手法では先述の通り、物理的パラメータの変化によって変数的パラメータを制御することを考える。このとき、変化させる物理的パラメータと、制御する変数的パラメータは非常に多くの組み合わせが考えられる(例えば、物理的パラメータ: 重さ・脚長、変数的パラメータ: 脚角度、歩行速度)。本章では簡単のため、変化させる物理的パラメータx・制御する変数的パラメータyともに1つずつの1対1の制御を考える。

本手法と一般的な制御を比較したブロック図は $\mathbf{Fig.~1.4}$ に示した。通常,何からかの対象を制御することを考えるとき, $\mathbf{Fig.~1.4}$ の破線で示したルートのように,所望の状態 y_d と現在の状態 y から入力 u_g を算出,システムに印加することで所望の出力 y を得る。一方,本論文で提案している手法におけるシステムの信号の流れを実線で示した。前述のとおり,本手法では物理的パラメータが変数的パラメータに影響を与えるとして考える。偏差の計算は従来と同様に行うが,たとえば,腰にトルクを印加するなどして直接脚を駆動するような,変数的パラメータへの直接入力は行わない。その代わりに生成した入力 u_s はシステムの中に存在する物理的パラメータを変化させるために用いられる。すると,受動的動歩行のような変数的パラメータが物理的パラメータに強く依存するシステムでは,その変数的パラメータを間接的に変化させることが期待できる。この性質を利用して受動的動歩行口ボットの制御を行う。

ところで、受動的動歩行では歩行時の変数的パラメータの予測が難しいことがある. そこで、第3章と同様に以下のような制御入力を用いる.

$$x_k = \sum \Delta x_k + x_0 \tag{4.1}$$

$$\Delta x_k = K_P |e_k| \operatorname{sgn}(\Delta x_{k-1}) \operatorname{sgn}(|e_{k-1}| - |e_k|)$$
(4.2)

$$e_k = y_{dk} - y_k \tag{4.3}$$

k 歩目の制御偏差 e_k と k-1 歩目の制御偏差 e_{k-1} を比較し,k 歩目に大きくなった場合は変数的パラメータの変化量 Δx の符号を反転させる.例えば,k-1 歩目に Δx が正で,k 歩目に $e_k-e_{k-1}>0$ の場合は k 歩目の Δx は負になる.いくつかの変数パラメータを物理的パ

ラメータの変化によって制御可能であることは、動力学シミュレータ上で数値的に検証している第3章にて示したとおりである.

4.3 開発した歩行口ボット

提案手法の検証のため、新たに脚歩行ロボットの開発を行った。本手法の検証のために開発したロボットの外観を **Fig. 4.1** に、諸元を **Table 4.1** に、システムのブロック図を **Fig. 4.2** に示した。なお、本ロボットは受動的動歩行が可能である。

Table 4.1 Physical parameters of the robot

(a) Lengths	
Height	618 mm
The distance between	
rotation axis to foot	600 mm
Width	600 mm
Foot radius	650 mm
Moving distance of	
the weights	400 mm

(b) Weights		
Total weight	$4.9~\mathrm{kg}$	
Additional weight at each leg	0.25 kg	

本ロボットは、脚部に取り付けたおもりを上下に駆動させることで物理的パラメータの変化を行うことができるようになっている。おもりの昇降はボールねじと DC ギアードモータによって行う。本ロボットに搭載されているアクチュエータはおもり昇降制御用のもののみである。つまり、本ロボットは歩行時の推進力になるようなアクチュエータは一切持たず、物理的パラメータのみに従って歩行を行う。しかしながら、おもり位置を制御することによって、変数的パラメータである歩幅や歩行速度は変化しうる。

本ロボットには Genuino 101 と Raspberry Pi 3 が搭載されており、それぞれが異なった役割を担っている (**Fig. 4.2**). Genuino 101 は各脚にそれぞれ 1 つ取り付けられており、おもりの位置制御と内蔵 IMU による加速度・角速度情報の取得を行う。取得した IMU 情報とロータリーエンコーダのパルスカウントは、USB によるシリアル通信を用いて Raspberry Pi 3 へ送信される。なお、送信周期は 50 Hz である。Raspberry Pi 3 では受け取った情報を元に、主に脚の姿勢推定・制御入力の計算と計算した入力指令を Genuino 101 へと送信している。姿勢推定には ROS の相補性フィルタパッケージである"imu_complementary_filter"[54]を用い、接地の検出には鉛直方向の加速度情報を用いた。また、Raspberry Pi 3 は実験データのロギングや現在の状態のモニタリング用のウェブサーバとしても利用している。



Fig. 4.1 Appearance of the robot; the black-colored boxes that were attached the leg can move by ball-screw actuated by DC-motor. The weight is put in those boxes. Therefore, position of the center of mass as a physical parameter will change. The walker has 2 D.o.F.

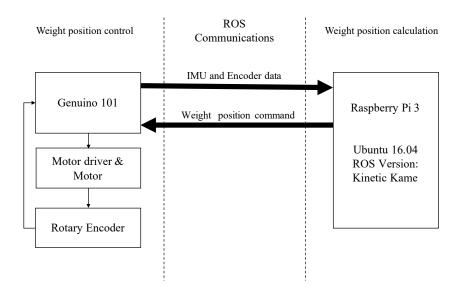


Fig. 4.2 System block diagrams of the developed robot; it has two processors. One is the Raspberry Pi 3B+ that calculates how the weights move. Another one is A micro-controller Genuino101 that attached to each leg. It receives the command and controls their weight position. It communicates between Raspberry Pi and Genuino101 via ROS.

4.4 開発したロボットを用いた歩行制御実験

開発したロボットを用いて、角度が変更可能な約7 m の坂道で歩行実験を行った。搭載したおもりの重量は約300 g, 坂道の角度は1.95 deg である。本実験では変化する物理的パラメータをおもり位置、制御する変数的パラメータを接地時の歩幅とした。制御に使用する変数的パラメータの現在値として、最新の2 歩分の平均値を用いた.

制御実験時の脚のピッチ方向の 1 歩ごとの歩幅とおもりの位置の結果の一例を **Fig. 4.3** に 示した. 歩行開始時のおもり位置は 150 mm とし, 目標とする歩幅は 107 mm として設定した. このとき, 歩行終了直前の 4 歩分の歩幅の平均値が 97 mm, 目標の歩幅との誤差は 10 mm であった. また, 最終的なおもり位置は 197 mm となった. なお, 非駆動時におもり位置を 200 mm に固定して実験を行ったとき, 歩行終了直前の 4 歩分の歩幅の平均値を各試行

の代表値とすると、この代表値の平均と標準偏差はそれぞれ 108 mm, 6.85 mm となった. これらの 2 つの実験結果を比較すると、提案手法によって目標に近い歩幅での歩行を実現していることがわかる.

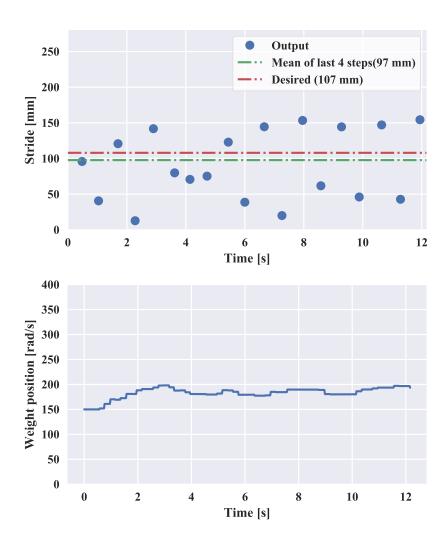


Fig. 4.3 Stride and weight position during the walking experiment; the stride shows two periodic walkings. It has changed the weight position while walking.

4.5 考察

それぞれの脚を A 脚・B 脚として区別し、ある着地によって生成される歩幅を着地する直前まで遊脚だった脚で分類した歩幅・ピッチ方向(脚の振り方向)の角速度の時系列データを **Fig. 4.4** に示した。**Fig. 4.4** を見ると、2 周期の歩行が発現していることがわかる。しかしながら、それぞれの脚ごとの歩幅は定性的ではあるが収束しようとしているように見える。本実験では、ほとんど全ての試行において 2 周期の歩行が現れた。2 周期の歩行は 1 周期の歩行に比べてその挙動が複雑になることが予想され、このとこが誤差の一因となっていると考えられる。

提案する手法では、坂道上においては目標の歩幅で歩行できるパラメータを探索できればその位置で固定してしまえばエネルギ消費はなく、高いエネルギ効率が期待できる。電流電圧を計測する装置を取り付けていないため実際のエネルギ消費について定量的に議論することは現段階ではできないが、例えば本試行であればおもりを 47 mm 移動させることで目標の歩幅を実現できる。

4.6 おわりに **69**

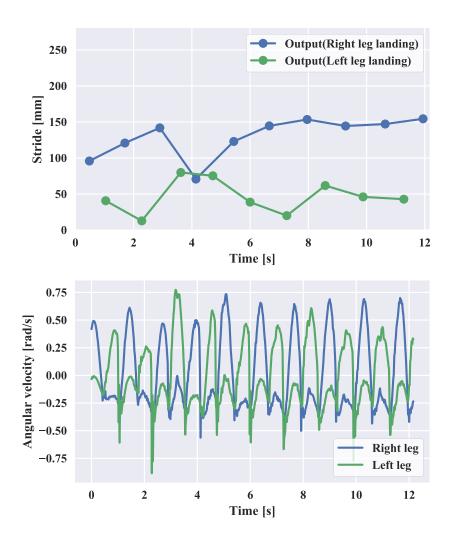


Fig. 4.4 Experimental results of stride and angular velocity; it distinguished the right leg and left leg. It seems bifurcated due to parameter different from the right and left.

4.6 おわりに

本章では、物理的パラメータを変化させることで受動的動歩行ロボットの受動性を阻害する ことなく変数的パラメータを制御する手法を提案し、実機を用いて実験的検証を行った. 結果 として、提案した制御を適用することで脚歩行ロボットの歩幅制御が実現できた。今回の結果から、システムそのものを変化させる本手法の検証が動力学シミュレーション(2,3章)と実験の両方で確認できた。ところで、一般的な適応制御ではコントローラ側のパラメータを更新しながら制御を行う一方で、提案した手法は対象システム側のパラメータを更新しながら制御を行うという点で類似している。このことから、一般的な適応制御と対比しての議論が必要であり、今後はこの観点から考察し理論的な解析を行っていきたい。本制御法を用いた際の歩行効率を先行研究と比較して評価すること、定量的に安定性を評価すること、現在探索的に行っている制御入力の決定をより理論立てて決定することが直近の課題である。

4.6 おわりに **71**

第5章

おわりに

本論文では受動的動歩行の持つ適応的なふるまいに着目し、それを利用した受動的動歩行が 可能な脚歩行ロボットハードウェアの設計及び制御を提案・検証した.

まず、第2章では受動的動歩行が可能な脚歩行ロボットハードウェアの設計方法を提案した.歩行させることが容易な小さなコンパス型の脚歩行ハードウェアから、吸引領域が狭く歩行させることが困難な膝付きの脚歩行ハードウェアへと徐々に変化させていくことで所望の脚歩行ロボットハードウェアの設計を行った.さらに、ある歩幅を実現するような足首トルクを印加する単純なフィードバック制御を適用し、坂道角度を徐々に減少させていくことで適応的なふるまいの発現を誘発し、最終的に平地歩行も実現可能であることを述べた.この方法をうまく利用できれば、目的に応じてそれに適した形状へ適応的に変形し続けるようなハードウェアが実現できるだろう.

次に、第3章では脚歩行ロボットハードウェアが持つ諸パラメータを物理的パラメータと変数的パラメータの2つに分類し、物理的パラメータを変化させることで所望の変数的パラメータを持つ脚歩行ロボットハードウェアの設計を行った。ここではこの設計手法は、物理的パラメータが変化し続けるか否かによって設計としても制御としても見ることができることを述べた。

最後に,第4章では第3章で述べたように本手法を制御として捉え,歩行実験を通してこれを検証した.実験には物理的パラメータの変化を実現できるように,脚に沿って移動するおもりをとりつけた脚歩行ロボットを開発し,フィードバック制御により歩容の制御を行った.

これまで、試行錯誤的に探索する場合には、膨大な数のパラメータの組み合わせに対して設計を検討し、さらに初期条件の探索を行う必要があった。本手法を用いることでハードウェア自身がもつ適応的なふるまいを利用して、非常に単純な、試行錯誤的ではあるものの、指向性をもたせた探索で設計が可能であることを示した。特に自由度の変化に対しても適応的に歩容を変化させ、歩き続けることが確認できたことは非常に大きな意味を持つだろう。

本手法は設計にも制御にも見えることを述べた. 2章のように途中で変化を止めてしまう、つまり Δx を 0 にすれば、系の物理的パラメータは静的なものとなり、設計として捉えることができる. 3, 4章のように常に変化を起こすようにするとこれは制御しているようにも見える. この点から、設計と制御に共通する本質のようなものを見つけてこれらを抽象化する、あるいは橋渡しする変換のようなものを見つけることができれば、設計と制御を統一的に議論できるようになる. このようなことが可能であるならば、それぞれの知見をそれぞれのフィールドに持ち込むことが容易になり、さらにそれぞれができることの幅が広がるだろう.

1章でも触れたが、受動的動歩行はシステムと環境との相互作用(ここでは受動的動歩行器と坂道)の間にフィードバック構造を持った制御器を持っていることが示されており、このパラメータは歩行器と環境によって決定される [22]. つまり、本稿で行った物理パラメータの調節はこの隠された制御器のパラメータを調整していることに他ならない. また、脚長を伸ばす、おもりを動かすといった制御はそれ単体で見ると陽的な制御そのものとなっている. そのような視点で提案手法を見直してみると Fig. 5.1 のように見える. つまり、本稿では陽的な制御を、ロボットの受動性を阻害しないことを念頭に置き挿入している. しかしながら、平地歩行のような、陰的な制御則を調整するだけでは達成できない目標も存在している. だからといって従来のように関節にアクチュエータを配置することはできず、本稿で提案した陰的制御の調整との相性を考えた陽的な制御を考える必要があるだろう.

今後は本手法の数理的な議論は必要不可欠であり、これを一般化して受動的動歩行以外の系 に適用することも考えたい.

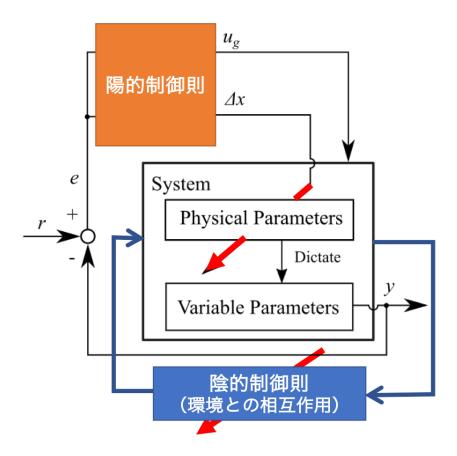


Fig. 5.1 More detailed proposed method; the passive dynamic walking has an implicit control system that produced due to synergy between the body dynamics and the environment. The walker walks well because of the implicit control system. The parameters of the implicit control system consist of the walker's physical parameters. Therefore, to change the physical parameters is equal to adjust the implicit controller's parameters. In contrast, controllers that change physical parameters and traditional controllers look like explicit controllers. If you want to achieve more challenging matters, such as to walk a flat plane, you should use some actuators. So, it is necessary to consider designing an explicit controller taking into account the implicit controller.

- [1] Tad McGeer. Passive dynamic walking. The International Journal of Robotic Research, Vol. 9, No. 2, pp. 62–82, 1990.
- [2] A. Goswami, B. Thuilot, and B. Espiau. Compass-like biped robot part i : stability and bifurcation of passive gaits. *Technical Report 2996*, *INRIA*, Vol. 19, No. 4, pp. 402–408, 1996.
- [3] 大須賀, 桐原. 受動的歩行ロボット quartet ii の歩行解析と歩行実験. Vol. 18, No. 5, pp. 121–126, 2000.
- [4] Y. Sugimoto and K. Osuka. Hierarchical implicit feedback structure in passive dynamic walking. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 20, No. 4, pp. 559–566, 2008.
- [5] N. H. Shah and M. A. Yeolekar. Influence of slope angle on the walking of passive dynamic biped robot. *Applied Mathematics*, Vol. 06, pp. 456–465, 2015.
- [6] Q. Li, J. Guo, and X. Yang. Bifurcation and chaos in the simple passive dynamic walking model with upper body. *Chaos*, Vol. 24, No. 3, p. 033114, 2014.
- [7] Z. Gan and C. D. Remy. A passive dynamic quadruped that moves in a large variety of gaits. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, 2014.
- [8] F. Asano and I. Tokuda. Indirectly controlled limit cycle walking of combined rimless wheel based on entrainment to active wobbling motion. Vol. 34, No. 2, pp. 191–210,

2015.

[9] D. Owaki, M. Koyama, S. Yamaguchi, S. Kubo, and A. Ishiguro. A 2-d passive-dynamic-running biped with elastic elements. TRANSACTIONS ON ROBOTICS, Vol. 27, No. 1, pp. 156–162, 2011.

- [10] 池俣, 佐野, 宮本, 大竹, 藤本. バネ付きリムレスホイールによる受動走行の基礎的研究. Vol. 76, No. 7, pp. 115–121, 2010.
- [11] 佐野, 池俣, 宮本, 丸山, 藤本. 起こし回転型受動走行と平衡点解析. Vol. 76, No. 7, pp. 115–121, 2010.
- [12] F. Asano, T. Saka, and Y. Harata. 3-dof passive dynamic walking of compass-like biped robot with semicircular feet generated on slippery downhill. In *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2016.
- [13] Y. Harata, F. Asano, K. Taji, and Y. Uno. Efficient parametric excitation walking with delayed feedback control. *Nonlinear Dynamics*, Vol. 67, No. 2, pp. 1327–1335, 2011.
- [14] I. R. Manchester, U. Mettin, F. Iida, and R. Tedrake. Stable dynamic walking over uneven terrain. The International Journal of Robotics Research, Vol. 30, No. 3, pp. 265–279, 2011.
- [15] T. Nanayakkara, K. Byl, H. Liu, X. Song, and T. Villabona. Dominant sources of variability in passive walking. In *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2012.
- [16] T. Kinugasa, T. Ito, H. Kitamura, K. Ando, S. Fujimoto, K. Yoshida, and M. Iribe. 3d dynamic biped walker with flat feet and ankle springs: Passive gait analysis and extension to active walking. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 27, No. 4, pp. 444–452, 2015.
- [17] Y. Huang, Q. Wang, B. Chen, G. Xie, and L. Wang. Modeling and gait selection of passivity-based seven-link bipeds with dynamic series of walking phases. *Robotica*,

- Vol. 30, pp. 39–51, 2012.
- [18] D. J. Braun, J. E. Mitchell, and M. Goldfarb. Actuated dynamic walking in a seven-link biped robot. *Transactions on Mechatronics*, Vol. 17, No. 1, pp. 147–156, 2012.
- [19] Y. Hanazawa and M. Yamakita. High-efficient biped walking based on flat-footed passive dynamic walking with mechanical impedance at ankles. *Journal of Robotics* and *Mechatronics*, Vol. 24, No. 3, pp. 498–506, 2012.
- [20] X. Luo, L. Zhu, and L. Xia. Principle and method of speed control for dynamic walking biped robots. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 66, pp. 129–144, 2015.
- [21] 佐野明人. 受動歩行由来の無動力歩行支援器 acsive. Vol. 118, No. 1165, p. 51, 2015.
- [22] Y. Sugimoto and K. Osuka. Stability analysis of passive dynamic walking -an approach via interpretation of poincare map's structure. *Transactions of the Institute of Systems*, Vol. 18, No. 7, pp. 255–260, 2005.
- [23] M. Garcia, A. Chatterjee, A. Ruina, and M. Coleman. The simplest walking model: stability, complexity, and scaling. *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 120, No. 2, pp. 281–288, 1998.
- [24] J.S. Moon, D. M. Stipanović, and M. W. Spong. Gait generation and stabilization for nearly passive dynamic walking using auto-distributed impulses. *Asian Journal of Control*, Vol. 18, No. 4, pp. 1–16, 2015.
- [25] T. Chyou, G. F. Liddell, and M. G. Paulin. An upper-body can improve the stability and efficiency of passive dynamic walking. *Journal of Theoretical Biology*, 2011.
- [26] M. Gomes and A. Ruina. Walking model with no energy cost. Physical Review E, Vol. 83, No. 3, 2011.
- [27] S. Collins, A. Ruina, R. Tedrake, and M. Wisse. Efficient bipedal robots based on passive dynamic walkers. *Science*, Vol. 307, No. 5712, pp. 1082–1085, 2005.
- [28] I.Handz ic, K. B. Reed. Validation of a passive dynamic walker model for human

- gait analysis. In 35th Annual International Conference of the IEEE EMBS, 2013.
- [29] Development of The Passive Dynamic Walk Robot which has symmetrized structure, No. 2A1-H06, 2014.
- [30] M. Iribe and K. Osuka. A design of the passive dynamic walking robot by applying its dynamic properties. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 19, No. 4, pp. 402–408, 2007.
- [31] 浦, 入部, 大須賀, 衣笠. 受動的動歩行の性質を利用した脚歩行ロボットの一設計方法適 応的機能を使用した形状と関節自由度構成の設計. 計測自動制御学会論文集, Vol. 51, No. 5, pp. 329–335, 2015.
- [32] X. Zang, L. Wang, Y. Liu, and S. Iqbal. Research on 3d walking of oscillator-based passive biped robot. In *International Conference on Mechanics and Control Engineering (MCE 2015)*, 2015.
- [33] T. Aoyama, K. Sekiyama, Z. Lu, Y. Hasegawa, and T. Fukuda. 3-d biped walking using double support phase and swing leg retraction based on the assumption of point-contact. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 24, No. 5, pp. 866–875, 2012.
- [34] T. Kinugasa, T. Haji, M. Iribe, T. Kobayashi, S. Fujimoto, and K. Yoshida. 3-d passive dynamic walker made of cardboard for robot education -design strategy, experiment and manual training-. *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 31, No. 2, pp. 154–160, 2013.
- [35] Y. Ikemata, A. Sano, and H. Fujimoto. A stability mechanism of the fixed point in passive walking. *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 23, No. 7, pp. 839–846, 2005.
- [36] I.D. Landau, 富塚. 適応制御システムの理論と実際. 1981.
- [37] 高西淳夫. 上体の運動によりモーメントを補償する 2 足歩行ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 7, pp. 983-985, 1993.

- [38] 広瀬, 竹中, 五味, 小澤. 人間型ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 7, pp. 983-985, 1997.
- [39] Y. Kuroki, T. Ishida, J. Yamaguchi, and T. Doi. A small biped entertainment robot. Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 14, No. 1, pp. 6–12, 2002.
- [40] 梶田秀司. ヒューマノイドロボット. 2005.
- [41] 小椋, 林, 高西. 2 足ヒューマノイドロボットの膝関節伸展型歩行パターン生成アルゴリズム. 日本機械学会論文集(C編), Vol. 70, No. 700, pp. 147–153, 2004.
- [42] 長阪, 黒木, 永野, 高橋, 山口. 小型二足歩行エンターテインメントロボットによる踵接地及び爪先接地を伴う二足歩行. 第 22 回日本ロボット学会学術講演会, No. 3L22, 2004.
- [43] 金子, 金広, 森澤, 三浦, 中岡, 原田, 梶田. サイバネティックヒューマン hrp-4c の開発 一プロジェクト概要からシステム設計まで一. 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 7, pp. 853-864, 2010.
- [44] M. Iribe, T. Fukushima, J. Yamaguchi, and Y. Kuroki. Development of a new actuator for a small biped entertainment robot - which has suitable functions for humanoid robots-. In *Proc. of the 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics* Society, No. FD5-1, 2004.
- [45] 大日方五郎. 構造系と制御系の同時最適設計問題. 計測と制御, Vol. 36, No. 4, pp. 254-261, 1997.
- [46] 池俣, 佐野, 藤本. 受動歩行における平衡点の安定メカニズムの構造. 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 7, pp. 839-846, 2005.
- [47] 入部, 浦, 廣瀬, 衣笠, 大須賀. 受動的動歩行の性質を利用した脚歩行ロボットの設計. ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, No. 2A2-E09, 2013.
- [48] 徳田, 岩尾, 入部, 衣笠, 大須賀. 歩行ロボットと地面の相互作用に着目した環境推定-受動歩行ロボットの歩容変化による勾配変化検出の試み-. ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, No. 2P1-E07, 2013.
- [49] J. W. Grizzle, F. Plestan, and G. Abba. : poincare's method for systems with

impulse effects: application to mechanical biped locomotion. In *Proceedings of the* 38th Conference on Decision & Control, 第 4 巻, pp. 3869–3876, 1999.

- [50] 平田, 小亀. 状態にジャンプを有する線形システムの周期運動 compass walking のモデリング, 安定解析, フィードバック制御 . システム制御情報学会論文誌, Vol. 17, No. 12, pp. 553–560, 2004.
- [51] Open Dynamics Engine Russ Smith. https://www.ode.org/ (accessed 2020-01-07).
- [52] I. Obayashi, S. Aoi, K. Tsuchiya, and H. Kokubu. Formation mechanism of a basin of attraction for passive dynamic walking induced by intrinsic hyperbolicity. In PRO-CEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY A, 2016.
- [53] Y. Hu, G. Yan, and Z. Lin. Feedback control of planar biped robot with regulable step length and walking speed. TRANSACTIONS ON ROBOTICS, Vol. 27, No. 1, pp. 162–169, 2011.
- [54] imu_complementary_filter ROS Wiki. http://wiki.ros.org/imu_complementary_filter (accessed 2020-01-07).

謝辞

本論文は著者が大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻に在籍していた際の研究をまとめたものです.

本研究をすすめるにあたり、大阪大学教授 大須賀公一先生、大阪大学准教授 杉本靖博先生、大阪電気通信大学教授 入部正継先生には非常に重要なご指導ご助言を頂きました。イレギュラーな形の学位取得となり、多くのご心配・ご迷惑をおかけしましたが、それでもなお親身に議論して頂けたことで、この論文は博士論文としての形を得ることができました。

大阪大学教授 石川将人先生,大阪大学助教 末岡裕一郎先生,岡山理科大学教授 衣笠哲 也先生には研究のアイデアや根幹の部分で有益なご助言を頂きました。末岡先生は博士課程在 籍時の先輩でもあり,生活・研究ともにお世話になりました。また,学位審査において副査を 引き受けてくださった大阪大学教授 東森充先生,石川先生には本論文の作成に際して多くの ご助言を頂きました。

大須賀・石川研究室ならびに大須賀・杉本研究室のみなさまとは研究会や普段の雑談で様々な議論をさせて頂きました。とくに博士後期課程に同期として在籍していた北海道大学学術研究員 浪花啓右さん、松江工業高等専門学校助教 中西大輔先生には、頻繁に議論にお付き合い頂きました。浪花さんには本論文に登場したロボットの機構設計において非常に重要な意見を頂きました。

小松製作所ならびにコマツみらい建機協働研究所のみなさまには、業務と並行して学位取得

86 謝辞

に励むことをお許し頂きました.特に、大畠陽二郎副所長には折に触れお気遣い頂きました. 家族には日常生活の面で非常にお世話になりました.

大阪大学教務担当者の皆様には学生生活や本論文の作成など、多くの面でサポート頂きました.

どれか一つでも欠けるとこの論文は形になりませんでした.最後にこの場をお借りして,すべての皆様に深くお礼申し上げます.ありがとうございました.

謝辞 87

業績一覧

査読付き原著論文

- 1. 浦, 入部, 大須賀, 衣笠. 受動的動歩行の性質を利用した脚歩行ロボットの一設計手法: 適応的機能を使用した形状と関節自由度構成の設計, 計測自動制御学会論文集, Vol.51, No.5, pp. 329-335, 2015
- D. Ura, Y. Sugimoto, K. Osuka, T. Kinugasa. Asymptotic Realization of Desired Control Performance by Body Adaptation of Passive Dynamic Walker, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.29, No.3, pp. 480-489, 2017

国際会議論文

 D. Ura, Y. Sugimoto, K. Osuka. A Control of Legged Robot Using Its Dynamics of Passive Dynamic Walking, SICE Annual Conference 2018, FrB05.3, 2018

国内学会

- 1. 入部, 林, 浦, 衣笠, 大須賀. 対称構造を有する受動的動歩行ロボット, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 2P1-E01, 2014
- 2. **浦**, 入部 大須賀, 衣笠. 受動的動歩行の性質を利用した脚歩行ロボットの設計と評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 2A1-H08, 2014
- 3. 浦, 大須賀, 入部, 林, 杉本, 衣笠. 対称構造を有する受動的動歩行ロボットを用いた適 応的なふるまいの実験的検証, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2P1-T10, 2015

90 業績一覧

4. 浦, 大須賀, 入部, 杉本, 衣笠, 末岡. 身体適応による所望の制御機能の漸近的実現, 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3J4-1, 2015

- 5. **浦**, 大須賀, 杉本, 末岡. 重心位置変化による受動的動歩行ロボットの歩幅の制御, ロボ ティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2P1-07b7, 2016
- 6. **浦**, 杉本, 末岡, 大須賀. 物理的パラメータ変化を有する受動的動歩行ロボットの安定性の解析, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2P2-I05, 2017