

アーチ型スナップモータの
パワーフロー解析と
その跳躍走行ロボットへの応用

2022年 3月

翠 健仁

アーチ型スナップモータの
パワーフロー解析と
その跳躍走行ロボットへの応用

翠 健仁

システム情報工学研究科
筑波大学

2022年 3月

概要

撃力は跳躍や遊泳のような素早い運動の基本であり、打音検査に代表に代表されるようにシステム同定の常套手段である。撃力が有用である一方で、DC モータでは短時間に高いトルクを取り出すのに向かないという課題がある。本研究ではコンパクトでシンプルな撃力発生機構としてアーチ型スナップモータを対象とし、跳躍走行ロボットを提案する。スナップモータはフレームとモータおよび弾性体というシンプルな構成で撃力を発生できる。撃力発生には、モータにより弾性体を変形させ、あるところで大きく形状が変化する飛び移り座屈現象を利用する。提案する跳躍走行ロボットは平地を車輪で移動し、段差を跳躍機構によって踏破できる。提案する跳躍走行ロボットは走行と跳躍をシームレスに切り替えることで、走行後の連続跳躍による階段踏破や走行中の跳躍を行う。

本論文では、まずアーチ型スナップモータのフレーム変形に着目し、フレーム変形が座屈条件そのものを緩和していると仮説を立て、実機および既存のシミュレータ上で座屈を得た。このフレームの変形をモータ間距離の変化としてとらえ、座屈発生を安定化させ耐久性と撃力を向上させるフレキシブルフレーム機構を提案した。機構をシミュレータ上へ実装し、座屈時の弾性エネルギーおよびモータトルクの推定を含む入力電気エネルギーから座屈を経て跳躍による運動エネルギーまでのパワーフロー解析を行い、定量的評価方法を示した。続いてアーチ型スナップモータの連続跳躍性能を実験より示した。提案跳躍走行ロボットは最大で 1.9Hz の繰り返し周波数で 117 回の連続跳躍を 1 分以内に達成した。また、パワーフロー解析によってモータトルク内で最も弾性エネルギーが大きくなる弾性体の設計が可能となり、これを用いた跳躍走行ロボットにおいて高さ 15cm の段差に対して連続跳躍踏破を達成した。最後にアーチ型スナップモータを用いて小型跳躍走行ロボットによる走行中跳躍を達成した。走行中に跳躍することで走行速度を利用して本体幅以上の跳躍を達成した。繰り返し周波数が高いことで段差に即時に対応でき、走行速度を利用することで跳躍幅を伸ばすことができる。

以上の知見から本論文では、アーチ型スナップモータの定量的な設計および評価を可能とするパワーフロー解析を初めて達成し、これを通じてアーチ型スナップモータの設計方法を示し、実機実験による跳躍性能、跳躍走行ロボットとしての性能を示した。この成果は工学へ小型の撃力発生装置評価解析手法の提供のみならず、ロボティクス分野に対して段差を含む平地を移動するロボットのモビリティを大きく向上させその応用範囲を拡大するものである。

目次

概要	i
第1章 はじめに	1
1.1 研究背景と目的	1
1.2 関連研究	6
1.3 研究内容	7
1.4 本論文の貢献	8
1.5 本論文の構成	8
第2章 アーチ型スナップモータのパワーフロー解析	11
2.1 平面型スナップモータでのパワーフロー解析	11
2.2 アーチ型スナップモータとそのフレーム変形	12
2.2.1 フレームの柔軟性による撃力生成	14
2.2.2 フレーム変形の実装による座屈生成	20
2.2.3 フレキシブルフレーム機構	22
2.2.4 フレーム変形のシミュレータへの実装	25
2.3 パワーフロー解析	30
2.3.1 エネルギー効率測定	31
2.3.2 座屈を含めたエネルギー変換効率	35
2.3.3 アーチ型スナップモータの力積計測	35
2.4 考察	41
2.5 まとめ	45
第3章 跳躍走行ロボットの繰り返し跳躍性能	46
3.1 アーチ型スナップモータを搭載した跳躍走行ロボット	46
3.1.1 プロトタイプII	46

3.1.2	プロトタイプ III	49
3.1.3	パワーフロー解析によるフレキシブルフレーム機構の設計	50
3.2	繰り返し跳躍周波数計測実験	54
3.3	連続跳躍耐久実験	56
3.4	階段連続跳躍実験	58
3.5	考察	58
3.6	まとめ	66
第 4 章	跳躍走行ロボットの走行中跳躍性能	67
4.1	跳躍走行ロボットの走行中跳躍モデル	67
4.2	跳躍走行ロボットの機体	70
4.2.1	走行系と合わせたアーチ型スナップモータ	70
4.3	走行中跳躍実験	74
4.4	考察	78
4.5	まとめ	81
第 5 章	おわりに	83
5.1	全体のまとめ	83
5.2	今後の展望	86
補章 A	こどもと跳躍を介してインタラクションするロボットプラットフォーム	88
A.1	はじめに	88
A.2	跳躍インタラクションプラットフォーム	91
A.2.1	システム概要	91
A.2.2	知覚部	91
A.2.3	動作部	93
A.2.4	制御部	93
A.3	実験	94
A.3.1	跳躍応答実験	94
A.3.2	跳躍を介したこどもとのインタラクション実験	94
A.4	考察	99
A.5	おわりに	101

表 目 次

3.1	Repeated jumping ability of prototype II.	56
3.2	Repeated jumping frequency of prototype II.	58
3.3	The buckling occurring range by θ_m and l_m . The numbers are buckling energy [mJ] at the upside and the motor maximum torque [mNm] at the downside.	62
4.1	The specifications of the prototype I.	72
4.2	Impulse derived from the model.	78

図目次

1.1	The compact jumping wheeled robot can move over some obstacles.	3
1.2	Model of the difference in time and obstacle dimensions required for the jump robot to overcome obstacles.	5
2.1	Arched snap motor using two motors. Each end of the elastic strip is attached to a motor, and the motors rotate in reverse phase. One snap through buckling occurs after half a rotation of the motors. In this paper, the right-side shape is called the omega shape and the left-side shape is called the arch shape.	13
2.2	(A) Snap through buckling does not occur because the distance between motors was fixed. The distance between the motors in the upper image is 84 mm, and the distance between the motors in the lower image is reduced to 70 mm. The difference in distance can be seen from the red line. In each case, the motor stalls midway without rotating 180 deg. (B) Snap through buckling occurs because the distance between motors was free to change. The linear slider allows the distance between the motors to vary passively. One side of the elastic strip is painted in color to enhance the visibility of the front and back. The maximum distance between the motors is 84 mm when the leaf springs form the arch shape. The distance between the motors is shorter when the springs have an omega shape. The amount of change is indicated by the red arrows. When the motor rotates 180 deg, the shape changes to an arch shape from the omega shape, and the front and back of the elastic strip is observed to change.	15

2.3	Illustration of simulation, where the elastic strip does not snap through buckling. In each plot, the red curve shows the backbone shape of the elastic strip, and the blue curves show its edges. The pair of red, green and blue lines at the end of each set of curves show the orientation of the ends of the elastic strip. (A) Distance between motors is 84 mm. (B) Distance between motors is 70 mm.	17
2.4	Elastic energy produced by motor angle and motor torque versus motor angle. The line colors show the distances between motors on the legend. The red line shows 61.9mm on Sec. 2.2.4. There are the maximum motor torques near 105 deg. . . .	18
2.5	Figures of shapes of the simulator and real mechanics for comparing.	21
2.6	Flexible frame mechanism for passively changing the distance between motors with a sliding joint and a stopper. The distance between the motors is greater in the arch shape. The slider is configured so that the buckling point of the elastic strap is at the center of the distance between the motors.	23
2.7	The role of a stopper at the flexible frame mechanism is durability and greater getting buckling energy. The numerical value in the image is the number of frames of the moving image, and since it was shot at 240 fps, about 4.2 ms has passed per frame.	24
2.8	(A) Parameters of the moment at the free joint position. θ_z is the arm angle, τ_a is the moment at the free joint position, τ_z is the motor torque at a fixed position on the same axis as τ_a , F_x and F_y are forces at the fixed motor position, and l_a is the arm length. (B) Estimate of arm angle θ_z using τ_a . We can determine θ_z as 8 deg, at which the value of τ_a exceeds 0 by increasing θ_z	27
2.9	The shape of emulated flexible frame mechanism. Snap through buckling occurs at 156 deg to 157 deg.	28
2.10	(A) Elastic energy produced by motor angle and arm angle. The buckling energy was 910 mJ. (B) Motor torque versus motor angle. The maximum motor torque was 304 mN · m at 105 deg.	29
2.11	The bend and torsion part of elastic energy produced by motor angle. The maximum motor torque was caused at 105 deg.	31
2.12	(A) Experimental setting of measurement of buckling energy efficiency for power flow analysis. (B) The robot jumping overlay picture.	33

2.13 (A) Input current I_i versus the jump height h over time. (B) The robot jump height for robot mass.	34
2.14 Power flow of the arched snap motor. These plots show average values with error bars for variance.	36
2.15 Set up an impulse measurement experiment. The arched snap motor was measured generating forces by a load cell and real-time controller.	37
2.16 The measurement values of forces versus time. Peak forces were plotted for every buckling.	39
2.17 The measurement values of forces versus the time in the first buckling.	40
3.1 Prototype II: jumping wheeled robot with the arched snap motor in sec. 3.3.	47
3.2 Prototype III: jumping wheeled robot with the arched snap motor in sec. 3.4.	48
3.3 The parameters of an arched snap motor with a flexible frame mechanism.	51
3.4 Analysis of the jumping frequency and height of prototype II. The jumping frequency is measured from videos. The jumping height is measured from the locus of the marker.	55
3.5 Repeated jumping of prototype II. Prototype II jumped 117 times during 59.43 s and then jumped intermittently for a total of 424 jumps.	57
3.6 The appearance of the sheared elastic strip after prototype II jumped 424 times.	57
3.7 The artificial stairs have 220 mm width, 320 mm length, and 150 mm height.	59
3.8 The series of pictures of prototype III climbing the stairs every 200 ms.	60
4.1 Proposed compact jumping wheeled robot that can jump while rolling.	68
4.2 Model of jumping while rolling.	69
4.3 Four views of the prototype I.	71
4.4 The size of the elastic strip of the prototype I.	73
4.5 The predicted position of the blade is the red line just before a buckling. There is the blade under the robot's center of gravity.	75
4.6 The average value, standard deviation, and predicted value of jumping height and width.	76

4.7	The prototype I jumped while rolling. It is possible to make a jump of 5.8 ± 0.99 cm in height, 22 ± 0.99 cm in width at a speed of 1.2 m/s, 4.8 ± 1.2 cm in height, 23 ± 1.4 cm in width at a speed of 1.6 m/s, and 5.0 ± 1.7 cm in height, 30 ± 6.2 cm in width at a speed of 1.8 m/s.	77
4.8	Repeated jumping while rolling. The prototype I jumps twice repeatedly during 233-600 ms and 1137-1440 ms.	79
A.1.1	Jump robot platform for interacting with a child through a jump.	89
A.1.2	The jump robot for interaction overview.	90
A.1.3	Motion measurement device.	92
A.3.4	Jumping contingency between a human and the jump robot.	95
A.3.5	Jump interaction experimental setup.	96
A.3.6	Three patterns of jump robot reaction to child motion.	97
A.3.7(A)	Child 1 jumps with the robot in turn rhythmically. It should be noted that to achieve these rhythmical jumps with the robot she has to wait for an appropriate time. (B)Child 2 is running around the robot very fast. This image was made by superimposing a series of 5 images in a period of 1 second. He succeeded to make the robot jump frequently. (C)Child 3 showed a variety of motion behaviors. (1) Running, (2) Jump from standing state, (3) Crawling, (4) Jump from crouching state (Frog jump)	98
A.3.8	Acceleration of Child 1 and the robot. The upside is robot pattern A, the downside is robot pattern C. The blue solid line expresses the vertical acceleration of Child 1 while the red dashed line shows that of the jump robot.	100

第1章 はじめに

1.1 研究背景と目的

四肢動物の自身の全長をも超える跳躍や遡上する魚の遊泳など自然界ではいまだロボティクスで達成しえないしなやかな動作が数多く存在する。その中でも筋肉の収縮による一時的な力の発生である撃力はこういったしなやかな動作に必要な不可欠な要素である。また、工学において撃力はロボットのモビリティを高めるだけでなく、打音検査に代表に代表されるようにシステム同定の常套手段である。工学では最も普及したアクチュエータは DC モータの回転動作である。DC モータはスマートフォンのバイブレーションから大型の発電機まで幅広く活用されている。一方で DC モータは撃力を取り出すのに向かない。これは大きな力を取り出すためにはギアダウンの必要があり速度とトルクがトレードオフの関係にあるためである。撃力を取り出す方法は様々な方法が考えられるが、シンプルかつコンパクトな方法であればバイブレーションモータのように様々な機器に搭載でき、幅広く新たな価値あるサービスの創出に貢献できる。

ルンバに代表されるように今後ますます人の生活空間にロボットが入り込むことが考えられる。内閣府は「目標 1. 2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」するムーンショット目標を掲げており、工業用ロボットとは異なる、人を相手にするロボットの基礎的な研究が重要であると言及している [1]。これらの人の生活空間で活動するロボットにとって最大の障害となるのが階段を含む段差の踏破である。数多くの移動手段がある中で平地の移動においては車輪移動が最も効率のよい移動方法であるといえる。一方で車輪移動では通常車輪直径の 1/3 までの高さの段差しか乗り越えることができない。ふみ面奥行の限られた階段環境においては車輪径を大きくすることだけでは階段の踏破はできないことは想像に難くない。

階段を含むような平地での移動には様々は手段が考えられる。例えば Boston Dynamics 社の Atlas や spotmini に代表される脚移動ロボットは階段踏破が可能である [2, 3]。また、クローラ [4, 5] やロッカーボギー機構 [6] に代表される大型の特殊車輪や複数の車輪を組み合わせた

機構や、駆動部に遊星歯車を用いて巧みにロボット本体を階段上へ持ち上げる手法 [7, 8] 等階段を踏破するための機構には枚挙にいとまがない。一方でこれらの脚ロボットや特殊車輪ロボットに共通するのは階段を踏破するために階段高さ以上のサイズが必要不可欠であり、狭所に入り込む運用はできない。また、ロボットの大型化はアクチュエータ数およびセンサ類の増加や重量の増加を招き、運搬コストの増加や転倒時の安全性の確保等、製造および運用時のコストが高くなる。飛行ロボットのドローンは段差を気にせず運用が可能である [9]。Amazon社はホームセキュリティ向けの製品としてカメラを搭載したドローン Ring Always Home Camの販売を始めた [10]。ドローンを室内で運用するには壁面からの風の影響や窓ガラスの認識等高度な認識技術と制御技術が求められる。また、平地においては車輪移動と比較してバッテリー消費量が大きく長時間の運用には向かない。壁面からの風の影響を低減する方法としてドローンの回転翼の周りに受動回転する球殻を取り付けることで壁面を走行するドローンが提案されている [11]。狭所への移動にも対応できるが、やはりバッテリー消費量は大きく運用コストが高くなる。階段高さに満たない小型のロボットが階段を含む段差を乗り越える手段として浮かび上がるのが跳躍である。跳躍はその測定のしやすさと比較のしやすさから数多くの研究が行われている。手のひら大の 7g の跳躍ロボットは 1m を超える跳躍を行うことができる [12]。また、series-elastic を用いた跳躍ロボット Salto は 80cm を超える跳躍を連続で行い、壁面を蹴ることで単体の跳躍では到達しえない高さまでの跳躍を達成している [13]。一方で純粋な跳躍のみでは有効なタスクに乏しい。跳躍機構しか持たないような小型のロボットでは平地の移動で小回りが効かない。また、人と同じ空間において階段以上の高さを跳躍踏破する必要性は生じ難い。図 1.1 に示すような跳躍と走行をシームレスに切り替える跳躍走行ロボットが開発されれば移動ロボットの移動可能範囲を大きく広げ、移動ロボットの応用可能範囲を大きく向上させることができる。

また、地球規模での課題として持続可能な開発目標である SDGs への貢献も期待される。SDGs 目標 9 である産業と技術革新の基盤に対して達成目標 1 である「信頼でき、持続可能な、災害などにも強いインフラ」に対して飛行ドローンによる点検作業のロボット化による信頼性、持続性向上が進められている。一方でドローンの操作には慣れが必要であり、作成運用コストが高い。また、飛行ドローンは高所作業に有効だが側溝や配管の点検といった狭所作業には向かない。発展途上国において電気インフラが進んでいない場合も想定され、作業員となるロボットの消費電力は低い方が望ましい。また、作成運用においても安価であることが望ましい。また、誰でも利用できるためには操作も簡単であることが望ましい。ここで、跳躍機構による撃力提示はまさに打音検査そのものであり、例えばマイクを搭載することで

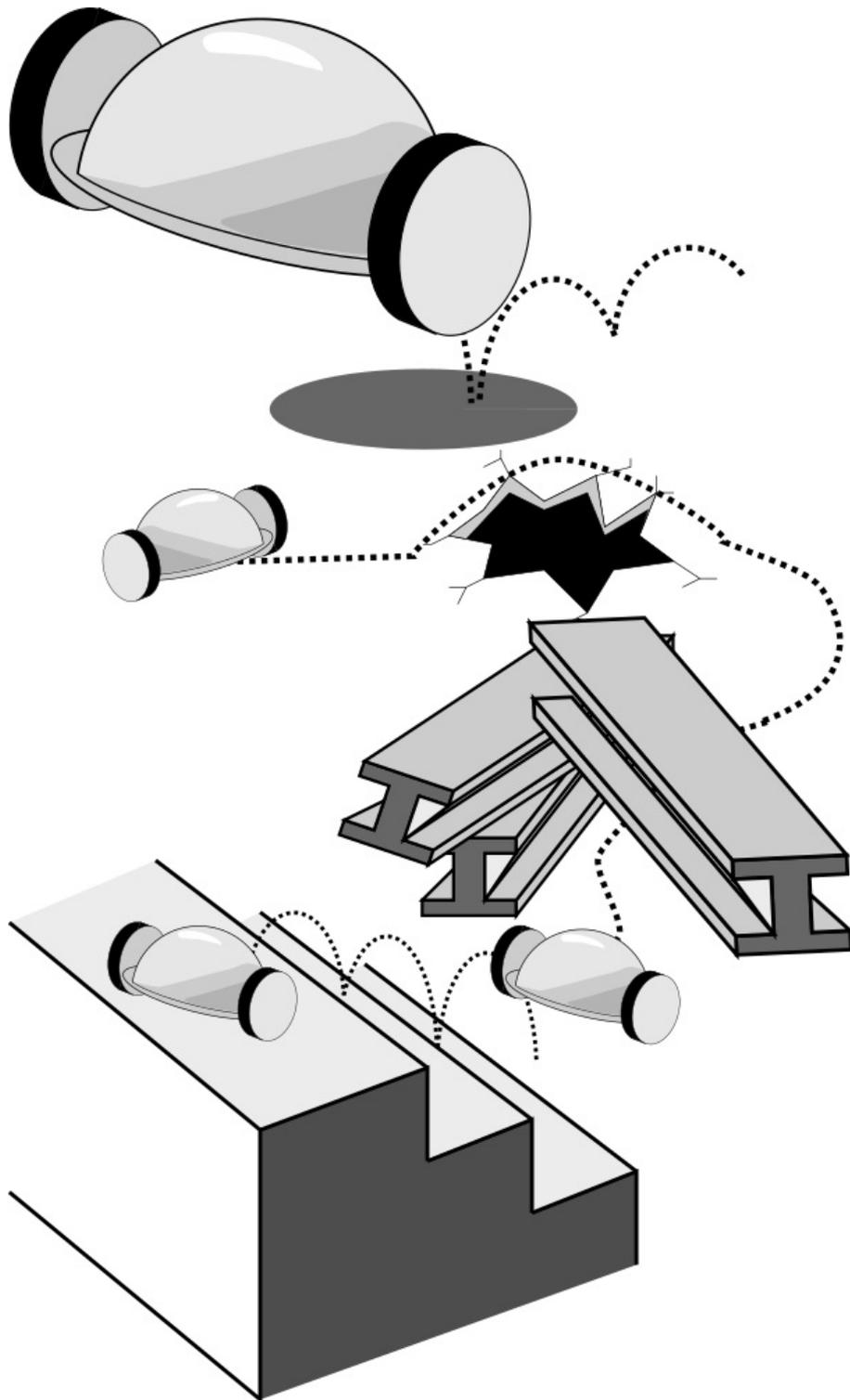


Fig. 1.1: The compact jumping wheeled robot can move over some obstacles.

トンネル壁面等のインフラ検査装置として利用可能と考えられる。電気消費の低さは、飛行ドローンと置き換えることによりエネルギー消費が抑えられSDGs 目標 12, 達成目標 2 である「資源を効率よく使う」への貢献が期待される。

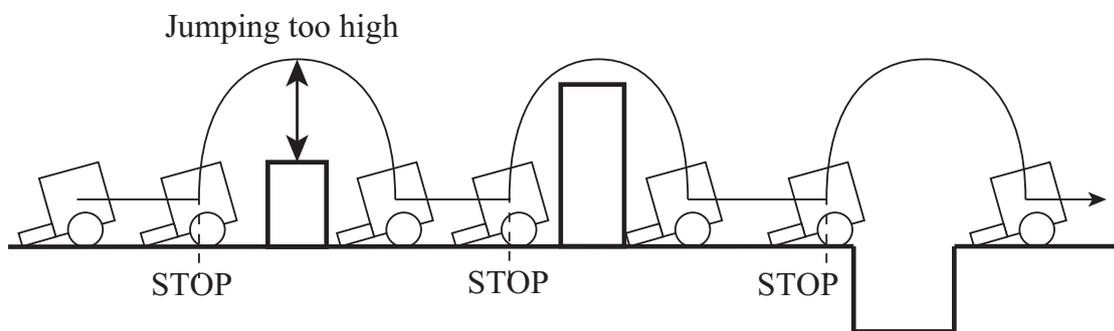
図 1.2 上段に示すように跳躍機構だけでなく車輪を取り付けることで平地を車輪で移動し段差を跳躍機構で踏破する「跳躍/走行ロボット」が数多く提案されている。これらは跳躍と走行を切り分けて考えており、跳躍の前後で停止する必要がある。このような「跳躍/走行ロボット」では、跳躍時には走行機構が、走行時には跳躍機構が単に重りとして作用してしまっている。また、跳躍高さに着目しているため一度の跳躍に時間を有する。これは連続した段差である階段を踏破する際には段数分の累積した時間が必要となり移動に時間を有してしまう。ここで、移動そのものがタスクとなる場合より、タスクを生じる場所まで到達する手段として移動をとらえる場合が多いことに注意されたい。であるならば、移動には目的地へ到達できるという到達可能性だけでなく、目的地へ素早く到達できるという時間的優位性も求められる。

現状の小型ロボットによる段差を含む平面移動の課題として以下のようなことが挙げられる。

- 最も普及しているアクチュエータである DC モータでは、ギアダウンにより高トルクと素早い動きの両立が困難であり、短時間での繰り返し撃力発生に向かない。
- 階段のように連続した段差において、1 回の跳躍に要す時間が考慮されておらず、段数分の累積となって移動時間が肥大化している。
- 走行と跳躍が切り分けて考えられており、走行時には跳躍機構が、跳躍時には走行機構が単に重りとなっている。
- 制作運用コストが考慮されておらず、機構のシンプルさおよびコンパクトさが無い。

これらの課題に対し、本研究では跳躍走行ロボットを提案する。跳躍走行ロボットの重要な能力は 2 つである。1 つ目に、繰り返し周波数の高い連続跳躍能力である。これは階段のように連続した段差の踏破に有用である。2 つ目に、走行中跳躍能力である。これは跳躍の前後に停止時間を設けず走行速度を生かした跳躍により移動可能範囲を広げ移動時間を縮めるものである。以上を踏まえ本研究における段差を含む平面を移動する跳躍走行ロボットの要求仕様は以下に示す通りである。一つ目に小型の基準として建築基準法が示す屋内階段 1 段のふみ面の最低値である奥行 21cm に収まるサイズである。二つ目に階段を想定して、撃力発生を繰り返す周波数を高くする。具体的には人と同等の速度で階段を踏破する速度を考え

Conventional Jumping Robot



Proposed Jumping Robot

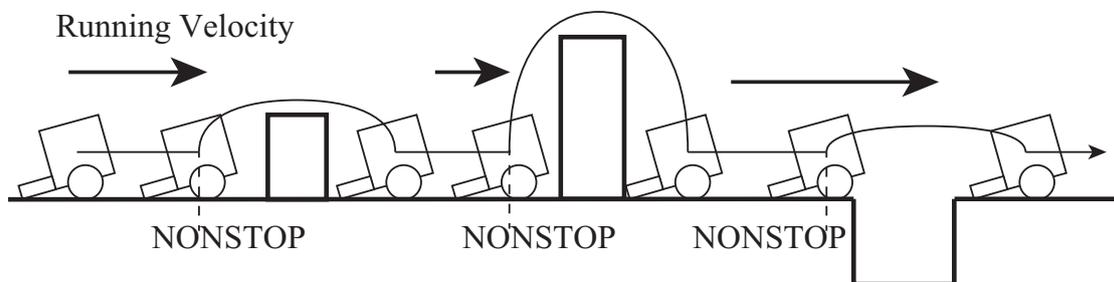


Fig. 1.2: Model of the difference in time and obstacle dimensions required for the jump robot to overcome obstacles.

る。人の踏破速度の基準としてエスカレーターの法定最大速度を用いれば、22cmの高さを1段あたり1.7Hzの周波数での乗り越えを目標とする。三つ目に図1.2下段に示すように走行中に跳躍を行う。具体的には跳躍前後で走行輪を止めることなく、単体の跳躍では到達しえない跳躍達成を目指す。以上より本研究の目的は、段差を含む平面において素早く目的地へと移動可能な小型跳躍走行ロボットの開発である。

1.2 関連研究

跳躍ロボットは数多くの研究があり、その機構はコンパクトな撃力発生装置そのものである。大きく分けて3種類の撃力発生方法が考えられる。一つ目に内燃機関を用いた方法である。Sandia National LaboratoryのHopperは内燃機関を用いて9mの跳躍が可能なロボットである[14]。Hopperをもとに、Boston Dynamics社で開発されたSandFleaは平地を4輪で走行し、内燃機関を用いて建屋の屋根上まで跳躍可能なロボットである[15]。内燃機関を用いることで高い跳躍能力が得られる一方で、安全性の観点から人と接するような環境での運用は難しく、これ以上の小型化は困難であると考えられる。また、制作運用コストが比較的高い。

二つ目に空圧シリンダを用いた方法がある。空圧シリンダを用いた跳躍ロボットとして塚越らが開発したLeg-in-Rotorがある[16]。災害救助用ロボットとして開発されており、平地を2輪で走行し車輪踏破が困難な瓦礫等の段差を、空圧シリンダを用いて0.8mの跳躍踏破が可能である。空圧シリンダを用いる際には空圧タンクが必要となり、小型軽量なメカニズムには向かない。

三つ目に弾性体にエネルギーを蓄積する方法がありこれが一番数多く存在する。階段を跳躍するロボットとして、scoutrobotは2輪で移動し板バネを変形させて階段跳躍踏破ができるロボットである[17]。しかし、一度の跳躍には20秒以上の時間を要する。杉山らは柔軟外骨格を変形させることで移動と跳躍を行うロボットを開発している[18]。外骨格へエネルギーを蓄積することで約0.7mの跳躍を達成している。さらに跳躍に有効な形状を明らかとし、柔軟外骨格のシミュレータを開発している[19]。一方で、柔軟外骨格である円環を安全に制作するためにはある程度の大きさが必要となり、小型化は難しい。執筆現在は販売が終了しているが、Parrot社のJumpingSumoは偏心カムを用いて圧縮コイルばねへエネルギーを蓄積することで0.8mの跳躍が可能な跳躍ロボットであり、商業的に成功した跳躍ロボットの一つである[20]。1回の跳躍には1.2秒程度の時間が必要であり、バッテリー消費が大きく1度の充電で10分ほどしか稼働時間がない。ChoとFearingらの研究グループはパンタグラフ機構を用い

た移動機構を備えた跳躍ロボット JumpRoACH を開発している [21]. 小型で走行中に 0.72m の段差に飛び乗ることができる. 一方で弾性体へエネルギーを蓄積するために 45 秒以上の時間を要する.

これらの関連研究から, 室内階段に収まる小型でありながら, 走行速度を生かした跳躍や, 人並の速度で階段を踏破するような高い繰り返し周波数を持つ跳躍ロボットは存在しないことが見えてくる.

1.3 研究内容

小型かつ走行速度を生かした跳躍や, 繰り返し周波数の高い跳躍を達成するために, 本研究では「跳躍走行ロボット」を開発する. 跳躍走行ロボットを図 1.1 に示す. 本研究における跳躍走行ロボットとは, 跳躍と走行の融合により跳躍と走行がシームレスに切り替えられ, 走行速度を生かした跳躍や, 階段における連続跳躍を指し, 移動ロボットの移動可能範囲を大きく広げることを目的としている. 小型の跳躍走行ロボットを達成するために, 小型の撃力発生装置としてスナップモータの利用を考える. スナップモータはモータと弾性体とそれらをつなぐフレームから構成され, モータによって弾性体を変形させ, あるところで大きく形状が変化する飛び移り座屈現象を利用するコンパクトでシンプルな撃力発生機構である. スナップモータにはモータによって弾性体を曲げ方向に変化させ平面的に座屈を生じさせる平面型と, アーチ形状の弾性体の両端のモータを逆相に回転させることでねじれを伴う空間的に座屈を生じさせるアーチ型の二種類が存在する. 平面型のスナップモータは山田らにより静的なつり合いモデルと共に開発され [22], その後も小型の撃力発生装置として様々なアプリケーションが開発されてきた. 平面型のスナップモータを用いた *kikker* [23] は 191mm の階段を 1.4Hz で踏破する性能を持つ. その後もシミュレータの開発が進み, 定量的に設計されてきた [24, 25]. 一方で *kikker* の本体重量は 14g であり, 跳躍による重力方向の力積は 0.03Ns と小さく, 駆動輪を備えるようなペイロードがない. また要求仕様より, 撃力発生 of 繰り返し周波数は高いことが望ましい. 平面型では座屈を繰り返し生じさせるためには 180 度の区間を繰り返し動作させる必要があり, 跳躍時に利用できるのは半分のみである. 平面型はモータが一つでも撃力を生成できる軽量化が可能であるという利点がある一方で繰り返し周波数はアーチ型と比較し低くなる. 対してアーチ型スナップモータは同様に山田らによって開発され [26], モータを二つ使用することで機構自体の重量が増す一方で各モータは連続回転をすることでモータ半回転毎に 1 回の撃力発生を行うことができ, 回転方向を入れ替える必要がな

く、繰り返し周波数を高めることができる。また、アーチ型の飛び移り座屈では弾性体、座屈によって得られるエネルギーが多いことが経験的に知られていた。以上を踏まえ本研究ではスナップモータの中でも繰り返し周波数が高く、より多くの座屈エネルギーを利用できるアーチ型スナップモータを対象とする。一方で、シミュレータを含めて座屈時の弾性エネルギーの何%が運動に利用できるのかパワーフロー解析が進んでいる平面型と比較し、アーチ型スナップモータにおいてはパワーフロー解析が行えておらず設計方法は試行錯誤的であった。本研究ではアーチ型スナップモータのフレーム変形に着目し筆者の知る限り初めてアーチ型スナップモータの座屈時の弾性エネルギーおよびモータトルクの見積を含むパワーフロー解析を達成した。パワーフロー解析によって、モータトルクに応じた弾性体の選定が可能となり、アーチ型スナップモータを用いた走行跳躍ロボットにおいて高さ 15cm の階段連続跳躍踏破を達成した。また、走行速度の 70%以上を維持した走行中の跳躍を達成した。

1.4 本論文の貢献

本研究によって高い繰り返し周波数を持つ小型撃力発生装置であるアーチ型スナップモータの定量的な設計評価を可能とし、段差を含む平面を移動する小型跳躍走行ロボットを達成した。本研究の貢献を以下にまとめる。

- 弾性体の曲げとねじりを含む飛び移り座屈現象を対象とし、モータトルクと座屈時に得られる弾性エネルギーの関係を明らかとし、そのエネルギー変換効率を評価することでモータ選定および弾性体形状の選定を可能とするパワーフロー解析を達成した。この成果は繰り返し駆動するアクチュエータの評価設計手法を与え、それらを用いる工学の諸分野に対して貢献が期待される。
- アーチ型スナップモータを搭載した車輪移動跳躍走行ロボットを開発し、階段連続跳躍踏破および走行速度を維持した走行中の跳躍を達成した。この成果はロボティクス分野において移動ロボットの応用可能範囲を大きく広げるものである。

1.5 本論文の構成

本論文の構成については以下の通りである。

第 2 章では、本研究で対象とするアーチ型スナップモータのパワーフロー解析を行った。本研究ではアーチ型スナップモータのフレーム変形に着目し、フレーム変形が座屈条件その

ものを緩和していると仮説を立て、このフレーム変形をモータ間距離の変化としてとらえることで実機および既存のシミュレータ上で座屈を達成した。これにより、座屈で得られる弾性エネルギーと必要となるモータトルクの推定を初めて達成した。このフレーム変形を回転関節とスライダジョイントを組み合わせたフレキシブルフレーム機構によって再現することでフレームの耐久性を向上させた。フレキシブルフレーム機構をシミュレータ上に再現することでアーチ型スナップモータの飛び移り座屈現象を含むエネルギーの推定を可能とした。これらを基に投入した電気エネルギーから実際に得られる跳躍運動エネルギーおよび力積測定によるパワーフロー解析を行い、提案するアーチ型スナップモータの定量的評価を行った。力積計測から、地面を押し力積のほとんどを跳躍に変換できていることを示した。これらの成果によって、試行錯誤的であったアーチ型スナップモータの設計方法に対して定量的な指標を与えることが可能となり、小型かつ繰り返し周波数の高い撃力発生装置を設計することが可能となった。

第 3 章では、2 章のパワーフロー解析を用いたアーチ型スナップモータの設計方法を示すとともに、アーチ型スナップモータを搭載した跳躍走行ロボットの繰り返し跳躍性能の評価を行った。2 章のパワーフロー解析を用いて、選定したモータトルク内で弾性エネルギーを最大化するための設計方法を示し、それを基に新たにロボットを作成した。フレキシブルフレーム機構を備えたアーチ型スナップモータにおいて、連続跳躍耐久試験を行い、117 回の連続跳躍を 1 分以内に達成し、最大で 1.9Hz の繰り返し跳躍周波数を達成した。また断続して 400 回以上の跳躍を達成した。パワーフロー解析によって弾性体形状を最適化した走行輪と跳躍機構を合わせた機体で奥行 22cm、高さ 15cm の段差の連続跳躍を達成した。この連続跳躍における力積の値は軽量化による質量減少にもかかわらず 2 章と同等の値を発揮しており、それによって跳躍高さが改善されている。またパワーフロー解析で得られる座屈時のエネルギーに対してその運動エネルギーの変換効率が 13%であり、2 章での 8%との比較評価が可能となった。これらによって、跳躍走行ロボットとして高い繰り返し周波数で連続跳躍が可能であり、階段踏破が可能であることを示し、移動ロボットの移動可能範囲を広げることができた。

第 4 章では、アーチ形スナップモータを取り付けた跳躍走行ロボットを用いて走行中の跳躍を達成した。走行中の跳躍では地面との接触時間が短くなるため短時間で撃力を伝える必要がある。提案ロボットは走行速度の 70%を維持した状態で水平方向へロボット全長に近い跳躍を達成した。また、走行速度が向上した際にも跳躍機構による力積の大きさが落ちないことを実験から示した。また、パワーフロー解析で得られる座屈時のエネルギーに対してその 11%を運動エネルギーに変換できていることがわかった。この成果は目的地へ最短時間で向か

う場合にロボットの取りうる経路を大幅に広げることができる。

2章で示したパワーフロー解析によりアーチ型スナップモータの定量的な設計評価を可能とし、工学分野において小型の撃力発生装置評価解析手法を提供した。このパワーフロー解析によって設計可能となったアーチ型スナップモータによる3章および4章の跳躍走行ロボットの成果によって、図1.1に示すように、ロボティクス分野に対して小型の車輪移動ロボットの移動可能範囲を広げ、ロボットの応用可能範囲を向上させることができる。

最後に第5章では、本研究のまとめと今後の展望について述べる。

また補章では開発した跳躍走行ロボットによる子供と遊ぶインタラクション実験について報告する。

第2章 アーチ型スナップモータのパワーフロー解析

本章ではアーチ形スナップモータのパワーフロー解析について述べる。アーチ形スナップモータは弾性体の両端にモータを取り付け、それらを逆相に回転させることで半回転に1回弾性体の飛び移り座屈現象を生じさせるスナップモータである。本章ではアーチ型スナップモータのフレーム変形に着目し、アーチ型スナップモータの座屈時の弾性エネルギーの推定を含めた入力電気エネルギーから跳躍運動までを計測することで提案スナップモータのパワーフローを初めて解析した。これによって、弾性エネルギーの何%を運動へ利用できるかがわかり、アーチ型スナップモータの設計指針を示すとともに定量的な比較を可能とした。フレーム変形をモータ間距離の変化としてとらえ、フレームの耐久性を向上させるフレキシブルフレーム機構とそのパワーフロー解析への実装方法を示す。

2.1 平面型スナップモータでのパワーフロー解析

初めに、平面型スナップモータにおけるパワーフロー解析の事例を紹介するとともに本研究で対象とするアーチ型スナップモータのパワーフロー解析の困難さについてまとめる。本研究で述べるパワーフロー解析とは、アクチュエータシステムに対して投入するエネルギーからアクチュエータシステムの機序を含む出力運動エネルギーまでの変換効率の解析による定量的なアクチュエータシステム性能解析手法である。入出力エネルギーの変換効率はアクチュエータシステムによって何ができてどれだけのエネルギーが利用できるのかを明らかにする。また、アクチュエータシステムを設計、評価する際には入出力のみならず間のアクチュエータシステムによる機序での変換効率を明らかにすることでその設計指標が得られる。特にスナップモータを対象とした場合のパワーフロー解析とは、ロッド理論に基づいた弾性体座屈時の弾性エネルギー推定を含み、さらに力積およびエネルギーの変換効率の測定に基づいてスナップモータの定量的な性能評価解析手法である。力積を計測することで対象を押し力積を運動へどの程度利用できているかが明らかとなり、撃力による対象とのインタラクションの評価へつな

がる。また、エネルギー変換効率の測定によってスナップモータが有効に利用できる範囲を明らかとできる。これによって現状のアクチュエータシステムとしての評価から改善案を与えるものである。

スナップモータには平面型と呼ばれる曲げ変形のみを利用するものと、本研究で対象とする曲げ変形とねじり変形を同時に利用するアーチ型スナップモータの2種類が存在する。平面型は山田らによって弾性体の幾何学および静的な力学的つり合いモデルと共に報告され [22], その後も跳躍ロボット [27, 23] をはじめ様々なアプリケーションが報告されている [28]. その中で弾性エネルギーを見積もるためのシミュレータも並行して開発されている [24, 25]. これらを通じて平面型のスナップモータではシミュレータを用いて弾性エネルギーを見積もることによって実際に発揮される跳躍や投擲といった運動エネルギーと比較したパワーフロー解析が行われていた。これによって、運動エネルギーの弾性エネルギーに対する変換効率に基づいた設計が可能であった。ここで平面型においてはフレームが変形することで同じモータを用いた場合に、より強い弾性体を変形させられることが知られていた。しかしながらフレームの変形を含まないシミュレータ上においても飛び移り座屈現象が生じており、フレーム変形は制作上の工夫に留まっていた。

対してアーチ型スナップモータは同様に山田らによって開発され [26], モータを二つ使用することで、連続回転をすることでモータ半回転毎に1回の撃力発生を行うことができ繰り返し周波数が高いという特徴がある。また、アーチ型の飛び移り座屈では、ペイロードの無かった平面型と比べて高い撃力が得られている [29]. また、アーチ型スナップモータにおいても平面型と同様にフレーム変形がモータトルク条件を緩和することが知られていた [29]. 一方でアーチ型スナップモータが対象としているねじりを含む3次元的な変形においては飛び移り座屈を含むシミュレーションが達成されておらず [25], アーチ型スナップモータのパワーフロー解析ができていなかった。これは弾性体をロッドとしてモデル化していることで幅や厚みのある実機の場合との差異が曲げ変形に比べてねじり変形を伴うアーチ型スナップモータにおいて顕著であるためと考えられる。そのため、アーチ型スナップモータは撃力の大きさを設計することができず、試行錯誤的に設計するほかないという課題があった。

2.2 アーチ型スナップモータとそのフレーム変形

アーチ型スナップモータとは弾性体の両端にモータを取り付け逆相に回転させることで弾性体の飛び移り座屈現象を生じさせる小型撃力発生機構である。図 2.1 にアーチ型スナップ

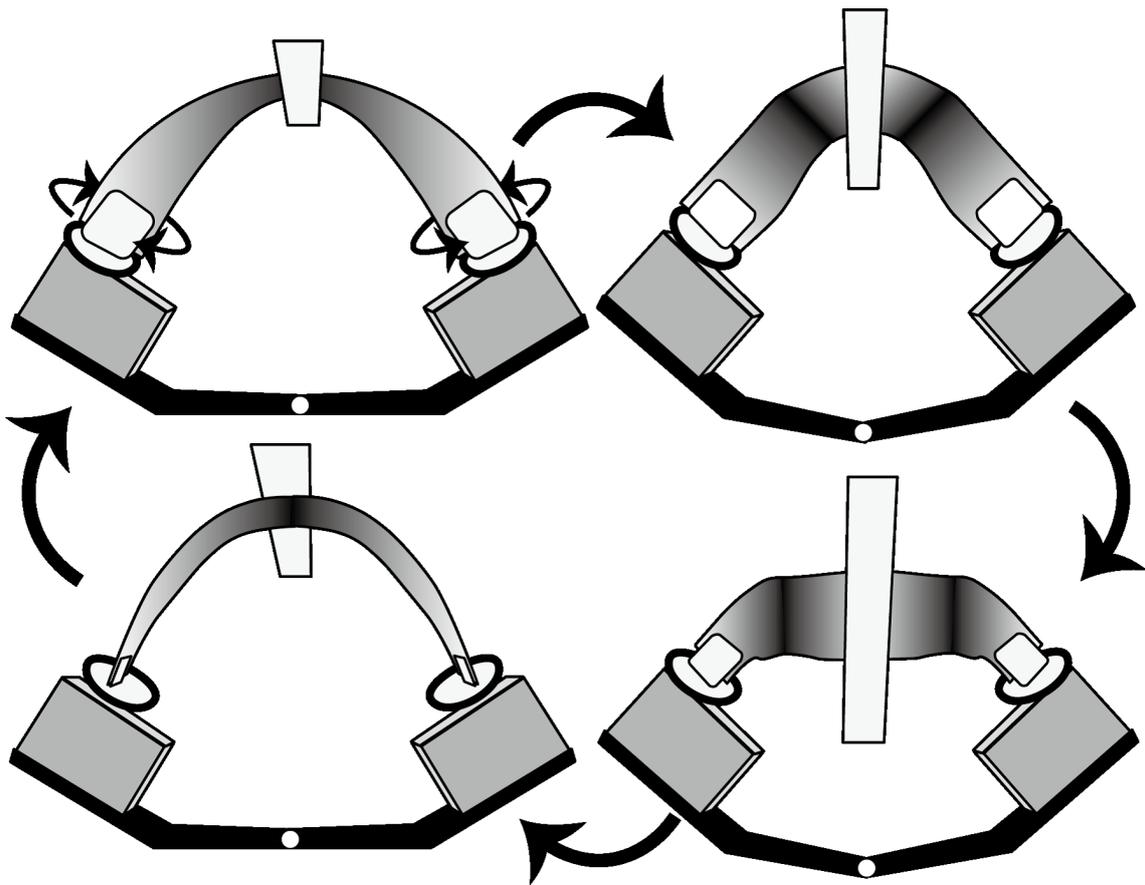


Fig. 2.1: Arched snap motor using two motors. Each end of the elastic strip is attached to a motor, and the motors rotate in reverse phase. One snap through buckling occurs after half a rotation of the motors. In this paper, the right-side shape is called the omega shape and the left-side shape is called the arch shape.

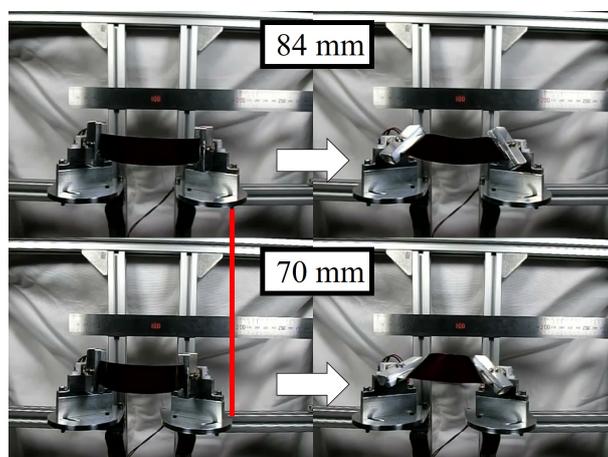
モータの概要を示す。説明のため本研究では図 2.1 の右側形状をオメガ形状、左側形状をアーチ形状と称する。アーチ型スナップモータにおいてもフレームの変形が、同じモータに対してより強い弾性体を変形させられることが知られていた [29]。より詳しく [29] でのフレームの変形をみていく。文献 [29] においてフレームは取り付けられた弾性体によって変形している。弾性体を取り付けたことでモータ間距離が広がっている様子が確認でき、アーチ形状においてモータ間距離が広がっている。また、座屈後においては 3D プリンタでの成型時と比べて 14mm 以上モータ間距離が開いていることが確認できる。3D プリンタによる成形によりファブリケーション能力が高く誰でもどこでも制作できる利点がある。一方で変形により強い弾性体を利用するにはフレームの破損が生じており、耐久性が低いという課題があった。

2.2.1 フレームの柔軟性による撃力生成

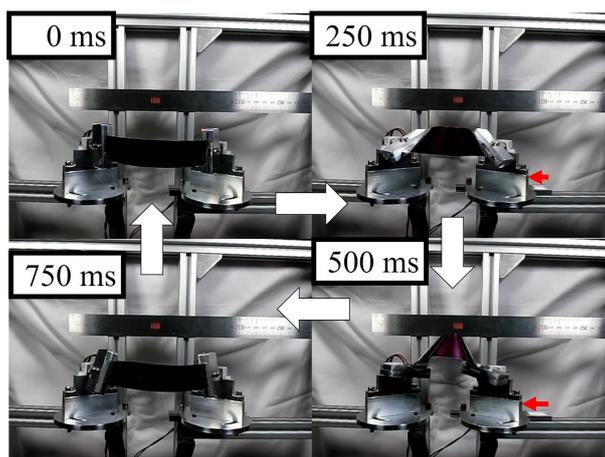
本節ではアーチ型スナップモータの撃力生成に必要な要素を明らかにし、設計要件をまとめる。平面型スナップモータにおいてフレームの変形はモータトルク要件を緩和するものの、シミュレータおよび実機において座屈発生の有無には関係がなく、フレームが変形しない場合においても座屈現象が観測されていた。そのため、既存のシミュレータ上においてこのフレームの変形は積極的には取り入れられてこなかった。アーチ型スナップモータにおけるフレーム変形も同様にモータトルク条件の緩和に着目されていた。しかし、改めてこのフレームの柔軟性による変形はトルク条件以上に座屈発生の有無に関わるのではないかと仮説を立てその確認を行った。その結果以下に報告するように、フレームを固定した場合において実機の観察より座屈が発生しないことを確認した。実機観察よりシミュレータ上において座屈が発生しない原因としてこのフレーム変形が組み込まれていないためであると仮説を立て、フレーム変形を実装することで座屈を含んだエネルギー解析を達成した。以下その実機観察およびシミュレータ上への仮説の実装方法について報告する。

はじめに実機によるフレーム変形の差異による撃力生成の有無について述べる。ここではフレームの変形をモータ間距離の変化としてとらえる。実験の様子を図 2.2 に示す。図 2.2 (A) はモータ間距離を固定した場合であり、図 2.2 (B) はモータ間距離をパッシブなリニアスライダによって縮ませる方向へ変化させた場合を示している。ここで使用しているモータ (Micro Metal Gearmotor HPCB 6V, Pololu Cop.), 弾性体 (SK85-CSPH, JIS), モータの向かい角および入力電力は A と B で同様である。入力電圧はリチウムイオンポリマーバッテリー (リポバッテリー) 2 個を想定し 7.4V 一定電圧を印加し、電流値はモータの最大電流値から 3A までに制限し

第2. アーチ型スナップモータのパワーフロー解析



(A)



(B)

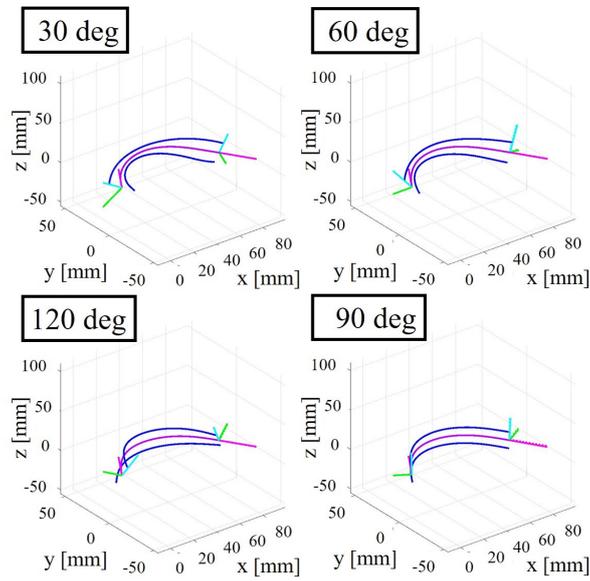
Fig. 2.2: (A) Snap through buckling does not occur because the distance between motors was fixed. The distance between the motors in the upper image is 84 mm, and the distance between the motors in the lower image is reduced to 70 mm. The difference in distance can be seen from the red line. In each case, the motor stalls midway without rotating 180 deg. (B) Snap through buckling occurs because the distance between motors was free to change. The linear slider allows the distance between the motors to vary passively. One side of the elastic strip is painted in color to enhance the visibility of the front and back. The maximum distance between the motors is 84 mm when the leaf springs form the arch shape. The distance between the motors is shorter when the springs have an omega shape. The amount of change is indicated by the red arrows. When the motor rotates 180 deg, the shape changes to an arch shape from the omega shape, and the front and back of the elastic strip is observed to change.

ている。実験に使用した弾性体の寸法は $0.2 \times 20 \times 110\text{mm}$ である。リニアスライダ (SAR209, 株式会社ミスミグループ本社) のストロークは 50mm である。ここで図 2.2(A) の表示長さはモータ間距離である。(A) 上段のモータ間距離 84mm は (B) のリニアスライダでの最大値に合わせている。図 2.2(A) ではアーチ形状からオメガ形状に遷移せず座屈が生じていない。一方で図 2.2(B) ではモータ間距離が 250ms および 500ms で縮んでいることがわかる。これによってアーチ形状からオメガ形状へ遷移が生じており、座屈が発生している。これらの結果から、モータ間距離が一度縮むことによって弾性体を飛び移り座屈させる際に必要となるモータトルクが小さくなることがわかる。これよりフレームを变形させモータ間距離を変化させることで同じモータに対してよりばね定数の高い弾性体を選定することができると分かる。

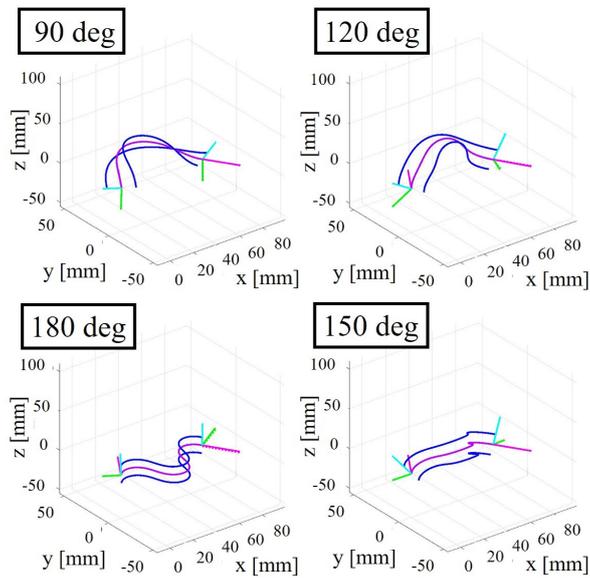
実機の観測においての座屈発生の有無はモータトルク条件の緩和とみることもできる。そこで既存のシミュレータを用いてモータ間距離を固定した際の座屈が生じない現象を改めて確認する。図 2.3 に既存のシミュレータ [30] を用いてモータ間距離を 84mm とした場合 (A) と 70mm とした場合 (B) のシミュレーション結果を示す。モータ間距離の広い、図 2.3(A) ではアーチ形状からオメガ形状への遷移が生じない。一方図 2.3(B) ではオメガ形状を維持し飛び移り座屈が生じない。図 2.3(A) の様子は実機実験による図 2.2(A) の様子と同様の結果としてみることができる。一方で図 2.3(B) のシミュレータ上の形状は図 2.2(A) での結果と大きく異なる。この差異は、シミュレータ上ではモータトルクに対する制限がない状態であるために生じると考えられる。一方でシミュレータ上においては図 2.3(B) の組み合わせにおいて座屈が生じず、その後も弾性体根本を回転させた際にはアーチ形状へと緩やかに変化していく。とすれば、実機においてモータトルクが上昇した場合においても座屈は生じ難いことが予想される。これによってフレームの变形によるモータ間距離の変化は平面型で見られるようなモータトルク条件の緩和のみならず、座屈発生そのものの条件を緩和していると考えられる。

ここで、モータトルク条件の緩和に関してより詳しくシミュレータから考える。モータ間距離を変化させた場合のモータ回転角度に対するモータトルクおよび弾性体に蓄えられるエネルギーを図 2.4 に示す。モータの回転角度は 0 度でアーチ形状を表し、図 2.3(B) での角度と同様の形状が得られている。図 2.4 中の各色はモータ間距離を表しており、 61.9mm は後述する 2.2.4 節のパワーフロー解析より得られたモータ間距離である。図 2.4 より、モータ間距離が異なる場合でも全体の形状は類似しており、モータ角度に対する弾性エネルギーおよびモータトルクの上昇、減少傾向はほぼ一致している。特にモータトルクのピークは全ての場合において 105 度付近で生じており、オメガ形状へと遷移途中にモータトルクのピークが生じることがわかる。さらにモータ間距離が縮まることで 105 度付近にあるモータトルクのピーク

第 2. アーチ型スナップモータのパワーフロー解析



(A)



(B)

Fig. 2.3: Illustration of simulation, where the elastic strip does not snap through buckling. In each plot, the red curve shows the backbone shape of the elastic strip, and the blue curves show its edges. The pair of red, green and blue lines at the end of each set of curves show the orientation of the ends of the elastic strip. (A) Distance between motors is 84 mm. (B) Distance between motors is 70 mm.

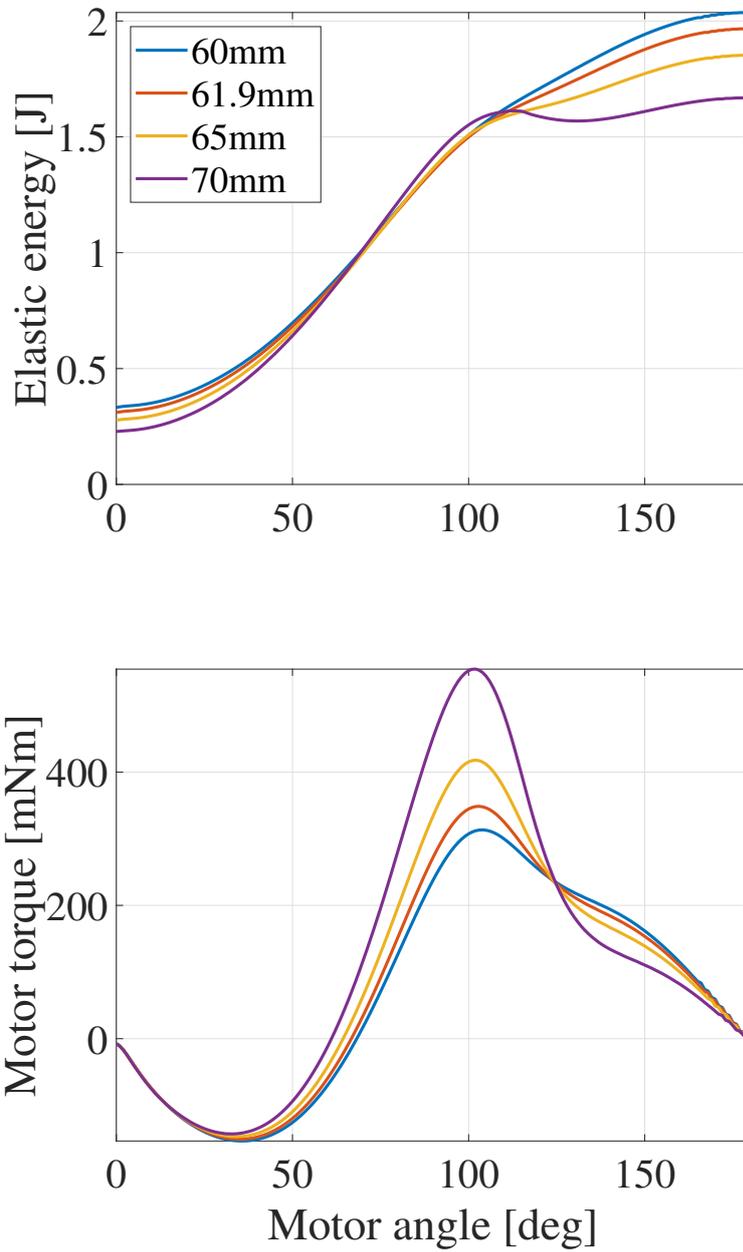


Fig. 2.4: Elastic energy produced by motor angle and motor torque versus motor angle. The line colors show the distances between motors on the legend. The red line shows 61.9mm on Sec. 2.2.4. There are the maximum motor torques near 105 deg.

第 2. アーチ型スナップモータのパワーフロー解析

が落ちることがわかる。図 2.2(B)においてリニアスライダによってモータ間距離は 84mm から 34mm まで変化可能であったため、図 2.4 に示すように 70mm で固定した場合よりも必要トルクが下がったためにオメガ形状への遷移が生じたと考えられる。また、モータ角度を変化させた際にトルクのピーク値を超えるとモータトルクは減少する傾向がみられる。これらより、モータ間距離を縮めることはオメガ形状へ遷移途中に生じるモータトルクのピークを下げる効果があり、同じモータであってもより強い弾性体を座屈させるのに有効に働くことがわかる。

シミュレータの結果を踏まえ、シミュレータ上で飛び移り座屈形状が得られない現象について考察していく。シミュレータ上の座屈が得られないのは、エネルギー的な遷移を生じえないことによるものと考えられる。例えば図 2.3(B) の 180deg においては Ω のような形状が見て取れ、エネルギー上は y 軸正方向に対してアーチ形状に遷移したほうが低くなる。図 2.4 においてモータ回転角度 0 度と 180 度がアーチ形状とオメガ形状であり、そのエネルギー差はモータ半回転の中で最も大きくなる。ところが既存のシミュレータ [30] においてはアーチ形状への遷移は生じず、図 2.3(B) 上の 120deg から 180deg に見られるように Ω の形状を維持し回転が続く。これはシミュレータにおいてモータの回転角を変化させた際には変化前の力トルクの値を初期値として用いるため、異なる極所解へ遷移し難いため生じていると考えられる。実機においてはモータ間距離が一度縮んだのちにモータ間が広がりながらの座屈現象がみられる。モータ間距離が一度縮んだことでオメガ形状へ蓄えられたエネルギーをモータ間距離が広がることで解放されアーチ形状への遷移が促されていると考えられる。

ここで、撃力生成装置として撃力の最大化に関して考察する。撃力最大化を目指せば座屈が生じる前後でのエネルギー変化が大きくなるように設計されるべきである。例えばオメガ形状のエネルギーを蓄えるためにモータ間距離を短く固定しておき、弾性体へ最もエネルギーが蓄えられた段階でモータ間距離の固定を解放しアーチ形状へ遷移させることで撃力の最大化が計れる。つまり、この場合においては平面型の飛び移り座屈と同様の飛び移り座屈となる。であるならば弾性体のねじり方向へモータトルクを加えるアーチ型スナップモータよりも、曲げ方向へトルクを加える平面型を利用したほうが、座屈発生が安定化すると考えられる。アーチ型スナップモータの利点としては、平面型と比べて繰り返し周波数が高いことがあげられる。またアーチ型スナップモータではオメガ形状からアーチ形状へと平面的な曲げとしての変化だけでなく、ねじりの変化も併発することで平面型と比べて撃力を取り出す時間を長く取れる利点がある。また、跳躍や小型機器への搭載を想定する際には軽量化、小型化が求められる。その場合にはモータ間距離を固定、変化させるために追加のアクチュエータを用い

るのは好ましくない。また撃力の繰り返し周波数を高めることを考えると弾性体変形を行うアクチュエータとフレームの固定状態を変化させるアクチュエータの同期を取るのは困難であると考えられる。これをまとめると、シンプルなメカニズムでモータ間を変化させることが望ましく、座屈前においてはなるべくモータ間距離が短いことが望ましいという要件が浮かび上がる。

2.2.2 フレーム変形の実装による座屈生成

フレーム変形がアーチ型スナップモータの座屈を発生させるという仮説を実証するために実機およびシミュレータ上においてモータ間距離の変化を実装した。図 2.5 にモータ間距離を変化させた実機の座屈の様子とモータ間距離の変化を実装したシミュレータでの形状を並べて示す。表示しているタイムスタンプは実機動画における時間を示している。モータ間距離が一度縮み、その後モータ間距離が再び広がることで座屈が生じている様子が実機およびモータ間距離の変化を実装したシミュレータ上でみることができる。また、その際の形状は座屈前後においても類似性が見られる。モータ間距離の変化が座屈を生じさせているという仮説を入れることで実機のみならずシミュレータ上でも同様の結果が得られた。ここで、実機へのモータ間距離の変化はフレキシブルフレーム機構と呼ぶフリー回転関節とスライダ関節を組み合わせた機構によって実装を行った。また、このフレキシブルフレーム機構をシミュレータ上へ実装した。それぞれの実装方法の詳細は後述する。

ここまでの結果をまとめる。図 2.2 に示す実機実験および図 2.4 のシミュレーションより、フレームがモータ間距離を縮めるように変化することで弾性体を飛び移り座屈させるために必要となるモータトルクが低くなることがわかり、フレームの柔軟性が撃力生成条件を緩和することが示唆される。また、図 2.3 に示すシミュレータでの結果より、モータ間距離を縮めた後に広げることで飛び移り座屈を促していると考えられる。そしてモータ間距離の変化が座屈を生じさせる仮説を取り入れることで図 2.5 に見られるようにアーチ型スナップモータの座屈をシミュレータ上においても確認することができた。ここで図 2.4 より、モータ間距離は短いほうが弾性体に蓄えられるエネルギーは大きく、座屈時に得られるエネルギー落差を大きく得るためにモータ間距離は広がり過ぎない必要がある。そしてこれらはフレームを変形させることによって得られるが階段跳躍のように連続して利用することも考えればフレームの耐久性も求められる。これらに加えて機構を構成する際にはシンプルな構造が望ましく、跳躍へ応用する際には軽量であることも同時に望ましい。これをまとめて、アーチ型スナッ

第2. アーチ型スナップモータのパワーフロー解析

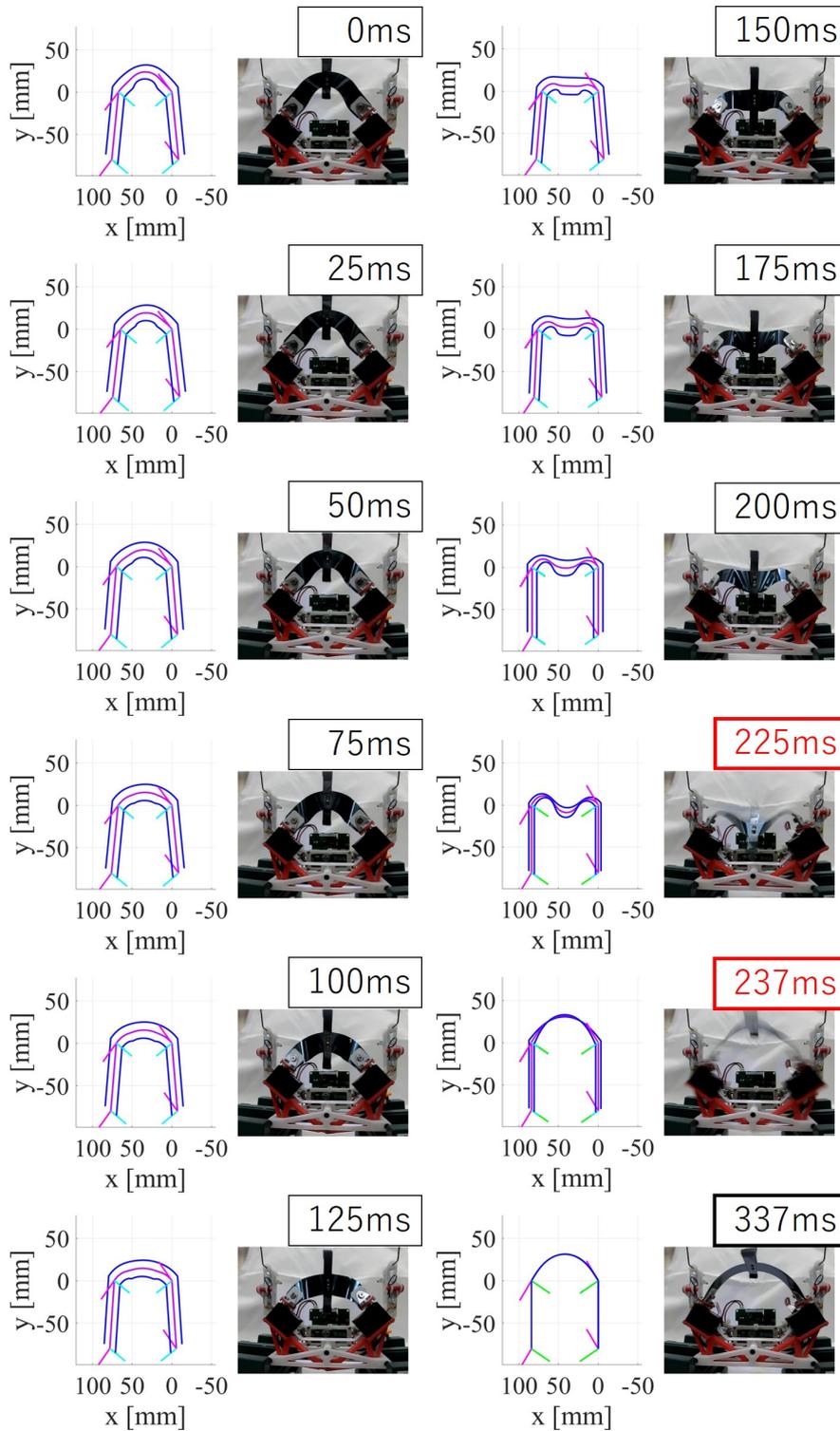


Fig. 2.5: Figures of shapes of the simulator and real mechanics for comparing.

プモータの設計要件として以下の4点が挙げられる。

- 座屈の発生を安定化させるため、モータ間距離が縮む必要がある。
- 座屈時に得られるエネルギー高めるためにモータ間距離は広がりすぎない必要がある。
- 機構は連続使用に耐えられる耐久性が必要である。
- これらの機構はシンプルかつ軽量に実装されるのが望ましい。

2.2.3 フレキシブルフレーム機構

本節では2.2.1節を受けて開発したモータ間距離を受動的に縮めるフレキシブルフレーム機構について説明する。フレキシブルフレーム機構の概要を図2.6に示す。フレキシブルフレーム機構は従来のアーチ型スナップモータのフレームを置き換え、座屈生成を安定させるとともに撃力を高めるためのシンプルなフレームである。フレキシブルフレーム機構は自由回転関節とパッシブなスライダ機構およびモータ間距離の変化量を抑えるトッパーから構成される。フレキシブルフレーム機構は自由回転関節軸によって固定され、ストッパーとして外部のフレーム等を利用することができる。特に跳躍走行ロボットへの実装においては、回転関節軸によってロボット本体に接続され、ストッパーはロボットのフレームを利用できる。ここでストッパーをアーム付近に用いて左右のモータを固定するフレームをつながない実装や図2.2(B)のように直動のスライダによる実装も可能である。しかし、その場合組立誤差や走行中の慣性等で座屈発生位置が都度変化してしまう可能性がある。中間点にスライダジョイントを用いて左右のフレームをつなぐことで、飛び移り座屈が生じる弾性体の中心位置を常にモータ間の中間地点にできる利点がある。さらに中間点にストッパーを用いることでモーメントアーム長が伸び本体フレームであるストッパーにかかる反力を軽減できる。また、パッシブなスライダ機構と自由回転関節は、実機においてはスライダ穴と回転関節によって実装可能であり、リニアガイドに比べてもシンプルかつコンパクトに実装できる。従来型のモータ間距離をフレームの柔軟性によって広げていた場合と比較し、フレーム自体が変形をしないため、耐久性が大きく向上している。また変形を伴わないためフレーム構成材料も自由に選択できる。モータ間距離をパッシブに縮めることで弾性体変形に必要なモータトルクの低減を達成している。対して、従来の3Dプリンタで作製したフレームと比較すると構造のシンプルさを失っており、比較した際の製造上の困難さが上がっている。また、構成部品の増加による重量増加が生じ、素材による軽量化との組み合わせによって重量が決定されるた

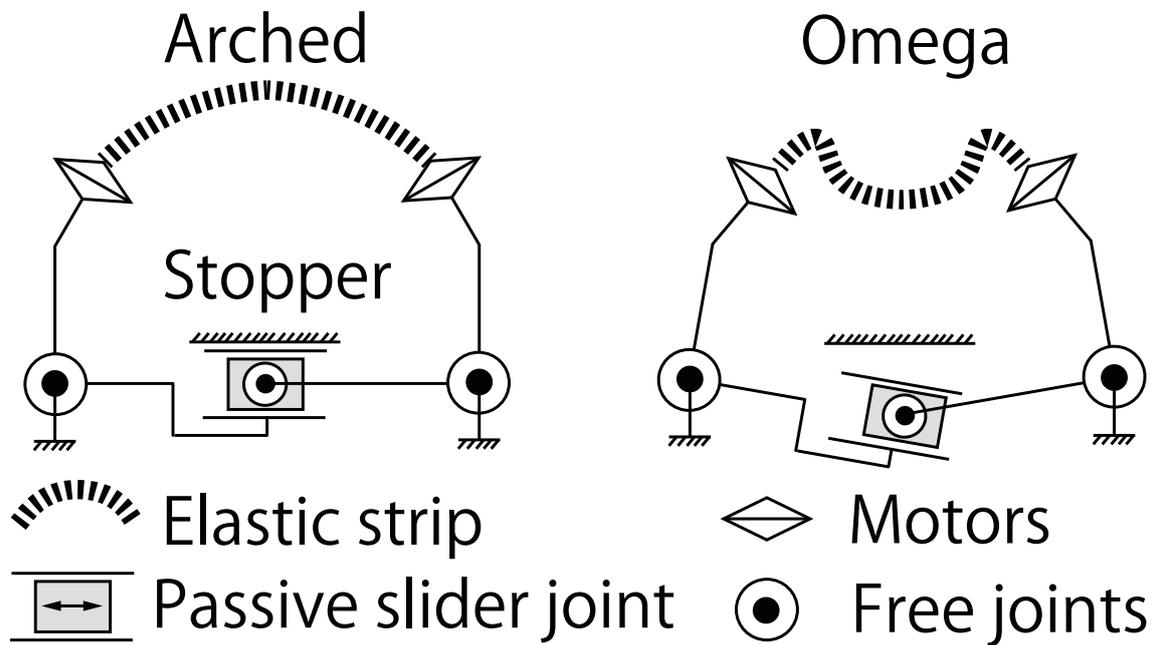


Fig. 2.6: Flexible frame mechanism for passively changing the distance between motors with a sliding joint and a stopper. The distance between the motors is greater in the arch shape. The slider is configured so that the buckling point of the elastic strap is at the center of the distance between the motors.

め、最軽量化を目指す最には製造上の工夫が必要となる。一方で従来のフレーム変形と耐久性を両立するために断面形状を試行錯誤的に決定していた手法と比較すると、スライダジョイントの可動域を確保すればよいためフレーム形状の設計はシンプルになる。

図 2.7 にフレキシブルフレーム機構によって座屈が生じている様子を示す。図 2.7 中の数値は映像のフレーム数を示しており、映像は 240fps で撮影しているため 1 フレームあたり約 4.2ms が経過している。図 2.7 の右上を 0 として 6 フレーム前の画像が左上である。6 フレーム前ではモータ間距離が縮みフレームがストッパーから離れている様子がわかる。また、変形が急速に始まる 0 フレームにおいてはストッパーに当たりモータ間距離が制限され、オメガ形状を維持することでストッパーがない場合と比較しエネルギーが高まると予想される。また、その場合であっても飛び移り座屈が発生しており、フリージョイントによってオメガ形状でモータ間距離が縮んだ後に広がることで座屈を誘発していることが確認できる。フレキシブルフレーム機構はストッパーを用いることでオメガ形状に蓄えられるエネルギーを高めながらアーチ形状への遷移も同時に達成している。これによってストッパーがない場合に比べて座屈中のエネルギー差が高まると考えられる。ここで、座屈が生じた際の撃力はアーチ型スナップモータ自身にも反力として加わる。この時座屈直前までフリージョイントによってフ

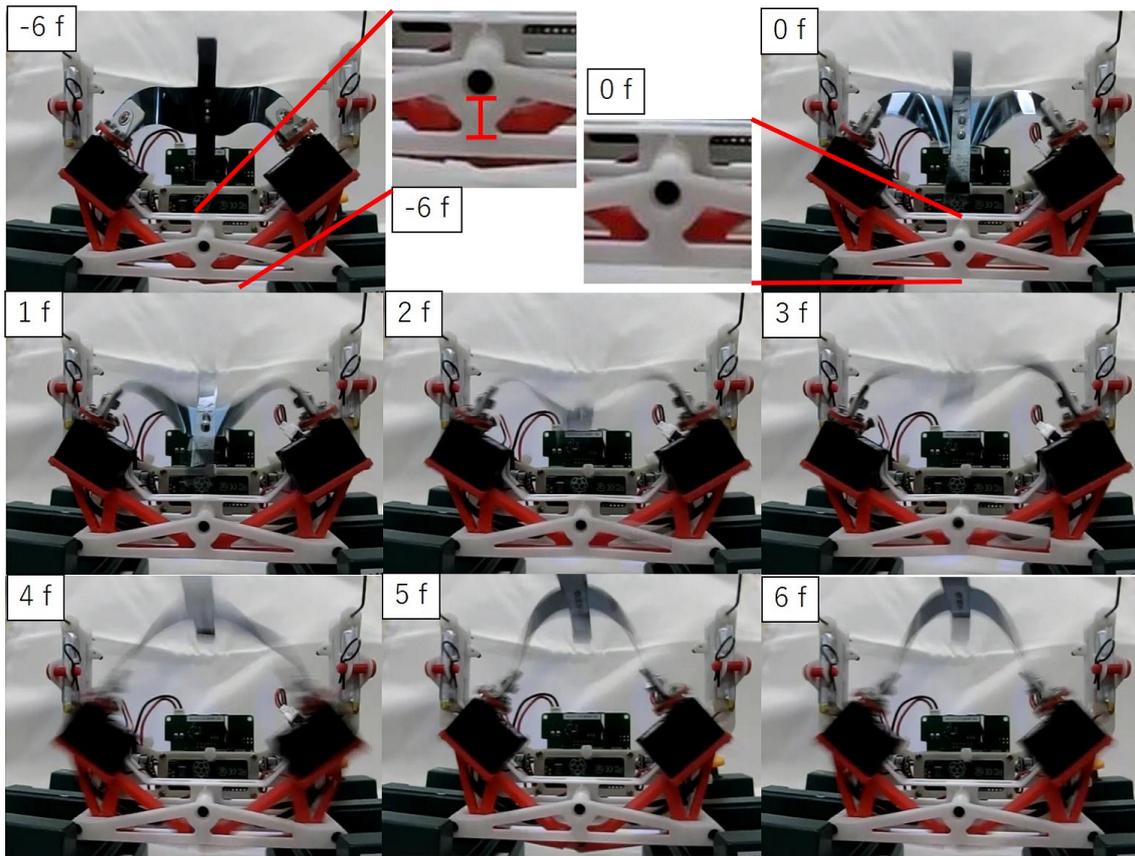


Fig. 2.7: The role of a stopper at the flexible frame mechanism is durability and greater getting buckling energy. The numerical value in the image is the number of frames of the moving image, and since it was shot at 240 fps, about 4.2 ms has passed per frame.

第 2. アーチ型スナップモータのパワーフロー解析

フレームがストッパーから離れていることから座屈発生直前において過剰な反力が本体フレームやモータギアにかかることを防止していると考えられる。

フレキシブルフレーム機構は要求仕様を満たしたうえで以下に示す利点がある。

- フレキシブルフレーム機構はパッシブな回転およびスライダジョイントによってモータ間距離を縮めることで変形に必要なモータトルクを下げるとともに座屈の発生を安定させる。
- フレキシブルフレーム機構はストッパーを用いてモータ間距離を制限することで、より高い撃力を取り出すのに有利に働くと考えられる。
- フレキシブルフレーム機構はフレーム自体の変形を伴わず、フリージョイントによって過剰な反力を抑制していると考えられ、従来手法と比較して耐久性が向上している。これはフレームを構成する素材を自由に選択できることにもつながり、ジュラルミン等軽量かつ高強度なフレームを構成できる。
- フレキシブルフレーム機構は実装においてスライダ穴と自由回転関節から構成できるため、柔軟性を維持するためにフレームの断面形状および材質を試行錯誤的に決定していた従来手法と比べてシンプルに実装できる。

2.2.4 フレーム変形のシミュレータへの実装

本節ではフレーム変形に伴うモータ間距離の変化をシミュレータへ実装する方法について説明する。弾性体のシミュレーションには本研究室で開発したシミュレータを用いる [30]。本シミュレータは弾性体の端点位置および姿勢を与えることで弾性エネルギーが最小となる形状を推定できる。シミュレータにおいて弾性体は複数の剛体リンクとばね関節によって表現される。ここで、ばね関節のばね定数は弾性体形状および材料から決定される。シミュレータによって、端点位置姿勢を決定した際の弾性体の形状および蓄えられる弾性エネルギー、その形状へ固定するための端点にかかる力トルクの推定が可能となる。またそれらの力トルクに対する位置姿勢の精度は長さ 150mm を 50 個の剛体リンクへ分割した際に数%に留まっている [31]。また、曲げと比較した際、わずかにねじりの精度が低くなることが知られている [31]。弾性体端点での拘束トルクを推定できるため、必要なモータトルクがわかる。これによってモータを選定可能となる。従来のシミュレータでは図 2.3 に示したように座屈を生じさせることができなかった。そこで実機と同様にモータ間距離を変化させる仕組みを既存のシミュ

レータに実装する。本研究では提案するフレキシブルフレーム機構をシミュレータに実装することでアーチ型スナップモータの飛び移り座屈が確認された。

フレキシブルフレーム機構の実装

本研究では厳密な形状および弾性エネルギーを求めるのではなく、座屈前後でのエネルギー差をある程度推定することを目標としている。そこで厳密な推定を目指すのではなく、リーズナブルにフレキシブルフレーム機構をシミュレータに実装することを目指す。フレキシブルフレーム機構によって変化するのは弾性体の端点位置と姿勢でありモータ固定位置のアーム角度 θ_z によって決まる。提案するフレキシブルフレーム機構は自由回転関節で構成されるため、回転関節位置でのモーメント τ_a の値はゼロとなる。そこで本研究ではアーム角度 θ_z を1度ずつ変化させ都度形状シミュレーションを行う。自由関節でのモーメントが $\tau_a \neq 0$ である場合に角度を1度変化させて再度計算する。これを繰り返すことでモーメント τ_a が0付近となる角度を求める。 τ_a の計算に用いるパラメータを図 2.8(A) に示す。 τ_a は以下の式で求められ、

$$\tau_a = \tau_z - f_x l_a \cos \theta_z + f_y l_a \sin \theta_z,$$

ここで τ_z は τ_a と同軸上の弾性体端点位置での弾性体固定トルク、 F_x および F_y は弾性体端点位置での弾性体固定反力、そして l_a は自由回転関節から弾性体端点までのアーム長である。本研究では τ_a の符号が反転した角度を0付近として採用した。図 2.8 (B) は提案するシミュレータによって θ_z の値を1度ずつ変化させた場合の τ_a の値である。図 2.8 (B) を例にとれば、 θ_z が9度で符号が反転しているため、 θ_z を8度として端点位置を決定する。

座屈時の弾性エネルギー解析

本節では3章にて後述するプロトタイプ II [32] とおおよそ同じ大きさである $0.2 \times 20 \times 110 \text{mm}$ の弾性体に対してシミュレーション上へフレキシブルフレーム機構を実装した結果を報告する。弾性体の弾性エネルギーは弾性体の材質および形状から計算される。弾性体の弾性パラメータは SK85-CSPH (JIS) を用いる。弾性体形状は厚み t 幅 w 長さ l によって決定される。弾性エネルギーは断面二次モーメントに比例する。長方形断面において、断面二次モーメントは厚み t の3乗に比例するため、弾性体形状の選定には厚み t を選定後幅 w 、長さ l を調整することで行う。形状の選定には使用するモータのトルク内において座屈前後での弾性エネルギーの差を大きくすることで行う。詳細な設計手順については3章で取り扱う。本節ではフレキシブル

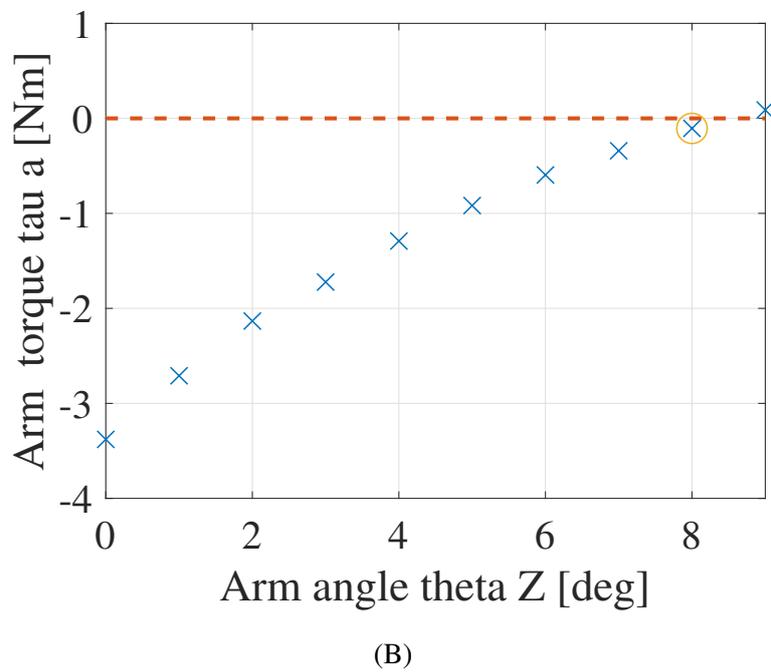
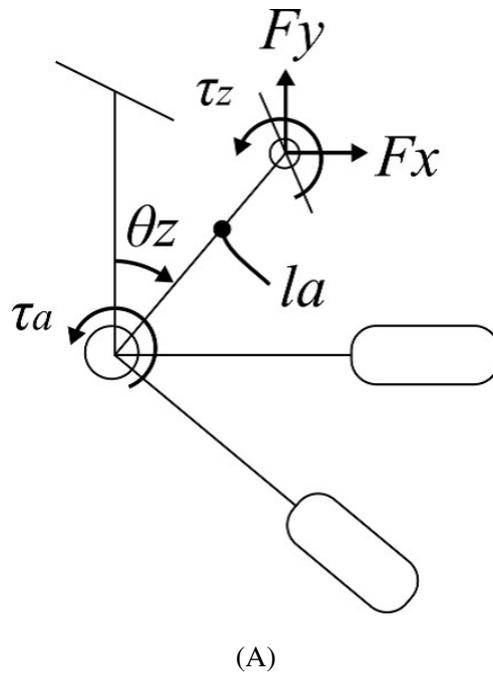


Fig. 2.8: (A) Parameters of the moment at the free joint position. θ_z is the arm angle, τ_a is the moment at the free joint position, τ_z is the motor torque at a fixed position on the same axis as τ_a , F_x and F_y are forces at the fixed motor position, and l_a is the arm length. (B) Estimate of arm angle θ_z using τ_a . We can determine θ_z as 8 deg, at which the value of τ_a exceeds 0 by increasing θ_z .

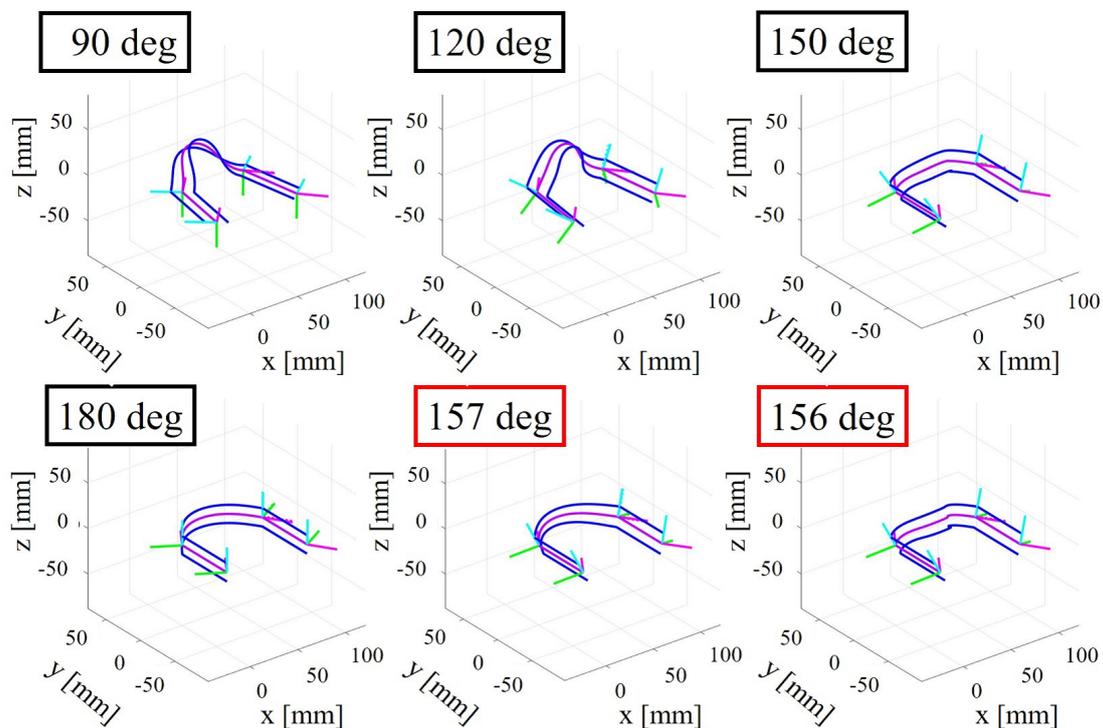


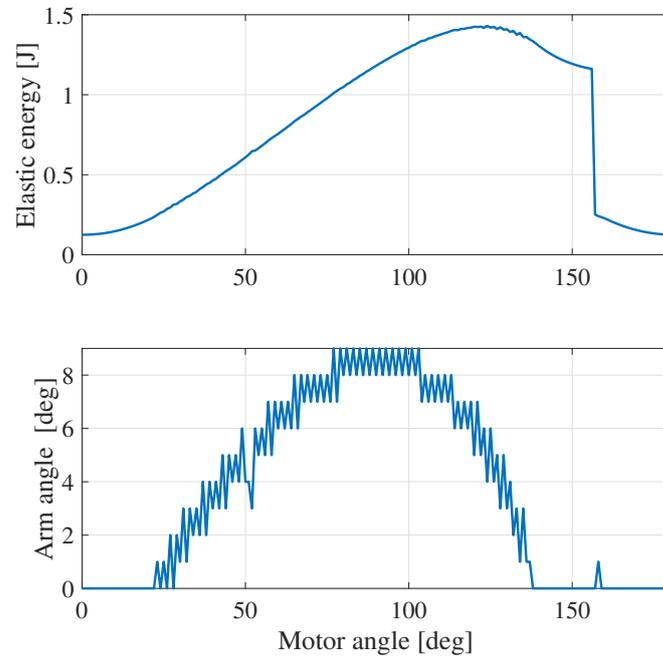
Fig. 2.9: The shape of emulated flexible frame mechanism. Snap through buckling occurs at 156 deg to 157 deg.

フレーム機構による座屈の可否の確認を行った。その他シミュレーションで用いるパラメータは図 2.7 の実機に合わせてモータ間距離は 84.2mm，モータ向かい角は 57.5 度，アーム長さは 80.2mm である。フレキシブルフレーム機構を搭載したシミュレータによる形状推定結果を図 2.9 に示す。解析結果には弾性体だけでなく回転関節からモータ固定位置までのアーム形状も描写している。アームが一度縮み，モータ角度が 156 度から 157 度において形状変化が生じており座屈が確認された。

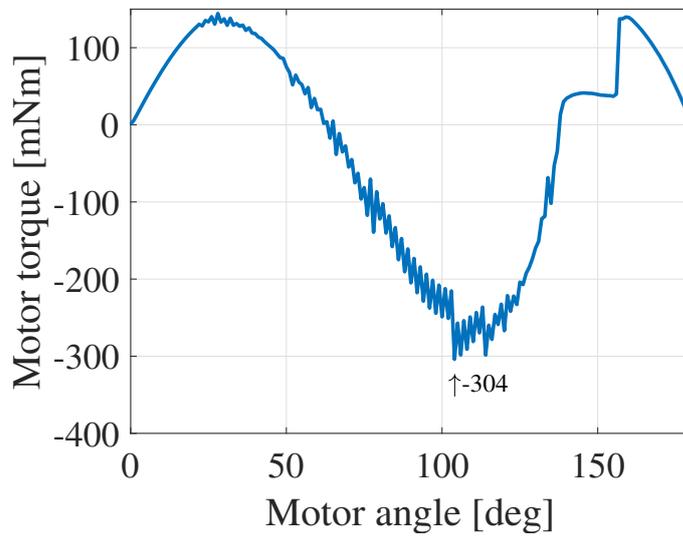
モータ角度に対する弾性体の弾性エネルギーおよびアーム角度の値を図 2.10 (A) に示す。アーム角度に着目すると，座屈前に一度アーム角度が上昇しモータ間距離が縮み，座屈前においてアーム角度 0 度付近に来ることで開ききった状態になっているとわかる。この結果は図 2.7 の実機での様子とも一致する。また，最大のアーム角度は 9 度であり，アーム長さ 80.2mm であるため，最短のモータ間距離は図 2.4 にも示した 61.9mm となる。モータ間距離が縮むことでオメガ形状への遷移が生じたと考えられる。

座屈時のエネルギー差は 156 度と 157 度での値の差から 910mJ であった。より細かく弾性エネルギーを見ていく。弾性体に貯められるエネルギーはアーチ形状のような長方形短辺と並行な

第2. アーチ型スナップモータのパワーフロー解析



(A)



(B)

Fig. 2.10: (A) Elastic energy produced by motor angle and arm angle. The buckling energy was 910 mJ. (B) Motor torque versus motor angle. The maximum motor torque was 304 mN · m at 105 deg.

軸での曲げ，長方形長辺と平行な軸でのねじりおよび厚み方向と平行な軸での曲げである．この時厚み方向軸での曲げはほとんど生じず，座屈前後でのエネルギー差は0.05mJにも満たない．短辺軸での曲げによるエネルギー差が846mJと支配的であり，ねじりによるエネルギー差は64mJと曲げに対して13倍の開きがある．この時座屈前後でのエネルギーはそれぞれ合算されるため単純に差の足し合わせにはならないことに注意されたい．曲げに関する力トルクの誤差はわずか数%に留まっており [31]，今回のシミュレータによるエネルギーの推定結果は誤差が最大限乗ったとしても10%程度と予想される．これよりフレキシブルフレーム機構を搭載した解析によって座屈時のエネルギーを見積もることが可能となった．モータ回転角度に対するモータトルクを図2.10 (B)に示す．アーム角度を1度刻みで変化させているため値にはある程度の幅がある．図2.10 (B)においてモータトルクの最大値はモータ回転角度105度において304mN・mであった．トルクピークは座屈が生じるより前のモータ角度で生じており，座屈前ではトルクの値は低くなっている．これは座屈前の形状でキープし，撃力が必要なタイミングで解放を行うような運用において有利に働く．ここで，モータ回転角度に対する弾性体に貯まるエネルギーのうち曲げとねじりを図2.11にそれぞれ示す．ここで，座屈が起きた際には曲げによる弾性エネルギーが優勢なことがわかる．一方でモータトルクが最大値をとる付近においてねじりの値が曲げよりも大きくなっている．モータトルクが最大値をとる付近においてアーム角度が内側になりモータ間距離が縮んでいる．また，アーム角度は1度刻みで変化させており，回転関節でのトルク符号反転前の値を用いているため，モータ間距離は実際よりも開いた状態となる．これによって実際よりもモータトルクは高い値が推定される．また，モータトルクが足りない場合においてはさらにモータ間距離が縮むことも考えられる．そのため，実装上スライダ関節はアーム角度の最大値以上に変形できる余裕を持つことでモータトルク最大値における制限は緩和できると考えられる．モータ角度毎のトルクが推定できるため，必要な運用周期に合わせてモータトルクがモータ性能を超えない範囲で自由に選定することが可能となった．

2.3 パワーフロー解析

本節では，アーチ型スナップモータにおけるパワーフロー解析を取り扱う．改めて本研究で述べるパワーフロー解析とは，アクチュエータシステムに対して投入するエネルギーからアクチュエータシステムの機序を含む出力運動エネルギーまでの変換効率の解析による定量的なアクチュエータシステム性能解析手法である．特にスナップモータを対象とした場合のパワー

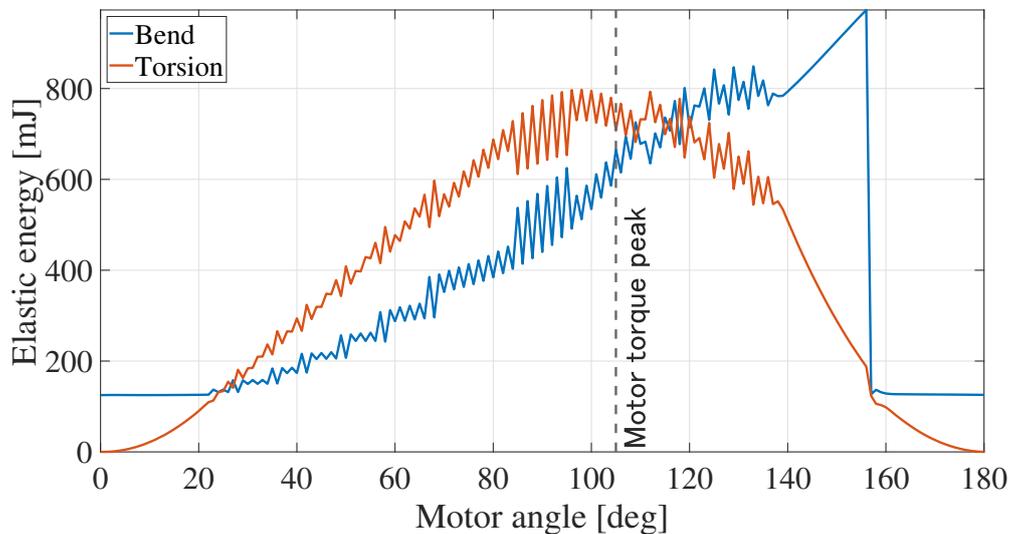


Fig. 2.11: The bend and torsion part of elastic energy produced by motor angle. The maximum motor torque was caused at 105 deg.

フロー解析とは、ロッド理論に基づいた弾性体座屈時の弾性エネルギー推定を含み、さらに力積およびエネルギーの変換効率の測定に基づいてスナップモータの定量的な性能評価解析である。これによって現状のアクチュエータシステムとしての評価から改善案を与えるものである。平面型において座屈エネルギーの見積および出力運動エネルギー変換効率の測定から設計指針を示しており、このパワーフロー解析によって定量的にスナップモータの設計が行われていた。そこで本節では、前節のアーチ型スナップモータによる座屈時の弾性エネルギー推定を含めた運動エネルギーまでの変換効率を測定するパワーフロー解析を行う。これによって、推定される座屈時の弾性エネルギーの何%を運動へ変換できるのかを明らかにすることで、跳躍高さの見積および性能評価を行う。本研究では入力電気エネルギーから出力として跳躍運動エネルギーを測定しその変換効率を考える。さらにロードセルを用いて発揮されている力を時間積分することで力積を計測し、発揮される力積が跳躍にどれだけ利用できるか考察していく。これによってアーチ型スナップモータの定量的な設計指針確立を目指す。

2.3.1 エネルギー効率測定

本節ではアーチ型スナップモータのエネルギー効率の測定を取り扱う。2.2.4節で示したシミュレーションによる座屈エネルギーすべてを利用できるわけではない。そこで実際に座屈による運動エネルギーおよびモータに入力した電気エネルギーを測定することでエネルギー変換効率を測

定する。これによって提案するアーチ型スナップモータの運動エネルギーへの変換効率がわかり、定量的評価が可能となる。また、利用できるエネルギーの割合がわかれば必要エネルギーを得るための弾性体形状を推定できる。運動エネルギーへの変換はエネルギー保存則より跳躍高さを計測することで必要となる運動エネルギーを求めることで行う。図 2.12(A) に測定実験の概要を示す。モータへの入力エネルギーは直流安定化電源 (PMX18-5A, 菊水電子工業株式会社) を用いて 7.4V の一定電圧を加えた場合の電流値をリアルタイム制御器 (sBOXII, 株式会社エムアイエス) を用いて 1000Hz の周期で測定することで行う。跳躍ロボットは文献 [32] の 3 章で示すプロトタイプ II を用いる。スナップモータに搭載されたモータは KRS-3204 ICS サーボモータ (近藤科学株式会社) である。最大トルクは 912mNm であり、2.2.4 節のモータ最大トルク 304mNm を上回っている。弾性体は 2.2.4 節で対象とした 0.2×20×110mm の SK85-CSPH(JIS) を用いる。飛び移り座屈の変化を地面へ伝えるため、地面と接触するブレードと呼んでいる弾性体の長さ方向中心に、弾性体長さ方向に対して垂直に取り付けられる部品を備えている。ブレードの大きさは 1×10×85mm であり、弾性体を挟み込む形で 2 枚のブレードを使用する。素材はポリカーボネートを用いて、ブレード先端部には地面との摩擦を増やすためゴムシートが取り付けられる。跳躍高さの測定には高速度カメラ (FASTCAM Mini UX, 株式会社フォトロン) を用いて AR マーカ (6D-Marker, 株式会社フォトロン) を撮影することで行う。この AR マーカは位置だけでなく、姿勢を測定できるため、跳躍高さはロボットの傾きも考慮して計測される。高速度カメラの撮影開始トリガはリアルタイム制御器から行うことで測定時間を合わせている。

図 2.13(A) に測定開始からの経過時間に対する入力電流および跳躍高さを示す。図 2.12(B) にロボットが跳躍する様子を示す。入力電気エネルギー E_i は入力電流 I_i と電圧 V_{const} をかけたものを時間積分することで

$$E_i = \int_{t_0}^{t_1} V_{\text{const}} I_i dt,$$

と求められる。ここで、 t_0 はモータ入力開始時刻であり t_1 はモータ入力を終えた時刻である。モータへの入力時間 $t_1 - t_0$ は座屈を安定して発生させるため十分長い時間を取っている。そのため図 2.13(A) においてロボットが跳躍した後も電流値が計測されていることがわかる。座屈エネルギー E_b は 2.2.4 節の解析結果より 910mJ と推定される。跳躍エネルギー E_j は跳躍の最大高さ h より mgh で計算される。ここで m はロボットの質量、 g は重力加速度である。ロボットの跳躍高さ h を図 2.13(B) に示す。ここで跳躍高さはロボットの重心位置で測定している。重心位置は AR マーカを車輪中心に取り付けそこからロボット幅の半分を車軸方向に減らすことで求めている。これによって跳躍中のロボットの傾きを考慮している。また、ロボット

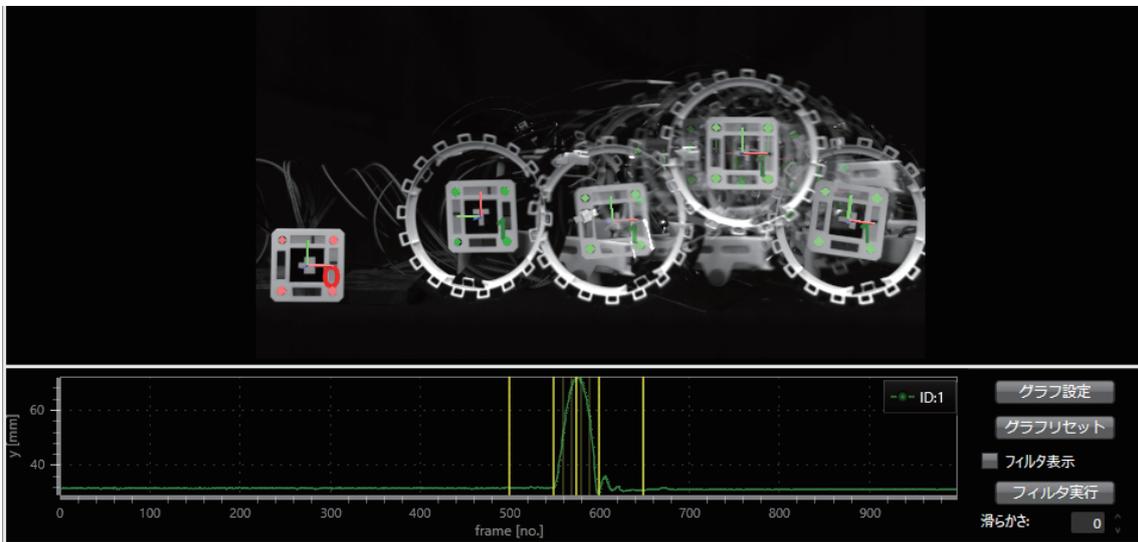
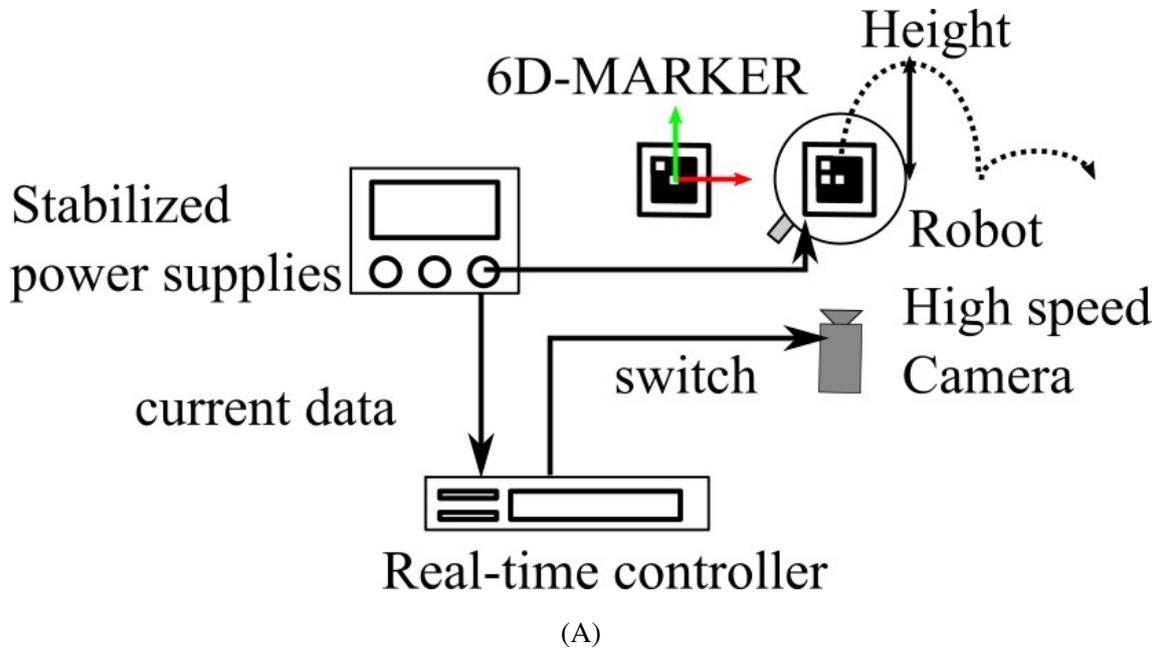
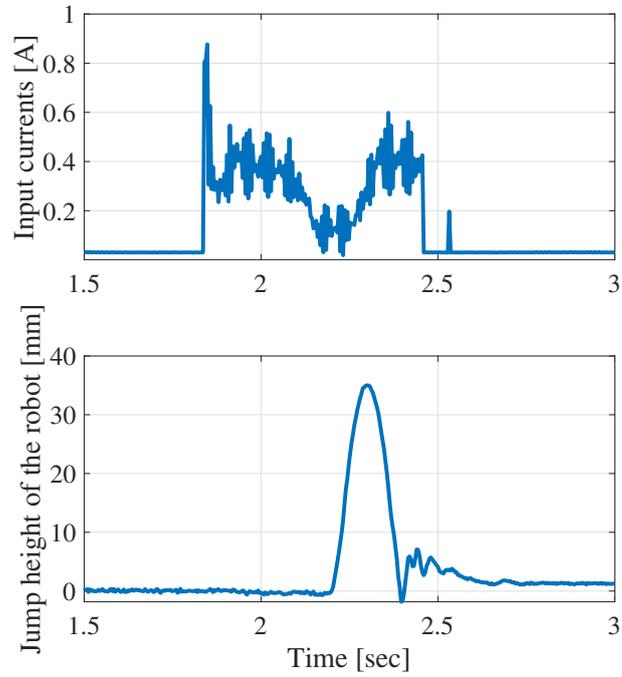
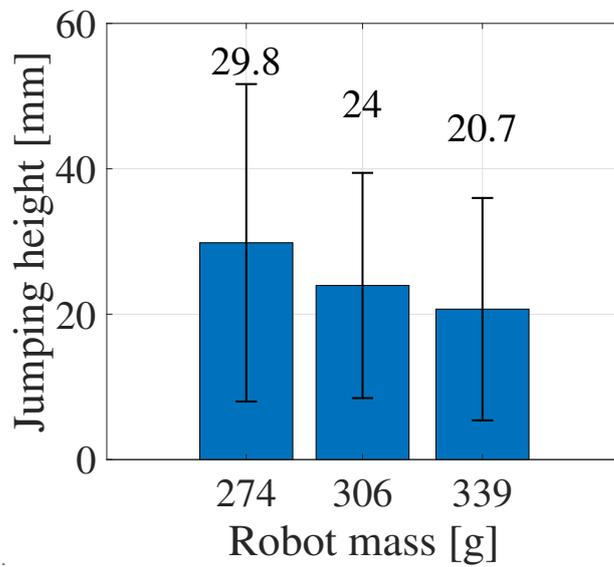


Fig. 2.12: (A) Experimental setting of measurement of buckling energy efficiency for power flow analysis. (B) The robot jumping overlay picture.



(A)



(B)

Fig. 2.13: (A) Input current I_i versus the jump height h over time. (B) The robot jump height for robot mass.

第 2. アーチ型スナップモータのパワーフロー解析

の質量変化に対するエネルギー効率の変化を測定するためロボットに重りを取り付け、質量を変化させ測定を行った。計測は各ロボット重量に対して 10 回行いその平均値および標準偏差を求めた。

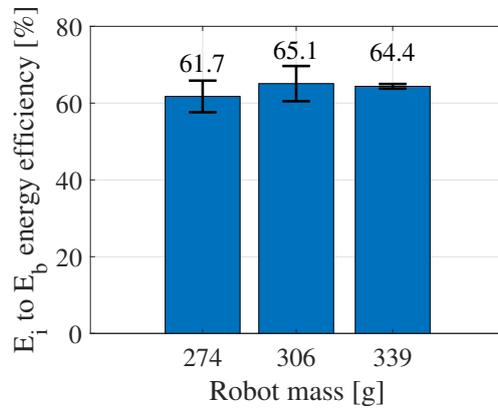
跳躍高さの平均および標準偏差は各質量に対して 274g で $29.8 \pm 21.8\text{mm}$ 、306g で $24.0 \pm 15.5\text{mm}$ 、339g で $20.7 \pm 15.3\text{mm}$ であり、そこから求めた跳躍運動エネルギーの平均および標準偏差は 274g で $80.1 \pm 0.15\text{mJ}$ 、306g で $71.8 \pm 0.14\text{mJ}$ 、339g で $68.8 \pm 0.17\text{mJ}$ であった。ここで、アーチ型スナップモータの性能として力積を考えれば、跳躍高さから鉛直方向の初速度を計算し、274g で 0.21Ns、306g で 0.21Ns、339g で 0.22Ns と質量増加量に対して初速度も減少することでほぼ一定の力積を発揮している。

2.3.2 座屈を含めたエネルギー変換効率

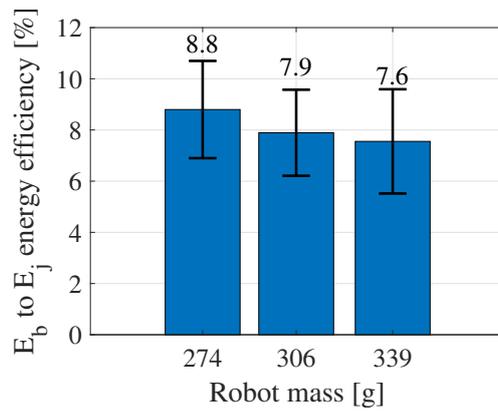
図 2.14 にアーチ型スナップモータのエネルギー変換効率を示す。図 2.14(A) は入力電気エネルギー E_i から座屈エネルギー E_b までの変換効率である。図より、 E_i から E_b までのエネルギー効率はロボット質量にかかわらず約 60% である。274g において入力電気エネルギーの平均値は 1475.8mJ であった。座屈エネルギー E_b が 910 mJ の一定値であるため、提案するアーチ型スナップモータは積載量にかかわらず入力電気エネルギー E_i がほぼ一定であると考えられる。図 2.14(B) に座屈エネルギー E_b から跳躍運動エネルギー E_j までの変換効率を示す。ここではロボット質量にかかわらず約 8% となった。また跳躍高さ h は基板を取り除いてロボット質量を 274g よりも軽くした場合には 274g よりも低い値となった。これはロボットの重心位置を変化させずに質量を軽くすることが困難であるためと考えられる。また質量 m の変化量にたいしてエネルギー効率の変化は小さくなっている。 E_b から E_j へのエネルギー変換効率は E_i から E_b への変換効率に比べて小さくなっている。そのため、提案機構は効率改善の余地が十分に残されている。同様に図 2.14(C) に入力電気エネルギー E_i から跳躍運動エネルギー E_j までの変換効率を示す。値はロボット質量によらず約 5% であった。

2.3.3 アーチ型スナップモータの力積計測

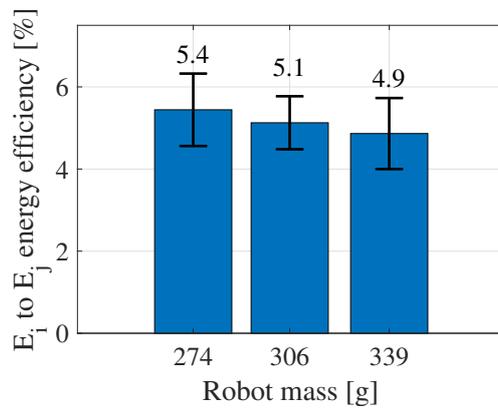
本節ではアーチ型スナップモータによる撃力によるインタラクションが跳躍運動へと変換される性能を詳しく見るため力積の計測を行う。アーチ型スナップモータのブレード部でロードセルを押し、その力と計測時間から力積を計測する。実際の実験の様子を図 2.15 に示す。実験ではロードセルの高さに合わせた台を作成し、その上で 2.3.2 節と同様のロボットおよび



(A)



(B)



(C)

Fig. 2.14: Power flow of the arched snap motor. These plots show average values with error bars for variance.

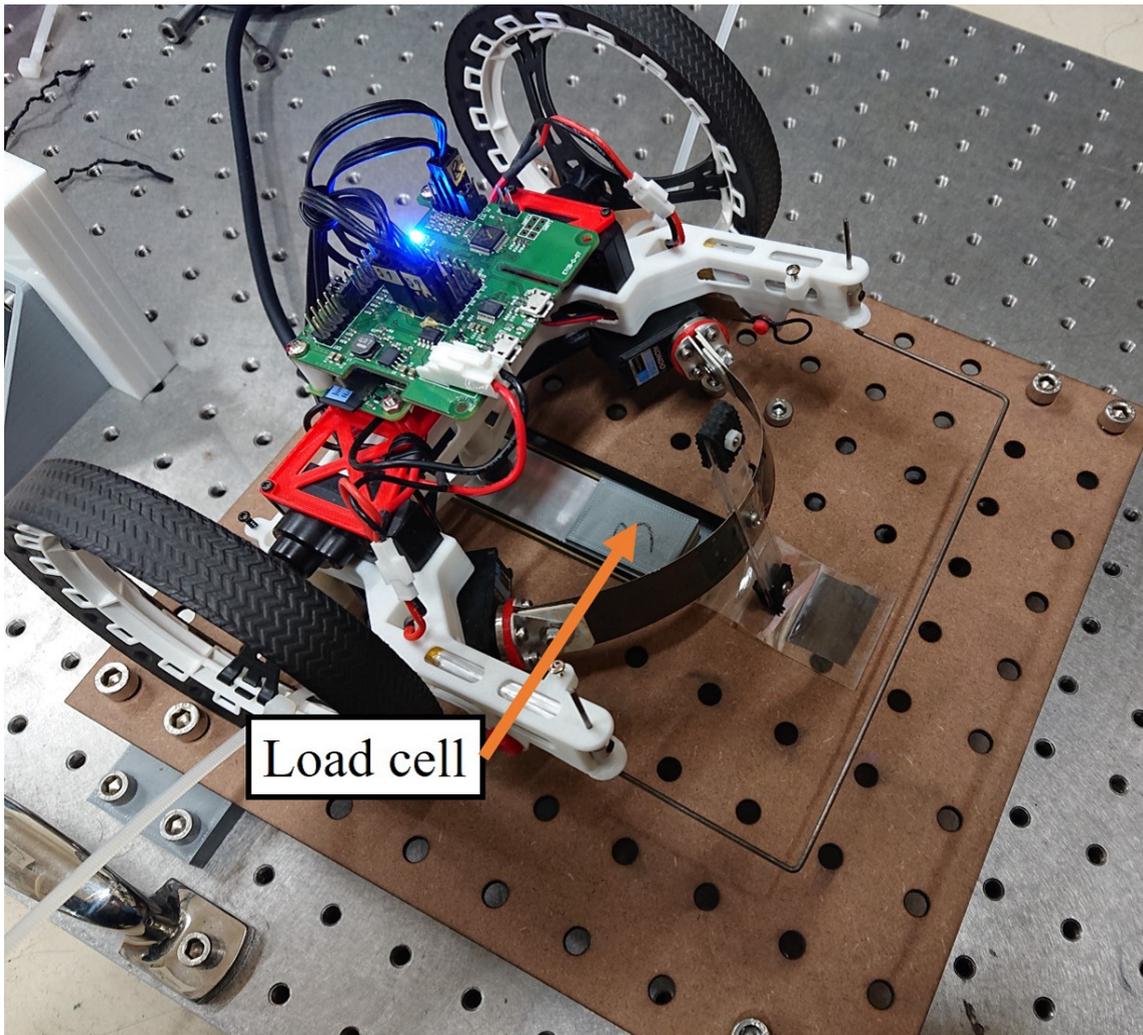


Fig. 2.15: Set up an impulse measurement experiment. The arched snap motor was measured generating forces by a load cell and real-time controller.

アーチ型スナップモータを用いて座屈時の1軸ロードセル(TU-CR(T)200N/KN-G, ティアック株式会社)にかかる力を測定する。この時ロボットが接地する台とロードセルの測定点の高さは等しい。また、ロボットの駆動輪を台に固定することで駆動軸周りにロボットが回転できる状態で繰り返しロードセルを打撃することで計測を行った。測定した際のロボットの質量は重りを取り付けていない状態の274gであり、固定された駆動輪の質量は合計22gである。測定はロードセルの信号をアンプ(SA-570ST, ティアック株式会社)を介してリアルタイム制御器(SEAGULL mini, エムアイエス株式会社)で40秒間16kHzの周波数で行った。その際の時間に対するロードセル荷重のグラフを図2.16に示す。40秒の測定中に座屈は96回確認され、各ピーク値間の秒数の平均は約0.4秒であり、本実験における撃力発生の繰り返し周波数は2.4Hzであった。ここで繰り返し周波数は跳躍をしない状態でのモータを連続回転させた際の値であり、跳躍時には本体の重量を支えることによる周波数の低下が考えられる。後述する3章3.2節においては、同様にプロトタイプIIの機体を用いて繰り返し跳躍周波数は1.9Hzであった。図2.16より座屈が発生したタイミングで13N程の力が発生していることがわかる。各座屈におけるピーク値の平均は13.3Nであった。また各ピーク値の標準偏差は0.86Nである。座屈時のロードセルにかかる荷重の変化について詳しく見ていく。図2.17は測定開始時から最初の座屈時の計測結果を拡大したものである。ピーク値が発生するよりも前にロードセルが押され、ピーク発生後約0.02秒間約10Nの力がかかり続けていることが確認できる。これはブレード部分が座屈発生より先に接地し、座屈による形状変形中地面を押し続けていることを示している。また値がマイナスになっている区間は必ずピーク後に見られ、片持ち梁型のロードセルが押された後に反動によって反対側に沿ったことで生じていると考えられる。ここで、ノイズ等を考慮しピーク値の前後で初めて0.5Nになるまでの区間の面積をMatlab R2020bを用いてpolyshape関数およびarea関数より求め、力と時間を掛け合わせることで力積を測定する。測定された力積の平均値は0.20Nsであり、標準偏差は0.033Nsであり、平均値に対する標準偏差の割合は16.5%であった。

ここで、偶数回同士、奇数回同士の値に着目する。アーチ型スナップモータの座屈においては弾性体の裏側と表側を交互に行き来することから、偶数回、奇数回において座屈が生じる面が異なる。力積において偶数回同士の平均および標準偏差は 0.23 ± 0.014 Ns、奇数回同士の平均および標準偏差は 0.17 ± 0.021 Nsであった。全体の標準偏差である0.033Nsに比べて両者標準偏差が小さく、それぞれ平均に対する標準偏差の割合は6.1%と12.4%であり偶数回奇数回を含めた際の16.5%より小さい。このことから偶数回と奇数回では撃力発生にばらつきがみられるものの、偶数回同士、奇数回同士においてはほぼ同じ撃力が発生していることがわかる。

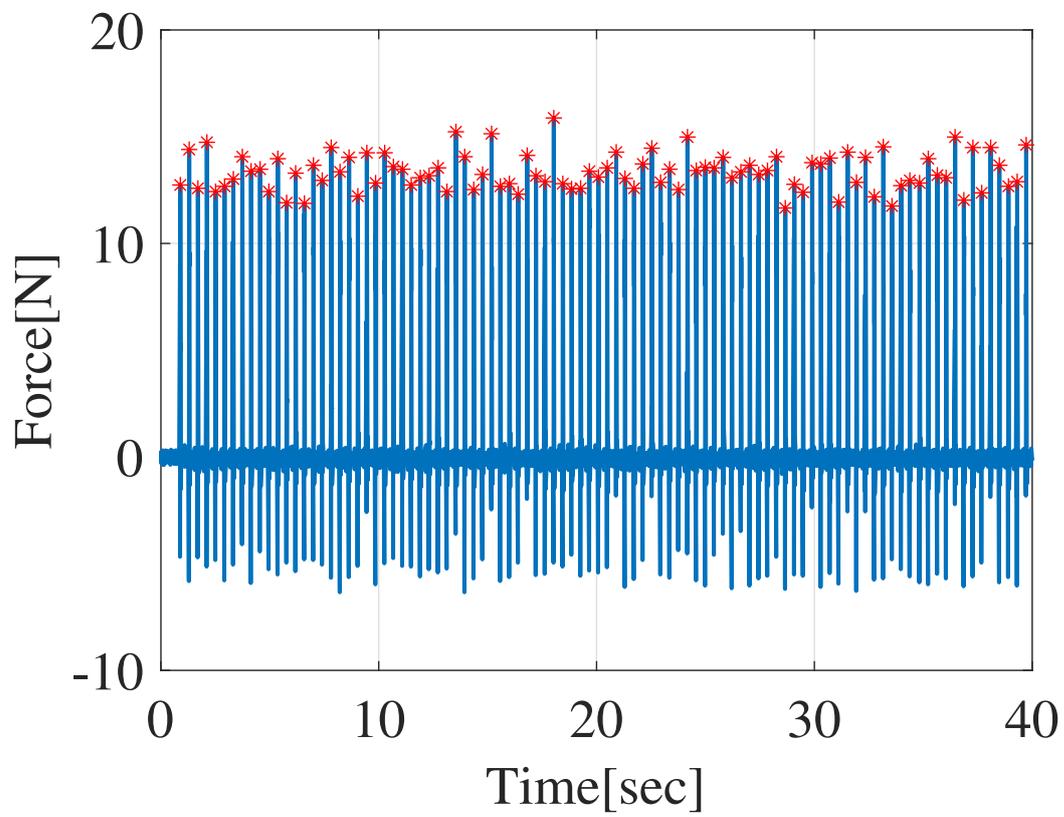


Fig. 2.16: The measurement values of forces versus time. Peak forces were plotted for every buckling.

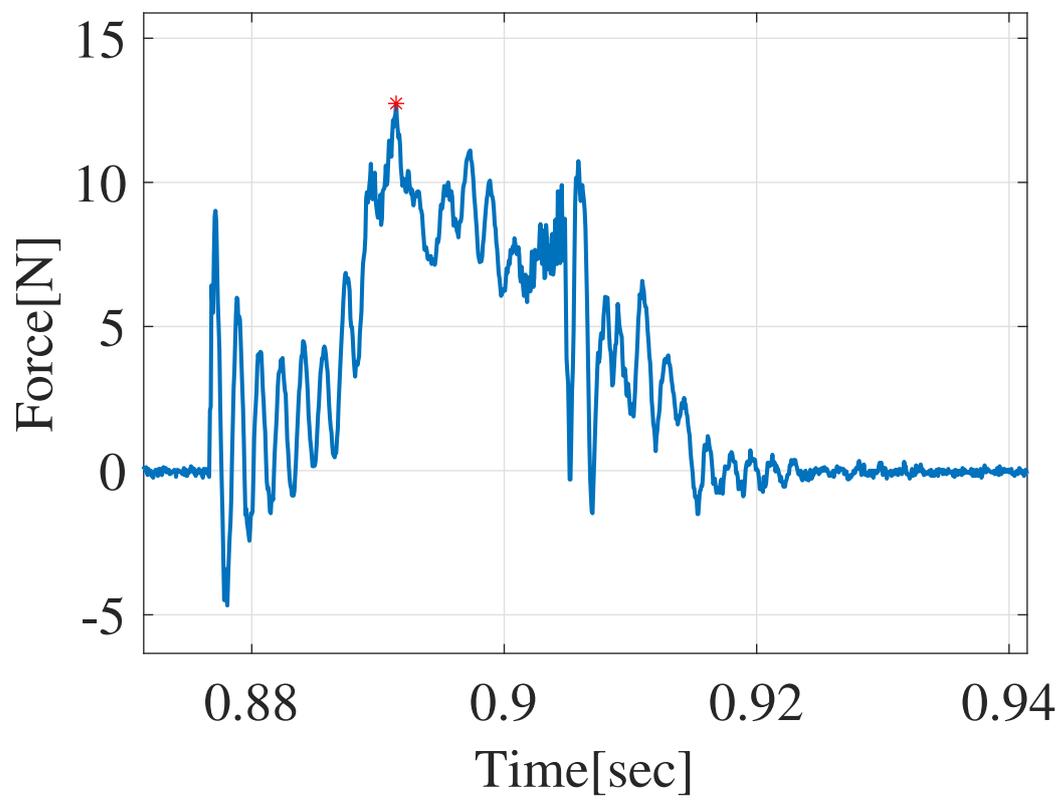


Fig. 2.17: The measurement values of forces versus the time in the first buckling.

偶数回奇数回のばらつきの原因としては弾性体を手で成形していることによる誤差やブレードの取り付け誤差等が考えられる。しかしながら、座屈が発生さえすれば偶数回、奇数回それぞれの撃力性能としてのばらつきは小さいことがわかる。

2.4 考察

提案するアーチ型スナップモータのエネルギーおよび変換効率について考察していく。はじめに質量の影響についてみていく。今回実験した範囲では質量の影響はあまり見られなかった。 E_i から E_j までの質量の違いによる効率の低下割合は約 10% であり、これは 274g から 339g への約 24% の質量増加割合に対して小さい。ここでは効率で考えているため入力電気エネルギーの値の変化に対しても跳躍エネルギーへの変換効率が変わるためあくまで傾向として減少率が小さいことがわかる。一方で跳躍高さそのものは質量増加約 24% に伴い平均値が 29.8mm から 20.7mm へと約 31% の低下が見られる。ここでエネルギーにおいては跳躍高さからエネルギー保存則を用いて求めた。エネルギーから初速度 v_0 を求めれば、重力加速度 g とロボットの跳躍高さ h から $v_0 = \sqrt{2gh}$ となりここから力積 I に直すと $I = mv_0 = m\sqrt{2gh}$ となる。仮に質量によらず一定の力積が発揮されるとすれば、質量増加割合 $n\%$ に対する初速度 v_0 の変化量は 2 乗で作用し、 $(\frac{1}{1+0.01 \cdot n})^2$ となる。 n が 24% の時、減少割合は約 35% となり、この結果は跳躍高さの減少量 31% と近い値が得られている。跳躍高さのばらつきも考慮すれば、ロボット重心を変えない範囲内において質量によらず一定の撃力を発生させられると考えられる。

次に、エネルギー変換効率を高める方法について考える。モータへの入力終了時間 t_1 を改善することで入力電気エネルギーの総量を減らすことができる。図 2.13 (A) を例にとれば、入力終了時刻 t_1 を 2.25 秒にすることで、入力電気エネルギー E_i は約 36% 改善できる。ロボットに座屈タイミングを検知するセンサを取り付けることで入力電気エネルギーを改善でき、図 2.14 (A) および (C) の値を改善可能である。また階段踏破等連続で撃力を取り出す際には座屈後の回転は次の座屈変形に利用されるため、座屈タイミングを検知した場合と同等かそれ以上の効率改善ができる。図 2.14 (B) の E_b から E_j へのエネルギー変換効率は約 8% であり改善の余地が残されている。例えばブレード長を長くすることで地面を押し時間をより長くすることや、床面との摩擦を増すこと、重心位置をとらえやすく改善することで運動エネルギーへの変換効率を高めると考えられる。また、飛び移り座屈を生じる弾性体に対してブレードの取り付け位置や角度、形状を変更することでより飛び移り座屈変形を地面に伝えやすくなることも考えられ、機構改善の余地が残されている。

次にスナップモータの性能として消費電気エネルギーを考えていく。投入した電気エネルギーの平均値は274gにおいて1475.8mJであった。ここで撃力発生周波数として力積計測での2.4Hzを用いれば消費電力は3.5Wとなる。ここで、プロトタイプIIに搭載する2個のバッテリー(GB361 3.7V, 500 mAh, G-Force, Inc.)から使用できるエネルギー量を単純にすべて利用できると考えれば1時間で $3.7 \times 2 \times 0.5 \times 3600 = 13320\text{J}$ が利用でき、その中で1回の撃力発生あたり約1.5Jの消費は小さいと考えられる。また消費電力で考えればバッテリー2個で3.7Whの容量を持つため、純粋に跳躍だけを行ったとして1時間以上の稼働時間が得られる。ここで投入した電気エネルギーは前述の通り座屈発生後も回転を続けているため、連続で使用する場合には1回あたりの消費電力はさらに低くなると考えられる。また跳躍の際には繰り返し周波数が1.9Hzまで下がっていることから、ここでの3.5Wは十分高く見積もった消費電力値となる。以上より、小型撃力発生装置の性能として消費電気エネルギーは小さく、繰り返し撃力を発生させる運用に向くと考えられる。

次に、力積計測も踏まえたエネルギー効率を考える。まず、パワーフロー解析による座屈時の弾性エネルギーは910mJであり、ロードセルによって測定した力積は0.2Nsであった。910mJがすべて鉛直方向の運動に変換された場合、274gのロボットは初速度2.58m/sとなり、すべて位置エネルギーへと変換された場合、最大跳躍高さは重力加速度を 9.8m/s^2 として、339mmとなる。一方で274gでの跳躍高さ29.8mmから求めた跳躍運動エネルギー80.1mJであり、この時の鉛直方向の初速度はエネルギー保存則から0.76m/sであり、この時力積の値は約0.21Nsとなる。計測した力積0.20Nsはノイズを考慮してピーク値から0.5N以下になるまでを計測しており実際と比べて低くなることが予想される。一方で跳躍時には鉛直方向のみならず水平方向へも移動しており、実際の運動エネルギーは跳躍高さから計測した以上の値となる。このことから、地面を押している力のほとんどを跳躍に変えられていることがわかる。またロードセルによる力積計測からも地面を押すブレード部の改良が有効に働くと考えられる。ここまでエネルギー変換効率と力積の2種類の方法で跳躍能力の見積を行った。改めてエネルギーから得られる速度から力積を求める式は $I = mv_0 = m\sqrt{2gh}$ となり、この式からエネルギーを倍にした場合でも力積の値は $\sqrt{2}$ 倍までしか得られないことがわかる。力積の計測において駆動輪を固定していたことから、ロボット質量の影響を受けずらい状況下で同等の力積が発揮できたと考えられる。このことから跳躍高さを高める場合には初速度を高めるためにロボットの軽量化が有効に働くことがわかる。ここまで鉛直方向のみで議論を行っていたが実際には跳躍によって水平方向へも移動をしている。跳躍によって車輪が地面から離れて着地するまでに移動した水平方向距離の平均は274gにおいて93.5mmであった。この時跳躍に有した時

第 2. アーチ型スナップモータのパワーフロー解析

間から跳躍による水平方向の移動速度は 0.57m/s となり、質量 274g と掛け合わせた際の水平方向の力積は約 0.16Ns であった。水平および鉛直をベクトル合成した際の力積の大きさは約 0.26Ns であり、その角度は水平から約 53 度である。水平および鉛直方向を合わせた初速度は約 0.96m/s であり、ロボット質量 274g においてその運動エネルギーは 125mJ となり、座屈時の弾性エネルギーの約 14% となる。現在この撃力発生角度についてはロボットの重心およびアーチ型スナップモータの打撃位置の影響が大きい。計測に用いたプロトタイプ II においてはロボット後方のパーツの長さを調整することでアーチ型スナップモータの地面を押し位置を変化させ、跳躍高さが高くなるように試行錯誤的に調整を行っている。階段跳躍踏破を考えれば、ロボットの水平移動距離は跳躍の最大高さにおいてロボットの前方から重心位置分以上が必要となる。実際にアーチ型スナップモータを跳躍に利用する際にはこの撃力発生方向はモデルに基づいて適切に設計されるべきである。また、本研究室では平面型のスナップモータを用いて打音検査を行う機構を開発しており、同様にロードセルを打撃した際の力積を測定している。同一の弾性体素材 SK85-CSPH を用いて形状 0.15×30×200mm において瞬間的に 210N を超える力が観測されている一方で全体の力積は 0.029Ns にとどまっている。また弾性エネルギーの増加量に対して力積の増加量は弾性エネルギー増加量のほぼ 1/2 乗で得られることが実験で計測されている。これはエネルギーの増加量に対する力積の増加量である 1/2 乗と一致している。平面型に比べて提案するアーチ型スナップモータは力のピーク値は小さいものの、7 倍の力積が得られている。打音検査と跳躍では力の加え方が異なり単純比較はできないが、跳躍を行う際には地面を長く押すことができるアーチ型スナップモータが有利に働くと考えられる。また、繰り返し周波数の面でアーチ型スナップモータは平面型と比較して高い。

ここで、撃力の単発での利用を考えるとタイミングおよび大きさをコントロールしたいといった要件が考えられる。撃力発生のタイミングについては座屈が生じる前の形状でモータの回転を止め、取り出したいタイミングで回転させることで調整することができる。図 2.4(B) のモータトルクに着目すれば座屈が生じる付近においては必要となるトルクが減少している。これは弾性体にエネルギーを貯める圧縮コイルばね等を用いる方法等と比べても撃力発生直前の状態を維持する際にモータにかかる負荷が低くなることが考えられる。現状のアーチ型スナップモータは軽量化のためセンサを搭載していないが、今後モータの回転角を制御することで撃力発生のタイミングは調整可能であると考えられる。一方で撃力の大きさについては弾性体の飛び移り座屈現象を利用しているため、同じ弾性体を同じフレーム形状で座屈させた場合には同じ撃力しか取り出すことができない。考えられる大きさコントロール手法として、モータ間距離を離すことによって発生する撃力を下げることが可能となるが、撃力を利用

する場面を考えれば下げたい状況は少ないと思われる。以上より、撃力発生装置としてアーチ型スナップモータをとらえれば、アーチ型スナップモータはモータトルク内で得られる最大の撃力を繰り返し生成する運用に向いている。

アーチ型スナップモータの性能として何が示されるのかを考える。撃力発生装置としてアーチ型スナップモータの性能は撃力の大きさを示す力積およびその撃力を発生させる繰り返し周波数で示される。力積計測より撃力の大きさは0.2Nsであり、跳躍を伴わない際には2.4Hzの繰り返し周波数で撃力を発生させられる。跳躍をする場合にはロボット質量の負荷等で値が減少し1.9Hzである。また、その消費電力は最大3.5Wである。ここでストッパー等を構成する外部フレームを除いたアーチ型スナップモータの質量は86gであり、外部フレームも考慮すれば約90gで構成される。ここで、フレキシブルフレーム機構を搭載したアーチ型スナップモータは単に座屈を生じさせるだけでなくその衝撃緩和機能もこの約90gに内包している。無論、駆動のためにはバッテリー等外部の電源を必要とする。ここで、撃力の大きさ比較として日本非破壊検査協会に則り鋼球落下の際の撃力と比較すれば、100gの鋼球を約20cmの高さから落とした際の撃力と等しい。この撃力をスナップモータとして重力方向以外にも発生させることができる。以上をまとめて、本章で取り扱ったアーチ型スナップモータの性能として、質量約90gで構成され、0.2Nsの撃力を2.4Hz以下で繰り返し発生させることができ、最大消費電力3.5Wで駆動する性能を持つ。

最後に、パワーフロー解析のアーチ型スナップモータ設計への貢献について考察する。まず、パワーフロー解析において計測を行った電気エネルギーおよび跳躍運動エネルギーは座屈時の弾性エネルギーが見積もれない状態でも結果を得られる。しかし、それだけではどの段階でエネルギーが消費されているのかわからない。そのため、モータの効率なのか、弾性体形状の問題なのか、地面とインタラクションする際の効率なのかを切り分けることができず、目標とする力積を発揮するスナップモータを設計できなかった。パワーフロー解析により、座屈時の弾性エネルギーの落差が見られ、その弾性体エネルギーの約8%が跳躍に利用できることが分かった。また力積の計測より、そのばらつきは16.5%ほどみられるものの、おおよそ同じ力積が得られることがわかった。加えて地面を押し力積のほとんどを跳躍運動に変換できていることがわかった。よって、アーチ型スナップモータを設計する際には要求する力積に対してその値が全体の8%程度となる弾性体形状を求めることで設計が可能となる。その際に必要となるモータトルク内でモータを選定することができる。一方でこの8%は実測値に基づいており、機体や弾性体の変更に伴い値が異なる可能性がある。また、現実的にはモータトルクを無段階で調整することは困難であると同時に、跳躍へ応用する際にはロボット重量は可能

な限り低いことが望ましい。これらを踏まえると、実際の設計においては、モータを先に選定し、モータトルク内で最大の弾性体形状を求める方法が有効であると考えられる。これらを踏まえると、本研究におけるパワーフロー解析によって、利用するモータトルクの推定が行えるため、モータトルク内で最大の弾性エネルギーが得られる弾性体形状の選定が可能となった。これらの設計指針は弾性体に貯まる座屈時の弾性エネルギーの推定を含むパワーフロー解析によって得られ、この成果は提案する跳躍走行ロボットへモータトルクに基づいた設計を可能とするものである。

2.5 まとめ

本章ではアーチ型スナップモータのフレーム変形に着目し、ロッド理論に基づいた座屈時の弾性エネルギー解析を含むアーチ型スナップモータのパワーフロー解析を初めて達成した。フレームの変形をモータ間距離の変化としてとらえ、パッシブにモータ間距離を変化させ、耐久性を向上させるとともに座屈発生を安定化させるフレキシブルフレーム機構を提案した。提案したフレキシブルフレーム機構をシミュレータ上に実装することで、シミュレータ上においてアーチ型スナップモータの座屈動作再現を達成した。これによって、座屈時に得られる最大エネルギーを見積もることが可能となった。同時にモータトルクの推定も可能とし、解析結果に基づいたモータ選定および選定したモータに基づいた弾性体形状の設計が可能となった。

さらにアーチ型スナップモータのエネルギー変換効率を跳躍ロボットを用いて計測した。提案するアーチ型スナップモータは積載量に対するエネルギー変換効率の低下率が低いことを実験より示した。座屈時の弾性エネルギーから跳躍運動エネルギーへの変換効率は約 8%であり、これによって弾性エネルギーを推定することで跳躍運動エネルギーの見積もりが可能となった。またロードセルを打撃することで得られた力積の値のほぼすべてを跳躍に利用できていることが実験よりわかった。これより、アーチ型スナップモータは地面とのインタラクションを適切に設計することで、跳躍運動エネルギーへの変換効率を高めることが可能とわかった。これらよりパワーフロー解析によって、アーチ型スナップモータの座屈時の弾性エネルギー推定を可能とし、その値に基づいたモータの選定および跳躍能力の推定を可能とした。本章のパワーフロー解析の成果によって従来試行錯誤的であったアーチ型スナップモータの評価方法に対して、定量的な評価方法を与えた。

第3章 跳躍走行ロボットの繰り返し跳躍性能

本章では、アーチ型スナップモータを搭載した跳躍走行ロボットによる連続跳躍性能の評価をおよび2章のパワーフロー解析を利用した設計を行う。初めに実験で使用するプロトタイプIIとプロトタイプIIIの機体について説明する。また、プロトタイプIIIにおいては2章のパワーフロー解析結果を用いてアーチ型スナップモータの設計を行ったのでその方法を詳しく説明する。その後、跳躍走行ロボットの連続跳躍性能評価方法として行った以下3点の試験について報告する。1点目は繰り返し跳躍周波数測定実験である。3回の跳躍から跳躍間の時間を計測し繰り返し跳躍周波数を測定した。2点目は連続跳躍耐久実験である。階段等連続した段差を跳躍踏破する際には複数回の跳躍を短時間で行う必要がある。そこで跳躍のみを繰り返し、その跳躍繰り返し周波数および回数を測定した。3点目に階段跳躍踏破実験を行った。室内階段を模した高さ15cmの段差の連続跳躍踏破を実験より達成した。本章ではこれらの結果を示す。

3.1 アーチ型スナップモータを搭載した跳躍走行ロボット

本節では実験で使用するアーチ型スナップモータを搭載した跳躍走行ロボットについて説明する。提案ロボットは複数のバージョンが存在する。後述する3.3節および3.4節で取り扱うプロトタイプIIを図3.1に、プロトタイプIIIを図3.2に示す。

3.1.1 プロトタイプII

本節では3.3節で使用する図3.1のロボットの概要を示す。本モデルは他研究での利用も想定し、研究室で開発したプロトタイプIモデルをもとに株式会社アサイ・エンジニアリングで再設計を行ったプロトタイプIIモデルである。フレーム部品を3Dプリンタを用いてABS樹脂で作成することで機械加工の必要なくロボットを組み上げられる。ロボットの走行系にはJumping Sumo[20](Parrot Drones)の走行系を利用している。アーチ型スナップモータの駆動モータには近藤科学のサーボモータ(KRS-3204 ICS, 近藤科学株式会社)を利用する。このサー

第 3. 跳躍走行ロボットの繰り返し跳躍性能

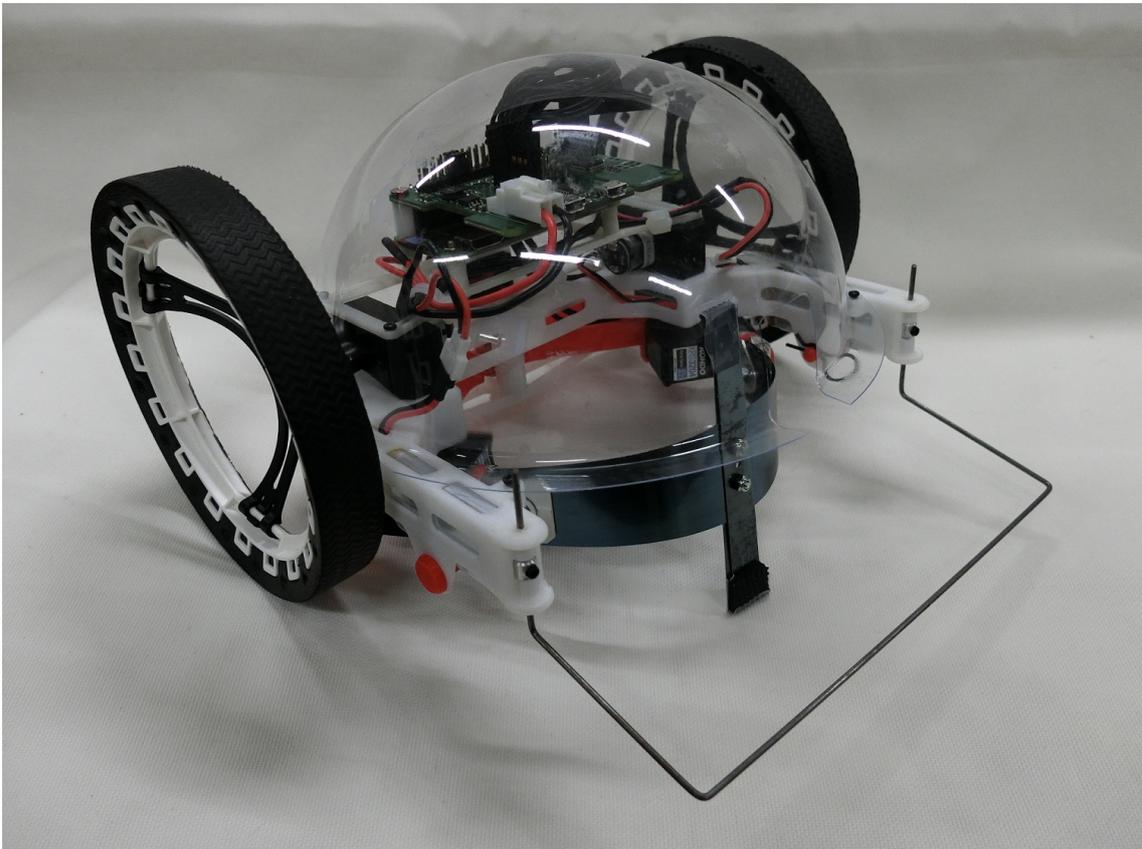


Fig. 3.1: Prototype II: jumping wheeled robot with the arched snap motor in sec. 3.3.

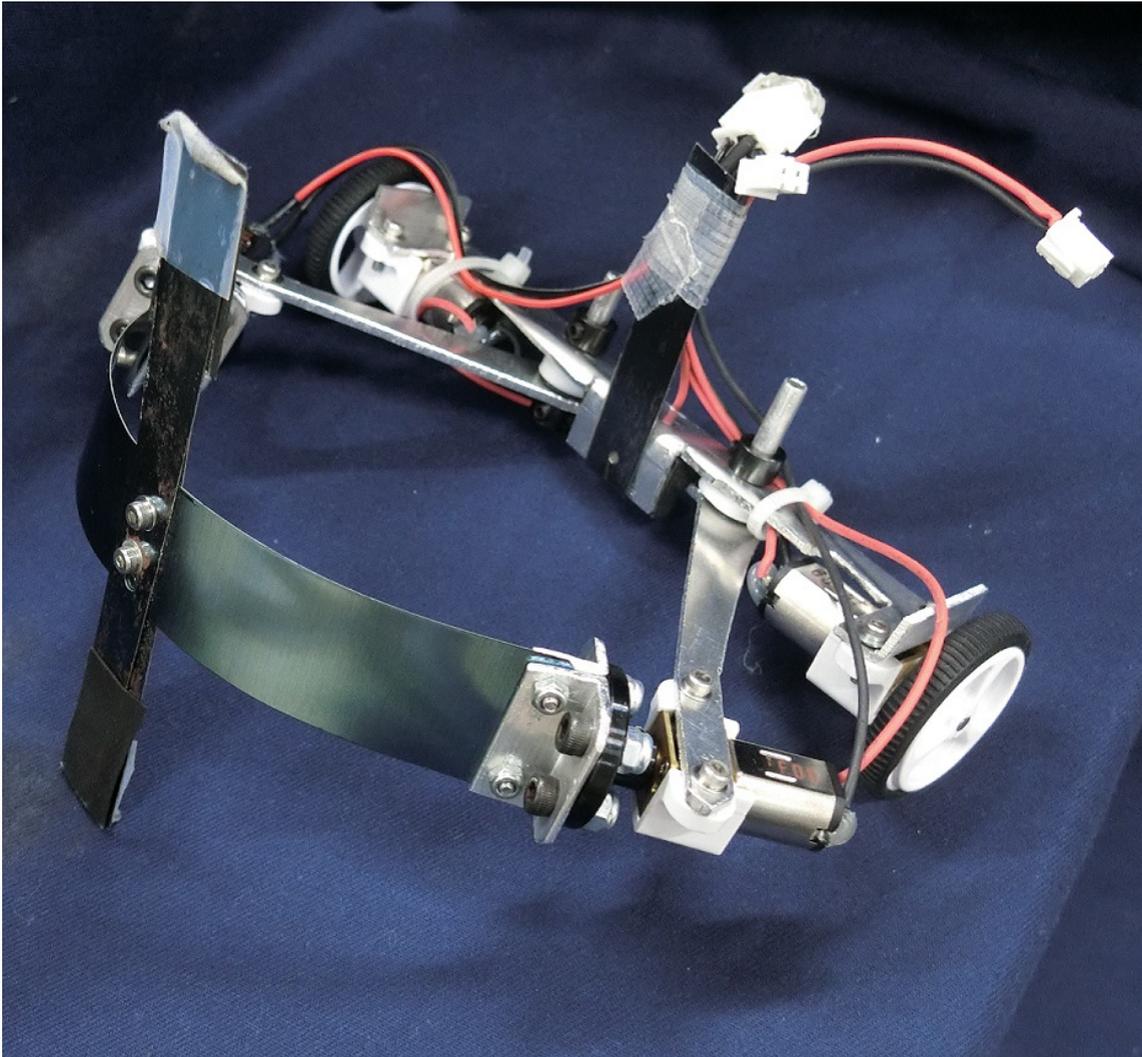


Fig. 3.2: Prototype III: jumping wheeled robot with the arched snap motor in sec. 3.4.

第 3. 跳躍走行ロボットの繰り返し跳躍性能

ボモータは無限回転モードが搭載されており、通常の DC モータのように角度限界なく利用できる。ロボットは 2 個のリポバッテリー (GB361 3.7V, 500 mAh, G-Force, Inc.) を搭載している。ロボットはコントローラとしてラズベリーパイゼロ W (Raspberry Pi Zero W, Raspberry Pi Foundation) とサーボコントローラ (ETCB, 株式会社知能機械研究所) を搭載している。ロボットはラズベリーパイの Wi-Fi 経由でゲームパッドを用いて人が遠隔で操作可能である。弾性体には板バネ (SK85-CSPH, JIS) を利用する。弾性体形状は長辺 110mm, 短辺中央幅が 30mm, 弾性体端で幅が 20mm となるようなひし形形状を用いる。また、中央部分に地面を押すためのブレードを備える。座屈用弾性体の厚みは 0.2mm であり地面を押すためのブレード側の厚みは 0.25mm である。ブレードは座屈用弾性体を挟み込む形で 2 枚利用している。ブレード部分の幅は 10mm で長さ 85mm である。これはロボットのフレームに当たらない中で地面をなるべく長く押せる長さに調整している。ブレードが地面を押す部分には摩擦を高めるためのゴムシートを張り付け、車輪移動中に地面に当たる部分にはフッ素樹脂粘着テープ (チューコーフロー, 中興化成工業株式会社) を張り付け摩擦を軽減している。ロボット全体の質量はカバーを含めて 281g である。

3.1.2 プロトタイプ III

本節では 3.2, 3.4 節で使用する図 3.2 のプロトタイプ III モデルの概要を示す。プロトタイプ III モデルでは跳躍高さを高めることを目的に本体の軽量化を行った。具体的には駆動輪に Pololu Wheel (32×7mm, Pololu Cop.) を使用し、本体フレームに 1.5mm 厚のアルミ板を利用することで車輪駆動部の質量を低減している。また、アーチ型スナップモータの駆動モータには小型ギアードモータ (Micro Metal Gearmotor HPCB 6V, Pololu Cop.) をギア比 298:1 で利用している。利用モータのストールトルクは 333mNm であり、2 章で提案したパワーフロー解析を用いて、モータの最大トルクがストールトルク以下となる範囲で座屈時のエネルギー落差が最大となる弾性体を選定した。パワーフロー解析によって弾性体 (SK85-CSPH, JIS) の形状は 0.2×22×110mm に決定された。弾性体形状の選定過程は後述する。地面を叩くブレードの形状は本体に干渉しない中で最大の長さを取り、0.25×107×10mm の大きさの弾性体 (SK85-CSPH, JIS) を座屈させる弾性体を挟む形で 2 枚使用した。今回は実験用にアーチ型スナップモータへ外部から電源を投入する。そのため、バッテリーとコントロールユニット分の質量を含まず本体質量は 118g である。プロトタイプ III モデルには別途遠隔コントローラ (MR-8 2.4GHz MX-F, 近藤科学株式会社), 3 個のモータコントローラ (MD-1(ニュートラル

ブレーキ仕様), 近藤科学株式会社) および 2 個のバッテリー (DTP502535(PHR), 3.7V, 400 mAh, Data Power Technology Ltd.) を搭載可能である。それらの合計質量は 48g であり, 搭載時のロボット質量は 166g となる。ロボットはそれらを搭載した状態で遠隔で車輪移動, 跳躍が可能であることを確認している。

3.1.3 パワーフロー解析によるフレキシブルフレーム機構の設計

本節ではプロトタイプ III にて行ったパワーフロー解析によるフレキシブルフレーム機構の設計方法について述べる。フレキシブルフレーム機構を搭載したアーチ型スナップモータの設計パラメータを図 3.3 に示す。ここで, 回転関節から弾性体までの距離であるアーム長 l_a , ストッパーに当たり最大に広がっている際のモータ間距離 l_m およびモータの向かい角 θ_m の 3 つがフレキシブルフレーム機構の設計パラメータであり, これに弾性体の厚み t_e , 幅 w_e , 長さ l_e の 3 つを加えた 6 つが可変パラメータである。弾性体の選定には 2.2.4 で開発したフレキシブルフレーム機構を実装したシミュレータを用いる。この 6 つのパラメータを決定することでスライダジョイントの長さが決定され, 全体の重心から地面を押すためのブレード形状が決定される。

初めに設計時に考慮すべき設計要件をまとめる。今回は跳躍を前提としているため, 軽量である必要があり, 全体の大きさはコンパクトであることが望ましい。具体的に階段踏破を目的とし, 建築基準法の定める階段ふみ面の最小サイズである奥行 210mm に収まるサイズを目標とする。この時, モータ間距離 l_m は弾性体長さ l_e より短くしなければアーチ形状にならない。さらにアーム長 l_a はブレードを含めてオメガ形状の際にフレームに接触しないように十分長くとる必要がある。また, 弾性体を座屈させる過程でモータトルクが使用するモータの最大トルクを超えない必要がある。そのうえで繰り返し周波数を高めるために過度なギアダウンによるトルク増加は望ましくない。通常モータトルクを無段階で調整することは困難なため, モータを選定した後に弾性体をモータトルクに合わせて選定していく。

これらを踏まえて今回行ったプロトタイプ III 設計手順を基にフレキシブルフレーム機構を備えたアーチ型スナップモータの設計手順を以下にまとめる。

- 質量とトルクバランス, 回転速度から使用するモータを選定する。
- 目標とする本体サイズから弾性体長さ l_e を決定する。弾性体の厚み t_e , 幅 w_e の比が 10 倍を超えるように仮決定する。その後アーム長さ l_a , モータ間距離 l_m とモータ向かい角 θ_m を調整しシミュレータにて座屈が生じるフレーム寸法の組み合わせを選定する。

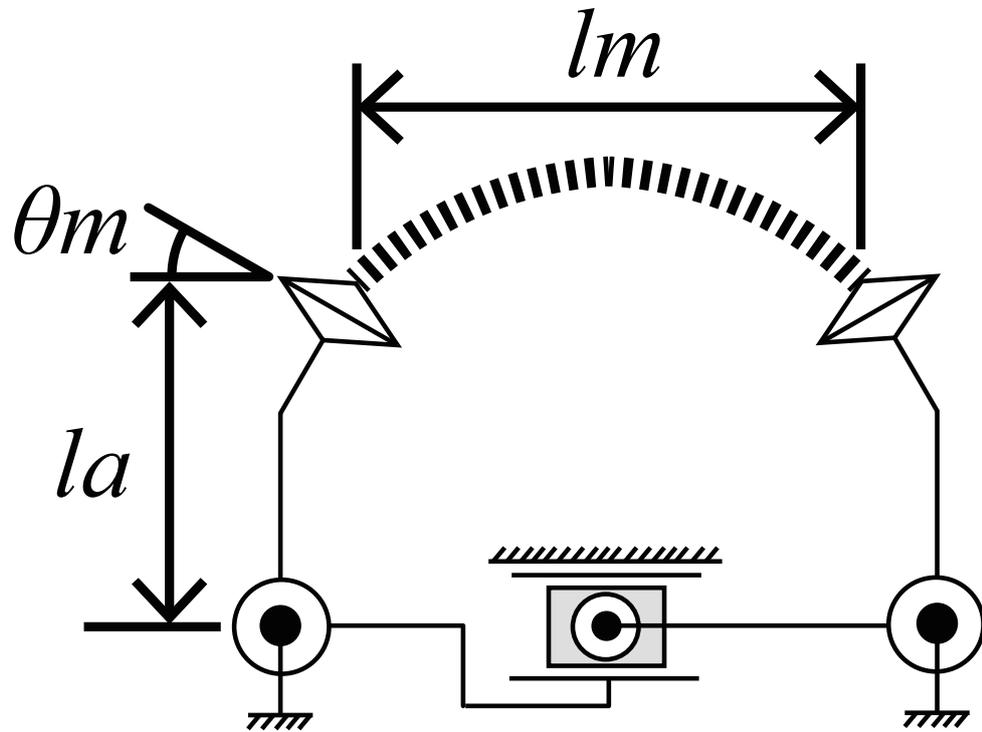


Fig. 3.3: The parameters of an arched snap motor with a flexible frame mechanism.

- 座屈が生じた組み合わせに対して，パワーフロー解析結果から最大モータトルクの差分を見る．そこから弾性体の断面形状厚み t_e を調整し，幅 w_e を調整することで弾性体形状を決定する．
- パワーフロー解析結果よりモータ間距離が最小となるアーム角度分の可動域をカバーするスライダ穴の長さを決定する．
- フレームに当たらない範囲で最大のブレード長をとり，走行系と合わせた際の重心を調整する．

さらに詳しく各過程を見ていく．モータ選定時には軽量のモータの中でトルクが十分に得られるものが望ましい．プロトタイプ III では Micro Metal Gearmotor HPCB 6V(Pololu Cop.) ギア比 298:1 を選定した．選定したモータは本体質量が 9.5 g と軽量かつ最大トルク 333mNm であり，質量 1g あたりの最大トルクの割合が 35mNm/g と，プロトタイプ II で使用したモータ (KRS-3204 ICS, 近藤科学株式会社) の 33.5mNm/g よりも高い．

続いて弾性体の長さ l_e を決定していく．建築基準法より，階段における最小の奥行が 210mm であり，蹴込みと呼ばれるネズミ返しのように一段下のふみ面から突き出るふみ面が最大 30mm

存在する。蹴込みに当たらず階段を跳躍することを考えるとロボットの全長は180mmよりもコンパクトであるのが望ましい。これらを考慮し、弾性体の長さはプロトタイプIを継承し110mmに決定した。

その後モータ間距離 l_m およびアーム長 l_a 、モータ向かい角 θ_m を2章で可能となったパワーフロー解析を用いて110mmの弾性体長さ l_e に対して座屈が生じる組み合わせを探索していく。ここで弾性体の厚み t_e と幅 w_e はその比が10倍を超える任意の組み合わせを用いる。今回は仮に厚み t_e を0.15mm、幅 w_e を20mmとした。試行錯誤によって最終的に座屈を生じる組み合わせとしてモータ間距離 l_m を72.5mm、アーム長 l_a を70mm、モータ向かい角 θ_m を51度とした。このフレームの大きさは複数の組み合わせがあり、座屈を生じる組み合わせは無数に存在する。その中で軽量化を前提にモータ間距離 l_e を製造が容易な範囲でなるべく短くなるよう72.5mmとした。アーム長 l_a はブレードが本体フレームに当たらないよう弾性体長さ l_e の半分よりも長い70mmとした。その中でモータ向かい角を調整することで座屈を生じる組み合わせを得た。2章のパワーフロー解析により実機作製を行うことなくパラメータの探索が可能となった。

座屈するフレームの組み合わせを得たら最後に弾性体の厚み t_e と幅 w_e を決定していく。ここで弾性体の座屈から得られるエネルギーはモータトルクの許す範囲で最大を取ることが望ましい。既存のシミュレータに使用しているロッドモデルは弾性体を多関節リンクに近似し各関節に曲げとねじりのばね定数を当てはめて計算を行っている。そのため、同じ弾性体長さ l_e であれば、ばね定数に応じた弾性エネルギーがモデルから得られる。本来、ねじりと曲げのばね定数は厚み t_e と幅 w_e によってそれぞれ個別に変化するため、一意にばね定数を決定することは難しい。しかし、厚み t_e と幅 w_e の比が10倍以上開くとねじりに関するばね定数は一定値に収束することが知られている。今回使用する弾性体の厚みは焼き入れリボン鋼の既製品を使用するため厚み t_e は0.1mmから0.05mm刻みで変化する。この時幅 w_e は弾性体の長さ l_e より小さい範囲で任意に設定できる。実機においてモータと接続する観点から幅 w_e の値は少なくとも5mm程度の幅が必要となり、幅と厚みの比は10倍以上となる。よってねじりに関するばね定数は厚み t_e と幅 w_e を変化させた場合においても一定値としてみることが可能。一方で曲げに関するばね定数は断面二次モーメントに比例し、長方形断面において断面二次モーメントは厚み t_e の3乗に比例し、幅 w_e に比例するため厚み t_e と幅 w_e を決定することで曲げに関するばね定数を決定できる。同時に同じ形状のロッドモデルに対してモータトルクはばね定数によって変化する。以上より、一度座屈を生じさせる組み合わせを見つけることで、そこから曲げに関するばね定数をモータトルク内で調整することで弾性エネルギー

第3. 跳躍走行ロボットの繰り返し跳躍性能

ギが最も高くなる弾性体の厚み t_e と幅 w_e を決定できる。これらの条件を式でまとめると、

$$n_e = \frac{\tau_{mm}}{\tau_s} > \frac{w_e^*}{w_e} \left(\frac{t_e^*}{t_e} \right)^3$$

となる。ここで、 n_e はモータトルク余裕倍率であり、使用するモータのストールトルク τ_s に対するパワーフロー解析上のモータ最大トルク τ_{mm} の倍率を表し、 t_e^* と w_e^* は変更後の厚みと幅を示す。今回の例では、仮決定した厚み t_e と幅 w_e は 0.15mm と 20mm であり、パワーフロー解析上のモータ最大トルク τ_{mm} は 127mNm であった。この際の座屈時の弾性エネルギーの差は 519mJ であった。使用するモータのストールトルク τ_s の 333mNm と比較し、モータトルク余裕 n_e は 2.62 倍の余裕がある。ここで厚み t_e は既製品を用いるため、刻み幅が限られ、さらにパラメータに 3 乗で影響するため先に厚み t_e^* を 0.2mm へと変更する。これによって断面二次モーメントは厚みが 4/3 倍になったことで約 2.37 倍に変化する。モータトルク余裕倍率 n_e の 2.62 倍と比べて 1.1 倍の余裕が見られるので幅 w_e^* を 22mm に変化させ、断面二次モーメントは 0.15×20mm と比べ 0.2×22mm への変化で 2.60 倍の変化が得られる。この 0.2×22×110mm の弾性体と先に決定したフレーム寸法を用いて、パワーフロー解析によってモータにかかる最大トルク 332mNm、座屈時の弾性エネルギーの差が 1343mJ 得られる組み合わせを得た。この時最大トルクと同じように弾性エネルギーの差も 2.6 倍されていることが確認できる。以上より、一度座屈するフレーム寸法および弾性体長さのパラメータを決定することで、モータトルク内で最大の弾性エネルギー差が得られる弾性体の選定が可能となった。ここで、2 章の結果より、座屈時の弾性エネルギー 1343mJ に対して 8% が跳躍運動に利用できるとすれば、ロボット質量 118g において想定される跳躍高さは約 93mm である。

これらのパラメータおよびパワーフロー解析から残りの機体設計を行う。パワーフロー解析によりモータ間距離の可動域がわかるので、その可動域をカバーするようにスライダジョイントに相当するスライダ穴の形状を決める。この時スライダ穴を可動域と合わせることで理論上ストッパーをなくすことができる。一方でスライダ穴と軸を用いているためスライダ穴端において特異点となり、モータ間距離を縮める動きが安定しないことが考えられる。そのため、スライダ穴の可動域には余裕を持たせ、アーチ型スナップモータを取り付ける本体フレームをストッパーとして用いて可動域を制限する。これはアーム角度を 1 度刻みで変化させているため、実機実装において余裕を持たせた設計を行うためにも必要である。これによってモータ間距離を縮める動きを安定させる。

最後に地面を押しブレードを決定する。ブレードは飛び移り座屈が生じる弾性体に取り付けられるため、座屈を阻害しないように飛び移り座屈を生じる弾性体と接する面積は少ない方

が望ましい。今回はブレードを手作業で制作しているため幅を 10mm とした。また、跳躍の際にはブレードは地面を押し続ける必要があり、ブレードの弾性は座屈によって変形でき、その際にロボット重量を支えられる弾性があることが望ましい。これらの条件より、プロトタイプ III では飛び移り座屈を行う弾性体と同様に焼き入れリボン鋼を利用し、 $0.25 \times 107 \times 10$ mm の弾性体を 2 枚飛び移り座屈をする弾性体を挟み込む形で利用した。この時ブレードの長さは接地時間を増やすため、フレームに当たらない範囲で最大を取ることで決定している。これは 2 章で用いた 85mm より長く、地面を押す時間の増加による力積やエネルギー効率の増加が考えられる。跳躍を行う際にはロボットの重心を押す必要がある。重心からずれることでロボット本体は回転してしまい、十分な跳躍高さを得られない。ブレード接地位置からロボットの重心はアーチ型スナップモータのモータ間にくることが望ましい。そのため駆動輪の位置やバッテリー等の位置によって重心の調整を行う。走行系と合わせた重心位置に関しては 4 章にも設計指針を示す。

これらの過程を経て、モータトルクが決定された際に座屈が生じるフレーム形状の探索によって、モータトルク内で最大の弾性エネルギーを得る弾性体形状が選定可能となった。以上よりフレーム形状を階段ふみ面に収まる中で小型化することで軽量化を行い、モータトルクに対する弾性体形状の最適化をプロトタイプ III において行った。

3.2 繰り返し跳躍周波数計測実験

本節は跳躍走行ロボットの繰り返し跳躍能力に関する実験を取り扱う。実験は図 3.1 のプロトタイプ II をハイスピードカメラ (EXILIM EX-100, Casio) を用いて 240fps で撮影し、車輪が跳躍によって地面と離れてから次の跳躍によって車輪が地面と離れるまでの時間を計測した。また、ロボットの駆動輪中心に取り付けたマーカを映像解析ソフト (TEMA, 株式会社フォトロン) を用いて軌跡を計測し跳躍高さを測定した。なお、映像ではロボットの跳躍する面よりもカメラ側に近い位置に取り付けたスケールを基準に高さを算出しているため、ロボットの向きやカメラとの距離の差によって誤差が生じることが考えられる。実験は 3 回の繰り返し跳躍を 1 セットとし、12 セット行った。跳躍周期は 1 セットの実験につき車輪の離れるまでの時間 2 つの平均を跳躍時間とし、12 セットの平均時間を算出し、1 跳躍あたりの時間の逆数を取り跳躍周期とした。跳躍高さに関しては跳躍前の車輪中心を基準として各セット初回の跳躍の高さを計測した。これは 2 回目以降の跳躍では、本体が傾くことでマーカ撮影による誤差が大きくなるためである。図 3.4 に実験の様子を示す。図 3.4 は跳躍の 250[ms] 毎の様

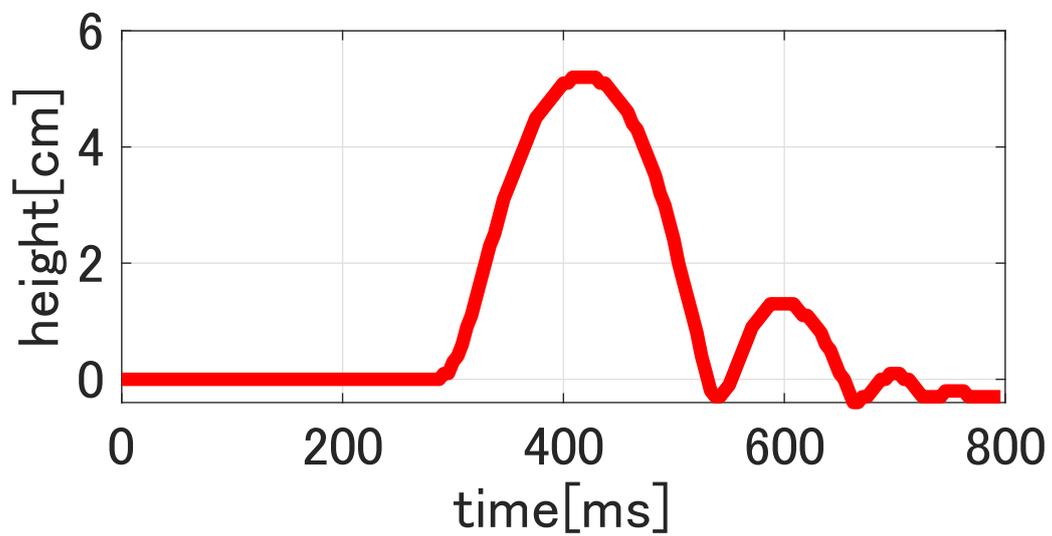
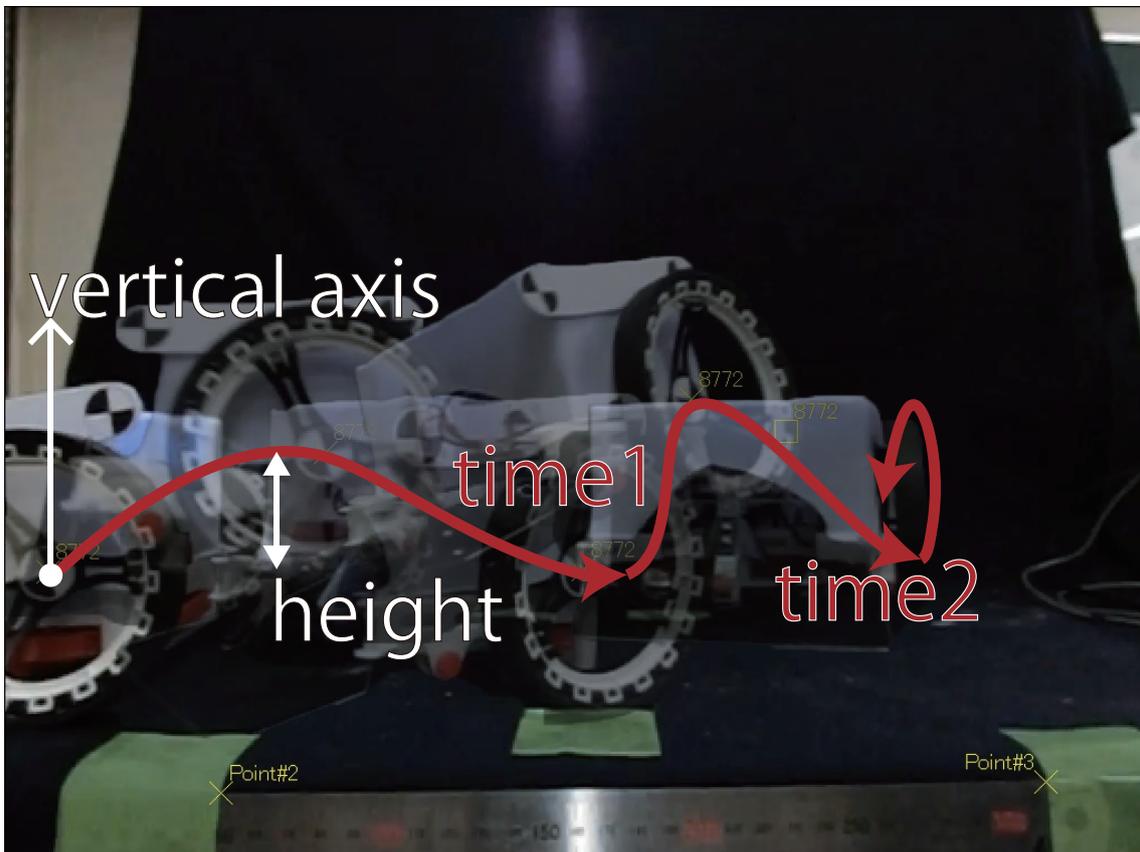


Fig. 3.4: Analysis of the jumping frequency and height of prototype II. The jumping frequency is measured from videos. The jumping height is measured from the locus of the marker.

子を重ね、車輪中心の軌跡を結んだものである。図 3.4 に示すように跳躍高さは跳躍前の車輪中心を基準として、1 回目の跳躍の最大点で測定している。また、跳躍周期に関しては3回の跳躍を基に2回の時間を測定しその逆数をとることで測定した。表 3.1 に跳躍周期、周波数および跳躍高さの平均値および測定値の標準偏差をロボットの繰り返し跳躍能力として示す。ロボットの跳躍繰り返し周期は実験より、 $1.9 \pm 0.04[\text{Hz}]$ であった。また、跳躍高さは $5.9 \pm 0.7[\text{cm}]$ であった。標準偏差は平均値と比較して小さく、実験結果から同じ跳躍を繰り返し行っていることがわかる。

Table 3.1: Repeated jumping ability of prototype II.

Item[unit]	Value[unit]
Jumping times [s]	0.52
Jump frequency [Hz]	1.9 ± 0.04
Jumping height [cm]	5.9 ± 0.7

3.3 連続跳躍耐久実験

本節では連続跳躍耐久実験について示す。プロトタイプ II に対してバッテリーを充電した状態から跳躍コマンドを送り続け跳躍できなくなるまで続ける。その際の跳躍にかかる時間及び跳躍の回数を動画から測定する。図 3.5 に実験開始時から2回跳躍するまでの400msの映像を重ねた様子を示す。本実験より、プロトタイプ II は117回の跳躍を59.43秒で達成した。表 3.2 に跳躍回数に対応する跳躍周波数を示す。59.43秒で117回の跳躍は1.97Hzの繰り返し周波数であり、バッテリーが満充電の際には2Hzに近い跳躍繰り返し周波数を得た。その後バッテリーの低下に伴い連続跳躍可能な回数が12回、6回、4回、最終的には1回毎となった。さらに跳躍周波数もバッテリー消費に伴い低く変化し、260回以上では1.6Hzとなった。最終的には図 3.6 に示すように弾性体が破断することで実験は終了した。弾性体が破断するまでに跳躍した合計回数は424回である。始めの跳躍から弾性体破断までの時間は人による転倒したロボットの姿勢補正の時間を含めて12分49.56秒であった。また、破断後にも走行輪が駆動できたことからバッテリーの余裕はあった。また、弾性体は本実験前から継続して利用していたものである。この時フレームの破損ではなく弾性体の破断が起きていることから、フレキシブルフレーム機構の耐久性は利用している弾性体の耐久性よりも高い

第 3. 跳躍走行ロボットの繰り返し跳躍性能

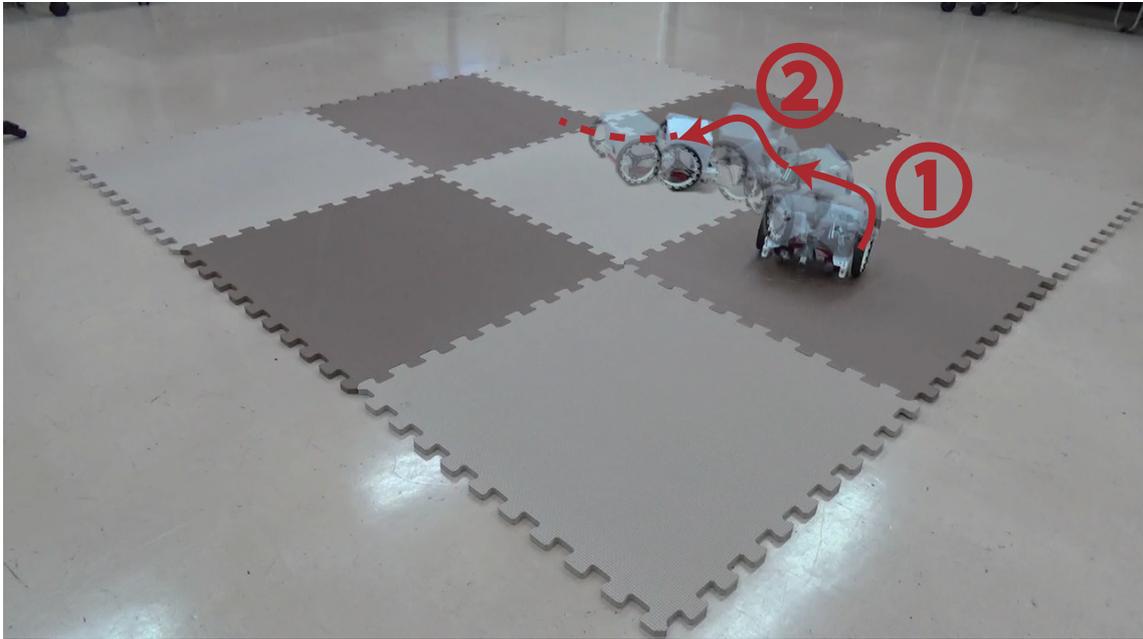


Fig. 3.5: Repeated jumping of prototype II. Prototype II jumped 117 times during 59.43 s and then jumped intermittently for a total of 424 jumps.

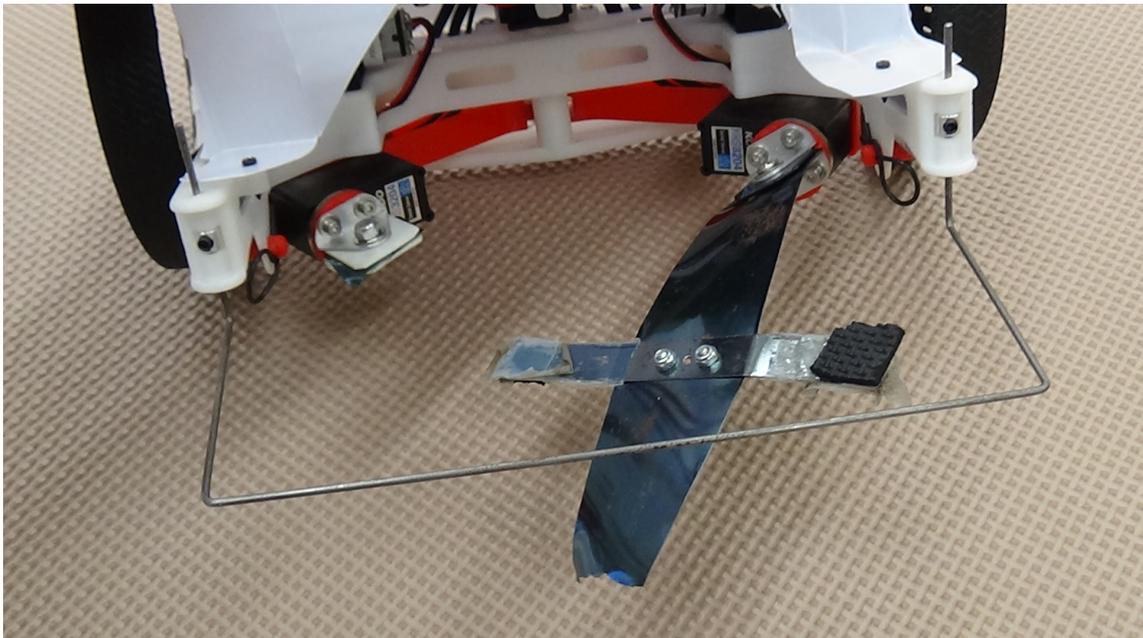


Fig. 3.6: The appearance of the sheared elastic strip after prototype II jumped 424 times.

ことが考えられる。以上から提案するアーチ型スナップモータは走行機構を搭載した状態で繰り返し跳躍周波数 1.9Hz を達成でき、400 回以上の跳躍が可能であることを示した。

Table 3.2: Repeated jumping frequency of prototype II.

Number of Jumps (-)	1–100	101–159	160–183	184–261	261–424
Jump Frequency (Hz)	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6

3.4 階段連続跳躍実験

本節ではプロトタイプ III を用いて階段を模した 15cm の段差を連続で踏破する実験を取り扱う。図 3.7 に使用する人工階段を示す。人工階段は幅 320mm、奥行 220mm のふみ面を備え 1 段あたりの高さが 150mm である。ふみ面の幅は建築基準法に規定する公共施設での室内階段の最小サイズよりも小さいことに注意されたい。高さについては提案ロボットの跳躍能力から 150mm とした。建築基準法の最大高さが 220mm であることから、すべての階段に対応するわけではない。実験では、プロトタイプ III のアーチ型スナップモータに対して外部の直流安定化電源から 2 個のリポバッテリーを想定して 7.4V を印加する。駆動モータのストール電流が 1 個あたり 1.5A であることから最大電流は 3A とした。実験ではロボットを 1 段目に置いた状態からアーチ型スナップモータへ電源を投入し、その様子を動画で撮影することで階段踏破の可否を計測する。

プロトタイプ III が 2 段を連続で踏破した際の 200ms 毎の様子を図 3.8 に示す。最初の跳躍後ロボットが進行方向に向かって左側に傾いたことで最終段は想定したふみ面ではなくフレーム上で跳躍を行っている。この時、フレーム幅は 600mm であり、建築基準法の最低値である 750mm よりも小さいことに注意されたい。

3.5 考察

アーチ型スナップモータの設計パラメータとその設計可能範囲について考える。今回 2 章のパワーフロー解析によってモータストールトルク内で弾性体に貯まるエネルギーを高めることが可能となった。一方で弾性体の長さ l_e に対する図 3.3 に示したフレーム形状パラメータの決定方法は試行錯誤的である。ここで、試行錯誤で決定されるパラメータは弾性体長さ l_e ,

第 3. 跳躍走行ロボットの繰り返し跳躍性能

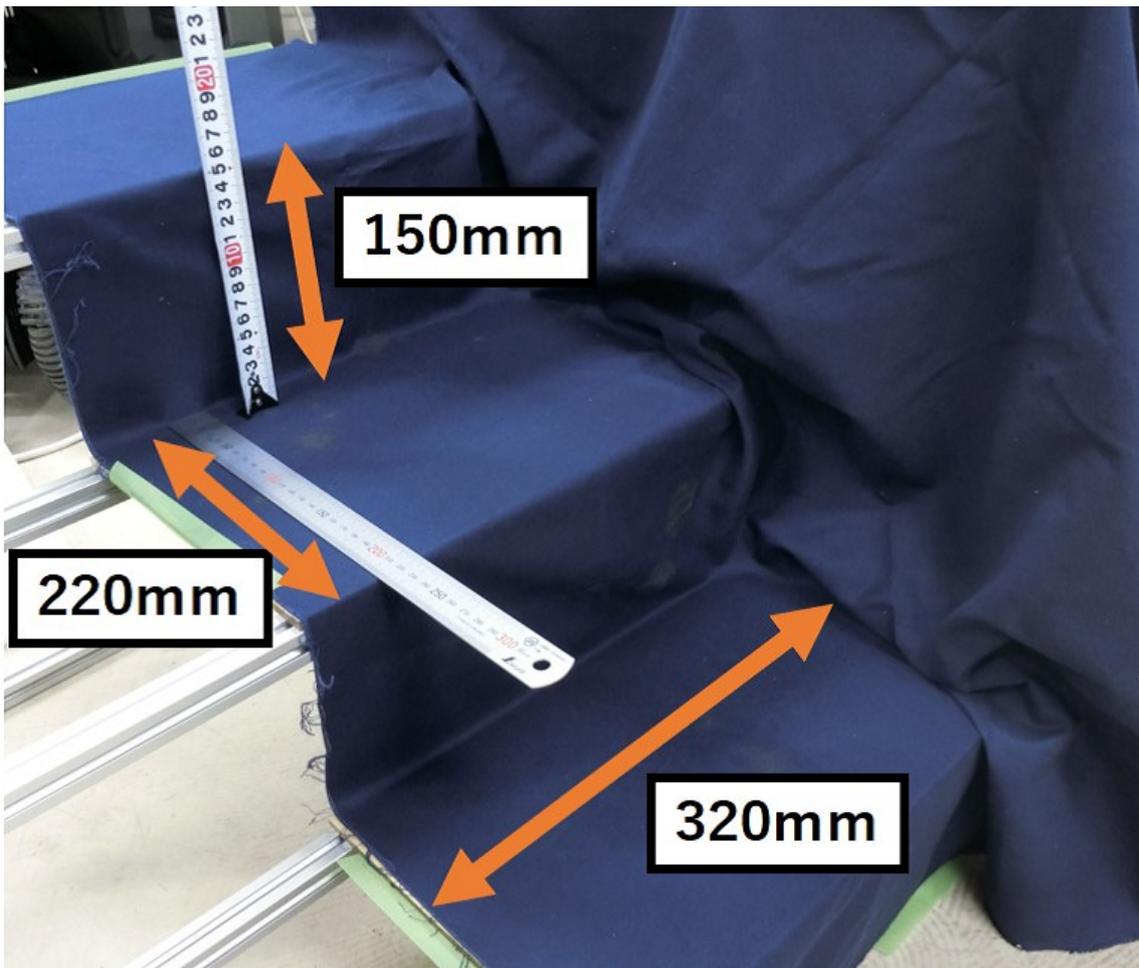


Fig. 3.7: The artificial stairs have 220 mm width, 320 mm length, and 150 mm height.

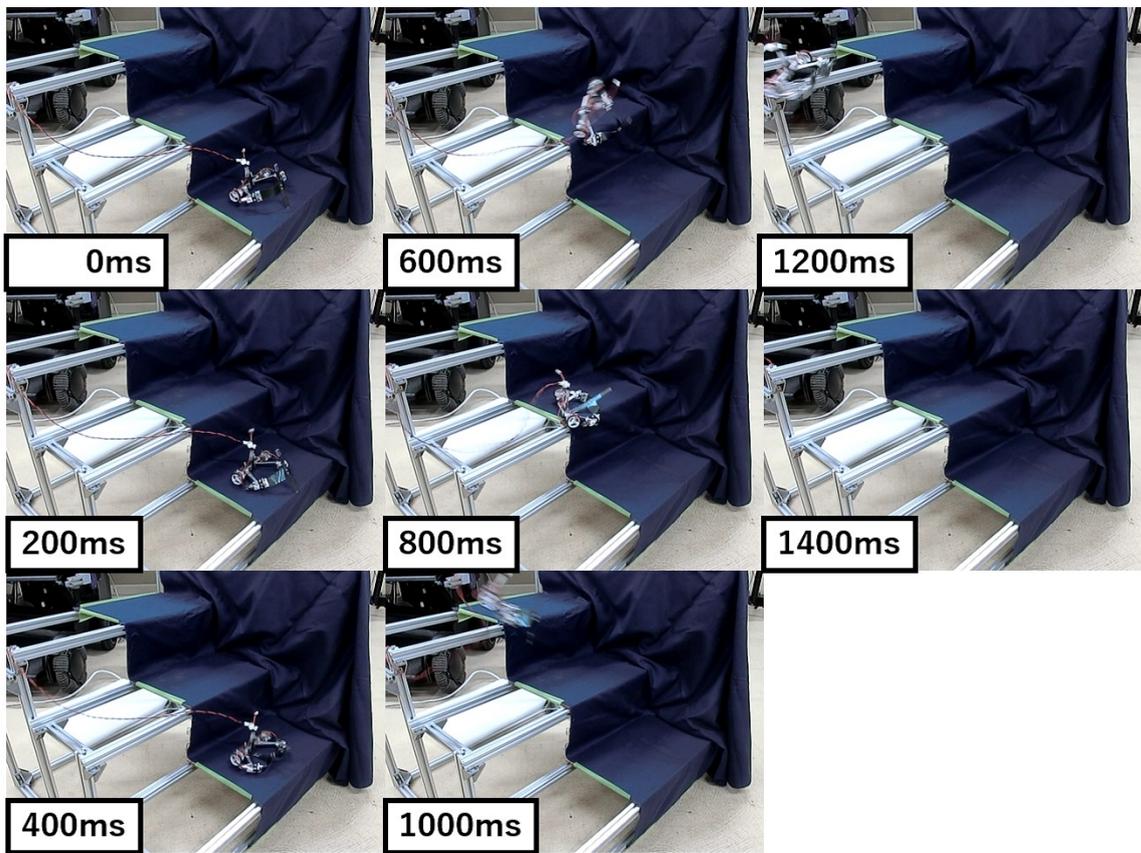


Fig. 3.8: The series of pictures of prototype III climbing the stairs every 200 ms.

第3. 跳躍走行ロボットの繰り返し跳躍性能

モータ間距離 l_m 、モータ向かい角 θ_m およびアーム長 l_a の4つである。ここでアーム長 l_a はオメガ形状においてモータ間距離を縮ませるために必要な長さが取ればよいため、実装においては比較的自由に設定できる。残るパラメータの取りうる組み合わせは無数に存在する。パラメータの取りうる範囲として、モータ間距離 l_m は弾性体長さ l_e よりも短く、座屈発生のため0でない必要がある。それらを踏まえ、実装を考えると弾性体長さ l_e に対してその10%から90%の範囲がモータ間距離 l_m の取りうる値と考えられる。モータ向かい角 θ_m はアーチ形状を作りながら座屈を生じさせるために0度より大きく90度よりも小さい範囲で決定される。弾性体長さ l_e が110mm、幅 w_e が20mm、厚み t_e が0.15mmの弾性体に対して、アーム長 l_a を仮に $l_a = L_e/2$ の55mmとし、モータ間距離 l_m を弾性体長さの10%から10%刻みに90%まで変化させ、モータ向かい角 θ_m を10度から10度刻みに80度まで変化させた場合のパワーフロー解析による座屈発生の有無を調べた。その結果を表3.3に示す。表3.3中の記号はそれぞれ、×：収束する形状が見つからない、△：座屈が生じない、▽：座屈が生じない、収束する形状は本来想定しているアーチ形状とは逆形状（アーム側にアーチ形状を成す）が得られている、数値：座屈が生じ、上段が座屈時の弾性エネルギー差 [mJ] を示し下段がモータの最大トルク [mNm] を示している。また数値前に▽があるケースは想定と逆形状において座屈が生じた際の値である。表3.3からモータ間距離 l_m は弾性体長さの0.5から0.8の長さで生じやすく、モータ向かい角 θ_m は70度から80度の範囲が生じやすいことがわかる。また、モータ間距離は短い方が、弾性エネルギーが高い傾向が見られ、モータ向かい角は角度が大きい方が、弾性エネルギーが増加する傾向が見られる。またモータ最大トルクは弾性エネルギーの上昇に伴い上昇している。ここで、パワーフロー解析においてアーム形状は1度刻みであることや、それぞれ静的な形状を推定していることから、座屈が生じない組み合わせやその周辺においても実機では座屈が得られる場合も存在することに注意されたい。現にプロトタイプIIIにおいて、弾性体長さ l_e が110mmに対してモータ間距離 l_m が72.5mmの数値は割合として約0.69でありモータ向かい角51度はほぼ表3.3中の0.7 - 50度の組み合わせであるが表にもある通りその組み合わせでは座屈を生じなかった。素直に表3.3の結果をとらえればモータ間距離を近づけ、モータ向かい角を大きくとることで高い座屈エネルギー差が得られる。一方で実装を考えれば短いモータ間距離および大きな向かい角は座屈前の形状が大きくアーム側へと遷移し本体フレームに当たることが考えられる。また前述のプロトタイプIIIの例のように座屈を生じない組み合わせ付近であっても座屈が生じる場合があり、シミュレータ上で形状が収束する△の空間においては座屈が生じる組み合わせを探索できると考えられる。パワーフロー解析により実機作成を伴っていた従来のパラメータ探索よりも時間が

Table 3.3: The buckling occurring range by θ_m and l_m . The numbers are buckling energy [mJ] at the upside and the motor maximum torque [mNm] at the downside.

	The rate of l_m to l_e (-)								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
10	▽	▽	▽	▽	△	△	△	△	△
20	▽	▽	△	△	△	△	△	△	▽ 73.7 43.3
30	△	△	△	△	△	△	△	△	△
40	△	△	△	△	△	△	△	△	▽ 17.7 43.3
50	1052.7 139.9	△	△	△	△	△	△	△	×
60	×	△	△	△	△	344.4 138.9	△	×	×
70	1374.5 189.2	△	△	△	△	△	△	441.8 386.1 145.6 137.4	×
80	×	×	△	△	1060.4 182.1	605.3 173.0	512.8 164.9	455.1 153.4	×

× : Not find the result.

△ : Not occur the buckling.

▽ : Not occur the buckling. Find reverse shape.

Numbers: The buckling energy [mJ] at the upside. The motor maximum torque [mNm] at the downside.

第 3. 跳躍走行ロボットの繰り返し跳躍性能

短縮されるものの、今後この弾性体長さに対するフレーム形状も含めて座屈の生じる形状を自動で見つけることが期待される。

また弾性体長さの増減によるスケーラビリティについて考える。表 3.3 より座屈を生じた弾性体長さに対するモータ間距離の割合が 0.5、モータ向かい角 80 度の組み合わせにおいて弾性体長さを変化させた際のパワーフロー解析による座屈の有無を調べた。ここでは表 3.3 で用いたアーム長 l_a を弾性体長さ l_e の半分とし、弾性体長さ l_e が 110mm に対して 10mm 毎に変化させた際の座屈の有無を調べた。すると、弾性体長さ l_e が 100mm で収束する形状が得られず、140mm 以降では収束するものの座屈が生じなかった。このようにほぼ同じジオメトリに対して座屈の発生しない状況も生じており、使用しているモデル [30] においてねじりを含んだ場合にスケーリングができない状況が生じている。将来的にねじりを含んだモデルの無次元化によるスケーラビリティの向上が望まれる。また、座屈の生じた 120mm, 130mm での弾性エネルギーはそれぞれ 838.4mJ と 774.0mJ であり、モータ間距離が 110mm の場合と比較し低い値となっている。この時モータ間距離の値は弾性体長さの上昇に伴って上昇するため、エネルギーの減少はモータ間距離の影響も考えられる。跳躍を想定すれば小型に加えて軽量であることが有利に働くため、弾性体長さはなるべく短い中で制作上無理のない大きさが望ましい。

これらを踏まえて現状の設計可能範囲についてまとめていく。表 3.3 より、まずモータ向かい角 20 度以下の小さい範囲において逆形状で収束する傾向が見られ、その場合本来想定のアーチ形状を取りづらい状況も考えられ、避けた方がよい。またモータ間距離が弾性体長さに対して 0.1, 0.9 といった範囲において収束しない場合が見られ、これらの形状も安定して座屈を生じえないと考えられる。それらを避け、表 3.3 より座屈が生じないものの収束する Δ で示した範囲は広く、その中で座屈が生じる組み合わせを見つけることはプロトタイプ III のように可能と考える。一意にパラメータを決定することは困難である一方で設計可能範囲は広いと、応用先に応じて選択可能なパラメータとみることができる。例えば跳躍を例にとれば実装しやすい範囲で軽量化を目指しパラメータを選定できる。ここで、大型化について考える。注意すべきは、弾性体に貯まるエネルギーの増加量に対して、撃力発生装置として発揮される力積は 1/2 乗でしか増加しないことがあげられる。単純に弾性エネルギーが停止状態から運動に変換されたとすれば、質量 m が変化しない状況において速度 v は運動エネルギー $(1/2)mv^2$ によって変化するため、力積 mv は 1/2 乗でしか増加しない。そのため、力積の増加にはモータ質量の増加量に対して 2 乗の弾性エネルギーの増加量が必要となる。以上より、アーチ型に限らずスナップモータは大型化に向かない。モータの質量増加が問題とならない、

備え付けの装置による打音等の一部の応用先においては大型化も可能である。しかし、大型化するには空気圧等他の撃力発生方法も考えられるため、アーチ型スナップモータは小型の撃力生成装置として利用することが有効と考えられる。

続いて提案するアーチ型スナップモータの繰り返し周波数について考える。3.3節の結果より跳躍繰り返し周波数は1.9Hzであった。素早い連続跳躍の一つの利点として素早い階段踏破があげられる。例えば人と同等の速度で階段を踏破できれば、人を先導しながら道案内を行うといった応用先が考えられる。人の階段踏破速度の一つの基準としてエスカレーターを考える。建築基準法のエスカレーター最大速度は勾配30度において毎分45m以下と規定されている。単純に30度で毎分45mの速度で駆動した場合室内の最大階段高さ22cmを上る速度は一段あたり約0.587秒であり、繰り返し周波数は1.7Hzとなる。繰り返し周波数は階段高さとのコンビネーションで決まるため、一概に1.9Hzで十分とは言えないが、跳躍高さを高めることができれば十分な繰り返し周波数といえる。

次にプロトタイプIIIの跳躍性能として力積を考える。15cmの高さへ跳躍させる場合鉛直方向の初速度は重力下で約1.7m/sとなり、停止中の質量118gの機体を1.7m/sへ変化させた場合の力積は約0.2Nsとなる。この時アーチ型スナップモータが発揮した運動エネルギーはエネルギー保存則より15cmの高さと質量118gおよび重力加速度から173mJである。ここで、パワーフロー解析による座屈による弾性エネルギーの落差は1343mJであり、そのすべてが鉛直方向の運動に変化するとすればエネルギー保存則より初速度は4.8m/sとなり、その時力積は0.56Nsとなる。エネルギー変換効率は約13%と2章における8%をわずかに上回っている。また、ロボットは次の段に上るために鉛直方向だけでなく進行方向に対しても運動を行っており、実際の力積はさらに大きくなると考えられる。ここで、進行方向の運動量として15cmの鉛直方向跳躍の最大高さにおいてふみ面奥行の220mmを移動するという最大値を考えれば水平方向の移動速度は約1.26m/sとなり、質量118gにおいて約0.15Nsの力積となる。この水平方向および鉛直方向の運動を両者考慮するとアーチ型スナップモータが発揮した力積は、鉛直方向のみの0.2Nsから上昇し約0.25Nsとなる。ここでは15cm以上の跳躍高さおよび斜めに跳躍することによる水平移動量の増加を考慮しておらず力積の大きさの合成値は低く見積もった際の値である。ここで効率が上がった一因として、地面との摩擦が考えられる。2章において摩擦を高めるためにゴムシートを取り付けていたが、その取り付けには金属製のなべねじを用いており、ゴムシートで接地する面積が狭くなっていた。プロトタイプIIIにおいては摩擦力を高めるラバーシートはブレードに接着しており、接触面が増えたことで摩擦が増し、滑りによるロスが減ったと考えられる。また、ブレード長が伸びたことで地面とのインタラク

第 3. 跳躍走行ロボットの繰り返し跳躍性能

ション時間が増加したことも効率改善の要員と考えられる。力積の大きさに着目すれば、2章の 274g のプロトタイプ II と比較しプロトタイプ III の質量は半分以下の 118g であるものの、同等の力積 0.2Ns が発揮されており、結果初速度の増加に伴い跳躍高さが上昇したと考えられる。

続いて連続跳躍による階段踏破について考える。提案するアーチ型スナップモータを用いて走行機構を取り付けた状態で 15cm の段差踏破を達成した。今後コントロールユニットおよびバッテリーが小型軽量になることで外部電源を用いず階段踏破可能であると考えられる。一方で階段跳躍の際には着地後の姿勢が次の踏破の可否にかかわってくる。3.4 節の実験では機体が左に傾き、想定したふみ面からはみ出た状態での跳躍となった。跳躍のみを行う場合では走行機構は単に重りとなってしまふ。しかし、跳躍機能のみのロボットでは跳躍後の姿勢の調整が困難となる。今後跳躍機構だけでなく、走行機構を用いて着地後の姿勢を調整することでより安定した連続跳躍踏破へつながる。一方で現状の 15cm の段差 2 段の踏破にはモータ入力開始から約 1.2 秒を有しており、一段あたり 0.6 秒が必要となり約 1.6Hz となっている。異なるモータおよび弾性体を用いているため純粋な比較にはならないが、プロトタイプ II による 1.9Hz と比べて繰り返し周波数が下がっている。これはモータトルク限界付近を利用することで、モータ回転速度が落ちたためと考えられる。前述のエスカレーター速度に照らせば、15cm の階段 1 段あたりの周波数は 1 段あたり 0.4 秒で踏破するため 2.5Hz となる。これは跳躍高さを改善することで相対的に繰り返し周波数を下げることで解決できると考える。跳躍高さを改善するにはアーチ型スナップモータで利用できる座屈エネルギーの増加が考えられる。弾性体に貯まるエネルギーを増加させるために、ギアダウンすることでモータトルクが増すためより曲げばね定数の高い弾性体を座屈させられるが、繰り返し周波数が下がる。目標とするパラメータに合わせて適切にモータを選択する必要がある。

最後にプロトタイプ III のアーチ型スナップモータの性能を示す。プロトタイプ III の駆動輪および駆動モータを取り除いた際の質量は 86g である。ここでプロトタイプ II と比較し軽量のモータを選定したが、弾性体の取り付けに金属部品を用いたことによる質量増加と打ち消し合いアーチ型スナップモータとしての質量はほぼ同等となった。以上より、プロトタイプ III に搭載されたアーチ型スナップモータは 86g の質量で 0.2Ns の力積を 1.6Hz で繰り返し発生させることができる性能を持つ。

3.6 まとめ

本章では、アーチ型スナップモータを備えた跳躍走行ロボットの設計方法を示し、パワーフロー解析結果を用いた弾性体選定方法を示した。そして、跳躍走行ロボットの跳躍性能を実験より示した。提案する跳躍走行ロボットプロトタイプ II は 1.9Hz という高い繰り返し周波数で 100 回以上の連続跳躍が可能であることを実験より示した。また、断続的に 400 回以上の跳躍が可能であり、階段のように連続した段差に対して有効であることを示した。加えて、跳躍走行ロボットプロトタイプ III において走行機構を取り付けた状態でミニマムなふみ面を持つ 15cm の段差の連続跳躍踏破を達成した。このときプロトタイプ III の跳躍による撃力発生性能は 0.2Ns の撃力を 1.6Hz で繰り返す性能を持つ。また、パワーフロー解析による座屈時の弾性エネルギーの運動変換効率 は 13% と 2 章のスナップモータと比較しわずかに性能が向上している。以上より、提案するアーチ型スナップモータを備えた跳躍走行ロボットは、走行機構を備えた状態で階段を踏破する性能を有し、今後モータおよびコントローラ、バッテリーの小型軽量化が進むことでより高い跳躍性能を発揮できる。

15cm の段差跳躍踏破を達成したことにより跳躍走行ロボットとして、平地での走行を素早く行いながら、階段踏破時には着地時の姿勢を走行機構で調整することでより安定した段差踏破が達成できると考えられ、単に跳躍機構のみを持つロボットと比較し跳躍走行ロボットは階段踏破に有用である。

第4章 跳躍走行ロボットの走行中跳躍性能

本章では、アーチ型スナップモータを搭載した跳躍走行ロボットによる走行と跳躍をシームレスに行う走行中跳躍を達成したのでそれを報告する。多くの移動機構を備えた跳躍ロボットは跳躍と移動は切り離されている。そういった走行と跳躍を行うロボットは段差前や溝の前に停止する時間が必要となる。図 1.2 に走行中跳躍の利点を示した。走行中に跳躍することで走行の慣性を利用して跳躍単体では超えられない溝の踏破が可能となり、目的地まで短時間で移動するという移動ロボットの基本タスクに有利に働く。また跳躍能力を変更することができないロボットでは障害物の高さや幅によらず跳躍を行うため、滞空時間が探索時間の拡大につながっている。一方で、走行中に跳躍するロボットはロボットの移動速度を変更することで跳躍能力を変更できない単一の跳躍機構であっても跳躍高さおよび幅を変更することができる。

走行中跳躍の実現には、地面との接触時間が短い撃力発生機構が必要となる。2章のパワーフロー解析における力積測定結果から、短時間で撃力を発生させることにアーチ型スナップモータは適しており、3章の跳躍周波数実験よりスナップモータを用いた跳躍機構は特に繰り返し周波数が高い特徴がある。走行中跳躍においては、既存の走行系に干渉せず、単純な機構で繰り返し跳躍できる瞬発力発生機構が望ましい。

本章では、コンパクトで繰り返し周期の早い跳躍走行ロボットのプロトタイプ I を提案する。提案ロボットは走行車輪を 2 つ持ち、跳躍機構としてアーチ型スナップモータを備える。図 4.1 に提案ロボットを示す。提案ロボットは跳躍能力として約 5.9cm の高さで幅 22cm の跳躍を平均速度 1.2m/s において達成した。そして、提案するロボットは移動速度を 1.6m/s に変更した際には 4.8cm の跳躍高さ、23cm の跳躍幅へ変更することが可能であると実験より示した。

4.1 跳躍走行ロボットの走行中跳躍モデル

本節では跳躍走行ロボットの走行中に跳躍を行う際の力学モデルについて述べる。図 4.2 に跳躍走行ロボットのモデルを示す。ロボットは等速度 v_0 [m/s] で移動中に跳躍機構によって斜

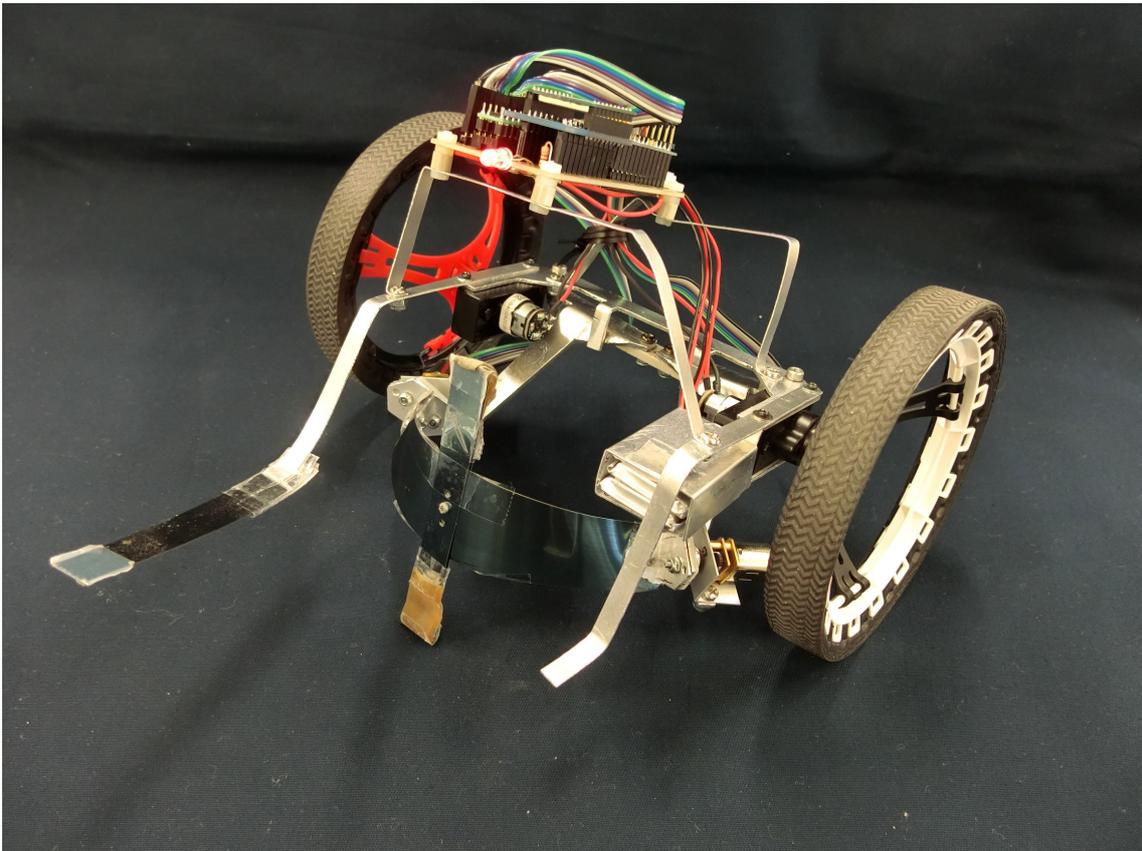


Fig. 4.1: Proposed compact jumping wheeled robot that can jump while rolling.

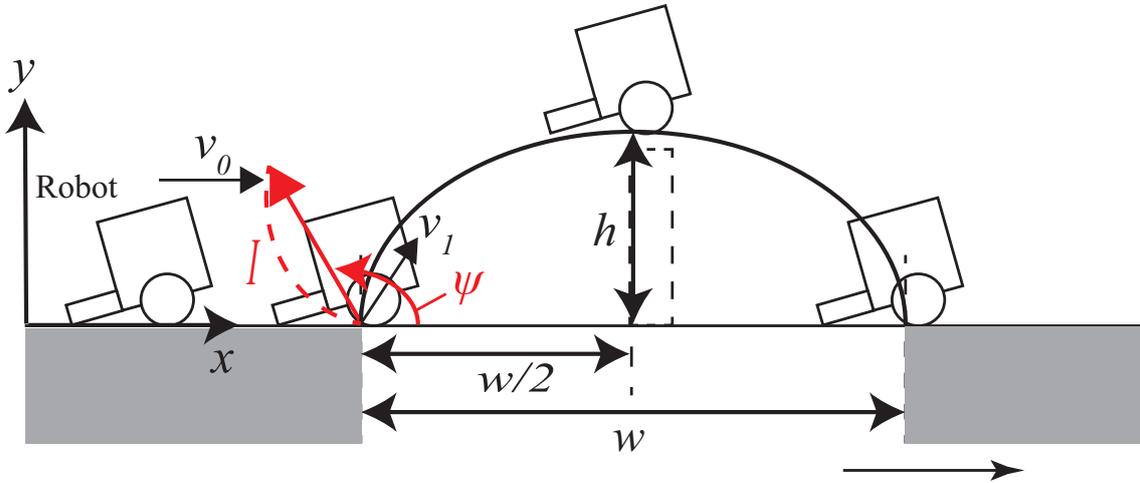


Fig. 4.2: Model of jumping while rolling.

方投射される。跳躍走行ロボットは進行方向に対して ψ の角度で力積 I で跳躍すると仮定する。この時、跳躍直後の初速度 $\mathbf{v}_1 \in \mathbb{R}^2$ は運動量保存則から以下の式が得られ、

$$\mathbf{v}_1 = \begin{bmatrix} v_0 + \frac{I}{m} \cos \psi \\ \frac{I}{m} \sin \psi \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

ここで $m[\text{kg}]$ はロボットの質量である。跳躍高さ h と跳躍幅 w は運動量保存則から

$$h = \frac{\left(\frac{I}{m} \sin \psi\right)^2}{2g} \quad (4.2)$$

$$w = \frac{2\left(\frac{I}{m} \sin \psi\right)\left(v_0 + \frac{I}{m} \cos \psi\right)}{g}. \quad (4.3)$$

と得られる。跳躍高さ h と幅 w は v_0, I および、 ψ の値から得られる。ここでロボットの v_0 は進行速度として直接調整可能であり、跳躍軌跡は I および ψ によって決定される。それらのパラメータが初速度 v_0 によって決定される場合、ロボットの移動軌跡を決定することができ、経路の最適化に利用可能となる。例えば段差高さが h^* のとき、式 (4.2) の h を h^* より高くなればよい。さらに跳躍のタイミングは式 (4.3) 中 w 半分の位置で踏み切ればよい。2章のパワーフロー解析における力積測定の結果からアーチ型スナップモータは力積のばらつきが少ないことがわかっている。走行速度の影響を調べることで力積の大きさと角度が推定できれば走行中跳躍の跳躍軌跡を調べることができる。

4.2 跳躍走行ロボットの機体

本節では跳躍走行ロボットの機体について説明する。図 4.3 に跳躍走行ロボットプロトタイプ I の外観を示す。ロボットは本体長 230mm(転倒防止用のブレード長 55mm を含む)、幅 200mm、高さ 140mm で質量が 208g である。ロボットは走行系と跳躍系から成る。ロボットは 1.7Hz という素早い跳躍繰り返し周期を持つ。表 4.1 にロボットのパラメータを示す。後述する通り、モータ間距離およびモータ向かい角は CAD 上での値であり、実機においてはストッパー当たるまでフレームが弾性体によって押されることでそれぞれ 85mm および 54 度に変化している。ロボット本体のフレームは 1.2mm 厚のアルミ板で作成する。跳躍時に姿勢を調整する部分については 1mm 厚のアルミ板で作成している。走行系の車輪および DC モータは Jumping Sumo[20](Parrot Drones) のものを利用している。マイコンは Arduino Pro Mini(Arduino Holding) および通信に XBee(Digi International K.K.) を利用している。ロボットは人によって無線操縦される。ロボットはリポバッテリー (3.7 V 400 mAh) を 2 個利用している。

跳躍系として図 4.4 に示す弾性体形状を用いる。弾性体には他のロボットと同じく板バネ (SK85-CSPH, JIS) を用いる。図 4.4 中の数値はミリメートルを示す。また地面を押すブレードは座屈変形する弾性体を挟み込む形で 2 枚を重ね合わせて利用する。アーチ型スナップモータに使用したモータはプロトタイプ III と同じくマイクロメタルギアードモータ (HPCB 6V, Pololu Cop.) であり、ギア比は 298:1 を使用した。アーチ型スナップモータのフレームはアルミ板を利用し厚みは 2mm である。アーチ型維持のためストッパーとしてロボット本体フレームを利用する。

4.2.1 走行系と合わせたアーチ型スナップモータ

本節ではアーチ型スナップモータと走行系を合わせた機体設計について説明する。跳躍の際にはロボットの重心を押すことが重要となる。走行中の跳躍では慣性によってブレードが地面を押す位置が停止時よりも後ろに寄る。重心をうまく押すことで本体を回転させることなく跳躍できる。アーチ型スナップモータの飛び移り座屈によってブレードを進行方向へ蹴り上げるため走行中の慣性を生かしやすい。走行中の跳躍によって重心をうまく押せるように本体後部のアルミフレームを調整することで座屈時にブレードが接地するタイミングを本体が回転しないように調整を行う。走行中の跳躍においては、ブレードは静止時跳躍に比べて本体後方の地面を押す。そのため、ロボットの重心位置は車軸中心よりも後方、駆動輪とブレードの間に設計される。ロボットの走行速度が遅いもしくは停止時にはブレードは重心

第 4. 跳躍走行ロボットの走行中跳躍性能

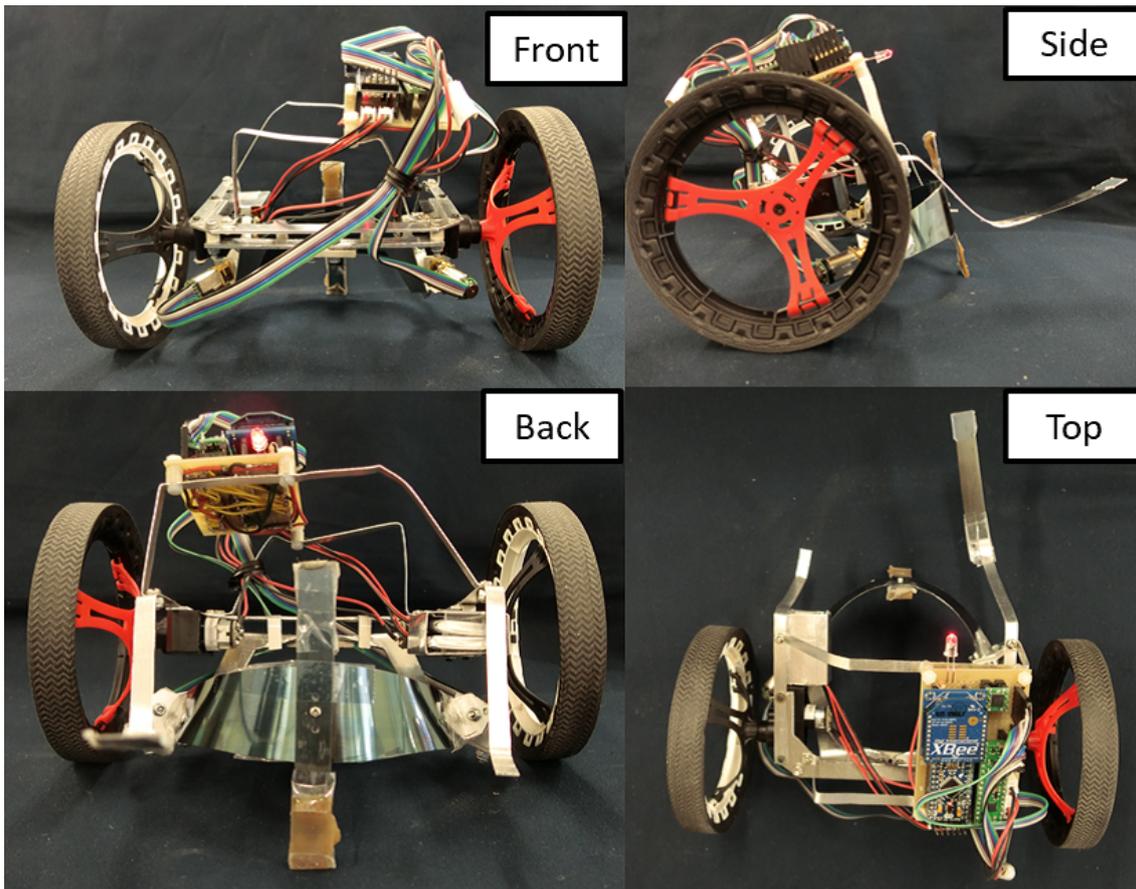


Fig. 4.3: Four views of the prototype I.

Table 4.1: The specifications of the prototype I.

Parameter	Value[unit]
Robot length	200[mm]
Robot width	220[mm]
Robot height	140[mm]
Robot math	208[g]
Elastic strip length	110[mm]
Elastic strip width	20~30[mm]
Elastic strip thickness	0.2[mm]
Elastic blade length	95[mm]
Elastic blade width	10[mm]
Elastic blade thickness	0.25[mm]
Distance between the motor axes	63*[mm]
Motor mounting angle	48*[deg]
Driving frequency	1.7[Hz]

*: The values are on the 3D CAD. The actual values are 85 mm and 54 deg since the elastic strip pushes out the frame.

第 4. 跳躍走行ロボットの走行中跳躍性能

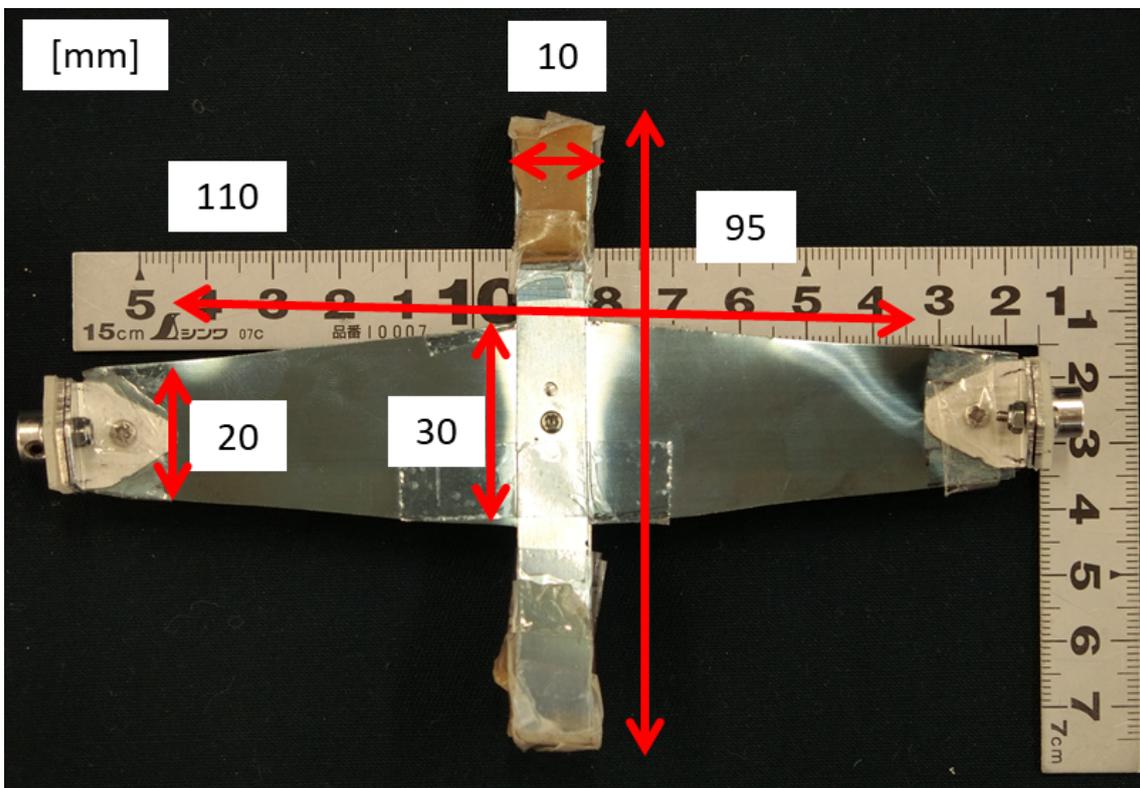


Fig. 4.4: The size of the elastic strip of the prototype I.

位置よりも進行方向側を押すことになり本体の傾きが生じてしまう。ロボットには左駆動輪の後方に転倒防止のための幅 10mm 長さ 55mm の弾性体を備えている。

図 4.5 に走行系と跳躍機構を合わせた際の 3DCAD (Solid Works2016) 上での重心位置およびブレード推定位置を赤色の線で示す。跳躍機構のブレード部分が重心位置を押すことによってロボット本体は回転することなく安定した跳躍動作を行うことができる。跳躍機構は弾性体の飛び移り座屈方向に対して跳躍力を発揮する。飛び移り座屈はモータに取り付けられた弾性体のアーチを作る平面に対して垂直に近い方向に発生する。そのため、跳躍機構はアーチ面が地面と平行になるように取り付けられ、走行時にはブレードによって本体姿勢は前に傾いた形になる。飛び移り座屈が発生する直前に弾性体はオメガ形状に変形する。これによりアーチ型に固定されるときに比べてモータから半分の高さにブレードがくると予想される。その点において、ブレードは重心位置を押し上げる長さに設計される。また、今回弾性体を手加工にて作成しているため、左右の非対称性が現れる。これによりブレードはわずかにロボット中心よりも右駆動輪よりの地面を押し上げる。そのため今回はバッテリーをカウンターウェイトとして右駆動輪側に取り付け、跳躍動作の安定化を図った。

4.3 走行中跳躍実験

本節ではロボットの走行中に跳躍する能力について示す。実験ではロボットの走行速度を変化させて跳躍の様子をハイスピードカメラ (EXILIM EX-100, Casio) を用いて 240fps で撮影することで行う。撮影した映像の背景においた 1cm 角のグリッドボードから跳躍高さを計測する。跳躍幅については映像を用いてロボットの駆動輪のサイズをもとに測定した。また、ロボットは操縦者がコントローラによって操作した。

図 4.6 へ跳躍高さ h および幅 w の、平均および標準偏差そして予測値を示す。予測値は式 (4.2) および (4.3) を用いて実験平均値より力積の大きさ I を 0.22Ns, 角度 ψ を 107deg の定数として計算される。走行速度 v_0 は駆動輪入力の変調比によって 3つの速度に変化する。変調比を変えた場合の 0.4m 移動する時間を各 3 回映像から測定しその平均より、走行速度はそれぞれ 1.2m/s, 1.6m/s そして 1.8m/s とした。また、ロボットは、1.2m/s 未満の速度では重心より前方を跳躍機構が押すため支えがない場合に本体が後方へ回転してしまう。また、1.8m/s よりも早い速度では跳躍機構が重心よりも後方を押すため、本体が前方に傾き跳躍することができない。図 4.7 はロボットの跳躍の様子を 50ms 毎に示したものである。図 4.7 においてロボットが 1.2m/s で走行中に跳躍高さは 8cm であった。図 4.6 より、走行速度 1.2m/s

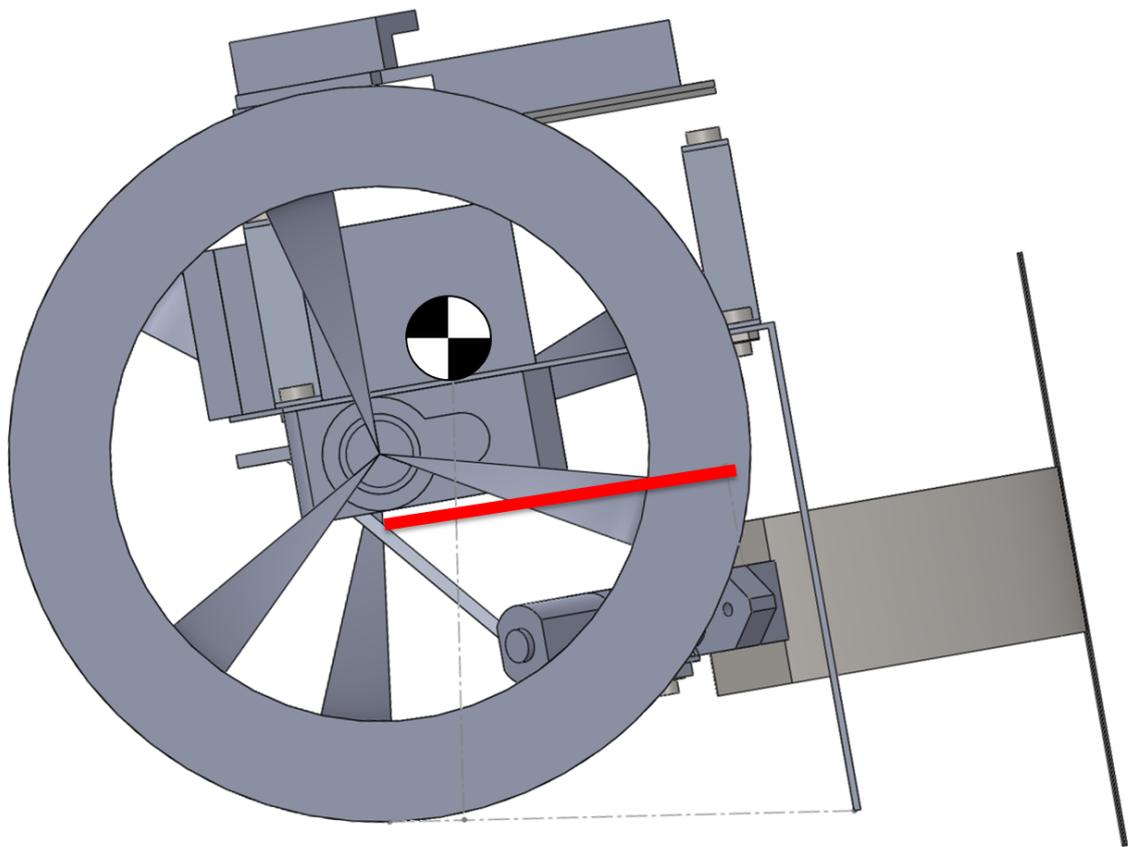


Fig. 4.5: The predicted position of the blade is the red line just before a buckling. There is the blade under the robot's center of gravity.

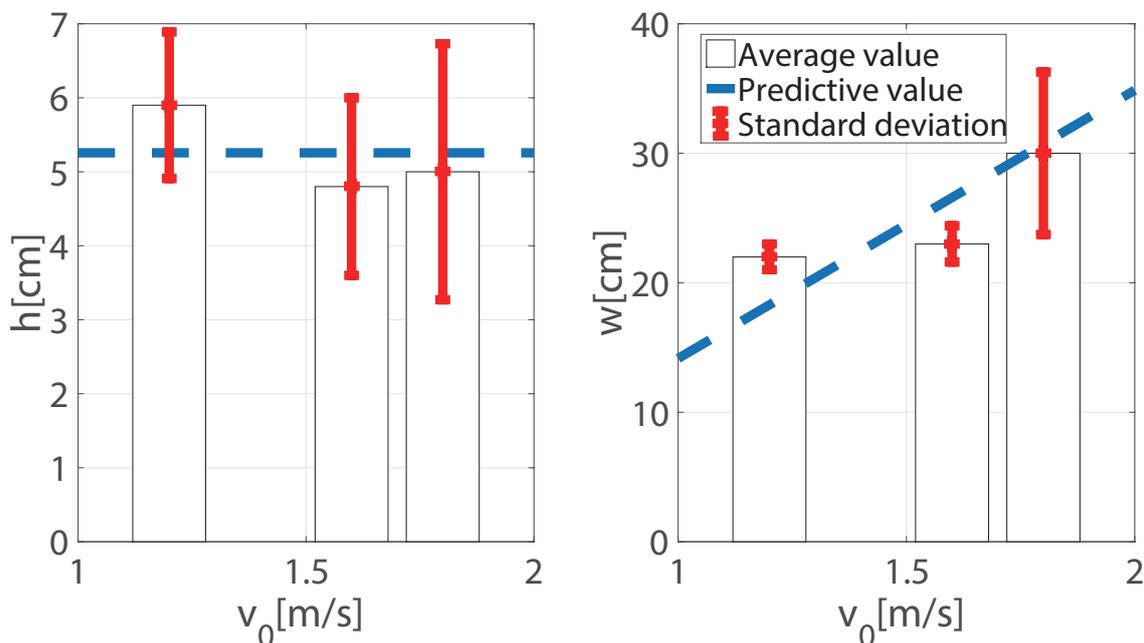


Fig. 4.6: The average value, standard deviation, and predicted value of jumping height and width.

において跳躍高さ $5.8 \pm 0.99\text{cm}$ 、幅 $22 \pm 0.99\text{cm}$ の跳躍を達成しており、同様に 1.6m/s において高さ $4.8 \pm 1.2\text{cm}$ 、幅 $23 \pm 1.4\text{cm}$ 、そして 1.8m/s において高さ $5.0 \pm 1.7\text{cm}$ 幅 $30 \pm 6.2\text{cm}$ の跳躍を達成した。本実験において計測を映像と背景から行っているため、計測結果には誤差が含まれる可能性がある。表 4.2 に各走行速度での平均値を用いて 4.1 節のモデルによって計算した力積の値および映像からブレードが接地している時間を計測した平均値を示す。ここで v_h および v_v は v_1 の鉛直および水平速度成分である。跳躍後の水平方向の速度 v_h に着目すると、走行速度 v_0 に比べてわずかに減少し、 1.2m/s で 83% 、 1.6m/s で 72% 、 1.8m/s で 83% である。一方、 1.2m/s での鉛直速度 v_v からの 1.6m/s での速度減少率は 9% 、 1.8m/s では 8% であり、その結果、力積は 1.6m/s および 1.8m/s においても維持される。一方力積 I の角度は 13 度のばらつきがみられる。動画から計測したブレード接地時間の平均値は 1.2m/s で 57ms であり、 1.6m/s で 51ms 、 1.8m/s で 47ms へと減少している。また、ロボットは進行方向に対して 1.2m/s において 22cm の跳躍を実現しており、これはロボットの全長 0.95 個分 (転倒防止ブレードを含まない場合 1.2 個分) に相当する。 1.6m/s において、跳躍距離は 23cm でありロボットの全長分の跳躍を実現している。跳躍幅については走行速度 v_0 の上昇に伴い上昇している。一方で跳躍高さは減少している。仮に跳躍機構の力積算出パラメータ I および ψ が走行速度 v_0 とは独立して決定されるのであれば跳躍高さは一定となる。正確な予測にはより詳細なモデル

第 4. 跳躍走行ロボットの走行中跳躍性能

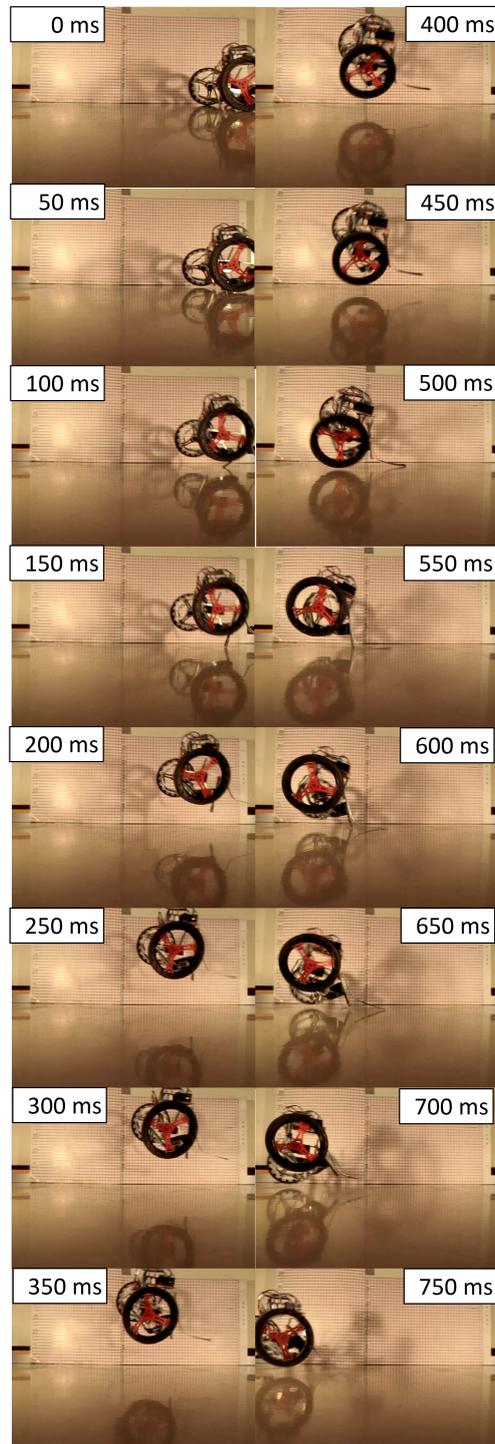


Fig. 4.7: The prototype I jumped while rolling. It is possible to make a jump of 5.8 ± 0.99 cm in height, 22 ± 0.99 cm in width at a speed of 1.2 m/s, 4.8 ± 1.2 cm in height, 23 ± 1.4 cm in width at a speed of 1.6 m/s, and 5.0 ± 1.7 cm in height, 30 ± 6.2 cm in width at a speed of 1.8 m/s.

が必要となる。

Table 4.2: Impulse derived from the model.

Item[unit]	v_0 [m/s]		
	1.2	1.6	1.8
v_v [m/s]	1.1	0.97	0.99
v_h [m/s]	1.0	1.2	1.5
$\ \mathbf{v}_1\ $ [m/s]	1.47	1.51	1.79
$\angle \mathbf{v}_1$ [deg]	47	40	34
I [Ns]	0.23	0.22	0.22
ψ [deg]	101	114	107
The blade ground contact time[ms]	57	51	47

続いてロボットが走行中跳躍を繰り返し可能であることを示す。図 4.8 に繰り返し走行中跳躍の様子を示す。9 枚の画像は 200ms 毎の様子である。233-600ms および 1137-1400ms においてロボットは跳躍している。より詳細な跳躍の様子を 66ms 毎に重ね合わせ示す。図 4.8 の例においては跳躍間に要した時間は $1137 - 233 = 904\text{ms}$ であり、繰り返し周波数は 1.1Hz である。ここで、跳躍指令は連続でなく着地後から入力を開始しているためこの周波数は最大値ではないにも関わらず 1Hz を超える繰り返し周波数を得ている。図 4.8 中では 2 回の跳躍のみであるが、ロボットは任意回数の繰り返し跳躍が可能であることを実験から確認している。

4.4 考察

跳躍走行ロボットの走行中の跳躍能力について考える。図 4.7 から跳躍の様子を詳しくみていくと、座屈が生じた 100ms の後ブレードが変形しながら地面を押し続けていることが確認できる。柔軟素材を使用したことで、慣性によってブレードの接地面がロボット後方に移動する間も地面と接することができ、力積が増大したと考えられる。これは曲げによる弾性エネルギーが支配的である 2 章のパワーフロー解析の結果に対して、実機においてはブレードでねじり変形を地面に伝えることで力積が増加することを示唆しており、アーチ型スナップモータが平面型に比べて力積を高めやすく、走行中跳躍に有利であることが示唆される。表 4.2 より、ブレード接地時間は速度上昇に伴いわずかな減少しか生じなかった。これより、ロ

第 4. 跳躍走行ロボットの走行中跳躍性能

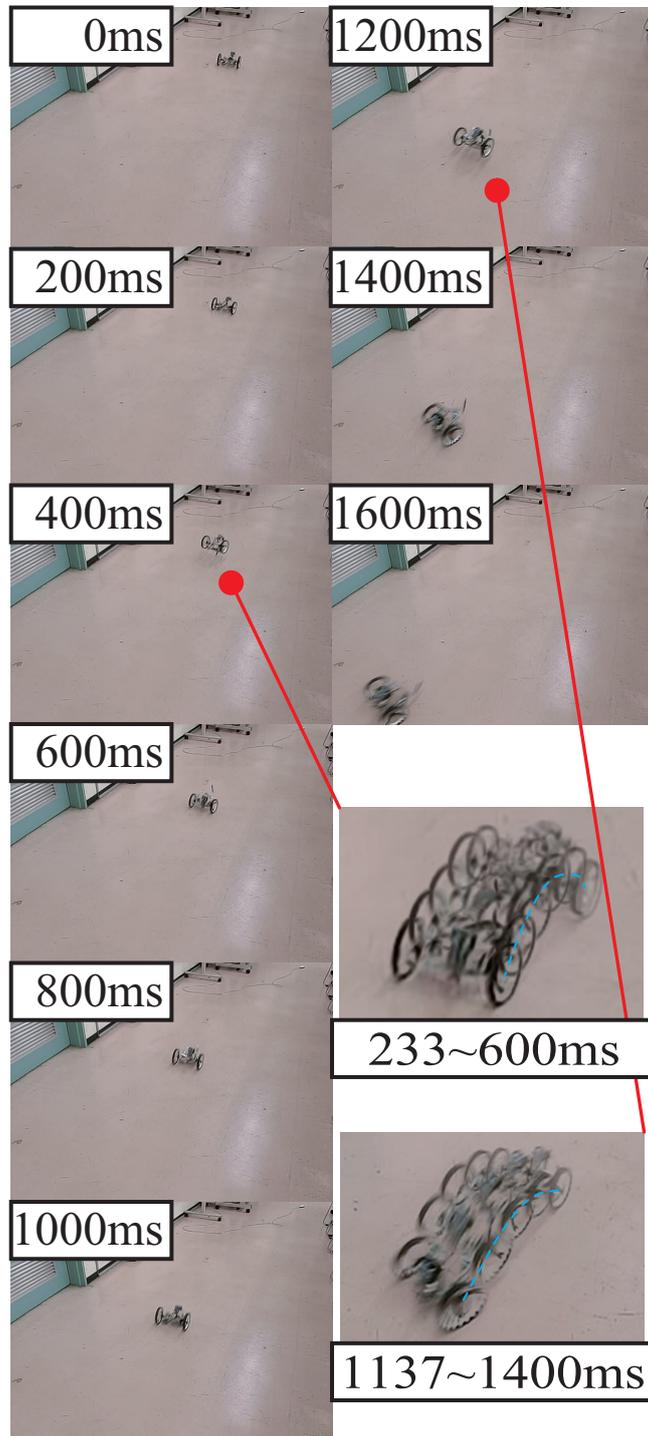


Fig. 4.8: Repeated jumping while rolling. The prototype I jumps twice repeatedly during 233-600 ms and 1137-1440 ms.

ボットの跳躍高さは1cmの減少にとどまっている。跳躍機構が十分に地面を押すことができたため、鉛直方向に対して速度減少を抑えられたと考えられる。

次にロボットの水平方向の跳躍能力について詳しく見ていく。表4.2よりロボットの跳躍後の水平方向速度は走行速度と比べて減少しており、跳躍機構によって減速が生じていることがわかる。一方で走行速度の上昇に伴い水平移動速度自体は上昇しており、走行速度を高めることで跳躍幅が増加することを確認できた。走行と跳躍が切り離されていた場合、力積がほぼ一定であることから走行速度によらず跳躍軌跡は一定となる。今回走行速度に応じて跳躍幅の増加が確認でき、提案する跳躍走行ロボットは走行速度を生かした走行中跳躍を達成している。

次に跳躍軌跡のばらつきについて考察していく。ばらつきの原因としては複数の要因が考えられる。原因の一つとして座屈を生じさせる弾性体を手で成形していることによる形状誤差がある。また、今回の跳躍高さは映像から車輪の最も低い点で測定している。そのため、ロボットが進行方向を軸としたロール回転することで片輪が低くなり跳躍高さが減少する。これらの要因によって、ばらつきが生じていると考えられる。ロボットの回転は今後モデルに考慮されるべきである。

次にロボットの走りながら跳躍する能力について詳しく見ていく。走行中の跳躍では、水平方向の移動速度の70%以上を維持した状態で跳躍している。力積は移動速度の上昇によって大きさ I は維持され、 v_1 の角度が水平に近づいている。このことから、移動速度を変更することによって跳躍能力を維持しながら跳躍方向を変えることが可能となる。ロボットが実際に段差や溝を飛び越える場合には、これらのばらつきも考慮してある程度平均よりも低く跳躍能力を見積もる必要がある。提案するロボットはばらつきを考慮して、少なくとも予測した値の63%の跳躍能力を発揮することができる。溝を飛び越える際には走行速度 v_0 よりも跳躍中の水平速度が減速するため、溝幅に近い跳躍幅とすることで素早い移動を達成できる場合が考えられる。4.1節のモデルは、ロボットが段差や溝を含んだ平面を移動する際の動作計画に使用することができる。例えば、15cmの溝なら走行速度 v_0 1.3m/sとして16cm幅の跳躍といった具合である。一方で跳躍高さは移動速度 v_0 の上昇によって減少傾向が見られる。これはブレードの接地時間が短くなっていることで生じていると考えられる。実験結果から、力積の大きさはほぼ一定だが、角度は変化している。今後速度上昇に伴う、力積角度の変化も考慮したモデルを考える必要がある。

最後にパワーフロー解析を含めたエネルギー変換効率について考える。今回表4.1に示したモータ間距離およびモータ向かい角、弾性体形状の値では形状の収束を得なかった。表4.1に

第 4. 跳躍走行ロボットの走行中跳躍性能

示した値は CAD 上の設計値であり、実際には機体を手で作成していることによる歪みやストッパー位置のずれ等によりモータ間距離は CAD 上の数値より広がり、伴ってモータ向かい角も上昇している。今回はパワーフロー解析上で用いた弾性体形状に近い $110 \times 22 \times 0.2\text{mm}$ の弾性体に対して、実測からモータ間距離 l_m を 85mm 、モータ向かい角 θ_m を 54 度、アーム長 l_a を 66mm としてパワーフロー解析を行った。この組み合わせにおいて座屈時に得られる弾性エネルギーは 1054.7mJ であり、モータの最大トルクは 321mNm でストールトルク内であった。他のロボットと同様にこの弾性エネルギーがすべて鉛直方向の運動エネルギーに変換された場合ロボット質量 208g において鉛直方向初速度は 3.18m/s となる。走行中の跳躍では水平方向の速度減少も含めて力積を計算していたため、鉛直方向のみに着目すると、最も鉛直方向成分が大きい走行速度 1.2m/s において 0.22Ns となる。この時鉛直方向の運動エネルギーはエネルギー保存則より跳躍高さ 5.8cm 、質量 208g および重力加速度を用いて 118.2mJ となり、座屈時の 1054.7mJ の約 11% の値となる。これは 2 章の 8% よりわずかに上昇し、3 章の 13% からはわずかに減少した値となる。力積の大きさは 0.22Ns と 3 章のプロトタイプ III と比較しても高い値が出ているが、質量比を考えると速度が落ちるため跳躍高さは低くなったと考えられる。ここでストッパーとなるロボット本体フレームを除いたアーチ型スナップモータ単体の質量は 66g であり、ストッパー用のフレームも考慮すればアーチ型スナップモータの質量は約 70g である。以上より、プロトタイプ I に搭載されたアーチ型スナップモータは約 70g の質量で 0.2Ns の力積を 1Hz 以上で繰り返し発生させることができる性能を持つ。

4.5 まとめ

本章では跳躍走行ロボットによる走行中の跳躍を提案した。提案したロボットは平均して高さ 5.9cm 幅 22cm の跳躍を走行速度 1.2m/s において達成した。また、ロボットの跳躍可能な速度範囲をおよび繰り返し走行中跳躍能力を実験から示した。提案するロボットは走行速度を変更した場合であっても力積を大きく落とすことなく跳躍可能であること示した。提案するロボットは走行速度を生かした跳躍によって単体の跳躍では踏破しえない幅の跳躍を達成でき、ハードル走のような走行と跳躍の合わさった動作を行うことができるポテンシャルを持つことを示した。また、パワーフロー解析による座屈時の弾性エネルギーの値の約 11% を跳躍に利用できており、ブレードが地面を押し続けることで他のアーチ型スナップモータと比較し走行中であっても効率が維持されることを示した。

この跳躍走行ロボットの成果は移動ロボットへ跳躍を含めた移動経路を与えることにつな

がり、段差や溝を含む平面での移動経路を拡張し、目的地に短時間で到達するという移動ロボットのタスクを最適化できるものである。

第5章 おわりに

5.1 全体のまとめ

本論文では、アーチ型スナップモータのパワーフロー解析を行い、それによって得られた弾性エネルギーおよびモータトルクの推定から数値に基づいたアーチ型スナップモータにおける弾性体形状の設計を可能とした。弾性体形状が設計可能となったアーチ型スナップモータを用いて跳躍走行ロボットへと応用し、階段の連続跳躍および走行中の跳躍を達成し、移動ロボットの移動可能範囲を大きく向上させた。本論文ではアーチ型スナップモータのフレームの変形に着目し、モータトルク要件を緩和するだけでなく、座屈発生時の安定化そのものに寄与していると仮説を立て、フレームの変形をモータ間距離の変化としてとらえることで実機において座屈発生の有無を確認した。このモータ間距離の変化をシミュレータ上に実装することでシミュレータ上において初めてアーチ型スナップモータの座屈を含む形状推定を達成した。このモータ間距離の変化をフリー回転ジョイントとスライダジョイントを組み合わせて実現し、フレームの耐久性を向上させながらモータ間距離を縮めるフレキシブルフレーム機構を提案した。パワーフロー解析による入力電気エネルギーから、座屈時の弾性エネルギーを含む跳躍運動エネルギーの変換効率を示すことで、アーチ型スナップモータの設計指針を与えるとともに定量的な評価方法を与えた。加えてアーチ型スナップモータの力積を測定し、パワーフロー解析に照らすことで地面を押す力積のほとんどを跳躍へ変換できていることを示した。これらの成果によってモータ選定および弾性体形状の設計を可能とし、工学分野に対して小型かつ繰り返し周波数の高い撃力発生機構の設計が可能となり、その定量的評価を可能とした。

さらに、このパワーフロー解析を用いて跳躍走行ロボットへと応用を行った。パワーフロー解析によりモータトルク内で弾性エネルギーを高める弾性体形状の選定が可能となり、試行錯誤的に決定していた弾性体形状を設計可能とした。アーチ型スナップモータと走行系を備えた跳躍走行ロボットにおいて 1.9Hz という高い繰り返し周波数で 117 回の連続跳躍を達成した。さらに 15cm の段差の連続跳躍踏破を達成した。加えて、走行速度を 70%以上維持した

状態で走行中の跳躍を達成し、従来の走行と跳躍を切り分けて動作していたロボットと比べて、素早い繰り返し周波数での連続跳躍を達成するとともに、移動ロボットのモビリティを向上させる跳躍走行ロボットを開発した。

2章では、アーチ型スナップモータのパワーフロー解析を取り扱った。アーチ型スナップモータのフレームの変形に着目し、座屈条件の緩和にフレーム変形が必要であることを実機で示した。このモータ間距離の変化をモータ間距離の変化としてとらえ、耐久性を高めた新たなフレームとしてフレキシブルフレーム機構を提案した。提案したフレキシブルフレーム機構を既存のシミュレータに実装することで今まで達成されていなかったアーチ型スナップモータの座屈エネルギー解析を達成した。さらに入力電気エネルギーから座屈時に得られる弾性エネルギーを経て跳躍運動エネルギーへ変換されるまでのエネルギー効率を測定しアーチ型スナップモータの定量的評価としてのパワーフロー解析を行った。これによって座屈時の弾性エネルギーの約8%が跳躍に利用できることを示した。加えてアーチ型スナップモータの力積を計測し、パワーフロー解析と照らして地面を押す力積のほとんどを跳躍に変換できていることを示した。従来試行錯誤的であったアーチ型スナップモータのモータ選定および弾性体形状の設計方法を示したことは様々な応用先のある小型撃力発生装置としてアーチ型スナップモータをさらに発展させることに貢献できる。

3章では、2章のパワーフロー解析結果から弾性体形状が設計可能となったアーチ型スナップモータを用いて走行車輪を取り付けた跳躍走行ロボットの連続跳躍性能の評価を行った。2章のパワーフロー解析結果を用いて、モータトルク内で弾性エネルギーを高める弾性体形状を決定する手順を示した。走行車輪を取り付けた状態で繰り返し周波数が1.9Hzという高い数値で117回の連続跳躍を達成した。さらにコントローラおよびバッテリーは搭載していないものの、15cmの段差の連続跳躍踏破を達成した。この時階段踏破した際にはパワーフロー解析によって座屈時の弾性エネルギーの約13%を利用できていることを示した。このように重量やモータの異なるロボットに対してパワーフロー解析による定量的な評価を得られた。また、アーチ型スナップモータの跳躍繰り返し周波数は既存の跳躍ロボットと比較した場合でも高く、アーチ型スナップモータが階段等連続した段差の踏破に有利であることを示している。また、繰り返し周波数が高いことで任意のタイミングでの跳躍が即座に行える。これによって、走行中においても段差に瞬時に対応することができる。連続跳躍の際には着地時の姿勢を調整することでより安定した跳躍が可能となる。跳躍機構のみを備えたロボットでは姿勢の調整が困難であるが、走行系と組み合わせることで姿勢の調整が可能となり、走行系が単なる重りでなく跳躍を補助する機構となる。今後コントローラやバッテリーの小型高性能化が進

むことで走行車輪を持ったアーチ型スナップモータによる跳躍走行ロボットが階段の踏破を人並みの速度で行える。

4章では、アーチ型スナップモータを搭載した跳躍走行ロボットを用いて、走行と跳躍がシームレスで行われる走行中跳躍を達成した。走行中に跳躍を行う際には地面と接触する時間が短くなる。さらに慣性によってロボット本体が進行方向に移動するため、それを妨げない機構が必要となる。アーチ型スナップモータを用いることで地面と接触するブレード部分が進行方向に対してロボット本体を押し出すため、走行速度を維持した跳躍が可能となった。これにより、走行速度によって跳躍幅を変化させることができ、走行系のみでは踏破できない段差や溝のみならず、跳躍機構のみでは踏破できない幅の溝に対して跳躍と走行を組み合わせることで踏破可能となった。また、パワーフロー解析によって、走行中の跳躍においても座屈時の弾性エネルギーの約 11% を利用できていることを示した。この成果は、車輪移動ロボットの取りうる経路を大幅に向上させ、目的地まで最短でたどり着くための経路計画をより広くとることができる。

本研究では、繰り返し周波数が高いアーチ型スナップモータの設計および評価を可能とするパワーフロー解析を達成し、アーチ型スナップモータを車輪移動ロボットと組み合わせることで、走行系と跳躍機構がともにそれぞれの能力を高める跳躍走行ロボットを提案した。跳躍機構単体では困難な位置姿勢の調整が走行機構によってなされることでより安定した連続段差跳躍踏破が可能となる。また、提案するアーチ型スナップモータによる跳躍機構は走行速度を落とすことなく跳躍が可能であり、走行中の跳躍によって走行機構のみでは踏破できない溝の跳躍踏破が達成できる。それぞれの機能がそれぞれの機能を高めることで、移動ロボットの移動可能範囲を広げると共に、目的地までの移動時間を短縮することができる。従来の跳躍高さに着目した研究とは異なり、走行と跳躍を切り分けず、移動の手段としてとらえることで、従来の跳躍ロボットにはない、跳躍走行によるモビリティの向上を達成した。

本論文で示した、アーチ型スナップモータのパワーフロー解析とその跳躍走行ロボットへの応用に関する研究の主な貢献は以下の通りである。

- パワーフロー解析による飛び移り座屈現象の利用方法の提示：

弾性体の曲げとねじりを含む飛び移り座屈現象を対象とし、モータトルクと座屈時に得られる弾性エネルギーの関係を明らかとし、そのエネルギー変換効率を評価することでモータ選定および弾性体形状の選定を可能とするパワーフロー解析を達成した。これは従来、試行錯誤的に設計されていた曲げとねじりを含む飛び移り座屈現象を利用したアクチュエータシステムへ新たに評価解析手法を提供するものである。この成果は、同様に

繰り返し駆動するアクチュエータの評価解析手法を与えることで工学の諸分野に貢献できる。

- 車輪走行機構と組み合わせた跳躍走行によるモビリティ向上：

従来の跳躍と走行を切り分けた跳躍ロボットでは達成していない、素早い繰り返し跳躍や、走行と跳躍がシームレスに行われる走行中の跳躍を達成した。階段など連続した段差において繰り返し周波数の高い跳躍をすることで短時間の目的地への移動が可能となる。また、走行中の跳躍により走行速度を落とすことなく跳躍することで跳躍幅を向上させると共に移動中に停止時間を設ける必要がなく素早い移動が可能となる。これらの成果は、移動ロボットの移動可能範囲を大きく広げることで経路計画や目的地への到達時間を最適化でき、移動ロボットのモビリティの向上のみならずその応用可能範囲を広げることへ貢献できる。

5.2 今後の展望

アーチ型スナップモータのパワーフロー解析による跳躍走行ロボットの実現によって走行系を取り付けた状態での段差踏破や、走行中の跳躍を達成し、移動ロボットのモビリティを向上させた。しかし、跳躍高さはすべての室内階段を踏破できる 22cm には到達しておらず、撃力発生能力の向上が望まれる。またフレーム形状の設計パラメータは一意に決定できず、パワーフロー解析によって設計時間は短縮されたものの、結果を見ながらパラメータを調整する必要がある。撃力発生能力を向上させることで、センサやコントローラ等のペイロードが増し、人の操作に頼らない自動化による段差踏破等が可能となる。

今後の展望として、階段を含む段差がある平面内の自由な移動を目指すと共に以下のような展望が望める。

- フレーム形状の最適化:

現状パワーフロー解析によって弾性体形状はモータトルクに合わせた最適化を行える。しかし座屈を生じさせる弾性体長さに対するフレーム形状（モータ間距離、モータ向かい角、アーム長）は試行錯誤的な探索が必要である。フレーム形状を含むモデルを立て、それに基づいたフレーム形状の最適化ができれば、要求仕様を見たすアーチ型スナップモータをより設計しやすくなる。また、フレキシブルフレームによって部材の変形は生じなくなったものの、新たにストッパーや回転軸に対して撃力の反力がかかる構造と

なった。この反力は耐久性の観点から発生する撃力に対して低く設計されることが望ましく、これら反力も含んだフレーム形状パラメータの最適化が望まれる。

- 撃力の向上および方向の設計:

跳躍のように環境とインタラクションする際には撃力を相手により効率よく伝える必要がある。現状のブレードによる環境とのインタラクションでは摩擦の影響が大きい。また、跳躍に関しては重心とのバランスが撃力伝達に大きく影響してくる。これらより運動エネルギーは座屈時の弾性エネルギーの 10%程度の利用に留まっている。現状重心変化に伴う跳躍角度の調整については試行錯誤的にバッテリー等を用いて調整する他ない。この撃力発生方向は目標とする方向に対して最適に設計されるのが望ましい。モータの小型高トルク化および環境とのインタラクション部分での損失を抑えることでの撃力向上が望まれるとともに、重心変化に対する撃力発生方向の設計手法確立が望まれる。

- ダイナミクスを考慮したモデルによるエネルギーおよび力積の評価:

本研究で利用したロッドモデルは静的なつり合いのみを計算しており、座屈時に得られるエネルギーは座屈前後の弾性エネルギー差によって推定を行っている。アーチ型スナップモータの弾性体座屈時の速度および等価と見なせる質量を用いて求められる発揮される力積の値が推定できれば、より精度の高い座屈時の弾性エネルギーの推定が行える。また、アーチ型スナップモータの本質的な力積と実際に撃力をもってインタラクションを行った際の力積を比較することで、撃力によるインタラクションに影響を評価することが可能となる。そのためにモデルへダイナミクスを考慮することが望まれる。

- センサと組み合わせた段差検知と自動跳躍:

跳躍走行ロボットとして利用する際にはロボットとして段差を自動で検知し、その大きさに応じて走行速度、タイミングを自動調整し跳躍を行うことで段差を気にすることなく自動で移動可能なロボットシステムの達成が望まれる。

補章 A こどもと跳躍を介してインタラクシ ンするロボットプラットフォーム

A.1 はじめに

遊びは緊張をほぐす効果が知られており [33], 人のみならず多くの動物でもみられる. 情報伝達とコミュニケーション技術の発展により新たな遊びが発現するとともにその社会的価値も新たに生み出されている. 本章ではロボットの新たな価値を見出すことを目的として研究を行う. そのために, 我々はこどもを対象とし, 身体を動かして一緒に遊ぶことのできるロボットプラットフォームを開発した.

こどもと遊ぶショーシャルロボットは数多く存在する. アザラシ型ロボットの PARO はインタラクシオン相手ヘリラクゼーション効果が報告されている [34]. Kismet は指差し, うなずきや表情といった様々な方法で人とインタラクシオンを行う [35]. InterRobot は人の会話に対してうなずきを返すだけのロボットだが, それによって会話がスムーズに行えることが報告されている [36]. また教育ロボットとして, 田中らは teachable robot という人がロボットへ教えるコンセプトを提案しており英語を学習する日本のこどもたちが care-receiving robot へ英単語を教える効果を報告している [37]. ここでこどもとインタラクシオンを行うロボットの問題点として, その動作がうなずきや表情など限られていることがわかる. こどもたちが遊ぶ際には走る, 跳ぶといった非常に素早い動きを多く含んでいる. そこで本章の研究では, こうした素早い動きをもってこどもたちと遊ぶロボットを創出することへ挑戦する.

本章では跳躍を介してこどもとインタラクシオンを行う跳躍ロボットプラットフォームを提案する (図 A.1.1). 提案プラットフォームの最大の特徴の一つとして跳躍という従来のインタラクシオンロボットでは見られない非言語コミュニケーションを用いる点である. 指差し, うなずき, 表情といった様々な非言語コミュニケーションを用いるロボットがある [35] が我々の知る限り跳躍を対象とした研究は我々が報告するまで存在しない [32]. 跳躍は人だけでなく動物でも見られ, 喜びの表現方法として知られている [38, 39, 40]. 近年の研究より, ポジティブな感情を表現する際には跳躍のようなダイナミックな動作が表情での表現より強く伝

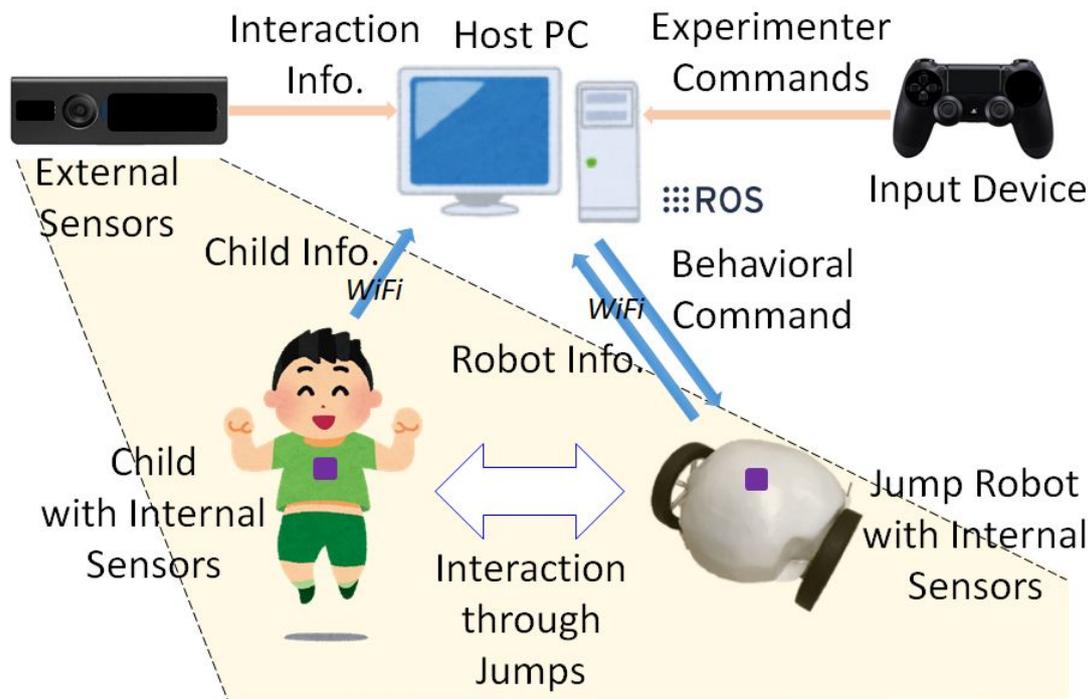


Fig. A.1.1: Jump robot platform for interacting with a child through a jump.

わることが報告されている [41]. 従って、跳躍は新たな非言語コミュニケーション手段たりえ
ると考えられ、こどもとロボットのインタラクションにおいてロボットの喜びを人へ伝える
新たな手法となりえる。跳躍は社会的シグナルを伝える観点から非常に伝わりやすい表現と
考えられる [42]. なぜなら跳躍はこどもであってもその有無が判別しやすいためである。ロ
ボットが喜びを表現する方法として非言語コミュニケーション手段として跳躍ははまだ検討
されていない [43]. 提案するロボットプラットフォームは跳躍走行ロボット、こどもの動き
を測定するセンサ、および跳躍指令をロボットへと送る ROS(Robot operating system) で構築
されたコントローラの3つの要素から構築される。跳躍走行ロボットの跳躍はこどもの動作
に対応するために素早い跳躍応答性が求められる。本章ではアーチ型スナップモータを用い
た跳躍走行ロボットを利用することで人の跳躍に対して0.45秒以内に跳躍動作を返すことが
できる。この応答時間の早い跳躍動作は人とインタラクションを行う中で応答がリアルタイ
ムで返ってくる”今性”と呼ばれる観点で非常に重要である [44, 45, 46].

本章では5-7歳のこども3人を対象として提案ロボットプラットフォームを用いて跳躍を介
したインタラクション実験の結果を報告する。実験より、こどもの素早い動きに反応して跳
躍走行ロボット(図A.1.2)が跳躍動作を返すことを達成した。これより提案プラットフォーム

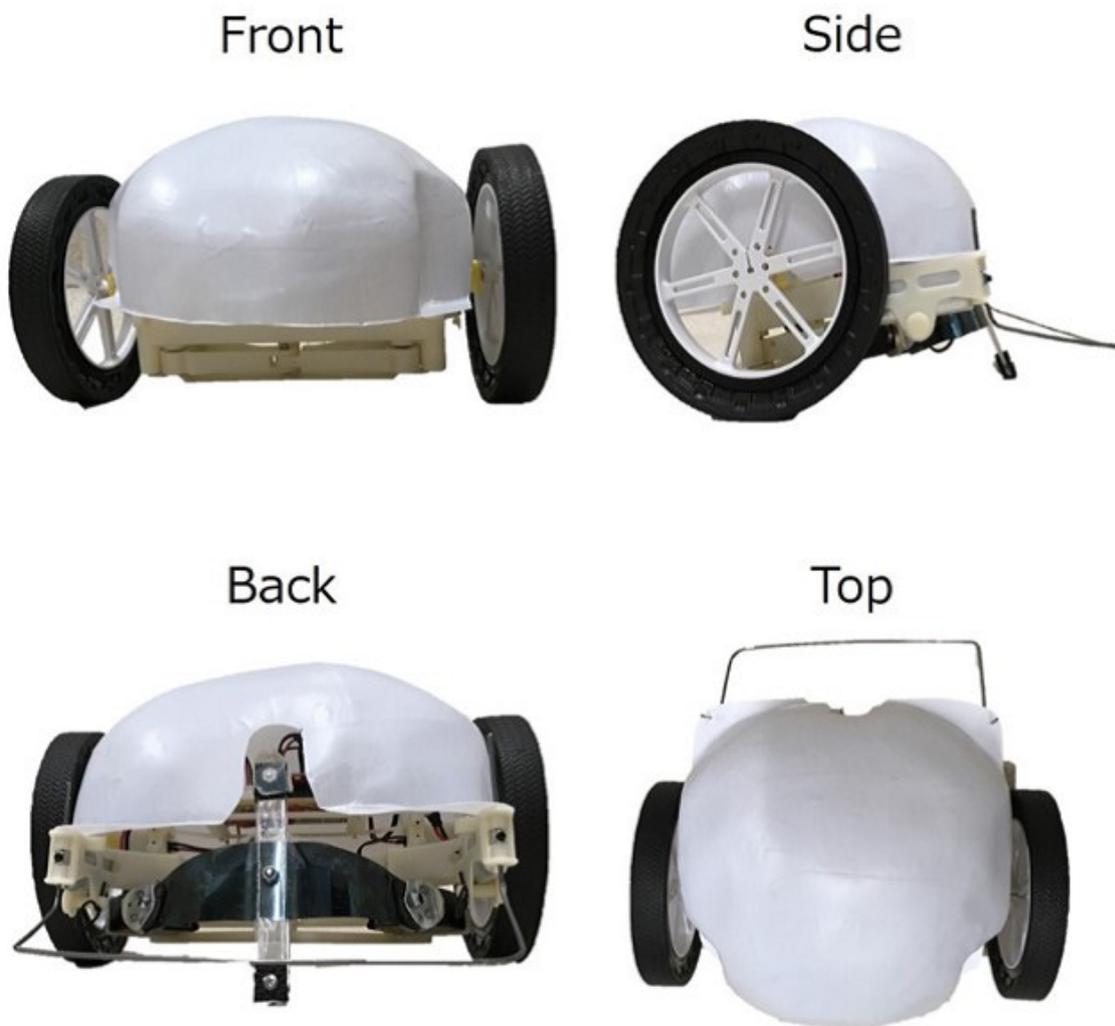


Fig. A.1.2: The jump robot for interaction overview.

がこどもと跳躍を介してダイナミックな動作を用いたインタラクションを行えるポテンシャルを持つことを示した。本章の貢献を以下に示す：

- 本章ではうなずきといった従来の動きの少ない非言語コミュニケーション方法でなく、跳躍というダイナミックな動作による新たな非言語コミュニケーション方法を用いてこどもとインタラクションを行うロボットを我々の知る限り世界で初めて提案した [32].
- 多くの跳躍ロボットが存在するが、本章では跳躍ロボットが新たなソーシャルロボットとしてのポテンシャルを持つこと示した。

A.2 跳躍インタラクションプラットフォーム

本節ではダイナミックな動作を利用した跳躍インタラクションプラットフォームについて説明する。

A.2.1 システム概要

提案する跳躍インタラクションプラットフォームは3つの要素からなり、こどもの動作を検知する知覚部、跳躍を行う動作部および跳躍をコントロールする制御部の3要素である(図 A.1.1)。これらのシステム要素の統合には ROS indigo を利用する。提案プラットフォームは、こどもとロボットへ加速度センサを取り付け、ホスト PC へセンサ情報を送り続ける。そしてホスト PC はデータに基づいてリアルタイムでロボットへ跳躍指令を送ることができる。結果プラットフォームはこどもの跳躍を検知しロボットへ跳躍指令を送ることができる。

A.2.2 知覚部

提案プラットフォームの知覚部はこどもに取り付けられた加速度センサが担っている。こどものモーションを取るセンサとして3軸の加速度センサ (ADXL345, Cixi Borui Technology Co., Ltd.) とマイコン (Raspberry pi zero with the ROS indigo environment) から構成する。これはロボットと同様のセンサ構成である。このセンサはこどもにゼッケンをつけるようにして取り付けられ(図 A.1.3)、主に鉛直方向の加速度値を取る。センササイズは約 50×80×25mm であり、重さは 40g でありこどもの素早い動作を阻害しない。知覚部として、こどもに取り付けるセンサ以外にも実験環境全体を撮影する深度カメラ等の他のセンサを ROS を介してホ

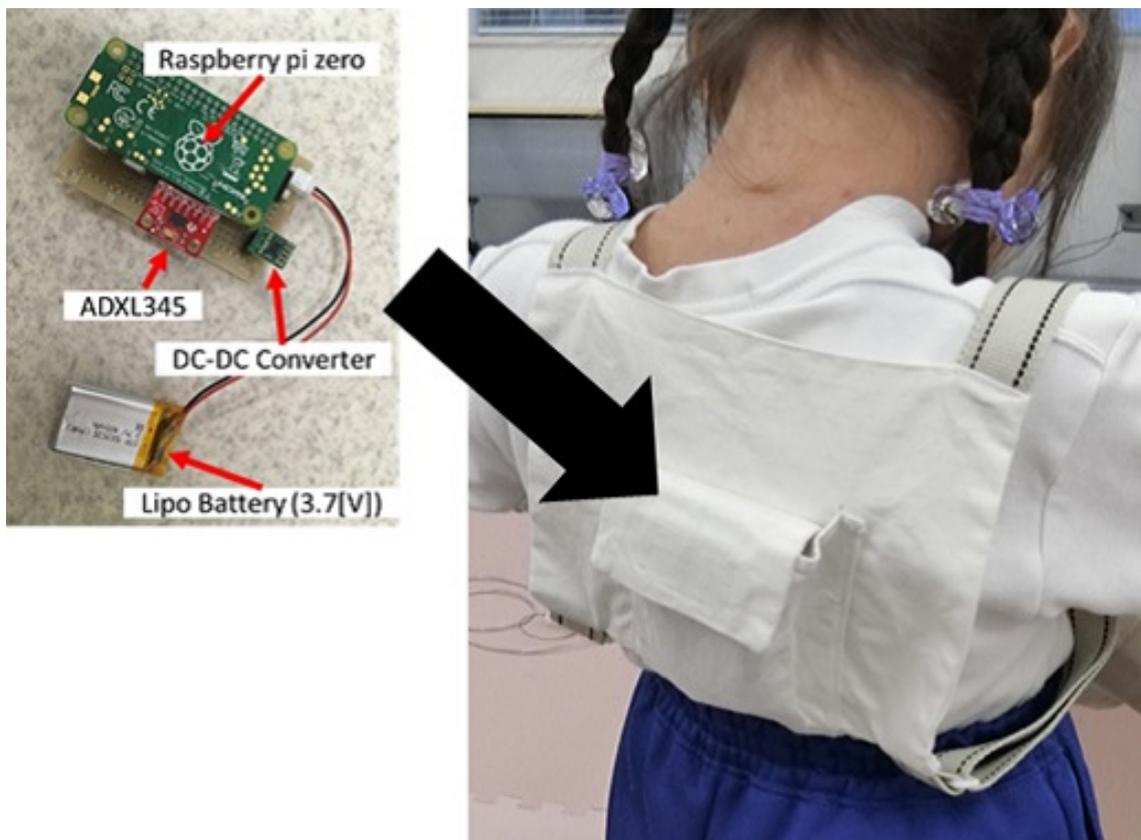


Fig. A.1.3: Motion measurement device.

スト PC へ取り付けることができる。今回は実験の初期段階としてこどもに取り付ける以外の外界センサは用いていない。

A.2.3 動作部

動作部はアーチ型スナップモータを搭載した跳躍ロボットが担う。全体のロボットの構成は3章のプロトタイプ II をベースとしている。ここではプロトタイプ II との差異がある部分について説明する。プロトタイプ II では JumpingSumo の駆動部を流用していたが、本ロボットは pololu 社の駆動輪 (Pololu Wheel 90×10mm, Pololu Cop.) と駆動モータ (298:1 Micro Metal Gearmotor HPCB 6V, Pololu Cop.) に置き換えている。また、駆動輪の外周には衝撃を吸収するため JumpingSumo の駆動輪のスポンジ部分を接着している。また、コントローラ部分はラズベリーパイ (Raspberry Pi Zero W, Raspberry Pi Foundation) を使用しているが、通信は外部の Wi-Fi ルータを介してホスト PC から ROS によって行っている。そのため、ホスト PC からのマニュアル操作およびセンサデータに基づいた自動操作が可能である。また、新たに加速度センサ (ADXL345) を取り付けることでロボットの跳躍タイミングを検知することができる。動作部としてロボットは跳躍機能のみならず駆動輪を持つ。そのため、その場で旋回を続ける、走行を行うといった跳躍に限らない素早い動作の提示が可能である。本章では跳躍のみを利用している。

A.2.4 制御部

跳躍ロボットの制御部は ROS indigo 環境を搭載したホスト PC が担う。制御部はセンサ情報を受け取り、跳躍動作を検知し跳躍ロボットへと跳躍指令を送る必要がある。さらに、ホスト PC へ接続したゲームパッドによって直接人がロボットを操縦できる。ホスト PC は常にこどもに取り付けたセンサの値を読み取り、こどもに取り付けた加速度センサの値が閾値を超えた際に跳躍指令を跳躍ロボットへと送る。これによって、跳躍を介したダイナミックなインタラクションを可能としている。さらに跳躍ロボットに取り付けた加速度センサの値も記録することで人とロボットの跳躍タイミングを照らし合わせることができる。これによって、ロボットへの跳躍指令の時間を遅らせることでインタラクションのタイミングを変化させ、応答時間の違いによるインタラクションの変化を観察することが可能となる。

A.3 実験

提案プラットフォームが今性を探ることが可能かどうか予備実験的を行った。はじめに提案プラットフォームが人の跳躍にどれぐらいの速度で応答できるかを調べ、続いて実際に子どもとインタラクションを行う実験を行った。

A.3.1 跳躍応答実験

予備実験として、人に取り付けた加速度センサをもとに跳躍ロボットへ跳躍指令を送った際の跳躍応答時間を計測した。跳躍したと判断する加速度の閾値は試行錯誤的に 3.5G とした。人に取り付けた加速度センサの値はマイコンを介してホスト PC へ 20ms 毎に送信される。実験の様子を図 A.3.4 に示す。人が跳躍を行った後 300ms 付近でロボットが跳躍をし、350ms において人とロボットがともに空中にいる様子がわかる。人の跳躍からロボットが跳躍するまでの平均時間は 12 回の試行で $239 \pm 16.8\text{ms}$ であった。このことから動作部としてロボットは人の跳躍動作にリアルタイムに反応する性能を持つ。

A.3.2 跳躍を介した子どもとのインタラクション実験

提案プラットフォームが跳躍を介して子どもとインタラクション可能か調べる実験を行った。本実験は筑波大学の知能機能システム専攻の倫理審査 (No. 2018R249) を得て実施している。実験協力者は 5 歳から 7 歳の 2 人の女の子と 1 人の男の子の計 3 人である。実験環境を図 A.3.5 に示す。実験は $4.8 \times 4.8\text{m}$ の正方形の環境で行う。実験環境内部には $1.2 \times 1.2\text{m}$ のロボット動作空間が中央に配置されている。各実験協力者は安全性の観点からロボット動作空間に入ることはできない。実験は 3 台のビデオカメラ (SONY HDR-PJ 680 \times 1 台, SONY HDR-AS 300 \times 2 台) を用いて記録する。各実験協力者は加速度センサが搭載されたゼッケンを着る。実験協力者に取り付けた加速度センサの値が 3.5G を超えた際に跳躍が行われたとして検知する。同時に、実験者はゲームパッドを用いて跳躍ロボットの駆動輪を操作する。これは跳躍によってロボットが動作範囲をでないようにするためである。さらにロボットは有線による非常停止スイッチを備え実験者によって停止することが可能である。ホスト PC は実験協力者とロボットに取り付けられた加速度センサの値を Wi-Fi を介して収集する。

実験に際して、実験協力者である子どもたちには以下の説明を行い、自由に遊んでくださいと教示を行った。

補章 A. こどもと跳躍を介してインタラクションするロボットプラットフォーム

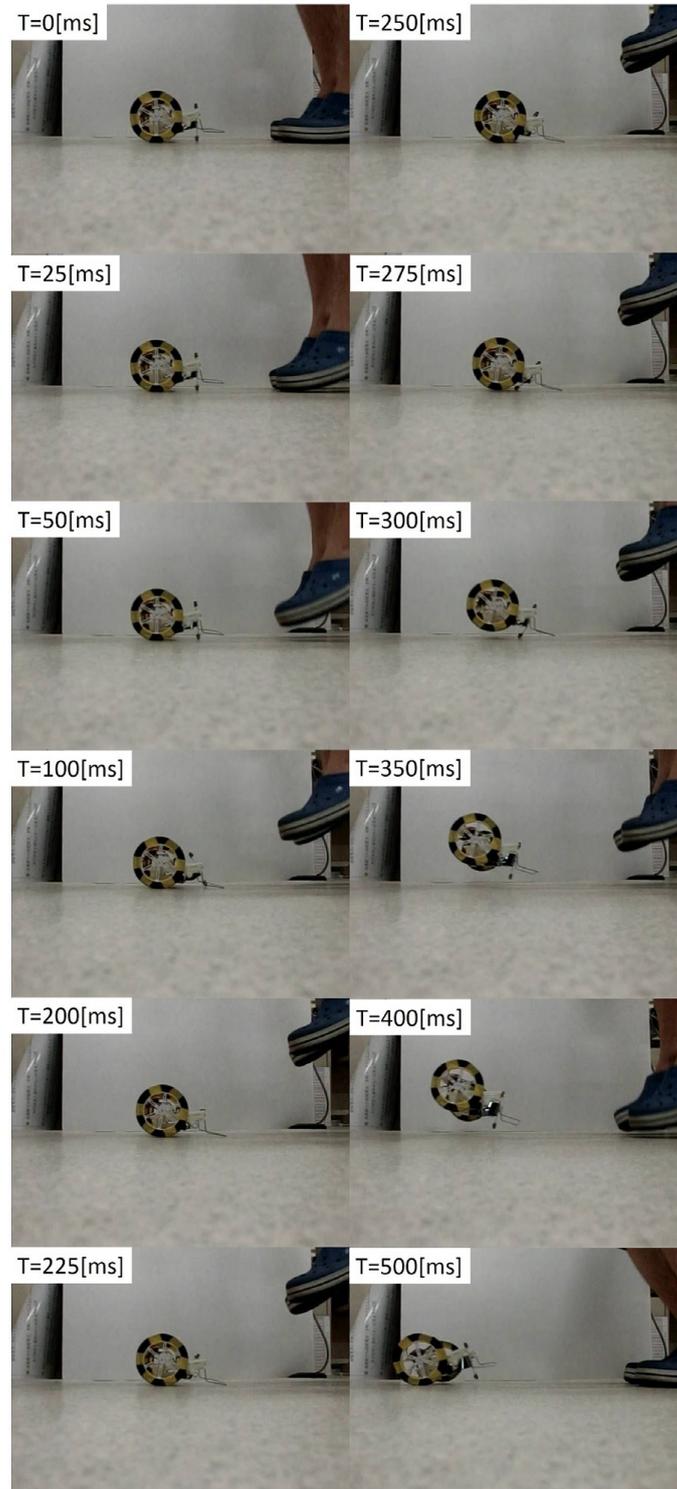


Fig. A.3.4: Jumping contingency between a human and the jump robot.

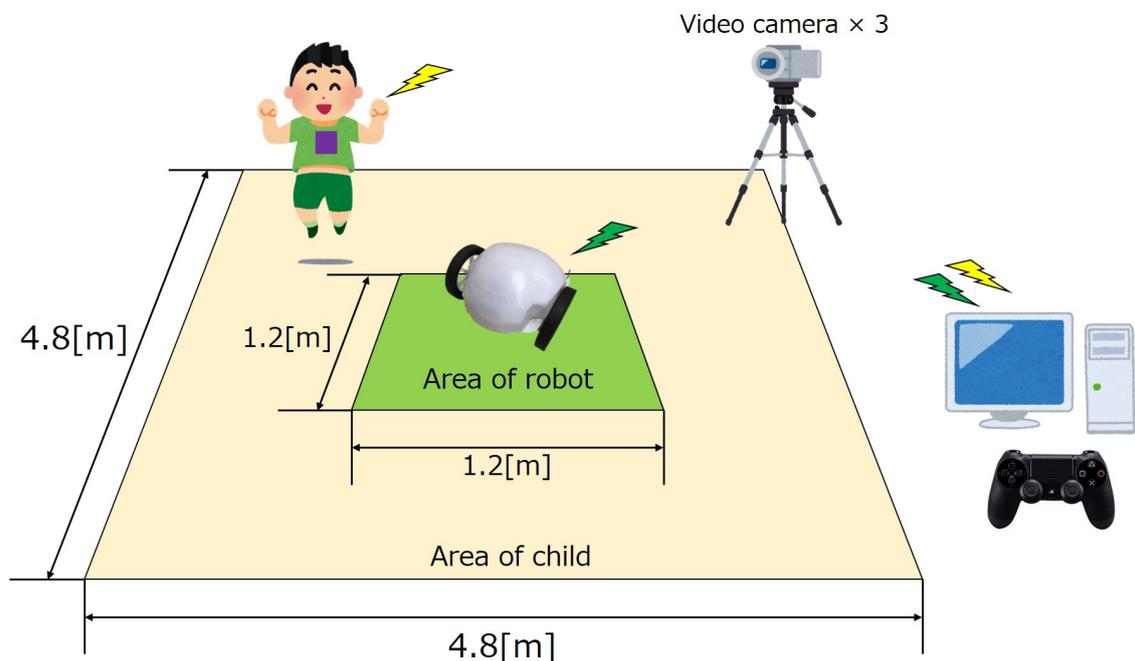


Fig. A.3.5: Jump interaction experimental setup.

1. ロボットと遊んであげてください.
2. このロボットは楽しいと感じるとジャンプします.

また、実験では今性の影響 [46] を確かめるために図 A.3.6 に示す以下の3つの応答パターンを用いた。すべての反応時間を2秒を1セットとして扱い、実験協力者の跳躍からロボットへ跳躍指令を送るタイミングを変化させた。パターンAは最も反応時間の早いパターンでロボットは人の跳躍を検知してから可能な限り早いタイミングで跳躍を返す。その後は2秒経つまでの間跳躍指令は受け付けない。パターンBでは中間の応答速度となり、跳躍から0.5秒後に跳躍指令を送る。パターンCは最も遅いパターンで跳躍から1秒後に跳躍指令を送る。これらのパターンは約2分間の1セッションの間維持される。実験では6セッションから構成され各パターン2回ずつ行われる。現在どのパターンになっているかは実験協力者には伝えられず、その順番もランダムに決定される。

実験を介して子どもたちの様々な反応が見られたのでそれを報告する。実験での子どもたちの様子を図 A.3.7 に示す。子ども1は初めのセッションにおいては跳躍を繰り返しロボットが跳躍する様子を観察していた。その後セッションを続けることで図 A.3.7(A) に見られるようにロボットの跳躍に合わせて交互にリズムカルに跳躍をする様子が観察された。また、こ

補章 A. こどもと跳躍を介してインタラクションするロボットプラットフォーム

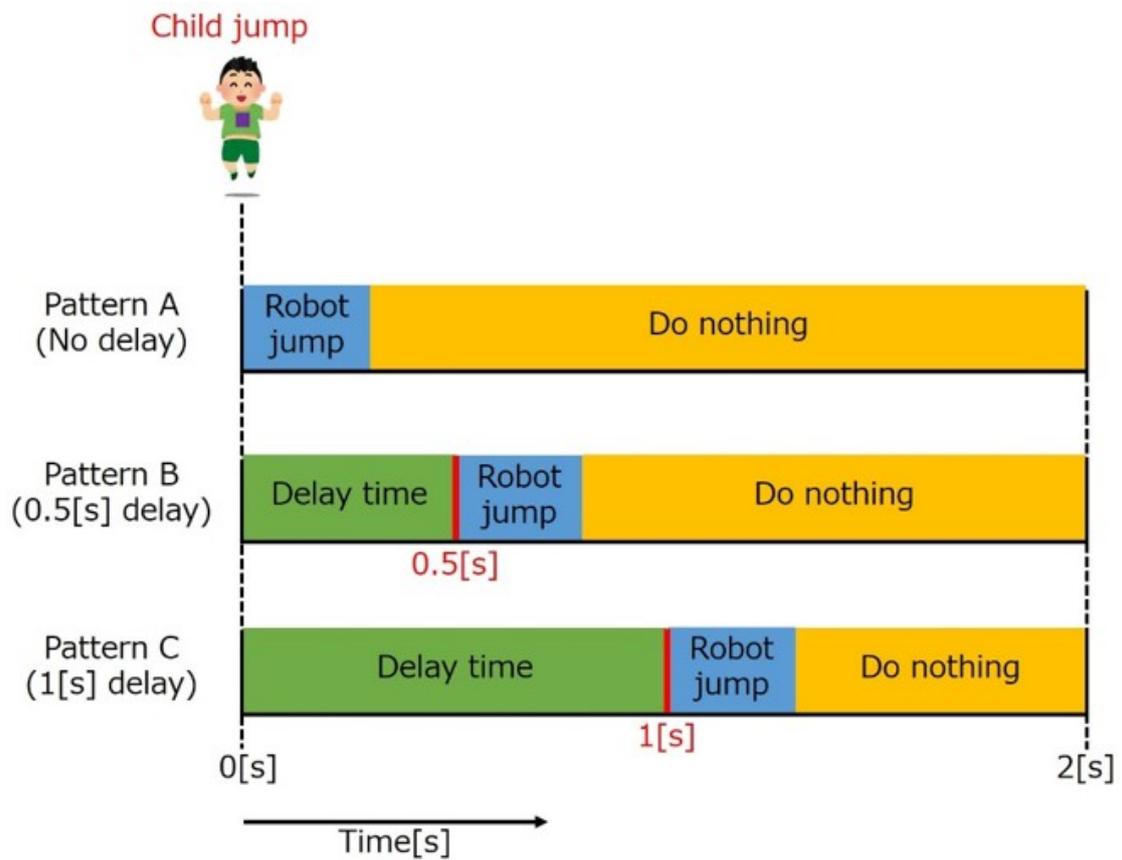
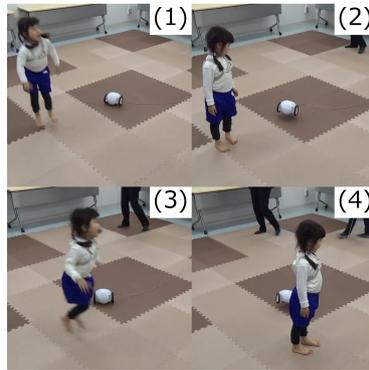


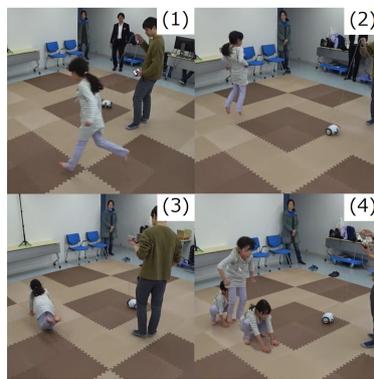
Fig. A.3.6: Three patterns of jump robot reaction to child motion.



(A)Child 1



(B)Child 2



(C)Child 3

Fig. A.3.7: (A)Child 1 jumps with the robot in turn rhythmically. It should be noted that to achieve these rhythmical jumps with the robot she has to wait for an appropriate time. (B)Child 2 is running around the robot very fast. This image was made by superimposing a series of 5 images in a period of 1 second. He succeeded to make the robot jump frequently. (C)Child 3 showed a variety of motion behaviors. (1) Running, (2) Jump from standing state, (3) Crawling, (4) Jump from crouching state (Frog jump)

の時パターンを変化させた場合でもこども 1 はロボットに合わせて跳躍タイミングを調整する様子が見られた。このような跳躍がリズムカルに返されている様子は加速度センサの値からもみることができる。こども 1 とロボットの加速度センサの鉛直方向の値を図 A.3.8 に示す。横軸が時間、縦軸が加速度センサの値である。青の実線がこども 1 の加速度の値、赤の破線がロボットの値である。図 A.3.8 の上段は最も反応速度の早いパターン A であり、下段が跳躍からの反応速度が遅いパターン C の加速度センサの値である。図 A.3.8 中の加速度には鋭いピークが見られ、簡単に跳躍のタイミングを検知することができる。図 A.3.8 より、跳躍が順に行われており、異なるパターンでも同様にみられることから、こどもはロボットの反応に合わせて跳躍のタイミングを変化適応させていることがわかる。

こども 2 はロボットの周りを走り回る動作を行った(図 A.3.7(B))。図 A.3.7(B)には 1 秒ごとのこどもの様子を重ね合わせて表示している。これは、こども 2 が走ることで十分な加速度を生じさせロボットを跳躍させられることに気づいた結果である。このように走ることで跳躍させられることはこども 2 が実験をするまで我々は知りえなかった。

こども 3 はカエル跳びや、はう動作など様々な動作を試す様子が見られた。(図 A.3.7(C))。

このように加速度センサの値をもとにロボットが跳躍するという単純な仕掛けであってもこどもの様々な動作を引き出すことができることが実験から観察された。

A.4 考察

初めに、跳躍インタラクションプラットフォームとしての性能についてみていく。提案プラットフォームはロボット 1 台、こどもの動作センサ 1 台、人のゲームパッドの入力を ROS を介してリアルタイムで処理する能力を有している。ROS を利用することで、容易にセンサを追加できる。例えば深度カメラを利用することで、こどもの動きをビジョンベースでとらえることができる。これによってこどもにセンサを取り付ける必要がなくなり、より自然なインタラクションを引き出せると考えられる。

続いて、提案プラットフォームのこどもとのインタラクションへの利用可能性についてみていく。実験より、こどもの跳躍動作を検知しロボットによって跳躍動作をこどもに示すことができた。これは跳躍というダイナミックな動作を用いてインタラクションを行う可能性を示した。また、こども 1 ではロボットの跳躍パターンに適応する様子が観測された。また、ロボットが跳躍できなかったエラーパターンにおいて、こども 1 がロボットを注視する様子が観測された。これはこどもが自身の動作によってロボットの跳躍を引き出せていると感じ

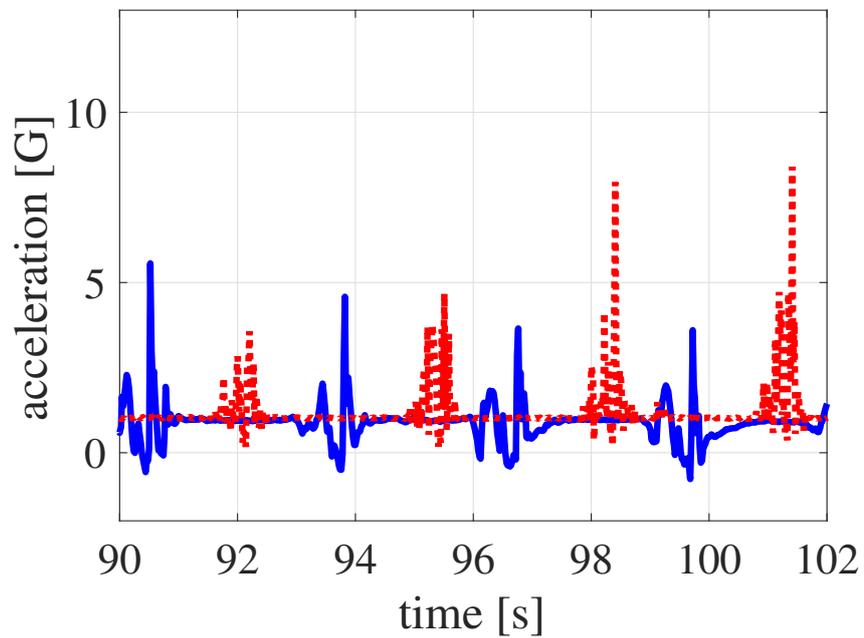
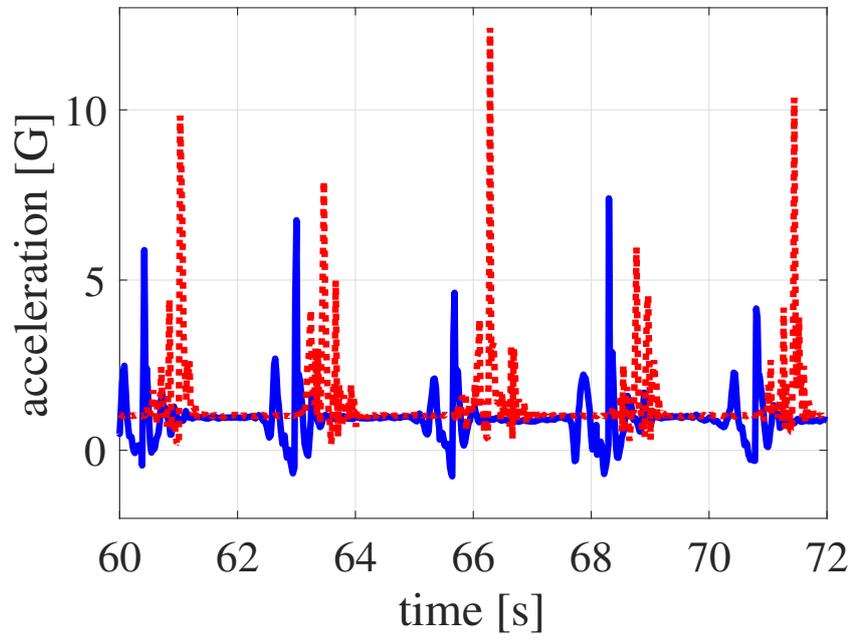


Fig. A.3.8: Acceleration of Child 1 and the robot. The upside is robot pattern A, the downside is robot pattern C. The blue solid line expresses the vertical acceleration of Child 1 while the red dashed line shows that of the jump robot.

ているために見られると考えられる。こどもがこの時間で反応するであろうというロボットのモデルが崩れたことで注視が生じたと考えられ、応答が今性をもって返されることでインタラクションがうまくいくことが示唆される。このことから、ロボットの応答時間は早いことが必要となる。提案プラットフォームは今性を探る動的なインタラクションを探るために利用できると考えられる。

一方で、本章で行った実験の協力者は3人ととても少なく、この結果のみでダイナミックな動作を介してインタラクションは可能であると断言するのは早計である。今後、より多くの実験を行うとともに、認知学等の実験手法を取り入れることでダイナミックな動作によるインタラクションの影響をより明らかにしていく必要がある。

A.5 おわりに

本章では、跳躍を介してこどもとインタラクションを行う跳躍ロボットプラットフォームを提案した。提案プラットフォームを用いた実験から、こどもたちの様々なダイナミックな動作が見られ、跳躍ロボットによるダイナミックなインタラクションの可能性が示唆された。これにより跳躍ロボットがソーシャルロボットとして利用できることを示した。

もちろん本研究は初期段階であり、課題も多く残っている。実験を重ねるとともに結果を注意深く観察することで動的なインタラクションを成立させる要素を明らかとしていく。

参考文献

- [1] 内閣府. ムーンショット目標1 2050年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現- 科学技術・イノベーション. <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub1.html>.
- [2] Boston Dynamics. Atlas. <https://www.bostondynamics.com/atlas>.
- [3] Boston Dynamics. Spot Mini. <https://www.bostondynamics.com/spot-mini>.
- [4] Eric Rohmer, Tomoaki Yoshida, Kazunori Ohno, Keiji Nagatani, Satoshi Tadokoro, and Eiji Konayagi. Quince : A Collaborative Mobile Robotic Platform for Rescue Robots Research and Development. In *The Abstracts of the international conference on advanced mechatronics : toward evolutionary fusion of IT and mechatronics : ICAM*, Vol. 5, pp. 225–230, 2010.
- [5] 渡邊彩夏, 奥川雅之. 能動適応クローラロボットの対地適応性に与える影響因子-梁モデルによるサブクローラ回転軸コンプライアンスの解釈. In *Dynamics & Design Conference 2018*, p. 727. 一般社団法人日本機械学会, 2018.
- [6] NASA. MARS Exploration Rovers. <https://mars.nasa.gov/mer/>.
- [7] 高木健, 仲川雄太郎, 石井抱. 倒立振り子型ロボットのための段差走行を可能にする遊星車輪機構の開発. *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, pp. 1P1–I05, 2011.
- [8] A. A. Wardana, T. Takaki, M. Jiang, and I. Ishii. Development of a single-wheeled inverted pendulum robot capable of climbing stairs. *Advanced Robotics*, Vol. 34, No. 10, pp. 674–688, 2020.
- [9] Kenzo Nonami. Drone technology, cutting-edge drone business, and future prospects. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 28, No. 3, pp. 262–272, 2016.
- [10] Amazon. Ring Home Drone. <https://ring.com/always-home-cam-flying-camera>.

- [11] Carl John Salaan, Kenjiro Tadakuma, Yoshito Okada, Yusuke Sakai, Kazunori Ohno, and Satoshi Tadokoro. Development and Experimental Validation of Aerial Vehicle with Passive Rotating Shell on Each Rotor. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 4, No. 3, pp. 2568–2575, Jul. 2019.
- [12] Mirko Kovač, Martin Fuchs, André Guignard, Jean Christophe Zufferey, and Dario Floreano. A miniature 7g jumping robot. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 373–378, 2008.
- [13] Mark M Plecnik, Duncan W Haldane, Justin K Yim, and Ronald S. Fearing. Design Exploration and Kinematic Tuning of a Power Modulating Jumping Monopod. *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 9, No. 1, p. 011009, 2017.
- [14] Sandia National Laboratories. Urban Hoppe. https://www.sandia.gov/research/robotics/unique_mobility/urban_hopper.html.
- [15] Boston Dynamics. Sand Flea. <https://www.bostondynamics.com/sandflea>.
- [16] Hideyuki Tsukagoshi, Masashi Sasaki, Ato Kitagawa, and Takahiro Tanaka. Design of a higher jumping rescue robot with the optimized pneumatic drive. In *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2005, pp. 1276–1283, 2005.
- [17] S.A. Stoeter and Nikolaos Papanikolopoulos. Autonomous Stair-Climbing With Miniature Jumping Robots. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, Vol. 35, No. 2, pp. 313–325, Apr. 2005.
- [18] Yuuta Sugiyama, Ayumi Shiotsu, Masashi Yamanaka, and Shinichi Hirai. Circular/spherical robots for crawling and jumping. In *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3595–3600, 2005.
- [19] 平井 慎一松野 孝博. 円形ソフトロボットにおける弾性外殻の変形形状解析. ばね論文集, Vol. 2021, No. 66, pp. 67–73, 2021.
- [20] IEEE SPECTRUM. Parrot’s Mini Quadrotor and Jumping Robot to Hit Stores in August. <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/home-robots/parrot-minidrones-rolling-spider-jumping-sumo>, 2014.

- [21] Gwang Pil Jung, Carlos S. Casarez, Jongeun Lee, Sang Min Baek, So Jung Yim, Soo Hwan Chae, Ronald S. Fearing, and Kyu Jin Cho. JumpRoACH: A Trajectory-Adjustable Integrated Jumping-Crawling Robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 24, No. 3, pp. 947–958, 2019.
- [22] Atsushi Yamada, Hiromi Mochiyama, and Hideo Fujimoto. Kinematics and statics of robotic catapults based on the closed elastica. In *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3993–3998. IEEE, 2007.
- [23] Takashi Tsuda, Hiromi Mochiyama, and Hideo Fujimoto. Quick stair-climbing using snap-through buckling of closed elastica. In *2012 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)*, pp. 368–373, 2012.
- [24] Hiromi Mochiyama, Aya Kinoshita, and Ryosuke Takasu. Impulse force generator based on snap-through buckling of robotic closed elastica: Analysis by quasi-static shape transition simulation. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, No. November 2013, pp. 4583–4589, 2013.
- [25] 高須亮輔, 望山洋. 閉ループ弾性体の形状計算アルゴリズム. *日本ロボット学会誌*, Vol. 32, No. 4, pp. 365–371, 2014.
- [26] Atsushi Yamada, Hiroshi Mameda, Hiromi Mochiyama, and Hideo Fujimoto. A compact jumping robot utilizing snap-through buckling with bend and twist. In *IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2010 - Conference Proceedings*, pp. 389–394, 2010.
- [27] Atsushi Yamada, Masamitsu Watari, Hiromi Mochiyama, and Hideo Fujimoto. An asymmetric robotic catapult based on the closed elastica for jumping robot. In *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 232–237. IEEE, 2008.
- [28] 望山洋, 山田篤史, 藤本英雄. 閉ループ弾性体による瞬発力発生機構. *日本ロボット学会誌*, Vol. 29, No. 6, pp. 492–495, 2011.
- [29] Naofumi Fukamachi and Hiromi Mochiyama. Palm-top jumping and crawling robot using snap-through buckling of arched elastica supported by ω -shaped frame. In *2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 1102–1107, 2015.

- [30] Hiromi Mochiyama. Model validation of discretized spatial closed elastica. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5216–5223, 2016.
- [31] Ryo Takano, Hiromi Mochiyama, and Naoyuki Takesue. Real-time shape estimation of kirchhoff elastic rod based on force/torque sensor. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2508–2515, 7 2017.
- [32] Kenji Misu, Akira Yoshii, Mitsuhiro Ando, and Hiromi Mochiyama. A Jump Robot Platform for Interacting with a Child Through Jump. In *Proceedings of the SICE Annual Conference 2020*, pp. 1084–1089, 2020.
- [33] Robert A Hinde. *Animal behavior: a synthesis of ethology and comparative psychology*. McGraw-Hill, 1970.
- [34] Kazuyoshi Wada and Takanori Shibata. Living with seal robots - Its sociopsychological and physiological influences on the elderly at a care house. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 23, No. 5, pp. 972–980, 2007.
- [35] Cynthia Breazeal. Toward sociable robots. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 42, No. 3-4, pp. 167–175, 2003.
- [36] Tomio Watanabe. InterRobot: Speech-Driven Embodied Interaction Robot. *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 24, No. 6, pp. 692–695, 2006.
- [37] Fumihide Tanaka, Kyosuke Isshiki, Fumiki Takahashi, Manabu Uekusa, Rumiko Sei, and Kaname Hayashi. Pepper learns together with children: Development of an educational application. In *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 270–275. IEEE Computer Society, 2015.
- [38] S Ishiyama and Michael Brecht. Neural correlates of ticklishness in the rat somatosensory cortex. *Science*, Vol. 354, No. 6313, pp. 757–760, 2016.
- [39] RC Newberry, DGM Wood-Gush, and JW Hall. Playful behaviour of piglets. *Behavioural Processes*, Vol. 17, No. 3, pp. 205–216, 1988.
- [40] Marc Bekoff. Social play and play-soliciting by infant canids. *American Zoologist*, Vol. 14, No. 1, pp. 323–340, 1974.

- [41] Marcello Mortillaro and Daniel Dukes. Jumping for joy: The importance of the body and of dynamics in the expression and recognition of positive emotions. *Frontiers in Psychology*, Vol. 9, No. MAY, 2018.
- [42] Alex Pentland. Social Signal Processing [Exploratory DSP]. *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 24, No. 4, pp. 108–111, 2007.
- [43] Alessandro Vinciarelli and Alex Sandy Pentland. New Social Signals in a New Interaction World: The Next Frontier for Social Signal Processing. *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*, Vol. 1, No. 2, pp. 10–17, 2015.
- [44] John N. Bassili. Temporal and spatial contingencies in the perception of social events. *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 33, No. 6, pp. 680–685, 1976.
- [45] W Stuart Millar and John S Watson. The effect of delayed feedback on infant learning reexamined. *Child development*, pp. 747–751, 1979.
- [46] 植田一博. 『認知的インタラクションデザイン学』の展望：時間的な要素を組み込んだインタラクション・モデルの構築を目指して. *認知科学*, Vol. 24, No. 2, pp. 220–233, 2016.

謝辞

本論文は様々な人の助けがあってはじめて完成したものです。はじめに研究にかかわっていただいたすべての人へ感謝を伝えたいと思います。望山洋教授にはこの5年間終始懇切丁寧な研究指導をしてくださり、言葉では足りないほど大変お世話になりました。専攻科から来た私を快く受け入れて下さりありがとうございます。また、忙しい中でも時間を作り研究指導をしていただきました。先生との議論の中で研究の進め方、考え方、心構え等多くのことを教わりました。

また、本研究を進める上で貴重な助言を頂きました、鈴木健嗣教授、相山康道教授、田中文英准教授、立命館大学の平井慎一教授に感謝いたします。未曾有の災禍が続く例年とは異なる忙しさの中、学位審査を引き受けて下さりありがとうございます。

研究の遂行にあたり数多くの人に助けられました。株式会社アサイ・エンジニアリングの浅井伸一様には跳躍走行ロボットの開発のみならずダチョウアームの再設計の際にもお世話になりました。芝浦工業大学の橋田規子教授と高木陸さんには子供とインタラクションするロボットの外観デザインでお世話になりました。研究の助けの中でも特に柔軟ロボット学研究室の皆さんには大変お世話になりました。研究室メンバーとの議論の中で考えがまとまることが多く、研究室で研究をする良さが実感できました。特に同期の吉井君、君が居なかったら IROS には行けなかったです、ありがとう。また直接のかかわりはないものの、本論文は偉大な先輩方の成果があったからこそ、その上に積み上げることができた成果です。ありがとうございます。

高専、専攻科、大学院進学を応援して支えてくれた家族に感謝します。やりたいことをやれたのは家族の理解と支えがあったからです、ありがとうございます。最後にいつもそばで支えてくれた美音に感謝を、いつもありがとう。

関連論文リスト

[査読付き雑誌論文]

- Kenji Misu, Hiromi Mochiyama, “Arched Snap Motor: Power Flow Analysis”, Advanced Robotics, vol.35, issue 18, 2021, pp. 1107-1115

[査読付き国際会議論文]

- Kenji Misu, Akira Yoshii, Hiromi Mochiyama, “A Compact Wheeled Robot That Can Jump while Rolling”, Proc. of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS18), Madrid, Spain, 10-2018, pp. 7507-7512
- Kenji Misu, Akira Yoshii, Mitsuhiro Ando, Hiromi Mochiyama, “A Jump Robot Platform for Interacting with a Child Through Jump”, Proc. of the SICE Annual Conference 2020, Chiang Mai, Thailand (Online), 9-2020, pp. 1084-1089 (Position Paper)

[査読の無い国内会議論文]

- 翠健仁, 吉井彰, 望山洋, “帯状弾性体の飛び移り座屈を利用した小型移動ロボット用跳躍機構”, 第18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, 仙台国際センター, 12-2017, 3A6-12, pp. 2295-2298
- 翠健仁, 吉井彰, 望山洋, “高い繰り返し周波数をもつ小型走行跳躍ロボット”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, 広島国際会議場, 6-2019, 1P2-F03
- 翠健仁, 望山洋, “スナップモータ: 6D-MARKERによる運動解析”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 金沢(オンライン), 5-2020, 1P2-J04