

東京電機大学

博士論文

生物に着想を得た運動のモデリングと制御
Modeling and Control of Bio-Inspired Motions

2016年3月

根本 琢磨

要 旨

本研究は、陸上の様々な環境で効率よく活動するために、歩行移動と回転移動を行えるクモの運動能力に着想を得た構造可変多脚ロボットを提案し、このロボットで継続的な回転移動を達成するためのモデル構築と制御系設計を行うことを目的とする。

ロボットは様々な分野での活躍が期待されており、例えば、災害救助では、瓦礫の上などを移動したり、狭所に侵入したりということが求められる。このような様々な課題への対応策として、従来はそれぞれの課題を個別に考慮して、それらに対応できるロボットの開発が行われてきたが、より効率的な方法として、類似した環境で生活する生物から解決策を得ることで様々な課題に対応できるロボットを開発するということが行われている。このような生物に着想を得たロボットの1つとして、本研究では、歩行移動と回転移動を行えるクモの運動能力の特徴を取り入れた構造可変多脚ロボットを扱っている。このロボットは、脚部の配置を変化させることにより、不整地では歩行による高い安定性と機動性を持った移動を実現し、坂や平地では回転によるエネルギー効率の良い高速移動を行うことが可能である。さらに、このロボットは脚部を巧みに利用することで、タイヤを持つロボットではタイヤが地面を掘ってしまい動けなくなるような、砂地などの軟弱な地盤でも回転による高速移動を行えるという利点がある。そして、高速移動のための追加機構も必要としないため、小型化して狭い空間で活動させることも期待できる。このような特徴から、災害救助のような場面では瓦礫上の移動や狭所への侵入に加えて、平地では回転移動を利用してバッテリーの消耗に対する移動の効率を上げたり、要救助者の情報を素早く知らせたりということが期待できる。

本研究では、このロボットで回転移動を実現するアプローチとして、生物の運動の特徴を取り入れてロボットの数学モデルに基づくエネルギー補償制御系を設計することを考える。この方法は、ロボットの数学モデルを利用していることから、モデルをオブザーバの設計にも利用することが考えられる。そのため、より効率的な移動法が求められる、多くのセンサを積むことが困難な小型のロボットなどにも適用が期待できる。回転移動中のロボットのエネルギーは地面との接触や衝突により失われるので、瞬間的な脚部の動きを周期的に行うことによりエネルギーを回復する制御系を、クモが回転移動を行う際の脚部の動かし方の特徴を取り入れて設計する。

1章では、本論文の背景、研究目的、課題、アプローチを述べ、関連研究に対する本研究の位置づけを論じている。特に、生物から着想を得て開発されたロボットを、そのロボットの適応できる環境ごとに分類し、それらのロボットを開発するために利用されている知見をまとめている。

2章では、構造可変多脚ロボットによる回転移動の制御系設計に応用されるアプローチとして、ヨーヨーに周期的な上下運動を行わせる操作を、シンプルな1リンクアームにより達成するための制御アプローチを示している。最初に、実際のヨーヨー挙動を解析に基づき、ヨーヨーとアームの相互干渉を捉えるためのヨーヨー・アーム統合モデルを構築し、未知パラメータの同定を行っ

ている。これらのモデルと同定パラメータの有効性は、シミュレーション結果と計測データを比較することにより検証されている。そして、構築した統合モデルを用いて、ヨーヨーの運動により失われたエネルギーをアームによる引き上げ動作により補償する制御系を設計している。設計した制御系を用いてヨーヨーの周期的な上下運動のシミュレーションを行い、この制御系が持続的な上下運動の実現に有効であることを示している。

3章では、宙返りを行えるアシダカグモの1種から着想を得た回転移動を、アシダカグモ型構造可変4脚ロボットにより実現するためのモデル構築と制御系設計を示している。最初に、生物の脚部の使い方の特徴を取り入れ、4脚ロボットによる回転移動モデルを構築している。このモデルは、地面との衝突や接触の影響を含まない4脚ロボットの回転形態モデルを構築し、あとから地面との衝突や接触によりもたらされる拘束力や、地面との衝突で発生する不連続な速度変化を考慮することで構築されている。次に、ヨーヨー操作の制御アプローチを応用し、回転移動により失われたエネルギーを補償する制御系を設計している。そして、回転移動のシミュレーションを行い、制御系の有効性と生物の運動の特徴を取り入れることの利点を示している。

4章では、身体を丸めて坂を側転のように転がり下りることができるホイール・スパイダーから着想を得た回転移動を、ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットにより実現するためのモデル構築と制御系設計を示している。最初に、ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットの機構とその平地における回転移動の方法を、生物の運動の特徴に基づいて考案している。そして、3章と同じ方法で、数学モデルの構築と制御系設計を行い、制御系の有効性を検証している。

5章では、本論文の結論を論じている。本研究では、クモの運動能力に着想を得た2種類の構造可変多脚ロボットを提案し、これらのロボットで継続的な回転移動を達成するためのモデル構築と制御系設計を示している。そして、クモの脚部の使い方の特徴を取り入れることで、ロボットで運動を達成することに有効なエネルギー補償制御系を設計できることと、その特徴を取り入れることの有効性を示している。

目次

1.	序論	1
1.1	生物に着想を得たロボット	1
1.1.1	陸上で活動するロボット	1
1.1.2	水中/水上で活動するロボット	3
1.1.3	空中で活動するロボット	3
1.2	生物に着想を得たロボットの実現方法	3
1.3	本研究の位置づけ	3
1.4	研究アプローチ	5
1.5	論文構成	6
1.5.1	2章：ヨーヨー・アーム統合モデルに基づくアーム型ロボットによる周期的なヨーヨー操作の制御	7
1.5.2	3章：アシダカグモ型構造可変4脚ロボットによる回転移動のモデル構築と制御系設計	8
1.5.3	4章：ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットによる回転移動のモデル構築と制御系設計	9
1.5.4	5章：結論	9
2.	ヨーヨー・アーム統合モデルに基づくアーム型ロボットによる周期的なヨーヨー操作の制御	10
2.1	ヨーヨー挙動の解析	11
2.2	ヨーヨー・アーム統合モデルの構築	12
2.2.1	ヨーヨーモデル（紐の伸縮あり）	14
2.2.2	ヨーヨーモデル（紐の伸縮なし）	21
2.2.3	1リンクアームモデル	23
2.2.4	ヨーヨー・アーム統合モデル	26
2.3	パラメータ同定	27
2.3.1	ヨーヨーモデルのパラメータ同定	27
2.3.2	アームモデルのパラメータ同定	29
2.4	提案モデル・同定パラメータの有効性検証	29

2.4.1	ヨーヨーの自由落下シミュレーション	30
2.4.2	M 系列信号入力時の関節挙動シミュレーション	32
2.5	エネルギー補償制御系の設計	34
2.5.1	1 リンクアームの線形化	35
2.5.2	エネルギー補償制御	36
2.6	グラビティ・プルのシミュレーション	37
2.7	まとめ	39
3.	アシダカグモ型構造可変 4 脚ロボットによる回転移動のモデル構築と制御系設計	43
3.1	アシダカグモ型構造可変 4 脚ロボットによる回転移動モデルの構築	44
3.1.1	アシダカグモ型構造可変 4 脚ロボットの回転形態モデル	46
3.1.2	地面との衝突・接触による拘束力の考慮	48
3.1.3	不連続な速度変化の考慮	49
3.2	回転移動のための制御系の設計	50
3.2.1	運動方程式の変換	50
3.2.2	エネルギー補償制御	52
3.3	4 脚ロボットによる回転移動のシミュレーション	53
3.4	まとめ	57
4.	ホイール・スパイダー型構造可変 6 脚ロボットによる回転移動のモデル構築と制御系設計	58
4.1	ホイール・スパイダー型構造可変 6 脚ロボットの機構と回転移動方法	58
4.2	ホイール・スパイダー型構造可変 6 脚ロボットによる回転移動モデルの構築	60
4.3	回転移動のための制御系の設計	64
4.3.1	運動方程式の変換	64
4.3.2	エネルギー補償制御	65
4.4	6 脚ロボットによる回転移動のシミュレーション	66
4.5	まとめ	72
5.	結論	73
5.1	総論	73
5.2	各論	73
5.2.1	2 章：ヨーヨー・アーム統合モデルに基づくアーム型ロボットによる周期的なヨーヨー操作の制御	73
5.2.2	3 章：アシダカグモ型構造可変 4 脚ロボットによる回転移動のモデル構築と制御系設計	74

5.2.3	4章：ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットによる回転移動のモデル構築と制御系設計	74
-------	---	----

目 次

1.1	生物に着想を得たロボット [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. 陸上, 空中, 水上/水中ごとに様々なロボットが開発されている. クモ型構造可変多脚ロボットは陸上の様々な環境に適応可能である.	2
1.2	生物に着想を得たロボットの実現方法 [1]. バイオミメティックやバイオ・インスパイアードといった観点が存在し, 2分野の関係はバイオ・インスパイアードがバイオミメティックを包含するようなものとなっている. バイオ・インスパイアードの分野では, 生物の特徴をそれぞれ, センサ, メカニズム, アクチュエータ, 形態, 制御構造, エネルギー生成法などに応用する研究が行われており, 本研究では制御構造に着目する.	4
2.1	ヨーヨー. 画像処理を用いて重心を検出するために, 市販のヨーヨーを白く塗って使用する.	11
2.2	1リンクアーム. アームの平衡状態を保つためのカウンターウェイトと, ヨーヨーを保持, 解放するための手先機構が備わっている.	11
2.3	計測環境. 紐の端を固定したヨーヨーを自由落下させ, カメラにより計測する. その後, PCにより画像処理を行い, ヨーヨーの重心位置を抽出する.	12
2.4	水平方向のヨーヨー位置の計測値. 落下に伴い, ヨーヨーが左右に揺れていることがわかる.	13
2.5	垂直方向のヨーヨー位置の計測値. 紐と円盤との摩擦や最下点でのバウンドによるエネルギー損失により頂点の高さが低くなっていく. ヨーヨーを自由落下させると, バウンドを繰り返すうちにヨーヨーがひねり回転してしまう.	13
2.6	ヨーヨーのモデル図 (紐の伸縮あり). ヨーヨーの回転角に依存して, 上下運動フェーズ (a, c) と遷移フェーズ (b) に分割される. 接続点は紐の伸縮性を考慮するために定義された仮想的な質点である. 手先と接続点の距離 r_s は相対位置をとるものとする. ヨーヨーの回転角 θ_y は紐との相対角をとるものとし, ヨーヨーが最下点にあるときを $\theta_y = 0$ rad とする.	15
2.7	ヨーヨーの状態遷移. ヨーヨーは上下運動を繰り返し, 下降運動と上昇運動は, ヨーヨーが頂点に達したときと, 最下点に達したとき (遷移フェーズを経由したとき) に入れ替わる.	16

2.8	ヨーヨーのモデル図（紐の伸縮なし）．紐の伸縮ありのモデルからバネ・ダンパを取り除いたものとなる．	21
2.9	1リンクアームのモデル図．	24
2.10	提案モデル，従来モデル，計測データのY軸方向の位置（yy_cs: 伸縮ありモデル，yy_us: 伸縮なしモデル，yy_p: 従来モデル，y_meas: 計測データ）．シミュレーションの軌跡は実際の軌跡と近いものとなっている．提案モデルを用いた場合のバウンドのタイミングが，実際のタイミングと合っていることから，従来モデルよりも正確にヨーヨーのバウンドの周期を捉えられていると考える．	31
2.11	提案モデル，計測データのX軸方向の位置（xy_cs: 伸縮ありモデル，xy_us: 伸縮なしモデル，x_meas: 計測データ）．伸縮なしのモデルのシミュレーションの軌跡は，伸縮ありのモデルの軌跡よりも計測データの軌跡との最大誤差が小さくなっているが，挙動の特徴は伸縮ありのモデルのほうがよく表しているといえる．	32
2.12	提案モデル，従来モデルのヨーヨー回転角（thy_cs: 伸縮ありモデル，thy_us: 伸縮なしモデル，thy_p: 従来モデル）．従来モデルのほうが振幅が大きく，回転角の差は最大で 1.28×10^2 rad となる．	33
2.13	提案モデル，従来モデルのヨーヨー角速度（dthy_cs: 伸縮ありモデル，dthy_us: 伸縮なしモデル，dthy_p: 従来モデル）．従来モデルのほうが振幅が大きく，角速度の差は最大で 2.59×10^2 rad/s となる．	33
2.14	Y軸方向位置の拡大図（yy_cs: 伸縮ありモデル，yy_us: 伸縮なしモデル，yy_p: 従来モデル，y_meas: 計測データ）．紐の伸縮を考慮したモデルを用いたシミュレーションでは，バウンド直後の紐の弛みによる軌跡の変化を再現できている．	34
2.15	提案モデル，計測データのリンク回転角（thl_simu: 提案モデル，thl_meas: 計測データ）．リンクが小刻みに動く部分では，シミュレーションと計測した挙動の差が大きくなっているが，1リンクアームの大まかな挙動は捉えられている．	35
2.16	ヨーヨーと紐の回転角（thy: ヨーヨー，ths: 紐）．ヨーヨーの回転は，0を中心とした振幅が一定の軌跡へと収束している．	39
2.17	ヨーヨーと手先のY軸方向位置（yy: ヨーヨー，yh: 手先）．ヨーヨーは手先から一定の距離を保ったまま，周期的な上下運動を行っている．	40
2.18	ヨーヨーと手先のX軸方向位置（xy: ヨーヨー，xh: 手先）．ヨーヨーの周期的な上下運動に伴い，水平方向の揺れも周期的な軌道へと収束している．	40
2.19	アーム関節の回転角．アームの関節は，制御系設計時に定義した可動域の範囲内で動いている．	41
2.20	エネルギー補償制御による関節トルク．ヨーヨーが最下点に達する直前に，正の関節トルクが入力されている．	41

2.21	ヨーヨーの運動エネルギーと目標エネルギーの差. アームによるヨーヨー引き上げ動作によって, ヨーヨーが最下点に達した時の運動エネルギーと目標エネルギーの差が0以上になっている.	42
2.22	エネルギー状態関数値の遷移. エネルギー状態関数値は, 1.00×10^{-4} 以下の値に収束している.	42
3.1	アシダカグモ型構造可変4脚ロボット. (a) 歩行形態. (b) 回転形態. 各脚に3個のモータを持ち, それぞれの回転軸が直交するように配置されている.	43
3.2	歩行形態・回転形態の変形. 脚部の配置を変更することでそれぞれの形態に移行できる.	44
3.3	フィードフォワードコントローラを利用した回転移動. 地面についた脚を同時に動かして地面を押しようにして回転する.	45
3.4	アシダカグモ型構造可変4脚ロボットによる回転移動のモデル図. 4脚ロボットによる回転移動は, X 軸を地面の高さとして垂直2次元平面で表される. 脚部の回転角 θ_{ij} は胴体の回転角 θ_b との相対角をとるものとする.	45
3.5	アシダカグモ型構造可変4脚ロボットによる回転移動の接地点を原点としたモデル図. 接地している脚を支持脚, もう一方を遊脚とし, 原点0の位置を支持脚の接地点に固定する. 原点0は, 各支持脚交換直後に支持脚の接地点にスイッチされる.	51
3.6	胴体の回転角. 胴体の回転角は持続的に増加しており, 10秒間に5.57回, 回転している.	54
3.7	胴体と各脚部の X 軸方向の位置 (x_b : 胴体, x_{lj} : 第 j 脚部). 4脚ロボットが10秒間で X 軸の正方向に2.91 m 進んでいることがわかる.	55
3.8	胴体と各脚部の Y 軸方向の位置 (y_b : 胴体, y_{lj} : 第 j 脚部). 最下点にある脚部が定期的に切り替わっていることから, 4脚ロボットが支持脚を交換しながら回転していることがわかる.	55
3.9	各脚部の回転角 (θ_{lj} : 第 j 脚部). 4脚ロボットが支持脚交換の直前にエネルギー回復動作を行い, 支持脚交換後に脚部を初期位置に戻していることがわかる.	56
3.10	エネルギー補償制御による入力トルク (τ_{aulj} : 第 j 脚部). 支持脚交換の直前に, 関節トルクが支持脚に入力されている.	56
3.11	4脚ロボットの運動エネルギーと目標エネルギーの差. エネルギー回復動作により, 運動エネルギーと目標エネルギーの差が0以上になっている.	57
4.1	平行リンクを用いた脚部機構の概略図. (a) 正面から見た図. ロボットの胴体と脚の側面を常に平行に保てる. (b) 上部から見た図. 脚の側面を湾曲させることにより回転がスムーズに行えるようにする.	59

4.2	回転移動時の姿勢. (a) 側面から見た図. 脚部を胴体に等間隔に取り付け, ロボット全体の重心が中心に来るようにする. (b) 正面から見た図. 脚部を胴体に引き付けた時の脚部と胴体の重心が一直線に並ぶようにする.	59
4.3	ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットによる回転移動方法. (a) から動作を開始し, (1) から (3) を繰り返して持続的な回転移動を達成する.	60
4.4	ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットによる回転移動のモデル図. 6脚ロボットによる回転移動は, X 軸を地面の高さとして垂直2次元平面で表される. 脚部の回転角 θ_{lj} は胴体の回転角 θ_b との相対角をとるものとする.	61
4.5	ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットによる回転移動の接地点を原点としたモデル図. 接地している最も前方の脚を支持脚, それ以外を遊脚とし, 原点0の位置を支持脚の接地点に固定する. 原点0は, 各支持脚交換直後に支持脚の接地点にスイッチされる.	64
4.6	胴体の回転角. 胴体の回転角は持続的に増加しており, 5秒間に1.69回, 回転している.	67
4.7	胴体と各脚部の X 軸方向の位置 (x_b : 胴体, x_{lj} : 第 j 脚部). 6脚ロボットが5秒間で X 軸の正方向に 7.02×10^{-1} m 進んでいることがわかる.	68
4.8	胴体と各脚部の Y 軸方向の位置 (y_b : 胴体, y_{lj} : 第 j 脚部). 最下点にある脚部が定期的に切り替わっていることから, 6脚ロボットが支持脚を交換しながら回転していることがわかる.	68
4.9	ロボットの水平方向の重心位置. ロボットの重心は支持脚交換時から前方に移動しているが, 支持脚を初期位置に戻す動作のため, $X_g = 2.00 \times 10^{-3}$ の周りで前進後退を繰り返している.	69
4.10	各脚部の回転角 (θ_{lj} : 第 j 脚部). 支持脚となった脚部が, $X_g \leq 2.00 \times 10^{-3}$ を満たすときに, エネルギー回復動作のため負方向に回転している. その後, 支持脚は初期位置に引き戻されている.	69
4.11	胴体の二次元平面上の位置. 胴体は上下に移動しながら正方向に進んでいる. 進行距離が変わらず高さのみが変化している部分で, 支持脚を初期位置に戻す動作が行われている.	70
4.12	エネルギー補償制御による入力トルク (τ_{lj} : 第 j 脚部). 地面との衝突が発生してから $X_g \leq 2.00 \times 10^{-3}$ を満たしている間に, 負の値の関節トルクが支持脚に入力されている. 支持脚を初期位置に戻すときには, ロボットの重心が接地点よりも後方に移動することが抑制するために, 小刻みに入力トルクが発生している.	70
4.13	6脚ロボットの運動エネルギーと目標エネルギーの差. エネルギー回復動作により, 運動エネルギーと目標エネルギーの差が0以上になっている.	71

表 目 次

2.1	ヨーヨーの主要パラメータ.	11
2.2	カメラの仕様.	12
2.3	ヨーヨーの物理パラメータ (紐の伸縮あり).	15
2.4	ヨーヨーの変数 (紐の伸縮あり).	16
2.5	1 リンクアームの物理パラメータ.	25
2.6	1 リンクアームの変数.	25
2.7	ヨーヨーパラメータ同定結果 (紐の伸縮あり)	28
2.8	ヨーヨーパラメータ同定結果 (紐の伸縮なし)	29
2.9	アームパラメータ同定結果	29
2.10	ヨーヨーの計測パラメータ.	30
2.11	1 リンクアームの計測パラメータ.	34
2.12	グラビティ・プルのコントローラパラメータ	38
3.1	アシダカグモ型構造可変 4 脚ロボットの物理パラメータ.	46
3.2	アシダカグモ型構造可変 4 脚ロボットの変数 ($j = 1, 2$)	46
3.3	4 脚ロボットによる回転移動のコントローラパラメータ	54
4.1	ホイール・スパイダー型構造可変 6 脚ロボットの物理パラメータ.	61
4.2	ホイール・スパイダー型構造可変 6 脚ロボットの変数 ($j = 1, \dots, 6$)	62
4.3	6 脚ロボットによる回転移動のコントローラパラメータ	67

1. 序論

ロボットは、様々な環境や作業に適応できるように開発することで、様々な分野への利用が可能となる。本研究では、陸上の様々な環境で効率よく活動するために、歩行移動と回転移動を行えるクモの運動能力に着想を得た構造可変多脚ロボットを提案し、このロボットで継続的な回転移動を達成するためのモデル構築と制御系設計を行うことを目的とする。

ロボットには、人間との協働や協調というパートナーとしての期待もさることながら、人間の行動や活動範囲を補完する分野や領域での活躍が期待されている。例えば、地震や津波、土砂災害、堤防決壊などの天災による災害現場では、人間が入れないような二次災害の危険がある地域や狭所での被害状況の確認や要救助者の捜索などで活躍が期待できる。しかし、そのような状況下でロボットが安定して活動するためには、瓦礫の上などを移動したり、狭所に入ったりという様々な環境への適応能力が必要となる。このような課題への対応策として、従来はそれぞれの課題を個別に考慮して、それらに対応できるロボットの開発が行われてきたが、より効率的な設計方針として、活躍が期待される環境と類似した環境で生活する生物を特定し、その生物が環境に適応した結果として獲得しているより特徴的な生態や運動、機能から解決策を得ることで様々な課題に対応できるロボットを開発するということが行われている。

1.1 生物に着想を得たロボット

図 1.1 に生物の生態や運動、機能に着想を得て開発されたロボットを示す [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]。このようなロボットは、それぞれ、陸上、空中、水上や水中で活動するものに分類される。

1.1.1 陸上で活動するロボット

陸上で活動するロボットとしては、匍匐運動、歩行、回転移動を行うものがあり、多くの研究が行われている。

匍匐運動を行うものとしては、ヘビ型ロボットが代表的である [5, 12, 13]。ヘビ型ロボットは、平地、砂地、不整地での移動に加え、障害物を乗り越えたり、パイプの中のような人間が入れない狭い空間を這って進んだりすることが可能であり、泳いだり、木を登ったりすることも期待できるため、多くの研究が行われている。例えば、前述の災害現場などにおいて、ヘビ型ロボットはその移動方法を生かすことで、瓦礫を登ったり、倒壊した家屋に入ったりすることが可能である。ヘビ型ロボットの他にもサンショウウオ [9] や蠕虫 [14, 15] から着想を得たロボットも開発されており、陸上での活動に加えて、水辺や水中での活動も期待されている。



図 1.1: 生物に着想を得たロボット [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. 陸上, 空中, 水上/水中ごとに様々なロボットが開発されている. クモ型構造可変多脚ロボットは陸上の様々な環境に適応可能である.

歩行を移動法としているものは, 多脚ロボットの分野で多く取り扱われており, ロブスター型 [10], カニ型 [16], 昆虫型 [7, 17, 8], 哺乳類型 [6, 18, 19] など, 様々なものが開発されている. このような歩行を主な移動手段とするロボットは, 不整地での安定した移動が可能であり, それを生かして様々な用途に用いられている. 例えば, 哺乳類型の多脚ロボットは, 災害現場などにおいて, 不整地や瓦礫の上で安定した移動を実現でき, 昆虫型の小型ロボットは狭所での活動が可能である [6, 7]. また, ロブスターの歩行を模した8脚ロボットは水辺での地雷の探索を目的として研究されている [10].

生物の中には, 天敵から逃げたり, 獲物を追いかけたりするときに, 身体を丸めたり, 脚の配置を変えたりすることで, 坂や平地を回転して移動できるものがある. 回転移動を行えるロボットは, そのような生物に着想を得た構造可変型ロボットとして, いくつかのものが開発されている [4, 20]. この例としては, 身体を丸めて天敵から逃げるイモ虫の運動 [4] や, アシダカグモの一種が行う宙返りのような回転運動 [20] に着想を得たロボットがある. このような回転運動には, 平地においてエネルギーの効率良く高速移動を行えるという利点がある.

1.1.2 水中/水上で活動するロボット

水中で活動するロボットとしては、魚の形態をとったものが代表的である [11, 21, 22]. 魚から得た知見を生かすことで、従来よりも高速で旋回できるロボットを製作できることが報告されている [21]. この他の水中生物から着想を得た泳ぎとしては、ウミガメを参考にしたロボットがあり、この研究では、なぜ4つのひれ足を持つ生物が2つのひれ足のみを泳ぐことに利用しているのかを示唆する結果が得られている [23]. また、水上で活動できるロボットとしては、アメンボの歩行から着想を得たものが開発されている [8].

1.1.3 空中で活動するロボット

空中で活動するロボットとしては、鳥や昆虫などの飛行できる生物から得られた知見を生かした、羽ばたき動作により飛行を実現するロボットが開発されている [2, 3, 24]. 例えば、昆虫（イエバエ）に着想を得たロボットは、室内のような限られた空間での活動に適している [2, 24]. Mentor と呼ばれる4つの翼を持つロボットは、生物から得た知見を生かして、ハチドリのような敏捷性を持ったホバリングを実現している [3].

1.2 生物に着想を得たロボットの実現方法

以上のように、生物の特徴を取り入れることにより、環境への適応能力が高いロボットを開発することが可能である. このように、生物の生態や運動、機能から得た知見をロボットの機能やデザインに生かすアプローチは、バイオミメティック・ロボティクスやバイオ・インスパイアード・ロボティクスと呼ばれる分野に含まれる [1, 20].

図 1.2 に生物に着想を得たロボットの實現方法を示す. バイオミメティック・ロボティクスでは、ロボットの形態、メカニズム、センサなどで、生物の挙動や形態を詳細に模倣することに主眼が置かれている. それに対し、バイオ・インスパイアード・ロボティクスでは、生物から得た知見を工学的なアプローチに応用することを目的としており、対象生物の特徴を完全に模倣することは必要としていない. バイオミメティック・ロボティクスには常にバイオ・インスパイアード・ロボティクスの観点が必要となることから、図 1.2 のように、2 分野の関係はバイオ・インスパイアード・ロボティクスがバイオミメティック・ロボティクスを包含するようなものとなっている. しかし、これらの観点は境界が曖昧で、これらの中に位置しているようなロボットも存在する.

1.3 本研究の位置づけ

以上を受け、本研究では、生物に着想を得たロボットとして、2種類のクモが持つ運動の特徴をそれぞれ取り入れた、脚の配置を変形することにより回転移動を実現できる2種類の構造可変多脚ロボットを提案する. 1つは、先行研究において開発された、宙返りを繰り返すような回転移動を行えるアシダカグモの1種に着想を得た4脚ロボット（アシダカグモ型構造可変4脚ロボット）

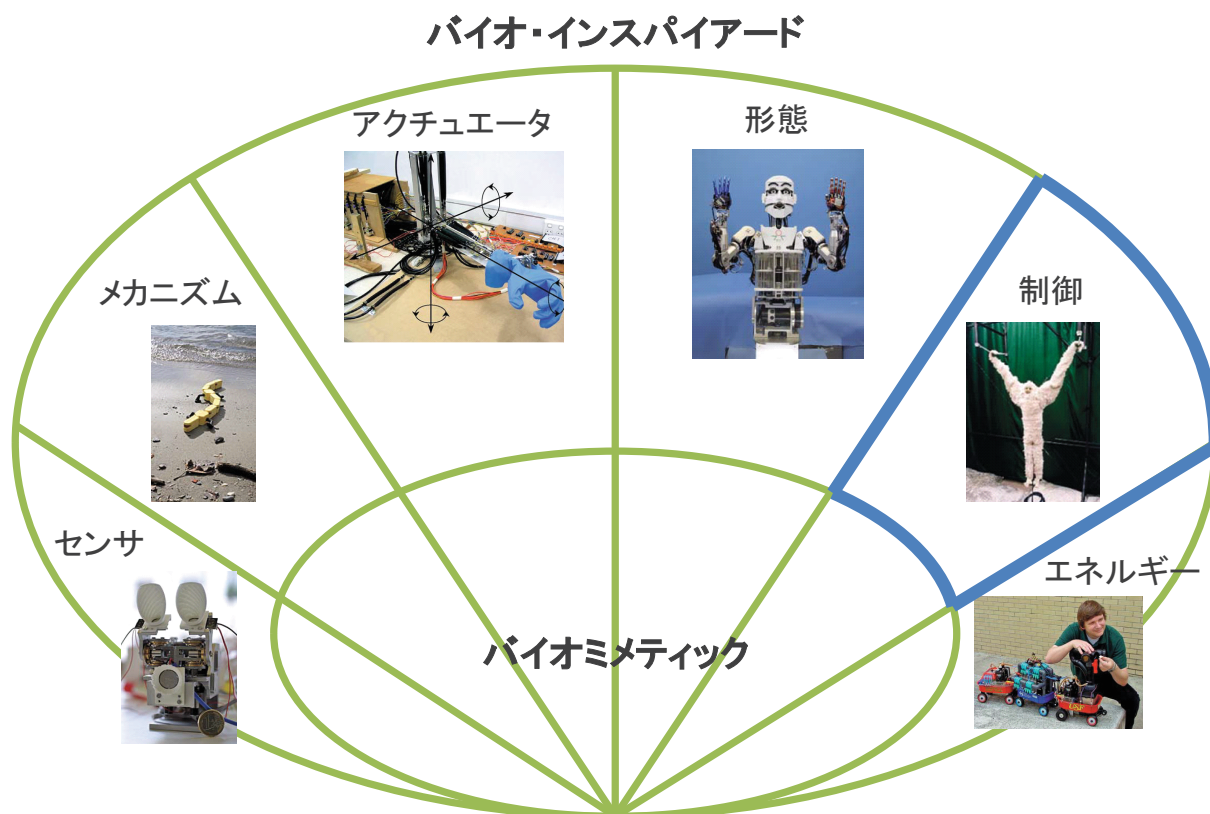


図 1.2: 生物に着想を得たロボットの實現方法 [1]. バイオミメティックやバイオ・インスパイアードといった観点が存在し、2分野の関係はバイオ・インスパイアードがバイオミメティックを包含するようなものとなっている。バイオ・インスパイアードの分野では、生物の特徴をそれぞれ、センサ、メカニズム、アクチュエータ、形態、制御構造、エネルギー生成法などに応用する研究が行われており、本研究では制御構造に着目する。

である [25]. もう1つは身体を車輪のように丸めて坂を転がり下りることができる、ホイール・スパイダーと呼ばれるクモに着想を得た6脚ロボット（ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボット）であり、本来は受動回転であるホイール・スパイダーの運動の特徴を平地での移動のためにも利用する。これらのロボットは、脚部の配置を変化させることにより、不整地では歩行による高い安定性と機動性を持った移動を実現し、坂や平地では回転によるエネルギー効率の良い高速移動を行うことが可能である。さらに、これらのロボットは脚部を巧みに利用することで、タイヤを持つロボットではタイヤが地面を掘ってしまい動けなくなるような砂地などの軟弱な地盤でも回転による高速移動を行えるという利点がある。そして、高速移動のための追加機構（タイヤ等）も必要としないため、小型化して狭い空間で活動させることも期待できる。そのため、図 1.1 のように、陸上の様々な環境に適応可能であると考える。

クモの回転移動に着想を得たロボットの運動の實現方法としては、生物の特徴を反映した制御構造に着目する。生物に着想を得た制御構造として代表的な学習制御には、制御対象の数学モデ

ルが不必要であり、制御対象の特性や周囲の環境条件を把握できない状況でも制御可能であるというメリットがある。その反面、計算量や処理時間が多く、また制御を行うためには制御対象の入出力が計測できなければならないという問題がある。そのため、クモ型構造可変多脚ロボットのように、素早い動きを要求されたり、小型化のために入出力計測用のセンサを搭載するスペースがなかったりする場合には、学習制御の適用は困難である。そこで、本研究では、ロボットの運動を実現するための方法として、モデルに基づくエネルギー補償制御を適用する。この方法には、モデルを利用してオブザーバを構築できたり、制御対象の動特性を解析できたりというメリットがあるが、必然的に制御対象の数学モデルが必要となる。本研究では、クモの回転移動からその特徴を抽出し、その特徴を反映したモデル構築と制御系設計を行う。

1.4 研究アプローチ

クモ型構造可変多脚ロボットによる回転移動のように、生物に着想を得た運動をロボットで実現するためには、対象となる生物の構造や挙動を解析し、それをロボットの機構や制御アルゴリズムにより模倣する必要がある。しかし、実際には、生物とロボットのアクチュエータやセンサに差があったり、対象生物に対する知識が不足していたりするため、生物の構造や挙動を完全に模倣することは困難である。そこで本研究では、対象生物の運動を達成するために重要な特徴のみを抽出し、それを反映させたロボットの数学モデルを構築する。そして、そのモデルをもとに制御系の設計や運動の実現可能性を検討することを考える。これにより、生物とロボットの構造の差を考慮し、生物に着想を得た運動をロボットでの実現に適した形で取り入れる。

生物に着想を得た運動をロボットに取り入れるためには、その制御アルゴリズムも重要となるが、これも前述のような理由で完全に模倣することが困難である。そのため制御アルゴリズムとしては、生物の運動の特徴を取り入れつつ、制御対象のロボットに適したものを選択する必要がある。しかし、このような回転移動を実現するための制御系設計は、従来の生物に着想を得た回転移動の研究では議論されていない。そこで本研究では、2種類のクモによる回転移動の特徴から、類似の運動の制御アルゴリズムを応用することを考える。

アシダカグモの回転移動は、地面につけた脚部で地面を押しようにして行われる [20]。地面に脚部をつけるとき、脚部は胴体に引き付けるように丸められており、この脚部で形成した曲面を利用して地面を転がった後、支持脚が切り替わる直前に脚部を伸ばすようにして地面を押しことにより次の回転へのエネルギーを与えている。この運動を繰り返すことにより、このアシダカグモは持続的な回転移動を実現している。以上のような特徴から、アシダカグモの回転移動は瞬間的な入力を利用した周期的な運動であるといえる。

ホイール・スパイダーの回転移動は、助走をつけたあと脚部を胴体に引き付けて固定し、車輪のような形態で行われる [26]。この形態のまま側転のように坂を転がり、ホイール・スパイダーは坂を下りきると、脚部の固定を解いて歩行を再開する。以上のことから、ホイール・スパイダーの回転移動は、重力を利用した受動的な周期運動であるといえる。しかし、このような運動もア

シダカグモの回転移動と同様に、同じ動作の繰り返しで平地でも実現可能であると考える。

以上のような特徴から、回転移動は脚部の周期的な往復運動により実現可能であるといえる。そこで本研究では、このような周期的な往復運動により実現される運動として、ヨーヨーの上下運動の操作に着目する。この操作は、最下点到達直前にヨーヨーを引上げ、運動により失われたエネルギーを回復させることを繰り返すことで実現される。この特徴から、ヨーヨーの上下運動の操作は、回転移動と同様に瞬間的な入力を利用した周期的な運動であるといえる。この運動に対し、我々は先行研究において、アーム型ロボットにより達成するための制御系を提案している。この制御系は、ヨーヨーの上下運動により失われたエネルギーを補償するように瞬間的なヨーヨーの引き上げ動作をアーム型ロボットに周期的に行わせるためのものであり、ヨーヨーとアーム型ロボット双方の動特性を考慮した数学モデルに基づいて設計されている。そして、設計した制御系の有効性はシミュレーションにより確認されている。

以上のことから、本研究では、ヨーヨー操作の制御アルゴリズムを回転移動の制御に応用する。回転移動中のロボットのエネルギーは、地面との接触や衝突により失われる。そのため、このエネルギー損失を、瞬間的な脚部の動きを周期的に行うことにより回復する制御系を設計する。この制御系は、生物の運動の特徴を取り入れ、ロボットの数学モデルに基づいて設計される。設計した制御系の有効性は、シミュレーションにより検証される。

1.5 論文構成

本論文は以下の内容で構成される。

- 2章：ヨーヨー・アーム統合モデルに基づくアーム型ロボットによる周期的なヨーヨー操作の制御
- 3章：アシダカグモ型構造可変4脚ロボットによる回転移動のモデル構築と制御系設計
- 4章：ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットによる回転移動のモデル構築と制御系設計
- 5章：結論

まず、2章で、回転移動の制御系設計に応用されるヨーヨー操作の制御アプローチを示す。その後、3章と4章で、アシダカグモ、ホイール・スパイダーにそれぞれ着想を得た回転移動のモデル構築と制御系設計を示す。そして最後に、本論文の結論をまとめる。

1.5.1 2章：ヨーヨー・アーム統合モデルに基づくアーム型ロボットによる周期的なヨーヨー操作の制御

この章では、グラビティ・プルと呼ばれる、ヨーヨーを落下させ、紐を上下に動かすことにより周期的なヨーヨーの上下運動を行わせる操作を、アーム型ロボットにより達成するための制御アプローチを示す。ヨーヨーは木製やプラスチック製の2つの円盤を短軸で連結し、軸に紐を巻きつけた玩具であり、このヨーヨーを用いたグラビティ・プルは、操作者の腕の動きとヨーヨーの動きとの同調を必要とし、運動機能や感覚器官の違いから、人間には容易だが、ロボットには困難な動作となっている。

ロボットによるグラビティ・プルの研究は過去にも行われている [27, 28, 29, 30, 31, 32]。Jinらは、ヨーヨーの運動を4つのフェーズに分割し、複雑なヨーヨー挙動をモデル化している。さらに、簡略化したモデルを利用してアーム型ロボットのための制御系を設計し、ロボットによるグラビティ・プルを実現している [28, 29]。同様に、Hashimoto[27] や Žlajpah[30, 31] らも、ヨーヨーの簡易的なモデリングと、ビジュアルフィードバックを利用した制御系の設計により、アーム型ロボットによるグラビティ・プルを達成している。2010年には Mombaur らが二足歩行ロボット HRP-2によりグラビティ・プルを実現している [32]。このロボットによるグラビティ・プル実現の過程で、Žlajpah らは人間によるヨーヨー操作の計測を通し、人間は持続的なグラビティ・プルを達成するためにヨーヨーが最下点に達する前に引き上げ動作を行っているという知見を得ている。このような運動の知見がロボットによるグラビティ・プルの制御には生かされている。

過去のヨーヨー研究では、視覚センサーでヨーヨーの高さを検出し、その高さに合わせてロボットの手先を動かすことにより上下運動の操作を実現している。このとき、制御の目標値としては、手先の高さや加速度が使われている。しかし、実際には、人間はヨーヨーが持つエネルギー量を感覚的に把握し、上下運動により失われたエネルギーを補うようにヨーヨーを引き上げることで、持続的な上下運動を達成していると考えられる。この知見を受け、本研究ではヨーヨーの運動エネルギーに着目し、瞬間的なヨーヨーの引き上げ動作により、上下運動により失われたエネルギーを補償することを制御目標とする。

グラビティ・プルにおいて、ヨーヨーは位置エネルギーを運動エネルギーに変換しながら自由落下し、最下点でバウンドする。このとき、エネルギーの一部はヨーヨーの円盤と紐との間に発生する摩擦や最下点での衝突によって失われる。そのため、周期的な上下運動を達成するには、失われたエネルギーを補償する必要がある。このとき、エネルギーを効率的に回復させるには、ヨーヨーとロボットの動きを巧みに同調させることが重要である。

ヨーヨーとロボットの同調を巧みに行ってグラビティ・プルを実現するためには、ヨーヨーとロボットの相互干渉を捉え、それらの動特性を考慮したエネルギー補償制御系を設計することが必要となる。この課題に対して、我々の先行研究では、ヨーヨーとロボットアームを統合したモデルの構築が行われている [33, 34, 35]。さらに、我々は、過去にヨーヨーのみのモデルを用いて上下運動により失われたエネルギーを補償する制御系を設計し、シミュレーション上でグラビティ・

プルを実現している [36, 37]. そこでこの章では, ヨーヨーを操作するロボットとして, 1 リンクアームを採用し, 先行研究をもとに, ヨーヨーと 1 リンクアームを統合したモデルを構築する. そして, 構築した統合モデルに基づいて従来の制御系を拡張し, 1 リンクアームにヨーヨー引上げ動作を行わせることによりエネルギー損失を補償する制御系を設計する.

この章では, 最初に, 実際のヨーヨー挙動を解析する. そして, その結果に基づいて, ヨーヨーとアームのそれぞれのモデルを構築し, それらの相互干渉を捉えるために, ヨーヨーとアームが統合されたモデルを構築する. ここで, モデルの物理パラメータには計測により決定することが困難なものが含まれているため, それらのパラメータは同定により決定する. これらのモデルと同定パラメータの有効性は, シミュレーション結果を計測データと比較することにより検証される. 次に, 制御系設計の簡略化のため, 1 リンクアームのモデルを線形化し, そのモデルとヨーヨーの統合モデルを用いて, ヨーヨーの運動により失われたエネルギーを補償する制御系を設計する. このとき, 制御入力はヨーヨーの動特性を考慮した 1 リンクアームの関節トルクとして導出される. 最後に, 設計した制御系を用いてグラビティ・プルのシミュレーションを行い, この制御系が持続的なグラビティ・プルの実現に有効であることを示す.

1.5.2 3章：アシダカグモ型構造可変 4 脚ロボットによる回転移動のモデル構築と制御系設計

この章では, 宙返りを行えるアシダカグモの 1 種から着想を得た回転移動を, 先行研究において開発されたアシダカグモ型構造可変 4 脚ロボットにより実現するための制御アプローチを示す. 4 脚ロボットによる回転移動において, ロボットの一部のエネルギーは, 地面との接触や衝突が原因で失われ, エネルギーの供給がなければ, 4 脚ロボットは回転移動を続けることができない. そこで, ヨーヨー操作の制御アルゴリズムの応用し, 瞬間的な脚部の動きを周期的に行うことにより, 運動により失われたエネルギーを回復する制御系を設計する.

エネルギー補償制御系を設計するためには, アシダカグモ型構造可変 4 脚ロボットによる回転移動のモデルを構築する必要がある. このとき, 回転移動のモデルには, アシダカグモの回転移動の特徴を取り入れるとともに, 地面との接触や衝突の影響を考慮する必要がある. この課題に対して, 従来研究において, 地面の影響を含まない対象システムのモデルに, 地面との接触や衝突より発生する拘束力を与え, さらに地面との衝突による不連続な速度変化を考慮することで, 対象システムが地面から受ける影響を考慮したモデルを構築する手法が提案されている [38]. そこでこの章では, この手法を利用して, 対象生物の運動の特徴を取り入れた, 4 脚ロボットによる回転移動のモデルを構築する. そして, 構築したモデルを制御系設計に適した形に変形し, それを利用して回転移動によるエネルギー損失を補償する制御系を設計する.

この章では, 最初に, 回転移動中にロボットが転倒しないという仮定に基づいて, アシダカグモの回転移動の特徴を取り入れた, 4 脚ロボットによる回転移動のモデルを構築する. このモデル

は、まず、地面との衝突や接触の影響を含まない4脚ロボットの回転形態モデルを構築し、あとから地面との衝突や接触によりもたらされる拘束力を与えることで構築される。このとき、地面との衝突で発生する不連続な速度変化は、地面との衝突は完全非弾性衝突であるという仮定に基づいて、衝突によりもたらされる拘束力から計算される。次に、4脚ロボットによる回転移動モデルを変形して地面との接地点を基準としたモデルを構築し、2章の制御系設計法を応用して回転移動により失われたエネルギーを補償する制御系を設計する。このとき、エネルギーを回復するための瞬間的な脚部の挙動とそのタイミングをアシダカグモの回転移動の特徴から決定する。最後に、設計した制御系を用いて4脚ロボットによる回転移動のシミュレーションを行い、2章の設計法を応用した制御系が持続的な回転移動の実現に有効であることを示す。

1.5.3 4章：ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットによる回転移動のモデル構築と制御系設計

この章では、身体を丸めて坂を側転のように転がり下りることができるホイール・スパイダーから着想を得た回転移動を、ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットにより平坦な地面上で実現するための制御アプローチを示す。本来のホイール・スパイダーは重力を利用して坂を受動的に転がり下りるが、平地での回転移動を実現するためには、ロボットは自身の機構を駆動させて能動的に回転することが必要となる。また、3章と同様に、ロボットのエネルギーは地面との接触や衝突の影響により失われていく。

ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットによる持続的な回転移動を実現するためには、有効な平地における回転移動方法を考案し、それを実現する制御系を設計することが必要となる。そこで、この章では、ロボットの機構と回転移動の方法を考案し、その機構を用いた6脚ロボットによる回転移動のモデルを構築する。そして、3章と同様に、構築したモデルを制御系設計に適した形に変形し、それを利用して回転移動によるエネルギー損失を補償する制御系を設計する。

この章では、最初に、ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットの機構とその平地における回転移動の方法を考案する。そして、3章と同じ方法で、ホイール・スパイダーの特徴を取り入れた6脚ロボットによる回転移動モデルを構築する。次に、その回転移動モデルを変形して地面との接地点を基準としたモデルを構築し、回転移動により失われたエネルギーを補償する制御系を設計する。最後に回転移動のシミュレーションを行い、設計した制御系が、考案した機構を持つホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットによる回転移動の実現に有効であることを示す。

1.5.4 5章：結論

この章では、前章までの結果を受けて、本研究の目的に対する結論を示す。最初に本研究全体の結論を示したあと、それぞれの章に対する結論をまとめる。

2. ヨーヨー・アーム統合モデルに基づくアーム型ロボットによる周期的なヨーヨー操作の制御

本章では、グラビティ・プルと呼ばれる、ヨーヨーを落下させ、紐を上下に動かすことにより周期的なヨーヨーの上下運動を行わせる操作を、ロボットにより達成するための制御アプローチを示す。グラビティ・プルにおいて、ヨーヨーは位置エネルギーを運動エネルギーに変換しながら自由落下し、最下点でバウンドする。このとき、エネルギーの一部はヨーヨーの円盤と紐との間に発生する摩擦と最下点での衝突によって失われる。そのため、周期的な上下運動を達成するには、失われたエネルギーを補償する必要がある。このとき、エネルギーを効率的に回復させるには、ロボットとヨーヨーの動きを巧みに同調させることが重要である。

本章の実験システムは、白塗りにされた市販のヨーヨー（図 2.1）と、カウンターウェイトを持つ 1 リンクアーム（図 2.2）で構成される。図 2.1 のヨーヨーは、画像処理を用いて重心を検出するために白く塗られている。このヨーヨーは紐が軸に固定されており、ヨーヨーの主要なパラメータは表 2.1 となる。ここで、市販のヨーヨーは円盤が中抜きなどされており、正確な慣性モーメントの計算が困難であるため、ヨーヨーの慣性モーメントは同定パラメータとする。さらに、ヨーヨーの水平方向への移動を考慮する場合、紐の揺れに対する慣性モーメントの影響が大きくなることが考えられるため、紐の慣性モーメントも同定パラメータとして求める。図 2.2 のアームは、カウンターウェイトの位置を調整することで平衡状態を保てるようになっている。また、アームの手先にはヨーヨーを保持、解放する機構が備わっている。この実験システムを用いてグラビティ・プルを実現するためには、ヨーヨーと 1 リンクアームの動きを同調させ、上下運動により失われたエネルギーを補償できるように、アームにヨーヨーの引き上げ動作を行わせる必要がある。

ヨーヨーと 1 リンクアームの動きを同調させるためには、ヨーヨーとアームの相互干渉を捉え、双方の動特性を把握する必要がある。そこで、実際のヨーヨー挙動を解析し、その結果に基づいたヨーヨーモデルと、アームモデルをそれぞれ構築する。そして、それらをサブシステムとして統合したモデルを構築する。導出したモデルの物理パラメータには計測により決定することが困難なものが含まれているため、それらのパラメータは同定により決定する。その後、ヨーヨー、アームそれぞれのモデルと同定パラメータを用いてシミュレーションを行い、導出したモデルの有効性を検証する。

モデルの導出後、アームのモデルを線形化し、ヨーヨーと線形化したアームの統合モデルを用いて、ヨーヨーの運動により失われたエネルギーを補償する制御系を設計する。この制御系の有効性は、グラビティ・プルのシミュレーションにより検証する。



図 2.1: ヨーヨー. 画像処理を用いて重心を検出するために, 市販のヨーヨーを白く塗って使用する.

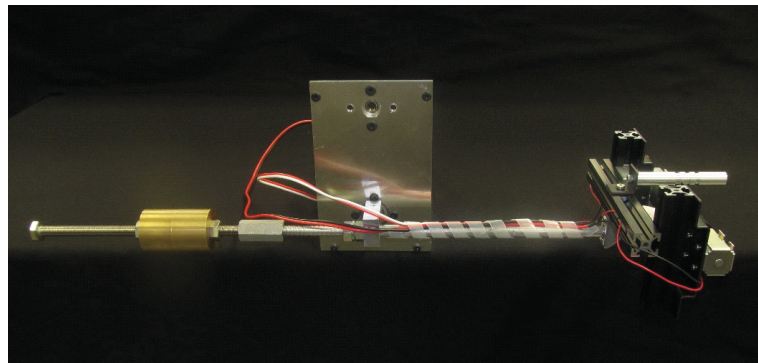


図 2.2: 1リンクアーム. アームの平衡状態を保つためのカウンターウェイトと, ヨーヨーを保持, 解放するための手先機構が備わっている.

2.1 ヨーヨー挙動の解析

ヨーヨーの挙動を解析するために, ヨーヨーの自由落下をカメラで撮影し, 画像処理を行うことにより, 重心位置の軌跡を取得する. 図 2.3 に計測環境を, 表 2.2 に使用するカメラの仕様を示す. 図 2.3 のように, 紐の端を固定したヨーヨーを自由落下させ, カメラにより計測する. その後, PC により画像処理を行い, 重心位置を抽出する.

図 2.4, 図 2.5 に計測したヨーヨーの重心位置の軌跡を示す. 図 2.4, 図 2.5 は, 自由落下開始か

表 2.1 ヨーヨーの主要パラメータ.

ヨーヨーの質量 [kg]	5.46×10^{-2}
ヨーヨーの直径 [m]	5.50×10^{-2}
ヨーヨーの厚さ [m]	3.90×10^{-2}
軸の最小半径 [m]	4.00×10^{-3}
紐の最大長 [m]	1.05

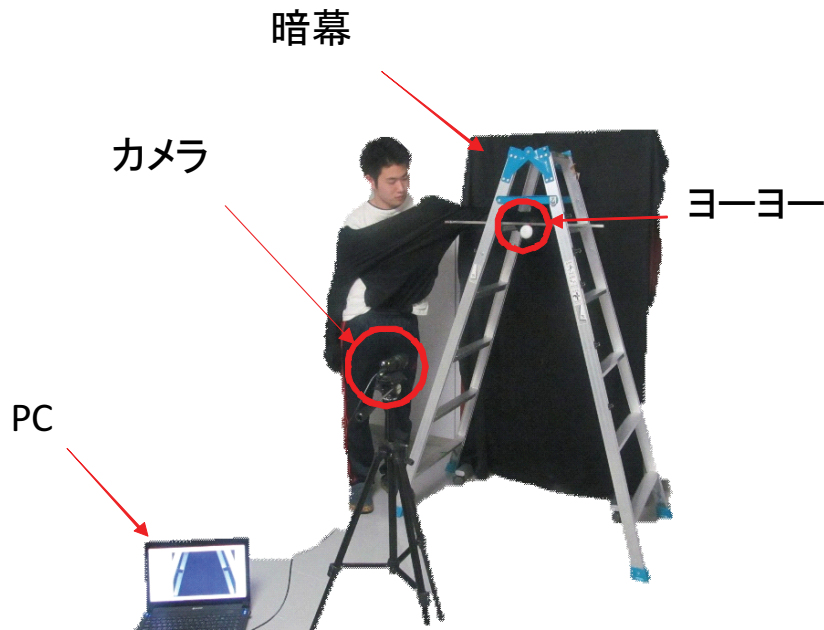


図 2.3: 計測環境. 紐の端を固定したヨーヨーを自由落下させ, カメラにより計測する. その後, PC により画像処理を行い, ヨーヨーの重心位置を抽出する.

表 2.2 カメラの仕様.

メーカー	Point Gray Research
型番	FL3-U3-13Y3M-C
最大解像度	1280 × 1024
最大フレームレート [fps]	150

ら紐のねじれが原因となるひねり回転が発生するまでの軌跡である. ヨーヨーを自由落下させると, ヨーヨーは位置エネルギーを運動エネルギーに変換しながら落下する. そして, 最下点に達すると, 角運動量の連続性により巻き上がる. このとき, 最下点に達した直後から, 軌跡の変化が確認できる. これは, 紐の弾性力によりバウンド直後に紐が弛んだことが原因である. ヨーヨーのバウンド後は, 頂点の高さが初期の高さよりも低くなっている. これは, 紐と円盤との間に発生した摩擦と最下点でのバウンドによるエネルギーの損失が原因であり, ヨーヨーの振幅は周期ごとに減少していく. また, ヨーヨーは落下に伴い, 左右に揺れることがわかる.

2.2 ヨーヨー・アーム統合モデルの構築

ヨーヨーとアームの相互干渉を捉え, 双方の動特性を把握するために, ヨーヨーと1リンクアームそれぞれのモデルと, それらを統合したモデルを構築する. これらのモデルの運動方程式は, Projection Method [39, 40, 41] と呼ばれる方法を用いて, システムに含まれる各要素の独立した

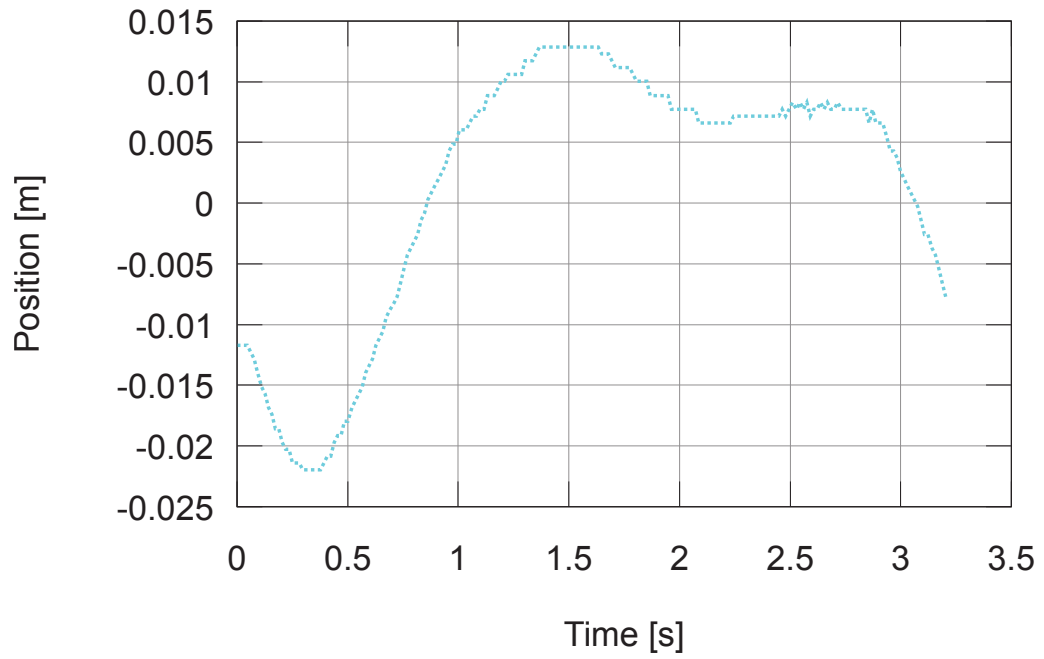


図 2.4: 水平方向のヨーヨー位置の計測値. 落下に伴い, ヨーヨーが左右に揺れていることがわかる.

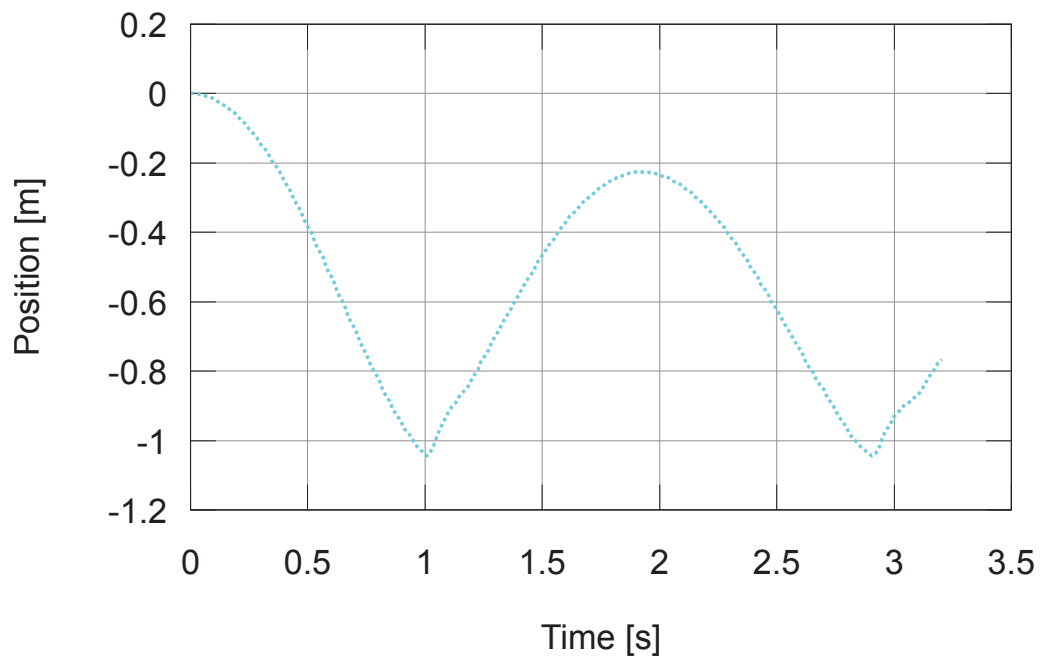


図 2.5: 垂直方向のヨーヨー位置の計測値. 紐と円盤との摩擦や最下点でのバウンドによるエネルギー損失により頂点の高さが低くなっていく. ヨーヨーを自由落下させると, バウンドを繰り返すうちにヨーヨーがひねり回転してしまう.

運動方程式とそれらのあいだに働く拘束条件から導出される。例として、ヨーヨーの運動方程式は、紐やヨーヨーディスクなどの独立な運動方程式とそれらの拘束条件から導出される。統合モデルは、ヨーヨーとアームの各運動方程式をシステムの要素の独立な運動方程式とみなし、それらのあいだの拘束条件を考えることにより導出される。

ヨーヨーのモデルとしては、紐の伸縮を考慮しているものとしていないものの2種類を構築する。紐の伸縮を考慮したモデルは、シミュレーション時のプラントとして、より正確なヨーヨーの挙動を再現するために使用される。紐の伸縮を考慮していないモデルは制御系の設計に使用される。グラビティ・プルにおけるヨーヨー操作は基本的に紐が弛んでいないときに行われるため、このモデルにより制御系設計の簡略化を図る。

2.2.1 ヨーヨーモデル（紐の伸縮あり）

紐の伸縮を考慮したヨーヨーモデルの運動方程式は、以下の仮定に基づいて導出される。

仮定 1. ヨーヨーは垂直な2次元平面上を移動する。ヨーヨーの回転軸は、常に2次元平面と直交している。

仮定 2. ヨーヨーの軸半径と紐が、上下運動中は常に直角をなす。紐が伸びきったときのみヨーヨー軸が紐の逆サイドへと π rad 回転する。

仮定 3. 紐の張り、弛みを考慮する。

仮定 4. 紐の太さを考慮し、紐の巻きつきによる粘性摩擦は、軸半径とヨーヨーの回転速度に比例する。

仮定1~4より、ヨーヨーのモデル図を図2.6、物理パラメータを表2.3、変数を表2.4とする。ここで、接続点は紐の伸縮性を考慮するために定義された仮想的な質点である。このとき、手先と接続点の距離 r_s は相対位置をとるものとする。ヨーヨーの回転角 θ_y は紐との相対角をとるものとし、ヨーヨーが最下点にあるときを $\theta_y = 0$ rad とする。

仮定1より、ヨーヨーは回転し、鉛直、水平方向へ移動するものとし、紐の鉛直方向からの傾き θ_s を考慮することでヨーヨーの水平方向の揺れを考慮する。ヨーヨーの回転が速い場合、ヨーヨーの傾き、紐のねじれによる回転は発生しないので、これらを見捨てる。

仮定2より、ヨーヨーの運動は、上下運動を行う上下運動フェーズと、ヨーヨー軸が紐の逆サイドへと π rad 回転する遷移フェーズに分割される。図2.6のように、 $|\theta_y| \geq \pi/2$ のときを上下運動フェーズ、 $|\theta_y| < \pi/2$ のときを遷移フェーズとし、 $\theta_y \leq -\pi/2$ と $\theta_y \geq \pi/2$ では、遷移フェーズを経由して紐とヨーヨー軸の位置関係が入れ替わる。このとき、ヨーヨーの状態遷移は図2.7のようになり、下降運動と上昇運動は、ヨーヨーが頂点に達したときと、最下点に達したとき（遷移フェーズを経由したとき）に入れ替わる。

仮定3より、紐の張りは、接続点と実際の手先位置を設定し、それらの距離 r_s が一定値より大きくなったとき、接続点と手先のあいだにバネ・ダンパモデルが作動して張力を発生させること

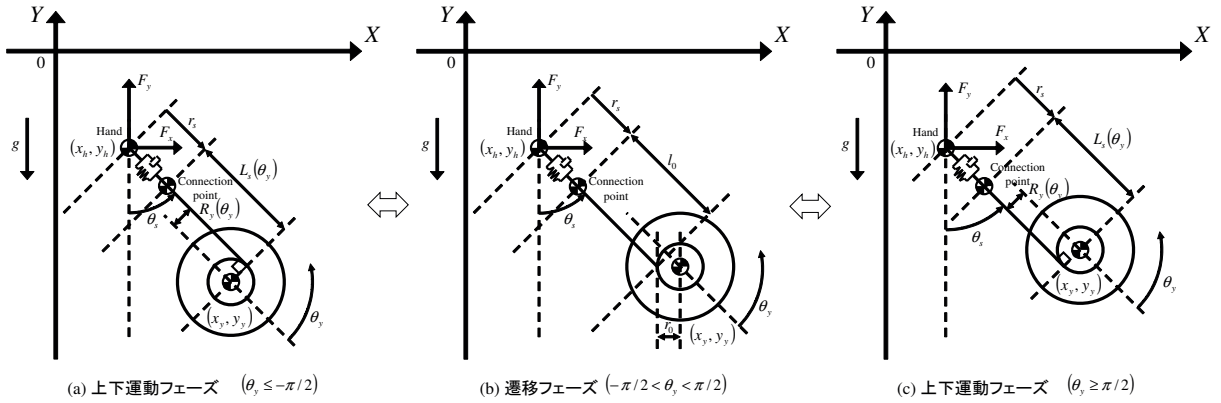


図 2.6: ヨーヨーのモデル図 (紐の伸縮あり). ヨーヨーの回転角に依存して, 上下運動フェーズ (a, c) と遷移フェーズ (b) に分割される. 接続点は紐の伸縮性を考慮するために定義された仮想的な質点である. 手先と接続点の距離 r_s は相対位置をとるものとする. ヨーヨーの回転角 θ_y は紐との相対角をとるものとし, ヨーヨーが最下点にあるときを $\theta_y = 0$ rad とする.

表 2.3 ヨーヨーの物理パラメータ (紐の伸縮あり).

ヨーヨーの質量 [kg]	m_y
手先の質量 [kg]	m_h
接続点の質量 [kg]	m_s
ヨーヨーの慣性モーメント [kgm^2]	I_y
紐の慣性モーメント [kgm^2]	I_s
ヨーヨーの粘性摩擦係数 [Ns/rad]	c_y
紐の粘性摩擦 [Nms/rad]	c_s
紐のダンパ係数 [Ns/m]	d_s
紐のバネ係数 [N/m]	k_s
紐の最大長 [m]	l_0
ヨーヨー軸の最小半径 [m]	r_0
紐の有効径 [m/rad]	k_r

で表現される. ただし, 紐が張った状態から弛む ($\dot{r}_s < 0$) とき, 紐は速度に対する抵抗力を持たないので, バネモデルのみで張力を発生させる. 紐の弛みは, 実際の手先位置が接続点よりもヨーヨーに近づいたとき, 接続点と手先のあいだに働く力を 0 にすることで表現される.

仮定 4 より, 紐が巻きついた状態の軸半径は, ヨーヨーの回転角に比例して大きくなる. しかし, その軸半径は, 紐の層が増えるまでは変化しない. そこで, 紐の有効径 k_r を設定し, 軸半径と紐の長さの変化を表現する. このとき, ヨーヨーの回転による摩擦力は, ヨーヨーの円盤と紐の接触する面積が増えるにつれて大きくなる.

表 2.4 ヨーヨーの変数（紐の伸縮あり）.

ヨーヨーの重心座標 [m]	(x_y, y_y)
手先の重心座標 [m]	(x_h, y_h)
ヨーヨーの回転角 [rad]	θ_y
紐の回転角 [rad]	θ_s
手先と接続点の距離 [m]	r_s
手先への入力 [N]	(F_x, F_y)

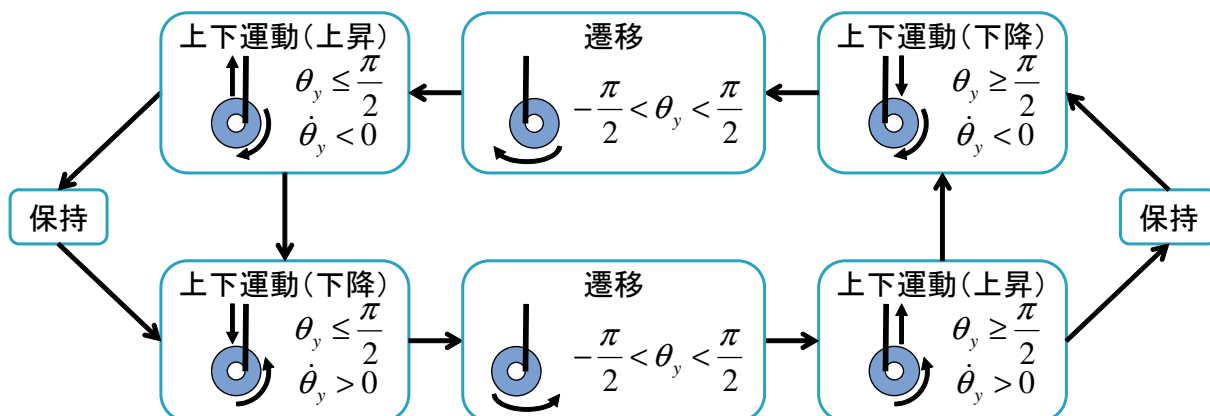


図 2.7: ヨーヨーの状態遷移. ヨーヨーは上下運動を繰り返す, 下降運動と上昇運動は, ヨーヨーが頂点に達したとき, 最下点に達したとき (遷移フェーズを経由したとき) に入れ替わる.

Projection Method で運動方程式を導出する場合, 通常, 位置は絶対位置, 角度は絶対角で考える. そこで, 接続点の位置を絶対座標 $(\tilde{x}_s, \tilde{y}_s)$, ヨーヨーの回転角を絶対角 $\tilde{\theta}_y$ として各要素の独立した運動方程式を導出したあと, 座標変換を行うことにより相対距離と相対角を含む式を導出する.

ヨーヨーの各要素の独立した運動方程式は, (2.1) のように表すことができる.

$$\tilde{M}_y \ddot{\tilde{x}}_y = \tilde{h}_y \quad (2.1)$$

ここで, \tilde{M}_y は一般化質量行列, \tilde{x}_y は一般化座標, \tilde{h}_y は一般化力ベクトルである. 一般化座標 \tilde{x}_y は, (2.2) と定義する.

$$\tilde{x}_y = [\tilde{\theta}_y, \theta_s, \tilde{x}_s, \tilde{y}_s, x_h, y_h, x_y, y_y]^T \quad (2.2)$$

一般化質量行列 \tilde{M}_y , 一般化力ベクトル \tilde{h}_y は, (2.3), (2.4) となる.

$$\tilde{M}_y = \text{diag}(I_y, I_s, m_s, m_s, m_h, m_h, m_y, m_y) \quad (2.3)$$

$$\tilde{\mathbf{h}}_y = \begin{bmatrix} -R_y(\tilde{\theta}_y - \theta_s)c_y(\dot{\tilde{\theta}}_y - \dot{\theta}_s) \\ -c_s\dot{\theta}_s + R_y(\tilde{\theta}_y - \theta_s)c_y(\dot{\tilde{\theta}}_y - \dot{\theta}_s) \\ -F_{kd}(r_s, \dot{r}_s) \sin \theta_s \\ F_{kd}(r_s, \dot{r}_s) \cos \theta_s - m_s g \\ F_x + F_{kd}(r_s, \dot{r}_s) \sin \theta_s \\ F_y - F_{kd}(r_s, \dot{r}_s) \cos \theta_s - m_h g \\ 0 \\ -m_y g \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

ここで、仮定3より、紐の伸縮性を考慮するために加える力を表す関数 $F_{kd}(r, \dot{r})$ を (2.5) とする.

$$F_{kd}(r, \dot{r}) = \begin{cases} k_s r + d_s \dot{r} & (r \geq 0, \dot{r} \geq 0) \\ k_s r & (r \geq 0, \dot{r} < 0) \\ 0 & (r < 0) \end{cases} \quad (2.5)$$

さらに、仮定4より、ヨーヨー軸の半径、紐の長さを表す関数 $R_y(\theta)$, $L_s(\theta)$ を、それぞれ (2.6), (2.7) とする.

$$R_y(\theta) = \begin{cases} r_0 + k_r (|\theta| - \frac{\pi}{2}) & (|\theta| \geq \frac{\pi}{2}) \\ r_0 & (|\theta| < \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad (2.6)$$

$$L_s(\theta) = \begin{cases} l_0 - \left(r_0 (|\theta| - \frac{\pi}{2}) + \frac{k_r}{2} (|\theta| - \frac{\pi}{2})^2 \right) & (|\theta| \geq \frac{\pi}{2}) \\ l_0 & (|\theta| < \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad (2.7)$$

式 (2.1) に対して座標変換を行い、接続点の座標 $(\tilde{x}_s, \tilde{y}_s)$ を手先と接続点の距離 r_s に、ヨーヨーの絶対角 $\tilde{\theta}_y$ を相対角 θ_y に変換する. 変換後の一般化座標 \mathbf{x}_y を,

$$\mathbf{x}_y = [\theta_y, \theta_s, r_s, x_h, y_h, x_y, y_y]^T \quad (2.8)$$

とすると、接続点の座標 $(\tilde{x}_s, \tilde{y}_s)$, ヨーヨーの絶対角 $\tilde{\theta}_y$ は,

$$\begin{cases} \tilde{x}_s = x_h + r_s \sin \theta_s \\ \tilde{y}_s = y_h - r_s \cos \theta_s \\ \tilde{\theta}_y = \theta_y + \theta_s \end{cases} \quad (2.9)$$

と表せる. したがって, $\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_y = \mathbf{A}_y \dot{\mathbf{x}}_y$ を満たす速度変換行列 \mathbf{A}_y は, (2.9) を (2.2) に代入し, (2.10) から求められる.

$$\mathbf{A}_y = \frac{\partial \tilde{\mathbf{x}}_y}{\partial \mathbf{x}_y} \quad (2.10)$$

この変換行列を用いると、 $\ddot{\mathbf{x}}_y = \dot{\mathbf{A}}_y \dot{\mathbf{x}}_y + \mathbf{A}_y \ddot{\mathbf{x}}_y$ より、変換後の運動方程式は、

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{M}}_y \left(\dot{\mathbf{A}}_y \dot{\mathbf{x}}_y + \mathbf{A}_y \ddot{\mathbf{x}}_y \right) &= \tilde{\mathbf{h}}_y \\ \mathbf{A}_y^T \tilde{\mathbf{M}}_y \mathbf{A}_y \ddot{\mathbf{x}}_y &= \mathbf{A}_y^T \left(\tilde{\mathbf{h}}_y - \tilde{\mathbf{M}}_y \dot{\mathbf{A}}_y \dot{\mathbf{x}}_y \right)\end{aligned}\quad (2.11)$$

となる．ここで、 $\mathbf{M}_y = \mathbf{A}_y^T \tilde{\mathbf{M}}_y \mathbf{A}_y$ 、 $\mathbf{h}_y = \mathbf{A}_y^T \left(\tilde{\mathbf{h}}_y - \tilde{\mathbf{M}}_y \dot{\mathbf{A}}_y \dot{\mathbf{x}}_y \right)$ とすると、ヨーヨーの各要素が独立している状態の運動方程式は、最終的に、

$$\mathbf{M}_y \ddot{\mathbf{x}}_y = \mathbf{h}_y \quad (2.12)$$

と表せる．

式 (2.12) より、ヨーヨーの各要素が拘束された状態の運動方程式は (2.13) のように表すことができる．

$$\mathbf{M}_y \ddot{\mathbf{x}}_y = \mathbf{h}_y + \mathbf{C}_y^T \boldsymbol{\lambda}_y, \quad (2.13)$$

ここで、 \mathbf{C}_y は拘束行列、 $\boldsymbol{\lambda}_y$ はラグランジュの未定乗数である．この拘束行列 \mathbf{C}_y は、ヨーヨーの各要素に課される拘束条件から、 $\mathbf{C}_y \dot{\mathbf{x}}_y = \mathbf{0}$ を満たすように与えられる．ヨーヨーの拘束条件はヨーヨーディスク、接続点、手先の位置関係の記述となるが、上下運動フェーズと遷移フェーズでディスクと紐の位置関係が変化するので、拘束条件を変更する必要がある．そこで、それぞれのフェーズでの拘束条件を挙げ、最終的なヨーヨーの運動方程式を導出する．

上下運動フェーズ ($|\theta_y| \geq \pi/2$)

$|\theta_y| \geq \pi/2$ のとき、図 2.6 の (a)、(c) のように、紐はヨーヨー軸に対して常に直角に接している．したがって、 $|\theta_y| \geq \pi/2$ のときの拘束条件は、(2.14) となる．

$$\begin{cases} x_y = x_h + (L_s(\theta_y) + r_s) \sin \theta_s + R_y(\theta_y) \cos \theta_s \operatorname{sgn} \theta_y \\ y_y = y_h - (L_s(\theta_y) + r_s) \cos \theta_s + R_y(\theta_y) \sin \theta_s \operatorname{sgn} \theta_y \end{cases} \quad \left(|\theta_y| \geq \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.14)$$

これを拘束方程式 $\boldsymbol{\Phi}_y = \mathbf{0}$ としてまとめると、

$$\boldsymbol{\Phi}_y = \begin{bmatrix} x_y - x_h - (L_s(\theta_y) + r_s) \sin \theta_s - R_y(\theta_y) \cos \theta_s \operatorname{sgn} \theta_y \\ y_y - y_h + (L_s(\theta_y) + r_s) \cos \theta_s - R_y(\theta_y) \sin \theta_s \operatorname{sgn} \theta_y \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (2.15)$$

となる．この拘束方程式 (2.15) より、拘束行列 \mathbf{C}_y は (2.16) のように計算できる．

$$\begin{aligned}\mathbf{C}_y &= \frac{\partial \boldsymbol{\Phi}_y}{\partial \mathbf{x}_y} \\ &= \begin{bmatrix} -k_r C_s + R_y(\theta_y) S_s \operatorname{sgn} \theta_y & -(L_s(\theta_y) + r_s) C_s + R_y(\theta_y) S_s \operatorname{sgn} \theta_y & -S_s & -1 & 0 & 1 & 0 \\ -k_r S_s - R_u(\theta_y) C_s \operatorname{sgn} \theta_y & -(L_s(\theta_y) + r_s) S_s - R_y(\theta_y) C_s \operatorname{sgn} \theta_y & C_s & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (2.16)$$

ただし、 C_s は $\cos \theta_s$ 、 S_s は $\sin \theta_s$ を表す．

式 (2.13) は冗長な自由度を含んでいるため、拘束条件下で独立となる速度ベクトル $\dot{\mathbf{q}}_y$ を定義し、運動方程式の低次元化を行う。独立な速度ベクトル $\dot{\mathbf{q}}_y$ は、一般化速度 $\dot{\mathbf{x}}_y$ より選ばれ、(2.17) と定義される。

$$\dot{\mathbf{q}}_y = [\dot{\theta}_y, \dot{\theta}_s, \dot{r}_s, \dot{x}_h, \dot{y}_h]^T. \quad (2.17)$$

ここで、一般化速度は $\dot{\mathbf{x}}_y = [\dot{\mathbf{q}}_y^T, \mathbf{v}_y^T]^T$ のように、独立な速度ベクトル $\dot{\mathbf{q}}_y$ と従属な速度ベクトル \mathbf{v}_y に分割される。この関係より、拘束行列に対する直交補行列 \mathbf{D}_y を、 $\mathbf{C}_y \mathbf{D}_y = \mathbf{0}$ かつ $\dot{\mathbf{x}}_y = \mathbf{D}_y \dot{\mathbf{q}}_y$ を満たすように求め、運動方程式の低次元化に利用する。 $\mathbf{C}_y \dot{\mathbf{x}}_y = \mathbf{0}$ より、独立な速度ベクトルと従属な速度ベクトルの関係は、(2.18) と表せる。

$$\begin{aligned} \left[\begin{array}{ccc|cc} -k_r C_s + R_y(\theta_y) S_s \operatorname{sgn} \theta_y & -(L_s(\theta_y) + r_s) C_s + R_y(\theta_y) S_s \operatorname{sgn} \theta_y & -S_s & -1 & 0 & 1 & 0 \\ -k_r S_s - R_u(\theta_y) C_s \operatorname{sgn} \theta_y & -(L_s(\theta_y) + r_s) S_s - R_y(\theta_y) C_s \operatorname{sgn} \theta_y & C_s & 0 & -1 & 0 & 1 \end{array} \right] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_s \\ \dot{r}_s \\ \dot{x}_h \\ \dot{y}_h \\ \dot{x}_y \\ \dot{y}_y \end{bmatrix} = \mathbf{0} \\ \left[\begin{array}{cc} \mathbf{C}_{y1} & \mathbf{C}_{y2} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_y \\ \mathbf{v}_y \end{bmatrix} = \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{y1} \dot{\mathbf{q}}_y + \mathbf{C}_{y2} \mathbf{v}_y = \mathbf{0} \\ \mathbf{v}_y = -\mathbf{C}_{y2}^{-1} \mathbf{C}_{y1} \dot{\mathbf{q}}_y \quad (2.18) \end{aligned}$$

この (2.18) を利用すると、一般化速度 $\dot{\mathbf{x}}_y$ は、

$$\dot{\mathbf{x}}_y = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_5 \\ -\mathbf{C}_{y2}^{-1} \mathbf{C}_{y1} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

と表せる。ただし、 \mathbf{I} は単位行列であり、添え字はその次数を表す。したがって、式 (2.19) より直交補行列 \mathbf{D}_y は、

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_y &= \begin{bmatrix} \mathbf{I}_5 \\ -\mathbf{C}_{y2}^{-1} \mathbf{C}_{y1} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ k_r C_s - R_y(\theta_y) S_s \operatorname{sgn} \theta_y & (L_s(\theta_y) + r_s) C_s - R_y(\theta_y) S_s \operatorname{sgn} \theta_y & S_s & 1 & 0 & 0 & 0 \\ k_r S_s + R_y(\theta_y) C_s \operatorname{sgn} \theta_y & (L_s(\theta_y) + r_s) S_s + R_y(\theta_y) C_s \operatorname{sgn} \theta_y & -C_s & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.20) \end{aligned}$$

となる。また, (2.20) は,

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_y \mathbf{D}_y &= \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{y1} & \mathbf{C}_{y2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_5 \\ -\mathbf{C}_{y2}^{-1} \mathbf{C}_{y1} \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{C}_{y1} - \mathbf{C}_{y2} \mathbf{C}_{y2}^{-1} \mathbf{C}_{y1} \\ &= \mathbf{0} \end{aligned}$$

を満たす。

直交補行列 (2.20) を用いて, (2.13) を \mathbf{D}_y^T で拘束された空間に射影し, 成分ベクトルを座標変換することにより, 冗長な自由度を取り除いた運動方程式を得ることができる。 $\dot{\mathbf{x}}_y = \mathbf{D}_y \dot{\mathbf{q}}_y$ を微分すると, $\ddot{\mathbf{x}}_y = \mathbf{D}_y \ddot{\mathbf{q}}_y + \dot{\mathbf{D}}_y \dot{\mathbf{q}}_y$ となる。これを (2.13) に代入し, 両辺に左から \mathbf{D}_y^T を掛けると,

$$\mathbf{D}_y^T \mathbf{M}_y (\mathbf{D}_y \ddot{\mathbf{q}}_y + \dot{\mathbf{D}}_y \dot{\mathbf{q}}_y) = \mathbf{D}_y^T \mathbf{h}_y + \mathbf{D}_y^T \mathbf{C}_y^T \boldsymbol{\lambda}_y \quad (2.21)$$

となる。ここで, $\mathbf{C}_y \mathbf{D}_y = \mathbf{D}_y^T \mathbf{C}_y^T = \mathbf{0}$ なので, (2.21) を変形すると, 最終的なヨーヨーの運動方程式は,

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_y^T \mathbf{M}_y (\mathbf{D}_y \ddot{\mathbf{q}}_y + \dot{\mathbf{D}}_y \dot{\mathbf{q}}_y) &= \mathbf{D}_y^T \mathbf{h}_y \\ \mathbf{D}_y^T \mathbf{M}_y \mathbf{D}_y \ddot{\mathbf{q}}_y + \mathbf{D}_y^T \mathbf{M}_y \dot{\mathbf{D}}_y \dot{\mathbf{q}}_y &= \mathbf{D}_y^T \mathbf{h}_y \end{aligned} \quad (2.22)$$

と求まる。

遷移フェーズ ($|\theta_y| < \pi/2$)

$|\theta_y| < \pi/2$ のとき, ヨーヨー軸は $-\pi/2 < \theta_y < \pi/2$ の範囲で回転する。したがって, $|\theta_y| < \pi/2$ のときの拘束条件は, (2.23) となる。

$$\begin{cases} x_y = x_h + (l_0 + r_s) \sin \theta_s + r_0 \sin(\theta_s + \theta_y) \\ y_y = y_h - (l_0 + r_s) \cos \theta_s - r_0 \cos(\theta_s + \theta_y) \end{cases} \quad \left(|\theta_y| < \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.23)$$

この拘束条件より, 拘束行列は,

$$\mathbf{C}_y = \begin{bmatrix} -r_0 C_{syo} & -(l_0 + r_s) C_s - r_0 C_{syo} & -S_s & -1 & 0 & 1 & 0 \\ -r_0 S_{syo} & -(l_0 + r_s) S_s - r_0 S_{syo} & C_s & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

と求まる。ただし, C_{syo} は $\cos(\theta_s + \theta_y)$, S_{syo} は $\sin(\theta_s + \theta_y)$ を表す。

独立な速度ベクトル $\dot{\mathbf{q}}_y$ は, (2.17) と同様であり, 拘束行列 (2.24) に対する直交補行列は,

$$\mathbf{D}_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ r_0 C_{syo} & (l_0 + r_s) C_s + r_0 C_{syo} & S_s & 1 & 0 \\ r_0 S_{syo} & (l_0 + r_s) S_s + r_0 S_{syo} & -C_s & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

となる. この直交補行列 (2.25) を用いて, 最終的なヨーヨーの運動方程式は, (2.22) と同様に表すことができる.

2.2.2 ヨーヨーモデル (紐の伸縮なし)

紐の伸縮を考慮しないヨーヨーモデルの運動方程式は, 基本的に紐の伸縮を考慮したモデルと同じ仮定に基づいて導出されるが, 仮定3のみ以下のように変更される.

仮定 3. 紐の張り, 弛みを考慮しない.

この仮定3に従い, 紐の伸縮を考慮しないヨーヨーモデルの運動方程式は, 紐を長さの変化する剛体とみなして導出される. これにより, 紐の伸縮に起因する最下点でのヨーヨーのバウンドは無視される.

ヨーヨーのモデル図を図 2.8 に示す. 紐の伸縮ありのモデルと同様に, ヨーヨーの回転角 θ_y は紐との相対角をとるものとし, ヨーヨーが最下点にあるときを $\theta_y = 0$ とする. 物理パラメータと変数は表 2.3, 2.4 と同様であるが, 紐の伸縮の考慮に関するものは使用しない.

紐の伸縮なしのヨーヨーの運動方程式は, 適宜行列, ベクトルを変更することにより, 伸縮あ

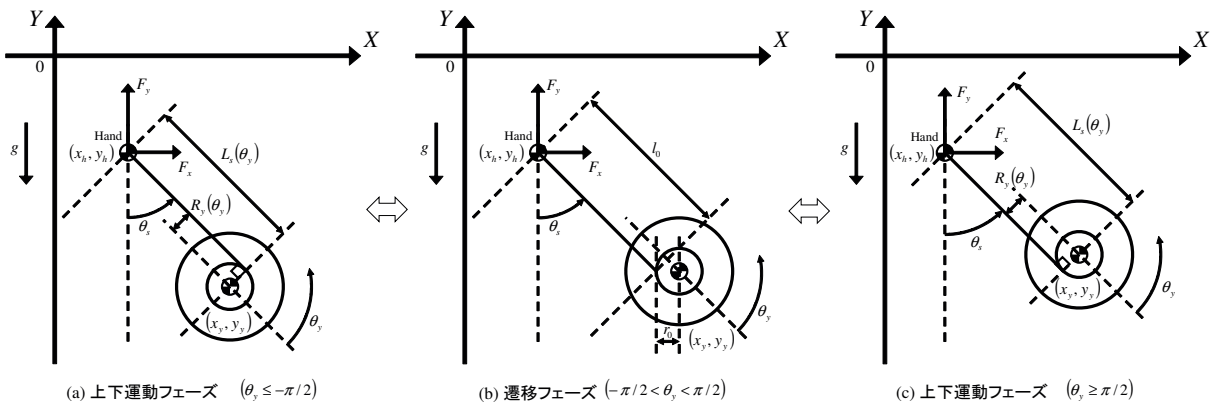


図 2.8: ヨーヨーのモデル図 (紐の伸縮なし). 紐の伸縮ありのモデルからバネ・ダンパを取り除いたものとなる.

りの運動方程式と同様の手順で導出できる。

ヨーヨーの各要素の独立した運動方程式は、(2.12) について、一般化座標、一般化質量行列、一般化力ベクトルを、

$$\mathbf{x}_y = [\theta_y, \theta_s, x_h, y_h, x_y, y_y]^T \quad (2.26)$$

$$\mathbf{M}_y = \begin{bmatrix} I_y & I_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_y & I_y + I_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_h & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_y \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\mathbf{h}_y = \begin{bmatrix} -R_y(\theta_y)c_y\dot{\theta}_y \\ -c_s\dot{\theta}_s \\ F_x \\ F_y - m_h g \\ 0 \\ -m_y g \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

と変更することで求まる。ここで、ヨーヨー軸の半径、紐の長さを表す関数 $R_y(\theta)$ 、 $L_s(\theta)$ は、(2.6)、(2.7) と同様である。

ヨーヨーの各要素が拘束された状態の運動方程式 (2.13) についての拘束行列は、上下運動フェーズ、遷移フェーズでの拘束条件を、

$$x_y = \begin{cases} x_h + L_s(\theta_y) \sin \theta_s + R_y(\theta_y) \cos \theta_s \operatorname{sgn} \theta_y & (|\theta_y| \geq \frac{\pi}{2}) \\ x_h + l_0 \sin \theta_s + r_0 \sin(\theta_s + \theta_y) & (|\theta_y| < \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad (2.29)$$

$$y_y = \begin{cases} y_h - L_s(\theta_y) \cos \theta_s + R_y(\theta_y) \sin \theta_s \operatorname{sgn} \theta_y & (|\theta_y| \geq \frac{\pi}{2}) \\ y_h - l_0 \cos \theta_s - r_0 \cos(\theta_s + \theta_y) & (|\theta_y| < \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad (2.30)$$

とし、(2.31)、(2.32) のように得られる。

$$\mathbf{C}_y = \begin{bmatrix} -k_r C_s + R_y(\theta_y) S_s \operatorname{sgn} \theta_y & -L_s(\theta_y) C_s + R_y(\theta_y) S_s \operatorname{sgn} \theta_y & -1 & 0 & 1 & 0 \\ -k_r S_s - R_u(\theta_y) C_s \operatorname{sgn} \theta_y & -L_s(\theta_y) S_s - R_y(\theta_y) C_s \operatorname{sgn} \theta_y & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \left(|\theta_y| \geq \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.31)$$

$$\mathbf{C}_y = \begin{bmatrix} -r_0 C_{syo} & -l_0 C_s - r_0 C_{syo} & -1 & 0 & 1 & 0 \\ -r_0 S_{syo} & -l_0 S_s - r_0 S_{syo} & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \left(|\theta_y| < \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.32)$$

この拘束行列に対する直交補行列は、独立な速度ベクトルを

$$\dot{\mathbf{q}}_y = [\dot{\theta}_y, \dot{\theta}_s, \dot{x}_h, \dot{y}_h]^T \quad (2.33)$$

と定義し, (2.34), (2.35) のように得られる.

$$\mathbf{D}_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ k_r C_s - R_y(\theta_y) S_s \operatorname{sgn} \theta_y & L_s(\theta_y) C_s - R_y(\theta_y) S_s \operatorname{sgn} \theta_y & 1 & 0 \\ k_r S_s + R_y(\theta_y) C_s \operatorname{sgn} \theta_y & L_s(\theta_y) S_s + R_y(\theta_y) C_s \operatorname{sgn} \theta_y & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \left(|\theta_y| \geq \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.34)$$

$$\mathbf{D}_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ r_0 C_{syo} & l_0 C_s + r_0 C_{syo} & 1 & 0 \\ r_0 S_{syo} & l_0 S_s + r_0 S_{syo} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \left(|\theta_y| < \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.35)$$

直交補行列 (2.34), (2.35) を用いて, (2.13) を \mathbf{D}_y^T で拘束された空間に射影し, 成分ベクトルを座標変換することにより, 紐の伸縮なしのヨーヨーの運動方程式は, (2.22) と同様に導出できる.

2.2.3 1 リンクアームモデル

1 リンクアームモデルの運動方程式もヨーヨーと同様の手順で導出される.

1 リンクアームのモデル図を図 2.9, 物理パラメータを表 2.5, 変数を表 2.6 に示す. ここで, リンクの乾性摩擦はモータの回転方向に応じて変化するものとし, 正方向と負方向の回転に対して別のパラメータを設定する.

アームの各要素の独立した運動方程式は, (2.36) で表される.

$$\mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{x}}_a = \mathbf{h}_a \quad (2.36)$$

$$\mathbf{x}_a := [\theta_l, x_l, y_l, x_w, y_w, x_f, y_f]^T \quad (2.37)$$

$$\mathbf{M}_a := \operatorname{diag}(I_l, m_l, m_l, m_w, m_w, m_f, m_f) \quad (2.38)$$

$$\mathbf{h}_a := \begin{bmatrix} \tau_l - c_l \dot{\theta}_l - f_{lp} \operatorname{sgn}(\operatorname{sgn} \dot{\theta}_l + 1) - f_{lm} \operatorname{sgn}(\operatorname{sgn} \dot{\theta}_l - 1) \\ 0 \\ -m_l g \\ 0 \\ -m_w g \\ 0 \\ -m_f g \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

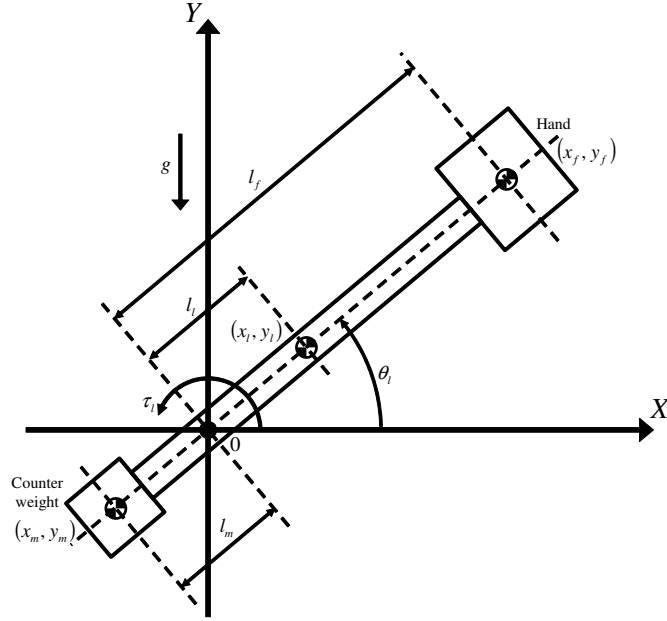


図 2.9 1 リンクアームのモデル図.

アームの各要素が拘束された状態の運動方程式は (2.40) のように表される.

$$M_a \ddot{x}_a = h_a + C_a^T \lambda_a, \quad (2.40)$$

ここで, C_a はアームの拘束行列, λ_a はラグランジュの未定乗数である. この拘束行列 C_a は, アームの各要素に課される拘束条件 (2.41) から, (2.42) のように求まる.

$$\begin{cases} x_l = l_l \cos \theta_l \\ y_l = l_l \sin \theta_l \\ x_w = -l_w \cos \theta_l \\ y_w = -l_w \sin \theta_l \\ x_f = l_f \cos \theta_l \\ y_f = l_f \sin \theta_l \end{cases} \quad (2.41)$$

$$C_a = \begin{bmatrix} l_l S_l & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -l_l C_l & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -l_w S_l & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ l_w C_l & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ l_f S_l & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -l_f C_l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

式 (2.41) の拘束条件下での独立な速度は,

$$\dot{q}_a = \dot{\theta}_l \quad (2.43)$$

表 2.5 1 リンクアームの物理パラメータ.

リンクの質量 [kg]	m_l
ウェイトの質量 [kg]	m_w
手先の質量 [kg]	m_f
リンクの慣性モーメント [kgm^2]	I_l
リンクの粘性摩擦 [Nms/rad]	c_l
リンクの乾性摩擦（正方向）[Nm]	f_{lp}
リンクの乾性摩擦（負方向）[Nm]	f_{lm}
関節からリンク重心までの長さ [m]	l_l
関節からウェイト重心までの長さ [m]	l_w
関節から手先重心までの長さ [m]	l_f

表 2.6 1 リンクアームの変数.

リンクの重心座標 [m]	(x_l, y_l)
ウェイトの重心座標 [m]	(x_w, y_w)
手先の重心座標 [m]	(x_f, y_f)
リンクの回転角 [rad]	θ_l
リンクの入力トルク [Nm]	τ_l

となり，拘束行列 C_a に対する直交補行列 D_a は，

$$D_a = \begin{bmatrix} 1 & -l_l S_l & l_l C_l & l_w S_l & -l_w C_l & -l_f S_l & l_f C_l \end{bmatrix}^T \quad (2.44)$$

となる．この直交補行列 D_a を用いることにより，冗長な自由度を取り除いたアームの運動方程式は，(2.45) と表すことができる．

$$D_a^T M_a D_a \ddot{q}_a + D_a^T M_a \dot{D}_a \dot{q}_a = D_a^T h_a \quad (2.45)$$

ここで，(2.45) の各項を計算すると，最終的に，

$$M(q_a) \ddot{q}_a + N(\dot{q}_a, q_a) = \tau_l \quad (2.46)$$

$$M(q_a) := (I_l + m_l l_l^2 + m_w l_w^2 + m_f l_f^2)$$

$$N(\dot{q}_a, q_a) := c_l \dot{q}_a + f_{lp} \text{sgn}(\text{sgn} \dot{q}_a + 1) + f_{lm} \text{sgn}(\text{sgn} \dot{q}_a - 1) + (m_l l_l + m_f l_f - m_w l_w) g \cos q_a$$

となる．

2.2.4 ヨーヨー・アーム統合モデル

ヨーヨーと1リンクアームを統合したモデルの運動方程式は、ヨーヨーとアームの各運動方程式をシステムの要素の独立な運動方程式とみなし、それらのあいだの拘束条件を考えることにより導出される。

例として、紐の伸縮なしのヨーヨーモデルと1リンクアームモデルの統合を考える。ヨーヨーとアームの運動方程式をそれぞれ、(2.22), (2.45) で表すと、統合モデルの独立状態の運動方程式は、(2.47) で表される。ただし、手先への入力 (F_x, F_y) はアームを介して与えられるので、 $F_x = 0.00$ N, $F_y = 0.00$ N とする。

$$\bar{M}\ddot{\bar{x}} = \bar{h} \quad (2.47)$$

$$\bar{x} := [q_a, \mathbf{q}_y^T]^T = [\theta_l, \theta_y, \theta_s, x_h, y_h] \quad (2.48)$$

$$\bar{M} := \begin{bmatrix} D_a^T M_a D_a & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & D_y^T M_y D_y \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

$$\bar{h} := \begin{bmatrix} D_a^T (\mathbf{h}_a - M_a \dot{D}_a \dot{q}_a) \\ D_y^T (\mathbf{h}_y - M_y \dot{D}_y \dot{q}_y) \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

ヨーヨーとアームを連結させる拘束は、それぞれの運動方程式で定義された手先位置が一致するという条件となる。したがって、(2.51) のような拘束条件が成り立つ。

$$\begin{cases} x_h = x_f = l_f \cos \theta_l \\ y_h = y_f = l_f \sin \theta_l \end{cases} \quad (2.51)$$

この拘束条件 (2.51) より、拘束行列 \bar{C} を前述の手順で求めると、

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} l_f S_l & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -l_f C_l & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

となる。ここで、拘束後の独立な速度ベクトル $\dot{\bar{q}}$ を、

$$\dot{\bar{q}} = [\dot{\theta}_l, \dot{\theta}_y, \dot{\theta}_s]^T \quad (2.53)$$

と選ぶと、直交補行列 \bar{D} は、前述の手順より、

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -l_f S_l & 0 & 0 \\ l_f C_l & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

となる。結局、ヨーヨーとアームを統合した運動方程式は (2.55) のように表される。

$$\bar{D}^T \bar{M} \bar{D} \ddot{\bar{q}} + \bar{D}^T \bar{M} \dot{\bar{D}} \dot{\bar{q}} = \bar{D}^T \bar{h} \quad (2.55)$$

2.3 パラメータ同定

導出したヨーヨーとアームモデルの物理パラメータには計測により決定することが困難なものが含まれているため、それらのパラメータを同定により決定する。

2.3.1 ヨーヨーモデルのパラメータ同定

ヨーヨーモデルの物理パラメータは、ヨーヨー本体の質量 m_y 、軸の最小半径 r_0 、紐の最大長 l_0 が計測により求まる。さらに、紐の有効径 k_r は、紐の最大長 l_0 、軸の最小半径 r_0 、軸に紐を巻いたときの最大巻き数 $\theta_{max} = 1.34 \times 10^2$ rad から、以下の計算により求めることができる。

$$k_r = \frac{2(l_0 - r_0(\theta_{max} - \pi/2))}{(\theta_{max} - \pi/2)^2} \quad (2.56)$$

そこで、市販のヨーヨーにおいて計測や計算によって求めることが困難なヨーヨーと紐の慣性モーメント I_y , I_s 、ヨーヨーの粘性摩擦係数 c_y 、紐の粘性摩擦 c_s を未知の物理パラメータとして、それぞれ、紐の伸縮ありとなしのモデルに対して同定により求める。それに加え、紐のバネ、ダンパ係数 d_s , k_s を紐の伸縮ありのモデルに対して同定する。なお、接続点の質量 m_s は仮想的なものなので、任意の微小な値を与えるものとし、手先の質量 m_h は1リンクアームの手先質量との兼ね合いから、任意の値を与える。

提案したヨーヨーモデルは手先に入力を加えないと手先とヨーヨーと一緒に落下してしまう。そこで、手先を初期位置で保持させるための制御系を設計し、手先を固定してヨーヨーを自由落下させるシミュレーションを行う。そして、実際に計測したヨーヨー挙動とシミュレーションにより得られたヨーヨー挙動を比較することにより、未知の物理パラメータを求める。

手先保持のための制御系設計

ヨーヨーモデルの手先を初期位置で保持させるため、手先を目標軌道に追従させる制御系を設計する。手先の目標軌道 (q_{x_h}, q_{y_h}) と現在値 (x_h, y_h) の差分を $\mathbf{e} = [q_{x_h} - x_h, q_{y_h} - y_h]^T$ 、手先への入力を $\mathbf{u} = [F_x, F_y]^T$ として、(2.57) のような誤差システムを構築する。

$$\dot{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{e}} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{u}, \quad \tilde{\mathbf{e}} := \begin{bmatrix} \int \mathbf{e} dt \\ \mathbf{e} \\ \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

このシステムに対し、(2.58) の評価関数を最小化するフィードバックゲイン \mathbf{F} を導出する。

$$J = \int_0^{\infty} (\tilde{\mathbf{e}}^T \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{e}} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (2.58)$$

表 2.7 ヨーヨーパラメータ同定結果（紐の伸縮あり）

I_y [kgm ²]	1.56×10^{-5}
I_s [kgm ²]	3.44×10^{-4}
c_y [Ns/rad]	1.91×10^{-4}
c_s [Nms/rad]	7.59×10^{-3}
k_s [N/m]	1.00×10^3
d_s [Ns/m]	6.08

ただし、 Q 、 R は重み行列である。ここで、 F は (2.59) のリカッチ方程式の正定対称解 P を用いて (2.60) のように与えられる。

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (2.59)$$

$$F = R^{-1}B^T P \quad (2.60)$$

この F を用いて u を (2.61) とする。

$$u = F\tilde{e} \quad (2.61)$$

これにより、手先を初期位置で保持させることができる。

評価関数

実際に計測した挙動とシミュレーションにより得られた挙動を比較するために、(2.62) のような評価関数 J_{yid} を定義する。

$$J_{yid} = \sum_{k=0}^N \left(R_x (x_k(\boldsymbol{\theta}_{yid}) - \hat{x}_k(\boldsymbol{\theta}_{yid}))^2 + R_y (y_k(\boldsymbol{\theta}_{yid}) - \hat{y}_k(\boldsymbol{\theta}_{yid}))^2 \right) \quad (2.62)$$

ここで、 $\{(x_k(\boldsymbol{\theta}_{yid}), y_k(\boldsymbol{\theta}_{yid})) : k = 0, 1, \dots, N\}$ は計測により得られたヨーヨーの重心座標のデータ、 $\{(\hat{x}_k(\boldsymbol{\theta}_{yid}), \hat{y}_k(\boldsymbol{\theta}_{yid})) : k = 0, 1, \dots, N\}$ はシミュレーションにより得られたデータである。 $\boldsymbol{\theta}_{yid}$ は未知パラメータであり、紐の伸縮ありのモデルに対しては、 $\boldsymbol{\theta}_{yid} = [I_y, I_s, c_y, c_s, k_s, d_s]$ 、伸縮なしのモデルに対しては、 $\boldsymbol{\theta}_{yid} = [I_y, I_s, c_y, c_s]$ と定義する。 R_x 、 R_y は重み係数である。紐の伸縮ありモデルの同定時は、 $R_x = 1.00$ 、 $R_y = 1.00$ とし、水平方向と垂直方向のデータを同じ重みで利用する。紐の伸縮なしモデルの同定時は、 $R_x = 0.00$ 、 $R_y = 1.00$ として、垂直方向のデータのみを用いる。この評価関数 J_{yid} が最小となるように未知パラメータ $\boldsymbol{\theta}_{yid}$ を決定する。このとき、実測値には、図 2.4、図 2.5 の自由落下開始からひねり回転が発生するまでのデータを用いる。

同定結果

ヨーヨーのパラメータ同定結果は、表 2.7、表 2.8 となる。表 2.7 は紐の伸縮ありのモデルに対するパラメータ、表 2.8 は伸縮なしのモデルに対するパラメータである。

表 2.8 ヨーヨーパラメータ同定結果（紐の伸縮なし）

I_y [kgm ²]	4.04×10^{-6}
I_s [kgm ²]	1.52×10^{-6}
c_y [Ns/rad]	5.52×10^{-5}
c_s [Nms/rad]	1.87×10^{-5}

2.3.2 アームモデルのパラメータ同定

1 リンクアームモデルの物理パラメータは、リンク、ウェイト、手先の質量 m_l , m_w , m_f と、関節から各部重心までの長さ l_l , l_w , l_f を計測により求めることができる。このことから、リンクの慣性モーメント I_l , 粘性摩擦 c_l , 乾性摩擦 f_{lp} , f_{lm} を未知パラメータとし、同定により求める。

評価関数

(2.63) のような評価関数 J_{aid} を定義する。

$$J_{aid} = \sum_{k=0}^N \left(\theta_k(\boldsymbol{\theta}_{aid}) - \hat{\theta}_k(\boldsymbol{\theta}_{aid}) \right)^2 \quad (2.63)$$

ここで、 $\{\theta_k(\boldsymbol{\theta}_{aid}) : k = 0, 1, \dots, N\}$, $\{\hat{\theta}_k(\boldsymbol{\theta}_{aid}) : k = 0, 1, \dots, N\}$ は、それぞれ、計測、シミュレーションにより得られたデータであり、入力としてトルクの M 系列信号を与えたときの関節角度の実測値とシミュレーション値を利用する。 $\boldsymbol{\theta}_{aid}$ は未知パラメータであり、 $\boldsymbol{\theta}_{aid} = [I_l, c_l, f_{lp}, f_{lm}]$ である。

同定結果

アームのパラメータ同定結果は、表 2.9 となる。

2.4 提案モデル・同定パラメータの有効性検証

提案モデルと同定パラメータの有効性を検証するために、それぞれ、ヨーヨーの自由落下のシミュレーション、M 系列信号を入力したときの関節挙動のシミュレーションを行い、計測データと比較する。

表 2.9 アームパラメータ同定結果

I_l [kgm ²]	7.71×10^{-7}
c_l [Nms/rad]	1.22×10^{-2}
f_{lp} [Nm]	6.30×10^{-2}
f_{lm} [Nm]	4.99×10^{-2}

2.4.1 ヨーヨーの自由落下シミュレーション

提案モデルを用いたヨーヨーの自由落下シミュレーションを行い、計測した自由落下の挙動、水平方向への移動と軸径の変化を考慮していない従来モデルを用いたシミュレーション挙動と比較する。

手先を初期位置 $(x_h, y_h) = (0.00, 0.00)$ に固定してヨーヨーを自由落下させる。このとき、ヨーヨーの初期回転角を $\theta_y = \theta_{max} = 1.34 \times 10^2$ rad, 紐の初期角度を $\theta_s = -1.13 \times 10^{-1}$ rad, 手先と接続点の距離を $r_s = 0.00$ m とする。ヨーヨーのシミュレーションパラメータには、表 2.7, 表 2.8 の同定パラメータと、表 2.10 の計測により決定されたパラメータを用いる。ただし、手先と接続点の質量 m_h, m_s は、任意の値として $m_h = 1.00$ kg, $m_s = 1.00 \times 10^{-6}$ kg とする。また、重力加速度は $g = 9.81$ m/s² とする。

シミュレーション結果を図 2.10 から図 2.13 に示す。図 2.10, 図 2.11 はヨーヨーの位置, 図 2.12, 図 2.13 はヨーヨーの回転角と角速度である。ただし、従来モデルでは水平方向の挙動を考慮しておらず、ヨーヨーの回転角, 角速度は計測データが取得できていないため、それらの軌跡は示されていない。

図 2.10 のように、従来モデルを用いたシミュレーションの軌跡は各バウンドの前後で実際の軌跡と差が生まれているが、提案モデルを用いたシミュレーションの軌跡は実際の軌跡と近いものになっている。さらに、提案モデルを用いた場合のバウンドのタイミングが、実際のタイミングと合っていることから、水平方向への移動と軸径の変化を考慮することにより、従来モデルよりも正確にヨーヨーのバウンドの周期を捉えられていると考える。ここで、バウンド前後の Y 軸方向の軌跡を拡大すると、図 2.14 のように、紐の伸縮を考慮したモデルを用いたシミュレーションでは、バウンド直後の紐の弛みによる軌跡の変化を再現できていることがわかる。

図 2.11 のように、X 軸方向の軌跡は紐の伸縮あり, なしのモデルとも計測データに近いものとなっている。伸縮なしのモデルのシミュレーションの軌跡は、伸縮ありのモデルの軌跡よりも計測データの軌跡との最大誤差が小さくなっているが、挙動の特徴は伸縮ありのモデルのほうがよく表しているといえる。

図 2.12, 図 2.13 のように、従来モデルと提案モデルでは、ヨーヨーの回転角と角速度に大きな差が発生している。回転角の差は最大で 1.28×10^2 rad, 角速度の差は最大で 2.59×10^2 rad/s となる。提案モデルでは軸径の変化を紐の最大巻き数から導出される紐の有効径を利用して計算し

表 2.10 ヨーヨーの計測パラメータ。

m_y	[kg]	5.46×10^{-2}
l_0	[m]	1.05
r_0	[m]	4.00×10^{-3}
k_r	[m]	5.85×10^{-5}

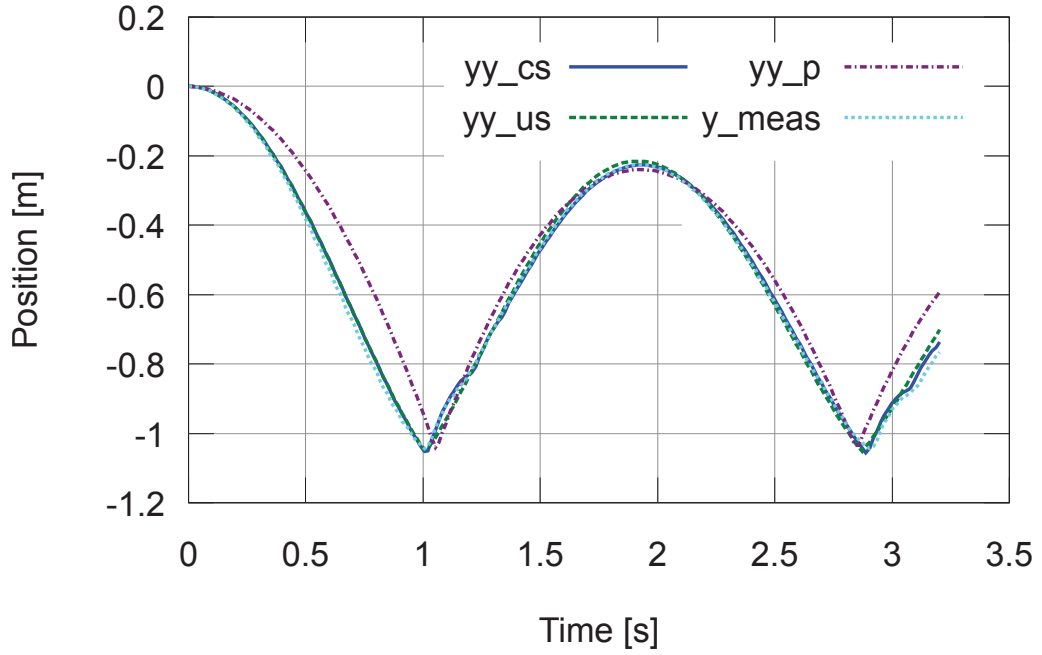


図 2.10: 提案モデル, 従来モデル, 計測データの Y 軸方向の位置 (yy_cs: 伸縮ありモデル, yy_us: 伸縮なしモデル, yy_p: 従来モデル, y_meas: 計測データ). シミュレーションの軌跡は実際の軌跡と近いものとなっている. 提案モデルを用いた場合のバウンドのタイミングが, 実際のタイミングと合っていることから, 従来モデルよりも正確にヨーヨーのバウンドの周期を捉えられていると考える.

ているため, 提案モデルの回転角は従来モデルと比較して実際の回転角に近いものになっている. 同様に, 角速度も提案モデルのほうが従来モデルよりも実際の角速度に近いものになっていると考えられる. ヨーヨーの角速度は, 人間がヨーヨーを行う場合に, 紐に加える力の大きさを決定するための判断材料として利用され, ヨーヨーの制御周期にも影響する. そのため, 軸径の変化を考慮し, ヨーヨーの回転角と角速度を正確に把握することが重要であると言える.

計測値とシミュレーション値の平均 2 乗誤差 y_{rms} と適合率 y_{fit} を (2.64), (2.65) より求める.

$$y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2} \quad (2.64)$$

$$y_{fit} = \left(1 - \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (y_k - \bar{y})^2}} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.65)$$

ただし, \bar{y} は実測値の平均値である. (2.64), (2.65) より, 紐の伸縮ありモデルの場合, X 軸方向の平均 2 乗誤差は 1.98×10^{-3} , 適合率は 81.8 % となり, Y 軸方向の平均 2 乗誤差は 1.42×10^{-2} , 適合率は 95.4 % となる. 紐の伸縮なしモデルの場合, X 軸方向の平均 2 乗誤差は 2.00×10^{-3} , 適合率は 81.6 % となり, Y 軸方向の平均 2 乗誤差は 1.96×10^{-2} , 適合率は 93.7 % となる. これらの適合率より, 紐の伸縮を考慮することで, Y 軸方向については伸縮なしよりも実際のヨーヨー

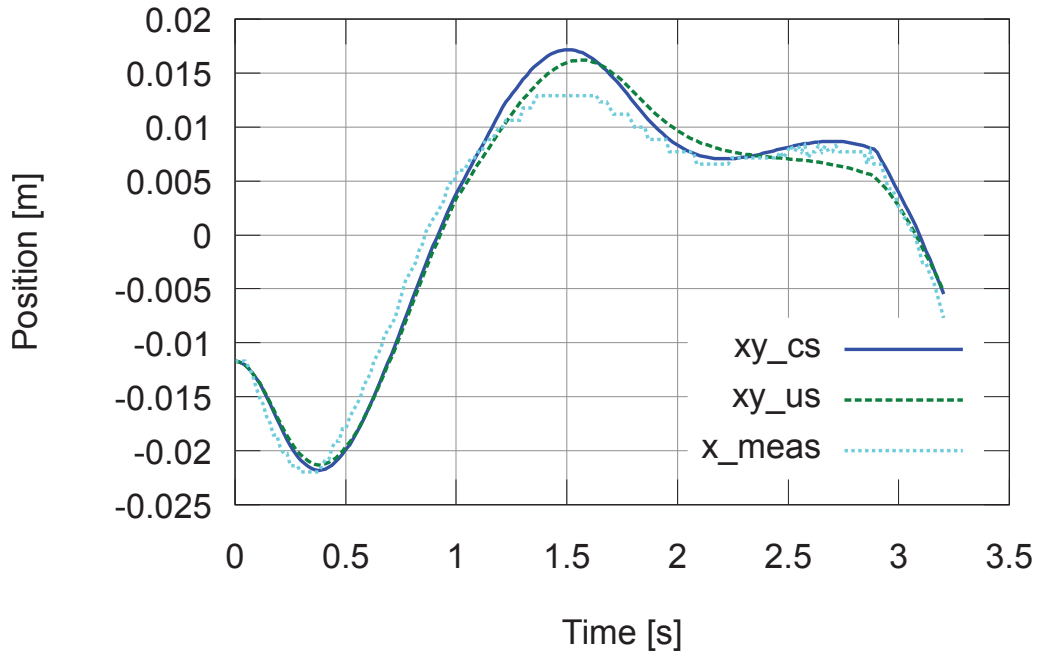


図 2.11: 提案モデル, 計測データの X 軸方向の位置 (xy_cs: 伸縮ありモデル, xy_us: 伸縮なしモデル, x_meas: 計測データ). 伸縮なしのモデルのシミュレーションの軌跡は, 伸縮ありのモデルの軌跡よりも計測データの軌跡との最大誤差が小さくなっているが, 挙動の特徴は伸縮ありのモデルのほうがよく表しているといえる.

挙動に近いものが得られ, X 軸方向についても同程度の挙動を得られることがわかる.

また, 従来モデルの場合, Y 軸方向の平均 2 乗誤差は 9.41×10^{-2} , 適合率は 69.5 % となる. このことから, 水平方向への移動と軸径の変化を考慮することで, 適合率を上げられることがわかる.

以上の結果から, 提案したモデルが, 実際のヨーヨー挙動の再現に有効であることが証明できた.

2.4.2 M 系列信号入力時の関節挙動シミュレーション

M 系列信号を入力したときの関節挙動のシミュレーションを行い, 計測した挙動と比較する.

リンクの回転角を $\theta_l = 0.00 \text{ rad}$ とし, M 系列信号を入力して動作を開始させる. 1 リンクアームのシミュレーションパラメータには, 表 2.9 の同定パラメータと, 表 2.11 の計測パラメータを用いる. 重力加速度は $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ とする.

シミュレーション結果を図 2.15 に示す. 図 2.15 はリンクの回転角である.

図 2.15 のように, リンクの回転角の軌跡は小刻みに変化する部分を除いて, 計測データに近いものとなった. このときの平均 2 乗誤差は 19.8, 適合率は 73.6 % となる. 1 リンクアームの大まかな挙動が捉えられていることから, 提案モデルは実際のアーム挙動の再現に有効であると考えられる.

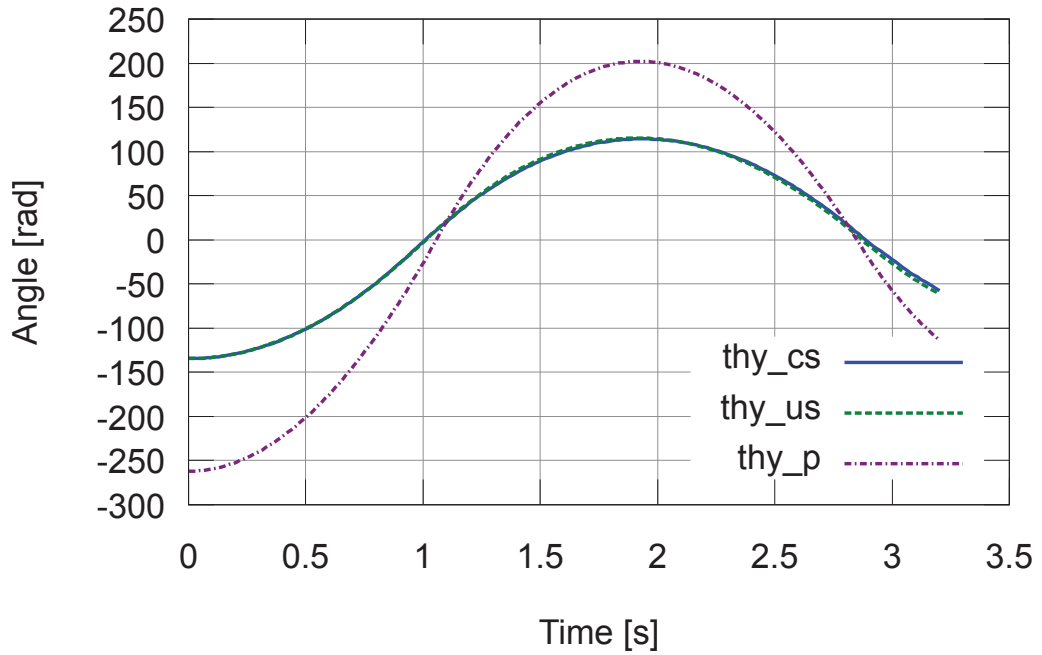


図 2.12: 提案モデル, 従来モデルのヨーヨー回転角 (thy_cs: 伸縮ありモデル, thy_us: 伸縮なしモデル, thy_p: 従来モデル). 従来モデルのほうが振幅が大きく, 回転角の差は最大で 1.28×10^2 rad となる.

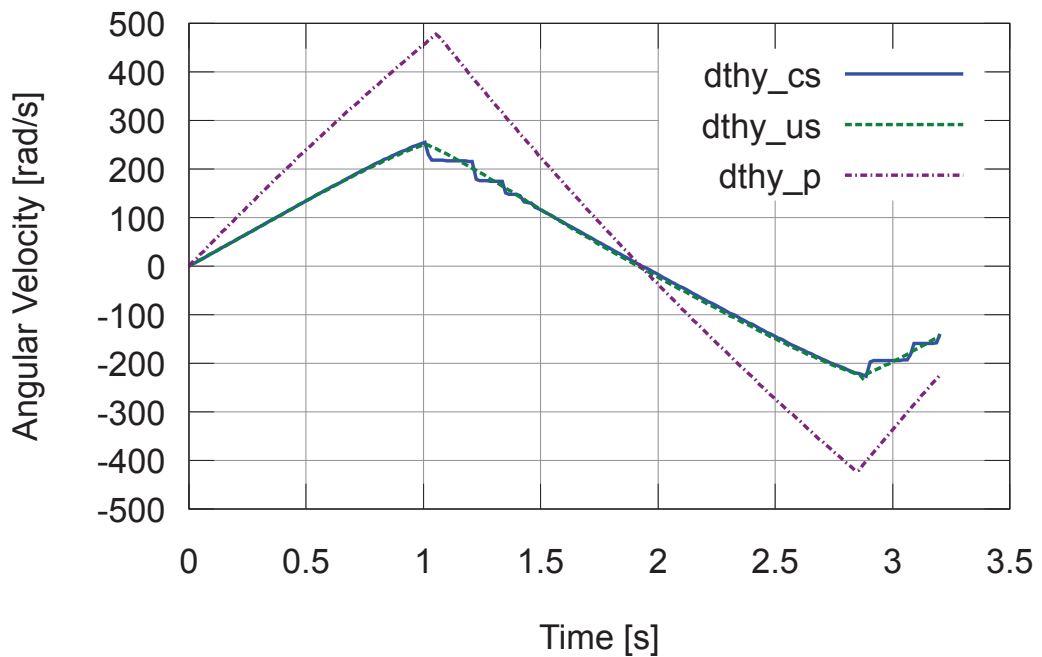


図 2.13: 提案モデル, 従来モデルのヨーヨー角速度 (dthy_cs: 伸縮ありモデル, dthy_us: 伸縮なしモデル, dthy_p: 従来モデル). 従来モデルのほうが振幅が大きく, 角速度の差は最大で 2.59×10^2 rad/s となる.

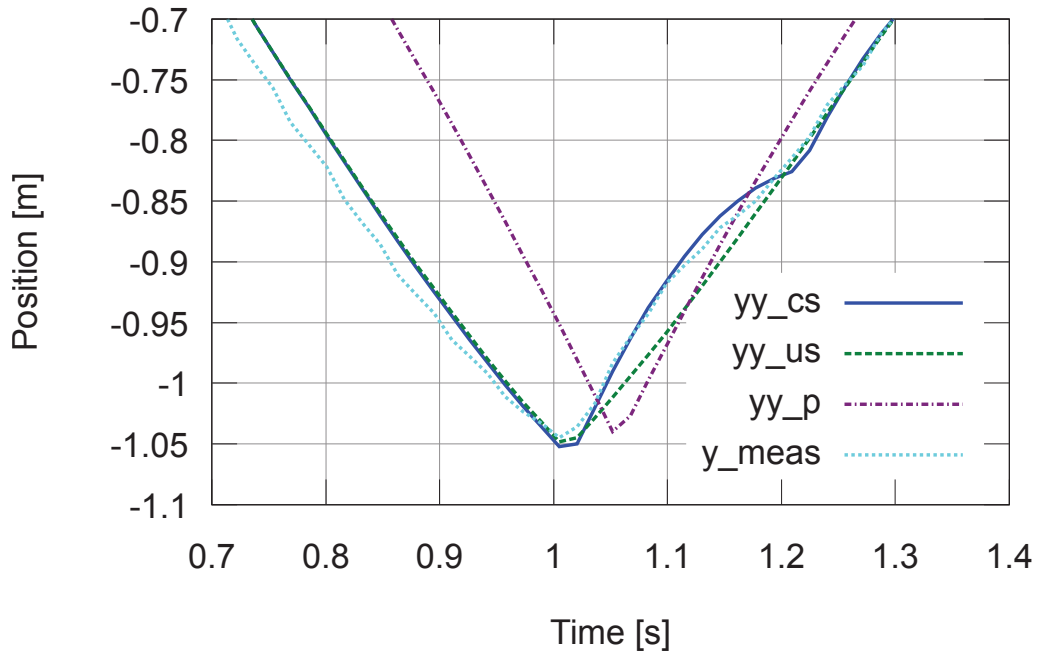


図 2.14: Y 軸方向位置の拡大図 (yy_cs: 伸縮ありモデル, yy_us: 伸縮なしモデル, yy_p: 従来モデル, y_meas: 計測データ). 紐の伸縮を考慮したモデルを用いたシミュレーションでは, バウンド直後の紐の弛みによる軌跡の変化を再現できている.

2.5 エネルギー補償制御系の設計

グラビティ・プルにおいて, ヨーヨーのエネルギーは円盤と紐との摩擦や最下点での衝突によって失われる. そのため, 持続的なグラビティ・プルを実現するためには, そのエネルギー損失を補償し, ヨーヨーの運動を一定のリミットサイクルに収束させることが必要となる. そこで, エネルギー損失を補償する制御系を設計する [36, 37]. 具体的には, 1 リンクアームの運動方程式を線形化し, ヨーヨーと線形化したアームの統合モデルを用いて, 最下点に達した時のヨーヨーの運動エネルギーを目標エネルギーに到達させるような 1 リンクアームの関節トルクを導出する. このとき, アーム, ヨーヨー, 紐の回転角と角速度は取得できるものとし, Žlajpah の研究 [30, 31]

表 2.11 1 リンクアームの計測パラメータ.

m_l	[kg]	1.13×10^{-1}
m_w	[kg]	7.58×10^{-1}
m_f	[kg]	5.36×10^{-1}
l_l	[m]	2.10×10^{-2}
l_w	[m]	1.79×10^{-1}
l_f	[m]	2.60×10^{-1}

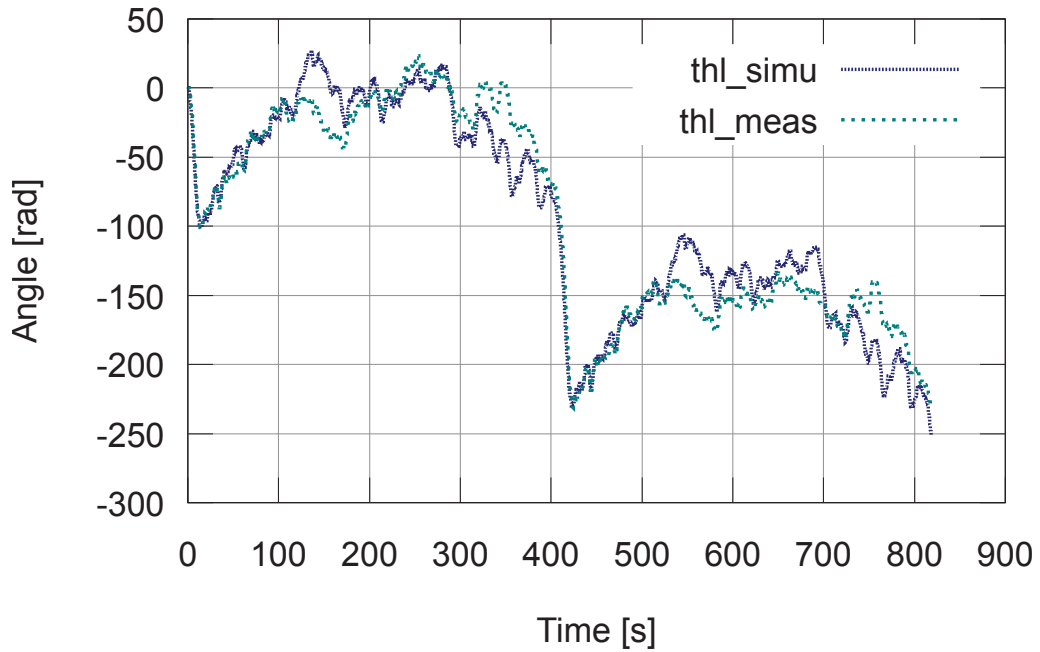


図 2.15: 提案モデル, 計測データのリンク回転角 (thl_simu: 提案モデル, thl_meas: 計測データ). リンクが小刻みに動く部分では, シミュレーションと計測した挙動の差が大きくなっているが, 1 リンクアームの大まかな挙動は捉えられている.

より, ヨーヨー引上げ動作はヨーヨーの最下点到達直前, すなわちヨーヨー下降中に行うものとする.

2.5.1 1 リンクアームの線形化

関節トルクの導出を容易にするために, 1 リンクアームの運動方程式を線形化し, ヨーヨーと線形化したアームの統合モデルを構築する. アームの運動方程式 (2.46) に対し, u_q を新たな入力として, (2.66) のような非線形フィードバックを考える.

$$M(q_a)u_q + N(\dot{q}_a, q_a) = \tau \quad (2.66)$$

これを (2.46) に代入すると, 1 リンクアームの運動方程式は (2.67) のように線形化できる.

$$\ddot{q}_a = u_q \quad (2.67)$$

線形化された 1 リンクアームの運動方程式 (2.67) をヨーヨーの運動方程式 (2.22) と統合すると,

一般化質量行列 \bar{M} と一般化力ベクトル \bar{h} のみが、以下のように変更される。

$$\bar{M} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & D_y^T M_y D_y \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

$$\bar{h} = \begin{bmatrix} u_q \\ D_y^T (h_y - M_y \dot{D}_y \dot{q}_y) \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

これらを利用して、ヨーヨーと線形化したアームを統合した運動方程式は (2.55) により求められる。

2.5.2 エネルギー補償制御

ヨーヨーの運動エネルギー K_y を

$$K_y = \frac{1}{2} I_y \dot{\theta}_y^2, \quad (2.70)$$

と定義する。式 (2.70) は、エネルギーが保存されていれば、最下点で最大となり、ヨーヨーの振幅は一定に保たれる。しかし、ヨーヨーの運動エネルギーは円盤と紐との摩擦や最下点での衝突によって失われる。そこで、グラビティ・プルが達成されているときの最下点でのヨーヨーの運動エネルギー E_{ky} を目標エネルギーとし、最下点において $K_y = E_{ky}$ を満たすことを考える。

ヨーヨーのエネルギー状態を表す関数 V_y を

$$V_y = \frac{1}{2} (K_y - E_{ky})^2, \quad \dot{V}_y = (K_y - E_{ky}) \dot{K}_y \quad (2.71)$$

と定義する。式 (2.71) は明らかに $V_y > 0$ であり、 $K_y = E_{ky}$ においては $V_y = 0$ を満たす。 $\dot{V}_y < 0$ ならば $V_y \rightarrow 0$ となり、 $K_y \rightarrow E_{ky}$ が満たされる。したがって、ヨーヨー下降中に $\dot{V}_y < 0$ となるような入力を与えれば、 $K_y \rightarrow E_{ky}$ が満たされ、グラビティ・プルが達成される。ここで、入力を与えられるのはヨーヨーの下降中のみなので、線形化されたアームの運動方程式と紐の伸縮なしのヨーヨーモデルにおける上下運動フェーズの運動方程式を統合したものを考えると、 $\ddot{\theta}_y$ についての運動方程式は、

$$\ddot{\theta}_y = -\frac{X_y}{Y_y} \quad (2.72)$$

$$X_y := m_y l_f R_y C_l \text{sgn} \theta_y u_q$$

$$+ m_y l_f R_y C_l \text{sgn} \theta_y \left((m_h + m_y) l_f^2 C_l S_l \dot{\theta}_l^2 - m_y l_f k_r C_l \dot{\theta}_y^2 - (m_h + m_y) l_f g C_l \right) \\ - \left((m_h + m_y) l_f^2 C_l^2 + 1 \right) \left(m_y l_f R_y S_l \text{sgn} \theta_y \dot{\theta}_l^2 - m_y k_r R_y \text{sgn} \theta_y \dot{\theta}_y^2 - c_y R_y \dot{\theta}_y - m_y R_y g \text{sgn} \theta_y \right)$$

$$Y_y := \left(m_h l_f^2 C_l^2 + 1 \right) \left(I_y + m_y k_r^2 + m_y R_y^2 \right) + m_y l_f^2 C_l^2 \left(I_y + m_y k_r^2 \right)$$

と求まる。ここで、 $R_y(\theta)$ を R_y 、 $\cos \theta_l$ を C_l 、 $\sin \theta_l$ を S_l と省略している。ただし、手先の水平方向への移動、紐の回転は無視し、接続点の質量 m_s は微小なので 0 としている。(2.70), (2.71), (2.72) より、エネルギー状態関数の時間微分 \dot{V}_y は、

$$\dot{V}_y = -\frac{(K_y - E_{ky}) I_y}{Y_y} X_y \dot{\theta}_y < 0 \quad (2.73)$$

となる。入力は紐を引く、つまりエネルギーを増加させることしかできないので、もし $K_y - E_{ky} \geq 0$ 、すなわち $K_y \geq E_{ky}$ ならば、 $u_q = 0$ とする。 $K_y - E_{ky} < 0$ 、すなわち $K_y < E_{ky}$ ならば、 $-(K_y - E_{ky})I_y/Y_y > 0$ なので、

$$\dot{V}_y = X_y \dot{\theta}_y < 0 \quad (2.74)$$

となる。ここで、ヨーヨー下降中は $\dot{\theta}_y \text{sgn} \theta_y = -|\dot{\theta}_y|$ が成立する。また、関節の可動域を $-\pi/2 < \theta_l < \pi/2$ に限定すると、常に $\cos \theta_l > 0$ となるので、(2.74) を計算すると、

$$u_q > Z_y \quad (2.75)$$

$$Z_y := \tan \theta_l \dot{\theta}_l^2 - k_r \left(m_h l_f \cos \theta_l + \frac{1}{l_f \cos \theta_l} \right) \dot{\theta}_y^2 + \frac{c_y \left((m_h + m_y) l_f^2 \cos^2 \theta_l + 1 \right)}{m_y l_f \cos \theta_l} |\dot{\theta}_y| - \frac{g}{l_f \cos \theta_l}$$

が成り立つ。

式(2.75)を満たすように入力を決定する。ヨーヨー引上げ動作を行える区間は、ヨーヨー下降中に限定されるため、その区間中に限りなく $V_y = 0$ が達成される必要がある。そこで、(2.75) より入力 u_q を、

$$u_q = \begin{cases} \zeta |Z_y| & (K_y - E_{ky} < 0) \\ 0 & (K_y - E_{ky} \geq 0) \end{cases} \quad (2.76)$$

と定義する。ただし、 ζ は入力のゲインで、 $1 < \zeta < \infty$ である。ここで、 ζ の値を決定するために、最下点到達時のエネルギー状態関数 V_y のポアンカレ写像 $\xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k, \dots\}$ を考える。ただし、 ξ_k は最下点到達時刻 t_k におけるエネルギー状態関数 V_y である。このポアンカレ写像が 0 に収束すれば制御目標は達成される。ポアンカレ写像を 0 に収束させるゲイン ζ を、

$$\zeta = \zeta_0 + \sum_{k=1}^N \left(\kappa_p \Delta \xi_k + \kappa_i \sum_{n=1}^k \Delta \xi_n + \kappa_d \frac{\Delta \xi_k - \Delta \xi_{k-1}}{\Delta t_k} \right) \quad (2.77)$$

とする。ただし、 $\Delta \xi_k = \xi_k - \xi_*$ であり、 $\xi_* = 0$ は目標とするエネルギー状態関数 V である。また、 $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ である。 ζ_0 、 κ_p 、 κ_i 、 κ_d は調整パラメータで、正の定数である。最終的に、1 リンクアームの関節トルク τ_l は、(2.76) を (2.66) に代入することにより導出される。

2.6 グラビティ・プルのシミュレーション

制御系の有効性を検証するために、グラビティ・プルのシミュレーションを行う。初期状態を、1 リンクアームの関節角度 $\theta_l = 0.00$ rad、ヨーヨーの回転角 $\theta_y = -1.35 \times 10^2$ rad、紐の回転角 $\theta_s = 0.00$ rad、手先と接続点の距離 $r_c = 0.00$ m として、ヨーヨーを自由落下させて操作を開始する。このとき、ヨーヨー引上げ動作は、ヨーヨー下降時に紐の長さが $15l_0/16$ 以上になったときから開始する。

シミュレーションのプラントには紐の伸縮ありのヨーヨーモデルと1リンクアームを統合したものを利用する。制御系には、提案したエネルギー補償制御系のほかに、ヨーヨー引上げ動作時以外で、引き上げた手先を初期位置に引き戻して保持するために、パラメータ同定時に利用したエラーシステムを用いた位置制御系を併用する。ただし、この位置制御系はエネルギー補償制御系が作動しているとき以外に作動するものとする。

ヨーヨーとアームのシミュレーションパラメータには、表 2.7, 表 2.8, 表 2.9, 表 2.10, 表 2.11 に示されるものを用いる。ただし、ヨーヨーモデルにおける手先と接続点の質量 m_h , m_s は、任意の値として $m_h = 1.00 \times 10^{-3}$ kg, $m_s = 1.00 \times 10^{-6}$ kg とする。重力加速度は $g = 9.81$ m/s² とする。ここで、表 2.7 のパラメータはプラントで、表 2.8 のパラメータは制御系で用いられる。

コントローラのパラメータには、表 2.12 に示されるものを用いる。ここで、ヨーヨーの目標エネルギー E_{ky} はヨーヨーの位置エネルギーをもとに、ヨーヨーの最大高さが手先より低くなるように決定する。

シミュレーション結果を図 2.16 から図 2.22 に示す。図 2.16 はヨーヨーと紐の回転角、図 2.17, 図 2.18 はヨーヨーと手先の位置、図 2.19 はアームの関節の回転角、図 2.20 はエネルギー補償制御による関節トルク、図 2.21 はヨーヨーの運動エネルギーと目標エネルギーの差、図 2.22 はエネルギー状態関数の値である。

図 2.16, 図 2.17 より、ヨーヨーが継続的に回転しながら、周期的な上下運動を行っていることが確認できる。このとき、図 2.18 のように、ヨーヨーの周期的な上下運動に伴い、水平方向の揺れも周期的な軌道へと収束していることがわかる。これらのことから、持続的なグラビティ・プルを実現できているといえる。

アームの関節は、図 2.19 のように、制御系設計時に定義した可動域の範囲内で動いていることが確認できる。このとき、図 2.20 より、ヨーヨーが最下点に達する直前に、正の値の関節トルクが入力されていることが確認できる。この入力により、図 2.21 のように、ヨーヨーが最下点に達した時のヨーヨーの運動エネルギーと目標エネルギーの差が 0 以上になっていることが確認できる。このことから、エネルギー補償制御により正しくエネルギーの回復が行われていることがわかる。また、このときのエネルギー状態関数の値は、図 2.22 のように、一定の値に収束しているが、目標値の 0 には到達していない。これは、ヨーヨーの運動エネルギーが過剰に回復されていることが原因であると考えられる。しかし、ここではヨーヨーの目標エネルギーを、手先を基準とし

表 2.12 グラビティ・プルのコントローラパラメータ

E_{ky}	4.51×10^{-1}
ζ_0	2.00
κ_p	2.00
κ_i	1.00
κ_d	1.00

たヨーヨーの最大位置エネルギーより小さな値に設定してあり、また目標値との差が 1.00×10^{-4} 以下の値となっているため、持続的な重力・プルへの影響は少ないと考える。以上の結果より、提案したエネルギー補償制御系は持続的な重力・プルを実現するのに有効であるといえる。

2.7 まとめ

本章では、重力・プルと呼ばれるヨーヨーの上下運動を繰り返す操作を 1 リンクアームで実現するための制御アプローチを示した。まず、ヨーヨーとアームの相互干渉を捉えるために、ヨーヨー、アームそれぞれのモデルを構築し、それらをサブシステムとしてヨーヨーとアームが統合されたモデルを構築した。これらのモデルの物理パラメータは計測と同定により決定した。次に、1 リンクアームの運動方程式を線形化し、ヨーヨーと線形化したアームの統合モデルを用いて、ヨーヨーの円盤と紐との摩擦や最下点での衝突によって失われたエネルギーを補償する制御系を設計した。最後に、設計した制御系を用いて、重力・プルのシミュレーションを行った。その結果、1 リンクアームによるヨーヨーの引上げ動作でヨーヨーのエネルギーが回復され、ヨーヨーの回転と上下運動が周期的な軌道に収束することが確認できた。結論として、提案したエネルギー補償制御系は持続的な重力・プルを実現するのに有効であるといえる。

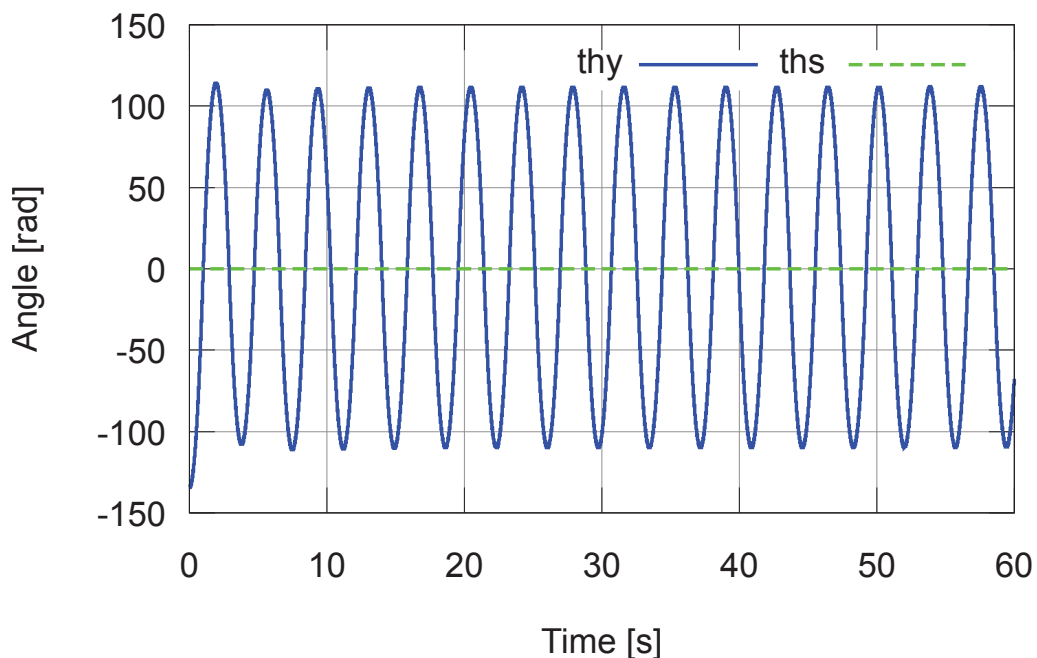


図 2.16: ヨーヨーと紐の回転角 (thy: ヨーヨー, ths:紐)。ヨーヨーの回転は、0 を中心とした振幅が一定の軌跡へと収束している。

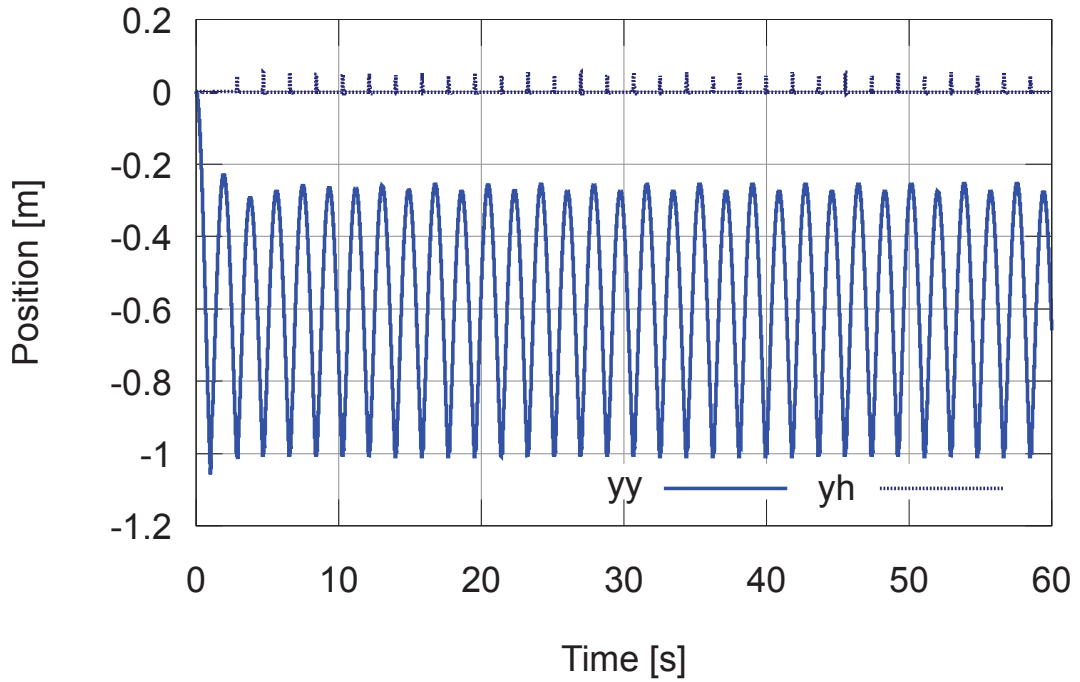


図 2.17: ヨーヨーと手先の Y 軸方向位置 (yy: ヨーヨー, yh: 手先). ヨーヨーは手先から一定の距離を保ったまま, 周期的な上下運動を行っている.

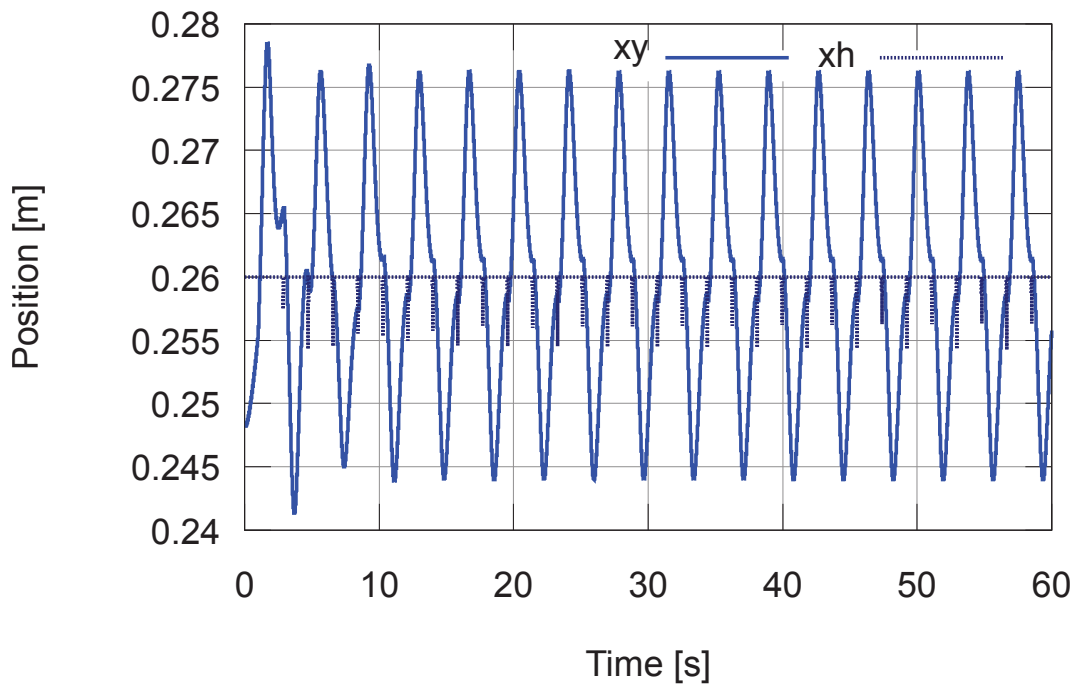


図 2.18: ヨーヨーと手先の X 軸方向位置 (xy: ヨーヨー, xh: 手先). ヨーヨーの周期的な上下運動に伴い, 水平方向の揺れも周期的な軌道へと収束している.

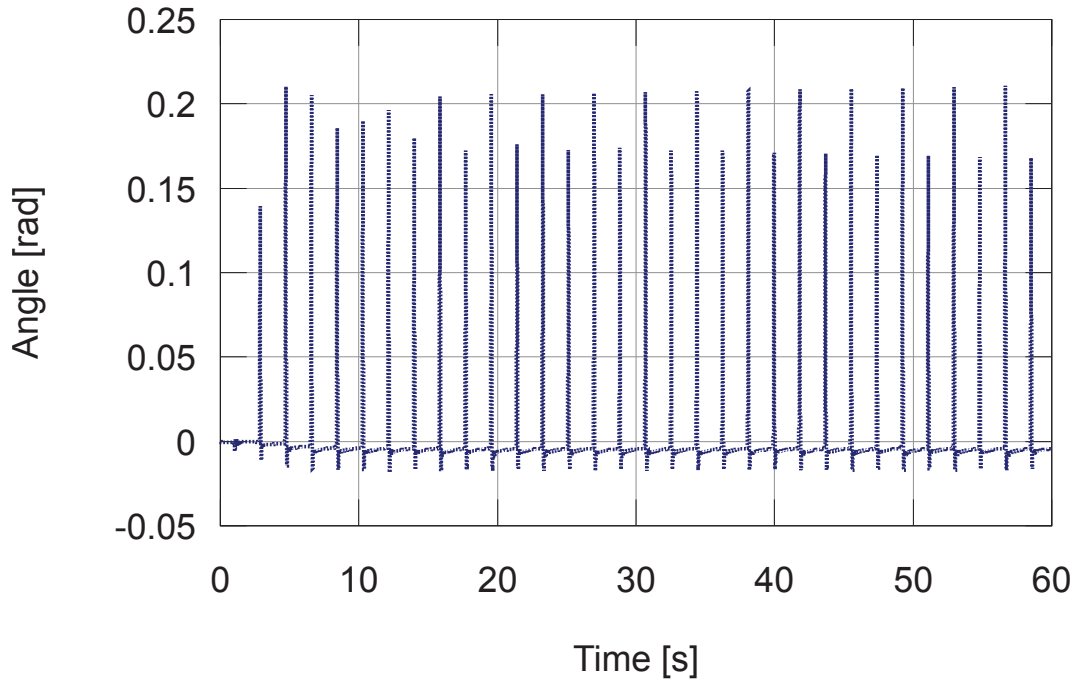


図 2.19: アーム関節の回転角. アームの関節は, 制御系設計時に定義した可動域の範囲内で動いている.

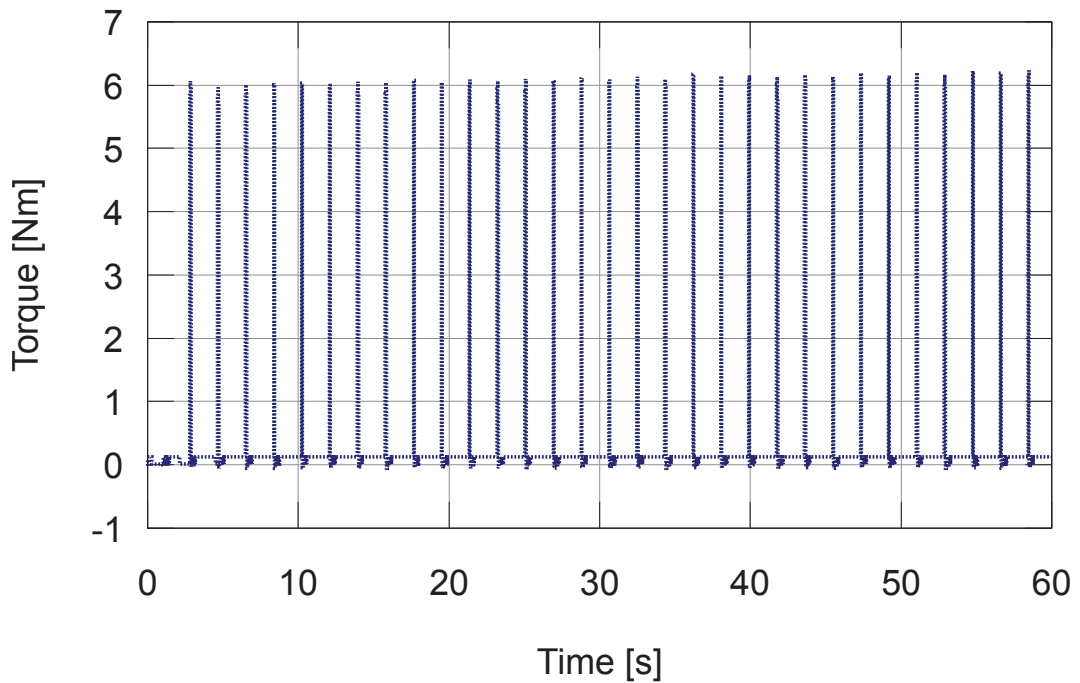


図 2.20: エネルギー補償制御による関節トルク. ヨーヨーが最下点に達する直前に, 正の関節トルクが入力されている.

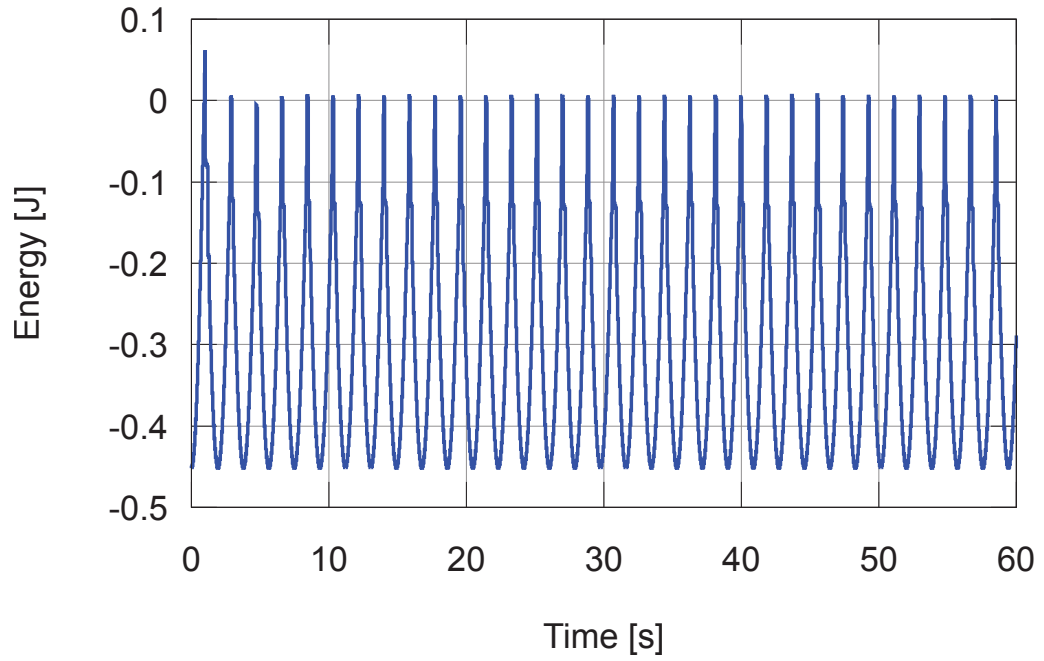


図 2.21: ヨーヨーの運動エネルギーと目標エネルギーの差. アームによるヨーヨー引き上げ動作によって, ヨーヨーが最下点に達した時の運動エネルギーと目標エネルギーの差が0以上になっている.

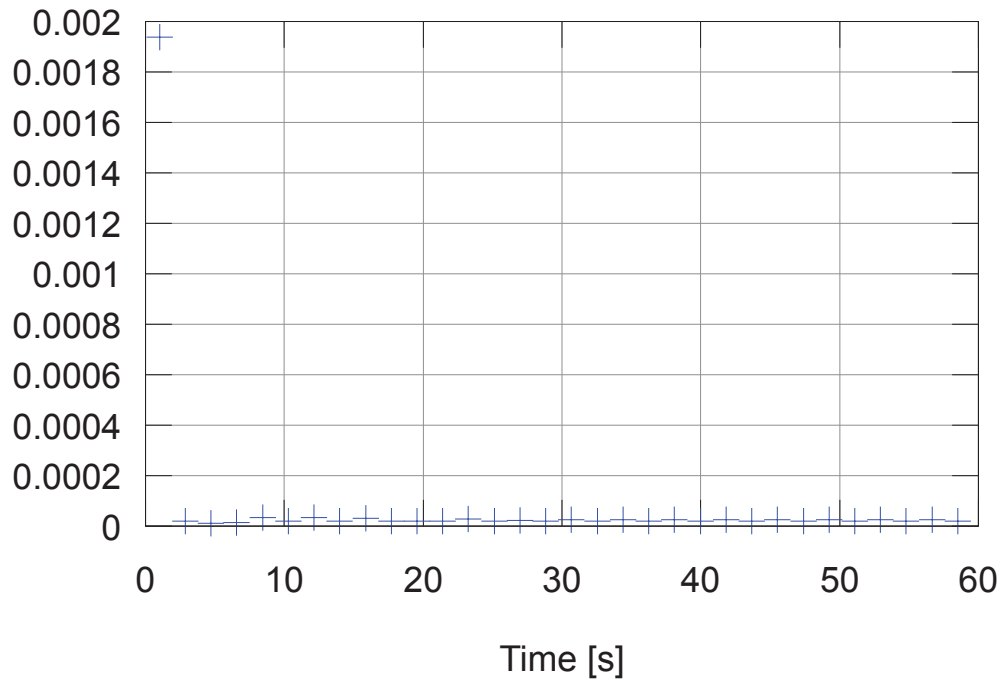


図 2.22: エネルギー状態関数値の遷移. エネルギー状態関数値は, 1.00×10^{-4} 以下の値に収束している.

3. アシダカグモ型構造可変4脚ロボットによる回転移動のモデル構築と制御系設計

本章では、宙返りを行えるアシダカグモの1種から着想を得た回転移動を、先行研究において開発されたアシダカグモ型構造可変4脚ロボットにより実現するための制御アプローチを示す。4脚ロボットによる回転移動において、ロボットの一部のエネルギーは、地面との接触や衝突が原因で失われ、エネルギーの供給がなければ、4脚ロボットは回転移動を続けることができない。そのため、持続的な回転移動を実現するためには、失われたエネルギーを補償することが必要となる。このとき、地面との接触や衝突の影響を把握することが重要となる。

本章では、図3.1に示すアシダカグモ型構造可変4脚ロボットを扱う。このロボットは各脚に3個のモータを持ち、それぞれの回転軸が直交するように配置されている。

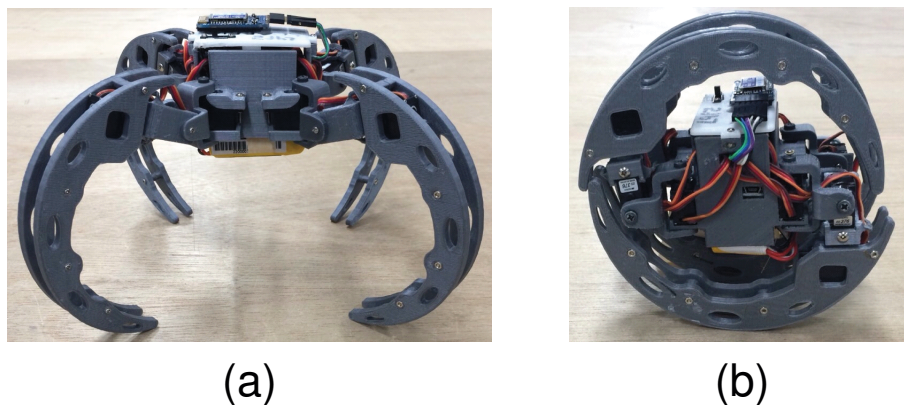


図 3.1: アシダカグモ型構造可変4脚ロボット. (a) 歩行形態. (b) 回転形態. 各脚に3個のモータを持ち、それぞれの回転軸が直交するように配置されている.

この4脚ロボットは図3.1のように歩行形態と回転形態の2形態を持ち、脚部の配置を変更することでそれぞれの形態に移行できる(図3.2). 歩行形態では、1脚を順番に持ち上げて前方へ移動させ、地面についた脚を後方に移動させることで歩行する。回転形態では、図3.3のように、地面についた脚を同時に動かして地面を押しようにして回転する。ただし、図3.3はフィードフォワードコントローラを利用した回転移動である。この地面を押し動作をエネルギー損失を補償するように行うことで、持続的な回転移動を達成する。

回転移動中のエネルギー損失を補償するような制御系を、アシダカグモ型構造可変4脚ロボットの動的モデルを利用して設計する。この動的モデルでは、アシダカグモの回転移動の特徴を取り入れるとともに、回転移動中にロボットが転倒しないという仮定に基づいたロボットの回転移

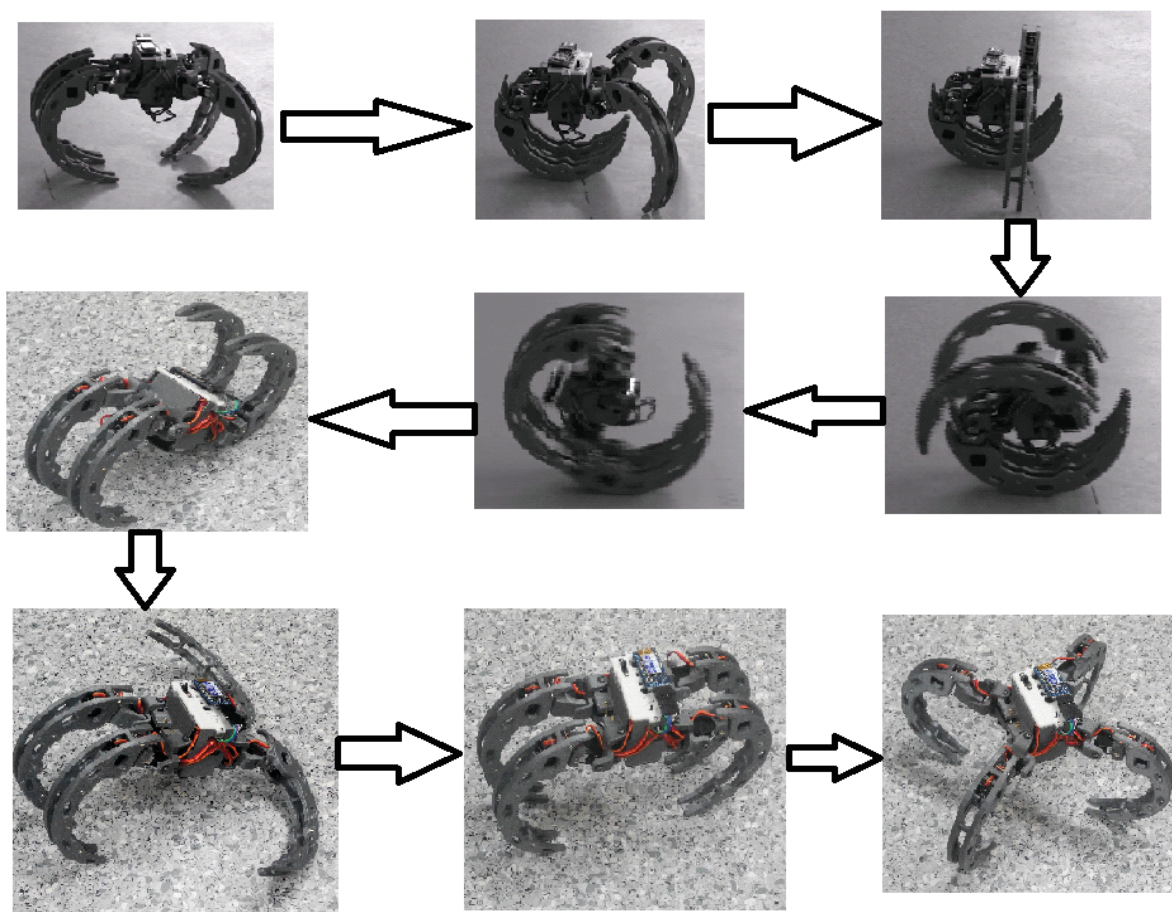


図 3.2 歩行形態・回転形態の変形. 脚部の配置を変更することでそれぞれの形態に移行できる.

動と, そのときの地面との衝突や接触の影響を表現する. このモデルにより, ロボットのエネルギーとエネルギー補償のための入力を計算する. そして, 設計した制御系を用いて4脚ロボットによる回転移動のシミュレーションを行い, 回転移動に対する制御系の有効性を検証する.

3.1 アシダカグモ型構造可変4脚ロボットによる回転移動モデルの構築

アシダカグモ型構造可変4脚ロボットによる回転移動に対する地面との接触や衝突の影響を把握するために, アシダカグモの回転移動の特徴を取り入れた回転移動のモデルを構築する.

4脚ロボットによる回転移動モデルの運動方程式は, 以下の仮定に基づいて導出される.

仮定 1. 4脚ロボットは回転中に転倒しない.

仮定 2. 4脚ロボットは平坦な地面を滑ることなく回転できる.

仮定 3. 地面との衝突は, 完全非弾性衝突であるとする.

これらの仮定に従い, 4脚ロボットによる回転移動のモデル図を図3.4, 物理パラメータを表3.1, 変数を表3.2とする. ここで, 脚部の回転角 θ_{ij} は胴体の回転角 θ_b との相対角をとるものとする.

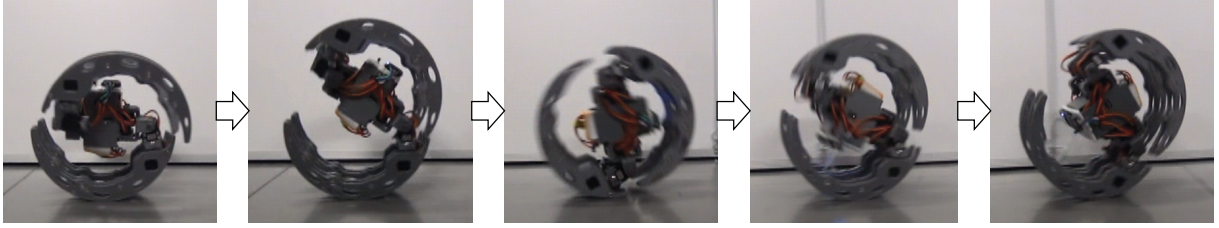


図 3.3: フィードフォワードコントローラを利用した回転移動. 地面についた脚を同時に動かして地面を押しようにして回転する.

このモデル図は, X 軸を地面の高さとして, 4脚ロボットの回転移動を垂直2次元平面で表している. ロボットの地面との接触は, 地面との接触基準点 (x_{cj}, y_{cj}) を定義することにより表現される. 図3.4のように, 4脚ロボットによる回転移動のモデルは, アシダカグモの回転移動における脚部を丸め, その曲面を利用して回転するという特徴を反映して, 湾曲した脚部を持ち, その曲面を活用して回転移動を達成するものとなっている.

回転移動モデルの運動方程式は, 2章と同様に, Projection Method を用いて導出される. この方法を用いて, まず, 地面との衝突や接触の影響を含まない4脚ロボットの回転形態モデルの運動方程式を導出し, あとからこの運動方程式に地面との衝突や接触によりもたらされる拘束力を与えることで, 最終的な4脚ロボットによる回転移動モデルの運動方程式を導出する. このとき,

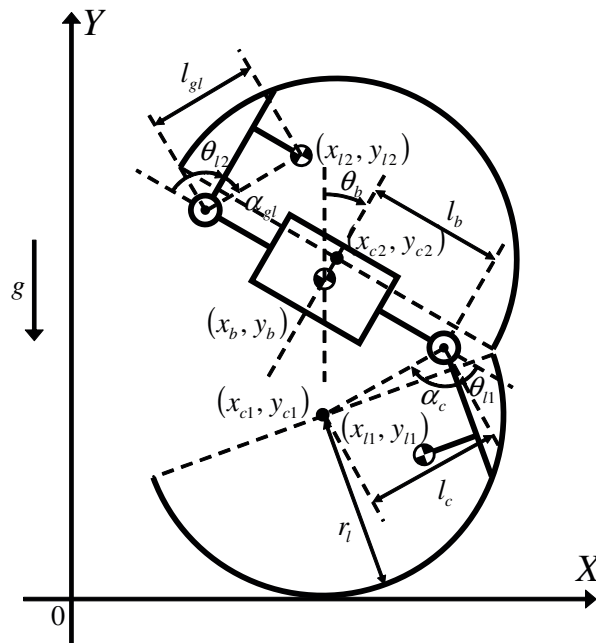


図 3.4: アシダカグモ型構造可変4脚ロボットによる回転移動のモデル図. 4脚ロボットによる回転移動は, X 軸を地面の高さとして垂直2次元平面で表される. 脚部の回転角 θ_{lj} は胴体の回転角 θ_b との相対角をとるものとする.

表 3.1 アシダカグモ型構造可変 4 脚ロボットの物理パラメータ.

パラメータ	記号	値
胴体の質量 [kg]	m_b	1.70×10^{-1}
脚部の質量 [kg]	m_l	5.50×10^{-2}
胴体の慣性モーメント [kgm^2]	I_b	7.65×10^{-5}
脚部の慣性モーメント [kgm^2]	I_l	6.10×10^{-6}
胴体の粘性摩擦 [Nms/rad]	c_b	1.70×10^{-9}
脚部の胴体摩擦 [Nms/rad]	c_l	5.50×10^{-10}
胴体の重心から関節までの長さ [m]	l_b	5.50×10^{-2}
関節から脚部の重心までの長さ [m]	l_{gl}	5.83×10^{-2}
脚部の重心の脚部リンクに対する角度 [rad]	α_{gl}	5.40×10^{-1}
関節から接地基準点までの長さ [m]	l_c	5.70×10^{-2}
接地基準点の脚部リンクに対する角度 [rad]	α_c	1.30
接地面の半径 [m]	r_l	8.00×10^{-2}
重力加速度 [m/s^2]	g	9.81

表 3.2 アシダカグモ型構造可変 4 脚ロボットの変数 ($j = 1, 2$).

胴体の重心座標 [m]	(x_b, y_b)
第 j 脚部の重心座標 [m]	(x_{lj}, y_{lj})
胴体の回転角 [rad]	θ_b
第 j 脚部の回転角 [rad]	θ_{lj}
第 j 脚部の接地基準点の座標 [m]	(x_{cj}, y_{cj})
第 j 脚部の関節トルク [Nm]	τ_{lj}

地面との衝突で発生する不連続な速度変化は、仮定 3 に基づいて、衝突によりもたらされる拘束力から計算される [38].

3.1.1 アシダカグモ型構造可変 4 脚ロボットの回転形態モデル

アシダカグモ型構造可変 4 脚ロボットの各要素の独立した運動方程式は、一般化座標 \mathbf{x}_q を、

$$\mathbf{x}_q = [\theta_b, \theta_{l1}, \theta_{l2}, x_b, y_b, x_{l1}, y_{l1}, x_{l2}, y_{l2}]^T \quad (3.1)$$

として, (3.2) のように表すことができる.

$$\mathbf{M}_q \ddot{\mathbf{x}}_q = \mathbf{h}_q \quad (3.2)$$

$$\mathbf{M}_q := \text{diag}(\mathbf{M}_{11}, \mathbf{M}_{22}) \quad (3.3)$$

$$\mathbf{M}_{11} := \begin{bmatrix} I_b + 2I_l & I_l & I_l \\ I_l & I_l & 0 \\ I_l & 0 & I_l \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{22} := \text{diag}(m_b, m_b, m_l, m_l, m_l, m_l)$$

$$\mathbf{h}_q := \begin{bmatrix} -c_b \dot{\theta}_b \\ \tau_{l1} - c_l \dot{\theta}_{l1} \\ \tau_{l2} - c_l \dot{\theta}_{l2} \\ 0 \\ -m_b g \\ 0 \\ -m_l g \\ 0 \\ -m_l g \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

式 (3.2) より, 4 脚ロボットの各要素が拘束された状態の運動方程式は (3.5) のように表すことができる.

$$\mathbf{M}_q \ddot{\mathbf{x}}_q = \mathbf{h}_q + \mathbf{C}_q^T \boldsymbol{\lambda}_q \quad (3.5)$$

4 脚ロボットの各要素に課される拘束条件は胴体と各脚部の位置関係の記述となり, (3.6) で表される.

$$\begin{cases} x_{lj} = x_b - (-1)^j l_b \cos \theta_b - (-1)^j l_{gl} \cos(\theta_b + \theta_{lj} + \alpha_{gl}) \\ y_{lj} = y_b + (-1)^j l_b \sin \theta_b + (-1)^j l_{gl} \sin(\theta_b + \theta_{lj} + \alpha_{gl}) \end{cases} \quad (3.6)$$

この拘束条件より, 拘束行列 \mathbf{C}_q は, $\mathbf{C}_q \dot{\mathbf{x}}_q = \mathbf{0}$ を満たすように,

$$\mathbf{C}_q = \begin{bmatrix} l_b S_b + l_{gl} S_{bl1gl} & l_{gl} S_{bl1gl} & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ l_b C_b + l_{gl} C_{bl1gl} & l_{gl} C_{bl1gl} & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -l_b S_b - l_{gl} S_{bl2gl} & 0 & -l_{gl} S_{bl2gl} & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -l_b C_b - l_{gl} C_{bl2gl} & 0 & -l_{gl} C_{bl2gl} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

と求まる. ただし, $S_b = \sin \theta_b$, $C_b = \cos \theta_b$, $S_{bljgl} = \sin(\theta_b + \theta_{lj} + \alpha_{gl})$, $C_{bljgl} = \cos(\theta_b + \theta_{lj} + \alpha_{gl})$ である.

式 (3.5) を低次元化するため, 拘束条件下で独立となる速度ベクトル $\dot{\mathbf{q}}_q$ を,

$$\dot{\mathbf{q}}_q = [\dot{\theta}_b, \dot{\theta}_{l1}, \dot{\theta}_{l2}, \dot{x}_b, \dot{y}_b]^T \quad (3.8)$$

と定義する。これを利用して、拘束行列 C_q に対する直交補行列 D_q は、 $C_q D_q = \mathbf{0}$ かつ $\dot{x}_q = D_q \dot{q}_q$ を満たすように、

$$D_q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -l_b S_b - l_{gl} S_{bl1gl} & -l_{gl} S_{bl1gl} & 0 & 1 & 0 \\ -l_b C_b - l_{gl} C_{bl1gl} & -l_{gl} C_{bl1gl} & 0 & 0 & 1 \\ l_b S_b + l_{gl} S_{bl2gl} & 0 & l_{gl} S_{bl2gl} & 1 & 0 \\ l_b C_b + l_{gl} C_{bl2gl} & 0 & l_{gl} C_{bl2gl} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

と求まる。

最終的に、直交補行列 (3.9) を用いて、(3.5) を D_q^T で拘束された空間に射影し、成分ベクトルを座標変換することにより、冗長な自由度を取り除いた運動方程式は、2章と同じように、

$$D_q^T M_q D_q \ddot{q}_q + D_q^T M_q \dot{D}_q \dot{q}_q = D_q^T h_q \quad (3.10)$$

と求まる。

3.1.2 地面との衝突・接触による拘束力の考慮

4脚ロボットの回転形態モデルの運動方程式に地面との衝突や接触によりもたらされる拘束力を与えることで、最終的な4脚ロボットによる回転移動モデルの運動方程式を導出する。

4脚ロボットの回転形態モデルの運動方程式 (3.5) に地面との衝突や接触による拘束力 τ_I を加えると、4脚ロボットによる回転移動モデルの運動方程式は (3.11) と表せる。

$$M_q \ddot{x}_q = h_q + C_q^T \lambda_q + \tau_I \quad (3.11)$$

この拘束力 τ_I は、地面との衝突や接触による拘束行列 C_I とラグランジュの未定乗数 λ_I を用いて、

$$\tau_I = C_I^T \lambda_I, \quad (3.12)$$

と与えられる。ここで、拘束行列 C_I は、 $C_I \dot{x}_q = \mathbf{0}$ を満たす必要がある。この拘束行列 C_I は、ロボットの接地点 h_j が $h_j \leq 0$ で、かつ床反力 λ_j が $\lambda_j > 0$ のとき、地面との衝突や接触による拘束条件を与えることで求められる。ここで、接地基準点の座標 (x_{cj}, y_{cj}) を、

$$\begin{cases} x_{cj} = x_b - (-1)^j l_b \cos \theta_b - (-1)^j l_c \cos(\theta_b + \theta_{lj} + \alpha_c) \\ y_{cj} = y_b + (-1)^j l_b \sin \theta_b + (-1)^j l_c \sin(\theta_b + \theta_{lj} + \alpha_c) \end{cases} \quad (3.13)$$

とすると、ロボットの接地点は $h_j = y_{cj} - r_l$ と表され、(3.14) の拘束条件が成り立つ。

$$\begin{cases} x_{cj} = x_{cj0} + r_l(\theta_b + \theta_{lj} - (\theta_{b0} + \theta_{lj0})) \\ y_{cj} = r_l \end{cases} \quad (h_j \leq 0 \cap \lambda_j > 0) \quad (3.14)$$

ここで、 x_{cj0} , θ_{b0} , θ_{lj0} は、それぞれ、拘束が発生したときの接地基準点の X 軸方向位置、胴体と脚部の回転角である。拘束条件 (3.14) より、拘束方程式 $\Phi_I = 0$ を定義すると、地面との衝突や接触による拘束行列 C_I は (3.15) と表せる。

$$C_I = \frac{\partial \Phi_I}{\partial \mathbf{x}_q} \quad (h_j \leq 0 \cap \lambda_j > 0) \quad (3.15)$$

拘束行列 (3.15) が成り立つとき、(3.11) を D_q^T で拘束された空間に射影し、成分ベクトルを座標変換すると、4脚ロボットによる回転移動の運動方程式は (3.16) のように変形できる。

$$D_q^T M_q D_q \ddot{\mathbf{q}}_q + D_q^T M_q \dot{D}_q \dot{\mathbf{q}}_q = D_q^T \mathbf{h}_q + D_q^T C_I^T \boldsymbol{\lambda}_I \quad (3.16)$$

さらに、(3.12) を (3.11) に代入して、

$$\begin{aligned} M_q \ddot{\mathbf{x}}_q &= \mathbf{h}_q + C_{qq}^T \boldsymbol{\lambda}_{qq} \\ C_{qq} &:= [C_q^T, C_I^T]^T \\ \boldsymbol{\lambda}_{qq} &:= [\boldsymbol{\lambda}_q^T, \boldsymbol{\lambda}_I^T]^T \end{aligned} \quad (3.17)$$

と表すことができる。式 (3.17) を変形すると、 $C_{qq} \dot{\mathbf{x}}_q = \mathbf{0}$ より、 $C_{qq} \ddot{\mathbf{x}}_q = -\dot{C}_{qq} \dot{\mathbf{x}}_q$ なので、

$$\begin{aligned} C_{qq} \ddot{\mathbf{x}}_q &= C_{qq} M_q^{-1} \mathbf{h}_q + C_{qq} M_q^{-1} C_{qq}^T \boldsymbol{\lambda}_{qq} \\ \boldsymbol{\lambda}_{qq} &= (C_{qq} M_q^{-1} C_{qq}^T)^{-1} (C_{qq} M_q^{-1} \mathbf{h}_q + \dot{C}_{qq} \dot{\mathbf{x}}_q) \end{aligned} \quad (3.18)$$

となり、 $\boldsymbol{\lambda}_{qq}$ を求めることができる。この $\boldsymbol{\lambda}_{qq}$ より、(3.16) に必要となる $\boldsymbol{\lambda}_I$ 成分を取り出すことができる。

3.1.3 不連続な速度変化の考慮

4脚ロボットの脚部が地面に接触するさいには、脚部と地面との衝突により不連続な速度変化が発生する。そこで、仮定3に基づいて、衝突によりもたらされる拘束力から不連続な速度変化を計算する。

式 (3.11) より、 $\boldsymbol{\lambda}_q$ は、

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\lambda}_q &= -\mathbf{X}_q^{-1} (C_q M_q^{-1} \mathbf{h}_q + \dot{C}_q \dot{\mathbf{x}}_q + C_q M_q^{-1} \boldsymbol{\tau}_I) \\ \mathbf{X}_q &:= C_q M_q^{-1} C_q^T \end{aligned} \quad (3.19)$$

と求められる。式 (3.12), (3.19) を代入すると, (3.11) は,

$$\begin{aligned} M_q \ddot{\mathbf{x}}_q &= \mathbf{Y}_q \mathbf{h}_q - \mathbf{C}_q^T \mathbf{X}_q^{-1} \dot{\mathbf{C}}_q \dot{\mathbf{x}}_q + \mathbf{Y}_q \mathbf{C}_I^T \boldsymbol{\lambda}_I \\ \mathbf{Y}_q &:= \mathbf{I}_9 - \mathbf{C}_q^T \mathbf{X}_q^{-1} \mathbf{C}_q M_q^{-1} \end{aligned} \quad (3.20)$$

と変形できる。式 (3.20) より, 衝突直前の速度を $\dot{\mathbf{x}}_q^-$, 直後の速度を $\dot{\mathbf{x}}_q^+$ とすると, 衝突前後の速度関係は,

$$M_q \dot{\mathbf{x}}_q^+ - M_q \dot{\mathbf{x}}_q^- = \mathbf{Y}_q \mathbf{C}_I^T \boldsymbol{\lambda}_I \quad (3.21)$$

と表すことができる。このとき, $\dot{\mathbf{x}}_q^+$ は $\mathbf{C}_I \dot{\mathbf{x}}_q^+ = \mathbf{0}$ を満たす必要があるので, (3.21) より, $\boldsymbol{\lambda}_I$ は,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\lambda}_I &= -\mathbf{Z}_q^{-1} \mathbf{C}_I \dot{\mathbf{x}}_q^- \\ \mathbf{Z}_q &:= \mathbf{C}_I M_q^{-1} \mathbf{Y}_q \mathbf{C}_I^T \end{aligned} \quad (3.22)$$

と与えられる。したがって, 衝突直後の速度 $\dot{\mathbf{x}}_q^+$ は, (3.22) を (3.21) に代入して,

$$\dot{\mathbf{x}}_q^+ = \left(\mathbf{I}_9 - M_q^{-1} \mathbf{Y}_q \mathbf{C}_I^T \mathbf{Z}_q^{-1} \mathbf{C}_I \right) \dot{\mathbf{x}}_q^- \quad (3.23)$$

と求められる。

3.2 回転移動のための制御系の設計

持続的な回転移動を実現するために, 2章の制御系設計法を応用し, 回転移動中のロボットのエネルギーに基づいた制御系を設計する。回転移動において, 4脚ロボットの一部のエネルギーは, 地面との衝突や接触により失われ, エネルギーの供給が行われなければ, ロボットの回転は停止する。そこで, ロボットの回転移動により失われたエネルギーを補償する制御系を設計する [37]。具体的には, 地面に接した脚 (支持脚) の接地点を基準とした運動方程式を考えてロボットの力学的エネルギーを求め, 支持脚が切り替わる瞬間の運動エネルギーを目標エネルギーに到達させるような支持脚の関節トルクを導出する。ただし, アシダカグモが支持脚切り替わりの直前に地面を押して回転のためのエネルギーを供給していることを考慮し, 4脚ロボットはエネルギー回復動作を支持脚交換の直前に支持脚で地面を押すようにして行うものとし, それ以外のときは各脚を初期位置へ戻して維持するものとする。また, 4脚ロボットの進行方向は X 軸の正方向のみに限定する。

3.2.1 運動方程式の変換

4脚ロボットの接地点を基準とした力学的エネルギーを求めるため, 図 3.5 のように, 接地している脚を支持脚, もう一方を遊脚とし, 原点 0 の位置を支持脚の接地点とした運動方程式を導出する。ここで, 原点 0 は, 各支持脚交換直後に支持脚の接地点にスイッチされるものとする。

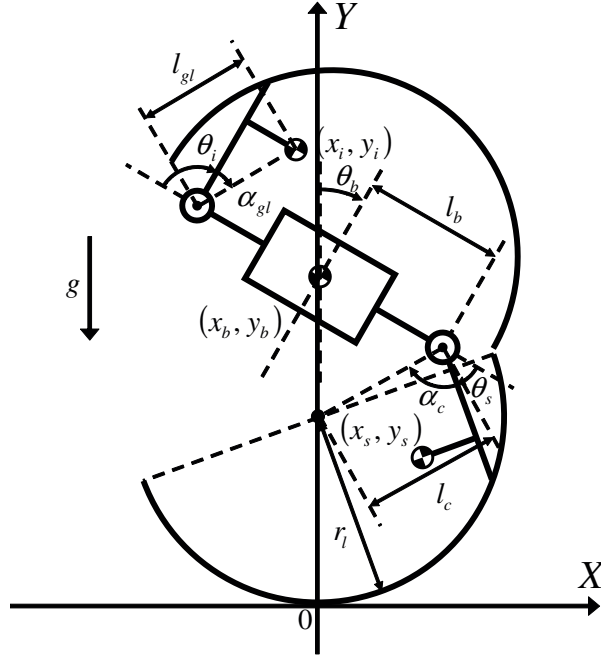


図 3.5: アシダカグモ型構造可変4脚ロボットによる回転移動の接地点を原点としたモデル図. 接地している脚を支持脚, もう一方を遊脚とし, 原点0の位置を支持脚の接地点に固定する. 原点0は, 各支持脚交換直後に支持脚の接地点にスイッチされる.

運動方程式の変換は拘束条件と独立な速度ベクトルを変更することにより行われる. 原点変更後の拘束条件は, (3.24) となる.

$$\left\{ \begin{array}{l} x_b = -l_c \cos(\theta_b + \theta_s + \alpha_c) - l_b \cos \theta_b \\ y_b = l_c \sin(\theta_b + \theta_s + \alpha_c) + l_b \sin \theta_b + r_l \\ x_s = -l_c \cos(\theta_b + \theta_s + \alpha_c) + l_{gl} \cos(\theta_b + \theta_s + \alpha_{gl}) \\ y_s = l_c \sin(\theta_b + \theta_s + \alpha_c) - l_{gl} \sin(\theta_b + \theta_s + \alpha_{gl}) + r_l \\ x_i = -l_c \cos(\theta_b + \theta_s + \alpha_c) - 2l_b \cos \theta_b \\ \quad - l_{gl} \cos(\theta_b + \theta_i + \alpha_{gl}) \\ y_i = l_c \sin(\theta_b + \theta_s + \alpha_c) + 2l_b \sin \theta_b \\ \quad + l_{gl} \sin(\theta_b + \theta_i + \alpha_{gl}) + r_l \end{array} \right. \quad (3.24)$$

ここで, (x_s, y_s) は支持脚の重心座標, (x_i, y_i) は遊脚の重心座標である. 独立な速度ベクトル $\dot{\mathbf{q}}_q$ は,

$$\dot{\mathbf{q}}_q = [\dot{\theta}_b, \dot{\theta}_s, \dot{\theta}_i]^T \quad (3.25)$$

となる. 変更後の拘束条件 (3.24) と独立な速度ベクトル (3.25) を利用し, 前章と同様の手順により拘束行列 \mathbf{C}_q , 直交補行列 \mathbf{D}_q を求めれば, 接地点を原点とした運動方程式は求められる.

力学的エネルギーを求めるため、接地点を原点とした運動方程式を

$$\mathbf{M}_c(\mathbf{q}_q)\ddot{\mathbf{q}}_q + \mathbf{C}_c(\mathbf{q}_q, \dot{\mathbf{q}}_q)\dot{\mathbf{q}}_q + \frac{\partial U_q}{\partial \mathbf{q}_q} = \mathbf{T}_c \quad (3.26)$$

と表す．ここで， $\mathbf{M}_c(\mathbf{q}_q)$ は慣性行列， $\mathbf{C}_c(\mathbf{q}_q, \dot{\mathbf{q}}_q)$ は粘性行列， U_q は位置エネルギー， \mathbf{T}_c は入力であり， $\mathbf{M}_c(\mathbf{q}_q) = \mathbf{D}_q^T \mathbf{M}_q \mathbf{D}_q$ ， $\mathbf{T}_c = [0, \tau_s, \tau_i]^T$ である．ここで， τ_s ， τ_i は，それぞれ，支持脚，遊脚の入力トルクである．これを利用して，ロボットの力学的エネルギー E_q ，運動エネルギー K_q ，位置エネルギー U_q は，

$$E_q = K_q + U_q \quad (3.27)$$

$$K_q = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_q^T \mathbf{M}_c(\mathbf{q}_q) \dot{\mathbf{q}}_q \quad (3.28)$$

$$U_q = (m_b y_b + m_l (y_s + y_i)) g \quad (3.29)$$

と定義される．このとき，力学的エネルギーの時間微分と制御入力との関係は，

$$\dot{E}_q = \dot{K}_q + \dot{U}_q = \dot{\mathbf{q}}_q^T \mathbf{T}_c \quad (3.30)$$

で表される．

3.2.2 エネルギー補償制御

4脚ロボットの運動エネルギー K_q はロボットと地面との衝突や接触により失われる．そこで，回転移動が達成されているときの支持脚交換の瞬間の運動エネルギーを目標エネルギー E_{kq} と設定し，回転移動が達成されているとき， $K_q = E_{kq}$ が満たされていると仮定する．このとき，ロボットのエネルギー状態を表す関数 V_q を

$$V_q = \frac{1}{2} (K_q - E_{kq})^2, \quad \dot{V}_q = (K_q - E_{kq}) \dot{K}_q \quad (3.31)$$

と定義する．式(3.31)は2章の(2.71)と同様の性質を持つので， $\dot{V}_q < 0$ となるような関節トルクを与えれば， $K_q \rightarrow E_{kq}$ が満たされ，回転移動が達成されることとなる．

式(3.31)，(3.30)より，エネルギー状態関数の時間微分 \dot{V}_q は，

$$\begin{aligned} \dot{V}_q &= (K_q - E_{kq}) \left(\dot{\mathbf{q}}_q^T \mathbf{T}_c - \dot{U}_q \right) \\ &= (K_q - E_{kq}) \left(\dot{\theta}_s \tau_s + \dot{\theta}_i \tau_i - \dot{U}_q \right) < 0 \end{aligned} \quad (3.32)$$

となる．ここで，エネルギー回復は支持脚を動かすことによるのみ行われるので $\dot{\theta}_i \tau_i = 0$ とすると，結局，

$$\dot{V}_q = (K_q - E_{kq}) \left(\dot{\theta}_s \tau_s - \dot{U}_q \right) < 0 \quad (3.33)$$

となる．

本論文では、4脚ロボットの進行方向を X 座標の正方向のみに限定する。そこで、ロボットの回転方向を一定に保つため、エネルギー回復動作時の支持脚の回転速度は $\dot{\theta}_s < 0$ を満たすものとする。この制限のもと、もし $K_q - E_{kq} < 0$ 、すなわち $K_q < E_{kq}$ ならば、

$$\dot{\theta}_s \tau_s - \dot{U}_q > 0 \quad (3.34)$$

となる。ここで、 $\dot{\theta}_s < 0$ なので、 $\dot{\theta}_s = -|\dot{\theta}_s|$ とすると、 τ_s の条件は、

$$\tau_s < \begin{cases} -\left|\frac{\dot{U}_q}{\dot{\theta}_s}\right| & (\dot{U}_q \geq 0 \cap \dot{\theta}_s < 0) \\ \left|\frac{\dot{U}_q}{\dot{\theta}_s}\right| & (\dot{U}_q < 0 \cap \dot{\theta}_s < 0) \end{cases} \quad (3.35)$$

となる。もし $K_q - E_{kq} \geq 0$ 、すなわち $K_q \geq E_{kq}$ ならば、

$$\tau_s > \begin{cases} -\left|\frac{\dot{U}_q}{\dot{\theta}_s}\right| & (\dot{U}_q \geq 0 \cap \dot{\theta}_s < 0) \\ \left|\frac{\dot{U}_q}{\dot{\theta}_s}\right| & (\dot{U}_q < 0 \cap \dot{\theta}_s < 0) \end{cases} \quad (3.36)$$

が成り立つ。以上の条件より、入力 τ_s を、

$$\tau_s = \begin{cases} -\zeta \left|\frac{\dot{U}_q}{\dot{\theta}_s}\right| & (K_q - E_{kq} < 0 \cap \dot{\theta}_s < 0) \\ \zeta \left|\frac{\dot{U}_q}{\dot{\theta}_s}\right| & (K_q - E_{kq} \geq 0 \cap \dot{\theta}_s < 0) \\ 0 & (\dot{\theta}_s \geq 0) \end{cases} \quad (3.37)$$

と定義する。ただし、 ζ は入力のゲインで、 $1 < \zeta < \infty$ である。また、(3.37) の $\dot{\theta}_s$ は特異点を持つため、別の入力により一定の初速を与える。 ζ の値は、支持脚交換の瞬間のエネルギー状態関数 V_q のポアンカレ写像を考え、2章と同様に、(2.77) で決定する。

3.3 4脚ロボットによる回転移動のシミュレーション

設計した制御系により持続的な回転移動が実現できることを確認するために、平坦な地面上でのアシダカグモ型構造可変4脚ロボットによる回転移動のシミュレーションを行う。初期状態を、胴体の回転角 $\theta_b = 8.73 \times 10^{-2}$ rad、各脚部の回転角 $\theta_{lj} = 1.57$ rad として、片方の脚部が接地した状態から回転移動を開始する。このとき、エネルギー回復動作は、4脚ロボットの重心の X 軸方向位置 $X_g = (m_b x_b + m_l(x_s + x_i))/(m_b + 2m_l)$ が $X_g \geq 1.25 \times 10^{-2}$ を満たしているときに行う。

シミュレーションのプラントには4脚ロボットによる回転移動のモデルを適用し、制御系には、エネルギー補償制御系とともに、脚部を初期位置に戻して保持するためと脚部に初速を与えるためにPID制御系を併用する。ただし、このPID制御系はエネルギー補償制御系が作動しているとき以外に作動するものとする。

4脚ロボットのシミュレーションパラメータには、表3.1に示されているものを使用し、コントローラパラメータは、表3.3のようにする。

表 3.3 4脚ロボットによる回転移動のコントローラパラメータ

E_{kq}	5.00×10^{-2}
ζ_0	10.0
κ_p	1.00×10^2
κ_i	20.0
κ_d	1.00×10^{-1}

シミュレーション結果を図 3.6 から図 3.11 に示す。図 3.6 はロボットの胴体の回転角，図 3.7，図 3.8 は胴体と各脚部の位置，図 3.9 は各脚部の回転角，図 3.10 はエネルギー補償制御による入力トルク，図 3.11 はロボットの運動エネルギーと目標エネルギーの差である。

図 3.6，図 3.7 より，4脚ロボットが持続的に回転しながら，正方向に進んでいることが確認できる。この 10 秒間で，回転数は 5.57 回で，進んだ距離は 2.91 m であるこのとき，図 3.8 のように，最下点にある脚部が定期的に切り替わっていることから，4脚ロボットが支持脚を交換しながら回転していることがわかる。

図 3.9 は，4脚ロボットが支持脚交換の直前にエネルギー回復動作を行い，支持脚交換後に脚部を初期位置に戻していることを示している。また，脚部の動きが周期的なものに収束していることが確認できる。このとき，エネルギー回復動作のための入力トルク（図 3.10）は，図 3.11 のように運動エネルギーと目標エネルギーの差を 0 以上にすることがわかる。これは，ロボットのエ

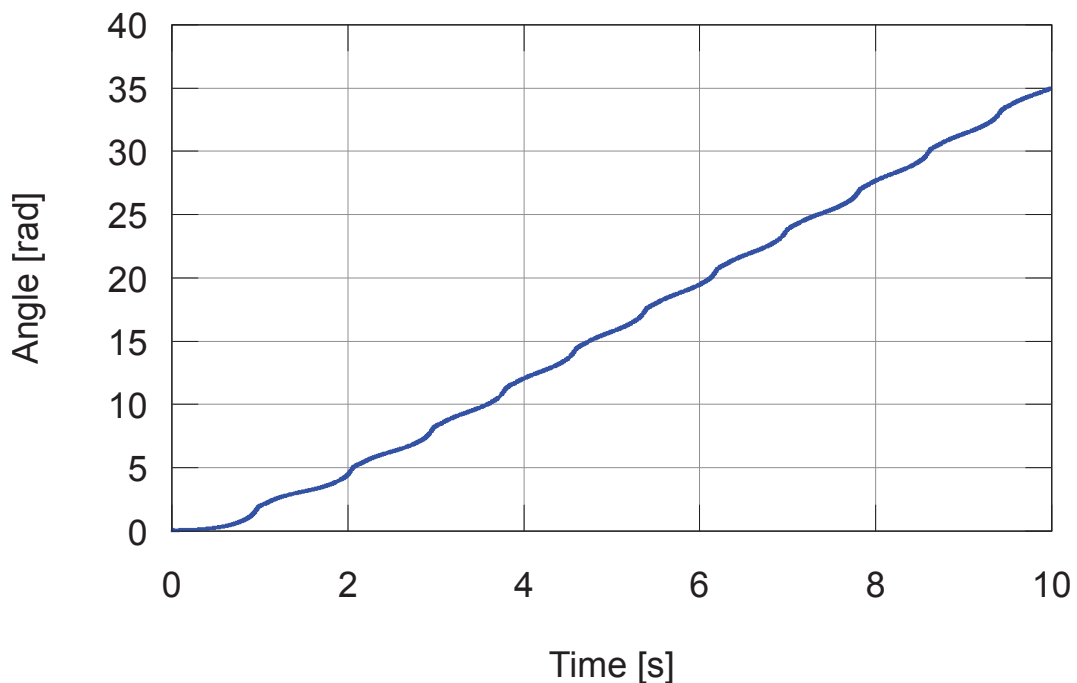


図 3.6: 胴体の回転角。胴体の回転角は持続的に増加しており，10 秒間に 5.57 回，回転している。

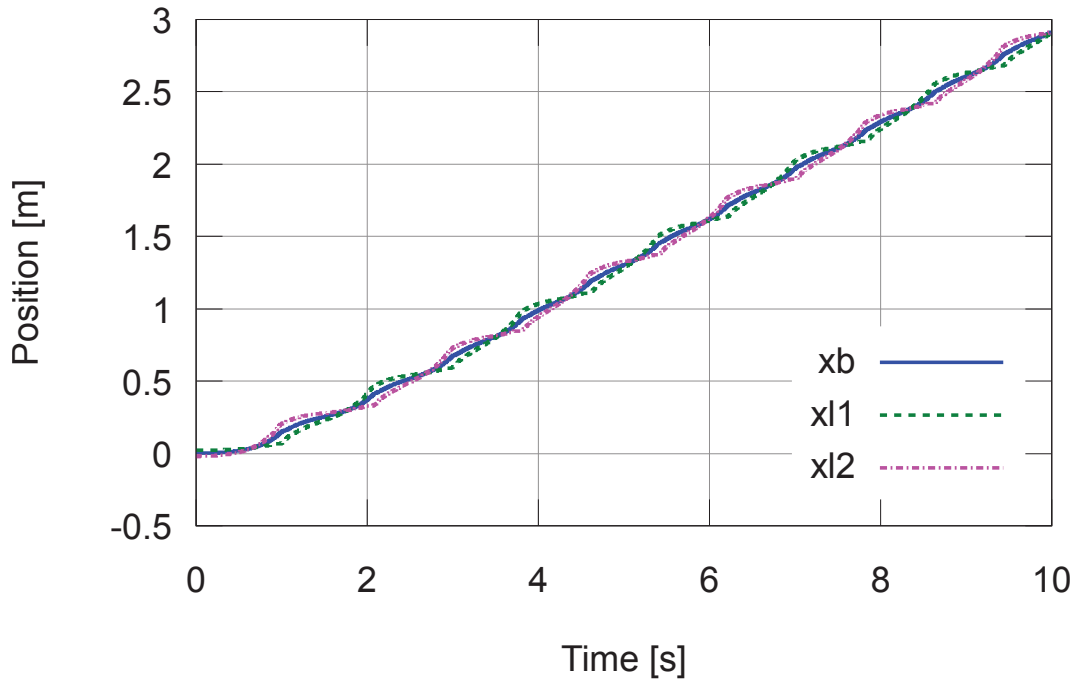


図 3.7: 胴体と各脚部の X 軸方向の位置 (x_b : 胴体, x_{lj} : 第 j 脚部). 4 脚ロボットが 10 秒間で X 軸の正方向に 2.91 m 進んでいることがわかる.

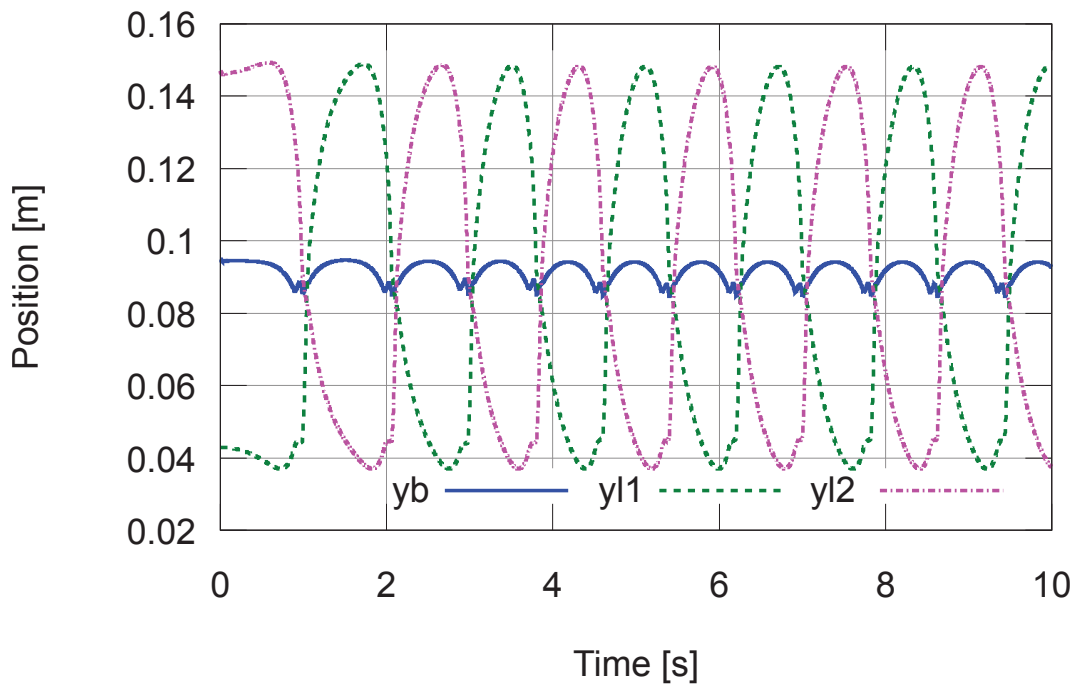


図 3.8: 胴体と各脚部の Y 軸方向の位置 (y_b : 胴体, y_{lj} : 第 j 脚部). 最下点にある脚部が定期的に切り替わっていることから, 4 脚ロボットが支持脚を交換しながら回転していることがわかる.

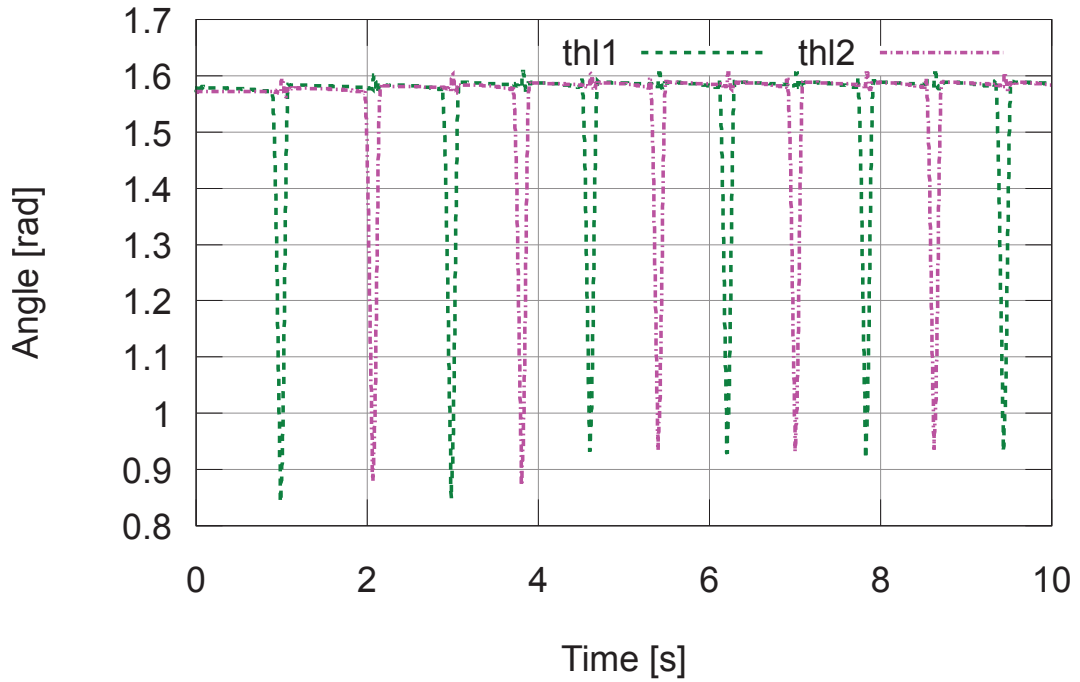


図 3.9: 各脚部の回転角 ($thlj$: 第 j 脚部). 4 脚ロボットが支持脚交換の直前にエネルギー回復動作を行い, 支持脚交換後に脚部を初期位置に戻していることがわかる.

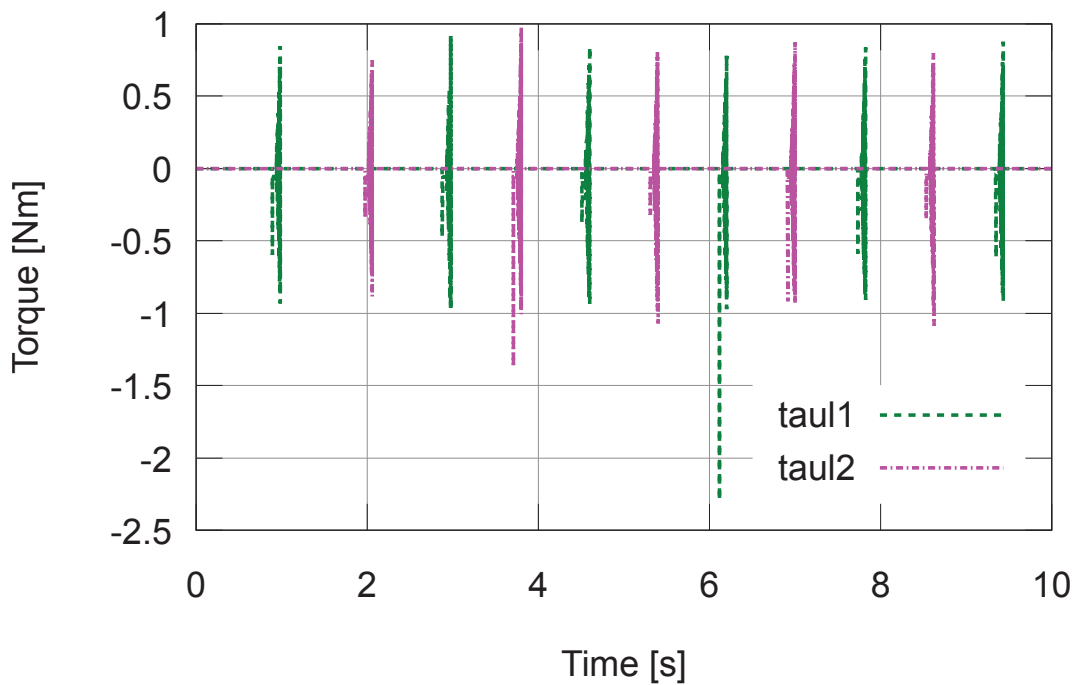


図 3.10: エネルギー補償制御による入力トルク ($taulj$: 第 j 脚部). 支持脚交換の直前に, 関節トルクが支持脚に入力されている.

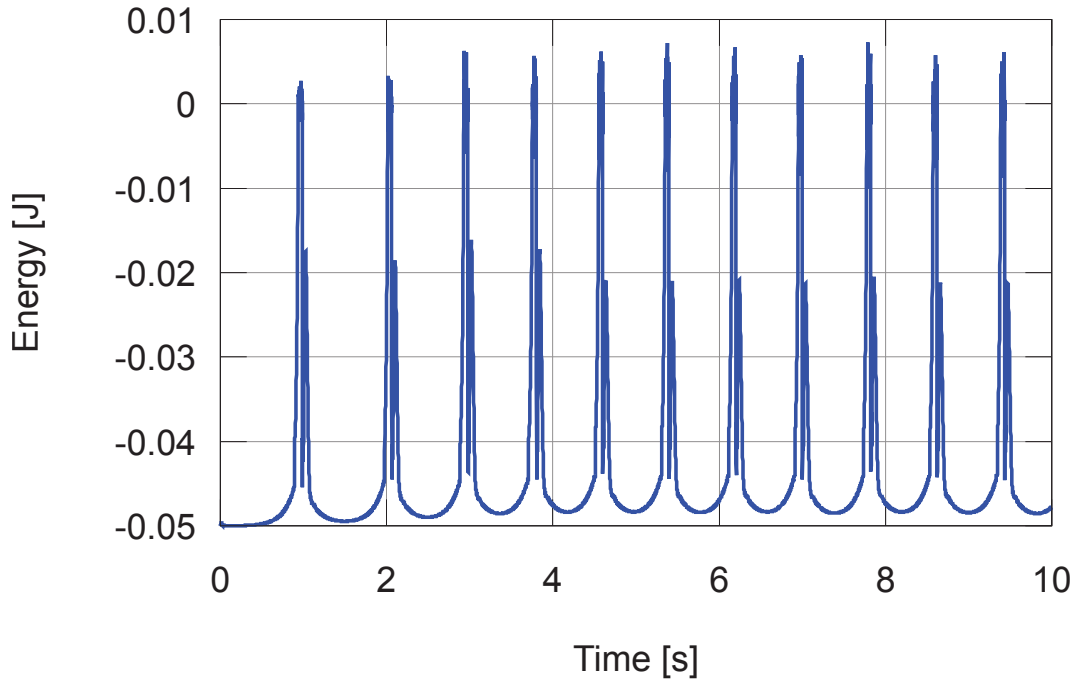


図 3.11: 4脚ロボットの運動エネルギーと目標エネルギーの差. エネルギー回復動作により, 運動エネルギーと目標エネルギーの差が0以上になっている.

エネルギー損失を提案した制御系により補償できることを意味している. 以上の結果より, 提案したエネルギー補償制御系は持続的な回転移動の実現に有効であるといえる.

3.4 まとめ

本章では, アシダカグモの1種から着想を得た回転移動を先行研究において開発されたアシダカグモ型構造可変4脚ロボットにより実現するための制御アプローチを示した. そのために, アシダカグモの回転移動の特徴を取り入れた4脚ロボットの動的モデルを構築した. このとき, 4脚ロボットの回転形態モデルの運動方程式を導出した後, 地面との衝突や接触による拘束力を加え, 地面との衝突による不連続な速度変換を考慮することで, 4脚ロボットによる回転移動モデルの運動方程式を導出した. その後, 支持脚の接地点を基準としたモデルへの変換を行い, ロボットの力学的エネルギーを求めた. そして, アシダカグモの回転移動から得られた知見を生かして, ロボットの回転移動により失われたエネルギーを補償する制御系を設計した. 最後に, 提案した制御系を用いて平坦な地面を4脚ロボットが回転移動するシミュレーションを行った. その結果, エネルギー回復動作を行うことにより, 持続的な回転運動を行うことができた. 結論として, アシダカグモの回転移動の特徴を取り入れたエネルギー補償制御系は, アシダカグモ型構造可変4脚ロボットによる持続的な回転移動の実現に有効であるといえる.

4. ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボット による回転移動のモデル構築と制御系設計

本章では、身体を丸めて坂を側転のように転がり下りることができるホイール・スパイダーから着想を得た回転移動を、ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットにより平坦な地面上で実現するための制御アプローチを示す。本来のホイール・スパイダーは重力を利用して坂を受動的に転がり下りるが、平地での回転移動を実現するためには、ロボットは自身の機構を駆動させて能動的に回転することが必要となる。このとき、効率的な回転移動を行うには、その方法が重要となる。また、3章と同様に、ロボットのエネルギーは地面との接触や衝突の影響により失われていく。

本章では、まず、ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットの機構と平地における回転移動の方法を考案し、その機構を持つロボットによる回転移動のモデルを3章と同じ方法で構築する。そして、このモデルを変形し、エネルギー補償制御系を設計する。この制御系を用いて回転移動のシミュレーションを行い、設計した制御系が、考案した機構を持つホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットによる持続的な回転移動の実現に有効であるかを検証する。

4.1 ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットの機構と回転移動方法

ホイール・スパイダーに着想を得た回転移動を平地で実現するために、6脚ロボットの脚部に平行リンク機構を用いることを提案する。図4.1のように、脚機構に平行リンクを用いるとロボットの胴体と脚の側面を常に平行に保てるため、横倒しになったときの姿勢を容易に安定させることができる。さらに、脚の側面を湾曲させることにより回転がスムーズに行えるようにする。この脚部を胴体に等間隔に取り付け、図4.2のように、全ての脚部の姿勢を同じにした時のロボット全体の重心が中心に来るようにする。同じように、脚部を胴体に引き付けた時の脚部と胴体の重心が一直線に並ぶように配置し、回転移動中のロボットが転倒しにくくする。脚部の駆動にはモータを利用し、図4.1のように、上下運動と旋回に各脚2個のモータを使用する。

回転移動の方法としては、ホイール・スパイダーが重力を利用して回転移動を行っていることから、図4.3のようなものを提案する。ただし、地面に接触している脚部のうち、最も前方にあるもののみを支持脚と定義し、初期姿勢は、図4.3(a)のように支持脚のみで立っている状態とする。そこから倒れるように動作を開始する。

1. 支持脚の関節を回転させ、胴体を前方に傾ける。
2. ロボットの重心が接地点より前方にあるように保ちながら、駆動した支持脚を初期姿勢に戻す。

3. 初期姿勢の状態前方の遊脚を地面に接触させ、支持脚を切り替える。

以上を繰り返すことにより、持続的な回転移動を達成する。

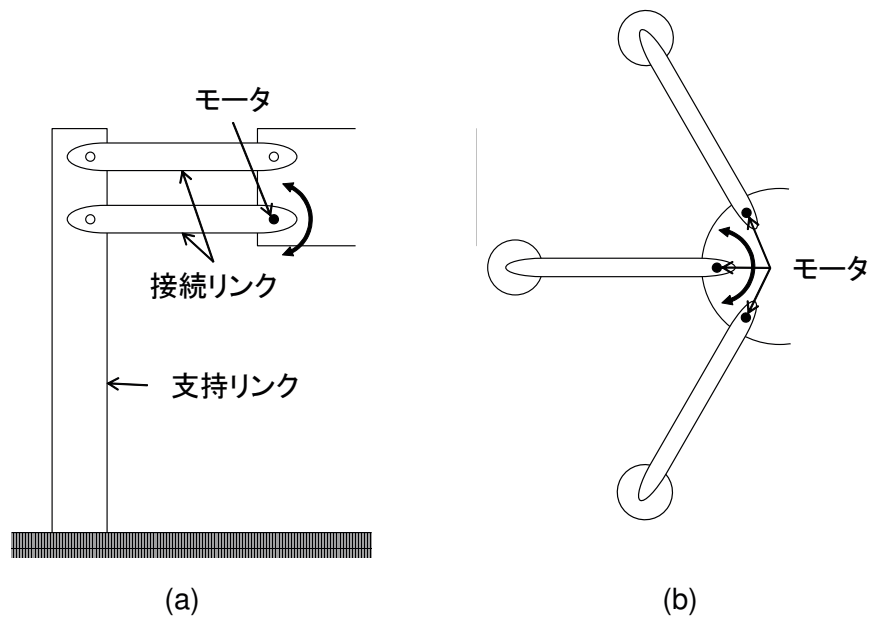


図 4.1: 平行リンクを用いた脚部機構の概略図. (a) 正面から見た図. ロボットの胴体と脚の側面を常に平行に保てる. (b) 上部から見た図. 脚の側面を湾曲させることにより回転がスムーズに行えるようにする.

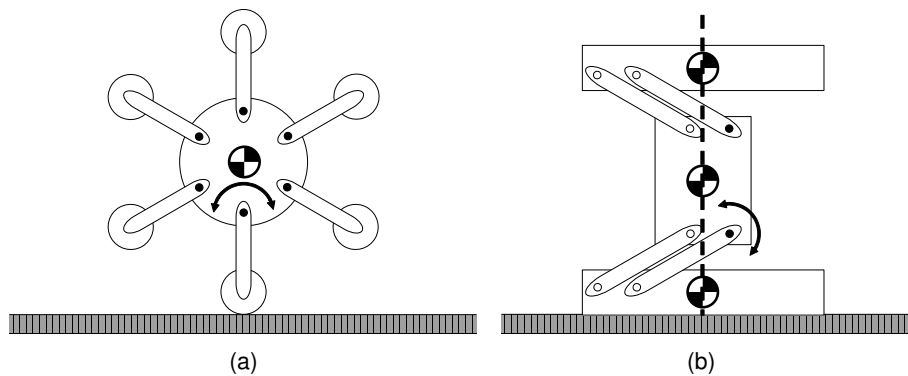


図 4.2: 回転移動時の姿勢. (a) 側面から見た図. 脚部を胴体に等間隔に取り付け、ロボット全体の重心が中心に来るようにする. (b) 正面から見た図. 脚部を胴体に引き付けた時の脚部と胴体の重心が一直線に並ぶようにする.

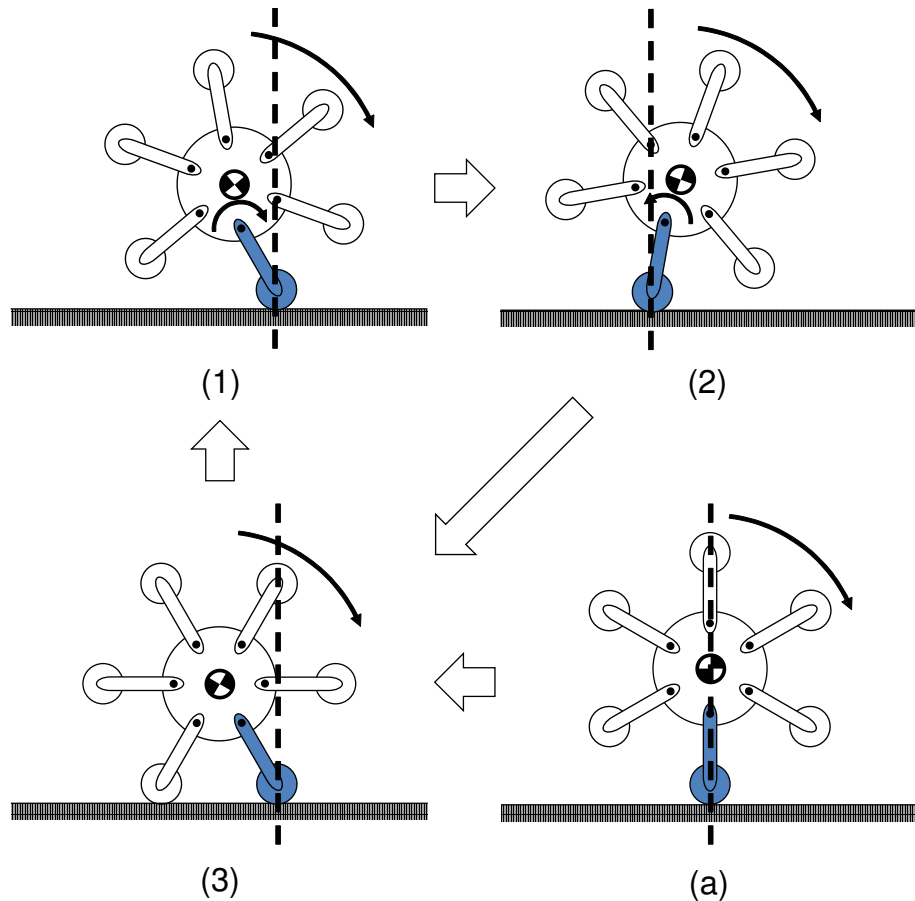


図 4.3: ホイール・スパイダー型構造可変 6 脚ロボットによる回転移動方法. (a) から動作を開始し, (1) から (3) を繰り返して持続的な回転移動を達成する.

4.2 ホイール・スパイダー型構造可変 6 脚ロボットによる回転移動モデルの構築

ホイール・スパイダー型構造可変 6 脚ロボットによる回転移動に対する地面との接触や衝突の影響を把握するために, この 6 脚ロボットによる回転移動のモデルを構築する.

6 脚ロボットによる回転移動モデルの運動方程式は, 以下の仮定に基づいて導出される.

- 仮定 1. 6 脚ロボットは回転中に転倒しない.
- 仮定 2. 6 脚ロボットは平坦な地面を滑ることなく回転できる.
- 仮定 3. 地面との衝突は, 完全非弾性衝突であるとする.
- 仮定 4. 脚部同士の接触は無視する.

これらの仮定より, 6 脚ロボットによる回転移動のモデル図を図 4.4, 物理パラメータを表 4.1, 変数を表 4.2 とする. ここで, 脚部の回転角 θ_{ij} は胴体の回転角 θ_b との相対角をとるものとする. このモデル図は, X 軸を地面の高さとして, 6 脚ロボットの回転移動を垂直 2 次元平面で表して

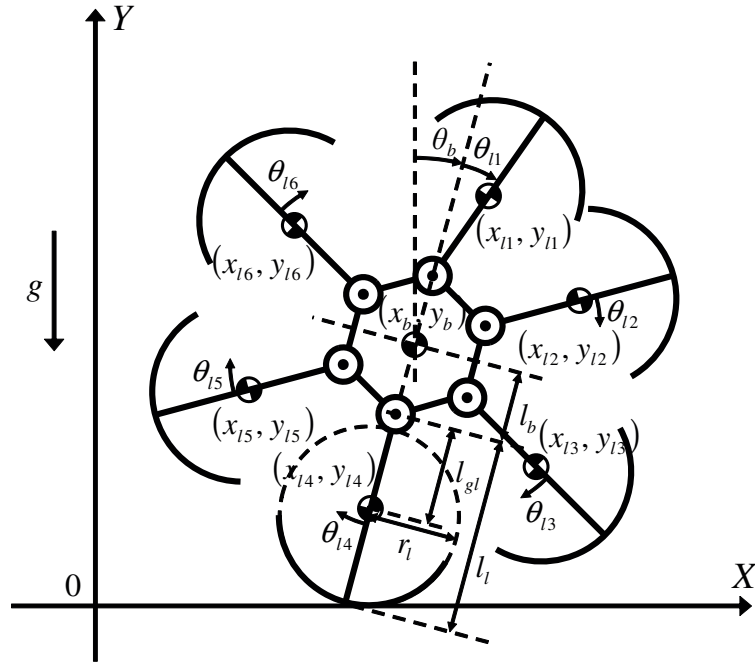


図 4.4: ホイール・スパイダー型構造可変 6 脚ロボットによる回転移動のモデル図. 6 脚ロボットによる回転移動は, X 軸を地面の高さとして垂直 2 次元平面で表される. 脚部の回転角 θ_{lj} は胴体の回転角 θ_b との相対角をとるものとする.

いる. 図 4.4 のように, 6 脚ロボットによる回転移動のモデルは, ホイール・スパイダーが車輪のような形態で回転移動を行っていることから, 等間隔に接続された脚部に湾曲した接地面を持ち, その曲面を利用して回転するものとなっている.

表 4.1 ホイール・スパイダー型構造可変 6 脚ロボットの物理パラメータ.

パラメータ	記号	値
胴体の質量 [kg]	m_b	1.70×10^{-1}
脚部の質量 [kg]	m_l	4.50×10^{-2}
胴体の慣性モーメント [kgm^2]	I_b	7.65×10^{-5}
脚部の慣性モーメント [kgm^2]	I_l	4.59×10^{-6}
胴体の粘性摩擦 [Nms/rad]	c_b	1.70×10^{-9}
脚部の胴体摩擦 [Nms/rad]	c_l	5.50×10^{-10}
胴体の重心から関節までの長さ [m]	l_b	3.00×10^{-2}
脚部の長さ [m]	l_l	3.50×10^{-2}
関節から脚部の重心までの長さ [m]	l_{gl}	1.75×10^{-2}
接地面の半径 [m]	r_l	3.00×10^{-2}
重力加速度 [m/s^2]	g	9.81

表 4.2 ホイール・スパイダー型構造可変 6 脚ロボットの変数 ($j = 1, \dots, 6$) .

胴体の重心座標 [m]	(x_b, y_b)
第 j 脚部の重心座標 [m]	(x_{lj}, y_{lj})
胴体の回転角 [rad]	θ_b
第 j 脚部の回転角 [rad]	θ_{lj}
第 j 脚部の接地基準点の座標 [m]	(x_{cj}, y_{cj})
第 j 脚部の関節トルク [Nm]	τ_{lj}

回転移動モデルの運動方程式は，3 章と同様の手順で導出する．

ホイール・スパイダー型構造可変 6 脚ロボットの各要素の独立した運動方程式は，一般化座標 \mathbf{x}_h を，

$$\mathbf{x}_h = [\theta_b, \theta_{l1}, \dots, \theta_{l6}, x_b, y_b, x_{l1}, y_{l1}, \dots, x_{l6}, y_{l6}]^T. \quad (4.1)$$

として，(4.2) のように表すことができる．

$$\mathbf{M}_h \ddot{\mathbf{x}}_h = \mathbf{h}_h \quad (4.2)$$

$$\mathbf{M}_h := \text{diag}(\mathbf{M}_{11}, \mathbf{M}_{22}) \quad (4.3)$$

$$\mathbf{M}_{11} := \begin{bmatrix} I_b + 6I_l & I_l & I_l & I_l & I_l & I_l & I_l \\ I_l & I_l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_l & 0 & I_l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_l & 0 & 0 & I_l & 0 & 0 & 0 \\ I_l & 0 & 0 & 0 & I_l & 0 & 0 \\ I_l & 0 & 0 & 0 & 0 & I_l & 0 \\ I_l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_l \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{22} := \text{diag}(m_b, m_b, m_l, m_l, m_l, m_l, m_l, m_l, m_l, m_l, m_l, m_l, m_l, m_l)$$

$$\mathbf{h}_h := \begin{bmatrix} -c_b \dot{\theta}_b, \tau_{l1} - c_l \dot{\theta}_{l1}, \dots, \tau_{l6} - c_l \dot{\theta}_{l6}, \\ 0, -m_b g, 0, -m_l g, 0, -m_l g, 0, -m_l g, 0, -m_l g, 0, -m_l g \end{bmatrix}^T \quad (4.4)$$

式 (4.2) より，6 脚ロボットの各要素が拘束された状態の運動方程式は (4.5) のように表すことができる．

$$\mathbf{M}_h \ddot{\mathbf{x}}_h = \mathbf{h}_h + \mathbf{C}_h^T \boldsymbol{\lambda}_h \quad (4.5)$$

6 脚ロボットの各要素に課される拘束条件は胴体と各脚部の位置関係の記述となり，(4.6) で表される．

$$\begin{cases} x_{lj} = x_b + l_b \sin\left(\theta_b + \frac{j-1}{3}\pi\right) + l_{gl} \sin\left(\theta_b + \theta_{lj} + \frac{j-1}{3}\pi\right) \\ y_{lj} = y_b + l_b \cos\left(\theta_b + \frac{j-1}{3}\pi\right) + l_{gl} \cos\left(\theta_b + \theta_{lj} + \frac{j-1}{3}\pi\right) \end{cases} \quad (4.6)$$

この拘束条件より，拘束行列 C_h は， $C_h \dot{\boldsymbol{x}}_h = \mathbf{0}$ を満たすように，

$$C_h = \frac{\partial \Phi_h}{\partial \boldsymbol{x}_h} \quad (4.7)$$

で求められる．ただし， $\Phi_h = 0$ は拘束条件 (4.6) より求まる拘束方程式である．

式 (4.5) を低次元化するため，拘束条件下で独立となる速度ベクトル $\dot{\boldsymbol{q}}_h$ を，

$$\dot{\boldsymbol{q}}_h = [\dot{\theta}_b, \dot{\theta}_{l1}, \dot{\theta}_{l2}, \dot{\theta}_{l3}, \dot{\theta}_{l4}, \dot{\theta}_{l5}, \dot{\theta}_{l6}, \dot{x}_b, \dot{y}_b]^T \quad (4.8)$$

と定義する．ここで，一般化速度 $\dot{\boldsymbol{x}}_h$ を $\dot{\boldsymbol{x}}_h = [\dot{\boldsymbol{q}}_h^T, \boldsymbol{v}_h^T]^T$ と分割すると，拘束行列 C_h は， $C_h \dot{\boldsymbol{x}}_h = C_{h1} \dot{\boldsymbol{q}}_h + C_{h2} \boldsymbol{v}_h$ を満たすように $C_h = [C_{h1}, C_{h2}]$ と表せる．この関係より，直交補行列 D_h は， $C_h D_h = \mathbf{0}$ かつ， $\dot{\boldsymbol{x}}_h = D_h \dot{\boldsymbol{q}}_h$ を満たすように求まる． $C_h \dot{\boldsymbol{x}}_h = C_{h1} \dot{\boldsymbol{q}}_h + C_{h2} \boldsymbol{v}_h = \mathbf{0}$ より， $\boldsymbol{v}_h = -C_{h2}^{-1} C_{h1} \dot{\boldsymbol{q}}_h$ となるため，直交補行列 D_h は， $\dot{\boldsymbol{x}}_h = [\dot{\boldsymbol{q}}_h^T, \boldsymbol{v}_h^T]^T = D_h \dot{\boldsymbol{q}}_h$ より，

$$D_h = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_9 \\ -C_{h2}^{-1} C_{h1} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

となる．ここで \boldsymbol{I} は単位行列，添字は単位行列の次元である．この直交補行列 (4.9) を用いて，(4.5) を D_h^T で拘束された空間に射影し，成分ベクトルを座標変換することにより，冗長な自由度を取り除いた運動方程式は，

$$D_q^T M_q D_q \ddot{\boldsymbol{q}}_q + D_q^T M_q \dot{D}_q \dot{\boldsymbol{q}}_q = D_q^T \boldsymbol{h}_q \quad (4.10)$$

と求まる．

以上より，最終的な 6 脚ロボットによる回転移動モデルの運動方程式は，3 章と同様に，6 脚ロボットの回転形態モデルの運動方程式に対して，地面との衝突・接触による拘束力と，不連続な速度変化を考慮することで求まる．このとき，各脚部の接地基準点の座標 (x_{cj}, y_{cj}) を，

$$\begin{cases} x_{cj} = x_b + l_b \sin(\theta_b + \frac{j-1}{3}\pi) + (l_l - r_l) \sin(\theta_b + \theta_{lj} + \frac{j-1}{3}\pi) \\ y_{cj} = y_b + l_b \cos(\theta_b + \frac{j-1}{3}\pi) + (l_l - r_l) \cos(\theta_b + \theta_{lj} + \frac{j-1}{3}\pi) \end{cases} \quad (4.11)$$

とし，地面との衝突や接触による拘束条件を，

$$\begin{cases} x_{cj} = x_{cj0} + r_l(\theta_b + \theta_{lj} - (\theta_{b0} + \theta_{lj0})) \\ y_{cj} = r_l \end{cases} \quad (h_j \leq 0 \cap \lambda_j > 0) \quad (4.12)$$

とする．ただし， $h_j = y_{cj} - r_l$ である．この拘束条件より，地面との衝突や接触による拘束行列を，(4.13) のように求める．

$$C_I = \frac{\partial \Phi_I}{\partial \boldsymbol{x}_h} \quad (h_j \leq 0 \cap \lambda_j > 0) \quad (4.13)$$

この拘束行列を用いた 6 脚ロボットによる回転移動の運動方程式は (4.14) のようになる．

$$D_h^T M_h D_h \ddot{\boldsymbol{q}}_h + D_h^T M_h \dot{D}_h \dot{\boldsymbol{q}}_h = D_h^T \boldsymbol{h}_h + D_h^T C_I^T \boldsymbol{\lambda}_I \quad (4.14)$$

4.3 回転移動のための制御系の設計

図 4.3 のような回転移動方法を実現するための制御系を，3 章と同様に，6 脚ロボットのエネルギーに基づいて設計する．3 章と同様に，支持脚の接地点を基準とした運動方程式を考えてロボットの力学的エネルギーを求め，運動エネルギーを目標エネルギーに到達させるような支持脚の関節トルクを導出する．ただし，ホイール・スパイダーの回転移動の特徴から，ロボット全体の水平方向の重心位置が接地点の真上に達した時の運動エネルギーを目標エネルギーとして設定し，その重心位置が接地点より一定以上前方に達するまでに，支持脚のみでエネルギー回復動作を行うものとする．それ以外のときは各脚部を初期位置へ戻して維持することで，支持脚交換時の姿勢を一定に保つ．各脚部を初期位置に戻すときには，ロボットの重心位置が接地点より後方に移動しないようにする．また，6 脚ロボットの進行方向は X 軸の正方向のみに限定する．

4.3.1 運動方程式の変換

図 4.5 のように，接地している最も前方の脚を支持脚，それ以外を遊脚とし，原点 0 の位置を支持脚の接地点とした運動方程式を導出する．ここで，原点 0 は，各支持脚交換直後に支持脚の接地点にスイッチされるものとする．

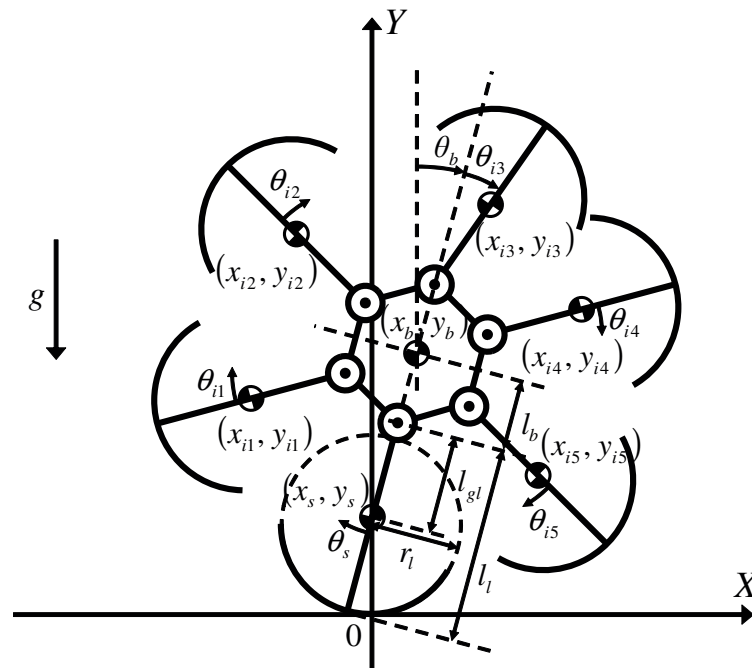


図 4.5: ホイール・スパイダー型構造可変 6 脚ロボットによる回転移動の接地点を原点としたモデル図．接地している最も前方の脚を支持脚，それ以外を遊脚とし，原点 0 の位置を支持脚の接地点に固定する．原点 0 は，各支持脚交換直後に支持脚の接地点にスイッチされる．

原点変更後の拘束条件は, (4.15) となる.

$$\begin{cases} x_b = (l_l - r_l) \sin(\theta_b + \theta_s) + l_b \sin \theta_b \\ y_b = (l_l - r_l) \cos(\theta_b + \theta_s) + l_b \cos \theta_b + r_l \\ x_s = (l_l - r_l - l_{gl}) \sin(\theta_b + \theta_s) \\ y_s = (l_l - r_l - l_{gl}) \sin(\theta_b + \theta_s) + r_l \\ x_{ik} = x_b + l_b \sin\left(\theta_b + \frac{k+3}{3}\pi\right) + l_{gl} \sin\left(\theta_b + \theta_{ik} + \frac{k+3}{3}\pi\right) \\ y_{ik} = y_b + l_b \cos\left(\theta_b + \frac{k+3}{3}\pi\right) + l_{gl} \cos\left(\theta_b + \theta_{ik} + \frac{k+3}{3}\pi\right) \end{cases} \quad (4.15)$$

ここで, (x_s, y_s) は支持脚の重心座標, (x_{ik}, y_{ik}) , $k = 1, \dots, 5$ は遊脚の重心座標である. 独立な速度ベクトル $\dot{\mathbf{q}}_h$ は,

$$\dot{\mathbf{q}}_h = [\dot{\theta}_b, \dot{\theta}_s, \dot{\theta}_{i1}, \dot{\theta}_{i2}, \dot{\theta}_{i3}, \dot{\theta}_{i4}, \dot{\theta}_{i5}]^T \quad (4.16)$$

となる. これらより拘束行列 \mathbf{C}_h , 直交補行列 \mathbf{D}_h を求めれば, 支持脚の関節を原点とした運動方程式は求められる. したがって, 接地点を原点とした運動方程式を,

$$\mathbf{M}_c(\mathbf{q}_h) \ddot{\mathbf{q}}_h + \mathbf{C}_c(\mathbf{q}_h, \dot{\mathbf{q}}_h) \dot{\mathbf{q}}_h + \frac{\partial U_h}{\partial \mathbf{q}_h} = \mathbf{T}_c \quad (4.17)$$

$$\mathbf{M}_c(\mathbf{q}_h) := \mathbf{D}_h^T \mathbf{M}_h \mathbf{D}_h$$

$$\mathbf{T}_c := [0, \tau_s, \tau_{i1}, \tau_{i2}, \tau_{i3}, \tau_{i4}, \tau_{i5}]^T$$

で表すと, ロボットの力学的エネルギー E_h , 運動エネルギー K_h , 位置エネルギー U_h は,

$$E_h = K_h + U_h \quad (4.18)$$

$$K_h = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_h^T \mathbf{M}_c(\mathbf{q}_h) \dot{\mathbf{q}}_h, \quad (4.19)$$

$$U_h = (m_b y_b + m_l (y_s + y_{i1} + y_{i2} + y_{i3} + y_{i4} + y_{i5})) g, \quad (4.20)$$

で定義され, 力学的エネルギーの時間微分と制御入力との関係は,

$$\dot{E}_h = \dot{K}_h + \dot{U}_h = \dot{\mathbf{q}}_h^T \mathbf{T}_c \quad (4.21)$$

となる.

4.3.2 エネルギー補償制御

6脚ロボットの運動エネルギー K_h はロボットと地面との衝突や接触により失われる. そこで, ロボット全体の水平方向の重心位置

$$X_g = \frac{(m_b x_b + m_l (x_s + x_{i1} + x_{i2} + x_{i3} + x_{i4} + x_{i5}))}{m_b + 6m_l} \quad (4.22)$$

を考え、回転移動が達成されているときの接地点の真上、すなわち $X_g = 0$ での運動エネルギー E_{kh} を目標エネルギーとする。そして、回転移動が達成されているとき、 $X_g = 0$ において $K_h = E_{kh}$ が満たされていると仮定する。このとき、ロボットのエネルギー状態を表す関数 V_h を、3章と同様に、

$$V_h = \frac{1}{2}(K_h - E_{kh})^2, \quad \dot{V}_h = (K_h - E_{kh})\dot{K}_h \quad (4.23)$$

と定義する。したがって、 $\dot{V}_h < 0$ となるような関節トルクを与えれば、 $K_h \rightarrow E_{kh}$ が満たされ、回転移動が達成されることとなる。

(4.23), (4.21) より、エネルギー状態関数の時間微分 \dot{V}_h は、エネルギー回復動作を支持脚のみで行うとすると、

$$\begin{aligned} \dot{V}_h &= (E_h - E_{kh}) (\dot{\theta}_s \tau_s + \dot{\theta}_{i1} \tau_{i1} + \dot{\theta}_{i2} \tau_{i2} + \dot{\theta}_{i3} \tau_{i3} + \dot{\theta}_{i4} \tau_{i4} + \dot{\theta}_{i5} \tau_{i5} - \dot{U}_h) \\ &= (E_h - E_{kh}) (\dot{\theta}_s \tau_s - \dot{U}_h) < 0 \end{aligned} \quad (4.24)$$

となる。これより、 $K_h - E_{kh} \geq 0$ 、すなわち $K_h \geq E_{kh}$ ならば、エネルギー回復の必要がないため $\tau_s = 0$ とし、 $K_h - E_{kh} < 0$ 、すなわち $K_h < E_{kh}$ ならば、エネルギー回復動作時の支持脚の回転速度は $\dot{\theta}_s < 0$ を満たすという制限のもと、 $\dot{\theta}_s = -|\dot{\theta}_s|$ として、

$$\tau_s < \begin{cases} -|\frac{\dot{U}_h}{\dot{\theta}_s}| & (\dot{U}_h \geq 0 \cap \dot{\theta}_s < 0) \\ |\frac{\dot{U}_h}{\dot{\theta}_s}| & (\dot{U}_h < 0 \cap \dot{\theta}_s < 0) \end{cases} \quad (4.25)$$

という条件が成り立つ。以上の条件より、入力 τ_s を、

$$\tau_s = \begin{cases} -\zeta |\frac{\dot{U}_h}{\dot{\theta}_s}| & (K_h - E_{kh} < 0 \cap \dot{\theta}_s < 0) \\ 0 & (K_h - E_{kh} \geq 0 \cup \dot{\theta}_s \geq 0) \end{cases} \quad (4.26)$$

と定義する。ただし、 $1 < \zeta < \infty$ であり、 $\dot{\theta}_s$ は特異点を持つため、別の入力により一定の初速を与える。 ζ の値は、 $X_g = 0$ のときのエネルギー状態関数 V_h のポアンカレ写像を考え、2章と同様に、(2.77) で決定する。

4.4 6脚ロボットによる回転移動のシミュレーション

設計した制御系を用いて、考案した機構を持つホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットにより持続的な回転移動が実現できることを確認するために、平坦な地面上での回転移動のシミュレーションを行う。初期状態を、胴体の回転角 $\theta_b = 8.73 \times 10^{-2}$ rad、各脚部の回転角 $\theta_{lj} = 0.00$ rad として、第4脚部が接地した状態から回転移動を開始する。このとき、エネルギー回復動作は、 $X_g \leq 2.00 \times 10^{-3}$ を満たしているときに行う。

シミュレーションのプラントには6脚ロボットによる回転移動のモデルを適用し、制御系には、エネルギー補償制御系とともに、脚部を初期位置に戻して保持するため脚部に初速を与えるた

めに PID 制御系を併用する。ただし、この PID 制御系はエネルギー補償制御系が作動しているとき以外に作動するものとする。

6脚ロボットのシミュレーションパラメータには、表 4.1 に示されているものを使用し、コントローラパラメータは、表 4.3 とする。

シミュレーション結果を図 4.6 から図 4.13 に示す。図 4.6 はロボットの胴体の回転角、図 4.7、図 4.8 は胴体と各脚部の位置、図 4.9 はロボット全体の水平方向の重心位置、図 4.10 は各脚部の回転角、図 4.11 は胴体の二次元平面上の位置、図 4.12 はエネルギー補償制御による各脚部の関節トルク、図 4.13 は運動エネルギーと目標エネルギーの差である。

図 4.6、図 4.7 より、6脚ロボットが持続的に回転しながら、正方向に進んでいることが確認できる。この 5 秒間で、回転数は 1.69 回で、進んだ距離は 7.02×10^{-1} m である。このとき、図 4.8 のように、支持脚は初期状態で接地していた第 4 脚部から順番に切り替えられている。この回転移動を実現している手順として、図 4.9、図 4.10 から、ロボットが、 $X_g \leq 2.00 \times 10^{-3}$ を満たすと

表 4.3 6脚ロボットによる回転移動のコントローラパラメータ

E_{kh}	3.00×10^{-2}
ζ_0	5.00
κ_p	10.0
κ_i	2.00
κ_d	1.00×10^{-2}

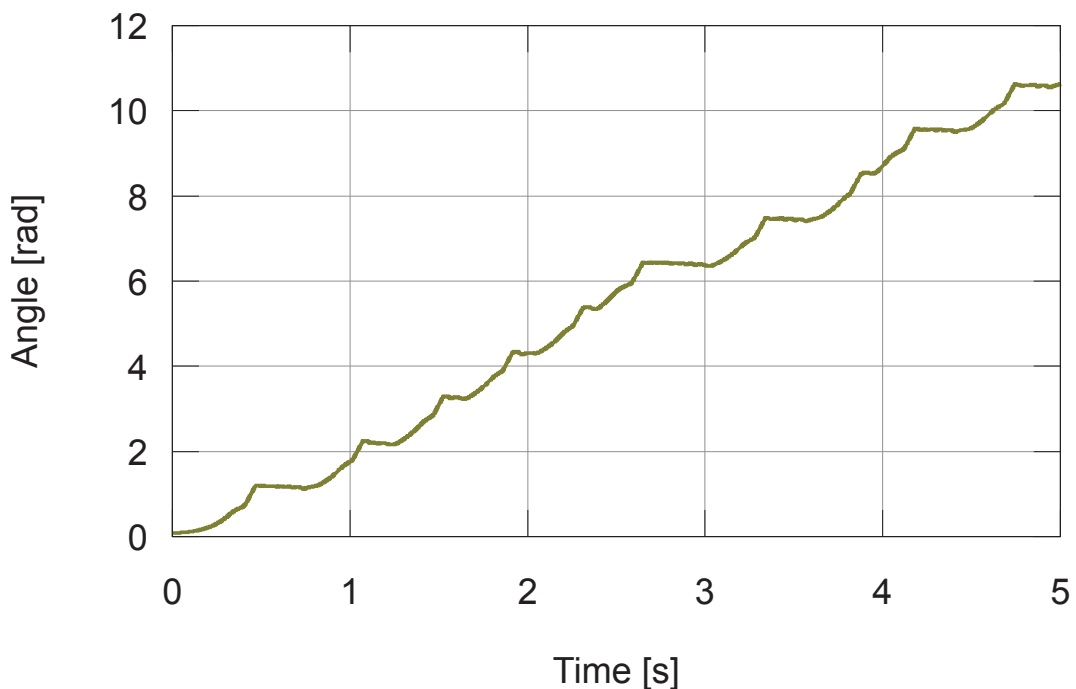


図 4.6 胴体の回転角。胴体の回転角は持続的に増加しており、5 秒間に 1.69 回、回転している。

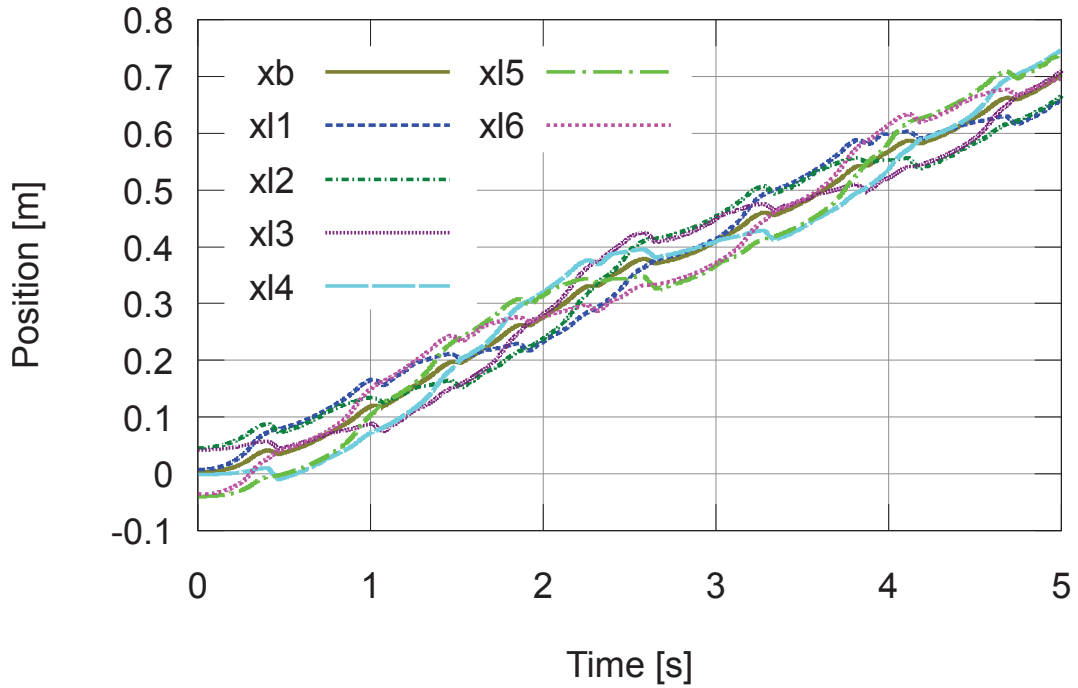


図 4.7: 胴体と各脚部の X 軸方向の位置 (x_b : 胴体, x_{lj} : 第 j 脚部). 6 脚ロボットが 5 秒間で X 軸の正方向に 7.02×10^{-1} m 進んでいることがわかる.

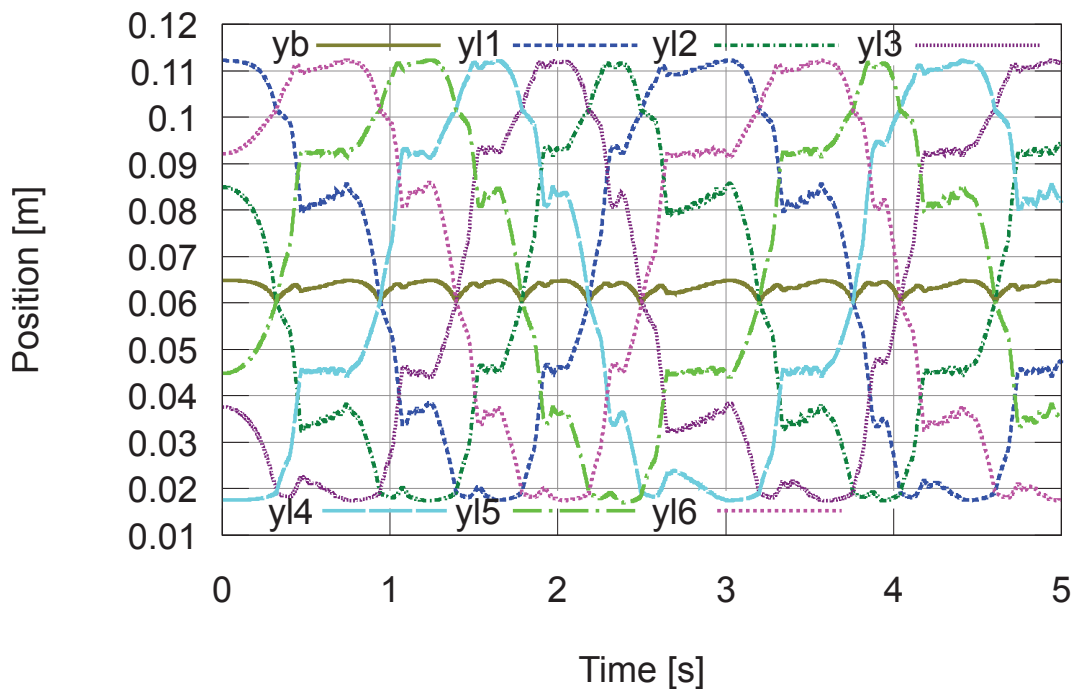


図 4.8: 胴体と各脚部の Y 軸方向の位置 (y_b : 胴体, y_{lj} : 第 j 脚部). 最下点にある脚部が定期的に切り替わっていることから, 6 脚ロボットが支持脚を交換しながら回転していることがわかる.

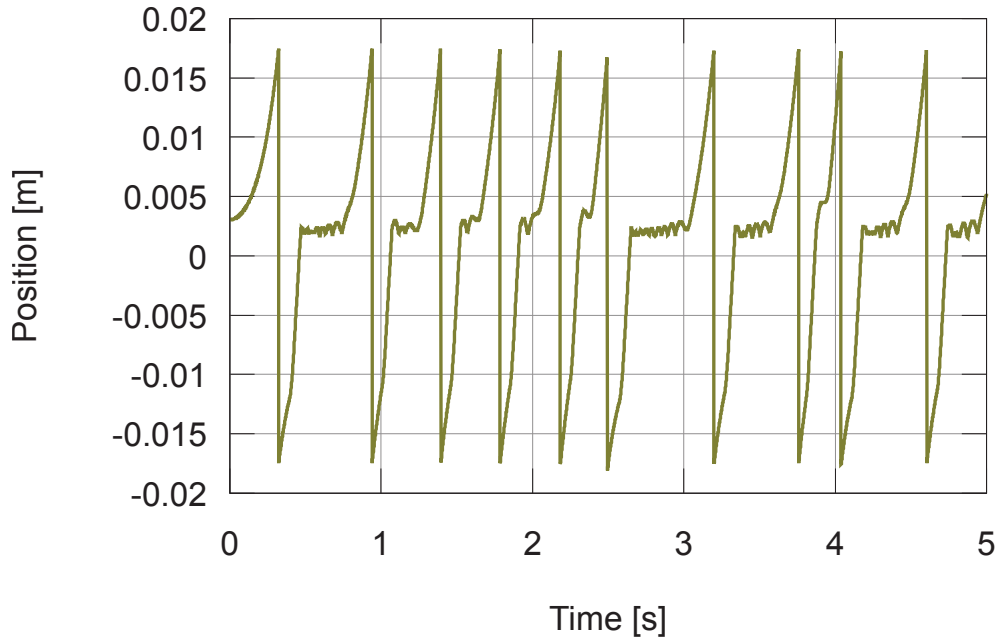


図 4.9: ロボットの水平方向の重心位置. ロボットの重心は支持脚交換時から前方に移動しているが, 支持脚を初期位置に戻す動作のため, $X_g = 2.00 \times 10^{-3}$ の周りで前進後退を繰り返している.

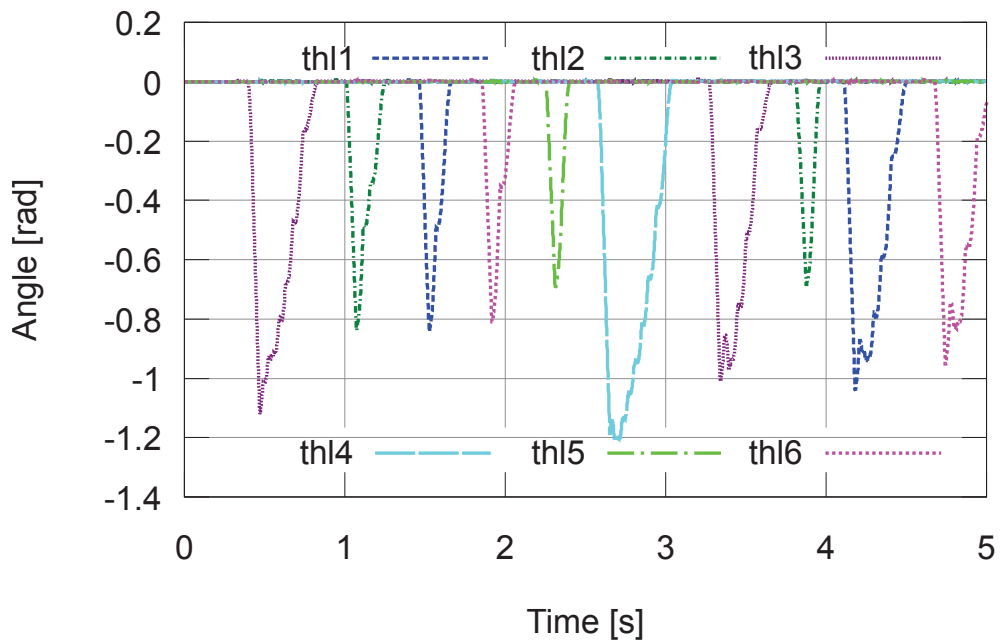


図 4.10: 各脚部の回転角 (th l_j : 第 j 脚部). 支持脚となった脚部が, $X_g \leq 2.00 \times 10^{-3}$ を満たすときに, エネルギー回復動作のため負方向に回転している. その後, 支持脚は初期位置に引き戻されている.

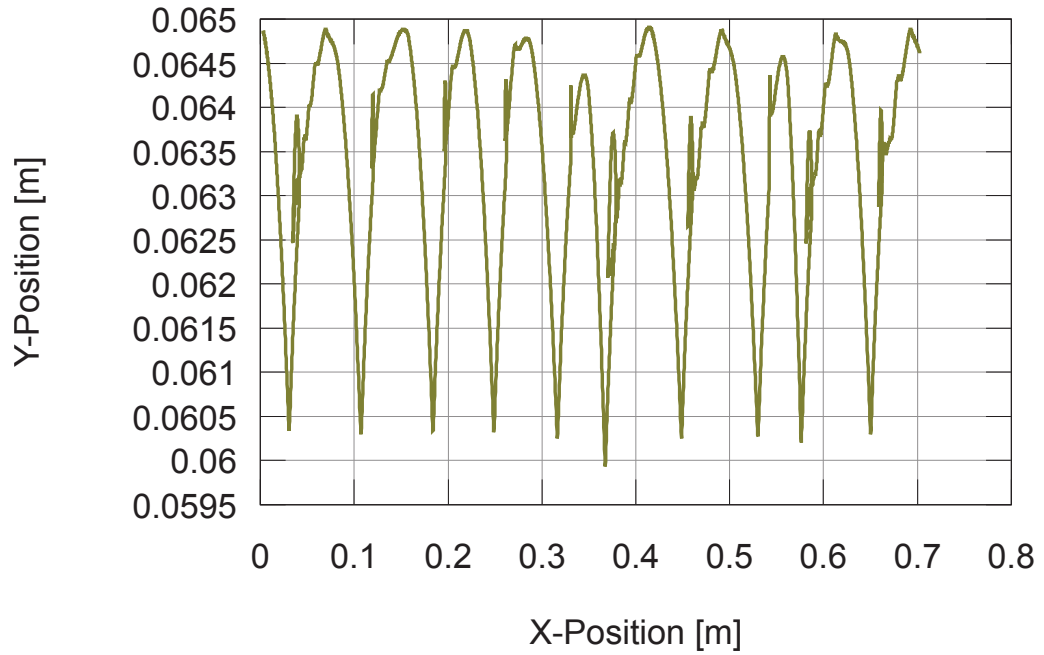


図 4.11: 胴体の二次元平面上の位置. 胴体は上下に移動しながら正方向に進んでいる. 進行距離が変わらず高さのみが変化している部分で, 支持脚を初期位置に戻す動作が行われている.

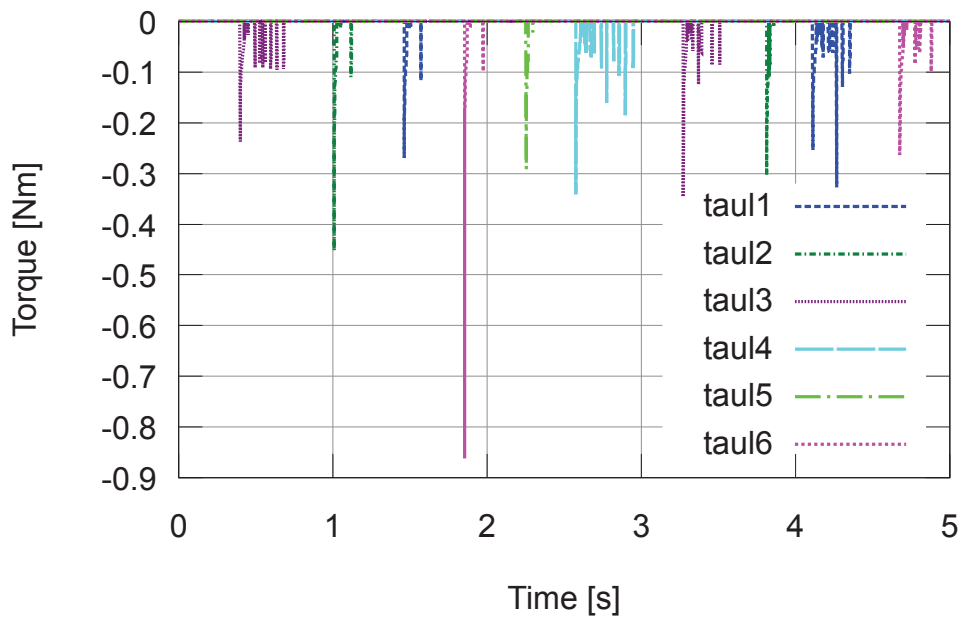


図 4.12: エネルギー補償制御による入力トルク (τ_{aulj} : 第 j 脚部). 地面との衝突が発生してから $X_g \leq 2.00 \times 10^{-3}$ を満たしている間に, 負の値の関節トルクが支持脚に入力されている. 支持脚を初期位置に戻すときには, ロボットの重心が接地点よりも後方に移動することが抑制するために, 小刻みに入力トルクが発生している.

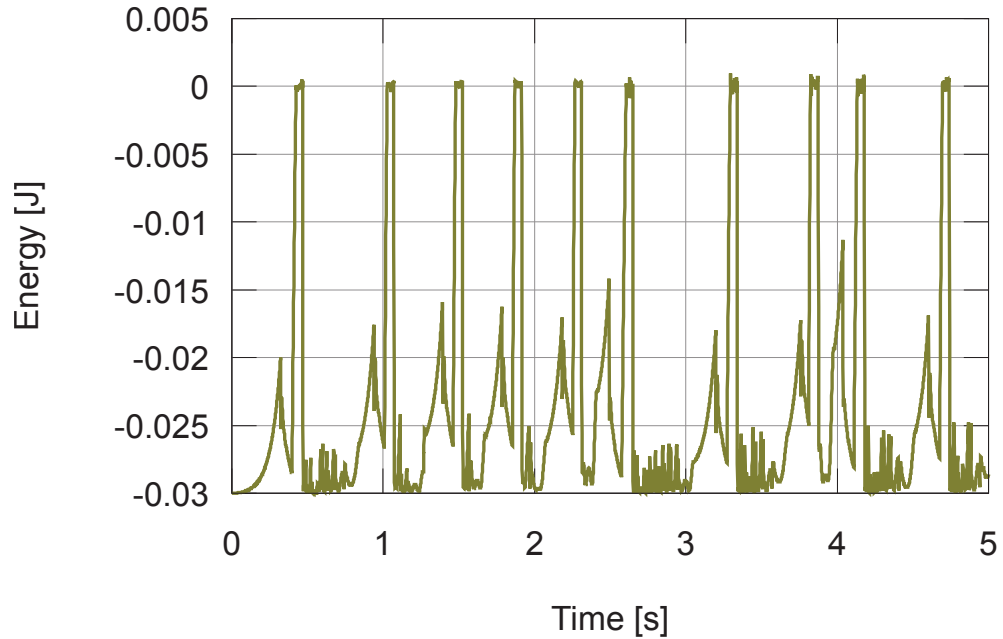


図 4.13: 6脚ロボットの運動エネルギーと目標エネルギーの差. エネルギー回復動作により, 運動エネルギーと目標エネルギーの差が0以上になっている.

きに支持脚の関節を負方向に回転させることで重心を前方に移動させ, その範囲を超えたら, 重心位置が接地点よりも後方に移動しないようにしながら支持脚を初期位置に戻していることがわかる. さらに, この支持脚を初期位置に戻す動作は, 支持脚交換までに終了していることがわかる. このように, ロボットは提案した回転移動法を再現できている. 回転移動時の胴体の2次元平面上に示した軌跡は, 図4.11のように, 上下に変化しながら正方向に進んでいくものとなっている. この軌跡において, 進行距離が変わらず高さのみが変化している部分がある. このとき, 6脚ロボットは支持脚を初期位置に戻す動作を行っている.

図4.12より, 地面との衝突が発生してから $X_g \leq 2.00 \times 10^{-3}$ を満たしている間に, 負の値の関節トルクが支持脚に入力されていることが確認できる. この入力により, 図4.13のように, ロボットの運動エネルギーと目標エネルギーの差が0以上に維持されている. さらに, 支持脚を初期位置に戻すときには, ロボットの重心が接地点よりも後方に移動することが抑制されている.

以上の結果より, エネルギー補償制御系を用いて, ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットによる回転移動を実現できていることが確認できた. しかし, 図4.10や図4.11のように, 脚部の回転や胴体の動きが周期的な軌道に収束していないため, この回転移動は不安定なものになっていると考える. この原因としては, 提案した回転移動法が, 支持脚交換後にロボットの重心が接地点よりも前方に移動するための運動エネルギーを補償するようなものとなっており, 支持脚を初期位置に戻すときのエネルギー状態や支持脚交換時のエネルギー損失を考慮していないことが挙げられる. そのため, より安定した回転移動を実現するためには, 回転移動方法の検討や, 支持脚の引き戻し動作時のエネルギー状態, 支持脚交換時のエネルギー損失の影響の検証をする必

要がある。

4.5 まとめ

本章では、ホイール・スパイダーから着想を得た回転移動をホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットにより平坦な地面上で実現するための制御アプローチを示した。そのために、6脚ロボットの機構として、脚部に平行リンク機構を用いたデザインを提案した。その回転移動方法としては、支持脚を回転させてロボットの重心を前方に移動させるようなものを提案した。そして、この回転移動方法を実現するために、ホイール・スパイダーの回転移動の特徴を取り入れて、3章と同じ方法で、6脚ロボットによる回転移動のモデルを構築し、エネルギー損失を補償することによりその方法を達成する制御系を設計した。その後、提案した制御系を用いて回転移動のシミュレーションを行い、結果として6脚ロボットによる平坦な地面での回転移動を実現できた。しかし、脚部の回転や胴体の動きが周期的な軌道に収束せず、回転移動は不安定なものとなっている。結論として、より安定した回転移動のためには回転移動方法の修正や回転移動全体を通したエネルギー状態の検証が必要ではあるが、提案した回転移動方法と制御系は、ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットによる回転移動の実現に有効あるといえる。

5. 結論

本研究では、歩行移動と回転移動を行えるクモの運動能力に着想を得た構造可変多脚ロボットを具体的な例として、生物から着想を得た運動を達成するためのモデル構築と制御系設計を行うことを目的とし、生物の運動の特徴を取り入れたモデル構築と制御系設計を通して、その特徴を生かすことの有効性を確認した。以下に、本研究の総論と各論を示す。

5.1 総論

本研究では、クモの運動能力に着想を得た2種類の構造可変多脚ロボットを具体的な例として、これらのロボットで継続的な回転移動を達成するためのモデル構築と制御系設計を示した。モデル構築では、それぞれのクモの回転移動の特徴を取り入れた動的モデルを構築した。このとき、多脚ロボットの回転形態モデルの運動方程式を導出した後、地面との衝突や接触による拘束力を加え、地面との衝突による不連続な速度変換を考慮することで、多脚ロボットによる回転移動モデルの運動方程式を導出した。制御系設計では、構築したモデルに基づき、クモの回転移動から得られた知見を生かして、ロボットの回転移動により失われたエネルギーを補償する制御系を設計した。この設計には、クモによる回転移動が瞬間的な入力を利用した周期的な運動であるということに注目し、同様の周期的な運動であるヨーヨーの上下運動操作の制御アプローチを応用している。この制御系の有効性検証のためにシミュレーションを行い、その結果として回転移動が達成されていることを確認した。結論として、本研究では、生物の運動の特徴を取り入れたモデル構築と制御系設計を行い、その特徴を生かすことの有効性を確認できた。このアプローチは、本研究で対象とした2種類の回転移動に対して同様に利用できていることから、その他の運動の実現にも応用できる可能性があると考えられる。

5.2 各論

各章の目的に対する結論を以下に示す。

5.2.1 2章：ヨーヨー・アーム統合モデルに基づくアーム型ロボットによる周期的なヨーヨー操作の制御

2章では、グラビティ・プルと呼ばれるヨーヨーの上下運動を繰り返す操作を1リンクアームで実現するための制御アプローチを示している。まず、ヨーヨーとアームの相互干渉を捉えるために、ヨーヨー・アーム統合モデルを構築している。これらのモデルの物理パラメータは計測と同

定により決定されている。次に、構築したモデルをヨーヨーと線形化したアームの統合モデルに変形し、ヨーヨーの上下運動中に失われたエネルギーを補償する制御系を設計している。最後に、設計した制御系を用いて、グラビティ・プルのシミュレーションを行っている。その結果、1リンクアームによる引上げ動作でヨーヨーのエネルギーを回復することにより、ヨーヨーの回転と上下運動が周期的な軌道に収束するグラビティ・プルを達成できることが確認できている。結論として、提案したエネルギー補償制御系は持続的なグラビティ・プルを実現するのに有効であるといえる。

5.2.2 3章：アシダカグモ型構造可変4脚ロボットによる回転移動のモデル構築と制御系設計

3章では、アシダカグモの1種から着想を得た回転移動をアシダカグモ型構造可変4脚ロボットにより実現するための制御アプローチを示している。そのために、アシダカグモの回転移動の特徴を取り入れて、4脚ロボットの回転形態モデルの運動方程式を導出した後、地面との衝突や接触による拘束力と、地面との衝突による不連続な速度変換を考慮することで、4脚ロボットによる回転移動モデルの運動方程式を導出している。その後、前述のモデルから変換した、支持脚の接地点を基準としたモデルを利用して、ロボットの力学的エネルギーの関係を求めている。それをもとに、アシダカグモの回転移動から得られた知見を生かして、回転移動により失われたエネルギーを補償する制御系を設計している。この制御系を用いて4脚ロボットによる回転移動のシミュレーションを行い、その結果から、エネルギー回復動作を行うことにより、持続的な回転運動を達成できることを確認している。結論として、アシダカグモの回転移動の特徴を取り入れたエネルギー補償制御系は、アシダカグモ型構造可変4脚ロボットによる持続的な回転移動の実現に有効であるといえる。

5.2.3 4章：ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットによる回転移動のモデル構築と制御系設計

4章では、ホイール・スパイダーから着想を得た回転移動をホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットにより平坦な地面上で実現するための制御アプローチを示している。そのために、6脚ロボットの機構として、脚部に平行リンク機構を用いたデザインを考案し、回転移動法として、支持脚を回転させてロボットの重心を前方に移動させるような方法を提案している。そして、この回転移動方法を実現するために、3章と同じ方法で、6脚ロボットによる回転移動のモデルを構築し、エネルギー損失を補償することによりその方法を達成する制御系を設計している。制御系の有効性はシミュレーションにより検証されており、提案した制御系により6脚ロボットによる平坦な地面での回転移動を実現できるという結果が得られている。しかし、脚部の回転や胴体の動きが周期的な軌道に収束せず、回転移動は不安定なものとなっている。結論として、より安定し

た回転移動のためには回転移動方法の修正や回転移動全体を通したエネルギー状態の検証が必要ではあるが、提案した回転移動方法と制御系は、ホイール・スパイダー型構造可変6脚ロボットによる回転移動の実現に有効あるといえる。

参考文献

- [1] J.-A. Meyer and A. Guillot, “Biologically inspired robots,” in *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2008, pp. 1395–1422.
- [2] X. Deng, L. Schenato, W. C. Wu, and S. S. Sastry, “Flapping flight for biomimetic robotic insects: Part i-system modeling,” *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 4, pp. 776–788, 2006.
- [3] K. D. Jones, C. J. Bradshaw, J. Papadopoulos, and M. F. Platzer, “Development and flight testing of flapping-wing propelled micro air vehicles,” 2003.
- [4] H.-T. Lin, G. G. Leisk, and B. Trimmer, “Goqbot: a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot,” *Bioinspiration & biomimetics*, vol. 6, no. 2, p. 026007, 2011.
- [5] F. Enner, D. Rollinson, and H. Choset, “Simplified motion modeling for snake robots,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*. IEEE, 2012, pp. 4216–4221.
- [6] J. R. Rebula, P. D. Neuhaus, B. V. Bonnlander, M. J. Johnson, and J. E. Pratt, “A controller for the littledog quadruped walking on rough terrain,” in *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*. IEEE, 2007, pp. 1467–1473.
- [7] F. Li, G. Bonsignori, U. Scarfogliero, D. Chen, C. Stefanini, W. Liu, P. Dario, and X. Fu, “Jumping mini-robot with bio-inspired legs,” in *Robotics and Biomimetics, 2008. ROBIO 2008. IEEE International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 933–938.
- [8] Y. S. Song and M. Sitti, “Surface-tension-driven biologically inspired water strider robots: Theory and experiments,” *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 3, pp. 578–589, 2007.
- [9] A. J. Ijspeert, A. Crespi, D. Ryczko, and J.-M. Cabelguen, “From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model,” *science*, vol. 315, no. 5817, pp. 1416–1420, 2007.

- [10] J. Ayers and J. Witting, “Biomimetic approaches to the control of underwater walking machines,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, no. 1850, pp. 273–295, 2007.
- [11] D. Barrett, M. Triantafyllou, D. Yue, M. Grosenbaugh, and M. Wolfgang, “Drag reduction in fish-like locomotion,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 392, pp. 183–212, 1999.
- [12] P. Liljebäck, K. Y. Pettersen, and Ø. Stavdahl, “A snake robot with a contact force measurement system for obstacle-aided locomotion,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*. IEEE, 2010, pp. 683–690.
- [13] M. Mori and S. Hirose, “Locomotion of 3d snake-like robots-shifting and rolling control of active cord mechanism acm-r3,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 18, no. 5, p. 521, 2006.
- [14] D. P. Tsakiris, M. Sfakiotakis, A. Menciassi, G. La Spina, and P. Dario, “Polychaete-like undulatory robotic locomotion,” in *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*. IEEE, 2005, pp. 3018–3023.
- [15] G. La Spina, M. Sfakiotakis, D. P. Tsakiris, A. Menciassi, and P. Dario, “Polychaete-like undulatory robotic locomotion in unstructured substrates,” *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 6, pp. 1200–1212, 2007.
- [16] X. Chen, L.-q. Wang, X.-f. Ye, G. Wang, and H.-l. Wang, “Prototype development and gait planning of biologically inspired multi-legged crablike robot,” *Mechatronics*, vol. 23, no. 4, pp. 429–444, 2013.
- [17] J. E. Clark, J. G. Cham, S. Bailey, E. M. Froehlich, P. K. Nahata, R. J. Full, M. R. Cutkosky, *et al.*, “Biomimetic design and fabrication of a hexapedal running robot,” in *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, vol. 4. IEEE, 2001, pp. 3643–3649.
- [18] Y. Fukuoka, H. Kimura, and A. H. Cohen, “Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain based on biological concepts,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 22, no. 3-4, pp. 187–202, 2003.
- [19] H. Kimura, Y. Fukuoka, and A. H. Cohen, “Biologically inspired adaptive walking of a quadruped robot,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, no. 1850, pp. 153–170, 2007.

- [20] R. S. King, *BiLBIQ: A Biologically Inspired Robot with Walking and Rolling Locomotion*. Springer, 2013.
- [21] F. E. Fish, “Limits of nature and advances of technology: What does biomimetics have to offer to aquatic robots?” *Applied Bionics and Biomechanics*, vol. 3, no. 1, pp. 49–60, 2006.
- [22] Z. Chen, S. Shatara, and X. Tan, “Modeling of biomimetic robotic fish propelled by an ionic polymer–metal composite caudal fin,” *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 15, no. 3, pp. 448–459, 2010.
- [23] J. H. Long Jr, J. Schumacher, N. Livingston, and M. Kemp, “Four flippers or two? tetrapodal swimming with an aquatic robot,” *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 1, no. 1, p. 20, 2006.
- [24] X. Deng, L. Schenato, and S. S. Sastry, “Flapping flight for biomimetic robotic insects: Part ii-flight control design,” *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 4, pp. 789–803, 2006.
- [25] A. Sinha, N. Tan, and R. E. Mohan, “Terrain perception for a reconfigurable biomimetic robot using monocular vision,” *Robotics and Biomimetics*, vol. 1, no. 1, pp. 1–11, 2014.
- [26] R. H. Armour and J. F. Vincent, “Rolling in nature and robotics: a review,” *Journal of Bionic Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 195–208, 2006.
- [27] K. Hashimoto and T. Noritsugu, “Modeling and control of robotic yo-yo with visual feedback,” in *Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*, vol. 3. IEEE, 1996, pp. 2650–2655.
- [28] H.-L. Jin and M. Zackenhause, “Yoyo dynamics: Sequence of collisions captured by a restitution effect,” *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, vol. 124, no. 3, pp. 390–397, 2002.
- [29] H.-L. Jin and M. Zacksenhouse, “Robotic yoyo playing with visual feedback,” *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 4, pp. 736–744, 2004.
- [30] L. Žlajpah and B. Nemec, “Control strategy for robotic yo-yo,” in *Intelligent Robots and Systems, 2003.(IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 1. IEEE, 2003, pp. 767–772.
- [31] L. Žlajpah, “Robotic yo-yo: modelling and control strategies,” *Robotica*, vol. 24, no. 02, pp. 211–220, 2006.

- [32] K. Mombaur and M. N. Sreenivasa, “Hrp-2 plays the yoyo: From human to humanoid yoyo playing using optimal control,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*. IEEE, 2010, pp. 3369–3376.
- [33] T. Nemoto, T. Sakuma, M. Iwase, and S. Hatakeyama, “Realization of yoyo operation called long-sleeper by robot arms,” in *IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2011, pp. 265–270.
- [34] T. Yoshioka, T. Sakuma, T. Nemoto, and M. Iwase, “Realization of robotic yoyo operation based on analysis of human motion,” in *Mechatronics (MECATRONICS), 2012 9th France-Japan 7th Europe-Asia Congress on and Research and Education in Mechatronics (REM), 2012 13th Int’l Workshop on*. IEEE, Nov 2012, pp. 299–306.
- [35] Y. Noguchi, M. Iwase, S. Hatakeyama, and M. Izutsu, “A yoyo trick realized by parallel-link manipulator,” in *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE*. IEEE, 2013, pp. 4049–4054.
- [36] S. Kojima, Y. Fukuda, M. Iwase, T. Sadahiro, S. Hatakeyama, and N. Miyatake, “Modeling and control of dynamic yoyo with pulling back motion,” in *Autonomous Robots and Agents, 2009. ICARA 2009. 4th International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 545–548.
- [37] S. Kojima and M. Iwase, “Yo-yo motion control based on impulsive luenberger observer,” in *Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011 50th IEEE Conference on*. IEEE, 2011, pp. 5323–5328.
- [38] H. Ohta, M. Yamakita, and K. Furuta, “From passive to active dynamic walking,” *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 11, no. 3, pp. 287–303, 2001.
- [39] K. Arczewski and W. Blajer, “A unified approach to the modelling of holonomic and non-holonomic mechanical systems,” *mathematical modelling of systems*, vol. 2, no. 3, pp. 157–174, 1996.
- [40] W. Blajer, “A geometrical interpretation and uniform matrix formulation of multibody system dynamics,” *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, vol. 81, no. 4, pp. 247–259, 2001.
- [41] H. Ohsaki, M. Iwase, and S. Hatakeyama, “A consideration of nonlinear system modeling using the projection method,” in *SICE, 2007 Annual Conference*. IEEE, 2007, pp. 1915–1920.

謝辞

本論文をまとめるに当たり、多くの方々よりご指導・ご助力を賜りました。この場を借りて感謝の意を示させていただきます。東京電機大学 岩瀬将美准教授には、研究を進めるうえで数えきれないほどのご指導・ご助言をいただきました。著者が難しい問題に直面した際には、常に適切なアドバイスをいただきました。心より深く感謝申し上げます。Singapore University of Technology and Design Mohan Rajesh Elara 講師には、3, 4章のアイデアを示唆していただき、また基本的な方向性を示していただきました。さらには、研究者としてのキャリアアップの機会を数多くいただき、充実した研究生活を送ることができました。心より感謝申し上げます。東京電機大学 畠山省四朗教授には、研究の進め方だけでなく、物事に取り組む姿勢や考え方、研究者としてあるべき人間性など、多くのことをご指導いただきました。心より深く感謝申し上げます。東京電機大学 井筒正義助教には、問題のとらえ方や制御理論のもととなる考え方など多くのご助言、多くの激励をいただきました。心より深く感謝申し上げます。東京電機大学 石川潤教授、釜道紀浩准教授には、本研究に対して数多くの貴重なアドバイスをいただきました。心より感謝申し上げます。東京電機大学 中村明生准教授には、研究者としての心構えや社会人としての在り方をご教示いただきました。感謝申し上げます。畠山研究室、岩瀬研究室の皆様、さらには Singapore University of Technology and Design の皆様のおかげで、有意義な研究室生活を過ごすことができました。感謝申し上げます。最後に、惜しみない援助をしていただいた両親に感謝申し上げます。