

平成18年9月
博士（工学）学位論文

回転関節を有する3リンクー脚ロボットの跳躍に関する研究

Study on jumping motion of a three-link robot with revolute joints

平成18年6月16日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻

学籍番号 1076031

中浜 昌文

Masafumi Nakahama

目次

第1章 緒論	1
1.1 緒言	1
1.2 従来の研究	3
1.3 本研究の目的と概要	5
第2章 一脚ロボットの概要	7
2.1 緒言	7
2.2 基本構造	8
2.3 跳躍のパターン	10
2.3.1 前方跳躍	10
2.3.2 上方跳躍	11
2.4 結言	13
第3章 数値解析および評価手法	14
3.1 緒言	14
3.2 解析方法	15
3.3 エネルギーの計算	17
3.3.1 エネルギー種類	17
3.3.2 入力エネルギー，位置エネルギー， 運動エネルギーの計算	17
3.3.3 衝突と摩擦による消散エネルギー	18

3.4.	衝突現象の計算精度の確認	20
3.4.1	並進での塑性衝突	20
3.4.2	回転と並進が混在する系での衝突	22
3.5	結言	26
第4章	前方跳躍現象の解析と評価	27
4.1	緒言	27
4.2	制御法	29
4.3	解析モデルと評価	31
4.4	シミュレーションおよびパラメータの影響度の 検討結果	33
4.4.1	シミュレーションの概要	33
4.4.2	跳躍開始角度の影響	36
4.4.3	駆動長さによる影響	38
4.4.4	足の形状による影響	40
4.4.5	連続跳躍	44
4.5	結言	46
第5章	上方跳躍現象の解析と評価	47
5.1	緒言	47
5.2	制御法	49
5.3	解析モデル	51

5.4	エネルギーによる評価	54
5.4.1	総合エネルギー，有効なエネルギー， 無駄なエネルギー	54
5.4.2	総合エネルギーと初期高さ	58
5.5	シミュレーションおよびパラメータの 影響度の検討	62
5.5.1	計算条件	62
5.5.2	結果の検討	63
5.6	付加ばねの効果	91
5.7	結言	94
 第6章 結論		 97
 参考文献		 104
 謝辞		 112

第 1 章 緒論

1.1 緒言

近年，二足歩行のできる人間型ロボットが多数発表され^{[1]-[6]}他，その中には走行できるものも報告（ホンダ^[4]，ソニー^[5]，産総研^[6]）されている．しかし，現状の人間型走行ロボットは，両足が同時に浮いている時間は非常に短く，人間の走行と比べれば速度も遅い．人間の走行に近いより躍動的な走行をするには立脚期（接地側）の脚が胴体やもう一方の脚を支えるだけでなくそれらを上方に素早く跳躍させる能力が必要と考えられる．十分大きく跳躍させるためには，ロボットの重量に比べて十分大きい駆動力が必要となる．外部から動力の供給や制御を行うのであればロボットの本体はできるだけ軽量化し，相対的に十分大きい駆動力を与えることは可能と考えられるが，本研究では，自立したロボットを考えているため，市販されているモータやバッテリーを用いるのであれば，人間型ロボットを大きく跳躍させることは困難と考えられる．

本研究では，片足で胴体およびもう一方の脚の重量を大きく跳躍させるのは困難であっても，胴体やもう一方の脚を取り去れば，負荷は大きく減少することに着目し，市販の部品により製作可能な一脚のロボットを考え，それにより大きな跳躍現象について検討する．

一脚ロボットについての研究は，美多ら^[7]による動物の脚構造をモデルとした脚にバランスをとるためと思われる胴体を載せた一脚ロボットに関する研究や，M.H. Raibert^[8]の研究に代表されるような一脚ホッピングロボットに関する研究などがおこなわれている^{[9]-[12]}．また，人間の脚を考慮したものも研究されている^[13]他．しかし，転倒防止のための支持構造を有していることや，動力源や制御用コンピュータをロボットの

外部に設置していることからいろいろな制約を受けるものと考えられる。また、これらは連続跳躍向きに製作されていて、停止状態から走行・跳躍、走行状態から停止は困難であると考えられる。

本研究では、支持構造がなく、動力源やコンピュータを内蔵した一脚ロボット^[16]を取り上げ、前方および上方への跳躍について、市販レベルのモータのトルクの範囲内で跳躍の距離や高さを増やすことを優先したモデルを用いて数値シミュレーションにより検討する。また、現状の人間型ロボットでは、足裏の角度と床面の角度の関係が走行中にあまり変化せず、足裏の角度はほとんど水平を保ったままで走行している^{[4]-[6]}。したがって、足関節で蹴り、ストライドを伸ばすという意味での活用はされていないので、前方跳躍では、足関節をできるだけ跳躍に活用することを考える。また、上方跳躍では、姿勢の制御よりも高く飛ぶことを優先するモータの駆動を考える。

1.2 従来の研究

人間型ロボットの研究は、近年大きく進み国家プロジェクト[6][17]でもとりあげられるなど多くの研究が報告されている。また、最近開発された人間型ロボットでは、走行も可能なものが報告されている[4]-[6]。しかし、走行可能といっても、まだまだ人間と比べれば、走行速度は遅く、跳躍している時間やストライドは、まだまだ本格的な走行と言えるレベルには達していない。また、現状の人間型ロボットの走行の様子を観察すれば、走行時でも足裏と床面の角度の関係はあまり変わらず、足裏は、ほとんど水平を保ったままである[4]-[6]。このことから足関節は姿勢を安定に保つなど有効には活用されているとは思われるが、床面を蹴り、ストライドを大きくし、走行速度を加速するまでには至っていないと考えられる。また、人間型ロボットはエネルギー消費の面からもまだまだ課題が多く、多くのエネルギーを使用するためには重いバッテリーが必要であり、高速走行や跳躍には障害になる要素の一つであると考えられる。エネルギー消費の少ないロボットとしては、受動歩行[18]-[21]他など多くの研究がなされているが、高速走行や跳躍などについては、今後の課題であると考えられる。

一方、人間の跳躍現象については、スポーツ工学の分野で多くの研究がなされている。跳躍現象を複数のカメラで撮影して得られる3次元挙動と、床反力の計測を行い、その結果から逆動力学を用いて、関節のモーメントを推定することなどが行なわれており[22]-[27]他、幅跳びや垂直飛びなどに関しても研究が行われている[26]-[32]。本研究の上方跳躍のモデルに近い垂直飛びでは、膝関節の寄与が大きいとされているが、足関節や股関節による影響があることが報告されている[33]。また、幅跳びの場合にも、3つの関節のモーメントが現象に影響しているが、本研究のモデルでは考慮されていない股関節モーメントの影響も大きいとされている。したがっ

て、現象としては、本研究のモデルと共通点は存在するものの直接比較することは難しい。

一脚ロボットに関する研究としては、美多ら^[7]による動物の脚構造をモデルとした脚にバランスをとるためと思われる胴体を載せた一脚ロボットに関する研究や、M.H. Raibert^[8]の研究に代表されるような一脚ホッピングロボットに関する研究などがおこなわれている^{[9]-[12]}。また、人間の脚を考慮したものも研究されている^[13]他、しかし、転倒防止のための支持構造を有していることや、動力源や制御用コンピュータをロボットの外部に設置していることからいろいろな制約を受けるものと考えられる。また、これらは連続跳躍向きに製作されていて、停止状態から走行・跳躍、走行状態から停止は困難であると考えられる。

ほかには、アクロロボット^{[34]- [38]}やシリアルリンク^{[39]- [41]}と呼ばれるロボットが多く研究されている。

1.3 本研究の目的と概要

本研究では、片足で胴体およびもう一方の脚の重量を大きく跳躍させるのは困難であっても、胴体やもう一方の脚を取り去れば、負荷は大きく減少することに着目し、市販の部品により製作可能な一脚のロボットを考え、それにより大きな跳躍現象について検討する。特に、姿勢の制御よりも、市販レベルの現実的なモータのトルクを用いて、より遠くへ、あるいはより高く飛ぶことを意識して、前方跳躍と上方跳躍の2つのパターンを取り上げる。

前方跳躍については、現状の人間型ロボットの走行においてストライドを伸ばすことにあまり活用されていない足関節に着目し、そのトルクを最大限活かす跳躍を考える。また、そのためには、駆動力はなくても足指関節が存在することが、跳躍に大きく影響すると考えその効果についても検討する。さらに、できるだけエネルギー消費の少ない跳躍を考える上では、着地時のエネルギー消散が少ないほうが望ましいと考え、足裏の形状についても検討を行なう。

一方、上方跳躍は、高く飛ぶには、系に流入するエネルギーによりその上限が抑えられてしまうことに着目し、跳躍高さの潜在能力を示す総合エネルギーを定義し、与えられた総合エネルギーを有効なエネルギーにすることが跳躍高さの増加につながるとして検討を行なう。また、跳躍高さの上限を制約する総合エネルギーを確保するために、モータトルクによる流入エネルギーを十分確保することを優先して考え、跳躍姿勢の改善には初期条件で対応することを考える。

以下の第2章では、本研究で用いる一脚ロボットの概要と、2つの跳躍のパターン、ならびにそれぞれのパターンでのシミュレーションの狙いを

示している。

第3章では、本研究のシミュレーションに用いる解析手法、手法の基本的な精度の確認、結果評価方法について示している。本研究で、使用しているような汎用の剛体マルチボディの解析ソフトウェアを用いて計算する場合には、衝突などの現象を含む場合には、場合によっては、大きい誤差が発生する可能性があるため、理論解がわかっている問題での予備計算を行い、衝突の計算の精度の確認を行なう。また、第5章で行なう、上方跳躍の評価や現象の理解を深めるために提案しているエネルギーによる評価法について述べる。

第4章では、前方跳躍に関する検討結果を示す。ねらい、モデル化方法、制御方法について示した後、特に足関節を十分に用いた条件でのシミュレーションにより、跳躍のタイミングや、跳躍のタイミングに至るまでの状況、足指関節の形状、足底の形状などの跳躍に対する影響についての検討結果を示す。

第5章では、上方跳躍に関する検討結果を示す。モデル化法、制御方法について示した後、エネルギーを用いた評価について具体的な説明を行なう。その後で、跳躍高さの確保を優先した制御法で駆動した場合の数値シミュレーションを行い、初期姿勢や足裏と床面の間の摩擦係数が、跳躍高さ、運動の軌跡、総合エネルギー、有効エネルギー、無効エネルギーなどに影響しているかについて検討した結果を述べる。その後、跳躍高さの上限となっている総合エネルギーをモータトルクはそのまま大きくする方法として付加ばね^[42]が有効であることを示す。

第6章では、本研究の全体を総括した結論を示す。

第2章 一脚ロボットの概要

2.1 緒言

人間の走行や跳躍には、下肢だけではなく多くの部分の運動が寄与しているが、市販のモータでも跳躍が可能なように、跳躍させる質量を出来るだけ軽くして、十分な跳躍が可能なように、その下肢の一脚部分に相当する一脚ロボットについてその跳躍現象を検討する。

その形状としては、人間の平均的な下肢のサイズと相似な形状とし、2次元の3リンクで、足関節と膝関節に駆動力としてモータを取り付けている。また、跳躍の種類として、前方跳躍と上方跳躍の2種類について検討するが、前方跳躍の場合には、足の形状が、跳躍の距離や着地時の衝撃力やエネルギー消散に大きく影響すると考え、駆動力の存在しない足指関節も考慮している。

また、上下方向の2次元の跳躍として垂直飛びがあるが、その場合には、胴体とのジョイントである股関節や上肢の運動を考慮する必要があり、少なくとも1リンクと1つのモータが必要となるが、ここでは現象をできるだけ簡単化するために、3リンクの2モータとした。

2.2 基本構造

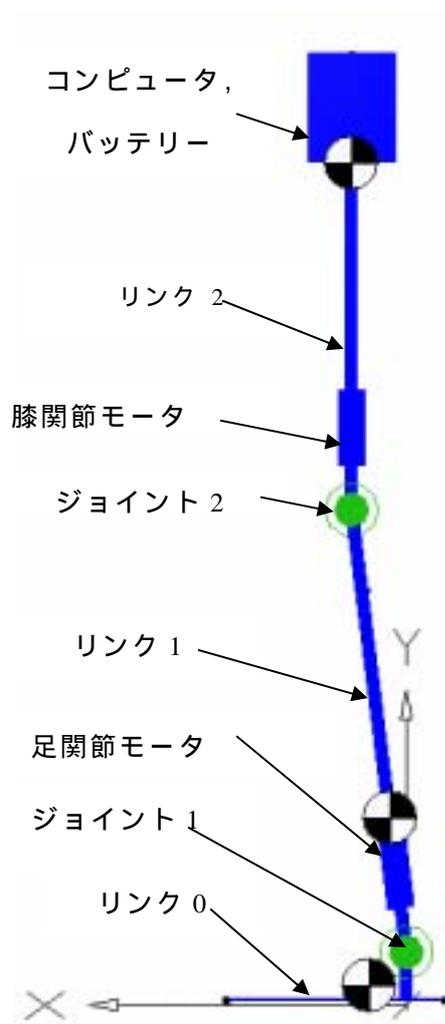


図 2.1 一脚ロボットの概要

数値シミュレーションに用いる一脚ロボットの概要を図 2.1 に示す。図のように人間の一脚に相当する部分を取り出した、垂直面で動作する 2 次元構造とし、リンク長は人間と比較しやすいように人間の平均的なリンク長にあわせている。また足関節（ジョイント 1）、および膝関節（ジョイント 2）の 2 箇所にジョイントを設け、3 リンク構造とする。シミュレーション結果に基づき実験装置を製作するので、質量などの大きさは、実験

装置に使用するバッテリーや制御用のコンピュータを想定して与えた。駆動は2つの関節のモータで行い、最大トルクは市販のモータで可能範囲想定した値を用いる。

各関節部には、可動域を設定し、回転部分が動作範囲の境界に衝突した場合には塑性衝突としてあつかう。

リンクの形状は、上方跳躍の場合には、すべてのリンクを直線としたが、前方跳躍の場合には、足の形状の影響を調べるため、図2.2のような足指関節の位置で角度を持っている形状についても計算を行う。

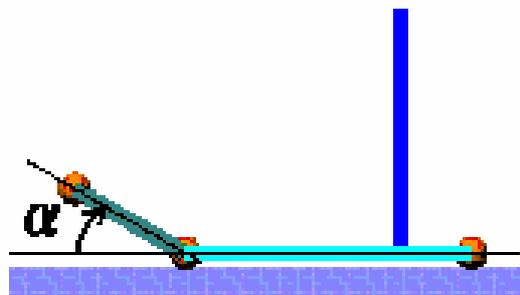


図2.2 足指関節の角度

2.3 跳躍のパターン

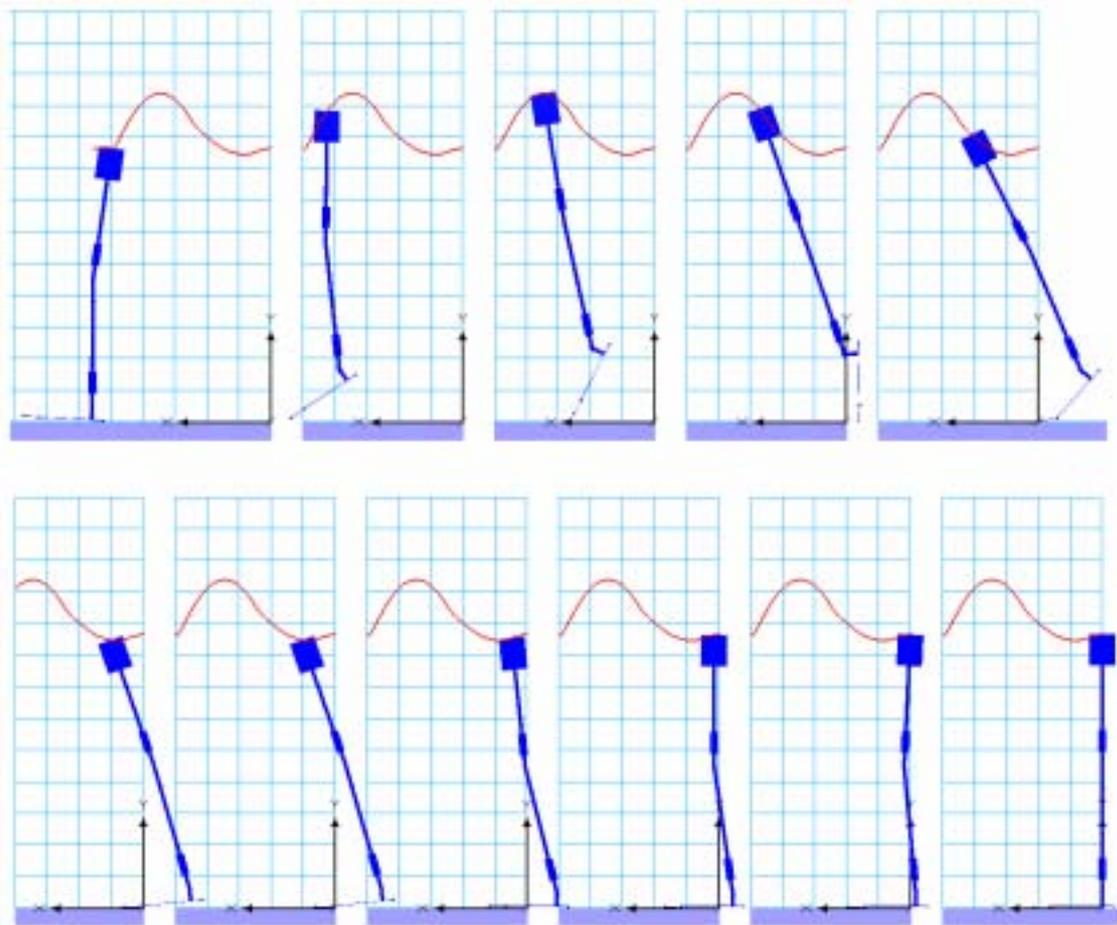


図 2.3 前方への跳躍

跳躍のパターンとしては，前方跳躍と上方跳躍の2種類を考える．

2.3.1 前方跳躍

人間型ロボットの走行では，走行中でも足裏と床面の角度はほとんど変わらず，ほぼ水平を保ったまま走行している[4]-[6]．足を水平に保ったままでは，足関節は，ストライドを伸ばし走行速度を上昇させることにほとんど寄与していない．本研究では，ストライドを伸ばすためには，足関節を有効に活用することを考え，跳躍時には足関節に大きいトルクを加えることを考える．また，跳躍現象をうまく行なうには，足指関節も重

要な役割を果たすと考え、足指関節の影響についても検討する。また、エネルギー消費の少ない効率的な走行や歩行を行なうには、エネルギーの消散をできるだけ抑える必要がある。本研究では着地時の足裏の形状がエネルギーの消散や衝撃力に影響するとして足裏の形状についても検討する。

人間の走行において、片足が地面と接している状態から、両足が地面と接触していない状態へ移行する場合には、それまでの走行方向の運動エネルギーと、立脚期の脚が地面と接触している部分を反力壁として関節トルクを作用させることによる入力エネルギーにより跳躍ができていると考えられる。一脚の場合には、二脚の場合と比べ運動の自由度が少ないことなど完全に二脚での運動を模擬することは難しいが、ある程度共通の部分があると考え、一脚ロボットによる前方への跳躍現象の数値シミュレーションを行い、各パラメータの影響について検討する。

2.3.2 上方跳躍

図 2.4 のような上方への跳躍は、走行時の運動とは異なるが、人間の基本動作として重要な要素の一つである。そこで、上方への跳躍については、足関節と膝関節に市販のモータで可能なトルクを与えた場合に、できるだけ高く跳躍することを考え、跳躍の高さにどのようなパラメータの影響が大きいかをエネルギーを用いて検討する。エネルギーは、モータから系に加えられる入力エネルギー、系の位置エネルギー、上下方向の運動エネルギー、水平方向、回転方向の運動エネルギー、衝突による消費エネルギー、摩擦によるエネルギーを考え、初期姿勢、摩擦係数、付加ばねなどの影響について検討する。そのなかで、潜在的なエネルギーである総合エネルギー、跳躍に有効な有効エネルギー、跳躍に役立たない無効エネルギーにわけて、エネルギーの観点も加えて検討する。また、制御の方法についても、姿勢のための制御よりも高さを優先する制御で検討を行なう。

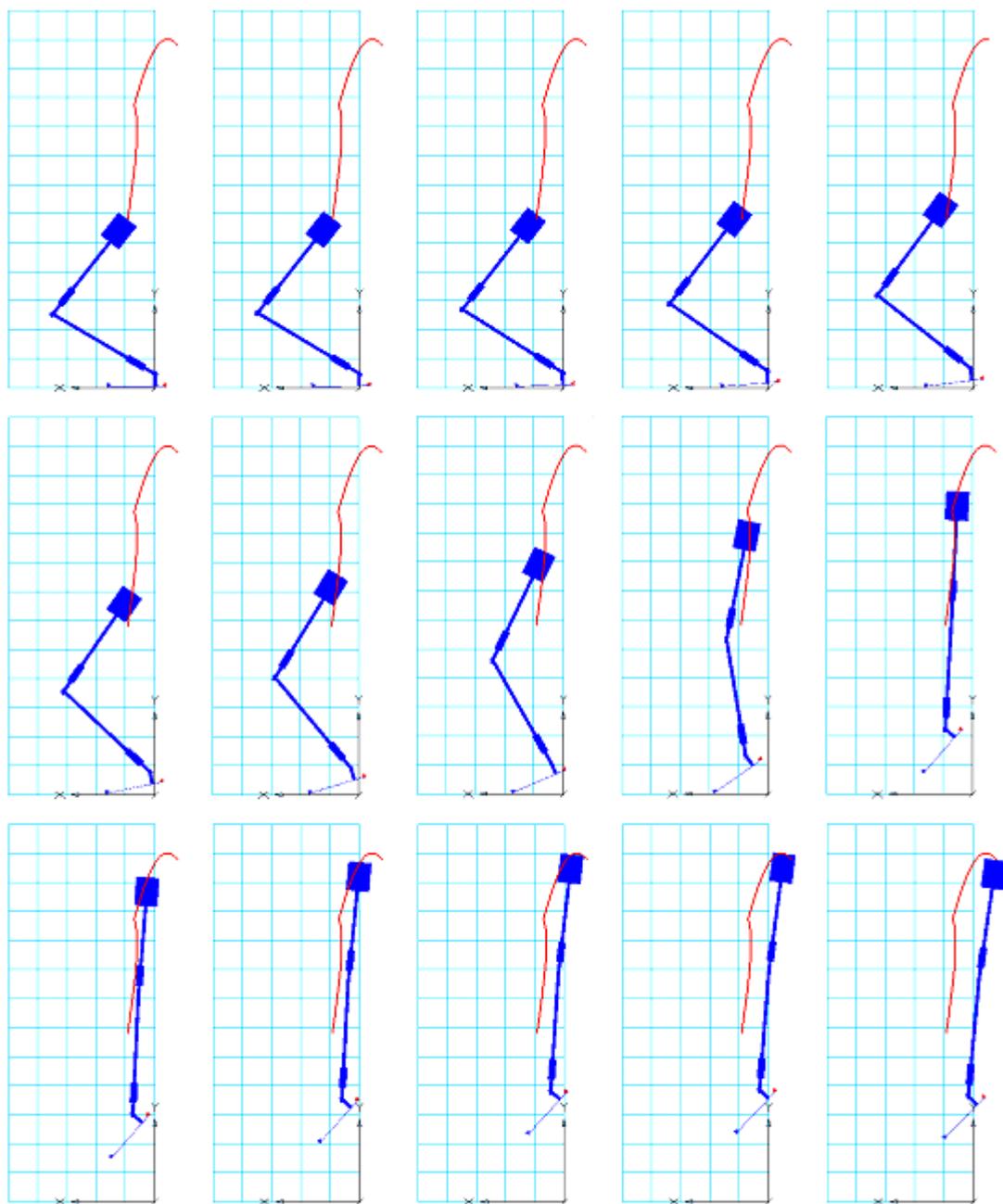


図 2.4 上方への跳躍

2.4 結言

前方への跳躍現象および上方への跳躍に関して，市販のモーターのレベルでより大きい跳躍数値を実現するために，胴体やもう一方の脚を省略した一脚のロボットに関して，3リンクとその結合部である膝関節，足関節に駆動源であるモータを取り付け，人間や人間型ロボットとくらべ，自由度が少ない構造ではあるが，簡単な構造でより大きい跳躍を検討可能な形状を提案した．

また，前方跳躍のモデルでは，現状の人間型ロボットの走行ではストライドを大きくするためにはあまり活用されていないと考えられる足関節をストライドを伸ばすためにできるだけ活用することを考え，そのために影響が大きいと考えられる足指関節（駆動源なし）や着地時のエネルギー消散に影響すると考えられる足裏の形状についても検討できるモデルを提案した．

上方への跳躍では，股関節のない二つの関節に与えるトルクのみで跳躍するモデルを提案した．走行時の運動とは異なるが，人間の基本動作として重要な要素の一つである．足関節と膝関節に市販のモータで可能なトルクを与えた場合に，できるだけ高く跳躍することを優先し，また，跳躍高さへの影響度を大きいかをエネルギーで評価可能なモデルとして提案した．

第3章 数値解析および評価手法

3.1 緒言

下肢を剛体リンクで表現し，汎用のマルチボディ解析ソフトで跳躍運動のシミュレーションを行なう．上方跳躍の場合には，エネルギーによる評価を行なうので，運動のシミュレーションを行なうとともにモータによる入力エネルギー，各剛体の運動エネルギーや位置エネルギー，また塑性衝突や滑りによる消散エネルギーを計算する．また，剛体マルチボディの解析では，衝突や摩擦などの計算では誤差が生ずる可能性が大きいので，そのような現象を使用する汎用のマルチボディ解析ソフトで，理論解が得られる問題を用いて，塑性衝突，偏心を考慮した塑性衝突に関して予備計算を行ない精度の確認を行なう．

3.2 解析方法

2個のジョイントと3個の剛体リンクからなるマルチボディダイナミクス部分は、汎用のマルチボディ解析ソフトである Visual Nastran 4D (vN4D) を用い、剛体リンクに加える力は Simulink5.0 で計算し、2つのソフトをリンクさせて計算した。vN4D は剛体のマルチボディ解析ソフトの WORKING MODEL と汎用の構造解析ソフトの一部の機能をあわせたものである。vN4D には直方体や球などの基本型のモデル作成する機能が有り、また、複雑な形は3次元キャドから即座にインテグレーション機能によりキャドデータを vN4D に取り込み、運動解析と応力解析ができる。部品を各種の拘束で結合してアセンブリを構築したモデルを用いた動的な運動解析ができるソフトである。

Simulink は制御工学などの分野で広く用いられている汎用のソフトウェアで、線形・非線形のシステムをブロック線図で構築して運動方程式や状態方程式を生成する機能を有しており、多くのマルチボディの解析ソフトは Simulink とリンクして使用できるようになっている。

今回研究に用いる回転関節を有する3リンク脚ロボットとして vN4D 内に構築した数値モデルは、リンクとリンクを1自由度のモータ付き回転ジョイントで拘束して、ジョイント1を足関節、ジョイント2を膝関節とした。また、各関節に回転ばねや回転減衰器を付加した。モータのトルク、回転ばねのばね常数、回転減衰器の減衰係数を内部の数式や外部コントローラで制御する。また、ジョイントに加えるトルクは Simulink で計算し、2つのソフトを連携させて計算を行った。また、足と地面との間は、摩擦係数と反発係数でモデル化した。

各関節部には、可動域を設定し、回転部分が動作範囲の境界に衝突した場合には塑性衝突としてあつかう方法と各関節の回転ばね・回転減衰器を

用いたストッパを設ける方法があるが、ここではエネルギーの収支の計算を行なうためにはね・減衰によるモデル化を用いた。そして、衝突や摩擦で消散するエネルギー、各剛体の位置エネルギー、各方向の運動エネルギー、モータからの入力エネルギーを計算して、系のエネルギーの推移の計算を行なった。

3.3 エネルギーの計算

3.3.1 エネルギー種類

入力されるエネルギーは、ジョイントに付いているモータが発生するトルクによる仕事によるものだけである。消散されるエネルギーは、足と地面との摩擦をとまなう運動で消費されるエネルギーと、ジョイントに設定してある減衰器による粘性抵抗をとまなう運動で消費されるエネルギーである。

保存されるエネルギーは、並進運動による運動エネルギーと回転による運動エネルギーと位置エネルギー、ばねの歪エネルギーである。ただし、例えば上方跳躍の場合には、回転や水平の運動エネルギーは保存されていないが、上方跳躍の高さには寄与していない無駄なエネルギーである。

数値シミュレーションに用いる一脚ロボットは、3つのリンクと2つのジョイントで構成されている。各ジョイントには質量、慣性モーメントは無いものとして、各リンクの質量と慣性モーメントを用いて、計算により出力される重心の速度、角速度、重力と高さから運動エネルギーと位置エネルギーをもとめる。摩擦・減衰器で消散するエネルギーは、その時の力と速度から仕事率を計算しそれを積分して計算する。

また、モータから系へ流入するエネルギーについても数値解析により出力される結果を積分して計算する。本研究では、入力されたエネルギーが、どれだけ跳躍高さや跳躍距離に生かされているか、また、無駄なエネルギーの消散がどのように起こっているかなどについて検討する。その詳細については、第5章のなかで示す。

3.3.2 入力エネルギー、位置エネルギー、運動エネルギーの計算

モータによる入力エネルギー W_M は、トルク入力開始角度から終了角度

までの間 , モータが発生したトルク τ_i に関節の角速度 $\dot{\theta}_i$ 乗算したものを次式のように時間で積分して求める .

$$W_M = \sum_i^2 \int \tau_i \dot{\theta}_i dt \quad (3.1)$$

位置エネルギー U は , 動作開始時の各リンクの重心の y 座標を y_i , 各リンクの質量を m_i とすれば

$$U = \sum_i^3 m_i y_i g \quad (3.2)$$

より計算する .

運動エネルギーは , 各リンクの慣性モーメントを J_i , 各リンクの静止座標系における角変位を ϕ_i , 上下方向の運動エネルギーを T_y , 水平方向の運動エネルギー T_x , 回転の運動エネルギーを T_ϕ とし垂直方向 (y 軸) 別々に以下のように計算する .

$$T_y = \frac{1}{2} \sum_i^3 m_i \dot{y}_i^2 \quad (3.3)$$

$$T_x = \frac{1}{2} \sum_i^3 m_i \dot{x}_i^2 \quad (3.4)$$

$$T_\phi = \frac{1}{2} \sum_i^3 J_i \dot{\phi}_i^2 \quad (3.5)$$

3.3.3 衝突と摩擦による消散エネルギー

衝突の理論式から衝突で失うエネルギーを求める . 関節が動作の制限域に達したときは , vN4D の関節制限で設定した制限域に達したときは塑性衝突として扱われるのでここでは塑性衝突の式で消散するエネルギーを

求める．塑性衝突のモデル化は，非線形のばねと減衰器で近似し，ばね・減衰器が衝突した後の働くように設定している．すなわち，各回転部の衝突により消散されるエネルギー D_C は

$$D_C = \sum_i^2 \int c_i \dot{\theta}_i^2 dt \quad (3.6)$$

で減衰が働いている区間で積分して求める．また，摩擦による消散エネルギー D_F は摩擦力を F_i ，その部分の滑り速度を \dot{x}_{iF} とすれば

$$D_F = \sum_i^2 \int F_i \dot{x}_{iF} dt \quad (3.7)$$

で求められる．

3.4. 衝突現象の計算精度の確認

剛体マルチボディの解析を行う場合には、衝突や摩擦が含まれると誤差が大きくなる場合も多い。本研究では、汎用のソフトウェアである vN4D を用いているので、vN4D で衝突の基本的な現象を計算し、理論値と比較することにより精度の確認を行った。

3.4.1 並進での塑性衝突

最も簡単な並進での衝突は、2つの物体の質量を m_A , m_B , 速度を v_A , v_B とし、衝突前を添え字 1 , 衝突後を添え字 2 で表現すると、運動量保存の法則より

$$m_A v_{A2} + m_B v_{B2} = m_A v_{A1} + m_B v_{B1} \quad (3.8)$$

と反発係数ゼロである

$$v_{A2} = v_{B2} = v_{AB} \quad (3.9)$$

したがって、

$$v_{AB} = \frac{m_A}{(m_A + m_B)} v_{A1} \quad (3.10)$$

衝突で失うエネルギー D は

$$D = \frac{1}{2}(m_A + m_B)v_{AB}^2 - \frac{1}{2}m_A v_{A1}^2 \quad (3.11)$$

となる。 $m_A = 1\text{kg}$, $m_B = 1\text{kg}$ で、初期条件として、 $v_{A1} = 1\text{m/s}$, $v_{B1} = 0\text{m/s}$ とすれば

$$v_{AB} = 0.5\text{m/s} \quad (3.12)$$

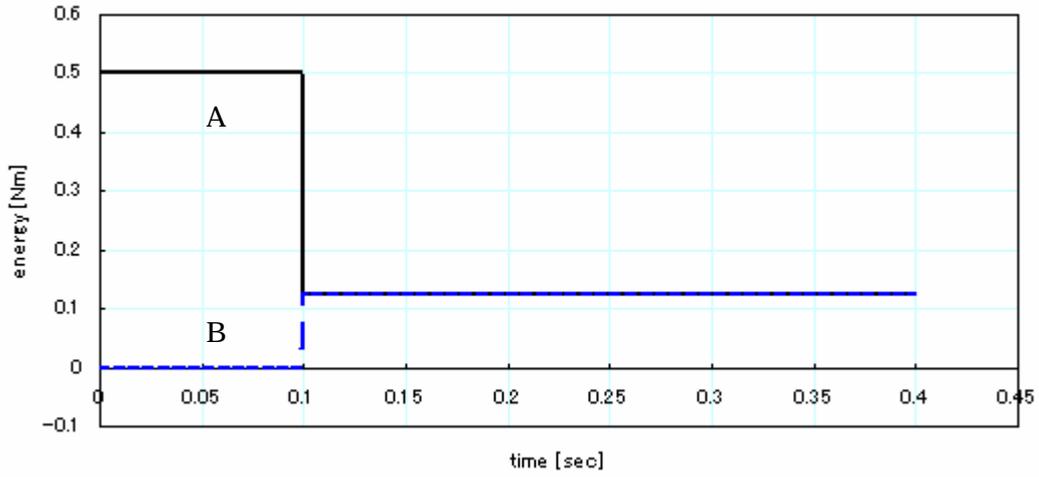


図 3.1 質量 AB の運動エネルギー

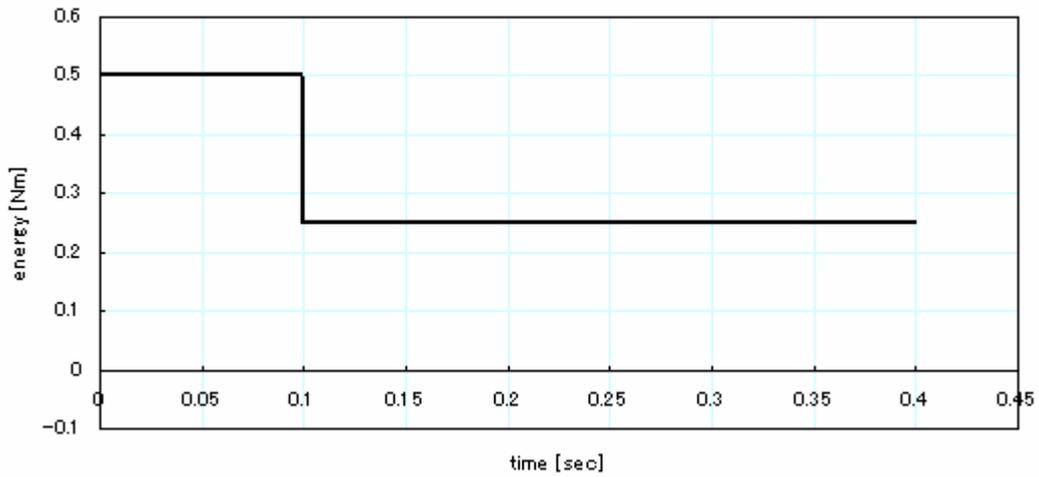


図 3.2 系全体の運動エネルギー

となり，衝突前の運動エネルギー T_1 は

$$T_1 = \frac{1}{2} m_A \dot{x}_{A1}^2 = 0.5 Nm \quad (3.13)$$

衝突後の運動エネルギー T_2 は

$$T_2 = \frac{1}{2}(m_A + m_B)v_{AB}^2 = 0.25Nm \quad (3.14)$$

となる．図 3.1・3.2 に vN4D による各質量，全運動エネルギーの計算結果を示すが，理論とよく一致している．

3.4.2 回転と並進が混在する系での衝突

3.4.1.では，反発係数により衝突前後を切り離して計算すれば，容易に検算を行えるが，図のように偏心して衝突する場合には系全体としての力学的なやりとりを正しく表現しなければ精度がおかしくなる．このような系でも塑性衝突ならば，理論解が得られるので精度の確認を行う．

(1)理論

図 3.3 のように塑性衝突を行う物体 A と B の運動方程式は

$$m_A \ddot{x}_A = F \quad (3.15)$$

$$m_B \ddot{x}_B = -F \quad (3.16)$$

$$J_B \ddot{\theta}_B = -Fr \quad (3.17)$$

となり，運動量変化は

$$\int_0^T m_A \ddot{x}_A dt = m_A v_{A2} - m_A v_{A1} = \int_0^T F dt \quad (3.18)$$

$$\int_0^T m_B \ddot{x}_B dt = m_B v_{B2} - m_B v_{B1} = -\int_0^T F dt \quad (3.19)$$

となる．したがって

$$m_A v_{A2} - m_A v_{A1} = m_B v_{B1} - m_B v_{B2} \quad (3.20)$$

整理して

$$m_A v_{A2} + m_B v_{B2} = m_A v_{A1} + m_B v_{B1} \quad (3.21)$$

$$\int_0^t J_B \ddot{\theta}_B dt = -r \int_0^t F dt \quad (3.22)$$

衝突前の回転角速度 $\omega_{B1} = 0$ であれば

$$J_B \omega_{B2} = r(m_B v_{B2} - m_B v_{B1}) \quad (3.23)$$

あるいは

$$J_B \omega_{B2} = r(m_A v_{A2} - m_A v_{A1}) \quad (3.24)$$

塑性衝突なら，

$$v_{A2} = v_{B2} + r\omega_{B2} \quad (3.25)$$

したがって

$$J_B v_{A2} = J_B v_{B2} + J_B r\omega_{B2} \quad (3.26)$$

一方

$$J_B \omega_{B2} = r m_B v_{B2} - r m_B v_{B1} \quad (3.27)$$

であるので， r を乗ずれば

$$r J_B \omega_{B2} = r^2 m_B v_{B2} - r^2 m_B v_{B1} \quad (3.28)$$

したがって，

$$J_B v_{A2} = J_B v_{B2} + r^2 m_B v_{B2} - r^2 m_B v_{B1} \quad (3.29)$$

となる．衝突前の物体 B の速度 v_{B1} が 0 ならば

$$m_A v_{A2} + m_B v_{B2} = m_A v_{A1} \quad (3.30)$$

一方

$$J_B v_{A2} = (J_B + r^2 m_B) v_{B2} \quad (3.31)$$

$$J_B m_A v_{A2} = m_A (J_B + r^2 m_B) v_{B2} \quad (3.32)$$

また

$$J_B m_A v_{A2} + J_B m_B v_{B2} = J_B m_A v_{A1} \quad (3.33)$$

したがって

$$m_A (J_B + r^2 m_B) v_{B2} + J_B m_B v_{B2} = J_B m_A v_{A1} \quad (3.34)$$

$$\{m_A (J_B + r^2 m_B) v_{B2} + J_B m_B\} v_{B2} = J_B m_A v_{A1} \quad (3.35)$$

衝突直後の物体 B の速度 v_{B2} は

$$v_{B2} = \frac{J m_A v_{A1}}{m_A (J_B + r^2 m_B) + J_B m_B} = \frac{1}{(1 + r^2 m_B / J_B) + m_B / m_A} v_{A1} \quad (3.36)$$

となる． v_{A2} は

$$v_{A2} = (m_A v_{A1} - m_B v_{B2}) / m_A = \left\{ 1 - \frac{2(m_B / m_A)}{m_B / m_A + 1 + r^2 m_B / J_B} \right\} v_{A1} \quad (3.37)$$

塑性衝突の場合のシミュレーションに用いるパラメータとして $m_A = 1\text{kg}$, $m_b = 3\text{kg}$, $J = 0.00633\text{kgm}^2$, $v_{A1} = 1\text{m/s}$, その他の速度はゼロとしてシミュレーションを行い理論値との比較を行った．その挙動を図 3.3 に , 理論と計算の比較を表 3.1 に示す．表より , 理論とシミュレーション結果はよく一致しており , vN4D では , 偏心した系の程度の衝突現象は精度よく計算

することが可能であることを確認した。

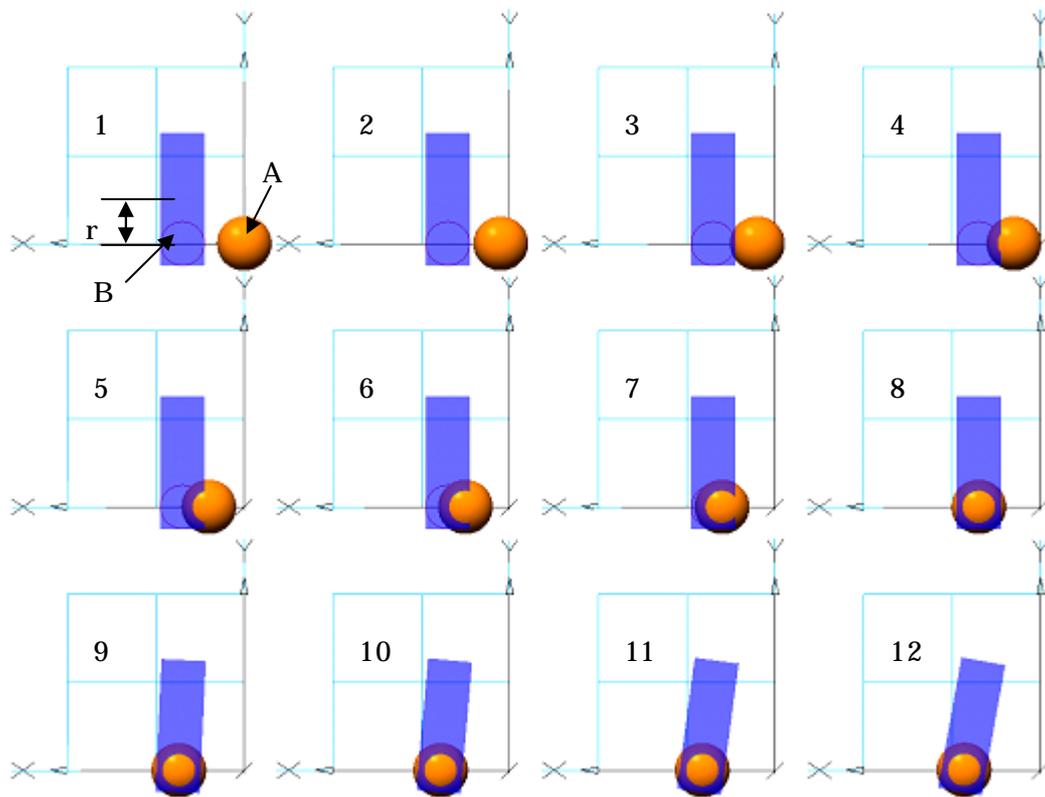


図 3.3 回転と並進を考慮した塑性衝突

表 3.1 衝突前後の速度

	衝突前[m/sec]		衝突直後[m/sec]	
	理論	数値実験	理論	数値実験
A の速度	1.0	1.0	0.423	0.41524
B の速度	0.0	0.0	0.1923	0.19491
B の速度(衝突点)	0.0	0.0		0.41524

3.5 結言

跳躍運動のシミュレーションを汎用のマルチボディ解析ソフトウェアである visual Nastran4D (vN4D) および Simulink5.0 を用いて行なうに際して、上方跳躍の場合の評価にエネルギーを用いることを示し、それらを系の潜在能力を示す総合エネルギーと跳躍高さに関連する有効なエネルギーと、跳躍高さに寄与しない無駄なエネルギーに分けることを提案した。有効なエネルギーとしては、最高到達点での位置エネルギー、無駄なエネルギーとしては、衝突や摩擦による消散エネルギー、水平や回転の運動エネルギーであることを示した。また、総合エネルギーは、初期姿勢における位置エネルギーとモータから系に流入するエネルギーであることを示した。

また、剛体マルチボディの解析では、衝突や摩擦などの計算では誤差が生ずる可能性が大きいので、衝突現象については使用する汎用のマルチボディ解析ソフトでの計算値を、理論解と比較することによってその精度の確認を行った。その結果、偏心を考慮した塑性衝突では、シミュレーションと理論解は良く一致し、vN4D ではある程度の複雑な衝突でも精度よく計算できていることが確認できた。

第4章 前方跳躍現象の解析と評価

4.1 緒言

近年，人間型ロボットなど，脚移動ロボットに関する研究が進み，ロボットの走行事例^{[4]-[6]}もいくつか発表されている．ここで，走行したと言われているのは，両足が地面と接触していない期間が存在することである．現状では，人間の走行と比べれば，その期間は短く，速度も非常に遅い．人間に近い高速の走行を実現するには，ストライドを大きくするより距離の長いを跳躍する必要がある．

走行したロボットの多くの動きを観察すれば，足裏が走行中に，地面と平行を保ちながら進んでいることがわかる^{[4]-[6]}．一方，人間の走行では，走行中に足裏の角度は大きく変動しており，足関節が走行にも寄与していることがわかる．足裏を地面と平行にすることは，走行の安定という意味では有効であると考えられるが，ストライドを伸ばすという意味では不利になると考えられる．

走行時の跳躍は，立脚期の状態にある脚と地面との間の摩擦と反力により行われるが，人間型ロボットのその脚は，胴体やもう一方の脚の重量も支えなければならない．一方，下肢一本のみの一脚ロボットであれば，自身の重量のみを支えればよいので，跳躍をさせるには有利である．また，構造が単純で現象を理解しやすい．人間型ロボットの二脚での走行と一脚ロボットでの跳躍では本質的に異なる部分もあるが，より単純な一脚ロボットで得られた知見は，二脚の現象を考える上でも有用であると考え，本研究では，一脚ロボットを用いてその跳躍現象について検討する．一脚ロボットについては，美多ら^[7]による連続跳躍による走行に関する研究や三平ら^[36]による Acrobot などいろいろな跳躍系の制御の研究などが行わ

れている。本研究では市販モータなど汎用の部品を用いた軽量の一脚ロボットを考え、その制御方法や足の形状が跳躍に対してどのように影響するかについて検討する。ここでは、その第一歩として、剛体マルチボディダイナミクスを用いた数値シミュレーションにより検討を行う。

人間の走行において、片足が地面と接している状態から、両足が地面と接触していない状態へ移行する場合には、それまでの走行方向の運動エネルギーと、立脚期の脚が地面と接触している部分を反力壁として関節トルクを作用させたことによる入力エネルギーにより跳躍ができていると考えられる。一脚の場合には、二脚の場合と比べ運動の自由度が少なく、股関節によるトルクを考慮することができないので、完全に二脚での運動を模擬することは難しいが、ここでは、特に、現状の人間型ロボットの走行では、十分活用されていない足関節の効果、および足裏の形状に注目して、一脚ロボットによる前方への跳躍現象の数値シミュレーションを行い、各パラメータの影響について検討する。

4.2 制御法

実験を想定し、静止状態からの運動を考える。運動は直立状態から開始し、最初は姿勢を前傾にして踵が浮く状態まで移行させ（phase1）、その後、足関節と膝関節を伸ばし跳躍する（phase2）という方法を用いる。

人間の走行において、片方の足が立脚期（接地期）の状態から、両足が地面と接触していない状態の遊脚期（非接地期）に移行する場合には、それまでの走行方向の運動エネルギーと、立脚期の脚が地面と接触している部分を反力壁として関節トルクを作用させたことによる入力エネルギーにより跳躍ができていると考えられる。二脚ロボットにおいて、片方の脚が立脚期に入って体を支えて、もう片方の脚が遊脚期に入り振り子のような挙動をするが、一脚の場合には、そのような作用はなく、また股関節のトルクも存在しない。したがって、跳躍後の挙動は、一脚と二脚では大きく異なるが、跳躍までの過程には、共通の部分があると考えられる。

ここでは、主に一脚ロボットの跳躍のみに着目し、その第一歩として、定常的な走行に見られる跳躍をするまでの運動エネルギーの影響についてはあまり考慮せず、静止状態からスタートする場合について検討する。特に、そのなかで、足関節トルクについては、ストライドを伸ばすために能力を最大限発揮することを考える。

図 4.1 に、検討の対象とする 4 リンク機構の一脚ロボットの概要を示す。これは一脚ロボットの側面から見たものである。制御用コンピュータやバッテリー、モータドライバを積載することを想定した質量部分（Mass）が腿部分（Thigh）の上端に固定されているとした。また、足関節（J2）と膝関節（J1）には市販のモータと減速器の取り付けを想定した、これにより跳躍するものとした。

今回検討した跳躍としては、直立姿勢から、まず、膝関節と足関節を曲げて質量部分を前方へ移動させることによりロボットを前傾させ、次に、

膝関節と足関節を伸ばしていき，そして，踵が浮いた状態で質量部分を前斜め上に加速するように制御を行う．特に，人間型ロボットの走行ではあまり有効に活用されていない足関節については，跳躍時には最大限のトルクで駆動する．

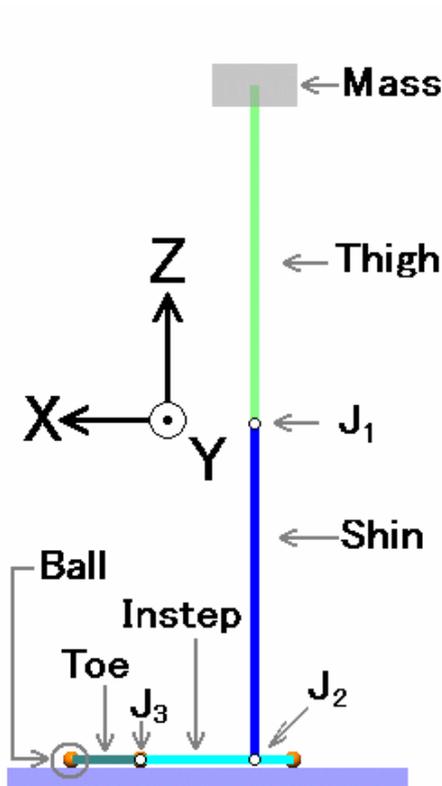


図 4.1 一脚ロボットのモデル

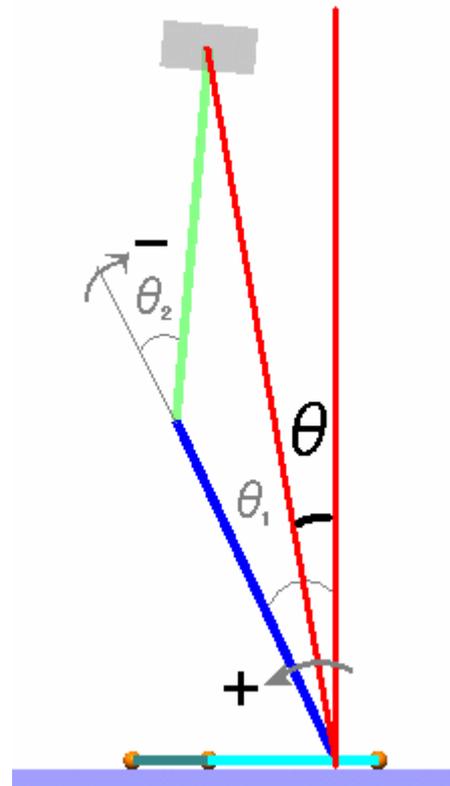


図 4.2 の定義

表 4.1 サイズとパラメータ

Parts	Weight(kg)	Size [x y z] (m)
Mass	4	0.1 0.1 0.05
Thigh	1.5	0.01 0.05 0.4
Shin	1.5	0.01 0.05 0.04
Instep	0.7	0.18 0.05 0.01
Toe	0.3	0.08 0.05 0.01
Ball	0.01×6	Radius 0.01
Coefficient of friction		0.4
Coefficient of restitution		0.1

4.3 解析モデルと評価

直交座標系(X, Y, Z)において $X-Y$ 平面を地面とし、モデルの前進を X 方向の正に、モデルの上昇を Z 正方向として、 Z 負方向に重力が作用する空間で4リンク機構の一脚ロボットモデルを作り、2次元問題としてシミュレーションを行い、前方へ跳躍を検討する。シミュレーションの環境として、MSC.visualNastran 4D 2003 (以下 vN4D) と MATLAB6.5 の Simulink5.0 を使用した。vN4D は、剛体マルチボディシステムの動力学を用いた解析と Nastran の構造解析の一部を合わせたソフトである。なお、地面と足の間は衝突を設定してあり反力を生ずる。地面との接触時にモデルに発生する力は摩擦係数と反発係数にて定めている。

一脚ロボットの解析モデルは前述した図 4.1 と同様にし、モデルの寸法とパラメータを表 4.1 に記す。なお大腿部(Thigh)先端に質量部分(Mass)が固定されたモデルと考えている。各リンクは均一の部材で質量を持つとし、リンク全体と質量部分の質量はほぼ同じとした。膝関節(J1)と足関節(J2)にはトルクを発生させるモータを設定してあり、その最大トルクは市販のモータと減速機の効率を考慮して 15 Nm とした。指関節は、回転のばね・減衰器により動作するものとした。

vN4D モデルへの入力として膝関節と足関節にそれぞれトルクを与え、モデルから出力される情報として足関節と膝関節の角度、膝関節の角速度をとった。制御アルゴリズムは Simulink において、C 言語でプログラミングし、各関節に与えるトルクは跳躍姿勢の基となる膝関節と足関節の角度を基に決定した。足関節はトルク制御、膝関節は、角速度フィードバックを行い速度制御を用いた。足関節をトルク制御とした理由は跳躍に必要なトルクがどの程度か調べるためである。膝関節を速度制御とした理由は、膝関節の角度がモデルの姿勢に大きな影響を与えるため、今回の跳躍には速度制御が適していると考えたからである。計算は直立姿勢から、まず、

膝関節と足関節を曲げて質量部分を前方へ移動させることによりロボットを前傾させ、次に、膝関節と足関節を伸ばしていき、そして、踵が浮いた状態で爪先で踏み切る跳躍を行った。

4.4 シミュレーションおよびパラメータの影響度の検討結果

4.4.1 シミュレーションの概要

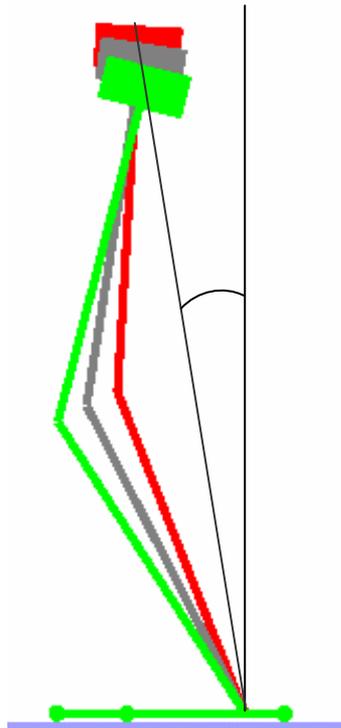


図 4.3 駆動長の影響

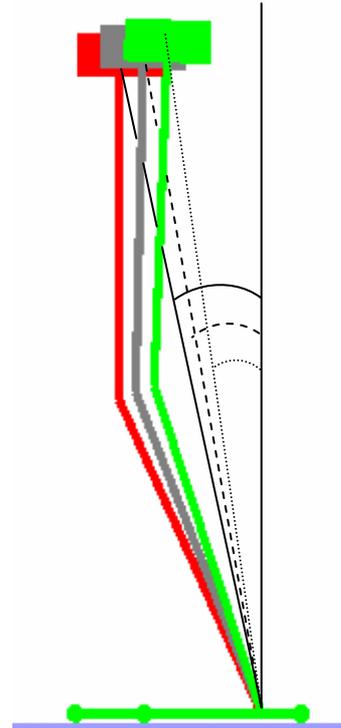


図 4.4 角度の影響

跳躍姿勢の影響として、質量部分の位置が考えられる。仮に足関節を原点として回転すると考えると、質量部分は2リンク機構の手先の位置として考えられ、手先の回転角度と、その半径が2リンク機構の姿勢を表す。このモデルにこの仮定は適用して、ここでは直立状態から回転した角度をとし、脚を伸ばしたときと曲げたときの手先位置の半径の差を駆動長さとした。この角度を規準として、膝関節と足関節に跳躍させるためのトルクを与えた。角度は順運動学より、次の(1)～(3)式で求められる。図4.2に一脚モデルにおける角度を示す。

$$a = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (4.1)$$

$$b = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (4.2)$$

$$\text{ここで } \theta = \tan^{-1}\left(\frac{a}{b}\right) \quad (4.3)$$

この角度 θ を変化させた場合に跳躍に及ぼす影響を調べるためにシミュレーションを行った。また，図 4.3 のように脚を曲げて伸ばすという駆動長さを変化させた場合に跳躍に及ぼす影響を調べるためのシミュレーションも行った。

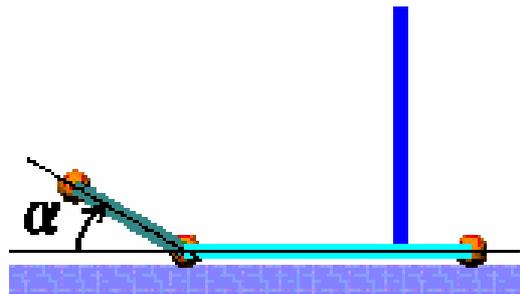


図 4.5 角度

足の形状は図 4.1 のように足指関節 (J_3) を設けてあり，一脚モデルは 4 リンク機構となっている。地面との接触は 6 個のボールによる点接触とした。図 4.5 に示すように足指関節は $0 \sim 30\text{deg}$ の範囲 (deg) で動作するものとし，関節は回転のばね・減衰器により動作するものとした。この足指関節は，足指を含めた足の長さに影響を与え，踵の上がりやすさや，跳躍距離に関係しているが，詳細については後述する。

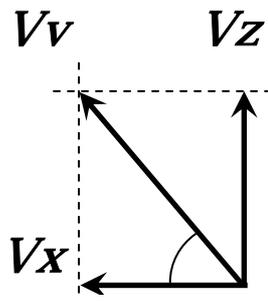


図 4.6 速度のベクトル

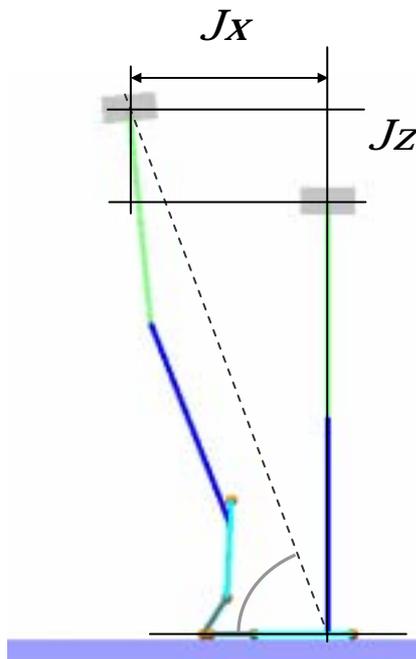


図 4.7 J_x と J_z の長さ

4.4.2 跳躍開始角度の影響

図 4.4 に示すように定義した跳躍を開始する角度 θ は、 θ が大きいほど質量部分が前進方向に移動するので、水平方向の跳躍距離が長くなると推測される。そこで、 θ を 7~11 deg まで変化させた場合の跳躍の変化を検討する。

制御の目標値として前傾時には、足関節トルク $St = 4 \text{ Nm}$ 、膝関節角速度 $V1 = -40 \text{ deg/s}$ を与えて、跳躍までの目標値として、足関節トルク $Mt = 15 \text{ Nm}$ 、膝関節角速度 $V2 = 20 \text{ deg/s}$ としてシミュレーションを行った。これは跳躍に適すように試行錯誤的に導き出した値である。

表 4.2 跳躍距離と速度

(deg)	X(m)	Z(m)	Jump	Vx(m/s)	Vz(m/s)	(deg)	Vv(m/s)	Jx(m)	Jz(m)	(deg)
7	0.660	0.204		0.312	1.050	73.45	1.10	0.274	0.172	74.26
8	0.667	0.190		0.534	1.020	62.37	1.15	0.339	0.167	70.68
9	0.668	0.181		0.737	0.972	52.83	1.22	0.411	0.164	66.91
10	0.654	0.178		0.966	0.909	43.26	1.33	0.477	0.146	63.24
11	---	0.173	x	1.190	0.831	34.93	1.45	0.539	0.129	59.88

角度 θ における水平方向の跳躍距離を X 、垂直方向の跳躍距離を Z で表し、動作始時から跳躍開始（離陸）までの質量部分の垂直方向の最高速度を Vz とし、その時の水平方向は Vx とした。また、図 4.6 に示すように Vx と Vz を合わせた速度ベクトルを Vv とし、そのベクトルと Vx のなす角度を α とする。また図 4.7 に示すように、動作開始時の足関節の位置を原点として、 Vz の時の質量の位置を Jx (水平方向)と Jz (垂直方向)として、それらから質量の位置の角度を β とした。これらをまとめたものを表 4.2 に記す。

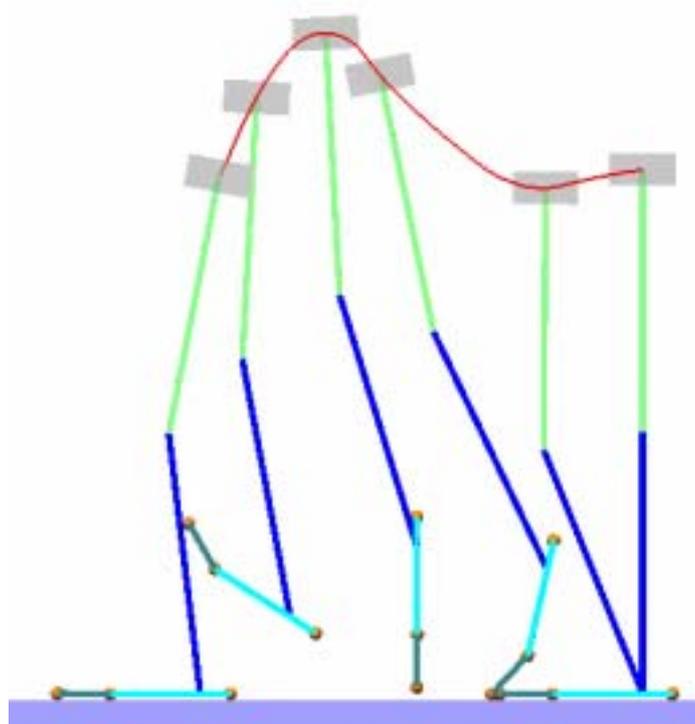


図 4.8 跳躍歩容

図 4.8 は 9deg のときのシミュレーション結果である．直立状態から前傾していき，角度 θ に達すると膝関節と足関節を伸ばすトルクが与えられ，まず踵が上がり始め，回転支点が足関節から足指関節に移り，足指関節が制限角度 θ_{lim} まで曲がりきったところで支点が爪先に移動し，爪先立ちとなり，足関節を伸ばし続けると跳躍した．

表 4.2 より θ が 7~10 deg では跳躍に成功したが，11 deg では跳躍状態後に爪先が地面と接触し転倒した． θ と跳躍距離 X に注目すると， θ が 45deg より大きい範囲では，推測した通り X が大きいほど跳躍距離が長くなっている．また θ が 7~11 deg と大きくなるにつれて X が小さくなっている．この X は 45deg より小さくなると跳躍距離が短くなった． θ を投射角， V_v を初速とした質量部分の斜方投射の運動と類似しているのではないかと考えられる．

そして跳躍距離を最大にする最適値があるという結果を得られた．

4.4.3 駆動長さによる影響

この節では、前節で変化させていた の値を固定し、図 4.3 に示したように膝関節の曲げ伸ばしの駆動長さが、跳躍にどのような影響を及ぼすのかシミュレーションを行った。目標値の足関節の前傾時のトルク St 、膝関節の前傾時の角速度 $V1$ 、跳躍までの膝関節の角速度 $V2$ をいくつかの条件を与えて駆動長さを変化させた。その条件は表 4.3 に結果と同記した。なお、前節で変化させていた角度 を、跳躍距離、角度 等から今回は 9deg で固定とした。

前傾時のトルク St が 4Nm から 3Nm としている場合は角度 に達するまでの時間が遅く、膝関節を深く曲げると予想される。また、膝関節の前傾時の角速度 $V1$ を -40deg/s から -60、-80deg/s と大きくした場合も角度 に達するまで深く膝関節を曲げると考えられる。膝関節の跳躍までの角速度 $V2$ を 20deg/s から 40deg/s と大きくした場合は膝関節を伸ばすのが速くなると考えられ、跳躍距離が大きくなると推測される。

表 4.3 に示すように跳躍の項目に注目すると条件 8 以外は跳躍可能であった。条件 8 の Jz の値をみると結果 1 の跳躍不可の場合の値 0.129m を下回り、 についても 40.74deg と 45deg を下回り、加えて Vz 時の質量部分の位置までの角度を示す も一番低い値を示している。条件 8 以外はすべて が 45deg 以上で、 Jz も跳躍不可の場合の値を上回っている。つまり条件 8 は前傾し過ぎたことを示しており、跳躍に適してないことがわかる。

これにより、跳躍も初速と投射角度、そして高さによって到達距離に影響があるため、質量部分の斜方投射の運動に類似しているという裏づけを得た。また予想していた駆動長さにおける影響は多少あったものの、前節の角度 ほどの顕著な影響は見られなかった。これは質量部分の駆動長さがあまり変化しなかったためか、もしくは St 、 $V1$ 、 $V2$ の値を変化させる割合が少なかったことが考えられる。

表 4.3 跳躍距離と速度（駆動長の影響）

	S _t	V ₁	V ₂	X (m)	Z (m)	Ju mp	Vx (m/s)	Vz (m/s)	(deg)	Vv (m/s)	Jx (m)	Jz (m)	(deg)
条件 1	4	-40	20	0.668	0.181		0.737	0.972	52.83	1.22	0.411	0.164	66.91
条件 2	4	-60	20	0.679	0.183		0.842	0.942	48.21	1.26	0.374	0.174	68.99
条件 3	4	-60	40	0.667	0.182		0.850	0.969	48.74	1.29	0.439	0.156	65.34
条件 4	4	-80	20	0.667	0.182		0.913	0.910	44.91	1.29	0.447	0.123	64.16
条件 5	3	-40	20	0.680	0.183		0.648	0.989	56.77	1.18	0.391	0.167	67.98
条件 6	3	-60	20	0.686	0.185		0.810	0.945	49.40	1.24	0.427	0.142	65.62
条件 7	3	-60	40	0.678	0.184		0.821	0.978	49.99	1.28	0.434	0.154	65.54
条件 8	3	-80	20	---	0.179	×	1.010	0.870	40.74	1.33	0.470	0.101	62.45

表 4.4 角度 の跳躍距離の影響

(deg)	X(m)	Z(m)	Jump
0 - 0	---	---	×
0 - 10	---	0.176	×
0 - 30	0.668	0.181	
0 - 50	0.676	0.191	
0 - 70	0.642	0.205	
0 - 90	0.584	0.190	
0 - 360	0.506	0.157	

4.4.4 足の形状による影響

直立状態から前傾していき、角度 θ に達すると膝関節と足関節を伸ばすトルクが与えられ、まず踵が上がり始め、回転支点が足関節から足指関節に移り、足指関節が制限角度 θ_{lim} まで曲がりきったところで支点が爪先に移動し、爪先立ちとなり、足関節を伸ばし続けると跳躍する。そのため、足の甲と爪先部分を足し合せた長さ（以下：足の長さとする）は、踵が浮くタイミングや関節の回転運動を跳躍方向の並進運動へ変換するのに大きく影響すると考えられるので、その影響について検討する。

(1) 関節型

足の長さが長い場合と短い場合を足指関節の制限角度範囲 θ_{lim} を変化させることによって検討した。値が $0 - 360\text{deg}$ の場合は自由に回転して足指関節で回転、つまり足の長さが最も短いときである。 θ_{lim} が $0 - 0\text{deg}$ の場合は足指関節を完全に固定して爪先で回転、つまりは足の長さが最も長いときである。

各 θ_{lim} での跳躍距離をまとめたものを表 4.4 に記す。足の長さが最も短い $0 - 360\text{deg}$ の場合にも同じ条件 1 の制御則にてシミュレーションを行ったところ、X 方向への跳躍距離は制限を設けた場合 (θ_{lim} が $0 - 30\text{deg}$) より小さくなった。足の長さが最も長い θ_{lim} が $0 - 0\text{deg}$ の場合は先程の条件 1 で用いた制御則では、踵すら上がらず、そのまま転倒する結果となった。

したがって、モデルの足の長さは短いほうが踵を浮かせやすいが駆動長さが確保しにくく、X 方向へ跳躍距離は少ない。故に跳躍距離を伸ばすには足の長さが長いほうが良いと考えられる。そこで足部分に足指関節を設けることにより、跳躍開始までに足関節、足指関節、爪先の順番に回転支点を移動させることができるため水平方向の跳躍距離を向上させることに適していると考えられる。

足の長さが長い場合に踵が上がりにくい理由としては今回のモデルは

質量部分が他の部位より重いため、足の長さが長いほど、モデルを傾斜させた場合にトルク不足になっていることが考えられる。

これまでのシミュレーションからもわかるように一脚ロボットの跳躍までの運動、つまり踵が浮いた状態後の運動は自由度に対して十分な数の駆動系を持たない劣駆動系と考えられる。そして、モデルを膝関節と足関節を曲げて質量部分を前方へ移動させることにより前傾させてから、膝関節と足関節を伸ばすようなトルクを与えることにより回転支点を足関節、足指関節、そして、爪先へと移していき、モデル全体で回転を行い、重力加速度以上の加速度で質量部分を加速させて前方へ跳躍を行っていると考えられる。

モデルを前傾させることによって、駆動長さを確保する効果と重心を前に持ってくる効果がある。そしてある程度、重心が前に移動したときに足関節を伸ばす方向にトルクをかけることによって、足関節付近から足指関節に回転中心を移して回転することができ、それにより、踵が浮いた状態となり、踵が上がることによって脚が伸びる方向が前斜め上になり、質量部分の斜方投射に類似した運動になったと考えられる。

現状の人間型ロボットでは、あまり足指関節は使用されていないが、以上の検討により足指関節の存在は、前方跳躍に大きい影響があることがわかった。

(2) 曲面型

足指関節により支点が2段階で変化するモデルのかわりに、支点が連続的に変化する曲面型足裏にした場合にどのような跳躍現象になるか検討する。

足の形を図 4.9 のように足裏を曲面にし、大腿 (Thigh)、脛 (shin)、質量部分 (Mass) は関節型と同じモデルを使用した。図 4.10 に足の寸法を示し、その曲率は試行錯誤的に決定した。膝関節と足関節を持った3リ

ンク機構とし、足の重量は関節型の足指 (Toe)、足の甲 (Instep)、球体 (Ball) の質量を足し合せた重量と同じにした。また、足関節を取り付ける位置も関節型と同じ様にした。制御則は関節型と同じように膝関節と足関節を曲げ、ある角度に達すると、膝関節と足関節を伸ばし跳躍させる。なおここでは跳躍させることだけを目的としている。

図 4.11 に示すように足裏を曲面としたことにより、直立状態から踵が下がり、爪先が上がった状態で姿勢を保ちつつ、膝関節と足関節を曲げて跳躍する関節型と同様な結果となった。しかし、曲面型は、着地時における足関節に発生する拘束トルクが、関節型の場合より大幅に軽減されていた。

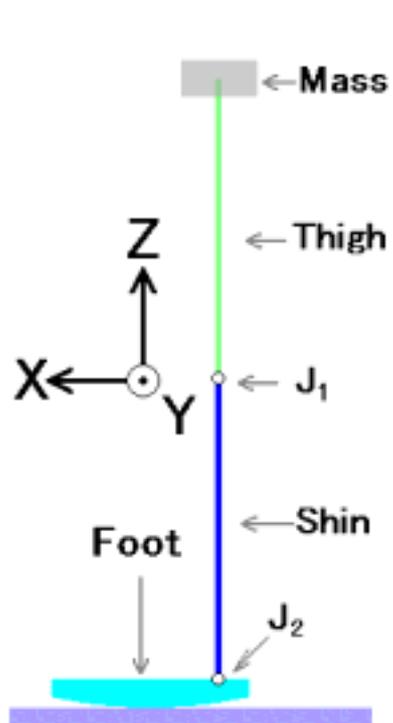


図 4.9 一脚ロボットのモデル 2

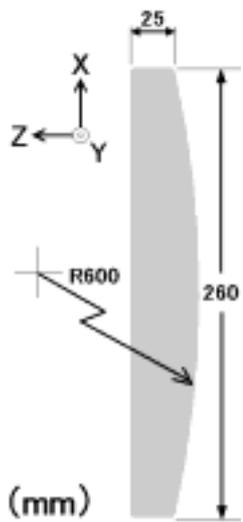


図 4.10 足の形

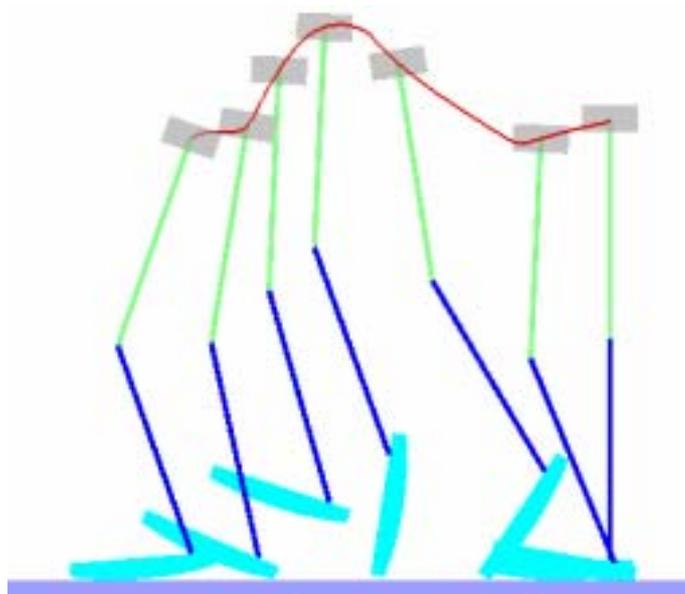


図 4.11 跳躍歩容 2

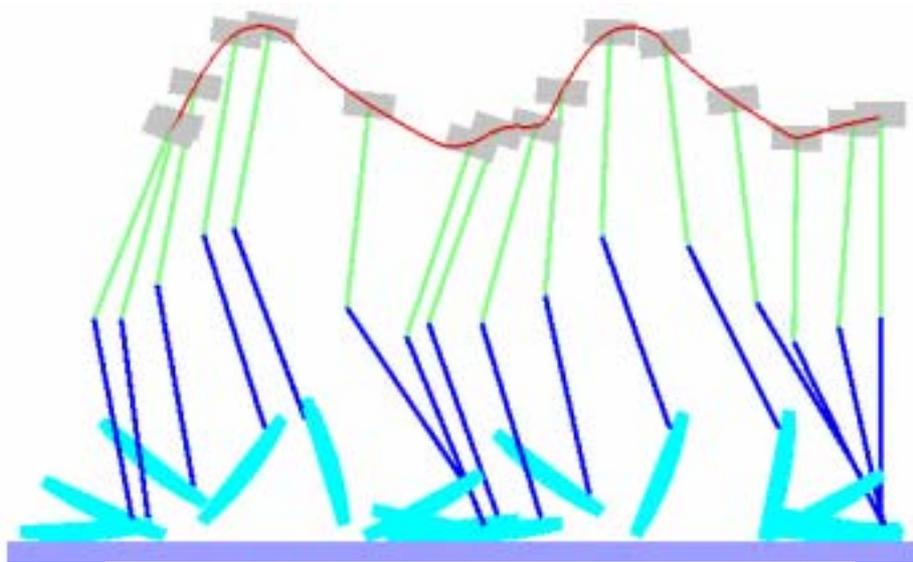


図 4.12 跳躍歩容 3

4.4.5 連続跳躍

前項の計算結果において、着地の挙動をみると踵から地面と接地すると足が足裏に沿って地面を転がり、モデルの運動が静止せず前後に振動する運動が生じた。このような動きが残ったのは、曲面型であれば、角型の剛体の場合には生じるロッキングによるエネルギー消散が存在しないことに起因していると考えられる。このようなエネルギー消散は、剛体の底面の形状に大きく左右されることがロッキングの研究^[43]により報告されており、足裏は1直線の場合と比べれば、足指関節で角度がついているほうがエネルギー消費は少ない。したがって、着地してそのまま運動を静止する場合には、それまでの運動エネルギーを早期に消散することが望ましいので平面のほうが有利であるが、着地時の運動エネルギーを消散させず、そのまま次の跳躍に生かせば、エネルギー損失の少ない走行につながると考え連続跳躍が可能か検討した。

これまでの計算では、走行において両足が地面と接触していない状態へ移行する場合に、静止状態からの1回の跳躍について検討を行ってきたが、4.4.4の(2)で示した曲面型の例について、1回目と同様の制御アルゴリズムを用いて2回連続的な跳躍が可能かどうかの検討を行った。

図4.12に計算結果を示すが、2回目についても跳躍が行われていることを確認できた。

4.5 結言

一脚ロボットは、立脚期に支える自重が、人間型ロボットなどと比較して軽く跳躍しやすいことに着目し、一脚ロボットの跳躍現象について数値シミュレーションにより検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 初期状態からモデルを徐々に前傾させ、踵がある程度浮いた状態で、足関節、膝関節を伸ばし前方へ跳躍するという制御方法を採用した結果、市販の部品により構成されるモデルで、十分跳躍が可能であること、跳躍距離を最大にする跳躍開始時の傾斜角度が存在することを確認した。また、現象としては、斜方投射と類似したものであることがわかった。現状の人間型ロボットでは、走行時には、足関節によりストライドを大きくするという使用方法はあまり用いられていないが、計算結果からは、足関節トルクはストライドを大きくするのに寄与できることを示唆していると考えられる。

(2) 足の長さが長すぎると、踵が上がるまでに前傾が深くなりすぎて、転倒してしまう。足の長さが短すぎると十分な跳躍高さが得られないという結果が得られ、足指関節を設け、回転支点が足指関節にある時は、短い足と同等で、踵が上がり回転支点が爪先に移ると長い足と同等の効果を持たせることができ、結果として長い跳躍距離が得られた。このことより、人間には存在している足指関節が、前方跳躍にとって有利に働いている可能性があることが推察された。さらに、足関節のように途中で支点を移動させる機構がなくても、連続的に支点に変化する足裏が曲面のものについても検討した結果、足指関節を用いた場合と同様の結果が得られた。また、足裏の形状は、跳躍だけでなく着地時の反力やエネルギーの消散にも影響を与え、曲面の場合にはエネルギー損失が少ないことがわかった。

第5章 上方跳躍現象の解析と評価

5.1 緒言

上方への跳躍は、走行時の運動とは異なるが、人間の基本動作として重要な要素の一つである。そこで、上方への跳躍については、3つのリンクの結合部である足関節と膝関節に市販のモータを使用するという条件のなかで、できるだけ高く跳躍することを考える。姿勢を制御し、合理的な運動をさせることも考えられるが、エネルギー的に考えれば、初期状態における系のポテンシャルエネルギーに系に流入するエネルギーを加えたもの（以下では、総合エネルギーと呼ぶ）以上に、最高到達点における位置エネルギーを大きくすることは不可能であり、その位置エネルギーが最高到達点の高さとほぼ同等であるので、総合エネルギーが最高到達点の上限を決めていることになる。そこで、まず、姿勢の制御のことは考えず、モータからは、モータの最大能力のトルクを加え、総合エネルギーを最大にすることを優先させる。また、モータのストロークには制限を設けているので、初期姿勢がきまれば、総合エネルギーの大きさは決まってしまう。その総合エネルギーが、有効に使われれば、跳躍高さは高くなり、無駄なものに使われれば、跳躍高さが低くなると考えられる。有効なエネルギーとしては、位置エネルギーと上下方向の運動エネルギーであるが、跳躍の最高の位置では、上下方向の運動エネルギーのほとんどが位置エネルギーに変換される。一方、無駄なエネルギーとしては、衝突や摩擦などの消散エネルギーがある。また、消散はされないが最高高さに達した状態での水平方向、回転方向のエネルギーは上下方向の跳躍の高さには直接寄与しないので無駄なエネルギーと言える。したがって、跳躍開始時に決まる総合エネルギーをできるだけ大きくし、最高点にいくまでの消散エネルギーと最高点における回転や水平方向のエネルギーの和である無駄なエネルギ

ーをできるだけ抑制できれば、より高い跳躍が実現できると考える。無駄なエネルギーが少ない跳躍では、回転や、水平方向の運動エネルギーが少ないと考えれば、高い跳躍が実現できれば、結果的に跳躍姿勢も回転や水平動の少ない跳躍となることが期待できる。また、初期条件などの容易に調整できる部分を学習などにより調整すれば、姿勢の微妙な修正は可能と考えられる。また、今回の計算には含めていないが、足が浮いてからの姿勢制御（あまりエネルギーは消費しない）により調整することも可能であるとえられる。

総合エネルギーおよび無駄なエネルギーに影響を与えるパラメータで容易に設定できるものとして初期姿勢を選び、それにより、総合エネルギーおよび無駄なエネルギーにどのように影響を与えるかを検討する。また、床面と足裏の間の摩擦係数については、それを変化させてその影響についても検討する。また、最後に総合エネルギーを機械的に増加させる方法として付加ばねを考える。

5.2 制御法

緒論で示したように，ここでは，複雑な制御は行わず，初期姿勢から2つの関節のモータに，常にモータの能力を最大限発揮させ，最大トルクを加えるものとする．また，簡単のためモータの最大トルクは速度によって変動しないものと仮定する．モータの可動範囲は，関節に可動域を設定する．可動の限界にまで回転し，速度を持っている場合には，塑性衝突により運動は一旦停止するものとする．2つの関節のモータにモータが可動範囲に達した後は，モータは静止した状態を保つので，新たなエネルギーの入力はない．したがって，姿勢を制御するための運動は行わず，モータが可動範囲に達した後で，すでに足が地面から離れた後は，基本的には3つのリンク位置は相対的には変化しない．

図5.1に跳躍の計算例を示すが，図は運動の軌跡であり，アルファベットの順に0.05secごとの姿勢を示している．図(a)は初期姿勢であり，ここからモータにトルクが働いている．モータトルクにより2つの関節が広がって行き，図(h)では膝関節が，図(i)では足関節が可動範囲の限界に達して，その後は，図のような直線的な形状を維持している．

また，最高点に達した後は，自重で落下をするが，ここでは，着地の状況のシミュレーションは実施していない．

踵を上げた状態から動作開始する研究が多くなされているが[7][13]他，本研究では，爪先と踵を接地している状態で，膝・足関節を曲げた形を跳躍のための動作開始位置とした．

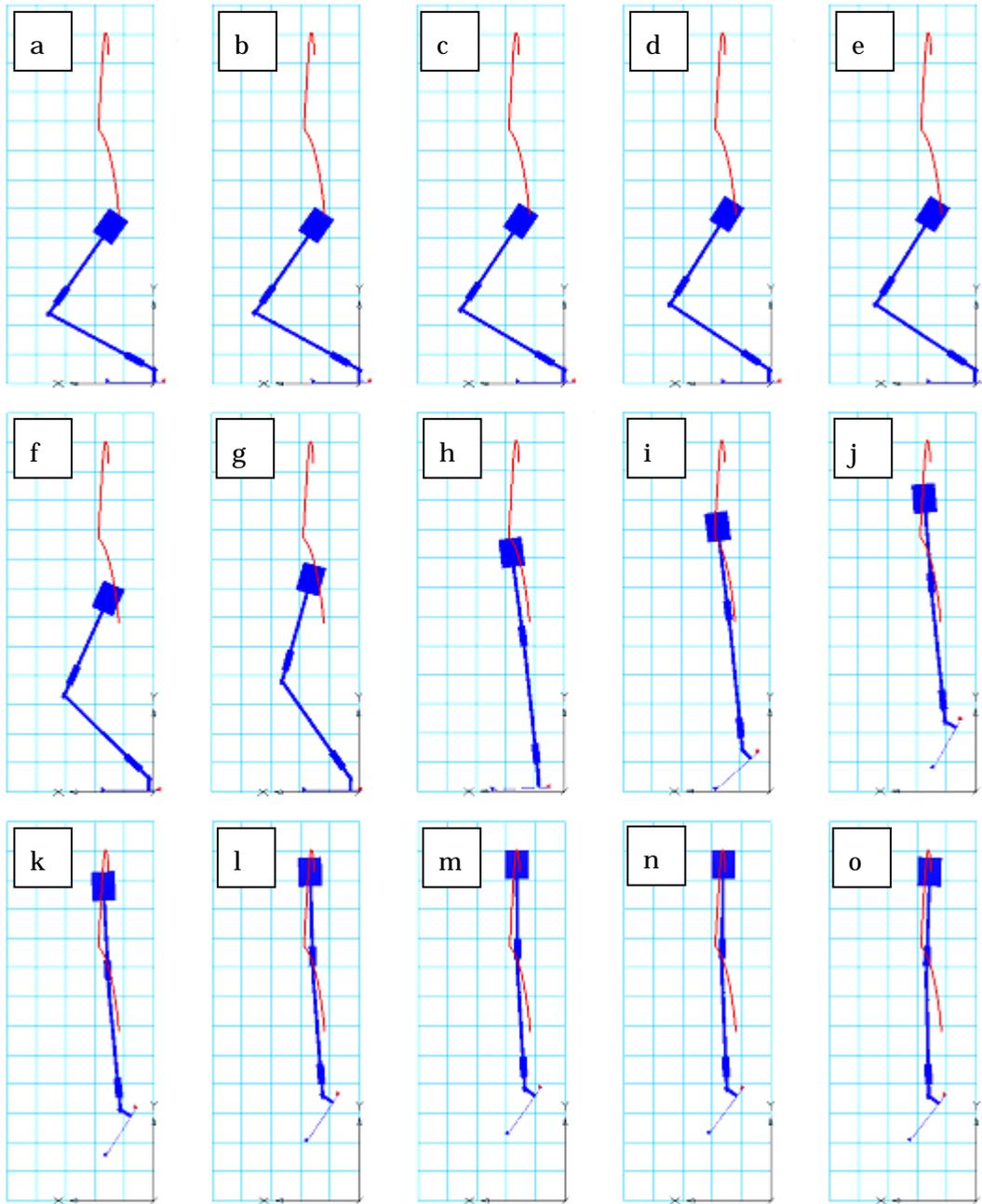


図 5.1 跳躍の例

5.3 解析モデル

ここでは数値シミュレーションに用いる一脚ロボットの概要を述べる。図 5.2 に示すように股関節はないが人間の一脚に相当する部分を取り出した 2 次元構造とし、リンク長は人間と比較しやすいように人間の平均的なリンク長にあわせている。また、表 5.1 に各リンクの質量を示す。足関節（ジョイント 1）、および膝関節（ジョイント 2）の 2 箇所に図 5.3 のようにモータ付きジョイントを設け、3 リンク構造とする。シミュレーション結果に基づき実験装置を製作する計画であるので、質量などの大きさは、実験装置に使用するバッテリーや制御用のコンピュータを想定して与えた。駆動は 2 つの関節のモータで行い、最大トルクは市販のモータで可能範囲を用いる。足は地面と接触するので摩擦の影響を受けられるので摩擦係数を数種類用いる。また、反発係数は 0 とした。

回転部分が動作範囲の境界に衝突した場合には塑性衝突としてエネルギーの消散が発生する。塑性衝突のモデル化は、消散エネルギーが計算しやすいように、動作範囲では、ばね定数・減衰定数がゼロで、可動範囲の境界よりも先ではばねと減衰が働く非線形回転ばね・減衰器でモデル化する。塑性衝突による消散エネルギーは、減衰で消散するエネルギーで表現する。表 5.2 に vN4D で用いた主な設定値を示す。

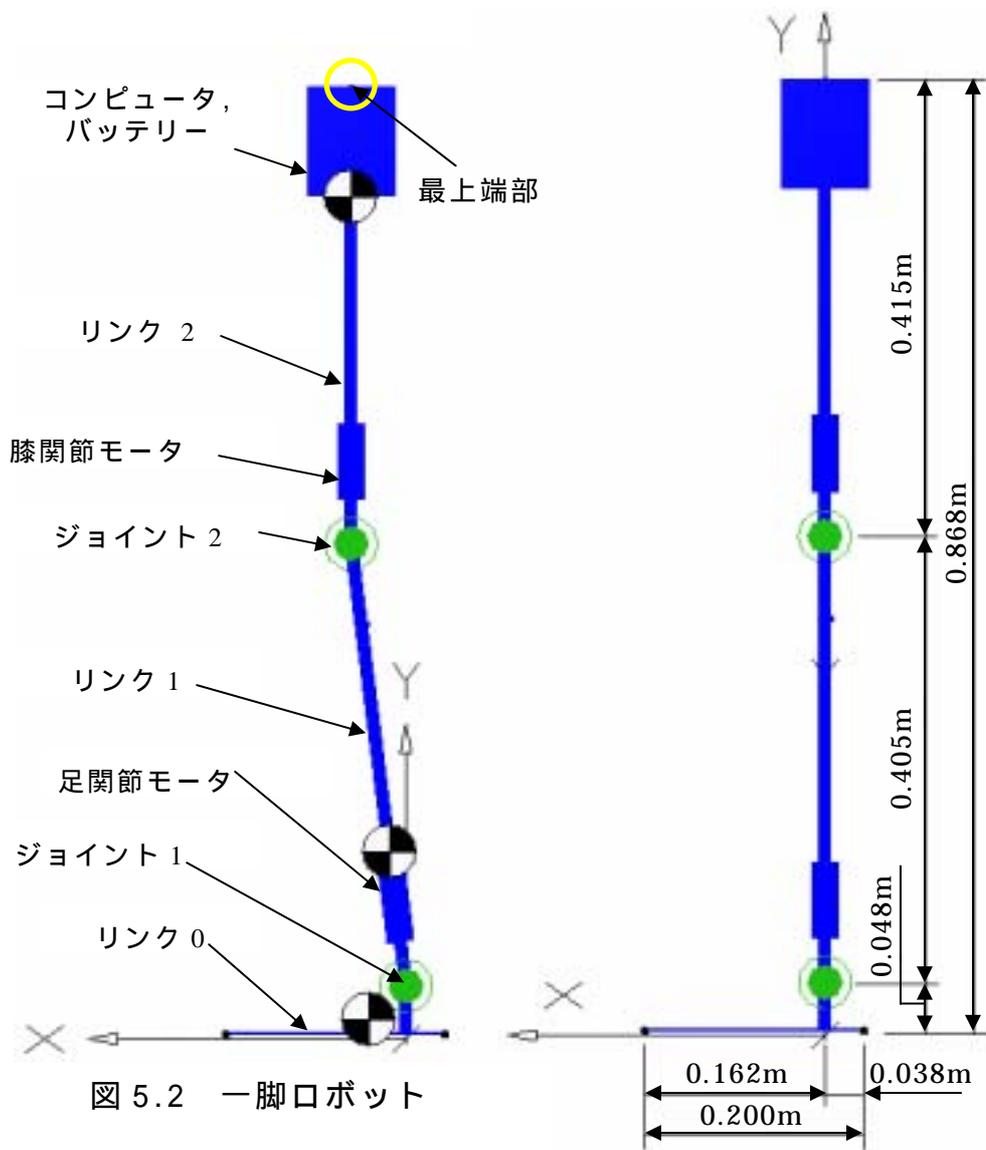


図 5.2 一脚ロボット

表 5.1 リンク質量

	質量 [kg]
リンク 2	2.4097273
リンク 1	0.4529889
リンク 0	0.0446376

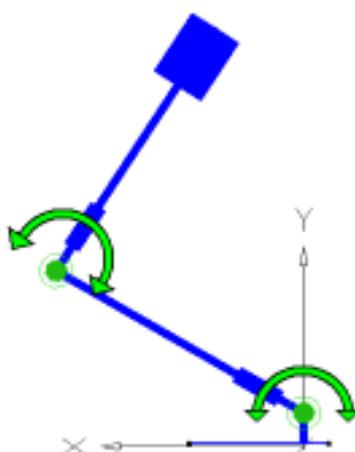


図 5.3 関節の動作方向

表 5.2 vN4D の主な設定値

	値	単位
フレーム時間	0.001	sec
フレーム数	1000	/sec
積分法	kutta-Merson	
固定・可変	固定	
積分の時間増分	0.0005	sec
フレーム毎の増分数	2	
収束許容値 位置	0.001	m
収束許容値 回転角度	0.001	rad
オーバーラップ許容値	0.02	
アセンブリ許容値	0.0001	m
有効桁数	20	
重力	9.8	m/sec ²

5.4 エネルギーによる評価

5.4.1 総合エネルギー，有効なエネルギー，無駄なエネルギー

初期姿勢における各リンクの重心位置 y_{i0} より，初期位置での位置エネルギー U_0 は

$$U_0 = \sum_i^3 m_i y_{i0} g \quad (5.1)$$

で表現される．また初期位置での各モータの初期角度を θ_{i0} ，モータの角度を θ_i ，モータ可動範囲の境界の角度を θ_{is} とすれば，初期位置からモータが系にする仕事 W_M は

$$W_M = \sum_i^2 \tau_{i\max} (\theta_i - \theta_{i0}) \quad (5.2)$$

で，境界に達した後は

$$W_{M\max} = \sum_i^2 \tau_{i\max} (\theta_{is} - \theta_{i0}) \quad (5.3)$$

で表現される．各回転部の衝突により消散されるエネルギー D_C は

$$D_C = \sum_i^2 \int c_i \dot{\theta}_i^2 dt \quad (5.4)$$

で減衰が働いている区間で積分して求める．また，摩擦による消散エネルギー D_F は摩擦力を F_i ，その部分の滑り速度を \dot{x}_{iF} とすれば

$$D_F = \sum_i^2 \int F_i \dot{x}_{iF} dt \quad (5.5)$$

で求められる．また，消散エネルギーとしてそれらをまとめたものを

$$D = D_F + D_C$$

とする．回転による運動エネルギー T_ϕ は，リンク i の重心まわりの慣性モーメントを J_i ，重心の絶対座標における回転角を ϕ_i とすれば

$$T_\phi = \frac{1}{2} \sum_i^3 J_i \dot{\phi}_i^2 \quad (5.6)$$

となる．また，水平方向（ x 方向）の運動エネルギー T_x は，各リンクの質量を m_i ，重心の水平方向の変位を x_i とすれば

$$T_x = \frac{1}{2} \sum_i^3 m_i \dot{x}_i^2 \quad (5.7)$$

となる．同様に上下方向の運動エネルギー T_y については，重心の上下方向の変位を y_i とすれば

$$T_y = \frac{1}{2} \sum_i^3 m_i \dot{y}_i^2 \quad (5.8)$$

となる．また位置エネルギー U は

$$U = \sum_i^3 m_i y_i g \quad (5.9)$$

となる．

したがって，総合エネルギー E は

$$E = U_0 + W_M \quad (5.10)$$

となる．総合エネルギー E は

$$E = U + T_y + T_x + T_\phi + D \quad (5.11)$$

と言う関係が常に成り立っている．

モータが可動範囲に達した後， E は

$$E = E_{\max} = U_0 + W_{M \max} \quad (5.12)$$

となり，一定の値になる．また，衝突が終了し，リンク全体も浮き上がっ

た後では

$$D = D_{\max} \quad (5.13)$$

として、一定の値となる。また、その時には、3リンクの形状は変化しないので、重心の高さが最高になった時、すなわち位置エネルギー U が

$$U = U_{\max} \quad (5.14)$$

になった時には、

$$T_y = 0 \quad (5.15)$$

になっているものと考えられる。したがって、最高到達点では

$$E_{\max} = U_{\max} + T_x + T + D_{\max} \quad (5.16)$$

となる。上式で、 E_{\max} は初期姿勢がきまれば与えられる。したがって、上方跳躍のための有効なエネルギー E_1 と無駄なエネルギー E_2 に分ければ、最高到達点では

$$E_1 = U_{\max} \quad (5.17)$$

$$E_2 = T_x + T + D_{\max} \quad (5.18)$$

で

$$E_{\max} = E_1 + E_2 \quad (5.19)$$

となる。また、 U_{\max} は重心の位置エネルギーであるが、最高到達点での姿勢があまり傾いていなければ、 U_{\max} を最大にする条件は、リンク系の上端の最高到達点 $y_{t\max}$ を最大にする条件と近い。したがって、同じ E_{\max} の場合であれば、無駄なエネルギー E_2 をできるだけ減らすような条件が、大きい

U_{\max} あるいは $y_{l\max}$ を与えることになる。したがって、できるだけ大きい E_{\max} を与え、かつ、その中の E_2 を小さくする条件が高く飛べる条件であるといえる。

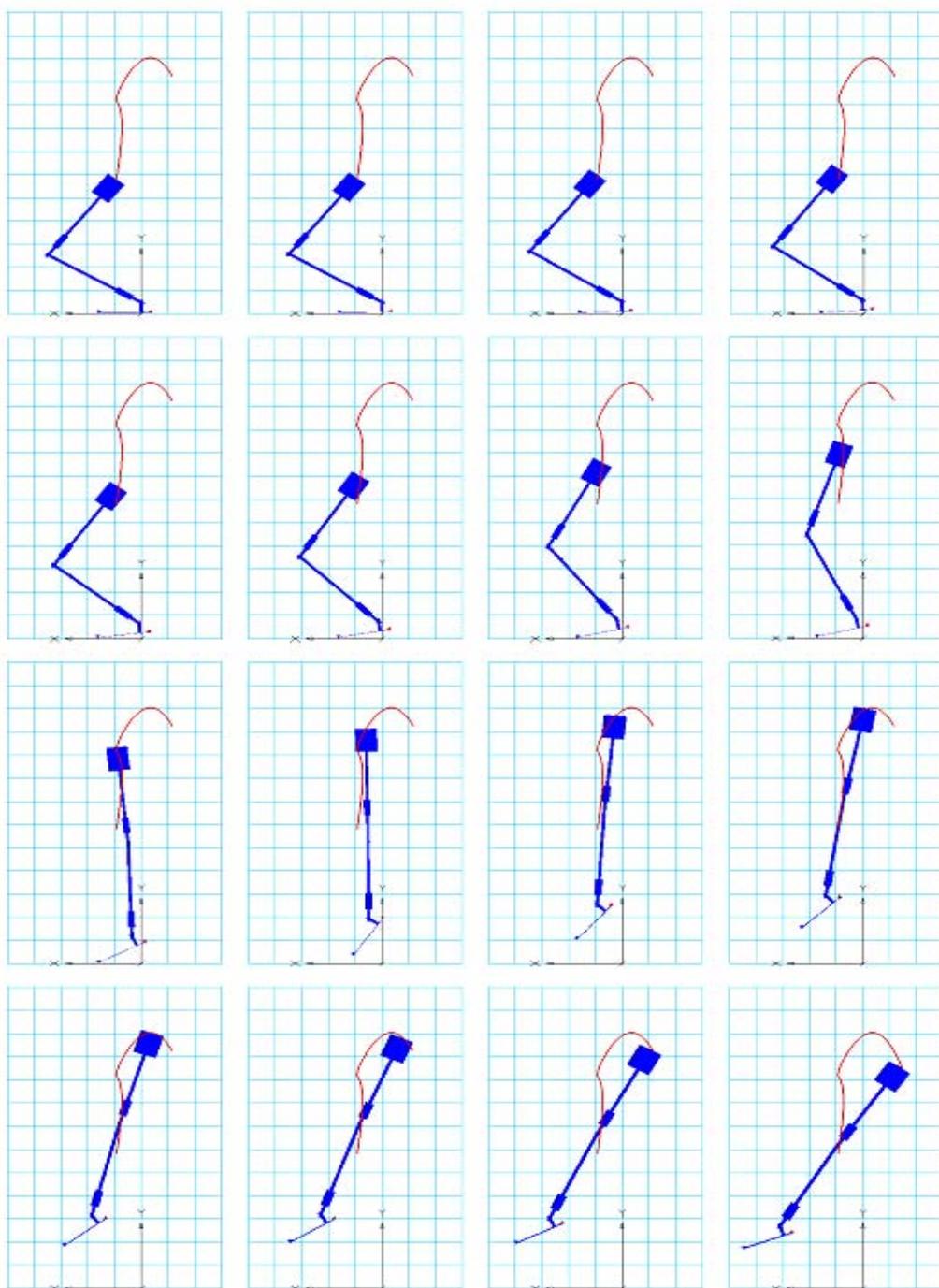


図 5.4(a) 跳躍例

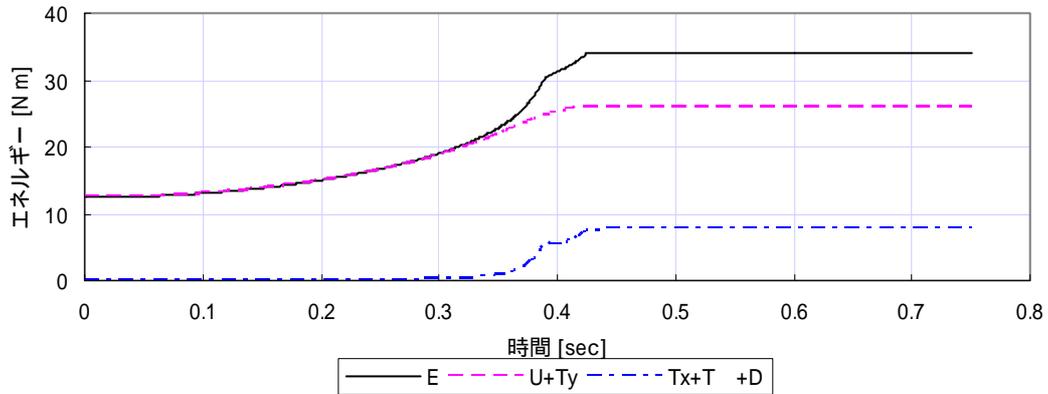


図 5.4(b) 計算例

例として，図 5.4(a)のような跳躍の場合のエネルギーの計算例を図 5.4(b)に示す．

5.4.2 総合エネルギーと初期高さ

図 5.5 に今回の計算を行った条件の初期姿勢における最上端部の座標を印で示している．図で最上端部の初期高さ y_{i0} が同じ条件の場合の E_{\max} を図 5.6 に示している．図より，最上端部の高さが同じであれば， E_{\max} はあまり変化していないことがわかる．そこで，最上端部の初期高さ y_{i0} の変化に対する E_{\max} とその内訳である初期の位置エネルギー U_0 ，モータによる入力エネルギーの最大値 $W_{M \max}$ を図 5.7 に示す．図より， y_{i0} が低くなれば， U_0 は小さくなるが， $W_{M \max}$ は大きくなっている．両者の和である E_{\max} は，この y_{i0} の範囲では y_{i0} が小さいほど大きくなっている．しかし，この範囲を超せば，多少水平位置により異なるが，おおむね，与えられたモータトルクでは，姿勢を保つことが不可能になり，くずれてしまうことになる．また， y_{i0} の減少に対する U_0 の減少の割合が， $W_{M \max}$ の増加の割合と比べて徐々に大きくなりエネルギー的にも，これ以上 y_{i0} を低くする意味がないことがわかる．

このように，ある範囲内であれば y_{i0} が低いほうが，総合エネルギー E_{\max} が大きくなり， y_{i0} によって，近似的に E_{\max} の大きさが与えられることになる．

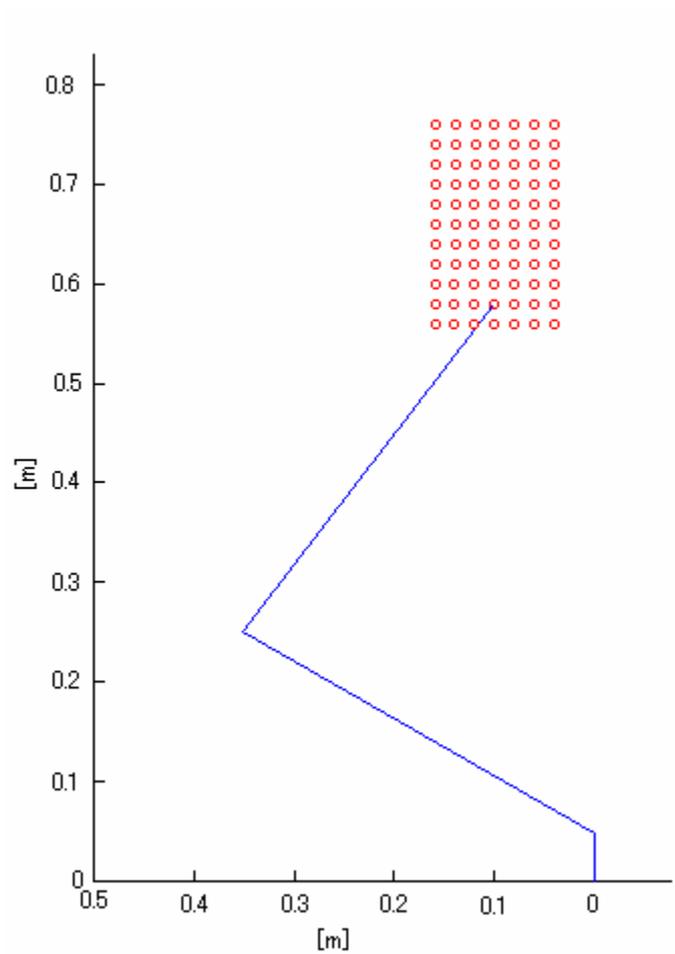


図 5.5 跳躍開始位置

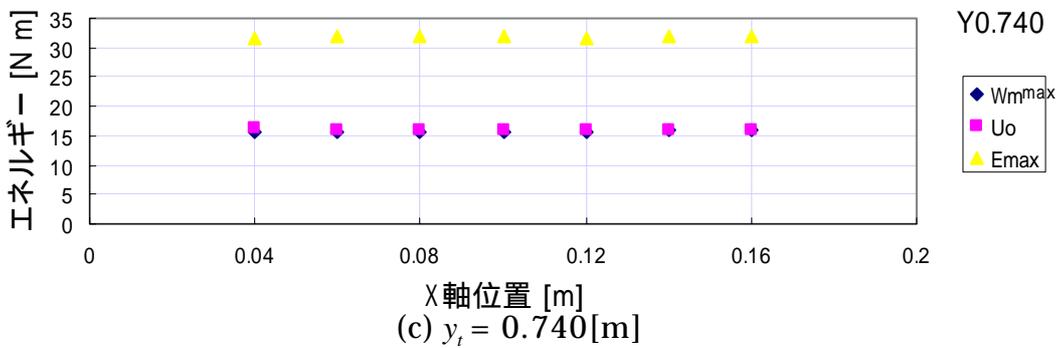
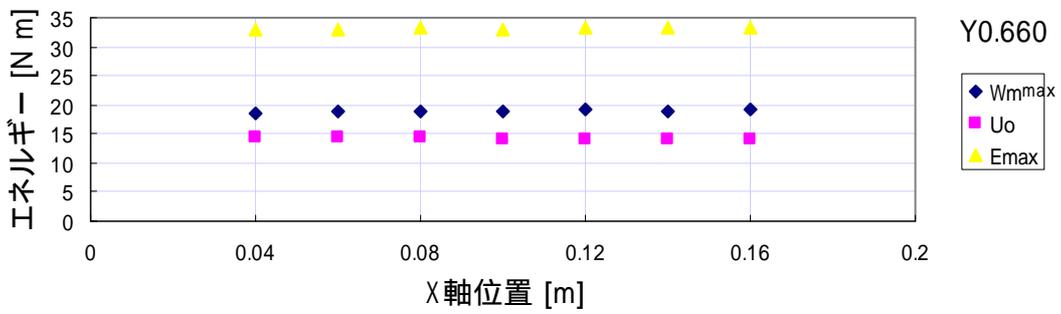
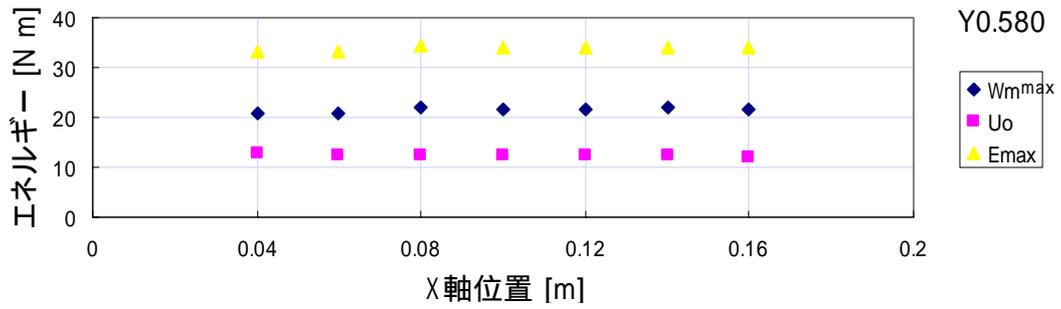


図 5.6 初期高さ y_{t0} が同じ条件の場合の U_o , E_{\max} , $W_{M \max}$

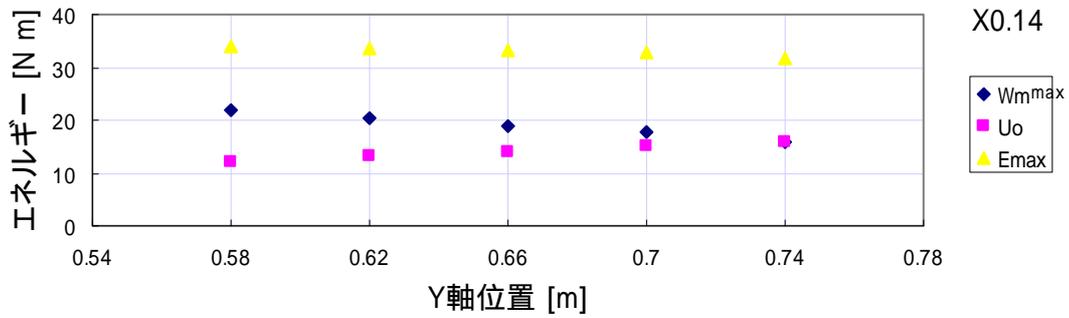
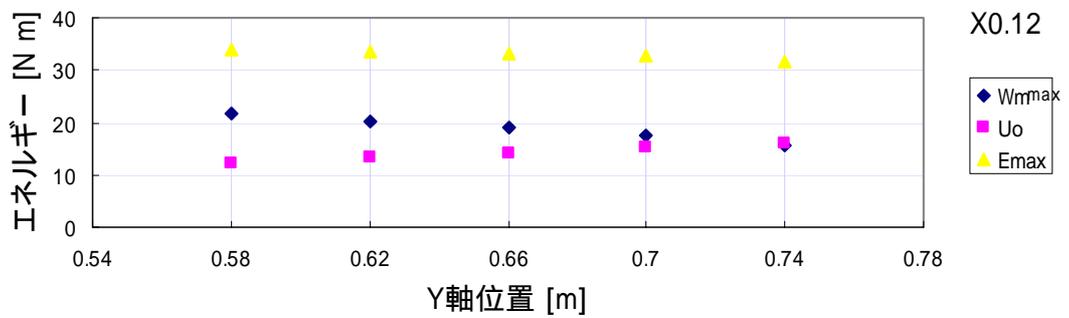
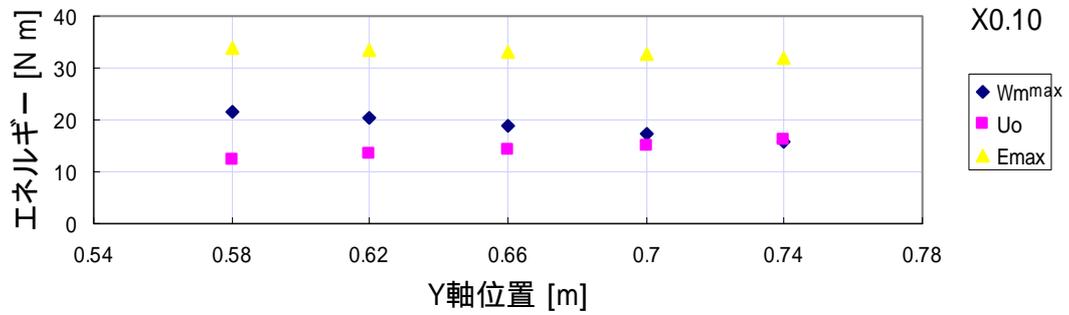


図 5.7 初期高さ y_{r0} が変化する場合の U_0 , E_{\max} , $W_{M\max}$

5.5 シミュレーションおよびパラメータの影響度の検討

5.5.1 計算条件

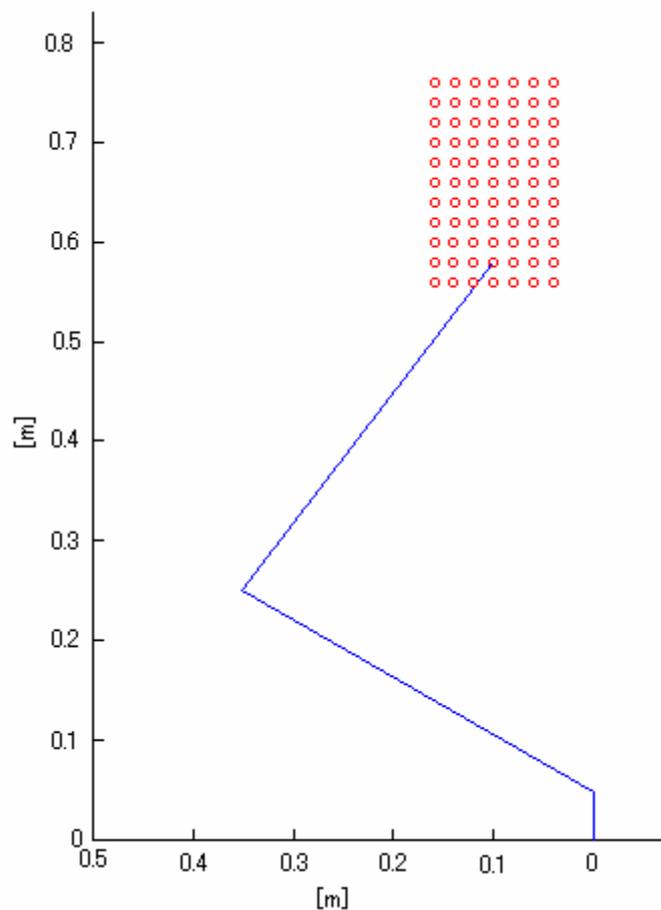


図 5.8 跳躍開始位置

比較的効率的な跳躍が可能な条件を中心に，図 5.8 に丸印で示すように，最上端部の位置を高さ y_{r0} を 0.56m から 0.76m まで，水平方向である x 軸方向の座標 x_{r0} は 0.04m から 0.16m まで 0.02m 間隔で跳躍について visual Nastran4D(vN4D)および Simulink5.0 を用いて計算を行った．足と地面の間の摩擦係数 μ については摩擦が無い場合として 0.0，0.5 程度の摩擦係数が存在する場合，非常に滑りにくい状態として摩擦係数が 5.0 の場合について計算した．

5.5.2 結果の検討

5.3 での検討結果より，同じ y_{i0} であれば，最大総合エネルギー E_{\max} も同等であるので，同じ y_{i0} の場合の y_i の軌跡を一つの図にまとめ，0.56m から 0.76m の間でそれを y_{i0} を変えて計算した結果をまとめたものを図 5.9 から図 5.11 に示す．図の曲線は，初期姿勢からの先端部の軌跡を示している．3つの図は，それぞれ，摩擦係数 μ が 0.0, 0.5, 5.0 の場合である．また，図のなかで四角で囲っている数字は，初期姿勢の高さ y_{i0} である．

以下では，これらの図を比較しながら，また，姿勢の軌跡やエネルギーの結果を適宜まじえながら現象の説明を行う．

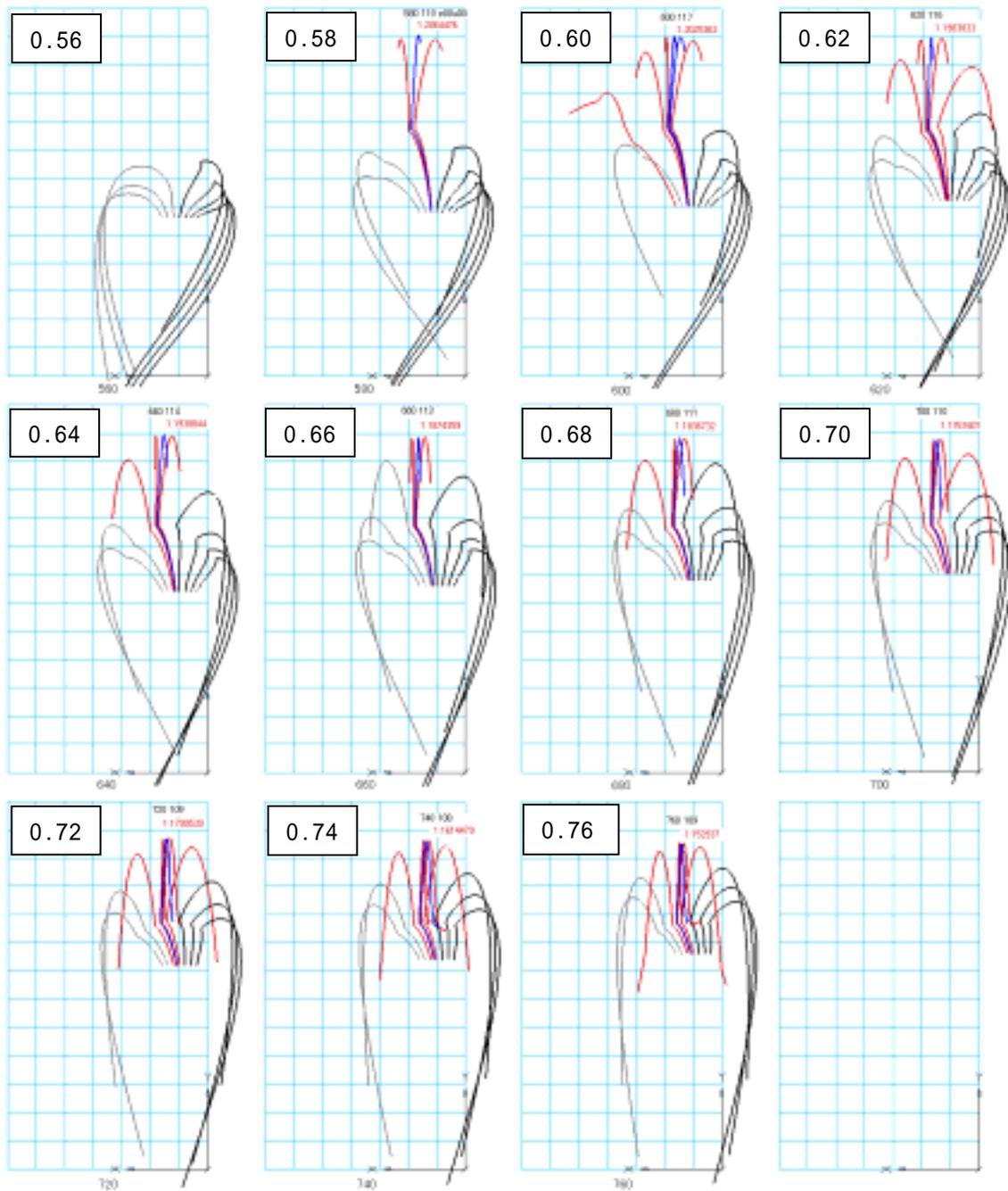


図 5.9 摩擦係数 0.0 の軌跡

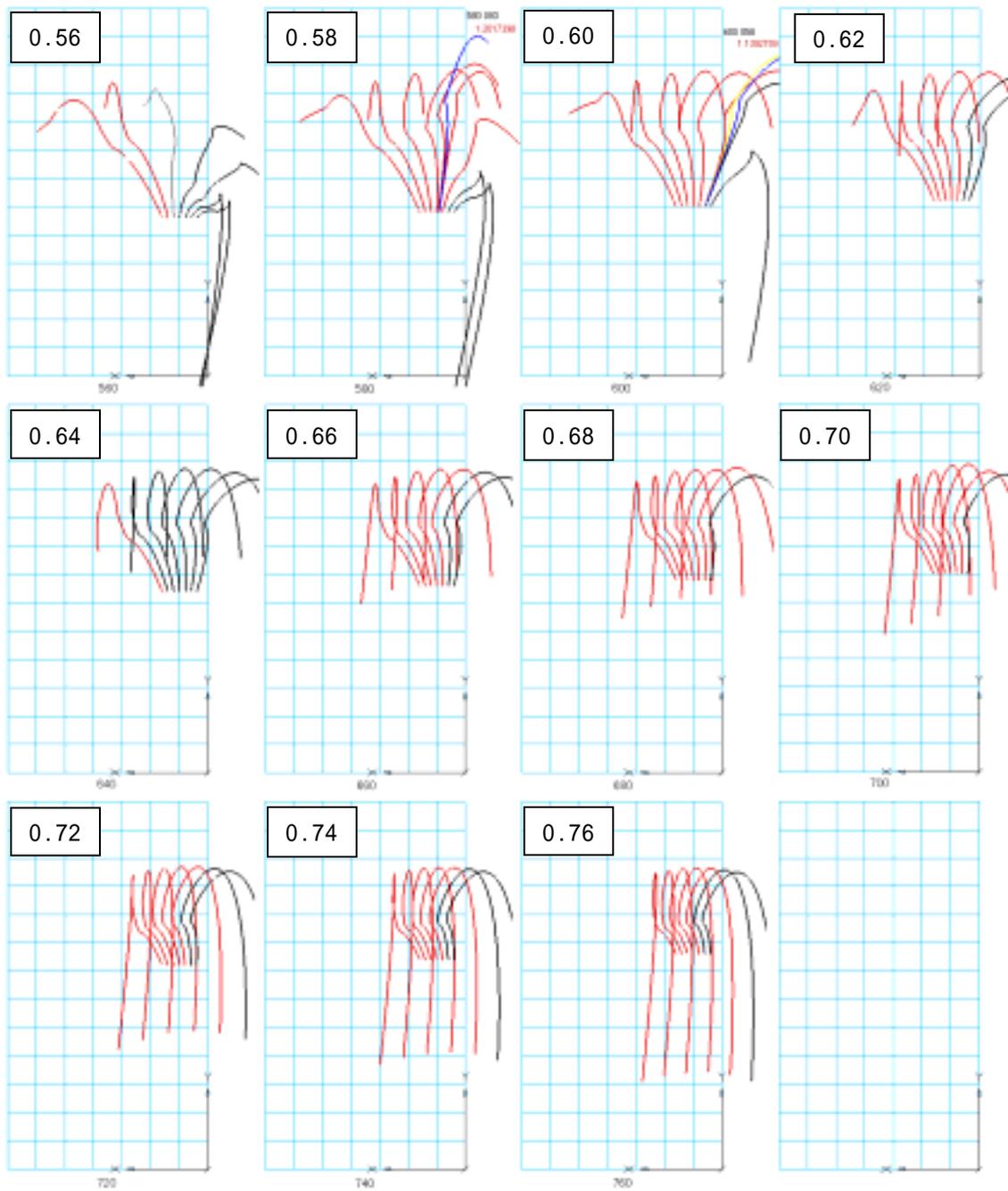


図 5.10 摩擦係数 0.5 の軌跡

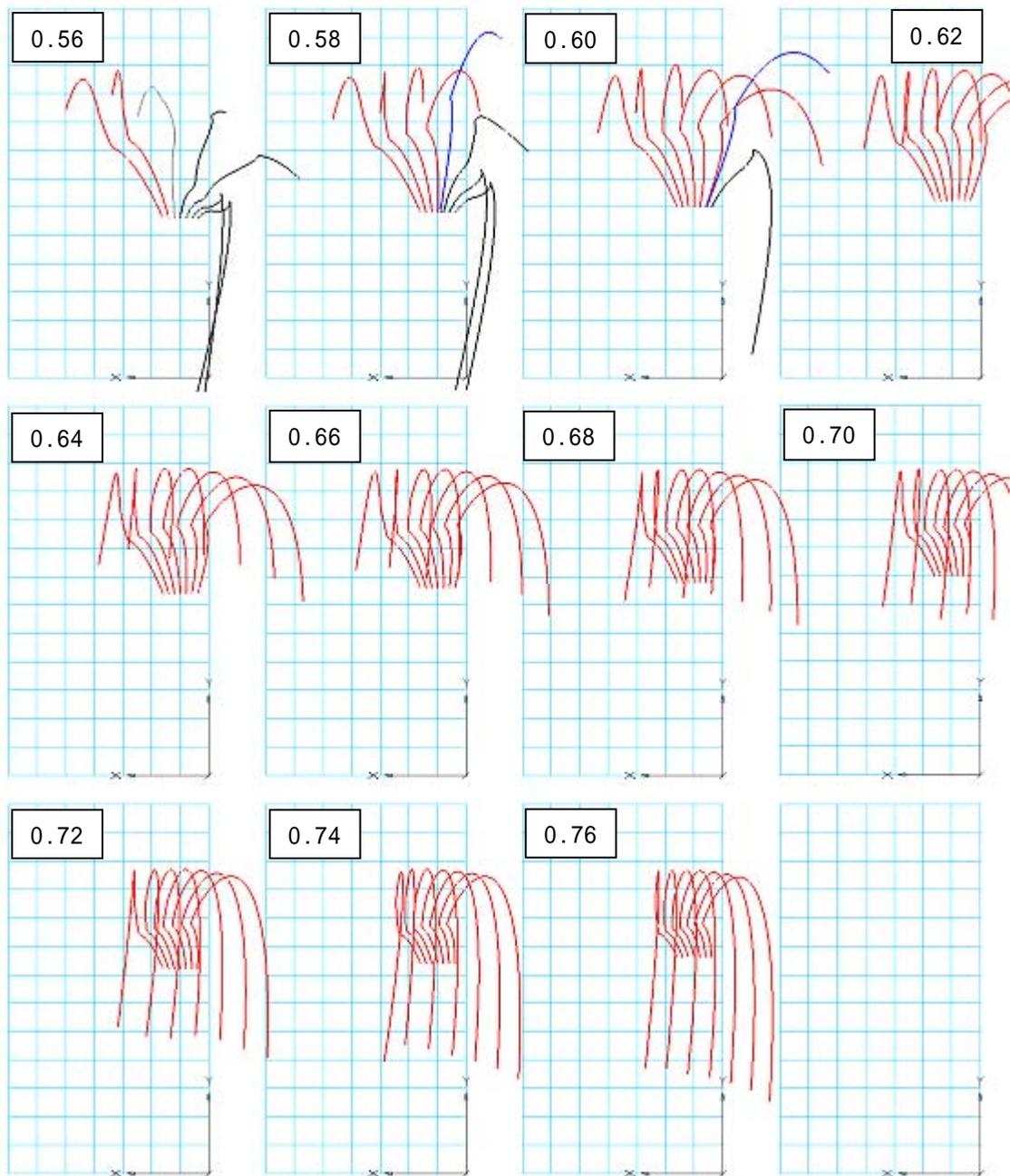


図 5.11 摩擦係数 5.0 の軌跡

(1) 全体的な傾向

まず、最初に y_t の軌跡の全体的な傾向について議論を行う。全体的な傾向としては、 y_{i0} が 0.56m の場合には、うまく跳躍できない場合もあるが、 y_{i0} が 0.58m 以上であれば、一つの y_{i0} に対して水平位置を変化させると、リンク最上端部の最高到達高さ y_{tmax} について最適な点 x_{topt} があることがわかる。ただし、最適点の近傍での様子は、初期高さ y_{i0} の大きさや摩擦係数によって異なる。摩擦係数 $\mu=0$ の場合には、 y_{i0} の大きさに係わらず、最適点近傍での y_{tmax} はゆるやかに変化している。一方、摩擦が存在する場合には、 y_{i0} が小さい領域では、最適点は非常に鋭いピークが認められる場合があるが、それ以外では、摩擦のない場合よりも逆に x_{i0} による差が少なくなっている。鋭いピークについては、今後、精度的な確認も必要とは考えられるが、後述の跳躍姿勢やエネルギー収支からは、問題は認められないので、ここでは正しいとして議論を進める。また、それぞれの条件での $x_{topt}(y_{i0}, \mu)$ の位置は、 μ や y_{i0} の値により微妙に変化している。また、 y_{i0} の高さが低いほど、 $x_t = x_{topt}$ の場合の y_{tmax} は大きくなっており、前節の検討での E_{max} と同じ傾向であることがわかる。

(2) $x_t = x_{topt}$ の場合の運動の軌跡

ここで、 $x_t = x_{topt}$ の場合の運動の軌跡として、図 5.12 から 5.14 にそれぞれの摩擦係数について、最も高い y_{tmax} を示している y_{i0} (0.58m の場合) のリンク系全体の運動の軌跡を示す。図では 0.05msec 刻みで姿勢の変化を示している。図より、多少全体が回転しているが、比較的、鉛直な姿勢に近く、ほぼ満足できる姿勢であると思われる。したがって、モータトルクを最大で固定して力を加えても初期姿勢を調整すれば、ある程度満足できる姿勢での跳躍が得られていることがわかる。

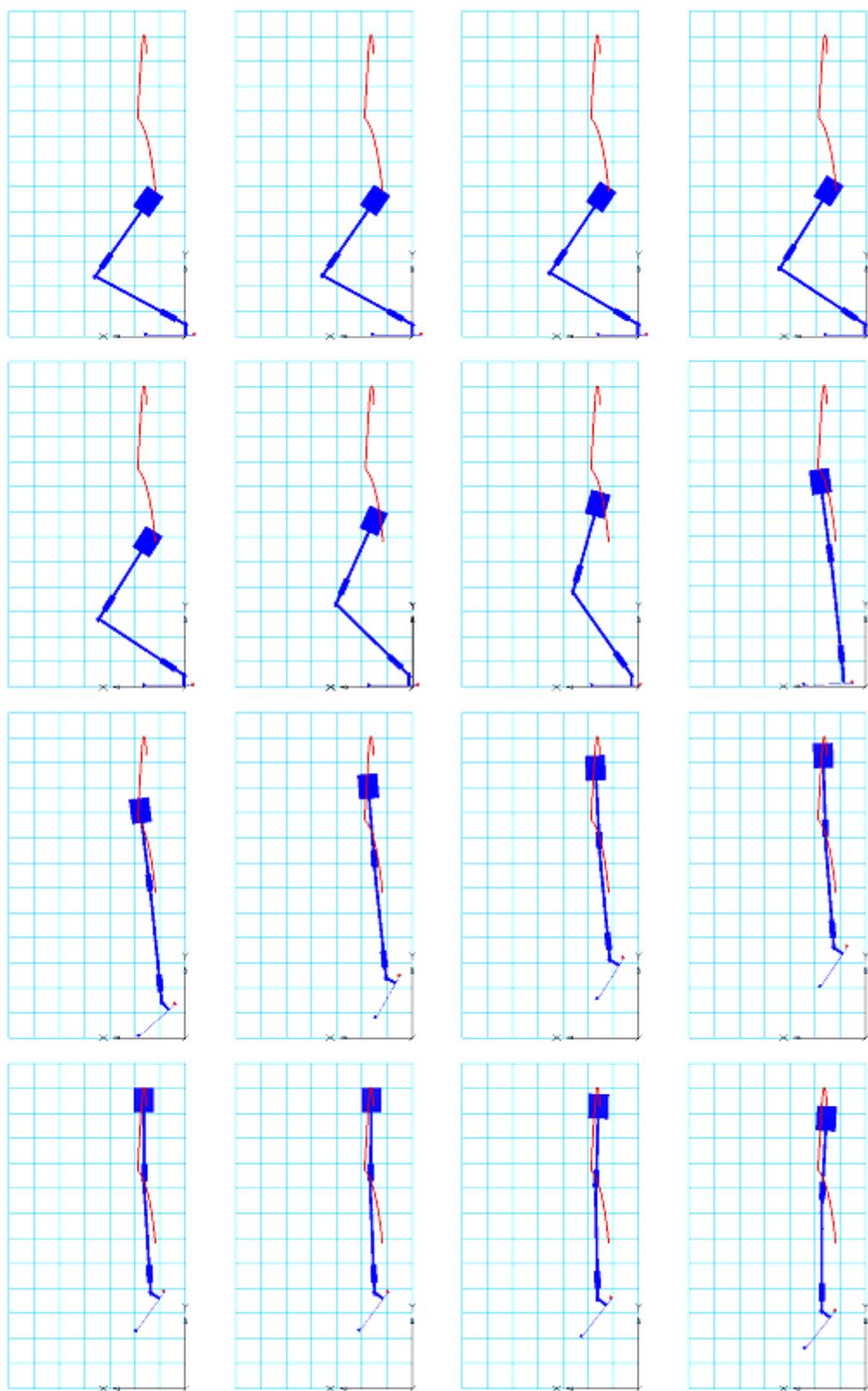


图 5.12 $\mu=0$ $y_{t_0}=0.580$ $x_{t_0}=0.119$

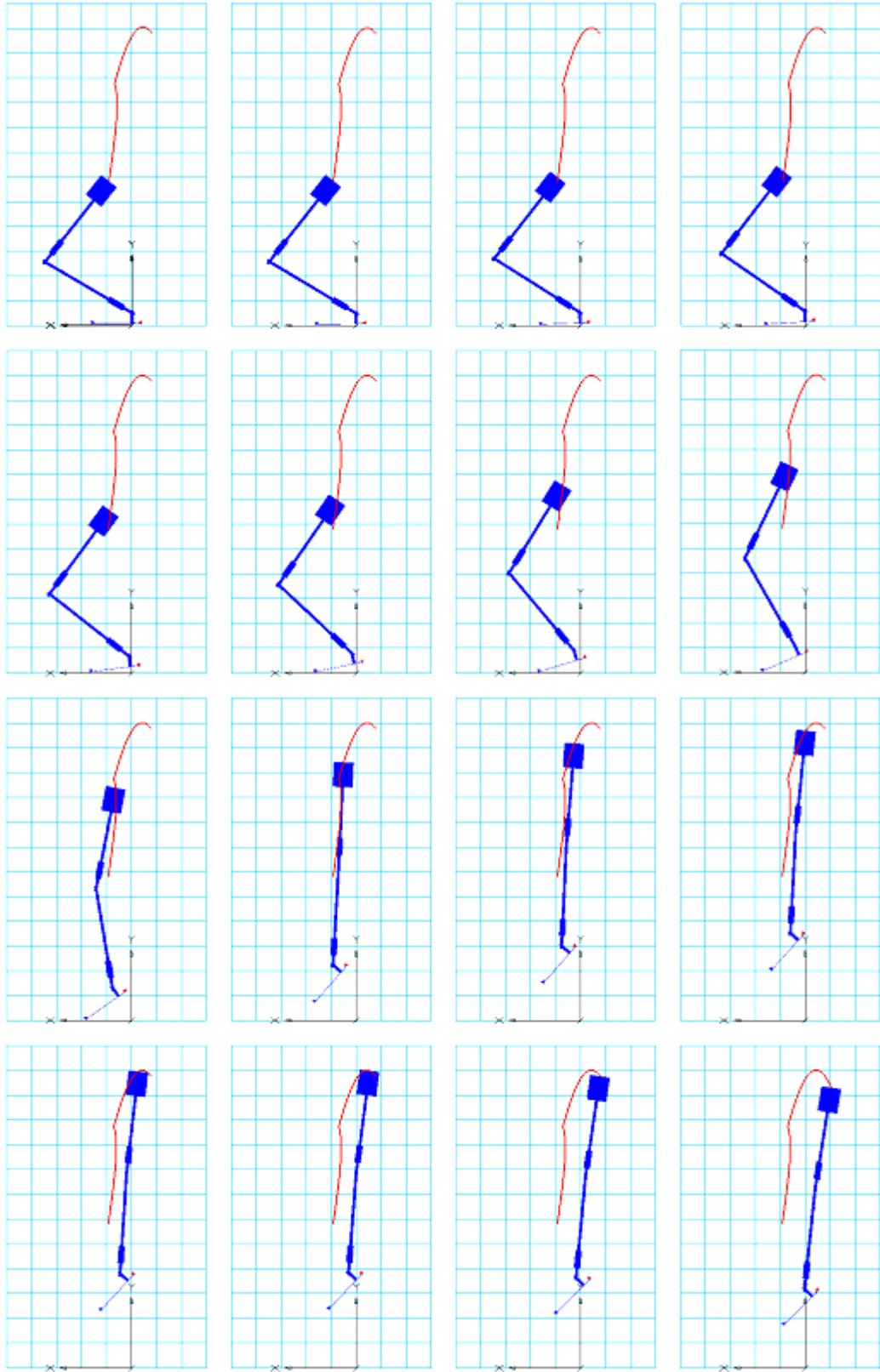


图 5.13 $\mu=0.5$ $y_{t_0}=0.580$ $x_{t_0}=0.093$

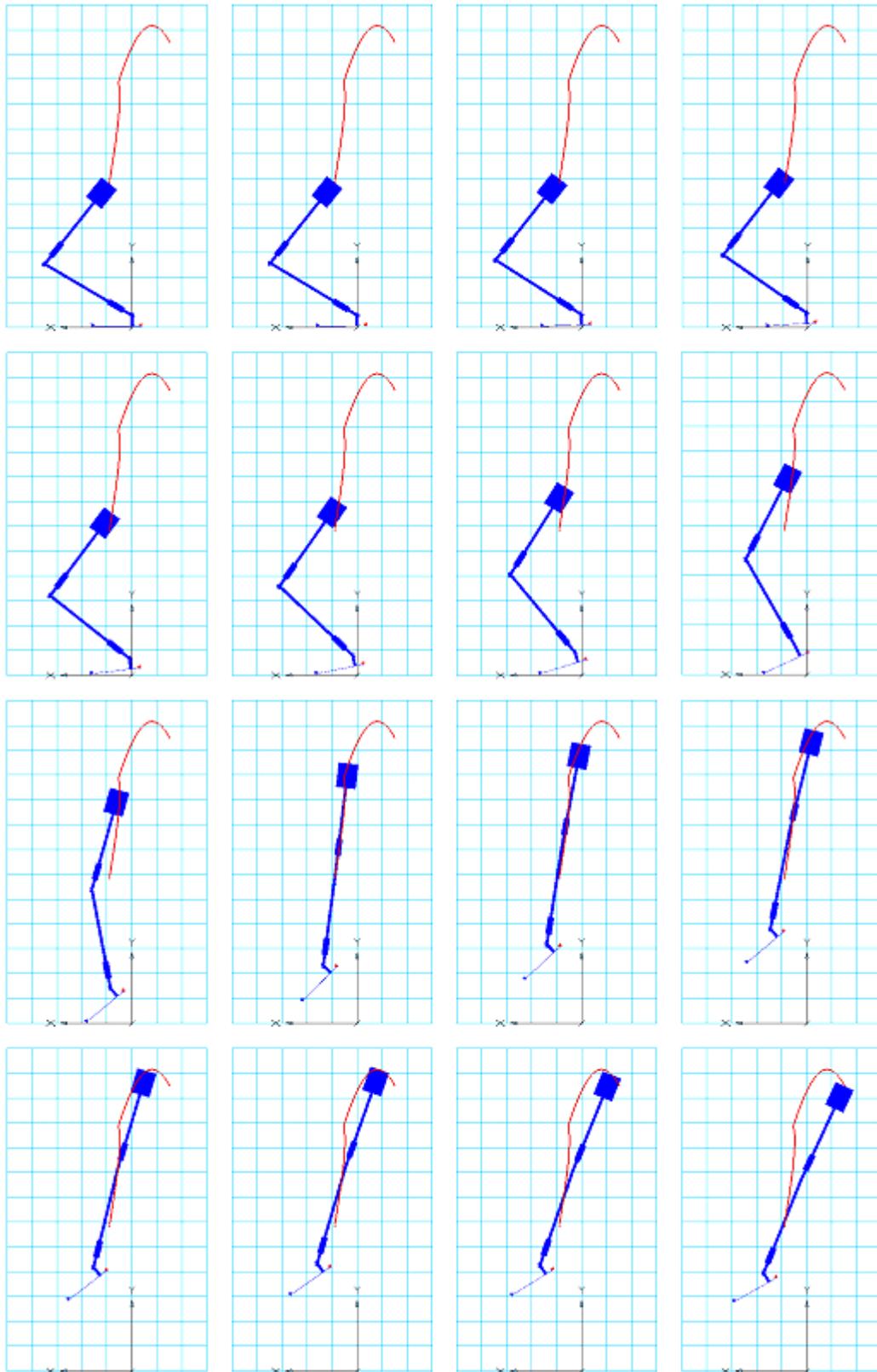


图 5.14 $\mu = 5.0$ $y_{i0} = 0.580$ $x_{i0} = 0.091$

(3) 摩擦係数の変化の跳躍高さに対する影響

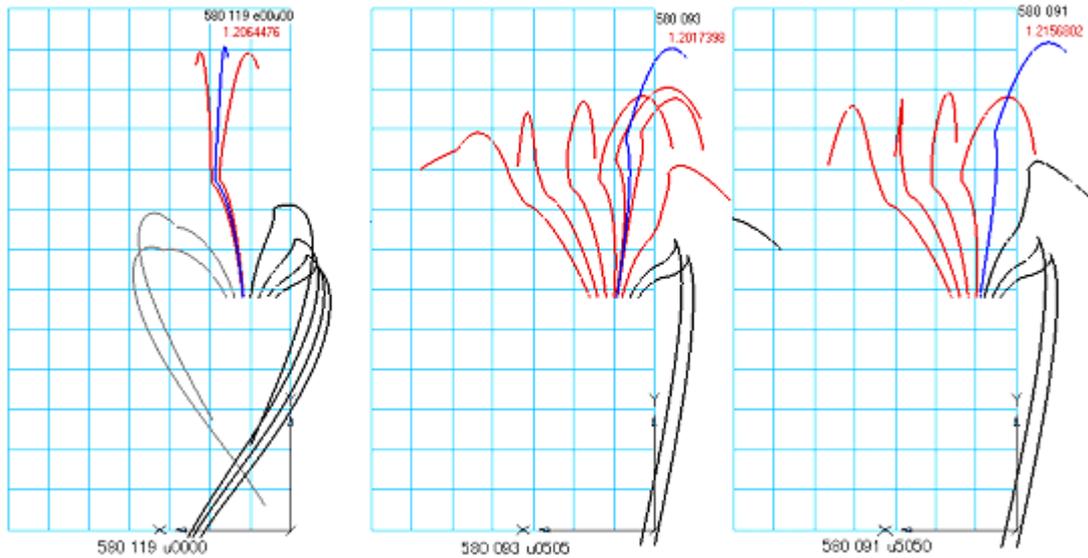


図 5.15 $y_t=0.58\text{m}$, $x_t = x_{opt}$ の場合の各摩擦係数での軌跡

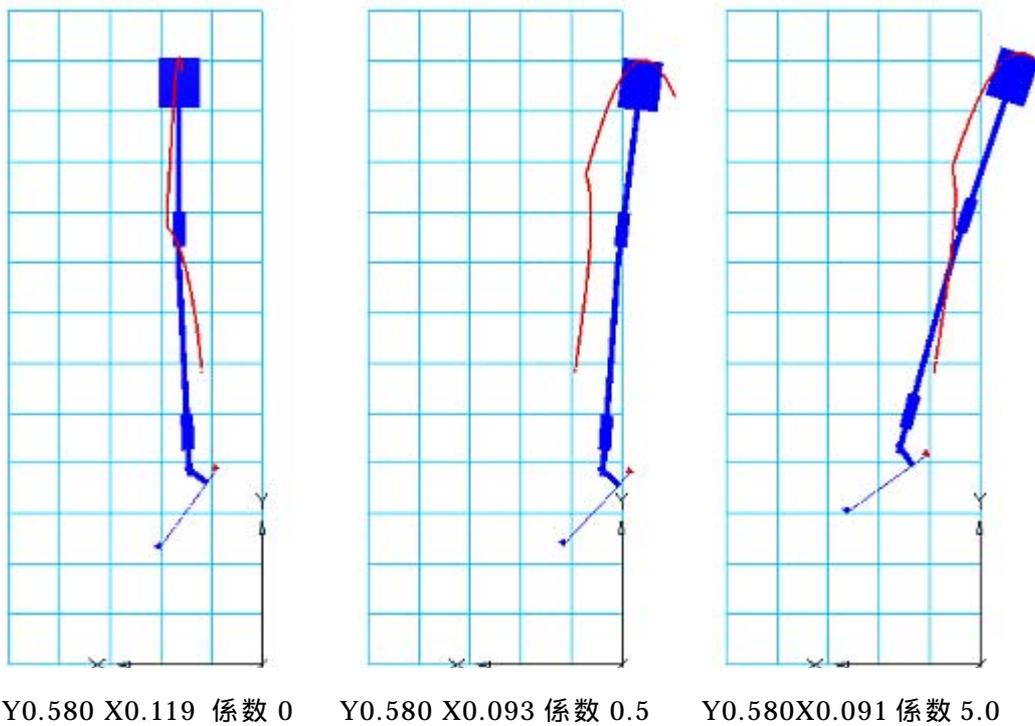


図 5.16 各摩擦係数で最高到達点の姿勢

図 5.15, 5.16 に, $y_{i0} = 0.58\text{m}$ の場合について, それぞれの摩擦係数の場合の, y_i の軌跡の拡大図および, 最適な x_i を用いた場合の最高到達点における姿勢を示す. 前述の摩擦がある場合の鋭いピークを考慮すれば, 3つの場合の先端の最頂到達高さ $y_{i\max}$ は, 摩擦係数が 0, 0.5, 5.0 の場合にそれぞれ, 1.2064, 1.2017, 1.2157 で, 初期姿勢での水平位置 x_{i0} は, それぞれ 0.119, 0.093, 0.091 の場合である. 摩擦係数によって, 初期の水平位置はかなりずれるものの, $y_{i\max}$ についてはあまり大きい差は認められない. あえて順序をつければ, $\mu = 5.0$ の場合が最大で, 次が $\mu = 0$ で最後が $\mu = 0.5$ となっている. また, 鋭いピークを除けば, 摩擦のある状態の場合には, 摩擦のない状態よりも $y_{i\max}$ が小さくなっている. これらのことから, 摩擦係数がないというのは, 現実的ではないものの全般的に良好な結果を出しているといえる. このことは, 摩擦がないことは, 姿勢が比較的安定していることが影響しているものと思われる.

一方, 最適な水平位置は, 摩擦によって影響を受けている. 摩擦係数が 0.5 以上の場合には, ほとんど差ないが, 摩擦が無い場合には, 最適な位置がかなり前方は移っていることがわかる.

(4) 最適点の運動の軌跡 (摩擦係数による相違)

次に, 前述の図 5.12 から 5.14 に示した運動の軌跡を詳細に見てみる. 図 5.13 と図 5.14 の摩擦が存在する場合には, 踵が浮いた後, 膝関節と足関節が同じようなタイミングで開いていっており, モータの可動範囲が終了し, 塑性衝突を起こすタイミングも 2つの関節であまり差がないことがわかる. 一方, 摩擦がない場合には, 踵が浮く前に, 膝関節が開ききり, 摩擦があるときと比べればかなり遅れて踵が浮き出している. また, 足関節が衝突するタイミングは, 膝関節のそれと比べてかなり遅れていることがわかる. このように, 運動の様子が異なっていると同時に, $x_{i\text{opt}}$ の場所

も摩擦の有無によってかなり異なっており，摩擦がない場合のほうが0.02-0.03m程度前傾した位置になっている．

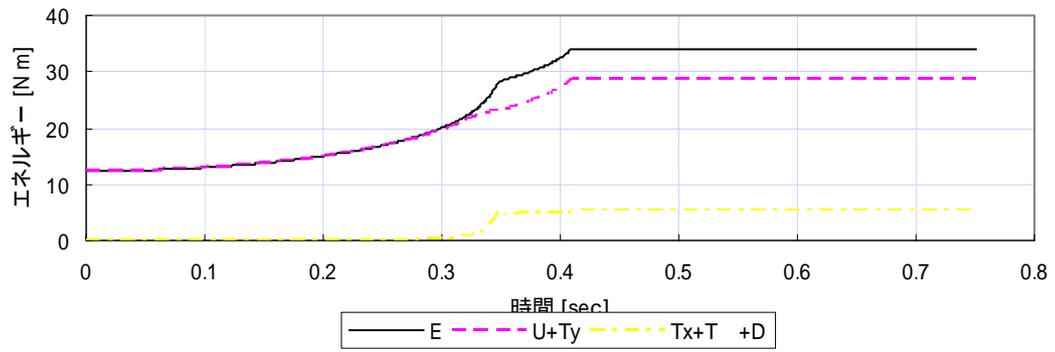
(5) 最適点のエネルギーの推移 (摩擦係数による相違)

(3)と同じの条件での，エネルギーの推移を図5.17-5.19に示す．まず，最初に図5.18を例に図の説明を行う．

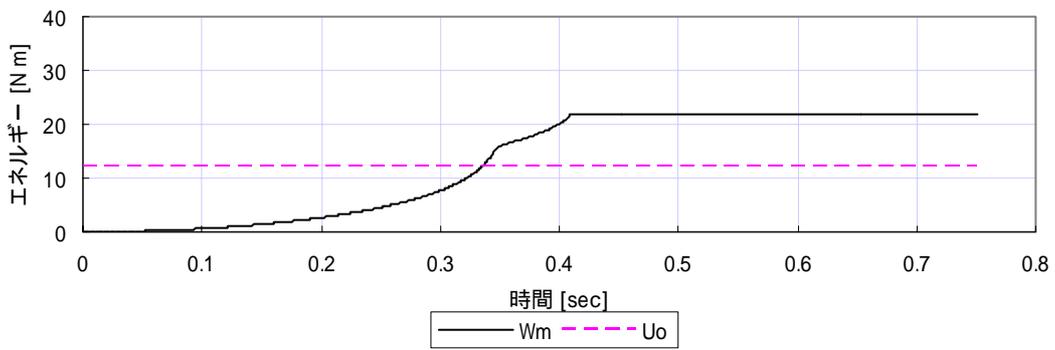
図では，モータにトルクが加われば，徐々に W_M が増加している． W_M は，モータが衝突すれば，それ以上増加しないので，両方のモータが衝突した後は，一定値となる． E_{\max} は，それに初期の位置エネルギーを加えたものになっている．また，運動エネルギーのうち，有効なエネルギーである上下方向の T_y は，位置エネルギー U が最大になるあたりでほぼゼロとなり，運動エネルギーが位置エネルギーに変わっていった様子が確認できる．また，関節が衝突した時には，消散エネルギー D_C が発生しているが，その時に運動エネルギー（時に回転や水平の運動エネルギー）が，その分だけ減少していることが認められる．また，摩擦による消散エネルギー D_F も発生しているものの，衝突による消散エネルギーよりも小さい．

3つの図より，最高到達点近傍では，いずれも無駄なエネルギーのなかで回転や水平方向の運動エネルギーは少なく，姿勢の面からも良好な結果になっていることと関連している．また，消散エネルギーでは，塑性衝突によるものが支配的であり，摩擦による消散エネルギーは，回転や水平の運動エネルギーよりも大きいものの，塑性衝突によるものよりも小さくなっている．また，最高到達点においては，効率を示す指標として，次式で定義される

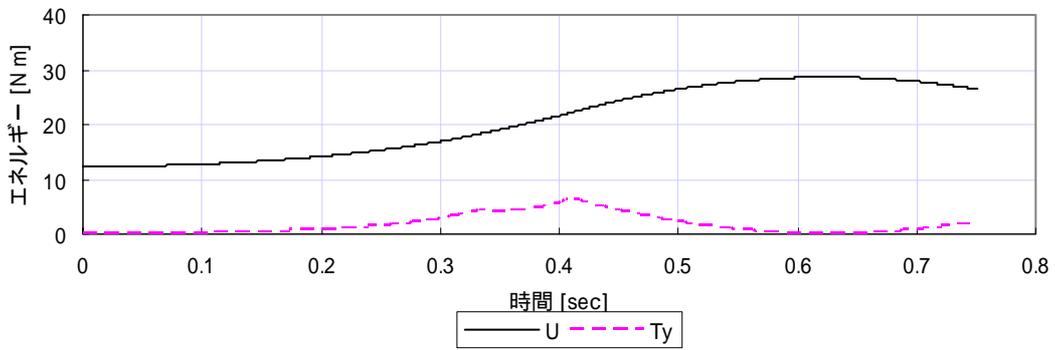
$$\eta_1 = \frac{U_{\max}}{E_{\max}} \quad (5.20)$$



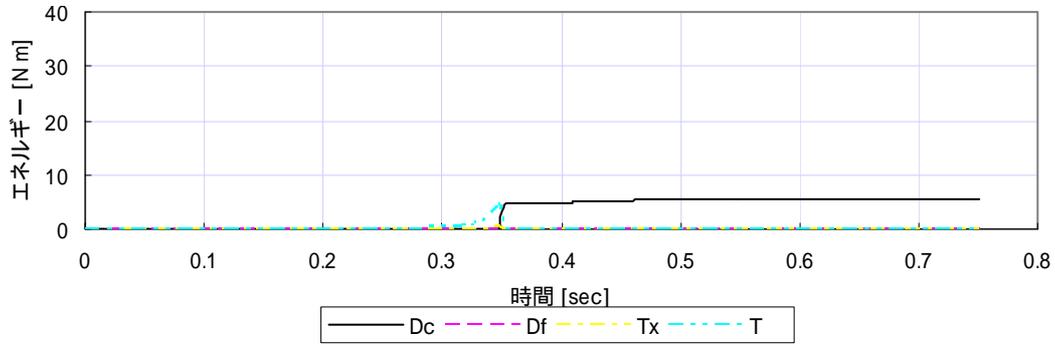
E



Wm+Uo

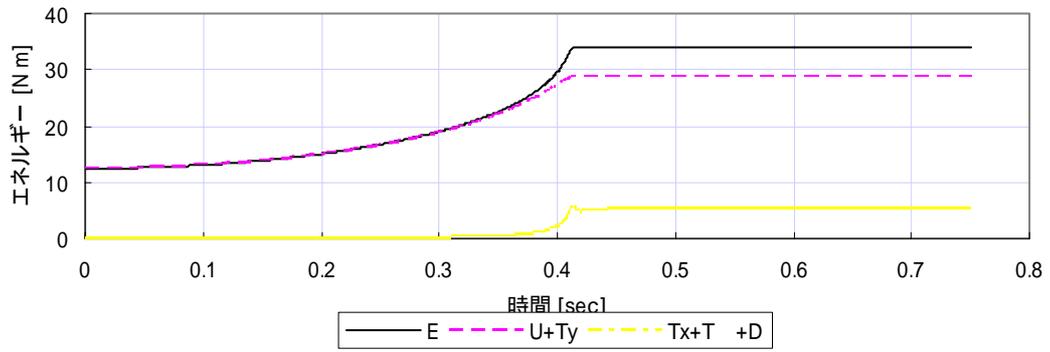


U+Ty

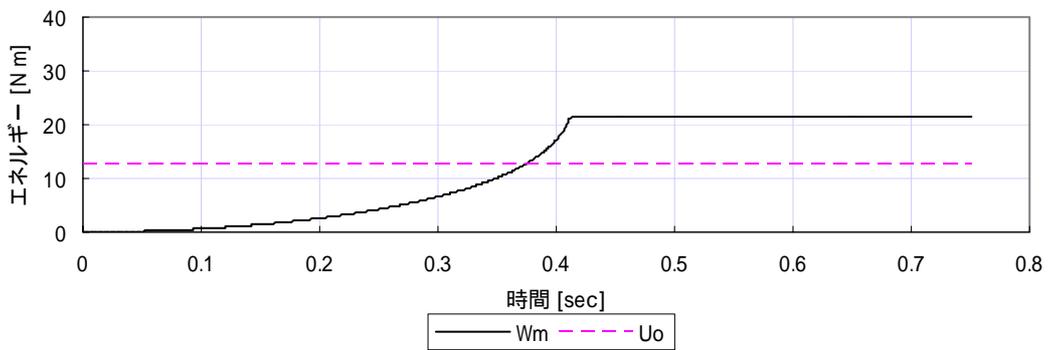


Dc+Df+Tx+T

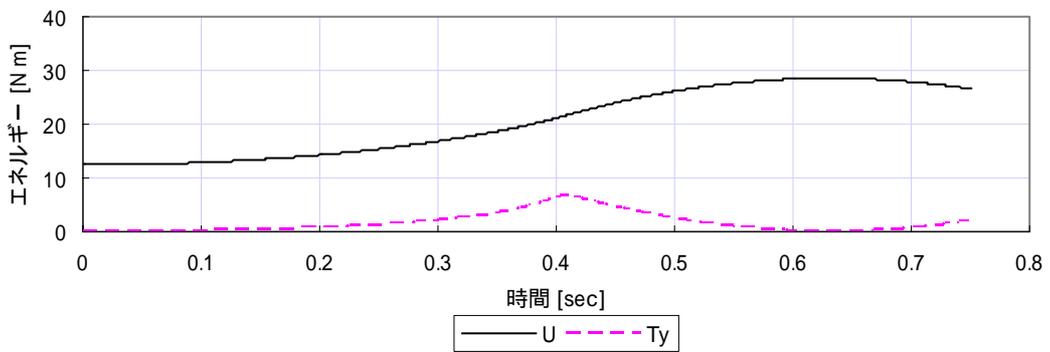
図 5.17 $\mu=0$ $y_{t0}=0.580$ $x_{t0}=0.119$



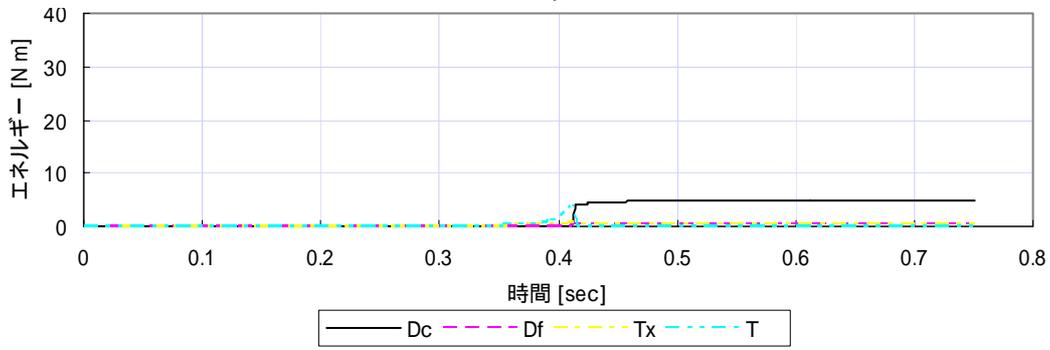
E



Wm+Uo

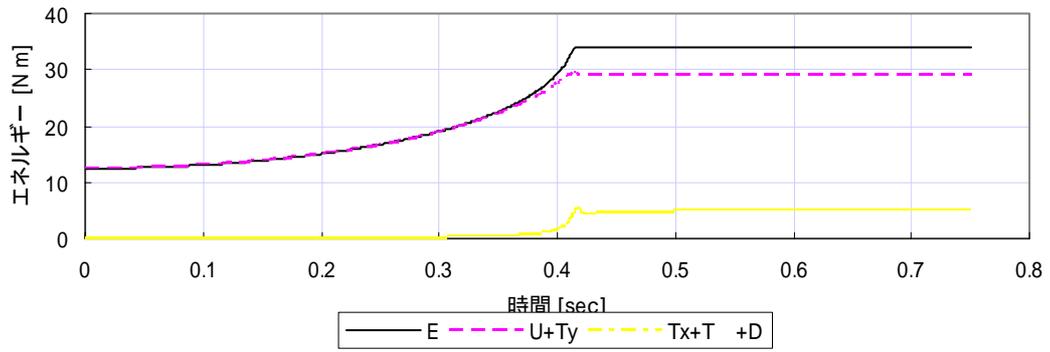


U+Ty

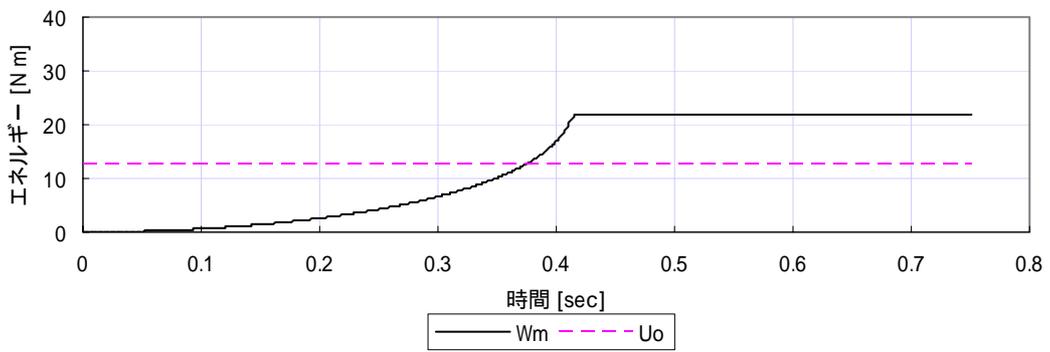


Dc+Df+Tx+T

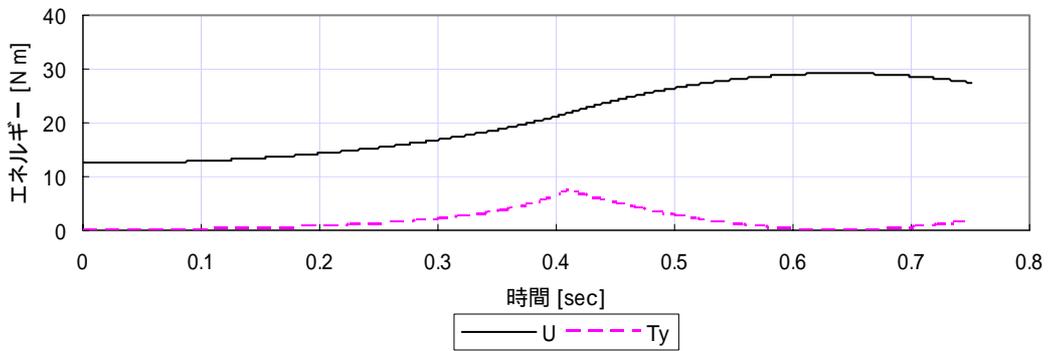
図 5.18 $\mu = 0.5$ $y_{r0} = 0.580$ $x_{r0} = 0.093$



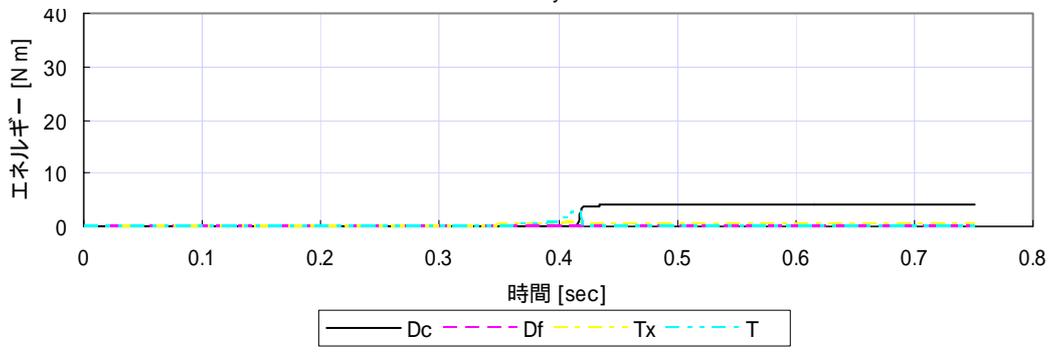
E



Wm+Uo



U+Ty



Dc+Df+Tx+T

図 5.19 $\mu = 5.0$ $y_{i0} = 0.580$ $x_{i0} = 0.091$

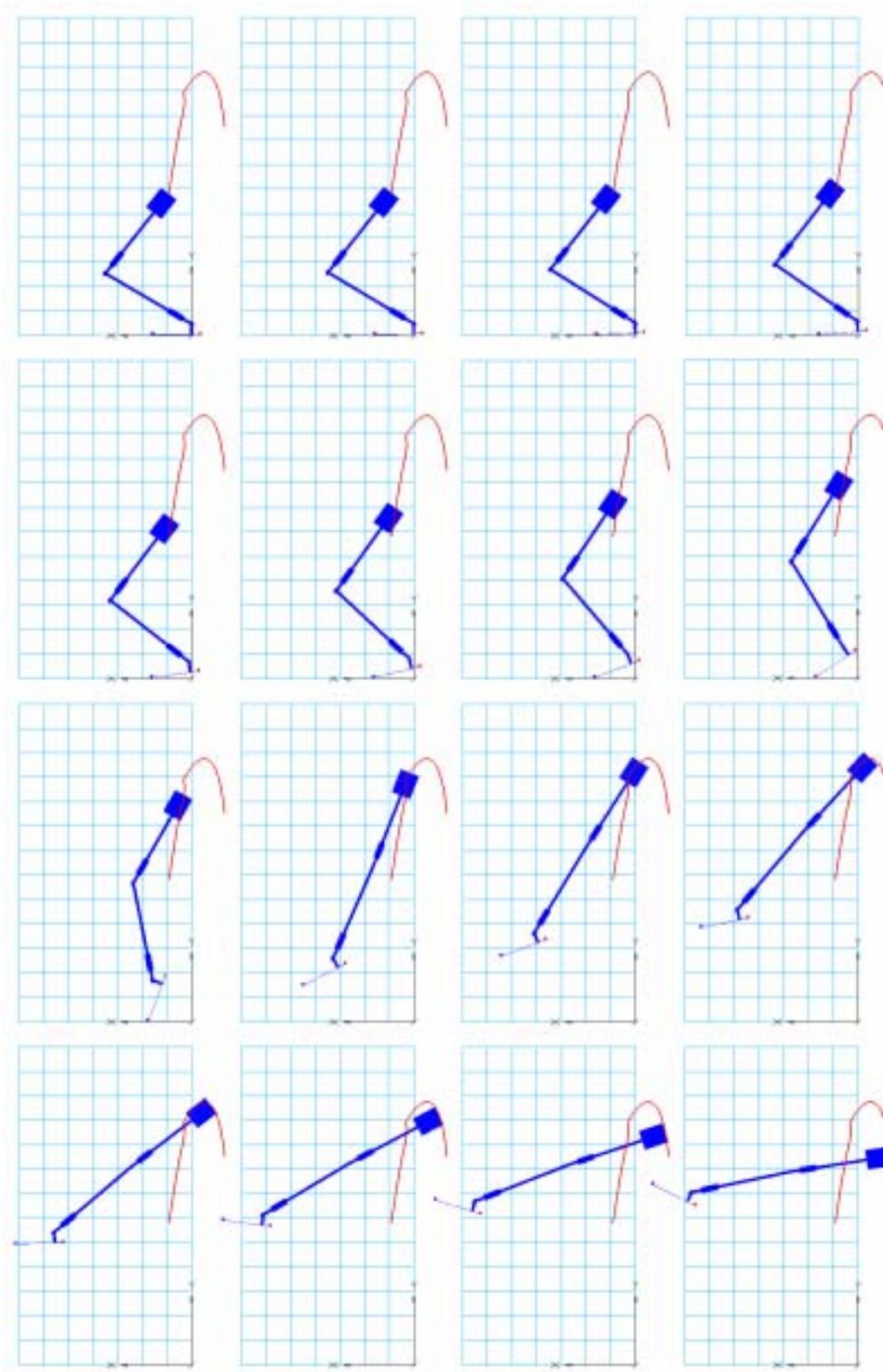


图 5.20 $\mu = 0.5$ $y_{i0} = 0.580$ $x_{i0} = 0.092$

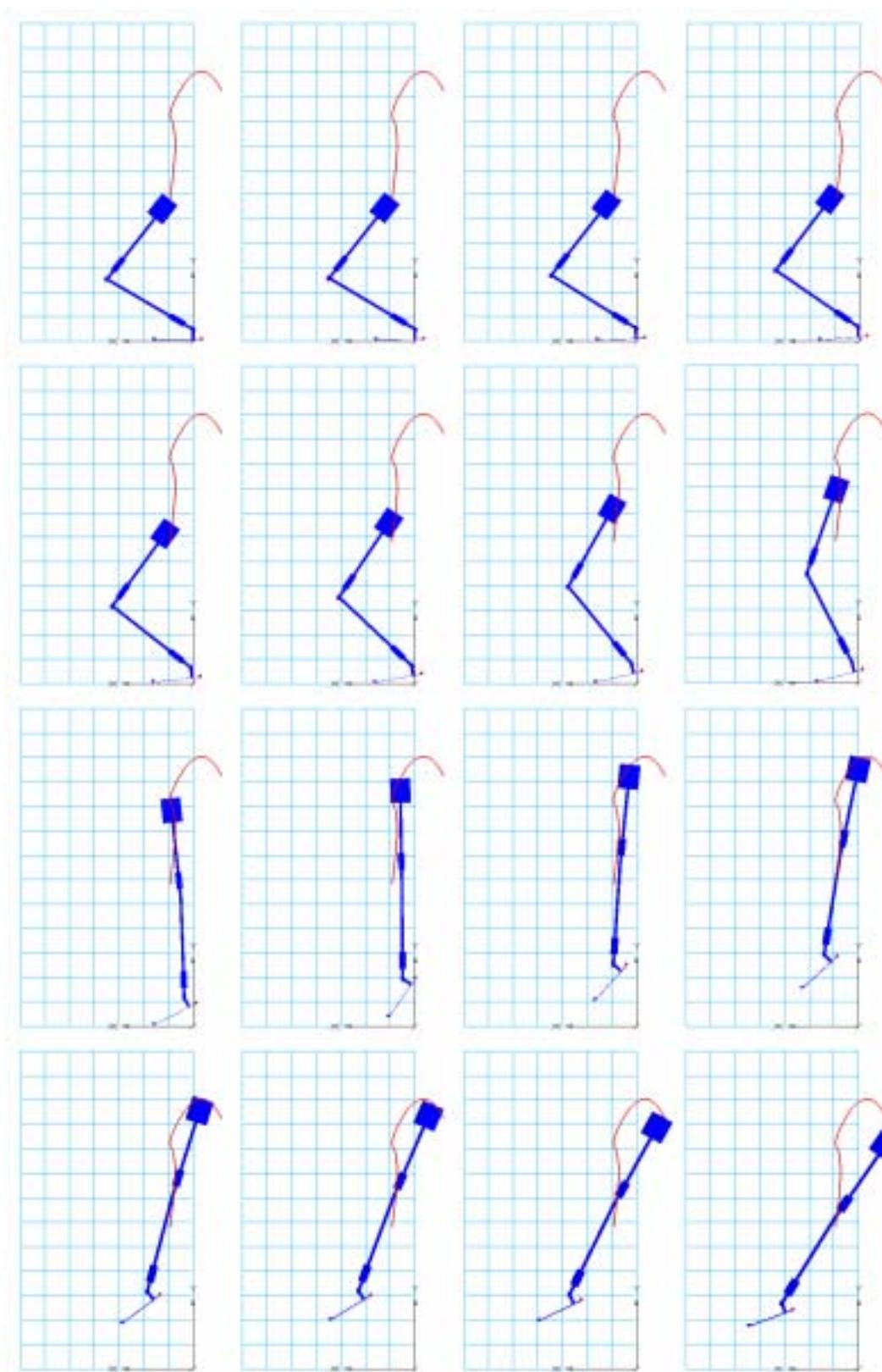
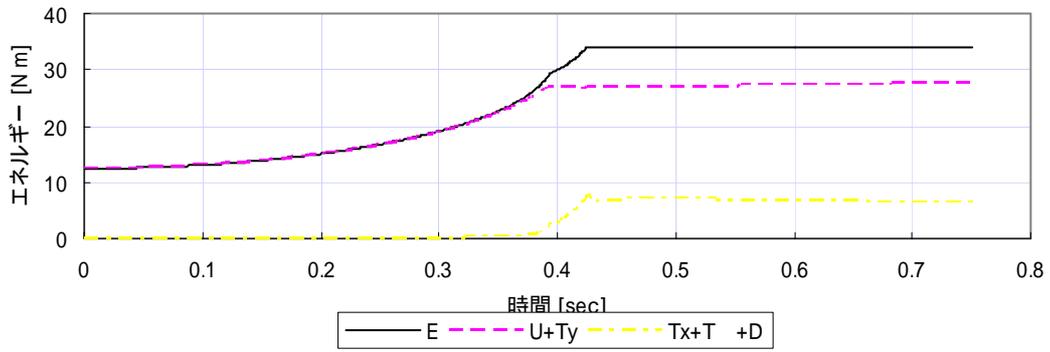
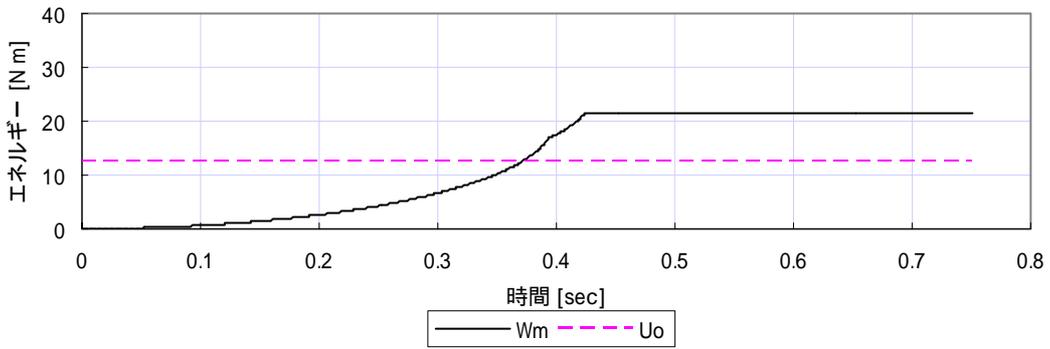


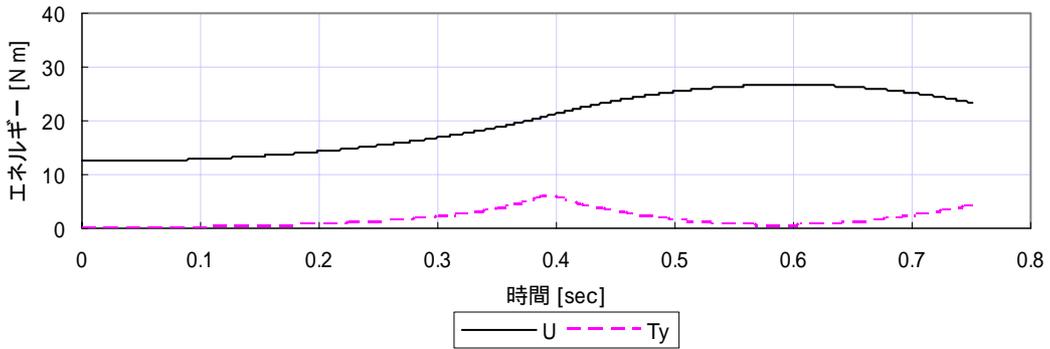
图 5.21 $\mu = 0.5$ $y_0 = 0.580$ $x_0 = 0.094$



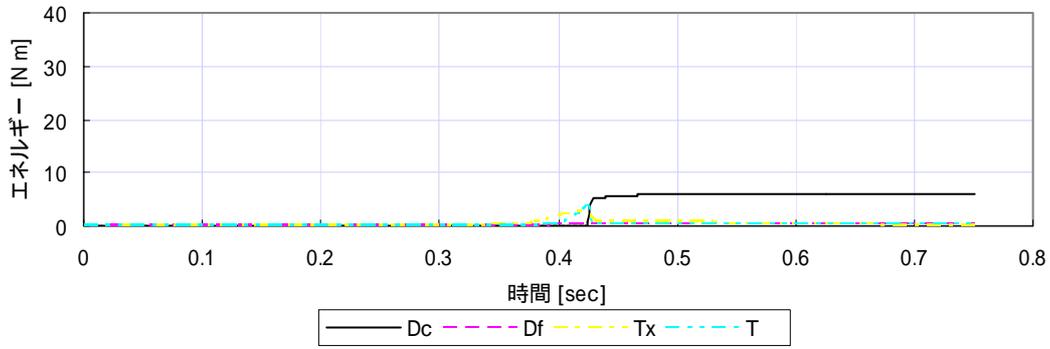
E



Wm+Uo

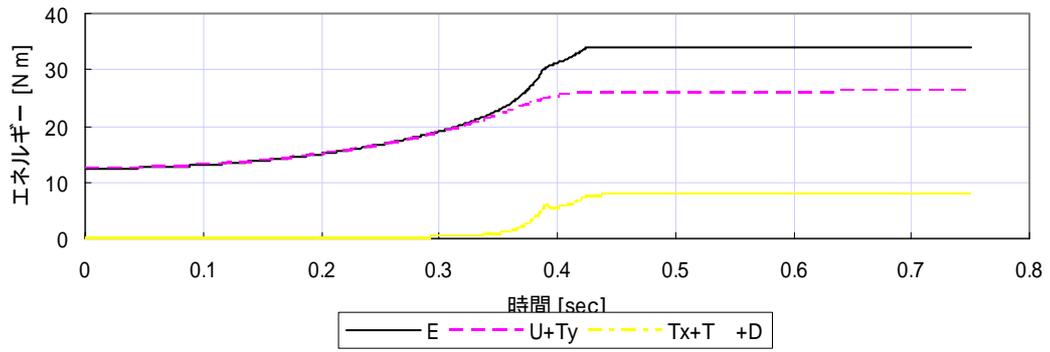


U+Tu

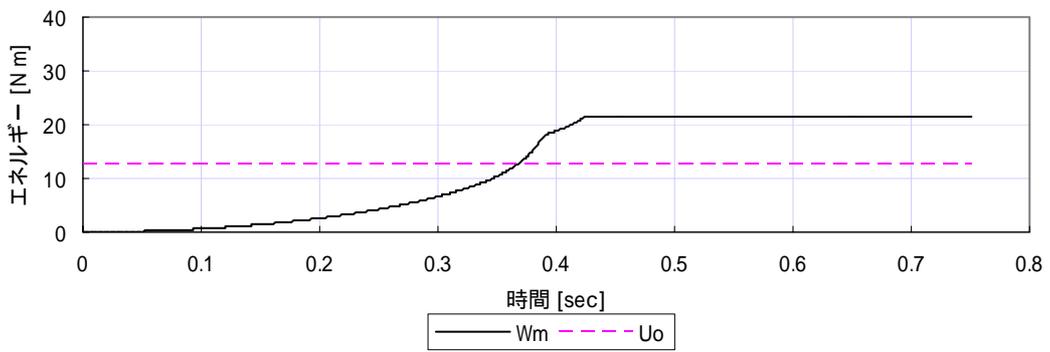


Dc+Df+Tx+T

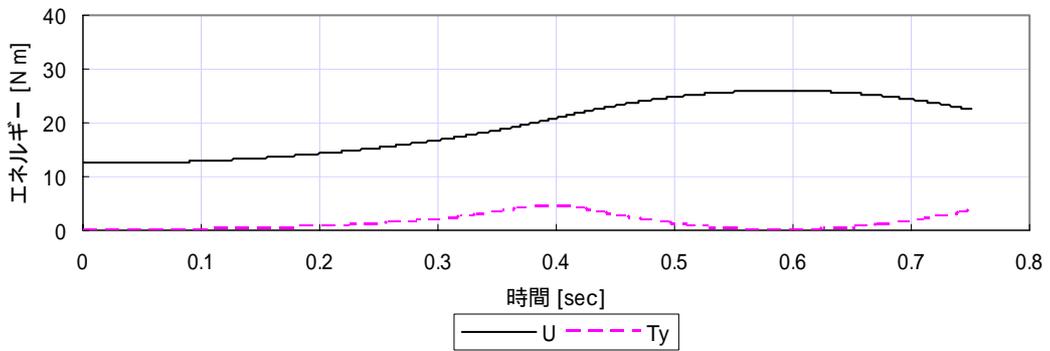
図 5.22 $\mu = 0.5$ $y_{i0} = 0.580$ $x_{i0} = 0.092$



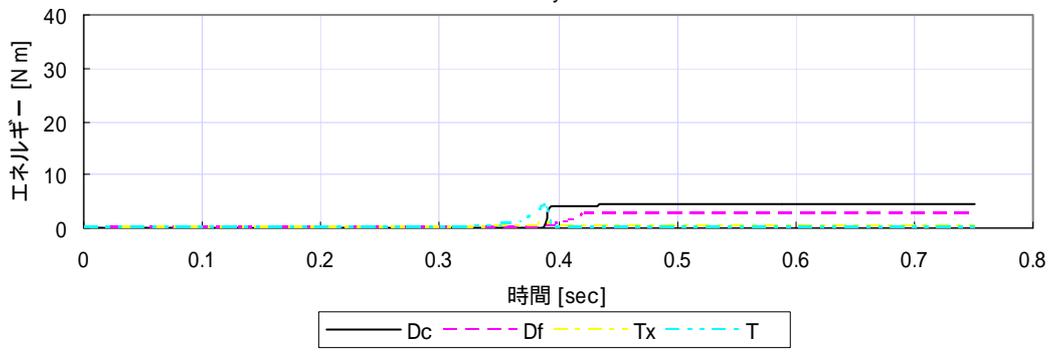
E



Wm+Uo



U+Ty



Dc+Df+Tx+T

図 5.23 $\mu = 0.5$ $y_{i0} = 0.580$ $x_{i0} = 0.094$

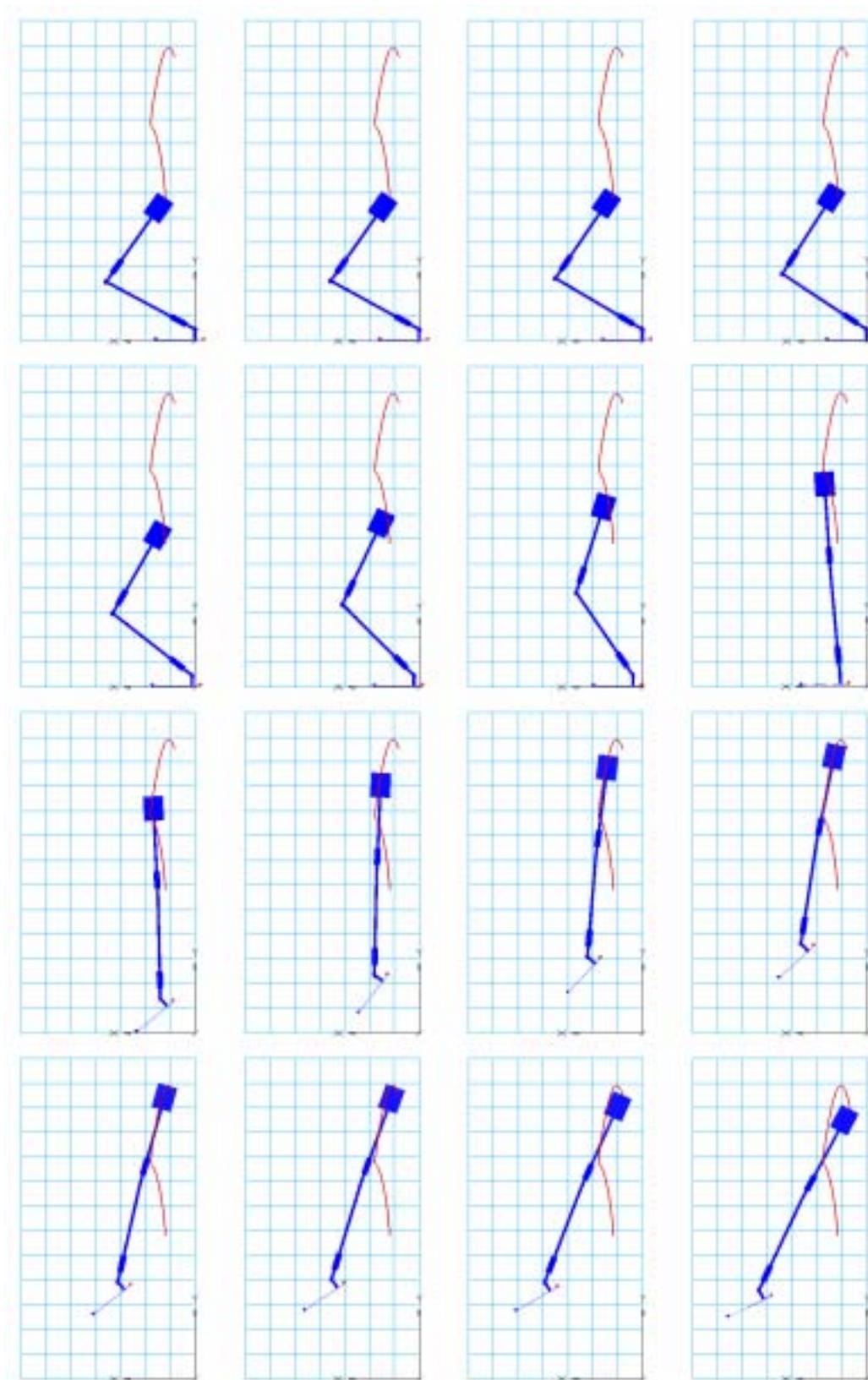


图 5.24 $\mu=0$ $y_{t_0}=0.580$ $x_{t_0}=0.118$

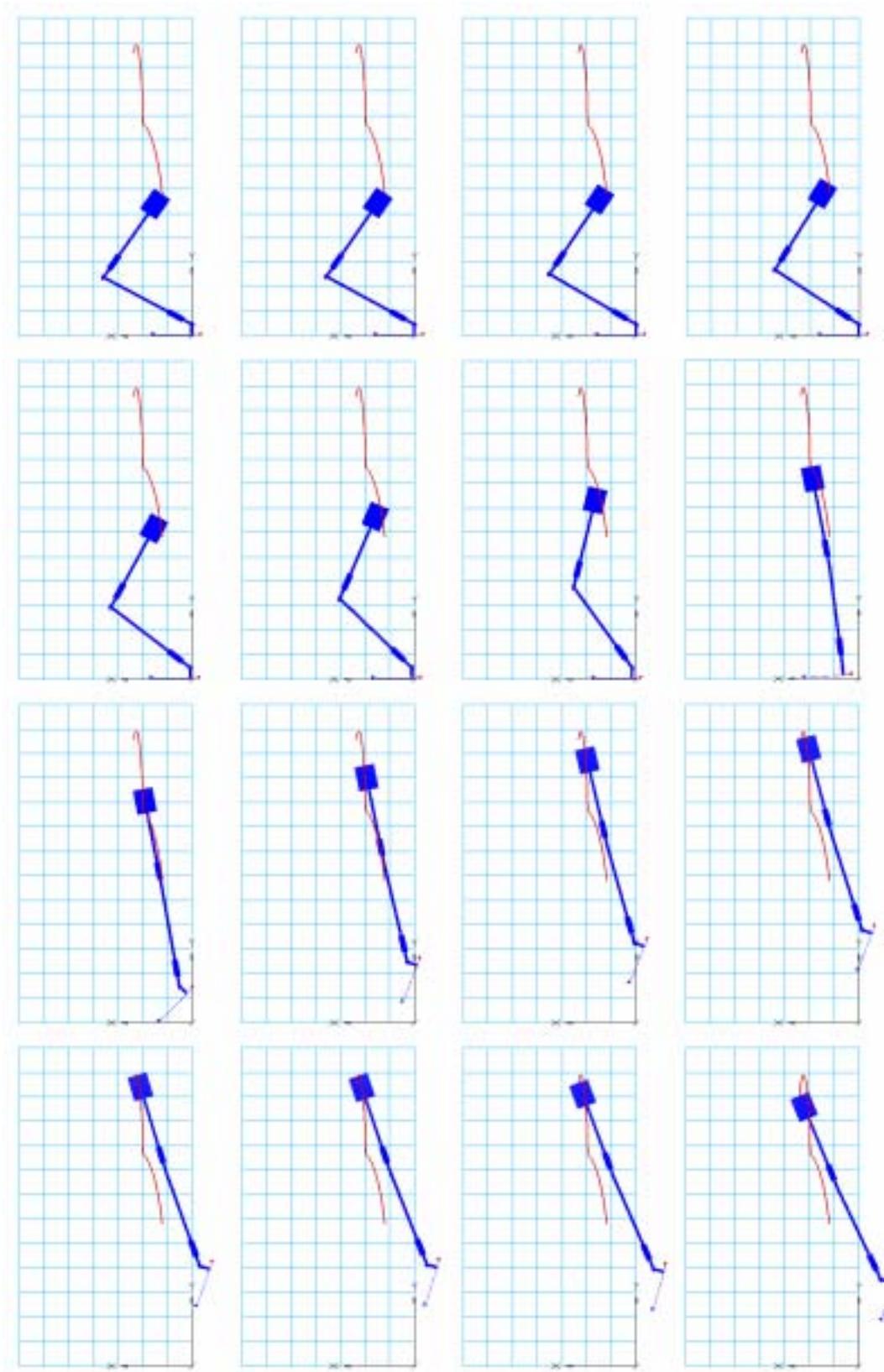
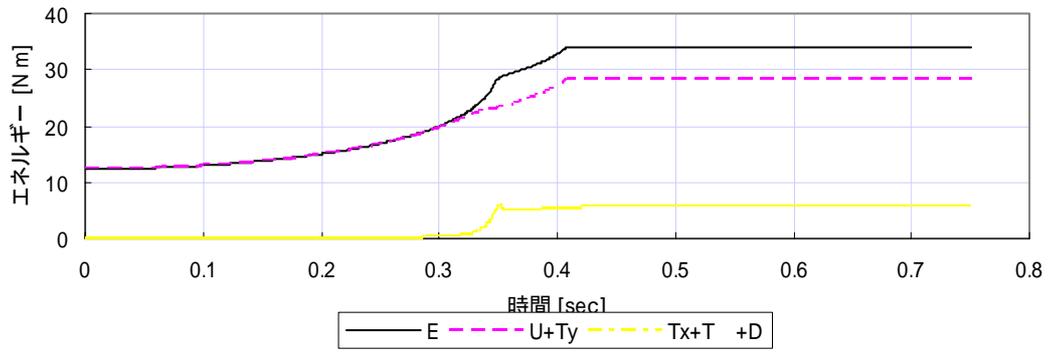
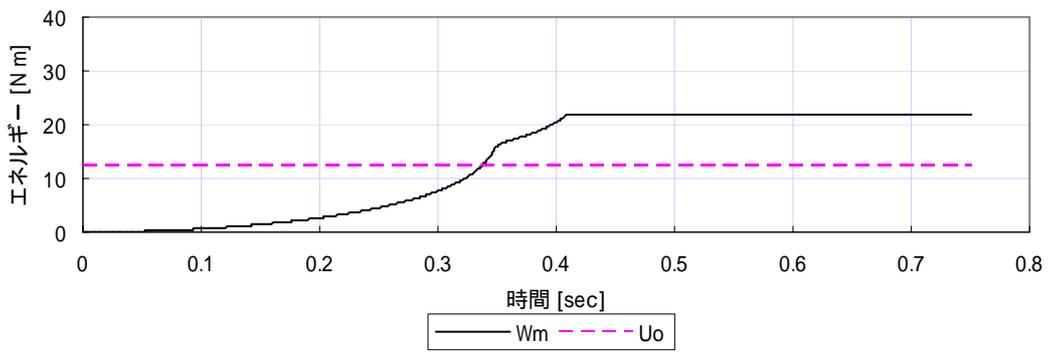


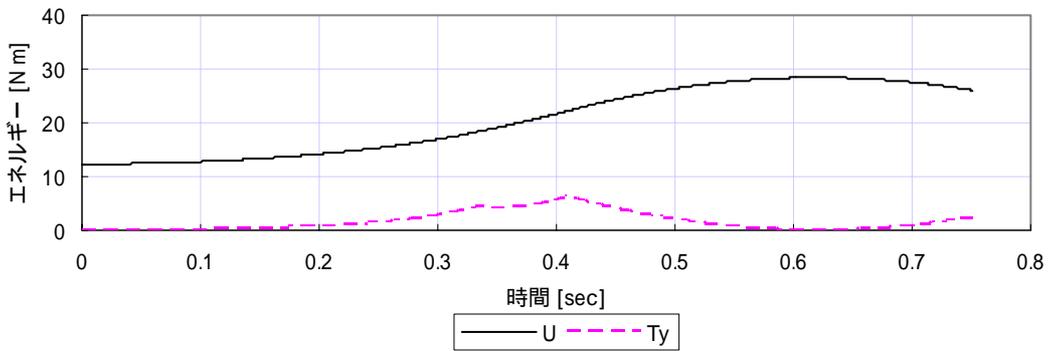
图 5.25 $\mu = 0$ $y_{t_0} = 0.580$ $x_{t_0} = 0.120$



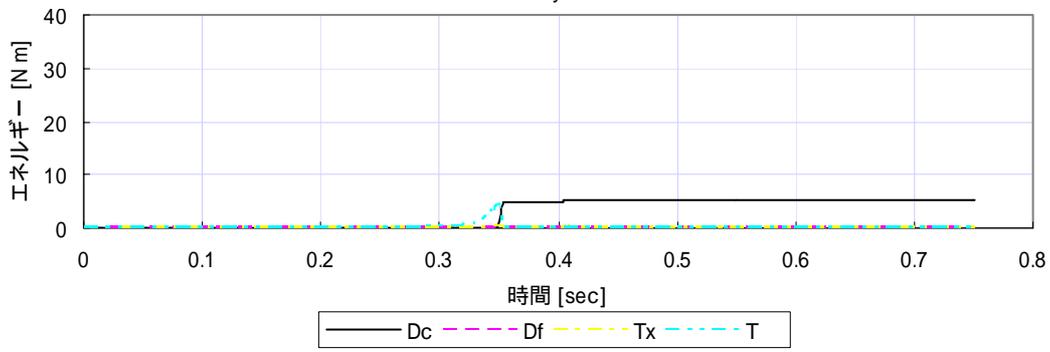
E



Wm+Uo

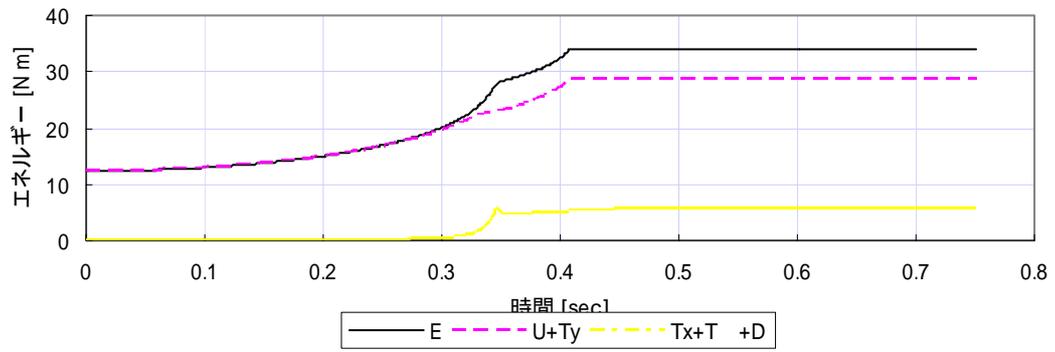


U+Ty

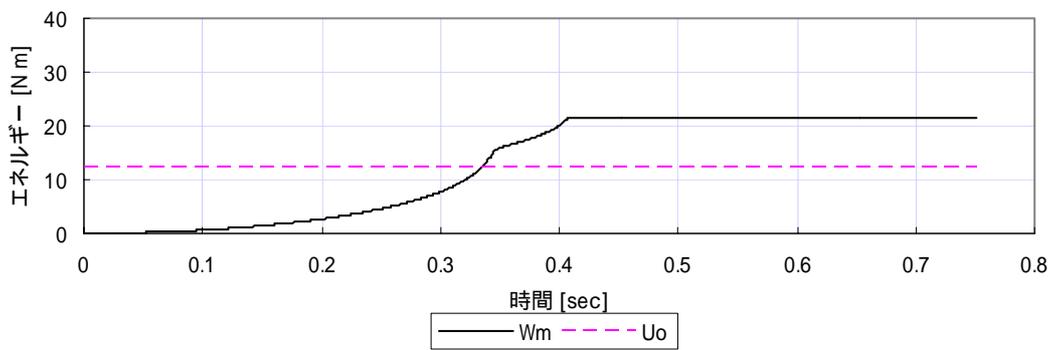


Dc+Df+Tx+T

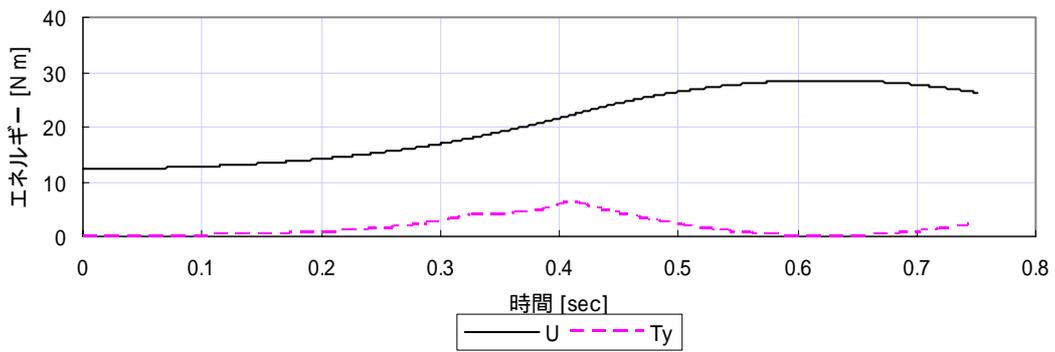
図 5.26 $\mu = 0$ $y_{i0} = 0.580$ $x_{i0} = 0.118$



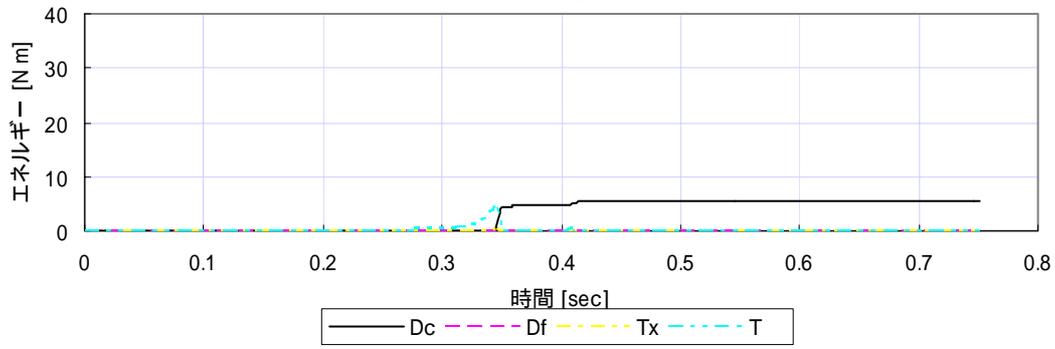
E



Wm+Uo



U+Ty



Dc+Df+Tx+T

図 5.27 $\mu = 0$ $y_{t0} = 0.580$ $x_{t0} = 0.120$

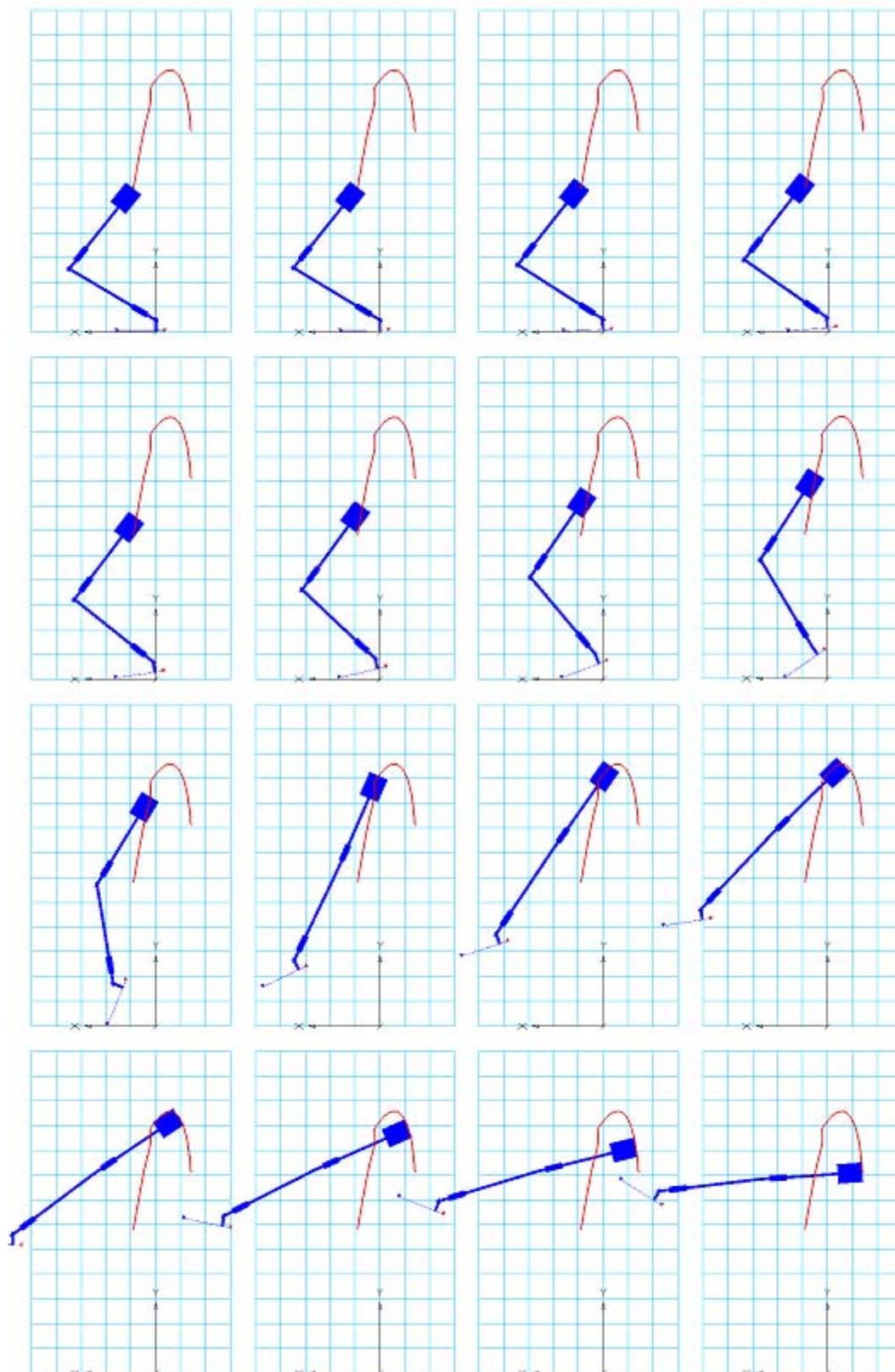


图 5.28 $\mu = 5.0$ $y_{t_0} = 0.580$ $x_{t_0} = 0.090$

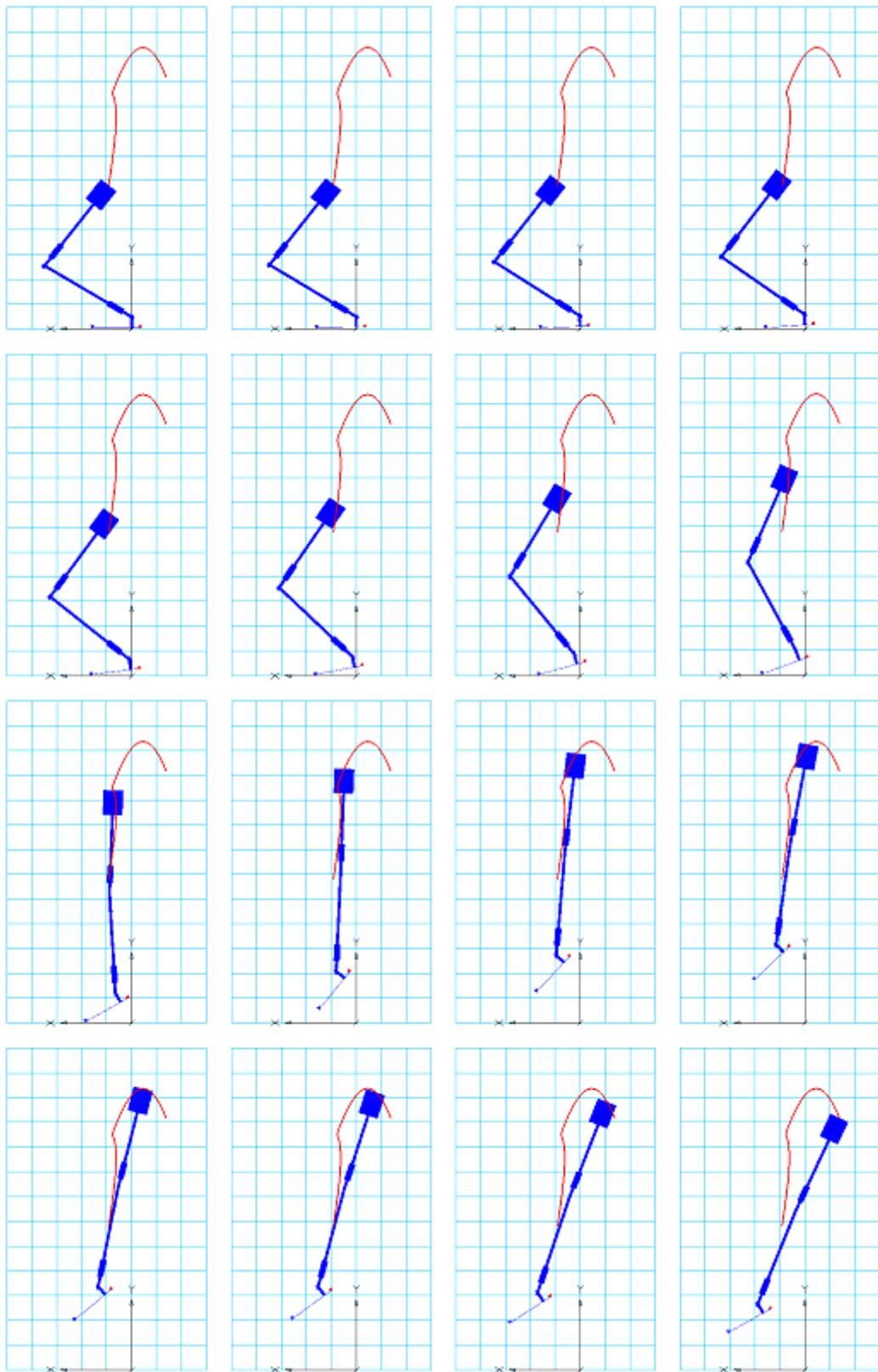
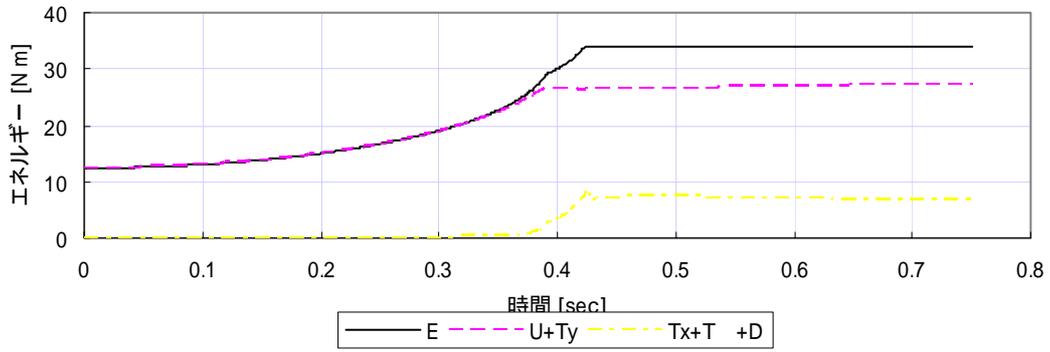
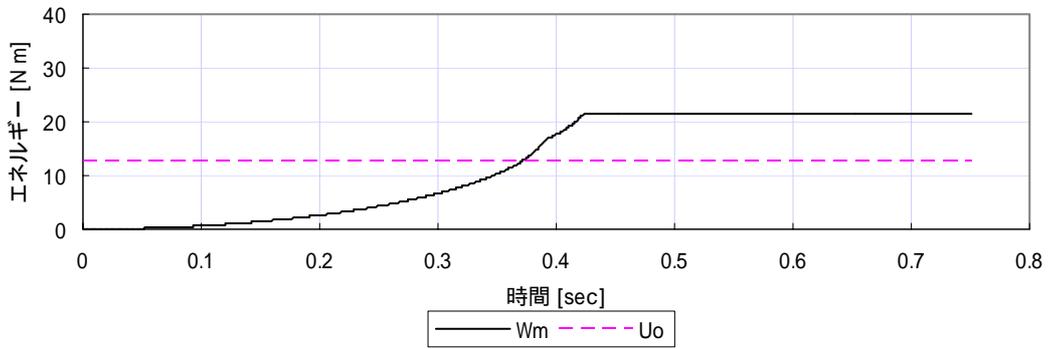


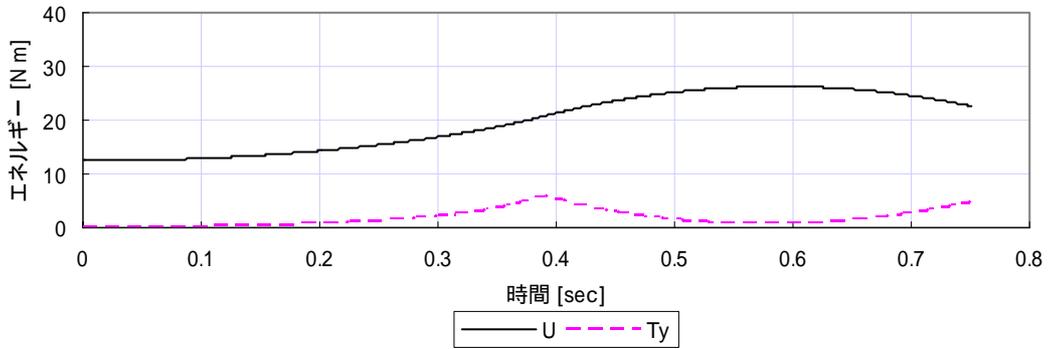
图 5.29 $\mu = 5.0$ $y_{i0} = 0.580$ $x_{i0} = 0.092$



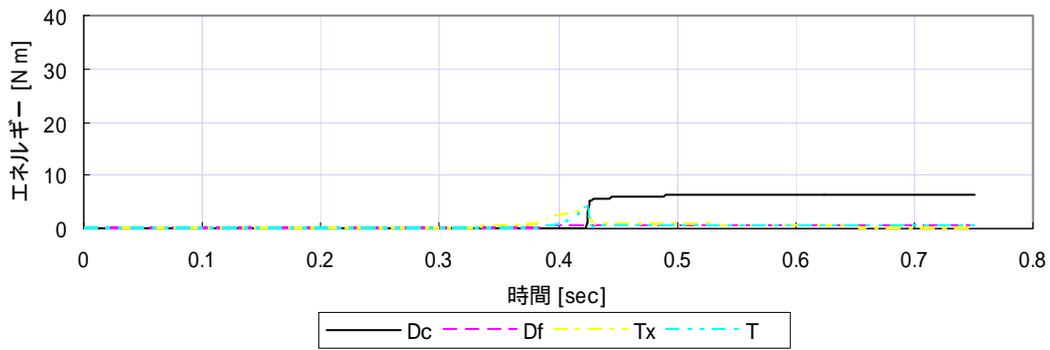
E



Wm+Uo

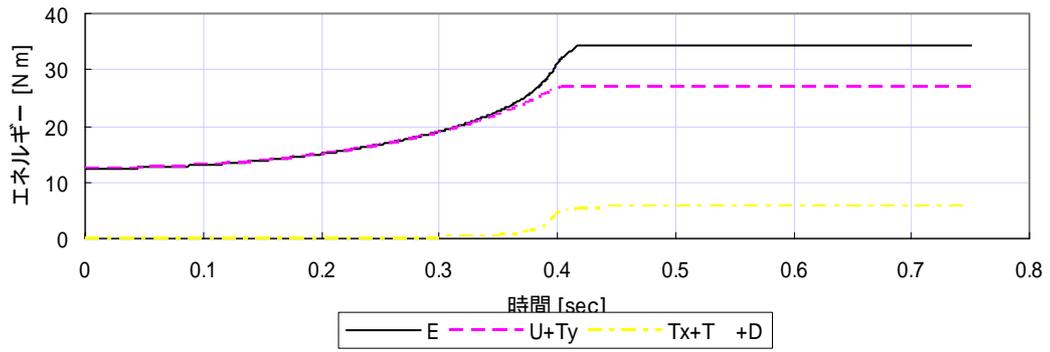


U+Ty

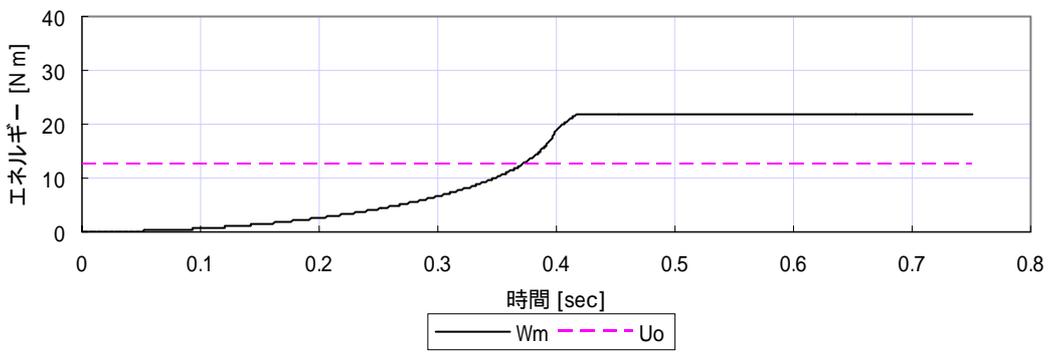


Dc+Df+Tx+T

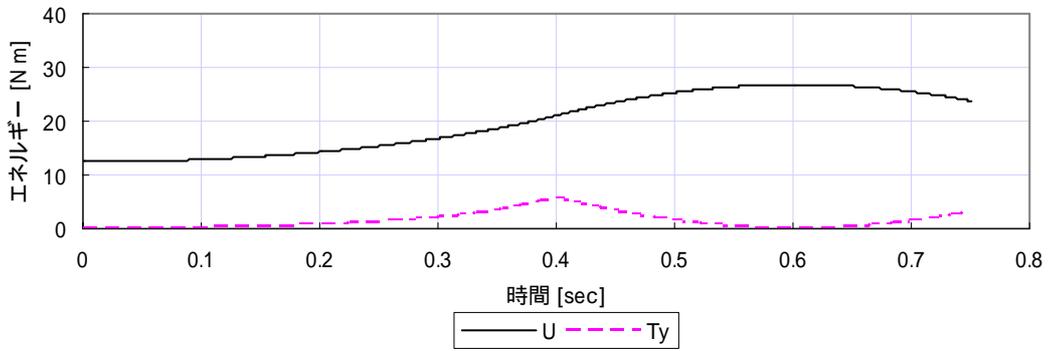
図 5.30 $\mu = 5.0$ $y_{t_0} = 0.580$ $x_{t_0} = 0.090$



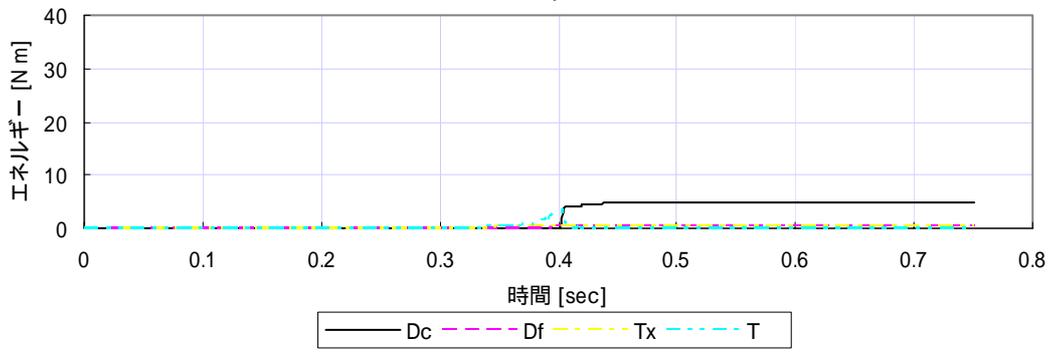
E



Wm+Uo



U+Ty



Dc+Df+Tx+T

図 5.31 $\mu = 5.0$ $y_{t0} = 0.580$ $x_{t0} = 0.092$

$$\eta_2 = \frac{U_{\max} - U_0}{W_{M \max}} \quad (5.21)$$

η_1 , η_2 を導入すれば , 摩擦係数が 0 の場合には $\eta_1=0.8409$, $\eta_2=0.75064$, 摩擦係数が 0.5 の場合には $\eta_1=0.84682$, $\eta_2=0.74878$, 摩擦係数が 5.0 の場合には $\eta_1=0.85591$, $\eta_2=0.77325$ となっている .

(6) 最適点近傍の運動およびエネルギーの推移

次に , x が最適点からずれた場合にどのような運動になるかを調べるために , 最適点の前後の運動の軌跡を摩擦係数が 0.5 の場合について図 5.20-5.21 に示す .

図より , 最適点の前後では , 膝関節と足関節が開くタイミングがずれていることがわかる . 図 5.20 の場合には足関節のほうが早く , 図 5.21 の場合には膝関節のほうが早くなっている . その結果 , 姿勢の傾きも最適点の前後では , 最適点よりも大きくなっていることがわかる .

この時の , エネルギーの推移を図 5.22 - 5.23 に示す . 図 5.23 の場合には , 最適点である図 5.18 の場合と比べて摩擦による消散エネルギーが大きくなっており , 図 5.22 の場合には , 衝突によるエネルギーが最適の場合と比べて大きく増加している .

次に , 摩擦係数が 0 の場合の最適点前後について , 運動の軌跡を図 5.24-5.25 にその時のエネルギー推移を図 5.26-5.27 に示す . 摩擦係数が 0 の場合には , 最適点の前後で 2 つの関節の衝突のタイミングは大きく変化しておらず , エネルギーの消散は , 摩擦が存在しないので , 衝突によるエネルギーが最適な場合と比べてやや増加している .

なお , 摩擦係数が 5.0 の場合の結果を図 5.28 - 5.31 に示すが , 説明は省略する .

(7) y_{i0} , E_{\max} , U_{\max} の傾向

5.4.2 では初期位置のみで与えられる y_{i0} と E_{\max} の関係について議論したが、ここでは、それらに、計算により得られた U_{\max} を $y_{i\max}$ と同等の値として加え、その関係について検討する。

図 5.32 に、摩擦係数が 0, 0.5, 5.0 の場合の結果を示している。縦軸の値は、それぞれの y_{i0} に対して、最適な水平位置 x_{opt} を用いた場合の結果を示している。図より、 U_{\max} は、摩擦係数により多少傾向が異なるものの E_{\max} と関連して変化していることがわかる。

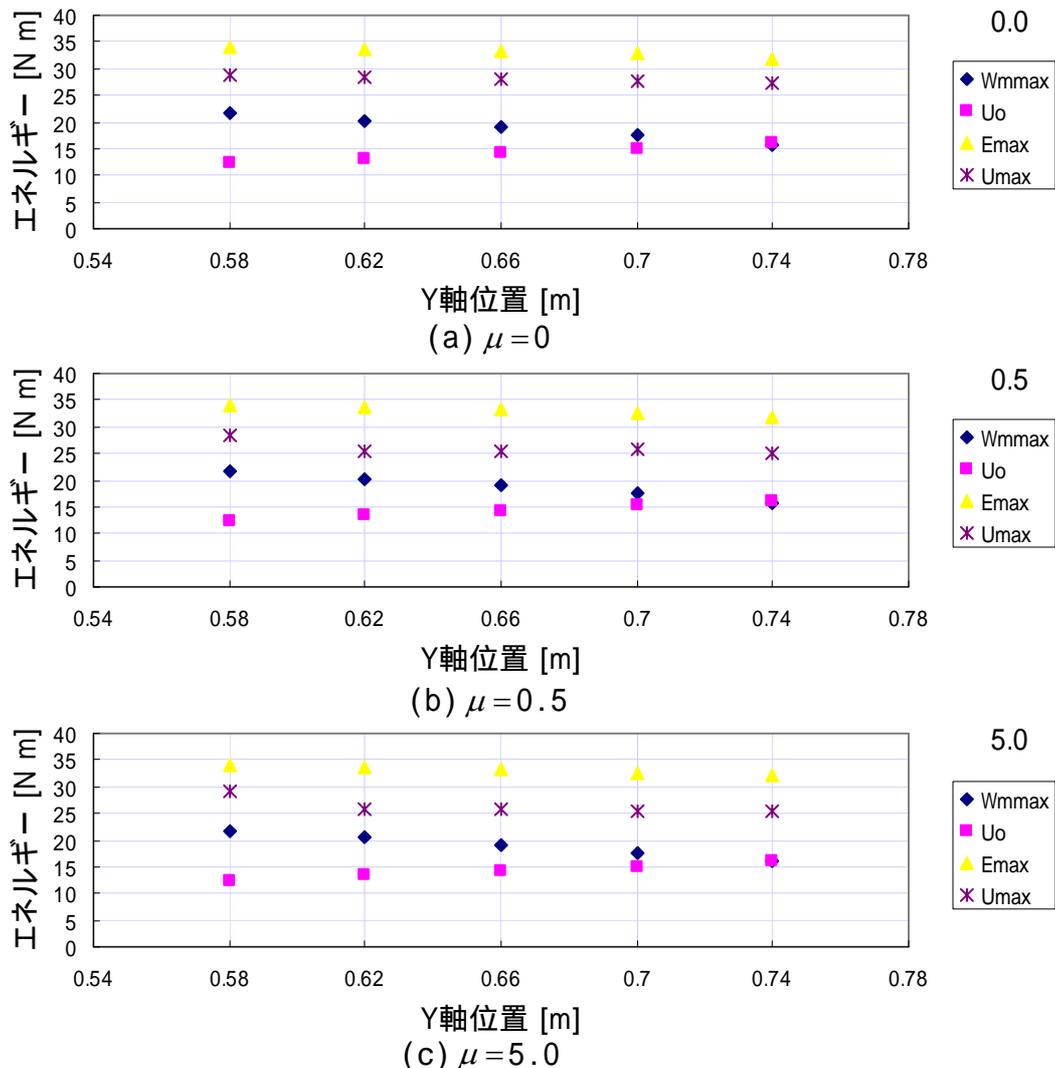


図 5.32 初期高さ y_{i0} の各高さに対する U_{\max} $\mu = 0, 0.5, 5.5$

5.6 付加ばねの効果

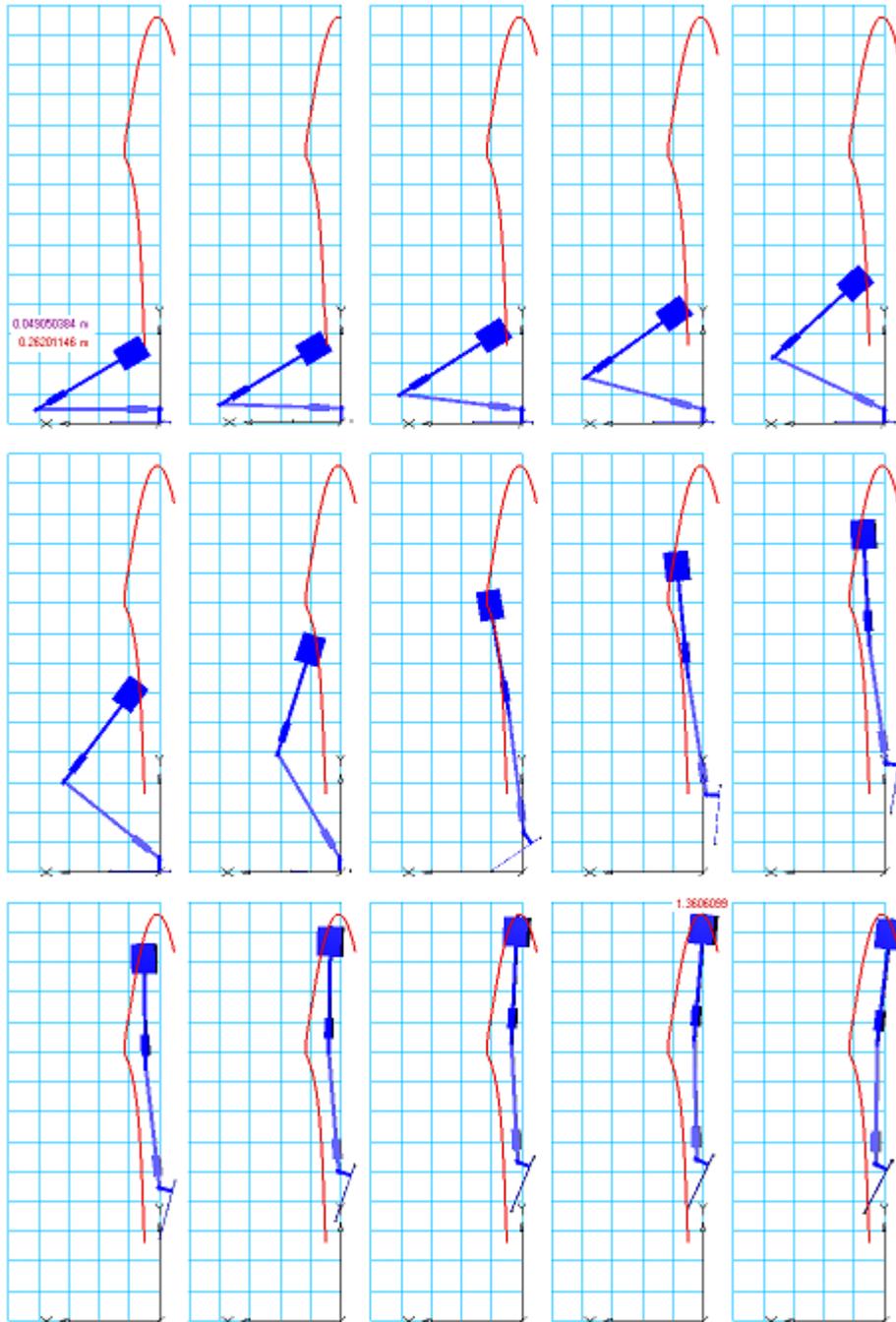


図 5.33 付加ばね付きモデルの跳躍
 ($\mu=0.5$ $y_{i0}=0.262$ $x_{i0}=0.049$)

5.4, 5.5 の検討より, 跳躍高さ $y_{t\max}$ と U_{\max} は, $x_0 = x_{0opt}$ の近傍の条件では, ほぼ同等で, 比例関係にあると考えられるので, 跳躍高さ $y_{t\max}$ のかわりに U_{\max} で評価しても大きな影響はないと考えられる. 無駄なエネルギーをいくら減らしても U_{\max} は総合エネルギー E_{\max} を超えることはないので, E_{\max} を増加させなければ, 大きく高さを伸ばすことは困難である. モータトルクを増やさずに E_{\max} を機械構造で増加させる方法として, ばねを付加する方法が考えられる. 初期姿勢の状態の時に, ばねに歪みエネルギーが蓄えられるように設定すれば, ばねのない状態であれば, y_{t0} が 0.56m あたりより小さくなれば, U_0 の減少の割合が $W_{M\max}$ の増加分よりも大きくなり, また, 所定のモータトルクでは構造を支えられなくなってしまうが, ばねを付加すれば, ばねによる歪みエネルギーは, ばねの自然長に対応するモータの変位を θ_k とすれば, ばねには

$$U_k = \frac{1}{2}k(\theta - \theta_k)^2 \quad (5.22)$$

初期位置のあたりでは,

$$\theta_0 < \theta_k \quad (5.23)$$

であるので, 初期位置を下げ, θ_0 を小さくしていけばいくほど, 歪みエネルギー U_k は, $\theta - \theta_k$ の 2 乗に比例して大きくなっていく. ばねによるたわみは, モータトルクの最大値 τ_{\max} とすれば, $-\tau_{\max}$ までは縮めることは可能である. θ_k は, 関節が衝突する角度になったときに関節を戻すような力が発生しないように設定して, 衝突の後もその角度が保たれているとすれば, その時のばねの歪みエネルギーを U_{k_s} とすれば, エネルギー収支の式は

$$E_{\max} + U_{k_0} = U_{\max} + T_x + T + D_{\max} + U_{k_s} \quad (5.24)$$

となる. したがって,

$$E_{\max} + (U_{k_0} - U_{k_s}) = U_{\max} + T_x + T + D_{\max} \quad (5.25)$$

となる．したがって E_{\max} のかわりに歪みエネルギーも考慮した総合エネルギー E'_{\max} を導入すれば

$$E'_{\max} = E_{\max} + (U_{k_0} - U_{k_s}) = U_{\max} + T_x + T + D_{\max} \quad (5.26)$$

となり，総合エネルギーを $U_{k_0} - U_{k_s}$ だけ増やすことが可能になり，高く飛ぶ潜在能力を増やすことができる．

その具体例として，ばね定数が足関節 $0.5[\text{N m/rad}]$ ，膝関節 $5[\text{N m/rad}]$ で，初期位置でのたわみが足関節 $0.5[\text{rad}]$ ，膝関節 $-0.9[\text{rad}]$ という条件で跳躍した場合のシミュレーションを行なった．その結果，図 5.33 に示すように，付加ばねのない場合と比べ， 0.147m 跳躍高さを伸ばすことができた．

5.7 結言

上方への跳躍について，3つのリンクの結合部である足関節と膝関節に市販のモータを使用するという条件のなかで，できるだけ高く跳躍することを考え，モータからは，モータの最大能力のトルクを加え，総合エネルギーを最大にすることを優先させ，そのなかの最適化は初期条件により行なうことを考え，そのエネルギーによる評価を行ないながら，その現象をシミュレーションにより検討した．

まず，エネルギーによる評価に関しては，以下のような概念的な検討結果が得られた．

(1) 初期状態における系のポテンシャルエネルギーに系に流入するエネルギーを加えた総合エネルギー以上に，最高到達点における位置エネルギーを大きくすることは不可能であり，総合エネルギーが最高到達点の上限を決めていることになる．また，モータのストロークには制限を設けているので，初期姿勢がきまれば，総合エネルギーの大きさは決まってしまう．

(2) 総合エネルギーが，有効に使われれば，跳躍高さは高くなり，無駄なものに使われれば，跳躍高さが低くなる．有効なエネルギーとしては，跳躍の最高到達点の位置エネルギーで．無駄なエネルギーは，衝突や摩擦などの消散エネルギー，最高到達点に達した状態での水平方向，回転方向のエネルギーとなる．

(3) 跳躍開始時に決まる総合エネルギーをできるだけ大きくし，最高到達点にいくまでの消散エネルギーと最高到達点における回転や水平方向のエネルギーの和である無駄なエネルギーをできるだけ抑制できれば，より高い跳躍が実現できる．

次に，数値シミュレーションの結果より，以下のような結論が得られた．

(1) 全体的な傾向として，初期高さ y_{i0} を与えれば，リンク最上端部の最高到達高さ $y_{i\max}$ について最適な初期水平位置 $x_{i\text{opt}}$ が存在することがわかった．ただし，最適点の近傍での様子は，初期高さ y_{i0} の大きさや摩擦係

数によって異なる．また， y_{i0} の高さが低いほど， $x_t = x_{iopt}$ の場合の y_{tmax} は大きくなることがわかった．また， y_{i0} の高さが高いほど， x_t に対する y_{tmax} の変化がゆるやかになる傾向が認められる．

(2) $x_t = x_{iopt}$ の場合の運動の軌跡としては，比較的，鉛直な姿勢に近く，跳躍という意味では，ほぼ満足できる姿勢が得られた．したがって，モータトルクを最大で固定して力を加えても初期姿勢を調整すれば，ある程度満足できる姿勢での跳躍が得られる．

(3) 足裏と床面との摩擦係数の変化の跳躍高さに対する影響は，最も高く飛んだ場合については，3つの摩擦係数の間であまり，大きな差はなかったが，摩擦係数が存在する場合には，高さを最高にする初期条件の範囲が摩擦のない場合に比べて狭い．

(4) 運動の軌跡に関しては，摩擦が存在する場合には，踵が浮いた後，膝関節と足関節が同じようなタイミングで開いていっており，モータの可動範囲が終了し，塑性衝突を起こすタイミングも2つの関節であまり差がない．一方，摩擦がない場合には，踵が浮く前に，膝関節が開ききり，摩擦があるときと比べればかなり送れて踵が浮き出はじめる．また，足関節が衝突するタイミングは，膝関節のそれと比べてかなり遅れていることがわかる．このように，運動の様子が異なっていると同時に， x_{iopt} の場所も摩擦の有無によってかなり異なっており，摩擦がない場合のほうが0.02-0.03m程度前傾した位置になっている．(3)の結果も含め，摩擦係数がゼロでも良好な跳躍が可能であることがわかった．

(5) 最適な条件では，最高到達点近傍では，いずれも無駄なエネルギーのなかで回転や水平方向の運動エネルギーは少なく，姿勢の面からも良好な結果になっていることと関連している．また，消散エネルギーでは，塑性衝突によるものが支配的であり，摩擦による消散エネルギーは，回転や水平の運動エネルギーよりも大きいものの，塑性衝突によるものよりも小さい．また，良好な条件であれば，最高到達点における位置エネルギーの

総合エネルギーに対する比は約 0.848，位置エネルギーの増加分の入力エネルギーに対する比は約 0.756 であった。

(6) 最適点近傍のエネルギーについては，最適点と比べて，衝突による消散エネルギーや摩擦によるエネルギーが増加している。また，摩擦が存在する場合で， x_t が最適点からずれた場合には，最適点の前後では，膝関節と足関節が開くタイミングがずれる。

(7) $x_t = x_{t_{opt}}$ の場合で， y_t を変化させれば，モータトルクで自重がささえられなくなるまでは， y_t が低くなるにしたがって，総合エネルギー E_{max} も大きくなるが，その時の $y_{t_{max}}$ ， U_{max} は，摩擦係数より多少傾向が異なるものの E_{max} の増加にともなって，大きくなる。したがって， E_{max} をできるだけ大きくとることが高い跳躍につながることをわかる。

以上のような数値シミュレーションによる検討結果より， E_{max} をできるだけ大きくとることが高い跳躍につながることを明らかになったので，モータトルクを増やさずに E_{max} を機械構造で増加させる方法として，ばねを付加する方法が考えて検討した結果以下の結論を得た。

(1) 初期姿勢の状態の時に，ばねに歪みエネルギーが蓄えられるように設定すれば，ばねのない状態であれば，ばねがない場合の y_{t_0} は下限値より小さくなれば，所定のモータトルクでは構造を支えられなくなってしまっていたが，ばねを付加すれば，支える力が増加するとともに，有効な総合エネルギーとして，初期位置の歪エネルギーと衝突時の歪エネルギーの差を加えることが可能となる。その結果，ばねのない場合と比べ跳躍高さを高くすることが可能であることがわかった。

第6章 結論

近年，二足歩行のできる人間型ロボットが多数発表され，その中には走行できるものも報告（ホンダ^[4]，ソニー^[5]，産総研^[6]）されている．しかし，現状の人間型走行ロボットは，両足が同時に浮いている時間は非常に短く，人間の走行と比べれば速度も遅い．人間の走行に近いより躍動的な走行をするには立脚期（接地側）の脚が胴体やもう一方の脚を支えるだけでなくそれらを上方に素早く跳躍させる能力が必要と考えられる．十分に大きく跳躍させるためには，ロボットの重量に比べて十分大きい駆動力が必要となる．外部から動力の供給や制御を行うのであればロボットの本体はできるだけ軽量化し，相対的に十分大きい駆動力を与えることは可能と考えられるが，本研究では，自立したロボットを考えているため，市販されているモータやバッテリーを用いるのであれば，人間型ロボットを大きく跳躍させることは困難と考えられる．

本研究では，片足で胴体およびもう一方の脚の重量を大きく跳躍させるのは困難であっても，胴体やもう一方の脚を取り去れば，負荷は大きく減少することに着目し，市販の部品により製作可能な一脚のロボットを考え，それにより大きな跳躍現象について検討した．支持構造がなく，動力源やコンピュータを内蔵した一脚ロボットを取り上げ，前方および上方への跳躍について，市販レベルのモータのトルクの範囲内で跳躍の距離や高さを増やすことを優先したモデルを用いて数値シミュレーションにより検討した．また，現状の人間型ロボットでは，足裏の角度と床面の角度の関係が走行中にあまり変化せず，足裏の角度はほとんど水平を保ったままで走行している^{[4]-[6]}．したがって，足関節で蹴り，ストライドを伸ばすという意味での活用はされていないので，前方跳躍では，足関節をできるだけ跳躍に活用することを考え，また，上方跳躍では，姿勢の制御よりも高く

飛ぶことを優先するモータの駆動を考え検討を行なった。

以下に、各章での検討事項を示す。

第2章では、本研究で用いる一脚ロボットの概要と、2つの跳躍のパターン、ならびにそれぞれのパターンでのシミュレーションの狙いを示した。前方への跳躍現象および上方への跳躍に関して、市販のモータのレベルでより大きい跳躍数値を実現するために、胴体やもう一方の脚を省略した一脚のロボットに関して、3リンクとその結合部である膝関節、足関節に駆動源であるモータを取り付け、人間や人間型ロボットとくらべ、自由度が少ない構造ではあるが、簡単な構造でより大きい跳躍を検討可能な形状を提案した。

また、前方跳躍のモデルでは、現状の人間型ロボットの走行ではストライドを大きくするためにはあまり活用されていないと考えられる足関節をストライドを伸ばすためにできるだけ活用することを考え、そのために影響が大きいと考えられる足指関節（駆動源なし）や着地時のエネルギー消散に影響すると考えられる足裏の形状についても検討できるモデルを提案した。

上方への跳躍では、股関節のない二つの関節に与えるトルクのみで跳躍するモデルを提案した。走行時の運動とは異なるが、人間の基本動作として重要な要素の一つである。足関節と膝関節に市販のモータで可能なトルクを与えた場合に、できるだけ高く跳躍することを優先し、また、跳躍高さへの影響度が大きいかをエネルギーで評価可能なモデルとして提案した。

第3章では、本研究のシミュレーションに用いる解析手法、手法の基本的な精度の確認、結果評価方法について示した。本研究で、使用しているような汎用の剛体マルチボディの解析ソフトウェアを用いて計算する場合

には、衝突などの現象を含む場合には、場合によっては、大きい誤差が発生する可能性があるので、理論解がわかっている問題での予備計算を行い、衝突の計算の精度の確認を行なった。また、第5章で行なう、上方跳躍の評価や現象の理解を深めるために提案しているエネルギーによる評価法について検討した。

跳躍運動のシミュレーションを汎用のマルチボディ解析ソフトウェアである visual Nastran4D (vN4D) および Simulink5.0 を用いて行なうに際して、上方跳躍の場合の評価にエネルギーを用いることを示し、それらを系の潜在能力を示す総合エネルギーと跳躍高さに関連する有効なエネルギーと、跳躍高さに寄与しない無駄なエネルギーに分けることを提案した。有効なエネルギーとしては、最高到達点での位置エネルギー、無駄なエネルギーとしては、衝突や摩擦による消散エネルギー、水平や回転の運動エネルギーであることを示した。また、総合エネルギーは、初期姿勢における位置エネルギーとモータから系に流入するエネルギーであることを示した。

また、剛体マルチボディの解析では、衝突や摩擦などの計算では誤差が生ずる可能性が大きいので、衝突現象については使用する汎用のマルチボディ解析ソフトでの計算値を、理論解と比較することによってその精度の確認を行った。その結果、偏心を考慮した塑性衝突では、シミュレーションと理論解は良く一致し、vN4D ではある程度の複雑な衝突でも精度よく計算できていることが確認できた。

第4章では、前方跳躍に関する検討結果を示す。ねらい、モデル化方法、制御方法について示した後、特に足関節を十分用いた条件でのシミュレーションにより、跳躍のタイミングや、跳躍のタイミングにあたるまでの状況、足指関節の形状、足裏の形状などの跳躍に対する影響についての検討を行なった。その結果、以下のようなことがわかった。

(1) 初期状態からモデルを徐々に前傾させ、踵がある程度浮いた状態で、足関節、膝関節を伸ばし前方へ跳躍するという制御方法を採用した結果、市販の部品により構成されるモデルで、十分跳躍が可能であること、跳躍距離を最大にする跳躍開始時の傾斜角度が存在することを確認した。また、現象としては、斜方投射と類似したものであることがわかった。現状の人間型ロボットでは、走行時には、足関節によりストライドを大きくするという使用法はあまり用いられていないが、計算結果からは、足関節トルクはストライドを大きくするのに寄与できることを示唆していると考えられる。

(2) 足の長さが長すぎると、踵が上がるまでに前傾が深くなりすぎて、転倒してしまう。足の長さが短すぎると十分な跳躍高さが得られないという結果が得られ、足指関節を設け、回転支点が足指関節にある時は、短い足と同等で、踵が上がり回転支点が爪先に移ると長い足と同等の効果を持たせることができ、結果として長い跳躍距離が得られた。このことより、人間には存在している足指関節が、前方跳躍にとって有利に働いている可能性があることが推察された。さらに、足関節のように途中で支点を移動させる機構がなくても、連続的に支点に変化する足裏が曲面のものについても検討した結果、足指関節を用いた場合と同様の結果が得られた。また、足裏の形状は、跳躍だけでなく着地時の反力やエネルギーの消散にも影響を与え、曲面の場合にはエネルギー損失が少ないことがわかった。

第5章では、上方跳躍に関する検討を行なった。モデル化法、制御方法について示した後、エネルギーを用いた評価について具体的な説明を行なった。跳躍高さの確保を優先した制御法で駆動した場合の数値シミュレーションを行い、初期姿勢や足裏と床面の間の摩擦係数が、跳躍高さ、運動の軌跡、総合エネルギー、有効エネルギー、無効エネルギーなどに影響しているかについて検討を行なった。その後、跳躍高さの上限となっている総合エネルギーをモータトルクはそのまま大きくする方法として付

加ばねが有効であるかどうかの検討を行なった。その結果を3つの項目に分けて示せば以下のようなになる。

まず、エネルギーによる評価に関しては、以下のような概念的な検討結果が得られた。

(1) 初期状態における系のポテンシャルエネルギーに系に流入するエネルギーを加えた総合エネルギー以上に、最高到達点における位置エネルギーを大きくすることは不可能であり、総合エネルギーが最高到達点の上限を決めていることになる。また、モータのストロークには制限を設けているので、初期姿勢がきまれば、総合エネルギーの大きさは決まってしまう。

(2) 総合エネルギーが、有効に使われれば、跳躍高さは高くなり、無駄なものに使われれば、跳躍高さが低くなる。有効なエネルギーとしては、跳躍の最高到達点の位置エネルギーで、無駄なエネルギーは、衝突や摩擦などの消散エネルギー、最高到達点に達した状態での水平方向、回転方向のエネルギーとなる。

(3) 跳躍開始時に決まる総合エネルギーをできるだけ大きくし、最高点にいくまでの消散エネルギーと最高点における回転や水平方向のエネルギーの和である無駄なエネルギーをできるだけ抑制できれば、より高い跳躍が実現できる。

次に、数値シミュレーションの結果より、以下のような結論が得られた。

(1) 全体的な傾向として、初期高さ y_{i0} を与えれば、リンク最上端部の最高到達高さ y_{tmax} について最適な初期水平位置 x_{topt} が存在することがわかった。ただし、最適点の近傍での様子は、初期高さ y_{i0} の大きさや摩擦係数によって異なる。また、 y_{i0} の高さが低いほど、 $x_t = x_{topt}$ の場合の y_{tmax} は大きくなることがわかった。また、 y_{i0} の高さが高いほど、 x_t に対する y_{tmax} の変化がゆるやかになる傾向が認められる。

(2) $x_t = x_{topt}$ の場合の運動の軌跡としては、比較的、鉛直な姿勢に近く、

跳躍という意味では，ほぼ満足できる姿勢が得られた．したがって，モータトルクを最大で固定して力を加えても初期姿勢を調整すれば，ある程度満足できる姿勢での跳躍が得られる．

(3) 足裏と床面の間の摩擦係数の変化の跳躍高さに対する影響は，最も高く飛んだ場合については，3つの摩擦係数の間であまり大きな差はなかったが，摩擦係数が存在する場合には，高さを最高にする初期条件の範囲が摩擦のない場合に比べて狭い．

(4) 運動の軌跡に関しては，摩擦が存在する場合には，踵が浮いた後，膝関節と足関節が同じようなタイミングで開いていっており，モータの可動範囲が終了し，塑性衝突を起こすタイミングも2つの関節であまり差がない．一方，摩擦がない場合には，踵が浮く前に，膝関節が開ききり，摩擦があるときと比べればかなり送れて踵が浮き出はじめる．また，足関節が衝突するタイミングは，膝関節のそれと比べてかなり遅れていることがわかる．このように，運動の様子が異なっていると同時に， x_{top} の場所も摩擦の有無によってかなり異なっており，摩擦がない場合のほうが0.02-0.03m程度前傾した位置になっている．(3)の結果も含め，摩擦係数がゼロでも良好な跳躍が可能であることがわかった．

(5) 最適な条件では，最高到達点近傍では，いずれも無駄なエネルギーのなかで回転や水平方向の運動エネルギーは少なく，姿勢の面からも良好な結果になっていることと関連している．また，消散エネルギーでは，塑性衝突によるものが支配的であり，摩擦による消散エネルギーは，回転や水平の運動エネルギーよりも大きいものの，塑性衝突によるものよりも小さい．また，良好な条件であれば，最高到達点における位置エネルギーの総合エネルギーに対する比は約 0.848, 位置エネルギーの増加分の入力エネルギーに対する比は，約 0.756 であった．

(6) 最適点近傍のエネルギーについては，最適点と比べて，衝突による消散エネルギーや摩擦によるエネルギーが増加している．また，摩擦が存

在する場合で、 x_i が最適点からずれた場合には、最適点の前後では、膝関節と足関節が開くタイミングがずれる。

(7) $x_i = x_{iopt}$ の場合で、 y_i を変化させれば、モータトルクで自重がささえられなくなるまでは、 y_i が低くなるにしたがって、総合エネルギー E_{max} も大きくなるが、その時の $y_{i\max}$ 、 U_{\max} は、摩擦係数より多少傾向が異なるものの E_{max} の増加にともなって、大きくなる。したがって、 E_{max} をできるだけ大きくとることが高い跳躍につながることをわかる。

以上のような数値シミュレーションによる検討結果より、 E_{max} をできるだけ大きくとることが高い跳躍につながることを明らかになったので、モータトルクを増やさずに E_{max} を機械構造で増加させる方法として、ばねを付加する方法が考えて検討した結果以下の結論を得た。

(1) 初期姿勢の状態の時に、ばねに歪みエネルギーが蓄えられるように設定すれば、ばねのない状態であれば、ばねがない場合の y_{i0} は下限値より小さくなれば、所定のモータトルクでは構造を支えられなくなってしまっていたが、ばねを付加すれば、支える力が増加するとともに、有効な総合エネルギーとして、初期位置の歪エネルギーと衝突時の歪エネルギーの差を加えることが可能となる。その結果、ばねのない場合と比べ跳躍高さを高くすることが可能であることがわかった。

参考文献

[1] 高西淳夫, 他. WABIAN. これまでの研究.

http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/research/wabian/previous_research_j.htm

[2] K Hirai. Current and future perspective of Honda humanoid robot. IEEE, Intelligent Robots and Systems, Proc.IROS'97, pp.500-508, 1997.

[3] 古田 貴之. 小型ヒューマノイド morph : RoboCup ヒューマノイドチャレンジに参戦するためのロボットシステム構築手法. 日本ロボット学会誌 Vol.20, No.1, pp.49-50, 2002.

[4] HONDA, 「ASIMO」 <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>

[5] SONY, 「QR10」. <http://www.sony.co.jp/SonyInfo/QR10/>

http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press_Archive/200312/03-060/

[6] 産業技術総合研究所, 「HRP-2LR」.

http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2004/pr20040415_2/pr20040415_2.html

http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2002/pr20020319_2/pr20020319_2.html

- [7] 玄 相昊, 上條 敏, 美多 勉. 動物の脚構造をモデル化した 1 脚走行ロボット Kenken. 日本ロボット学会誌 Vol.20 No.4, pp.453-462, 2002.
- [8] M.H.Raibert. Legged Robots That Balance. MIT Press, 1985.
- [9] M.Ahmadi, M.Buehler. Stable Control of a Simulated One-Legged Running Robot with Hip and Leg Compliance. IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.13, No.1, pp.96-104, 1997.
- [10] W.J.Schwind, D.E.Koditschek. Control of forward velocity for a simplified planar hopping robot. Proc.of ICRA, pp.691-696, 1995.
- [11] M.Ahmadik, M.Buehler. The ARL Monopod Running Robot: Control and Energetics In Proc.of ICRA, pp.1689-1694, 1999.
- [12] Garth J. Zeglin. Uniroo: A One Legged Dynamic Hopping Robot. B.S.Tesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, 1991.
- [13] 大橋 栄二郎, 大西 公平. 跳躍機械の跳躍高さ制御. 電気学会論文誌. D, 124(7), pp.660-665, 2004.
- [14] 鳥海 清司, 大島 徹, 藤川 智彦, 熊本 水頼, 百生 登. ヒトの腓腹筋である二関節筋の装備が跳躍運動に及ぼす影響. 日本機械学会論文集 C 編 69 巻 688 号, pp.63-3268, 2003.

- [15] 大島 徹, 鳥海 清司, 藤川 智彦, 百生 登. 足関節と膝関節の二関節筋による協調機能を用いた跳躍メカニズム, 日本機械学会論文集 C 編 71 巻 712 号(2005-12), pp.3510-3516, 2005.
- [16] 中浜 昌文, 森 崇, 井上 喜雄, 芝田 京子. 回転関節を有する 3 リンク脚ロボットの制御, 精密工学会 第 10 回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, pp.5-6, 2005.
- [17] 梶田秀司. ヒューマノイドロボット. オーム社, p12, 2005.
- [18] 山口 耕司, 桑山 孝哉, 栗田 裕, 松村 雄一. 平地における受動 2 足歩行の実現. Dynamics and Design Conference 2001 CD-ROM 論文集(日本機械学会). 333, 2001.
- [19] 小林 裕季, 栗田 裕, 松村 雄一. 上体の働きを模擬した副振動系をもつ受動形 2 足歩行器. シンポジウム講演論文集〔ジョイント・シンポジウム 2004〕(日本機械学会), B5, 2004.
- [20] 大須賀 公一, 桐原 謙一. 受動的歩行ロボット Quartet II の歩行解析と歩行実験. 日本ロボット学会誌 Vol.18 No.5, pp.737~742, 2000
- [21] T.McGeer. Passive walking with knees. Proc. of ICRA, pp.1640-1645, 1990.
- [22] 志賀 充, 尾懸 貢. 走幅跳競技者の下肢筋力と踏切中のキネマティクス及びキネティクスの関係 : 膝関節と股関節に着目して. 体力科学(日本体力医学会) 53(1), pp.157-166, 2004, 2004.

[23] 田辺 美根子, 丸山 剛生, 中原 凱文. 関節トルクおよび生体表面情報を用いた跳躍運動時の筋の活動様式. ジョイント・シンポジウム 2000 講演論文集 (日本機械学会) : スポーツ工学シンポジウム, シンポジウム:ヒューマン・ダイナミクス, pp.239-243, 2000.

[24] 多田 俊彦, 伊坂 忠夫, 牧川 方昭, 川村 貞夫, 今井 至, 山崎 敦. 装具設計のための膝関節トルクと膝関節間力の解析. Dynamics & Design Conference 2000(日本機械学会). CD-ROM 論文集, 713. 2000.

[25] 谷埜 予士次, 田邊 智, 大工谷 新一, 伊藤 章. 走速度およびストライドの変化が膝関節への力学的負荷に及ぼす影響. 体力科学(日本体力医学会) 53(1), pp.167-181. 2004.

[26] 鳥海 清司, 天野 義裕, 寺澤 健次. 立幅跳び踏切時における各関節でのパワー発揮の特徴 : 垂直跳びとの比較から. 中京大学体育学論叢 (中京大学) 30(1), pp.23-33, 1988.

[27] 樋口 憲生, 李 哲鎬, 加納 明彦, 湯浅 景元. 垂直跳びにおける前伸張の速さ・強さが跳躍高におよぼす効果. 中京大学体育学論叢(中京大学) 28(1), pp.59-64, 1986.

[28] 藤井 範久, 森脇 俊道, 垂直跳び動作と人体の形態的特徴に関する研究 : 付加重量が垂直跳び動作に与える影響. バイオメカニズム学会誌 16(4), pp.328-337, 1992.

- [29] 阿江通良, 渋皮侃二, 高原孝博. 高さをねらいとする跳のバイオメカニクス. 第5回バイオメカニクス国内セミナー, プロシーディングス, 1980.
- [30] 阿江通良, 渋皮侃二. その場から高くとぶ跳躍 垂直跳のバイオメカニクス . Jan.J.Sports Sci. 2(8), pp.590-599, 1993.
- [31] 蘇 素珍, 豊島 健, 戸川 達男, 土屋 喜一. 跳躍運動による人体の力学的特性の解析. バイオメカニズム学会誌 13(4), pp.198-206, 1989.
- [32] 松井 秀治. 人間の跳運動-人間研究としての Biomechanics 研究の視点から-. Jpn. J. Sports Sci. 2(8), pp.584-589, 1983.
- [33] 深代千之, 山際哲夫. 跳ぶ科学. 大修館書店.1990.
- [34] Matthew D. Berkemeier and Ronald S. Fearing. Sliding and Hopping Gaits for the Underactuated Acrobot. IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, pp.629-634, VOL.14, NO.4, AUGUST 1998.
- [35] 忻欣, 兼田雅弘. エネルギー制御法による劣駆動ロボットの振り上げ制御とその動きの解析 Acrobot の場合, 計測自動制御学会論文集 Vol.42, No.4, pp.411-420, 2006.
- [36] 宮崎正博, 三平満司, 高橋晶子, Acrobot 型劣駆動跳躍系の制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '00 講演論文集[2000.5.12-13, 熊本] (日本機械学会), 2P2-84-120, 2000.

[37] 鶴巻浩史, 中浦茂樹, 三平満司, Acrobot 型劣駆動跳躍系の制御, 第7回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集['01.4.25~27・豊中市] (日本機械学会), pp.92-95, 2001.

[38] Tsutomu Mita, Sang-Ho Hyon, Taek-Kun Nam, Analytical Time Optimal Control Solution for a Two-Link Planar Acrobot with Initial Angular Momentum, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL.17, NO.3, JUNE 2001, pp.361-366, 2001.

[39] 有川 敬輔, 美多 勉. 多自由度跳躍ロボットの設計 基本設計と計算機シミュレーション, 日本ロボット学会誌 Vol.20, No.2, pp.214-222, 2002.

[40] K. Arikawa, T. Mita. Design of Multi-DOF Jumping Robot, IEEE Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3992-3997, 2002.

[41] 東森 充, 原田 学, 石井 抱, 金子 真. シリアルリンクロボットの跳躍パターン生成. 日本ロボット学会誌 Vol.23, No.8, pp.1002-1010, 2005.

[42] 大久保 宏樹, 中野 栄二, 木村 浩. ばねとアクチュエータによる跳躍機械の構成法. 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.7, pp.948-954, 1992.

[43] 小笠原. ロッキング運動を用いた動的2足歩行. 機講論, 巻号(95-17), pp.183-186, 1995.

- [44] 小島, KATO. ストッパ - 機構を有する二関節ホッピングロボットの動的解析. 日本機械学会論文集(C編), 71巻, 707号, pp.2281-2288, 2005.
- [45] 松岡. 跳躍・走行機構に関する基礎的研究. 日本機械学会論文集, Vol.43, No.376, pp.4501-4509, 1977.
- [46] 山海 嘉之, 跳ぶロボット, バイオメカニズム学会誌, Vol.20, No.2, pp.74-81, 1996.
- [47] 梅木 健太郎, 岡田 昌史, 岩附 信行. 環境との力学的相互作用のための足部蹴りだし機構の開発. JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Kobe, Japan, June 9-11, 1P1-S-006, 2005.
- [48] 岩間 博哉, 竹村 裕, 上田 淳, 松本 吉央, 小笠原 司. 足指免荷時足指圧力計測に基づく歩行運動に及ぼす足指機能解明, 日本機械学会論文集(C編)70巻 689号(2004-1), pp.213-220, 2004.
- [49] 関口 暁宣, 鈴木 健宏, 跡部 有希, 妻木 勇一, Dragomir N. NENCHEV. ヒューマノイドの足底形状に関する考察. ロボテックス・メカトロニクス講演会'05, 1P2-S-043, 2005.
- [50] 岸本 諭, 丸山 剛生. シューズの着用が跳躍動作中における下肢の動作制御に及ぼす影響の定量的評価, ジョイントシンポジウム 2003 日本機械学会 [No.03-12] シンポジウム講演論文集, 31S, 2003.

[51] 才田 崇王, 太田 裕一, 横小路 泰義, 吉川 恒夫. 足指 2 自由度
を有する拘束装具を用いた人間の歩行における足平機構の機能解析. 日
本ロボット学会誌 Vol.23 No.4, pp.443-448, 2005.

[52] Matthew D. Berkemeier, Kamal V. Desai. Control of Hopping
Height in Legged Robots Using a Neural-Mechanical Approach. IEEE
International Conference on Robotics & Automation Detroit, Michigan
May 1999, pp. 1695-1701, 1999.

[53] 服部邦雄, 山浦弘, 小野京右. 浮遊ロボットの姿勢制御(トルク入
力の導出と時変ゲインによる最大トルクの低減), 日本機械学会論文集(C
編)70 巻 691 号(2004-3), pp.782-789, 2004.

[54] Satoshi Ito¹, Haruhisa Kawasaki. A Standing Posture Control
Based on Ground Reaction Force. Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ
International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2000.

[55] 管 伸二, 本多 庸悟, 金子 俊一, 望月 亮, 百鬼 史訓. 人間型の
脚機構を持つロボットの瞬発的駆動, 情報処理学会第 49 回(平成 6 年後
期)全国大会, pp.6-173 - 6-174, 1994.

謝辞

本研究の遂行にあたり、終始懇切なるご指導を賜りました高知工科大学教授 井上喜雄 博士に深甚な感謝の意を表し上げます。井上先生には学部からの長きにわたりご指導を賜りましたことは貴重な財産となりました。そして、有益なご助言を頂いた 高知工科大学 講師 副指導教員 芝田京子 博士に厚く謝意を申し述べます。暖かい激励と研究に対する貴重なご指導を賜りました 高知工科大学 教授 副指導教員 王 碩玉 博士に厚く感謝の意を表します。論文について貴重なご助言を頂いた 高知工科大学 客員教授 河田耕一 博士に深く感謝の意を表します。本研究に重要なご助言を頂いた 高知工科大学 助教授 岡宏一 博士に深く感謝の意を表します。長時間に及ぶシミュレーションや論文に必要な資料作り等に協力して頂いた 高知工科大学大学院院生 森君に感謝の意を表します。資料の整理等に協力してくれた 高知工科大学生 今西君に感謝の意を表します。そして、研究室メンバーの皆様の御協力に感謝の意を表します。