

脚の振り降ろしを利用した起き上がり運動における 角運動量条件

伊藤 聡^{*1*2} 阪 圭 央^{*1} 川崎 晴 久^{*1}

Angular momentum condition for stand-up motion using the leg swing movement

Satoshi Ito^{*1*2}, Yoshihisa Saka^{*1} and Haruhisa Kawasaki^{*1}

In this paper, we consider a stand-up motion from a face-up lying posture by means of swing-down movement of a leg. Because whether the motion is feasible or not depends on the angular velocity of the leg swing, we propose a method to calculate it approximately. This calculation is based on the phase plane analysis and on conservation of angular momentum. The main problem there is how to evaluate the motion during the rotation around hip, where angular momentum has an effect of the gravity. Here, we calculate it using the initial and final position of COG in the hip rotation phase. This method enables us to estimate a necessary angular velocity without solving dynamic equation. Finally, we examine the effectiveness of the method by simulation and experiments with our constructed robot.

Key Words: stand-up motion, leg swing velocity, conservation of angular momentum, phase plane analysis, knee joint

1. はじめに

人間に代表される二足歩行は多脚歩行に比べて不安定な歩行動作であり、路面状況の変化や周囲の環境など外乱の影響を受けやすい。歩行動作途中において外乱の影響を受けた場合、対応しきれず転倒してしまうことは十分起こりうる。人間の場合、歩行中に転倒してもすぐに起き上がり、本来の目的すなわち歩行動作に復帰することが可能である。歩行ロボットの研究では安定した歩行動作を実現させることを目的としたものが主であるが、転倒した場合に本来の目的行動である歩行動作に復帰する手法を考えておくことも、歩行ロボットの実用化を考える場合に重要となる。

起き上がり運動を仰向け状態から考えた場合、人間が行う動作は多様である。通常、われわれは Fig. 1(a) のように体をひねって一旦うつ伏せ状態になり、その後手を床について体重の支持点を増やし、手足の冗長な自由度を利用して静的な安定性を常に確保しながら起き上がるという戦略をとる。一方では、Fig. 1(b) のように腰関節を使って脚を振り降ろし、体をうまく置くことによって一度しゃがんだ姿勢になり、その後バランスをとりながら立ち上がるという方法もとれる。この場合、体

重を支持しないという意味では手を必要としない。その代わりに体を巧みに伸縮させ、運動量を重力に抗した起き上がりに利用する。つまり、手という機構および自由度が減少する分、脚の振り等で得られる反動をうまく利用していると考えられる。これは運動量を利用すれば少ない自由度での起き上がり運動が実現できることを示唆している。本稿では、このような観点から、仰向けの状態から起き上がる運動について考察してみる。

起き上がり運動に関しては、単純なロボットからヒューマノイドまでさまざまな報告がなされている。単純な機構のものとしては中久喜・山藤 [1] [2] らのように慣性力や遠心力を有効に利用して起き上がる運動を実現する試みや、森本・銅谷 [3] のように強化学習によりロボットに運動を獲得させる研究などがある。またヒューマノイドによる起き上がりには、直立状態への復帰の実現を目的とした金広らの研究 [4]、ロボットの身体を通じた環境とのインタラクションに着目し引き込み現象により起き上がり運動を生成した高橋らの研究 [5]、エンターテイメントとしての SONY SDR-4X [6] がある。ヒューマノイドの場合、多くは手を利用して起き上がるものが多く、本稿で関心をもつ方法についての報告は少ない。一方、単純なロボットによる起き上がりでは、その機構の簡便さゆえ本稿で着目しているようなダイナミカルな動作を利用している。学習に基づく手法は環境が変動しても再学習すれば運動が獲得される点で優れてはいるが、起き上がりができるロボットを設計するための目安となるようなモータの必要速度といった条件は、ロボットが完成して学習が終了した後の解析でしか明らかにならない。脚

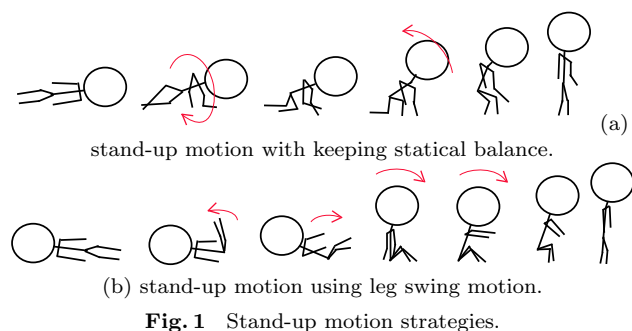
原稿受付 2002年9月12日

^{*1}岐阜大学工学部

^{*2}理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター

^{*1}Faculty of Engineering, Gifu University

^{*2}Bio-mimetic control research center, RIKEN



の振りを利用した起き上がり運動の場合、その条件は脚を振り降ろす時の角運動量の大きさに集約されると本稿では考える。そこで、この条件を導き出すことを主目的に起き上がり運動の解析を行っていく。この脚の振り降ろし時に必要な情報が事前に分かると、ロボットの設計とくにモータの選定時において非常に有用となる。本稿では、起き上がり運動の途中で現われるしゃがんだ姿勢を指定することにより、必要な脚の振り降ろしの角運動量を見積もる方法を提案する。このとき、回転時の姿勢を一定に保つという条件を課すが、これにより解析が容易になり、運動方程式を陽に解くことなく角運動量の算出が可能なのが利点となる。

2. 起き上がり運動の解析

2.1 モデルと問題設定

脚を振る動作には胴部と脚部の2リンクが必要であるが、起き上がることを目標とした場合、膝関節の動きが重要な役割を担っていると考えられる。脚を振り下ろすときには膝を伸ばし脚部の慣性モーメントを大きくすることで、胴部を起こすのに必要な大きな運動量を得ている。一方、着地するときには膝を折り、慣性モーメントを小さくすることで系全体を回転しやすくしている。そこで、本稿では腰関節、足関節だけでなく膝関節の自由度ももった3自由度4リンクモデルが必要十分な身体的条件と考え、この機構での起き上がり運動を考える。

考察する運動の本質は、仰向け状態時に脚を振って得られる運動量を、起き上がるために利用するという点である。その解析には矢状面内の運動を考えれば十分である。以下では、床面は水平で滑べらないものと仮定して解析する。

脚の振り降ろしを利用した起き上がりとして Fig. 2 のような運動を取り上げる。まず、仰向け状態 (1) より脚を持ち上げ、適当な角度で振り戻す (2)。そして、振った脚をある角度で急減速させる (3) とそのためのトルクが胴部を持ち上げるように作用する。このとき体を折り畳み (4)、その姿勢 (5) を保ちつづけると、腰回りの回転が起き、足部が地面に接地する (6)。続いて上体の姿勢を一定に保つと足関節回りの回転が起き (7)、しゃがんだ姿勢 (8) に移行する。その後、各関節を伸展させ (9) 起き上がり運動が達成 (10) される。

本研究では腰および足関節回りの回転中には姿勢を一定に保つと仮定するが、回転中に積極的に姿勢を変化させて起き上がれる条件を緩和する方法も考えられる。腰回りの回転ではその回転軸にアクチュエータは存在せず、また足関節まわり

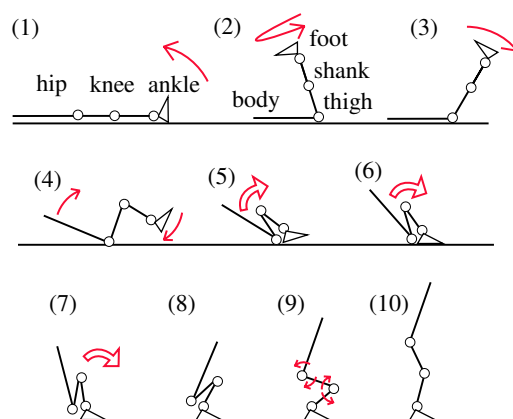


Fig. 2 A stand-up motion model for analysis.

の回転では足部の長さを歩行系では短く取るため足関節トルクは起き上がり運動には利用できない。このような系の制御は Acrobot [7] で代表される劣駆動系として扱われている。ここでは非線形性をうまく利用して制御系を構成すれば収束性が保証できる。その反面、実際の応用では、制御変数の変換に計測の難しい物理パラメータが多く入り所定の状態量たとえば角運動量などを正確に得ることが困難なこと、起き上がりの運動は速度が速いため非線形制御を行う時間が非常に短いこと、また短時間で収束性を高めるにはゲインをあげる必要があるが、実際のロボット制御では振動の原因となるためそれほどゲインが上げられないこと、が問題となる。それよりも解析の容易な条件、すなわち回転中の姿勢は一定であるという条件を課して、起き上がり運動の計画のためのおおよその方針を与えるアプローチをここでは選んだ。

回転中の姿勢が一定であることを仮定すると、(3) で減速し始める直前の脚の速度 (角運動量) の大きさによって、起き上がり運動の可否を判定することができる。つまり、これが適当でなく、速すぎると前方へ、遅すぎると後方へ倒れてしまう。特に、最低限必要な速度の条件をクリアできれば、起き上がるのに十分な性能をロボットが保持していることとなるため、これを明らかにすることは有用である。以降の解析では、起き上がりに必要な脚の降ろし速度の条件を議論していく。なお、(8) から (10) へは静的安定が保たれた条件下での移行である。したがって、実現は比較的容易であると考え、ここでは取り上げない。

2.2 角運動量に基づいた解析

2.2.1 方針

回転中心によるダイナミクスの違いにより、腰回りの回転、腰から足関節への回転中心の移動、足関節回りの回転の各相に分けて解析する。解析では、保存量として利用できる角運動量に着目する。足部の長さが決まると、その足部で静止できる足関節回りの回転時の角運動量の範囲を求めることができる。この角運動量の範囲を脚の振り降ろし時に還元していく。したがって、解析はしゃがんだ姿勢から逆方向に向かって行うことになる。Fig. 3 に解析のモデルと記号表記を示す。

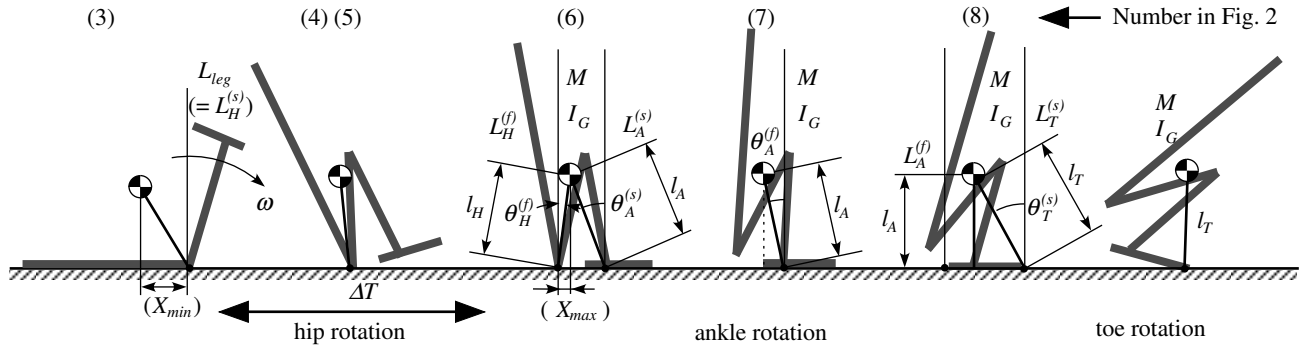


Fig. 3 Notation used in an analysis.

2.2.2 足関節回りの回転

足関節回りの回転の開始 (start) 時において、しゃがんだ状態への移行に必要な角運動量 $L_A^{(s)}$ の範囲を求める。まず勢いが足らず後方に戻ってくることがないように $L_A^{(s)}$ の下限を求める。そのためには重心が踵の真上まで到達できればよい。足関節回りの回転では姿勢は一定と仮定したため、運動は倒立振り子として考えることができる。足関節回りの回転開始時における重心と回転中心を結ぶ直線の鉛直方向からの傾きを $\theta_A^{(s)}$ 、重心が踵の真上に来たときの傾きを $\theta_A^{(f)}$ とおくと、付録 A より

$$L_A^{(s)} > \sqrt{2I_A M g \ell_A (\cos \theta_A^{(f)} - \cos \theta_A^{(s)})} \equiv L_{A_{min}}^{(s)} \quad (1)$$

となる。ここで M は身体モデルの質量、 I_A は足関節回りの慣性モーメント、 g は重力加速度、 ℓ_A は足関節すなわち回転中心から重心までの距離である。

次に、勢い余って前方に倒れることのないよう $L_A^{(s)}$ の上限について考える。重心が足関節の真上に到達した時点で足関節を固定すると、勢いのある場合は爪先まわりで回転を起こす。そのときの角運動量を $L_T^{(s)}$ 、重心と爪先を結ぶ直線の長さを ℓ_T 、その直線が鉛直方向となす角を $\theta_T^{(s)}$ とすると、付録 A より

$$L_T^{(s)} < \sqrt{2I_A M g \ell_T (1 - \cos \theta_T^{(s)})} \equiv L_{T_{max}}^{(s)} \quad (2)$$

であればよい。さて、爪先回りの回転が始まるには、回転中心が足関節から移動する必要がある。このとき回転中心回りの角運動量は変化する。付録 B の解析を用いると、足関節回りの回転終了 (finish) 時の足関節回りの角運動量 $L_A^{(f)}$ と $L_T^{(s)}$ との間には

$$\begin{aligned} L_A^{(f)} &= \frac{I_G + M \ell_A^2}{I_G + M \ell_A \ell_T \cos(\theta_T^{(s)})} L_T^{(s)} \\ &= \alpha_0 L_T^{(s)} \end{aligned} \quad (3)$$

という関係が成り立つ。ここで、 I_G は重心まわりの慣性モーメントである。さらにその前には足関節回りの回転が起こっている。倒立振り子の位相面での軌道は次式で表されるハミルトン系として表される。

$$H = \frac{1}{2I_A} L^2 + M g \ell_A \cos \theta \quad (4)$$

終了時には、重心の角度は $\theta_A^{(f)}$ で角運動量が $L_A^{(f)}$ であるから、

ハミルトニアンが

$$H_A = \frac{1}{2I_A} L_A^{(f)2} + M g \ell_A \cos \theta_A^{(f)} \quad (5)$$

の値をもつ軌道となる。これを利用すると足関節回りの回転開始時の角運動量 $L_A^{(s)}$ が計算できる。そのときの重心の傾斜角度は $\theta_A^{(s)}$ であるから

$$\begin{aligned} L_A^{(s)} &= \sqrt{L_A^{(f)2} + 2I_A M g \ell_A (\cos \theta_A^{(f)} - \cos \theta_A^{(s)})} \\ &= \sqrt{L_A^{(f)2} + \alpha_1} \end{aligned} \quad (6)$$

(2), (3), (6) より $L_T^{(s)}$, $L_A^{(f)}$ を消去すると

$$L_A^{(s)} < \sqrt{(\alpha_0 L_{T_{max}}^{(s)})^2 + \alpha_1} \equiv L_{A_{max}}^{(s)} \quad (7)$$

を得る。

2.2.3 腰から踵への回転中心の移動

腰回りの回転終了時に必要な角運動量 $L_H^{(f)}$ の範囲を求める。付録 B の解析より、 $L_H^{(f)}$ と $L_A^{(s)}$ の関係は

$$\begin{aligned} L_H^{(f)} &= \frac{I_G + M \ell_H^2}{I_G + M \ell_H \ell_A \cos(\theta_H^{(f)} + \theta_A^{(s)})} L_A^{(s)} \\ &= \beta L_A^{(s)} \end{aligned} \quad (8)$$

となる。 ℓ_H は腰部すなわち回転中心から重心までの距離、は腰回りの回転終了時における重心の傾斜角を $\theta_H^{(f)}$ である。したがって

$$\beta L_{A_{min}}^{(s)} (\equiv L_{H_{min}}^{(f)}) < L_H^{(f)} < \beta L_{A_{max}}^{(s)} (\equiv L_{H_{max}}^{(f)}) \quad (9)$$

が得られる。

2.2.4 腰回りの回転

腰回りの回転が始まる瞬間の角運動量を $L_H^{(s)}$ とする。腰回りの回転は脚の振り降ろしを止めるための腰関節のトルクが上体に作用し、その結果上体が起こされることによって実現される。このとき腰回りの全体の角運動量は、腰関節に働くトルクによっては直接的には変化しない。しかし、それにより重心位置が変化するため、重力の働きにより間接的に変化してしまう。角運動量の変化は外力によるモーメントに等しいから、それを積分することにより腰まわりの回転での変化量 ΔL は

$$\Delta L = \int_{t_H^{(s)}}^{t_H^{(f)}} MgX(t)dt \quad (10)$$

で与えられる。\$X(t)\$ は回転中心すなわち腰部を原点とし足側を正の座標系ととったときの重心の水平座標値、\$t_H^{(s)}\$ および \$t_H^{(f)}\$ はそれぞれ腰回り回転の開始および終了時刻である。

ここで水平方向の重心軌道は、腰回り回転の初期値 \$X_H^{(s)}\$ と終了値 \$X_H^{(f)}\$ の間もしくはその近傍で変化すると仮定し、\$\Delta L\$ を

$$MgX_{small}\Delta T(\equiv \Delta L_{min}) < \Delta L < MgX_{large}\Delta T(\equiv \Delta L_{max}) \quad (11)$$

の範囲で近似する。上式において \$X_{large}\$ は \$X_H^{(s)}\$ および \$X_H^{(f)}\$ のうちの大きい方、\$X_{small}\$ は小さい方であり、\$\Delta T(= t_H^{(f)} - t_H^{(s)})\$ は腰回り回転の時間である。近似の妥当性については第 3.4 節において考察する。この近似によると腰回りの回転終了時の角運動量 \$L_H^{(f)}\$ は

$$L_H^{(s)} + \Delta L_{min} < L_H^{(f)} < L_H^{(s)} + \Delta L_{max} \quad (12)$$

の範囲に存在する。(12) で与えられる \$L_H^{(f)}\$ は、(9) の条件を満たさなければならない。そのために必要な \$L_H^{(s)}\$ の条件を両式より算出すると、

$$L_{H_{min}}^{(f)} - \Delta L_{min} < L_H^{(s)} < L_{H_{max}}^{(f)} - \Delta L_{max} \quad (13)$$

で与えられる。この \$L_H^{(s)}\$ の上限および下限を \$L_{H_{max}}^{(s)}\$、\$L_{H_{min}}^{(s)}\$ とおく。脚の振り降ろしで得られる角運動量 \$L_{leg}\$ はそのまま腰回りの回転の角運動量の初期値、すなわち \$L_{leg} = L_H^{(s)}\$ であるから、しゃがんだ姿勢を達成するために必要な脚の振り降ろし時の角運動量は

$$L_{H_{min}}^{(s)} < L_{leg} < L_{H_{max}}^{(s)} \quad (14)$$

である。腰関節まわりの脚部の慣性モーメントを \$I_{leg}\$ とおけば、脚の振り降ろし時の角速度 \$\omega\$ の範囲が

$$L_{H_{min}}^{(s)} / I_{leg} < \omega < L_{H_{max}}^{(s)} / I_{leg} \quad (15)$$

として与えられる。

3. シミュレーションと実験

3.1 シミュレーション・モデル

第 2.2 節で展開した起き上がり運動解析の検証を行うためにシミュレーションを行った。シミュレーションでは、第 3.5 節で述べるロボットに基づいたモデルを用いる。しかし、足部については、床との接触の扱いを容易にするため、以下のような単純化を行った。床との接触を簡単にするには足部を無視した 3 リンク系として扱う方法がある。しかし、足部の質量は脚の振り降ろし時の慣性モーメントに影響を与えるため、この場合は適切ではない。そこで、足部は大きさ 0、慣性モーメントが十分小さい (0.000001) の質点と考えた。その他のリンクの長さおよび質量は Table. 2 に従う。慣性モーメントは足部以外は均質な線密度を持つ剛体として概算した。

3.2 起き上がり運動時の姿勢の設定

足関節回りの回転中では、しゃがんだ状態にとるべき腰および膝関節角度を予め実現しそれを維持するが、このとき回転中心回りの慣性モーメントが小さくなった方が起き上がりには有利である。そこで、両関節とも 140(deg.) 屈曲させた状態をしゃがんだ姿勢として指定した。ロボットでは関節を 160(deg.) まで屈曲させることができるが、可動限界の値を設定すると無理な力が加わった場合に破損しやすいため、少し余裕を持たせた値を与えた。

脚の振り降ろし時には膝関節を伸展させ慣性モーメントを大きくさせた方が必要な角運動量を得るにも小さな角速度ですみ、短時間での急激な加速を少しでも減らすことができる。したがって、振り降ろし時の脚の角速度は、膝関節を真っ直ぐに伸展させた状態で計算した。また、腰回転中の角運動量変化を見積もるには脚を振り降ろす瞬間の腰関節角度を指定しなければならない。腰関節を伸展させるほど重心が足側に移動し、起き上がりには有利である。しかし、伸展させすぎると振り降ろした脚の運動を静止させる前に足先が地面についてしまう、あるいは腰回り回転の短時間内にとるべきしゃがんだ姿勢が腰の屈曲量の増大により実現できないという状況が生じ、それほど伸展させた姿勢を与えることもできない。そこで、ここでは脚が鉛直状態 (腰関節の屈曲 90 度) と水平状態 (0 度) の中間のとなる腰関節の屈曲が 45 度の姿勢を指定した。しゃがんだ姿勢と脚を振り降ろす瞬間の 2 つを指定することにより \$X_{large}\$ と \$X_{small}\$ が計算できる。

本稿で製作した起き上がりロボットでは、足関節から爪先までの距離 (8cm) を比較的長くとった。そこで勢い余って前方に倒れることは少ないと考え、特に起き上がりに角速度の下限値のみを計算する。

3.3 条件設定

シミュレーションでは、膝関節を伸ばし腰関節を 90 度屈曲させた状態を初期状態として与えた。そして脚の振り降ろしに続いておきる腰回り回転の時間を \$\Delta T\$ とし、その時間内にはしゃがんだ姿勢がとれるよう運動を指定する。このとき不用意に膝関節を屈曲すると足部が地面に接地してしまうため、腰関節と足関節の屈曲のタイミングを工夫した。その後は Fig. 2 のように第 3.2 節で指定した姿勢を維持する。起き上がりは踵と上体重心との水平距離が、足関節-踵間の長さ 3cm の範囲に入った場合に成功とみなし、シミュレーションを終了する。数値計算には 4 次の Runge Kutta 法をきざみ時間 0.1ms で用いた。

3.4 計算結果とシミュレーション

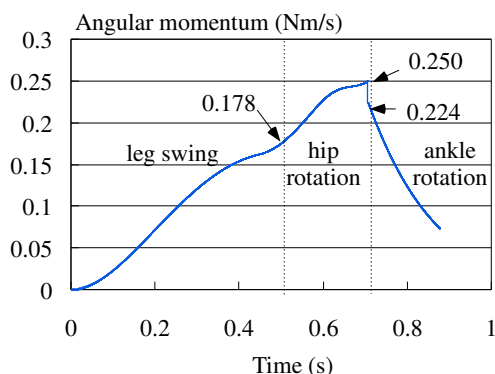
以上の設定のもと第 2.2 節の解析にしたがって計算した各変数値を Table.1 に示す。なお、使用したモデルでは足部が質量をもち、足部の接地によりその運動量が全て失われる。したがって、\$\beta\$ の計算はこれを考慮した次式を用いている。

$$\beta = \frac{I_G + M\ell_H^{(f)2}}{\bar{I}_G + \bar{M}\bar{\ell}_H^{(f)}\bar{\ell}_A^{(s)} \cos(\bar{\theta}_H^{(f)} + \bar{\theta}_A^{(s)})} \quad (16)$$

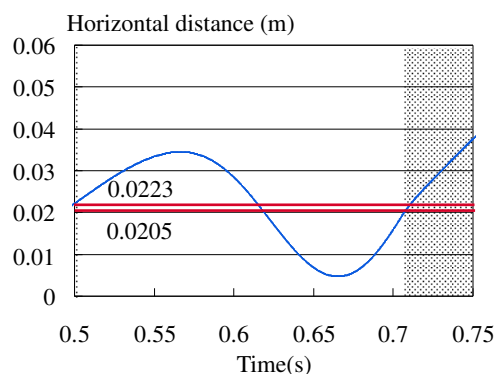
記号 \$\bar{\cdot}\$ は、足部を除いた部分に対して計算した量である。また、\$\Delta T\$ は付録 C にしたがって、\$L_{H_{min}}^{(f)}\$ とモータの最大連続トルク

Table 1 Simulation parameters and calculation results.

parameters		calculation results					
variable	value	variable	value	variable	value	variable	value
M	1.71 kg	ℓ_A	0.157 m	$\theta_A^{(f)}$	0.254 rad	$L_{Amin}^{(s)}$	0.210 Nm/s
\bar{M}	1.30 kg	ℓ_H	0.089 m	$\bar{\theta}_A^{(s)}$	0.756 rad	$L_{Hmin}^{(f)}$	0.234 Nm/s
I_A	0.0455 kgm ²	$\bar{\ell}_H$	0.115 m	$\bar{\theta}_H^{(f)}$	-0.047 rad	ΔL_{min}	0.069 Nm/s
I_G	0.0158 kgm ²	X_{small}	0.0205 m	β	1.12	$L_{Hmin}^{(s)}$	0.165 Nm/s
\bar{I}_G	0.0133 kgm ²	X_{large}	0.0223 m	ΔT	0.2 s	ω_{min}	2.84 rad/s
I_{leg}	0.0311 kgm ²						



(a) Angular Momentum



(b) Horizontal movement of COG.

Fig. 4 Simulation result.

値 ($\tau_M = 0.0284\text{Nm}$) より見積もった．このとき X_{max} の近似値として X_{large} を用いた．

起き上がり運動は、振り降りし時の角速度が ω_{min} よりも大きければ可能なはずである．そこで角速度の目標値としてそれよりも少し大きな値 $2.85(\text{rad/s})$ としたところ、起きあがれることが確認できた．シミュレーション動作での角速度は $2.84(\text{rad/s})$ よりも少し大きな値であった．シミュレーションでの回転中心まわりの角運動量の変化を Fig. 4(a) に示す． $L_A^{(s)}$ が Table. 1 の $L_{Amin}^{(s)}$ よりもわずかに大きな値であること、 $L_A^{(s)}$ と $L_H^{(f)}$ の比 ($0.250/0.224=1.12$) が β に近いことなどシミュレーションと計算値はよく一致している．Fig. 4(b) は、腰回転時の回転中心を原点としたときの重心の水平座標の時間変化を示している．網のかかっていない部分 $t \in [0.5052, 0.7062]$ が腰まわり回転で、ハミルトニアンでは運動が規定できない範囲である．重心は $X_{small} = 0.0205$ と $X_{large} = 0.0223$ の範囲にはおさまっていないが、角運動量の変化を評価するのは (10) 式のように積分値すなわち水平座標軸と作る部分の面積である．腰回転開始時および終了時には、全体が腰を中心に起き上がり方向に回転しているため、重心の水平座標の変化速度はともに正である．したがって、水平座標の時間変化は Fig. 4(b) のように増加のあと減少しその後また増加するという波 (~) 型を示す．特に腰回転時の運動つまり膝を伸ばして振り降りす姿勢からしゃがんだ姿勢までの変化をうまく設計すれば、Fig. 4(b) のように対称性の高い軌道となる．これを積分すると、多くの場合初期値及び終了値の間の値で近似できる．このシミュレーションでも、曲線の作る部分の面積 $\Delta L = 0.072(=$

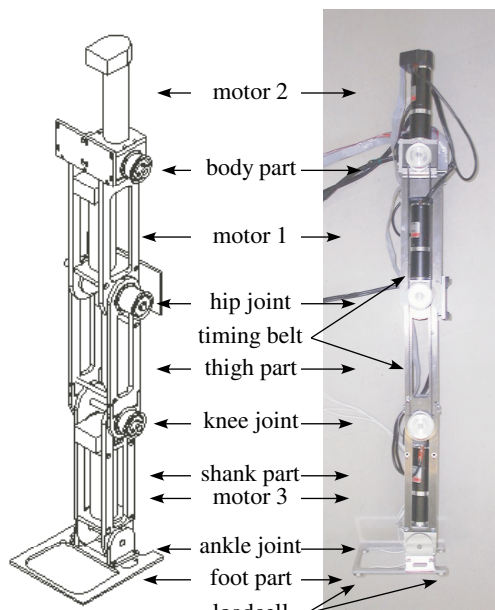


Fig. 5 Designed robot for stand-up motion.

$0.250 - 0.178$) は、水平線 X_{small} と X_{large} が作る長方形の面積 ($MgX_{small}\Delta T = 0.069, MgX_{large}\Delta T = 0.075$) で上下が抑えられていた．したがって腰回転中の角運動量について本稿で提案した方法で妥当な評価ができていくことになる．

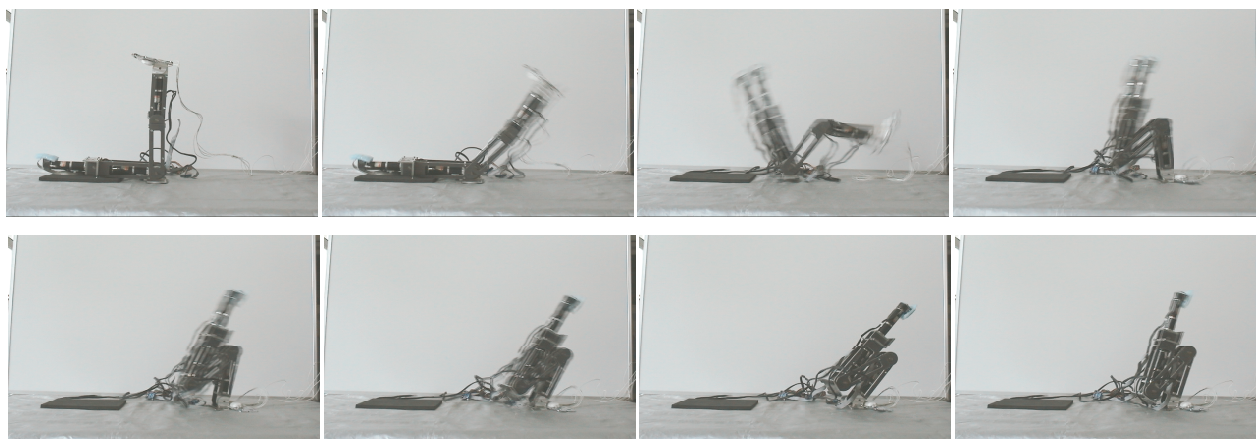


Fig. 6 Robot experiment.

Table 2 Mass and length of each link.

	body	thigh	shank	foot	total
Mass	0.76	0.16	0.38	0.41	1.71
Length	0.31	0.15	0.15	0.11	—

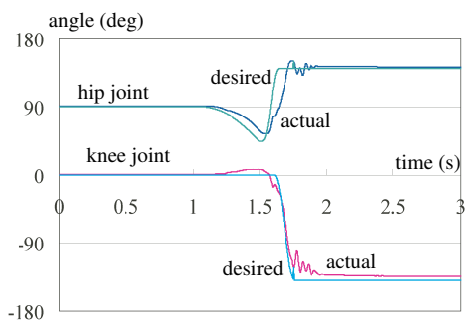


Fig. 7 Trajectories of hip and knee joint angle in robot experiment.

3.5 ロボットによる実験

実験では Fig. 5 のような 4 リンク 3 関節ロボットを利用する。腰・膝および足関節は、同じ性能の DC モータ (20W, ギア比約 53:1) を使用している。DC モータにはエンコーダが装着され、各関節変位が検出できる。また、足部が床面に接地したことを判断できるように、足部の各隅に床反力を測る力覚センサ (ロードセル) を装着している。Table 2 に各部のリンクの質量, 長さを示す。足関節-踵間 3cm, 足関節-爪先間 8cm で、足関節の高さは 3cm である。

実験はシミュレーションと同様の初期状態から行った。制御としては設定した角速度ができるような目標軌道を作成し、それに対する非線形補償なしの関節空間高ゲイン PD 制御をおこなった。ゲインは振動が起きない最も大きいものを選んだ。角速度が ω_{min} よりも大きければ起きあがること、慣性モーメントなどのいくつかのパラメータはその真値が正確にはわからないこと、制御での位相遅れなどを考慮し、目標角速度として ω_{min} より大きくきりのよい値 3.0(rad/s) を設定したところ、しゃがんだ姿勢に到達できた。そのときの様子を Fig. 6 に示す。Fig. 7 はモータのエンコーダ値より得られた腰および膝

関節角度の変化である。差分により角速度は目標の 3.0(rad/s) 以上はできていることを確認した。

4. おわりに

本稿では、仰向け状態から直立状態への脚の振り降ろしを利用した起き上がり運動について考察してきた。運動の成否は脚の振り降ろし時の角速度で決まると考え、その値を角運動量に基づいて計算する方法を提案した。シミュレーションおよび実験により、提案した方法の妥当性・有効性が示された。この方法は、倒立振りモデルに基づいた位相面解析と角運動量保存則に基づいている。計算時に問題になるのは、腰まわりの回転中に系全体が重力から受ける影響をどう評価するかである。本稿では、重心の水平位置の初期状態・終了状態を用いてそれを概算する方法をとった。これによりダイナミクスを解くことなく必要な角速度を見積もることができるようになった。ただし、腰まわりの回転が長い場合や重心の軌跡が複雑になる場合については改良すべき点が残されていると考える。

謝辞 本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 (13750215) の補助を受けた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 中久喜一雄, 山藤和男. “曲率をもつ 3 つのリンクで構成されたロボットの運動制御 (第一報, ロボットのコンセプトとダイナミックな制御),” 日本機械学会論文集 (C 編), vol. 58, No. 555, pp. 3299-3306 (1992)
- [2] 中久喜一雄, 山藤和男. “曲率をもつ 3 つのリンクで構成されたロボットの運動制御 (第二報, ロボットのさまざまな動作),” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.59, No. 559, pp. 850-854 (1993)
- [3] 森本 淳, 銅谷賢治. “強化学習を用いた高次元連続状態空間における系列運動学習 —起き上がり運動の獲得,” 電子情報通信学会誌, Vol. J82-D-II, No. 11, 2118-2131 (1999)
- [4] 金広文男, 稲葉雅幸, 井上博充. “倒れても起きあがることのできる人間型ロボット,” 第 13 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol. 1, pp. 195-196 (1995)
- [5] 高橋正仁, 宮腰清一, 國吉康夫, 柿倉正義. “振動子を用いた脚の振りにより引き起こされる身体の振りの制御,” 第 19 回日本ロボット学会学術講演会論文集, pp. 1151-1152, (2001)
- [6] <http://www.sony.co.jp/>
- [7] Mark W. Spong: “The swing up control problem for the acrobot,” IEEE Control Systems, pp. 49-55, (1995)

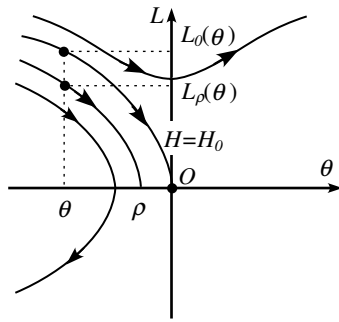


Fig. 8 Behavior on phase plane.

付録 A. 倒立振子の角運動量と転倒方向

倒立振子の運動の位相面上の振舞いは

$$H = \frac{1}{2I}L^2 + Mgl \cos \theta \tag{A.1}$$

で定義されるハミルトニアン H の大きさにより区別できる．ここで I は転倒中心まわりの倒立振子の慣性モーメント， L は回転中心回りの角運動量， θ は重心と回転中心を結んだ直線が鉛直方向からなす角度， M は倒立振子の質量， g は重力加速度， ℓ は回転中心から重心までの距離である．回転中心の真上にある不安定平衡点すなわち位相面の原点を通る軌道は， $\theta = L = 0$ を代入することにより，ハミルトニアンの値が

$$H = Mgl \equiv H_0 \tag{A.2}$$

として規定できる．したがって，Fig. 8 に示すように， $H > H_0$ の場合は倒立振子は不安定平衡点を通り越して前方へ倒れ，一方 $H < H_0$ の場合は不安定平衡点を越えられず後方に転倒する．このハミルトニアンで表された関係を角運動量で表現してみる．原点を通る軌道は

$$\frac{1}{2I}L^2 + Mgl \cos \theta = Mgl \tag{A.3}$$

である．右辺第 2 項を左辺に移行し，両辺に $2I$ をかけた後平方をとることにより，原点を通る場合の角運動量は θ の関数として

$$L = \sqrt{2IMgl(1 - \cos \theta)} \equiv L_0(\theta) \tag{A.4}$$

で表される．したがって，角運動量が $L_0(\theta)$ より大きい小さいかによって，前方か後方かのどちらに倒れるかが判定できる．

なお，重心が真上まで到達する必要がなく，手前の鉛直方向からの角度 ρ まででよい場合は，(A.4) 式は

$$L = \sqrt{2IMgl(\cos \rho - \cos \theta)} \equiv L_\rho(\theta) \tag{A.5}$$

で置き換えられる．

付録 B. 回転中心の変化と角運動量

点 O_- を中心にして床面上を回転したロボットが床面と衝突をおこし，その後回転中心が O_+ に変化した場合を考える．このとき，ロボットの各関節角度は一定に保たれていると仮定して剛体と考え，その質量を M ，重心まわりの慣性モーメント

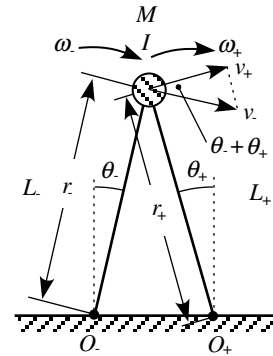


Fig. 9 Angular momentum changing with rotation center.

を I とおく．Fig. 9 に示すように，衝突前後において，各回転中心まわりの重心の角速度を ω_- および ω_+ ，回転半径を r_- および r_+ ，重心の速度を v_- および v_+ ，各回転中心まわりの角運動量を L_- および L_+ とおくと，

$$v_- = r_- \omega_- \tag{B.6}$$

$$L_- = (I + Mr_-^2) \omega_- \tag{B.7}$$

である．衝突時に加わる撃力は点 O_+ のみから働くため， O_+ まわりでの角運動量は衝突前後で保たれる．したがって，重心と点 O_1 および点 O_2 を結ぶ直線が鉛直方向からなす角度をそれぞれ θ^- および θ^+ とそれぞれおくと，

$$I\omega_- + r_+ Mv_- \cos(\theta_- + \theta_+) = L_+ \tag{B.8}$$

が成り立つ．(B.6) を代入し， ω_- について解くと

$$\omega_- = \frac{1}{I + Mr_- r_+ \cos(\theta_+ + \theta_-)} L_+ \tag{B.9}$$

となり，これを (B.7) に代入して

$$L_- = \frac{I + Mr_-^2}{I + Mr_- r_+ \cos(\theta_+ + \theta_-)} L_+ \tag{B.10}$$

の関係を得る．

付録 C. 腰まわりの回転時間

腰まわりの回転終了時の角運動量 $L_H^{(f)}$ が与えられたとする．モータの最大連続トルク τ_M より，腰まわりの回転時間 ΔT が最低どのくらい必要かを計算する．重力や腰関節トルクの影響がなければ，腰まわりの角運動量は保存される．この場合，脚の振り降ろし時の角運動量は腰回り回転終了時と等しく $L_H^{(f)}$ であったと考えることができる．しかし，実際にはこれに重力の影響が加わる．回転中の重心軌道における回転中心からの水平距離の最大値を X_{max} とすると，重力による角運動量の増加量は

$$MgX_{max}\Delta T \tag{C.11}$$

より大きくはならない．振り降ろした脚を止めることは，この重力の影響を加味した角運動量を腰関節のトルクで ΔT 間に打ち消すこととなるため

$$L_H^{(f)} + (\text{effect of gravity}) < L_H^{(f)} + MgX_{max}\Delta T < \tau_M\Delta T \quad (\text{C.12})$$

であればよいこととなる．上体を支えられると仮定すると $\tau_M - MgX_{max}$ は正である必要があるので，上式を ΔT について解くと

$$\Delta T > L_H^{(f)} / (\tau_M - MgX_{max}) \quad (\text{C.13})$$

が得られる．なお，この式では常に最大トルクが出せると仮定しているため，実際にはこれよりも大きめの値が必要となる．

伊藤 聡

1991年名古屋大学工学部情報工学科卒業．1993年同大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了．1994年より理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センターに勤務．1999年，岐阜大学工学部助手，現在に至る．工学博士．計測自動制御学会，IEEEなどの会員．（日本ロボット学会正会員）

阪 圭央

2002年岐阜大学工学部機械工学科卒業，現在同大学院工学研究科機械システム工学専攻博士前期課程在学中．

川崎 晴久

1974年名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了，同年日本電信電話公社（現 NTT）入社，90年金沢工業大学教授．1994年8月より岐阜大学工学部教授，現在に至る．ロボット制御，バーチャル・リアリティ応用ロボティクスなどの研究に従事．計測自動制御学会，日本機械学会，日本バーチャル・リアリティ学会，IEEEなどの会員．工学博士．（日本ロボット学会正会員）