YT メカニズムを用いた自立四足歩行ロボットの 振動制御による歩行の安定化*

滝 田 好 宏^{*1}

Walking Stabilization of a Self-Standing Quadrupedal Robot with YT-Mechanisms Using Vibration Control Device

Yoshihiro TAKITA

We present the vibration control of a self-standing quadrupedal walking robot with one-degree-of-freedom mechanisms which are called YT-mechanisms. Our developed robot walks with trot gait, in which its weight is supported by each pair of diagonally opposite legs alternately. The experimental results show that the natural frequency of first-mode vibration changes with the rotational angle of the mechanisms. The movement of feet's position generates imbalance force which makes the elastic displacement of legs and the vibration during walking. In order to reduce the vibration, we propose to use dynamic absorber as a passive vibration control device and investigate the influence of the tuned frequency of it. Experimental results show the advantages of this method.

Key Words: Vibration of Moving Body, Self-Standing Quadrupedal Robot, YT-mechanism, Trot Gait, Vibration Control, Dynamic Absorber

1. はじめに

歩行ロボットの特性は脚数と足先軌跡生成機構によって決定される。三脚以下⁽¹⁾⁽²⁾ではその安定化が重大な問題であり、実用化のために重要な問題点となっている。四脚以上では三脚以上で支持すれば安定であるが、多関節形^{(3)~(7)}を用いる場合にはその制御方法が複雑になる。一方、1自由度リンク機構^{(8)~(11)}を用いる方法では制御関節が少ない反面歩行パターンが固定されるが、使用用途を限定すれば多関節形に比べて軽量化が可能で自立歩行ロボットの実現に有効と考えられる。歩行パターンを生成する1自由度機構として、チェビシェフの4節回転連鎖近似直線運動機構⁽¹²⁾が歩行ロボットに応用されているが、軌跡が足先と反対の上部に描くためにさまざまな工夫が必要となり、結果的に重量が大きく高速化は難しいと考えられる。

著者らは歩行パターンを生成する1自由度機構として早戻り機構を応用したYTメカニズム⁽¹³⁾を考案して、自立四足歩行ロボットに適用している。ここでは、固定した歩行パターンでも歩行できる歩行形態としてトロット歩容を実現している。歩行中には接地した対

角の二脚と移動する重心によって不釣り合いモーメントが発生する。このロボットには不釣り合いモーメントを軽減する機構として、ロボットの電源である鉛蓄電池を胴体の前後に移動できる機構を取付け、機構の回転角に応じた位置に制御するようにしている。その結果、不釣り合いモーメントを軽減して歩行の安定化を実現している。しかし、脚機構の弾性変形によって振動を引き起こし、歩行に影響していることが確認されている。

本研究では、前報で用いた四足歩行ロボットの歩行の安定化のために、歩行中に引き起こされる振動の低減に動吸振器⁽¹⁴⁾を用いる方法を提案する。この歩行ロボットがトロット歩容で歩行する場合には、YTメカニズムのクランク回転角によって振動特性が変動する。このような時変系の対象の振動制御に振子式動吸振器の適用を試みる。一般的に動吸振器は時変系に対して制振特性を維持することは難しいが、構造が簡単で重量の割に制振特性がよいという特長があり、また自立歩行ロボットに設置が容易であることから採用している。ここでは着地前の振動振幅が大きい条件を選んで動吸振器を設計し、歩行時の振動特性を調べることによって、振動制御が歩行ロボットの歩行の安定化に有効であることを示す。

* 原稿受付 1996年1月22日。

^{*1} 正員, 防衛大学校 (〒239 横須賀市走水1-10-20)。

2. 四足歩行ロボット

2.1 YT メカニズム 歩行軌跡が胴体下部に描かれる機構として、図1に示すようなYTメカニズムを考案した。これは、早戻り機構に足部と補助リンクを取付けた簡単な機構である。 r はクランクの回転半径でモータによって等角速度で駆動される。B点はスライダで主リンクPと副リンクRとに結合する。Qは足部でC点で主リンク、D点で副リンクに結合する。F点のはかかと、H点のはつま先に相当する。この機構の解析は文献(13)を参照されたい。

四足歩行ロボットに用いた機構パラメータを表1に示す。この機構を用いて四足歩行ロボットにトロット歩容で歩行するために次の仮定を行っている。(1)対角の二脚で交互に支持する。(2)四脚が接地する区間が存在する。(3)左右の脚の回転位相差は180度に設定する。(4)遊脚と接地脚は回転角が180度異なり、かつ高さが一致する所で入れ替わる。(5)接地から遊脚までの接地区間ではスリップ、接地面の変形が起こらない。(6)歩行によって発生する不釣り合いモーメントは足の幅を広くすることによって抑制できる。この仮定に基づいて歩行ロボットの足先と胴体の軌跡は図2のように解析することができる。ところが実際の歩

Fig. 1 YT-mechanism for the walking robot

Fig. 2 Displacement of the body and foot

行ロボットでは脚構造の弾性変形や振動が発生するために、これが歩行にどのように影響するか調べる必要がある。

2.2 四足歩行ロボット YTメカニズムを脚機構に使用した歩行ロボットの組立図を図3に示す。外形寸法は446×400×270 mm, 全体の重量は文献(13)のロボットの軽量化を行った結果電池を含めて9.4 kgである。胴体は弾性変形を最小にするために9 mm 角パイプの溶接構造で、脚機構は可動部分の軽量化のために肉厚6 mm, 幅30 mm のアルミ合金を使用している。ロボットの脚機構は前後に取付けた減速器付DCモータが同期して回転するように歯車と駆動軸で結合して、傘歯車を介して駆動されている。各脚の回転は対角の脚が同位相、左右の脚が逆位相になるよう設定されている。回転角はモータ軸に取付けたロータリエンコーダによって240 pulse/revolutionで検出される。本体中央にはロボットの電源である鉛蓄電池(2.6 kg)1個をスライダに設置し、歯付ベルトを介してDCモータで前後に移動する不釣り合い補正機構が取付けられている。

2.3 制御装置の構成 図4にV 25 CPUを用いた四足歩行ロボットの制御装置の構成を示す。V 25 CPUでは2個の機構駆動用DCモータの角度制御と、不釣り合い補正機構のDCモータの制御を行っている。各脚の回転は歯車で機械的に結合されているので、2

Table 1 Link parameters

L_1	0.179 m	L_6	0.040 m
L_2	0.40 m	L_7	0.050 m
L_3	0.225 m	L_8	0.0325 m
L_4	0.060 m	r	0.035 m
L_5	0.010 m	L_x	0 m

Fig. 3 Outline of a quadruped robot

個のモータに同じ制御力を与えることができる。制御プログラムはパーソナルコンピュータを用いてC言語で開発し、シリアルインタフェースを介してダウンロードしてから実行した。

図5には各モータの制御のブロック線図を示す。ここで、 θ_{ri} は目標値、 θ_{oi} は出力、 G_i は制御対象の動特性でPWM駆動回路の特性も含んでいる。また、 K_{pi} はループゲイン、 K_{vi} は速度フィードバックゲインであり、これらの値は適正なステップ応答が得られるようにプログラム中で設定した。脚機構のクランク軸を等角速度で制御することは、目標値を等間隔で増加させることによって実現している。表2に本ロボットに用いたDCモータの特性を示す。電池の位置制御のための目標値は制御系の遅れを考慮して、図6の太い実線のように設定した。

2・4 不釣り合い補正 本歩行ロボットの足底の幅を100 mmに設定しているの、支持脚のかかとで作られる平行四辺形内で重心が動くことになり歩行が可能となる。しかし、図7に示すように、支持脚の接地中心を結ぶ線から重心がずれることによってモーメント

が発生する。これを解析すると図8の破線のようになる。これに対して、不釣り合い補正機構を用いて質量を接地脚の足先の位置に連動して移動することによって、図8の実線のように30パーセント小さくすることができている。ここで、ロボットの幅163 mm、脚中心の長さ356 mm、ロボットの全質量9.4 kg、重りの質量2.6 kgとした。本ロボットは軽量化を施した結果、前報に比較して23パーセント軽減されている。ただし、この解析において質量の位置制御時に発生する動的な影響は無視しているため、実際の歩行において調べる必要がある。

3. 歩行ロボットの振動制御

3・1 動吸振器の構造 歩行ロボットの脚機構は曲げ剛性が小さいために、不釣り合いによって弾性変形を生じる。したがって、歩行中には図8のように不釣り合いが正負に変動するために振動を引き起こすことになる。振動の方向は接地脚を結ぶ線を中心とした回転と考えられる。制振装置が振動面と常に平行に力が発

Table 2 Parameters of DC motors

	for walk	for battery
torque constant (Nm/A)	0.018	0.024
rotor inertia ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	3.2×10^{-6}	2.1×10^{-6}
maximum torque (Nm)	0.73	0.016
gear ratio	30	30
diameter of pulley (m)		0.015

Fig. 4 Control circuit constructed for the quadrupedal robot

Fig. 5 Control method of each motor

Fig. 6 Foot position and target value of weight position

Fig. 7 Generating mechanism of moment

Fig. 8 Calculated moment in walking

生できれば高い制振効果が得られるが、この場合には振動の回転軸は支持する脚が入れ替わるたびに左右に移動するので一つの制振装置では最適に設計するのは難しい。しかし、支持脚が入れ替わり振動面が変動しても左右の振動特性がほぼ同じであれば、歩行ロボットの横方向に作用する制振装置を設置するようにすると、制振効果は多少犠牲になるが一つの制振器で制振することが可能となる。本研究では図9に示す振り子式動吸振器を開発して、歩行ロボットの振動制御を試みる。ここで、固有振動数は振り子の長さで調整し、減衰は制振器質量を兼ねる銅板と永久磁石による磁気ダンパによって与える方式になっている。

3・2 動吸振器の設計理論 対角の二脚で支持した状態の振動特性をばねと質量からなる1自由度の振動系と考えると、これに動吸振器最適調整理論⁽¹⁴⁾を応用すれば、動吸振器の設計式は次のように得られ

Fig. 9 Pendulum-type dynamic damper with magnetic damper

Fig. 10 Natural frequency and gain of the first mode vibration changing by the angle position

る。

最適同調：

$$\frac{\omega}{\Omega} = \frac{1}{1+\mu} \quad \dots\dots\dots (1)$$

最適減衰：

$$\zeta = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$\Omega = \sqrt{\frac{K}{M}}, \omega = \sqrt{\frac{k_d}{m_d}}, \zeta = \frac{c_d}{2m_d\omega}, \mu = \frac{m_d}{M}$$

ここで、 Ω, M, K はそれぞれ制振対象の固有振動数、質量、ばね定数、 $\omega, m_d, k_d, c_d, \zeta$ は動吸振器の固有振

Fig. 11 Calculated compliance

Fig. 12 Calculated impulse response

動数, 質量, ばね定数, 減衰係数, 減衰率, μ は質量比を表す。動吸振器の設計には制振対象の固有振動数と質量を知る必要があるが, 実験的に求めることができる。

3.3 歩行ロボットの振動特性 歩行ロボットのクランク軸の回転角によってどのように振動特性が変化するかを調べて図 10 に示す。ここで, クランク軸の回転を 2.5 度おきに固定して胴体の横方向からインパルスハンマで加振して, 圧電式加速度センサから入力した振動を FFT アナライザで伝達関数に変換して得た一次の固有振動数と加速度ゲインを示している。こ

Fig. 13 Measured acceleration

Fig. 14 Measured impulse response

こで, 破線と実線は不釣り合い補正の有無に対応する。弾性変形がないと仮定すると四脚が同時に接地し瞬時に入れ替わるが, 実際には三脚から四脚が接地する区間が発生する。これは図 10 において測定点が表示されていない区間として現れている。このように, 不釣り合い補正を行うことによって接地区間は短くなり, 不釣り合い補正の効果が確認されている。

一方, 一次の固有振動数は回転角によって変化している。不釣り合い補正がない場合には 1.85~3.8 Hz, 不釣り合い補正を行った場合には 1.55~3.25 Hz の間で変化している。支持脚の組合せによって周波数変動の大きさが異なっているが, これはロボット内部の重量配分が異なるためと考えられる。ところが, 接地する間に周波数の曲線に三つのピークが現れる傾向は一致している。このような動特性変化の要因としてリンク

Table 3 Parameters of dynamic damper

Case	M (kg)	Ω (Hz)	ω (Hz)	c_d (Ns/m)	μ
1	4.87	2.35	2.282	0.435	0.0300
2	4.97	1.95	1.895	0.356	0.0292
3	6.16	2.50	2.443	0.413	0.0235

Table 4 Integration of squared acceleration

		θ rad/s	without balance control	with balance control
without dynamic damper		1.4	12.65	17.33
		2.8	68.32	88.27
dynamic damper	case 1 (2.35Hz)	1.4	9.940	11.97
		2.8	40.22	51.31
	case 2 (1.95Hz)	1.4	7.590	12.87
		2.8	67.63	57.68
	case 3 (2.5Hz)	1.4	12.87	16.38
		2.8	54.96	68.9

Fig. 15 Test apparatus

Fig. 16 Measured acceleration in walking

機構の剛性が角度によって変化するためと考えられ、このモデル化は今後検討する必要がある。

3・4 動吸振器の設計 このように動特性が変動する場合に動吸振器をどのように設計するかが問題となってくる。ここでは以下の条件を設定して設計を行っている。条件1：接地する直前で振動が大きい周波数(2.35 Hz, 回転角 27.5°), 条件2：剛性が小さい低い周波数(1.95 Hz, 回転角 15.0°), 条件3：不釣り合い補正をした場合に接地する直前で振動が大きい周波数(2.5 Hz, 回転角 32.5°)。

表3に各条件における動吸振器の設計値を示す。ここで、質量 M は質量感応法⁽¹⁵⁾によって求めた。動吸振器質量 m_a は0.145 kgである。本条件で動吸振器を設計した場合の数値解析による周波数応答を図11に、インパルス応答を図12に示す。この解析において歩行ロボット脚構造の減衰率を0.03と仮定している。

次に動吸振器を歩行ロボットに設置して制振効果を調べている。図13, 14にインパルス加振による伝達関数と時間応答を示す。ここで、動吸振器の調整はクランク軸の回転角を条件に設定して、振子の長さで固有振動数を調整した後、磁石の間隔を調整して最適な減衰を与えている。図13から条件1から3ではそれぞれ13 dB, 8 dB, 12 dB 低減されている。図14の各時間応答から動吸振器によって良好に振動が押さえられていることがわかる。また、これらの結果は図11, 12の数値解析結果とよく対応付けることができる。

4. 歩 行 実 験

本研究で用いた四足歩行ロボットの外観を図15に示す。ここで、歩行軌跡を写真によって記録するために、足部に3個、胴体と脚取付部にそれぞれ1個のLEDを取付けている。動吸振器と不釣り合い補正による歩行の安定性を評価するために、次の条件で振動の測定を行っている。(1) クランク軸の角速度を1.4 rad/sと2.8 rad/sに設定して静止した状態から2歩歩行させる。(2) 不釣り合い補正の有無、動吸振器の有無に分けて測定する。(3) ロボットは合板上を歩行する。

図16に振動測定の結果を示す。この図において、上から動吸振器なし、動吸振器の条件1から3を取付けた場合を示し、左側と右側それぞれは不釣り合い補正がない場合とある場合を示している。表4には各データについて二乗積分を計算した結果を示す。角加速度によってサンプリング周期が異なるので同じ角速度に対して比較する。この結果から次のようなことが言える。(1) 不釣り合い補正の制御を行った場合より制御しないほうが誤差積分は小さい。ただし、条件2の2.8 rad/sの場合を除く。これは、質量移動による慣性力が加振力となっているためと考えられる。(2) 動吸振器を設置した場合には設置しない場合に比較して良好な制振効果が得られる。(3) 動吸振器の制振効果のよい順に条件1, 条件2, 条件3となる。

角速度2.8 rad/sにおいて、動吸振器なしと動吸振器条件1の場合の歩行状態を調べるために、足先と胴

Fig. 17 Trajectory of legs and body while walking

体の軌跡を撮影して図 17 に示す。この図から動吸振器が設置されている場合には、着地直前の足先の軌跡は滑らかな軌跡を描いているために、動吸振器がない場合より安定した歩行が実現できている。しかし、不釣り合い補正制御を行った場合には軌跡に角が残り、振動が残っていることがこの結果からも言える。

5. お わ り に

YT メカニズムを用いた自立形歩行ロボットの歩行を安定化するために、歩行中に発生する振動に注目し、これを低減する手法を提案して次の知見を得た。

(1) トロット歩容で歩行する場合、支持脚の柔軟性と不釣り合いによって振動を引き起こす。この振動特性は YT メカニズムのクランクの回転角の変化によって変化することを、実験によって明らかにした。

(2) 一般的に制御対象の動特性が変化する場合に動吸振器の制振性能は劣化するが、脚が接地する直前で制振できれば歩行がより安定化される。

(3) 不釣り合い補正によってモーメントの発生は低減されるが、歩行速度が増すにつれて移動する質量の慣性モーメントの影響が発生し、かえって加振するような状況になり制御方法に工夫が必要である。

(4) 本歩行ロボットの安定歩行のためには、モーメントの発生を最小にするためにロボット自身を軽量化すること、発生した振動は制振装置によって抑える

こと、加振源となる要因をなくすことが必要である。

(5) 歩行ロボットがより高速化する場合には内部力に加えて脚の接地時に大きな外力を受けることになり、これによって発生する振動の対策が重要になってくる。本研究ではそのための一つの指針を示した。

文 献

- (1) Furusho, J. and Masubuchi, M., *Trans. of the ASME*, **108** (1986), 111-118.
- (2) 下山勲, 機論, **48-433**, C (1982), 1445-1455.
- (3) McGhee, R. B. and Iswandhi, G. I., *IEEE, SMC-9-4* (1979), 176-182.
- (4) 滝田好宏・背戸一登, 機論, **52-484**, C (1986), 3249-3255.
- (5) 滝田好宏・背戸一登・長松昭男, 機論, **54-499**, C (1988), 638-645.
- (6) Takita, Y. and Seto, K., *International Conf. on Advanced Mechatronics*, (1989), 677-681.
- (7) 広瀬茂男・梅谷陽二, 計測自動制御学会論文集, **16-5** (1980), 747-753.
- (8) 船橋宏明・渡辺克巳・小川繁, 機論, **45-390**, C (1979), 248-1954.
- (9) 船橋宏明・小川繁・ほか2名, 機論, **50-455**, C (1984), 1285-1297.
- (10) 岩附信行・船橋宏明, 機論, **52-484**, C (1986), 3339-3345.
- (11) 賀勢晋, 機誌, **78-676** (1975), 228-233.
- (12) 阿部稔・金子真・西沢昭一郎, 計測自動制御学会論文集, **21-6** (1985), 624-631.
- (13) 滝田好宏, 機論, **62-593**, C (1996), 掲載予定.
- (14) 背戸一登・岩浪孝一・滝田好宏, 機論, **50-457**, C (1984), 1762-1769.
- (15) 背戸一登・大熊政明・山下繁生・長松昭男, 機論, **53-485**, C (1987), 52-58.