

## 剛体振り子を用いた準受動歩行ロボットの開発

### A Powered Passive Walking Robot by using a pair of Pendulums

○ 石井信行\*, 情野瑛\*, 熊谷光\*, 水戸部和久\*

○ Nobuyuki Ishii\*, Akira Seino\*, Hikaru Kumagai\*, Kazuhisa Mitobe\*

\*山形大学

\*Yamagata University

**キーワード:** 準受動歩行(Powered passive walking), 二足歩行ロボット(Biped robot), 周期運動(Periodic motion), 振り子(Pendulum)

**連絡先:** 〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16 山形大学 大学院理工学研究科 水戸部研究室  
水戸部和久, Tel.:(0238)26-3230, Fax.:(0238)26-3205, E-mail: mitobe@yz.yamagata-u.ac.jp

## 1. 緒言

受動歩行はアクチュエータやコントローラを用いずに、歩容を受動歩行機のダイナミクスと環境との相互作用から生成する<sup>1)</sup>。この歩行の特徴としては柔軟な歩行が可能であること、重力場から得られる力を利用するためエネルギー効率が高いことが挙げられる。しかし、安定性の問題、平地での歩行ができない等の課題が存在する。

受動歩行の利点を活かしながら、アクチュエータやコントローラを取り付けることで平地での歩行を可能としたものとして準受動歩行ロボットが存在する。準受動歩行ロボットの駆動方法としては、左右に振れる倒立振り子のような上半身をアクチュエータにより駆動することで歩行する上半身駆動型準受動歩行ロボットの研究<sup>2)</sup>や、空気圧アクチュエータを用いた拮抗メカニズムと非線形振動子ネットワークによる運動制御系を持つ2脚歩行ロボットの研究<sup>3)</sup>がある。

本研究で開発した剛体振り子を用いた準受動歩行ロボットは、アクチュエータとしてサーボモ

ータを用いて剛体振り子を加振することで、ロボットの重心が振動に合わせて周期的に変化し、遊脚相が生成されるため歩行が可能となっている。しかし、人間の歩行と比較すると歩幅、歩行速度が小さく、安定性が低いため更なる研究が必要であると考えられる。

本稿ではサーボモータの周期と剛体振り子の錘の質量（以下では「加振周期」, 「錘質量」と呼ぶ）を変化させ、各条件の歩行を比較することで歩行速度と脚の振れ角の増大、安定性の向上の見込める条件を調査する。

## 2. 剛体振り子を用いた準受動歩行ロボット

### 2.1 ロボットの構成

本研究では Fig.1 に示す剛体振り子を用いて歩行する2足歩行ロボットを扱う。ロボットは Fig.2 に示すように中央にあるサーボモータ1つを動力とし、左右に取り付けた剛体振り子、2本の脚、内側と外側で高さの違う足裏を持つ。ロボットは

幅 800mm, 高さ 1100mm, 剛体振り子の錘部分を除いた質量 4.40kg である。剛体振り子は長さ 810mm, 錘は最大 0.60kg まで取り付けることができ, ワイヤにより繋がるロボット中央のサーボモータにより加振される。

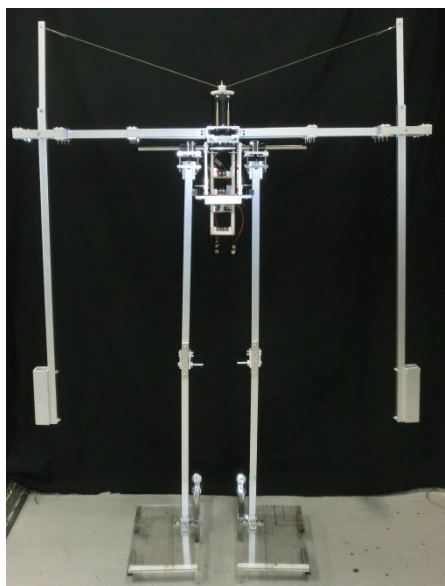


Fig.1 Powered Passive Walking Robot

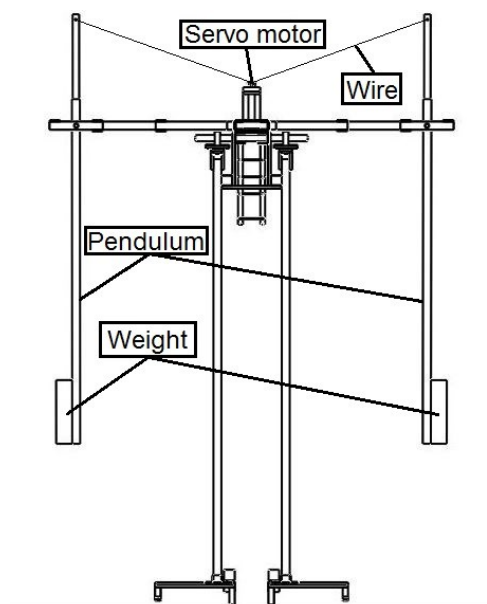


Fig.2 Mechanism of the pendulum system

## 2.2 遊脚相の生成と振り出し

開発したロボットは, 剛体振り子の振動に合わせて重心が左右に移動し, 足裏周りのモーメントが変化することでロボット全体が傾き, 遊脚相が

生成される。

足には Fig.3 に示すように錘が取り付けられており, この錘により脚の重心が脚の軸より後方に存在しているため, 重力により遊脚が振り子のように前へ振れる。この現象を利用し, 遊脚相において脚の振り出しを行う。



Fig.3 Weight position of the foot

## 3. 歩行実験

### 3.1 歩行速度に関する実験

歩行速度の比較を行うため, 開発したロボットが 1.5m 歩行する場合の平均歩行速度を, 加振周期を 1.20~2.30s の間で 0.10s 毎, 錘質量を 0.30~0.60kg の間で 0.10kg 毎変更し, 各条件において 3 回計測を行い, 平均をとることで得た。また, 転倒回数として歩行が 3 回成功するまでに転倒した回数を記録した。各条件における平均歩行速度を Table 1 に, 平均歩行速度の比較を Fig.4 に, 転倒回数を Table 2 に示す。ただし, 錘質量 0.30kg において加振周期 1.20s, 2.20s, 2.30s では足踏み, 錘質量 0.60kg において加振周期 2.00~2.30s では必ず転倒したため無記入としている。

Fig.4 より歩行速度の大きさは加振周期と錘質量を変更すると変化すること, 錘質量を一定として加振周期を変更すると平均歩行速度の大きい加振周期が 2 か所存在すること, 平均歩行速度の大きい加振周期は錘質量が大きくなると遅くなることが確認できる。また, Table 2 より加振周期を 1.70s 前後にして歩行させると転倒しやすいことが確認できる。以上よりロボットの歩行は, 歩行速度が大きくなる 1 か所目の加振周期では転倒しやすい加振周期である 1.70s に近い場合, 2 か所目の加振周期を選択して錘質量を 0.50kg にした場合, 歩行速度が大きく, 安定した歩行ができるとわかる。

Table 1 Average of the walking speed

	Average of the walking speed [mm/s]			
	0.30[kg]	0.40[kg]	0.50[kg]	0.60[kg]
1.20[s]		26.75	28.07	26.29
1.30[s]	20.45	42.71	37.91	30.07
1.40[s]	29.34	49.94	40.95	31.43
1.50[s]	42.28	57.16	44.05	31.49
1.60[s]	55.47	65.53	56.65	40.52
1.70[s]	35.94	62.12	67.65	51.59
1.80[s]	43.16	51.65	47.92	56.85
1.90[s]	43.37	62.90	52.82	47.45
2.00[s]	31.42	63.89	38.16	
2.10[s]	21.38	61.54	71.93	
2.20[s]		42.41	48.62	
2.30[s]		26.45	32.24	

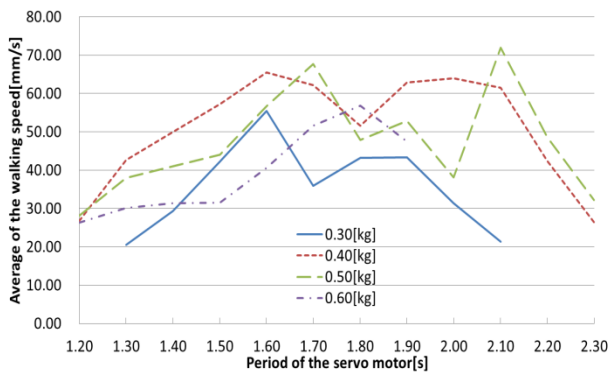


Fig.4 Average of the walking speed

Table 2 Occurrence count of falling down

	Occurrence count of falling down		
	0.40[kg]	0.50[kg]	0.60[kg]
1.60[s]	3	0	1
1.70[s]	5	8	6
1.80[s]	0	1	0

### 3.2 脚の振れ角に関する実験

歩行時の脚の振れを比較するため、脚の振れ角とロボットのロール角を加振周期と錘質量を 3.1 と同じ条件として計測する。加振周期 1.70s, 錘質量 0.50kg である歩行の脚の振れ角を Fig.5, ロール角を Fig.6 に, 加振周期 2.10s, 錘質量 0.50kg である歩行の脚の振れ角を Fig.7, ロール角を

Fig.8 に, 加振周期 1.20s, 錘質量 0.30kg である歩行の脚の振れ角を Fig.9, ロール角を Fig.10 に, 加振周期 1.80s, 錘質量 0.60kg である歩行の脚の振れ角を Fig.11, ロール角を Fig.12 に示す。

Fig.5 では脚の振れ角が 1 つ前の脚の振れ角より 6deg 大きくなる脚の振れが存在すること, Fig.7 では脚の振れ角がほぼ一定であること, Fig.9 では脚の振れが小さいことが確認できる。また, Fig.9 と Fig.10 を比較するとロール角の絶対値が 2deg 以下であると脚が振れにくいこと, Fig.11 と Fig.12 を比較するとロール角の絶対値が大きくなると脚の振れが大きくなり, ロール角の絶対値が小さくなると脚の振れが小さくなる傾向があることを確認できる。

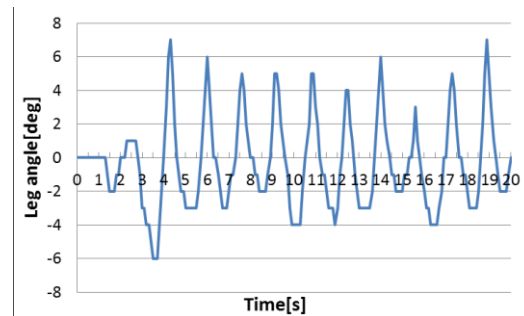


Fig.5 Leg angle (Period:1.70s, Weight:0.50kg)

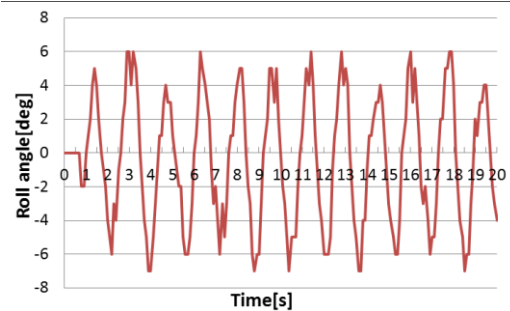


Fig.6 Roll angle (Period:1.70s, Weight:0.50kg)

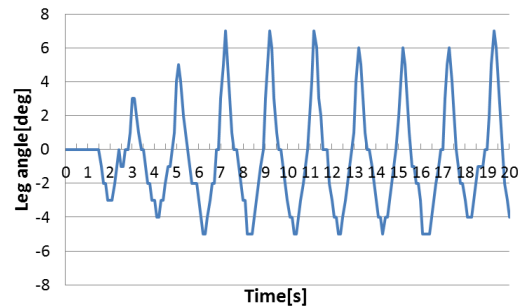


Fig.7 Leg angle (Period:2.10s, Weight:0.50kg)

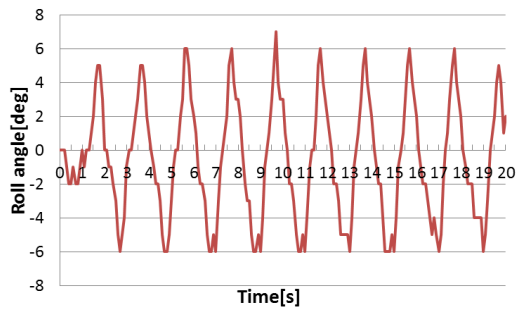


Fig.8 Roll angle (Period:2.10s, Weight:0.50kg)

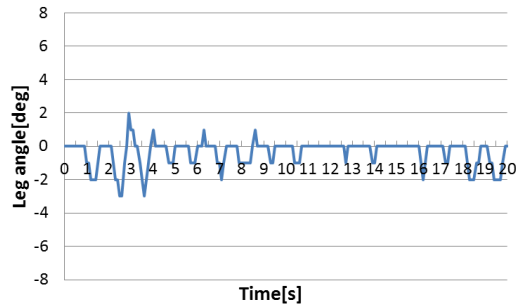


Fig.9 Leg angle (Period:1.20s, Weight:0.30kg)

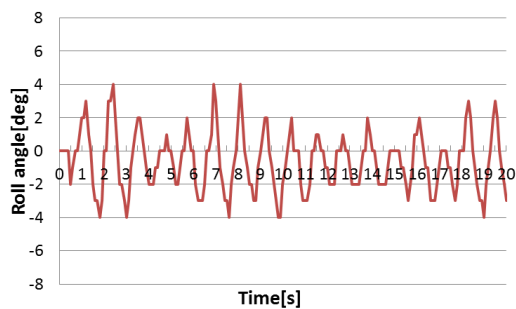


Fig.10 Roll angle (Period:1.20s, Weight:0.30kg)

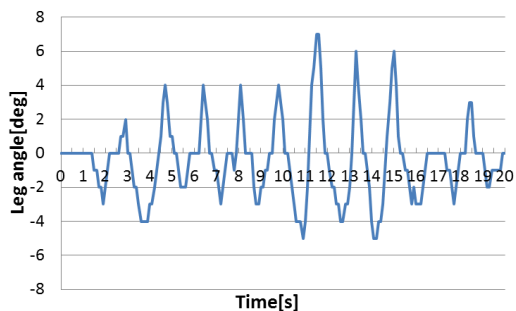


Fig.11 Leg angle (Period:1.80s, Weight:0.60kg)

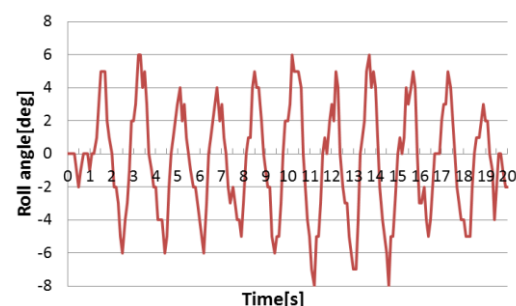


Fig.12 Roll angle (Period:1.80s, Weight:0.60kg)

## 4. 考察

開発したロボットは、Table 2 より加振周期 1.70s, 錘質量 0.50kg で最も転倒しやすいことがわかる。Fig.5 はこの場合の脚の振れ角を示し、脚の振れ角が1つ前の脚の振れ角より急に大きくなると転倒しやすい傾向があると考えられる。また、Table 1 より加振周期 2.10s, 錘質量 0.50kg で最も平均歩行速度が大きくなることがわかる。この場合の脚の振れ角は Fig.7, ロール角は Fig.8 に示され、他の条件のグラフと比較して角度が大きく、常に一定の大きさとなっていることが確認できるため、この条件で歩行速度と脚の振れ角が大きく、安定した歩行ができると考えられる。他に、Fig.9~Fig.12 より歩行を継続して行うためにはロール角の絶対値が 3deg 以上必要であると考えられる。

今後の課題として、まず脚の振れ角が大きくなり過ぎると転倒するため、センサから取得した角度をフィードバックする制御手法の導入、次に脚の振れ角をさらに増大するため、脚の重心位置が脚の振れ角に与える影響の調査、最後に、ロボットや剛体振り子の周期と加振周期の関係を解析し、定式化することが挙げられる。

## 5. 結言

本研究では剛体振り子を用いた準受動歩行ロボットを開発し、加振周期と錘質量が歩行速度、脚の振れ角、安定性に与える影響を確認した。

## 参考文献

- 1) T. McGeer: Passive Dynamic Walking, The Int. J. of Robotics Research, Vol9, No.2, 62/82 (1990)
- 2) 山田拓未, 寶田恵太郎, 秋元俊成, 松元明弘: 上半身駆動型準受動歩行ロボットの動歩行のモデリング, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会(IIP2008)講演論文集, 95/96 (2008)
- 3) 井之浦隆志, 辻田勝吉, 増田達也: 空気アクチュエータを用いた二脚ロボットの準受動歩行, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 1P1-F11(1)/1P1-F11(4) (2007)