

弾性腱を用いた柔軟脚ロボットに関する研究

A study on the flexible leg robot with elastic tendons.

○三津谷佳威*, 宮城慶徳*, 水戸部和久*

○Kai Mitsuya*, Keitoku Miyagi*, Kazuhisa Mitobe*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード:

歩行ロボット(Walking robot)

脚機構(Leg mechanism)

運動検出 (Motion detection)

柔軟腱(Elastic tendon)

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機械システム工学専攻 6-501 水戸部研究室

水戸部和久, [Tel:\(0238\)26-3230](mailto:mitobe@yz.yamagata-u.ac.jp), [Fax:\(0238\)26-3205](mailto:mitobe@yz.yamagata-u.ac.jp), [E-mail:mitobe@yz.yamagata-u.ac.jp](mailto:mitobe@yz.yamagata-u.ac.jp)

1. 緒言

歩行ロボットの制御は動的バランスを保つ運動計画問題として扱われることが多く、制御の実行においては計画された運動を忠実に再現するための軌道追従制御系として実装されている。

一方で、この方法では制御の実行段階では計画された軌道を忠実に再現することが要求され、ヒトや動物のように追従精度では説明が付きにくい運動制御との相違がある。

本研究は生体模倣の観点から、筋や腱により駆動または受動する方式の機能実現を目的として、弾性腱を用いた簡素な模型により運動を観察する。想定する機能は、動的バランスの制御、地面との衝突衝撃の吸収、地面と胴体間の相互作用力のインタフェースである。筋や腱による駆動は運動自由度に対して冗長であり、アクティブな筋を切り換えて使うことが出来る。また、ヒトの歩行では完全な受動に近い状態も多用される。多くの

筋や腱を実装し切り替えるハードウェアを生物のように軽量コンパクトに実現することは難しいので、筋や腱のアクチュエータの取り付け位置は切り替えが可能なことを仮定して、実際には手作業により弾性腱の取り付け位置を替える。

関節構造を簡素にすれば軽量化や受動状態の実現が容易になる。そのため、変位センサとしては胴体に取り付けたマーカーをカメラで観察することにする。変位センサの取り付け位置を胴体の多様な箇所に取り付けることは、目的の運動を関節角度を経由せずに直接検出するのに便利である。

本発表では、マーカーを用いた運動検出システムの開発、簡単な脚および足モデルによる衝突衝撃の吸収テストについて報告する。

2. 画像処理による運動解析

2.1 マーカーの座標取得

本研究ではロボットにカラーマーカーを取り付け、外界センサとしてカメラ(Casio社 EXILIM EX-ZR200)を使用した簡易的なモーションキャプチャを導入する。カメラ画像よりマーカーの画像平面での中心座標を取得する。録画設定は 512×384 の 240fps で行う。

特定の色のみ選択しその中心座標を取得するため、OpenCV (Willow Garage 社, Open Source Computer Vision Library)を使用する。取得した画像より OpenCV による画像処理を行い、HSV 表色系よりマーカーを検出し、その中心座標を取得する。マーカーの大きさは 30mm×30mm であり、材質は光の反射が少ないフェルトとした。画素とマーカー座標を対応させるために、基準位置に校正のためのマーカーを設置した。

2.2 座標取得の精度

運動検出の精度および静止時のブレを確認するために、予備実験を行った。

マーカーには黄色、橙色、青色を用い、黄色、橙色マーカーの座標をそれぞれ (x_Y, y_Y) , (x_O, y_O) , 求める距離 l を(1)により算出する。

$$l = \sqrt{(x_Y - x_O)^2 + (y_Y - y_O)^2} \quad (1)$$

測定に使用したマーカーを Fig3 に示す。黄色と橙色のマーカーを 0.1m の間隔で設置し、これを基準として青マーカーの位置を検出した。動画における横ピクセル P_x , 縦ピクセル P_y , 青マーカーの画素上の座標を (X_B, Y_B) , (1)式よりフレームごとに算出した距離 l の平均を \bar{l} とする。求める座標 (X, Y) を(2)に算出式を示す。

$$\begin{cases} X = \frac{0.1}{\bar{l}} X_B \\ Y = \frac{0.1}{\bar{l}} Y_B \end{cases} \quad (2)$$

Fig.1 はカメラからの距離 0.7m, カメラ倍率 1.00 倍における静止画である。Fig.2 に取得した座標の変動を示す。

同様にカメラ倍率 5.42 倍における静止画と青マーカーの取得座標を Fig.3, Fig.4 に示す。

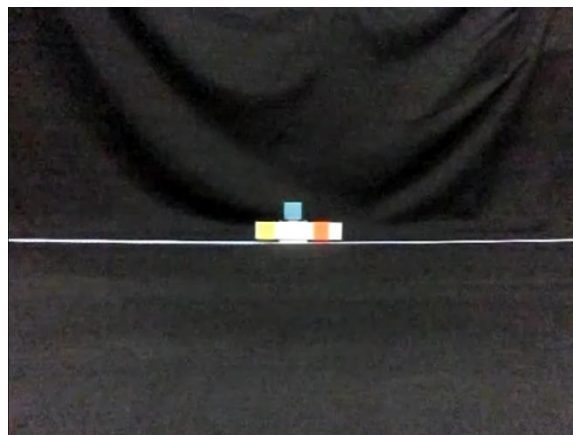


Fig.1 Marker image from 0.7m distance

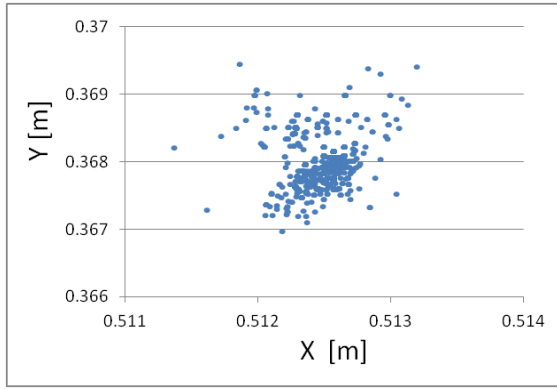


Fig.2 Fluctuation of the detected marker position(from 0.7m distance image)

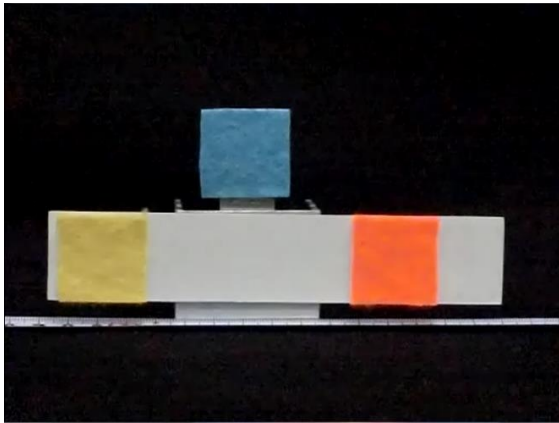


Fig.3 Telephotographic image of the markers

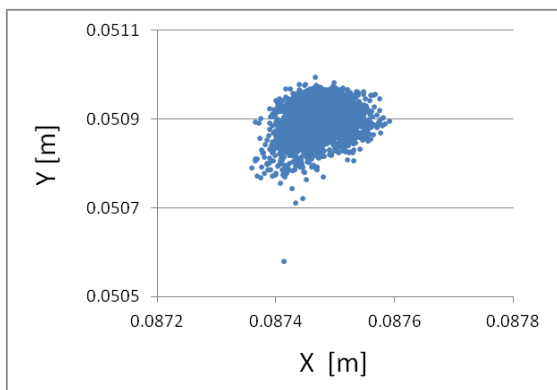


Fig.4 Fluctuation of the detected marker position(from telephotographic image)

2.3 レンズの収差による歪み

レンズの収差による誤差は画像内のマーカー位置により変動する. これを調べるために, 画像内の異なる場所での測定精度を調べた.

画面のいくつかの位置に 0.1m 間隔で取り付けた黄色, 橙色マーカーを X 軸方向, Y 軸方向の向きで置き, X, Y 軸方向に 0.1m ずつ移動させてマーカーの間隔の変化を計測した. その様子を Fig.5 に示す. また, マーカーの配置を Fig.6 に示す. x 軸方向に移動させたマーカーの(1)式によって算出したマーカー間距離 l 平均 \bar{l} と配置した x 座標の関係を Fig.7 に示す. \bar{l} と配置した y 座標の関係を Fig.8 に示す.

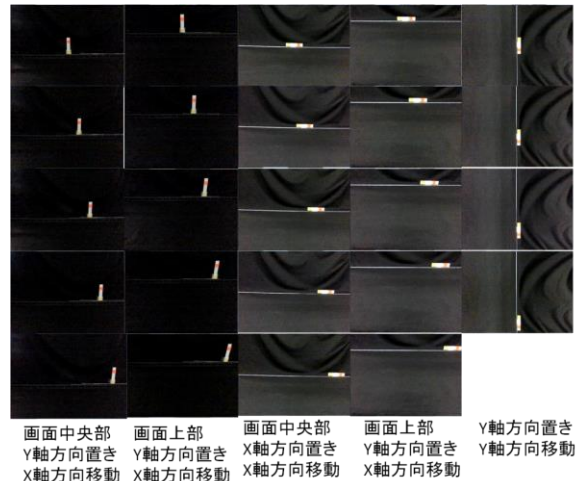


Fig.5 Marker location for testing the effect of lens aberration

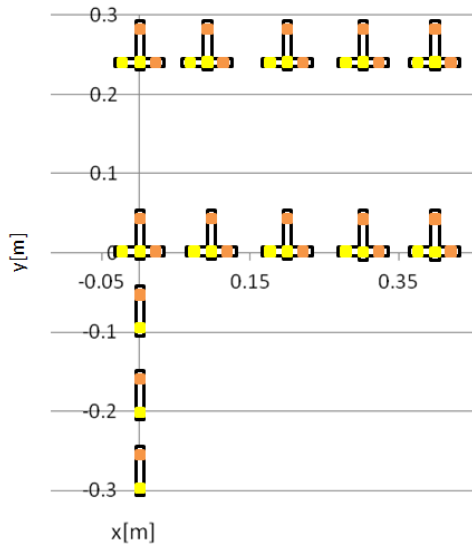


Fig.6 Location of each marker

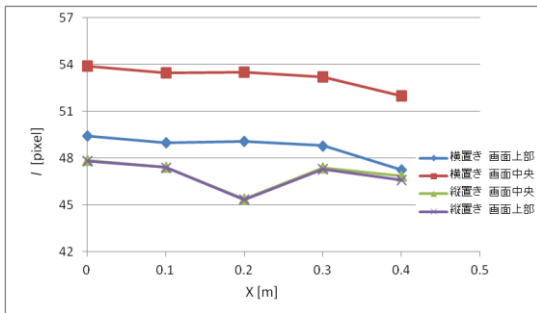


Fig.7 Detected marker distance and horizontal marker position

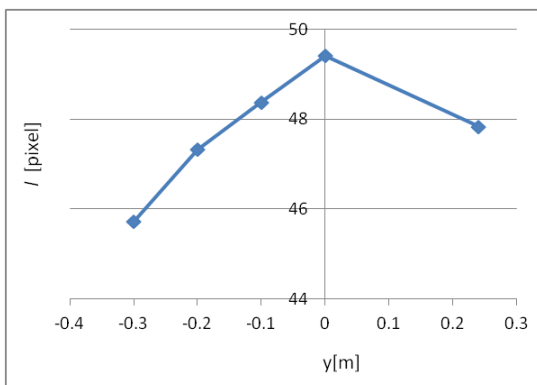


Fig.8 Detected marker distance and vertical marker position

2.4 衝突の観測

歩行ロボットの速度の変化の激しい接地時の座標を画像処理を用いて観測し、速度を算出する。マーカーを付けた台車をレールに沿って落とす。台車は接地時に柔軟腱を持つ脚と似た動きを出すためにゴムで弾性力が働く構造を持つ。

フレームごとの y 座標の差分 Δy より速度 $v[\text{pixel}/\text{s}]$ を近似した。

Fig.9 に台車を, Fig.10 に落下させた台車の様子を示す。0.5[m], 1.3[m] から落下させた時の座標と速度をそれぞれ Fig.11, Fig.12, Fig.13, Fig.14 に示す。

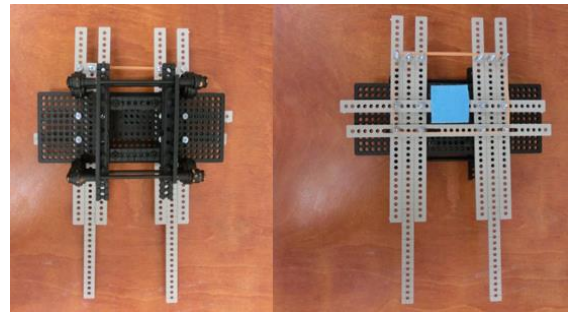


Fig.9 Mechanism of the landing experiment

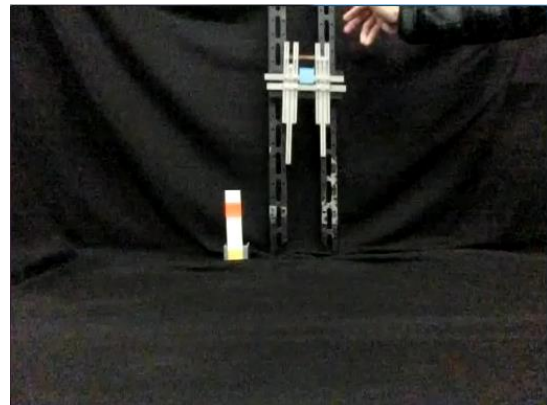


Fig.10 Experimental setup for the collision test

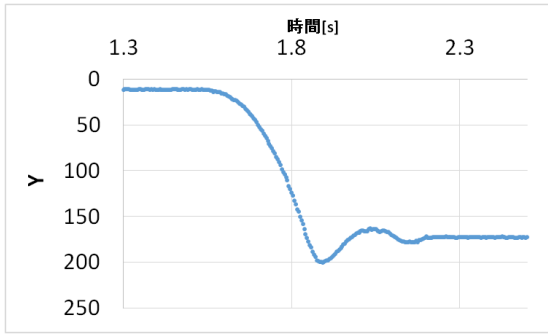


Fig.11 Measured position of the mechanism dropped from 0.5m height

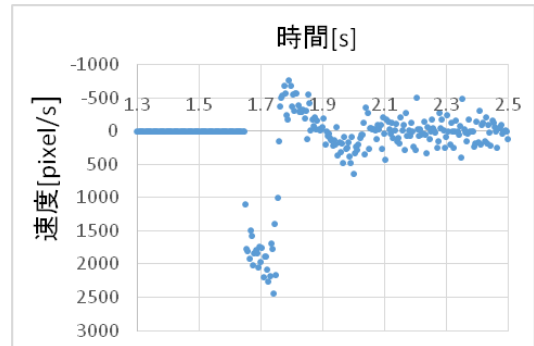


Fig.14 Measured velocity of the mechanism dropped from 1.3m height

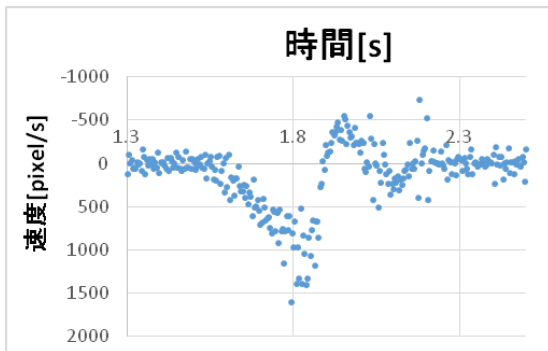


Fig.12 Measured velocity of the mechanism dropped from 0.5m height

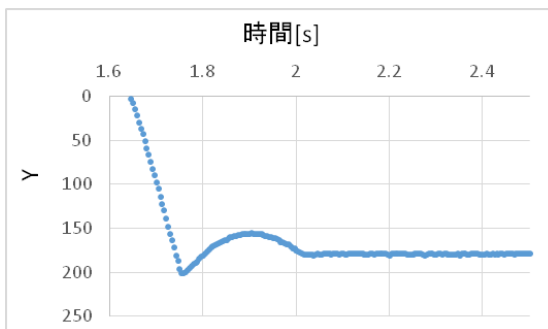


Fig.13 Measured position of the mechanism dropped from 1.3m height

3. 足裏アーチ構造を持つ脚の衝撃吸収

カメラとマーカーを用いて、足裏のアーチ構造による衝撃吸収を調査した。足部の簡単なモデルを示し、実験結果と比較する。足アーチ構造をもつ足部を Fig.15 に示す。3つのリンクをゴム紐で繋ぎ、負荷が加わるとつぶれて広がる構造となっている。ゴム紐の取り付け位置変更できるようにリンクには 5mm 間隔で穴が開いている。

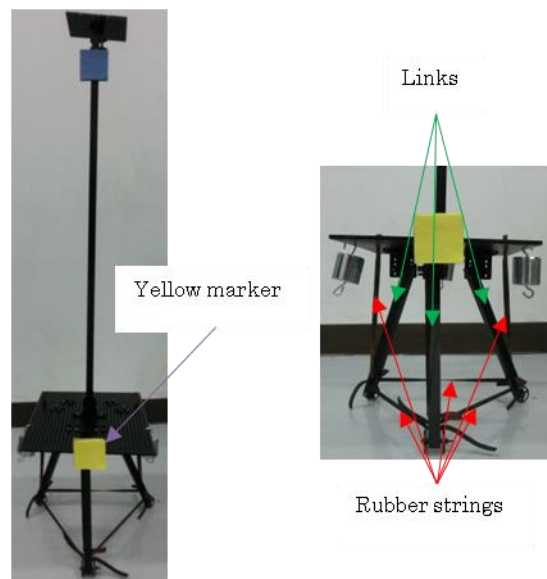


Fig.15 Foot mechanism with an arch structure

3.1 足部モデルの運動方程式

今回作製した足部を 2 次元に単純化したモデルを Fig.16 に示す. 中央のリンクの質量を m , 慣性モーメントを I とし, その他のリンクの質量, 慣性モーメントは無視する.

足部の運動は座標 $\mathbf{q} = (x, y, \varphi, \theta_1, \theta_2)^T$ により表現でき, このときの運動方程式は

$$\mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \frac{\partial U}{\partial \mathbf{q}} = 0 \quad (3)$$

となる. \mathbf{H} は慣性行列, $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ は非線形項を表す. U はポテンシャルエネルギーである. 足部は拘束を受けるとき, その自由度は低下するため足先が地面に着いている拘束条件

$$\mathbf{c} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = 0 \quad (4)$$

のもとで運動方程式を低次元化できる. 低次元化した座標として $\mathbf{p} = (x, y, \varphi)^T$ を選ぶと運動方程式は

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{h}'(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}) - \mathbf{F}^T \frac{\partial U}{\partial \mathbf{q}} = 0 \quad (5)$$

となる. $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{p}}$ は慣性力, $\mathbf{h}'(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}})$ は非線形項を表す. \mathbf{F} については 3.2. で説明する.

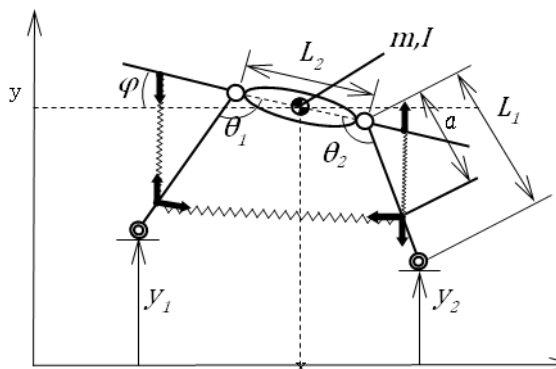


Fig.16 Model of the foot mechanism

3.2. 地面反力および ZMP

地面に着いたときの 2 次元に単純化したモデルを Fig.17 に示す. 地面に着いた状態での床反力は,

$$\begin{pmatrix} R_r \\ R_l \end{pmatrix} = \mathbf{E}^T \left(\frac{\partial U}{\partial \mathbf{q}} - \mathbf{H}\mathbf{F}\ddot{\mathbf{p}} - \mathbf{H}\boldsymbol{\alpha} \right) \quad (6)$$

と表される. ここで, $\boldsymbol{\alpha} = -(\mathbf{E}\dot{\mathbf{C}} + \mathbf{F}\dot{\mathbf{D}})\mathbf{F}\dot{\mathbf{p}}$,

$\mathbf{C} = \frac{\partial \mathbf{c}}{\partial \mathbf{q}}, \mathbf{D} = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{q}}, [\mathbf{E} \ \mathbf{F}] = [\mathbf{C} \ \mathbf{D}]^{-1}$ である.

(5) 式のモデルを平衡点まわりで線形近似したときの特性根位置を Fig.18 に示す.

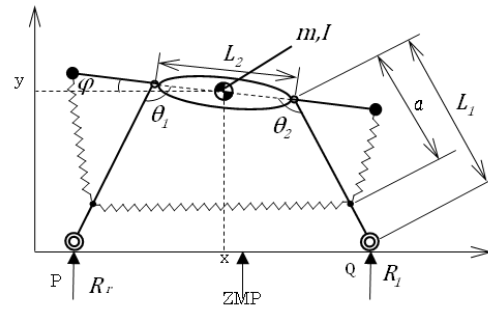


Fig.17 Model of the foot mechanism under ground contact

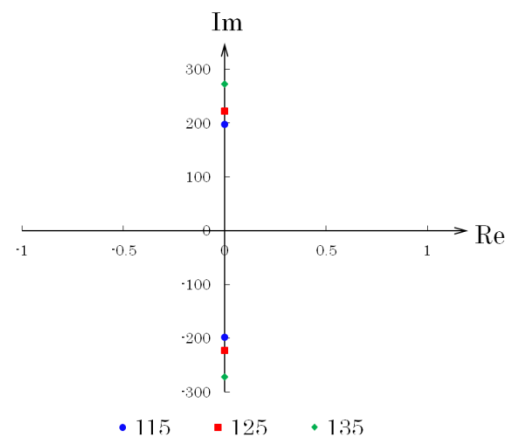


Fig.18 Characteristic roots for different tendon attachment positions

3.2. 落下実験

運動モデルにもとづき衝撃吸収の効果調べるため作製した足部を一定の高さから落下させる。ゴム紐の長さ、錘の質量を一定とし、一定の高さからマーカを2カ所に取り付けた足部を落下させる。その様子をカメラで撮影し、その映像より画像を抽出しマーカそれぞれの座標を得る。落下は Fig.16 で示す a を 115mm, 125mm, 135mm の3カ所に変えた場合と3つのリンクを固定した場合それぞれで行い比較する。

3.3. 結果

黄色のマーカの y 座標の変化を Fig.19 に示す。運動モデルには減衰特性を含まないので線形モデルの特性根は虚軸上にあり、Fig.16 で示す a が小さくなるにつれて原点に近づく。実験結果との整合性を今後検討する。

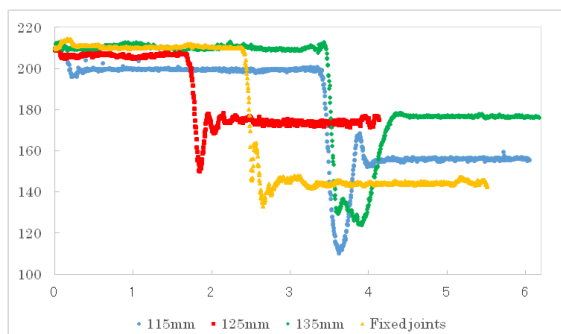


Fig.19 Vertical motion of yellow marker

4. 結言

静止したマーカの OpenCV による座標取得よりカメラと 30mm×30mm から一マーカとの距離が 0.7m 時のブレの

大きさを測定した。ズーム時の取得データのブレが小さいことが確認できた。使用したカメラの収差を評価し、足裏アーチ構造を持つ脚の落下実験には影響しないと判断した。台車の落下実験より 0.5m 程度の高さからの自由落下であれば座標の取得が可能であり、速度の算出ができた。ただし、算出した速度はばらつきが大きくなることがわかった。

衝撃吸収の効果に注目し足部の落下実験を行った。比較した中でゴム紐の取り付け位置による振動周期の変化は a が 115mm, 125mm の時には確認できたが、135mm のときでは確認できなかった。

5. 参考文献

- [1] 小川祐介, ベンチャー・ジェンチャン: “ヒトのアーチ構造を模した二足歩行ロボットのための歩行動作解析”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2012
- [2] 細田耕, 荻原直道, 池本周平: “屍体足を用いた足部機構の機能解析”, システム/制御/情報 Vol.59, No.10, p387~393, 2015
- [3] 山崎大, 杉原知道: “衝撃吸収と支持剛性を両立する人型ロボットの足機構”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2013
- [4] 橋本健史: “足アーチ構造の機能”, 慶応医学会 Vol.81, No.1, p17~21, 2004
- [5] 彭志新, 辻尾昇三, 足立紀彦: “ポジショナー・マニピュレータシステムの協調性拘束運動制御”, 日本ロボット学会誌 Vol.13, No.6, p799~807, 1995
- [6] 奈良先端科学技術大学院大学 OpenCV プログラミングブック製作チーム: OpenCV プログラミングブック第2版, 株式会社 毎日コミュニケーションズ(2010)