McKibben型空気圧アクチュエータを有する二次元脚ロボットの 立位姿勢と関節剛性に関する解析および実機検証

中西大輔*・末岡裕一郎*
杉本靖博*・大須賀公一*,**

Numerical Analysis and Experimental Verification for Standing Posture and Joint Stiffness of
a 2-dimensional Legged Robot Driven by McKibben Pneumatic Actuator

Daisuke NAKANISHI*, Yuichiro SUEOKA*,
Yasuhiro SUGIMOTO* and Koichi OSUKA*,**

It has been widely known that robots driven by a McKibben pneumatic actuator (MPA) generates stable motions in spite of an unsophisticated control and a simple actuator model. After deriving a MPA model from the pressure and the elasticity, we examine the validity of it via numerical analyses and physical experiments. Then, we derive stability condition for the standing posture of the 2-dimensional-leg robot equipped with extensor and flexor MPAs. Moreover, we show the correlation of the standing posture and the joint stiffness with respect to the combinations of two MPA pressures, respectively. Finally, we also verify that the standing posture and the joint stiffness can be individually controlled by regulating the values of two MPA pressures.

Key Words: McKibben pneumatic actuator, stability analysis, musculoskeletal system, joint stiffness

1. 緒 言

ソフトアクチュエータとは、軽い、柔らかいといった定性的特性をもったアクチュエータの総称である。ソフトアクチュエータはその柔らかさゆえに、ほかのアクチュエータにはない受動的な特性をもつため、現在でも多くの機械やロボットに使用されている¹⁾。そのようなソフトアクチュエータのなかで、古くから使用されているものとして McKibben 型空気圧アクチュエータ (McKibben Pneumatic Actuator 以下 MPA) が挙げられる。人工筋肉ともよばれる MPA は、シリコンゴムチューブの周りをナイロン繊維のメッシュで覆った構造をしており、外部のコンプレッサにより圧縮された空気がゴムチューブ内の空気袋を膨張させ張力に変換するアクチュエータである。使用されている繊維は、柔らかいが非常に強い長さ方向の剛性をもっており、その繊維のメッシュにより MPA は可変的な剛性と物理的柔軟性、そしてアクチュエータの軽さを実現している。そのため MPA は、脚型ロボット

や腕型ロボットなどの生物を模倣したロボットの開発や、四肢のリハビリテーションなどに盛んに使用されている^{2),3)}。また MPA を使用したロボットは、比較的簡単な制御で安定な運動を生成可能であることが知られており^{4)~6)}、MPA やその機構のもつ特性が運動安定性に有利に働いているのではないかと考えられている。

そのため、特に MPA の特性について、準静的特性のモデル化や、実機実験によって静的、動的特性を考察するといった研究が盛んに行なわれている^{7)~11)}。しかしこれらのモデルは、MPA の特性を正確に再現できている一方で非常に複雑であり、実際にロボットのアクチュエータモデルとして用いた場合の解析が困難になるという問題があった。そのため従来の MPA を用いたロボットの設計や制御入力は、経験則や試行錯誤によるところが大きく、MPA や機構のどのような特性が、生成される運動の安定性に対してどのように働いているかという点については未だ十分に議論されていない。ロボットの運動安定性と、MPA や機構の特性との関係が解明されれば、MPA を有するロボットの設計や制御に定量的な指標が与えられ、より適切な設計やダイナミックな運動の生成が可能になるのではないかと期待される。

そこで本研究では、実際に MPA をロボットに適用した場合、またそれを制御しようとした場合に、MPA や機構がもつさまざまな特性が、生成される運動の安定性に対してどのように働いているのかを明らかにすることを目標とする。この

* 大阪大学大学院工学研究科

吹田市山田丘 2-1M4 棟 105 号室

** (独) 科学技術振興機構, CREST 川口市本町 4-1-8

* Graduate School of Engineering, Osaka Univ., 2-1 Yamadaoka, Suita

** CREST, JST, 4-1-8 Honcho, Kawaguchi

(Received May 25, 2015)

(Revised August 27, 2015)

目標に対して著者らはこれまでに、運動解析を意識した表現の MPA モデルの導出や、MPA の動的な特性に関する実機検証などを行ってきた^{12), 13)}。また、Fig. 1 に示す MPA を有する二次元脚モデルの立位姿勢に対する基本的な安定条件を導出し、それらの条件が MPA および脚機構の特性によって満たされることを示した¹⁴⁾。さらに、MPA 圧力の組合せおよび空気弁の状態によって関節剛性を調節することが可能であることを確認してきた¹⁵⁾。

本稿では、脚モデルの平衡姿勢と MPA 圧力の組合せの関係、および関節剛性と MPA 圧力の組合せの関係についてさらに具体的に解析を行なう。またその結果より、脚モデルの平衡姿勢と関節剛性を独立に制御可能であることを示す。またこれらの解析結果の妥当性を、実機実験にて検証する。

本稿の構成は以下のとおりである。2 章で、MPA 単体のモデルおよび動的特性について述べる。3 章で、解析に用いる脚モデルについて説明し、MPA を適用した場合の立位姿勢の安定条件を導出する。また、それらの条件が MPA および脚機構の特性によって満たされるかについて検証する。さらに、脚モデルの姿勢と MPA 圧力との関係、関節剛性と MPA 圧力との関係について述べ、姿勢と関節剛性を独立に制御可能であることを示す。4 章では、3 章の解析結果について実機実験による検証を行なう。最後に 5 章で結言を述べる。

2. MPA 単体の特性について

2.1 運動解析を意識した MPA モデル

現在までにいくつかの研究により、McKibben 型空気圧アクチュエータのモデル化が行われてきた^{7)~11)}。しかしこれらのモデルは非常に複雑であり、またロボットに適用することを目的とした表現ではないため、MPA の特性が運動の安定性にどのように寄与しているかの解析が困難となってしまう。そこで本研究では、MPA の準静的な力がアクチュエータ長さおよびアクチュエータ圧力により表わされるモデルを用いる。これにより、ロボットモデルに MPA モデルを適応した際に幾何的な解析が可能となり、議論の容易化を図ることができる。詳細については参考文献 12) を参照されたい。以下その概要について述べる。

まず、空気圧によって発生する張力について考える。空気圧によって発生する張力 f_{m1} は、MPA を完全なシリンダとしてモデル化することで、以下のような式で与えられる。

$$f_{m1}(P', L) = -P' \frac{dV_b}{dL} = \frac{P'}{4\pi n^2} (3L^2 - b^2) \quad (1)$$

ただしここで、 P' は MPA の内圧（ゲージ圧、以降 MPA 圧力）、 V_b は空気袋体積、 L は MPA の長さ、 n は巻数、 b は繊維長さである。また、実際に MPA をアクチュエータとして制御する場合、MPA に空気を送り込む弁の開閉により出力を制御することがある^{4)~6)}。弁を閉じているときは MPA 内の空気の質量が一定となるため、理想気体の状態方程式より P' は、

$$P' = m_{air} RT \frac{1}{V_b} - P_0 = m_{air} RT \frac{4\pi n^2}{b^2 L - L^3} - P_0 \quad (2)$$

と表わされる。ここで m_{air} は MPA 内空気の質量、 R は空気の気体定数、 T は気体の絶対温度、 P_0 は大気圧である。よって、弁を閉じているときに MPA が発揮する張力は、

$$f_{m1} = \frac{P'}{4\pi n^2} (3L^2 - b^2) = \left(\frac{m_{air} RT}{b^2 L - L^3} - \frac{P_0}{4\pi n^2} \right) (3L^2 - b^2) \quad (3)$$

となる。(3) 式は (1) 式に比べ多少煩雑とはなるが、ここで R , T , P_0 は定数、気体の質量 m_{air} も弁を閉じたときの MPA 内圧と空気袋体積で決まる定数である。よって弁を閉じているときの MPA が発生する張力は、MPA の長さ L のみの関数となる。

上記のモデルに、変形による弾性エネルギーに依存した項を導入する。そのために (1) 式をつぎのように拡張する。

$$f_{m2} = -P' \frac{dV_b}{dL} + V_r \frac{dW}{dL} \quad (4)$$

ここで V_r は MPA ゴム部分の体積、 W はひずみエネルギー密度である。MPA は内部が超弾性体であるシリコンゴムで構成されている。そこで超弾性体のモデルとして Mooney-Rivlin モデル¹⁶⁾を用いると、ひずみエネルギー密度 W は主ひずみ λ_i ($i = 1, 2, 3$) を用いてつぎのように表わされる。

$$W = C_1 (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} - 3 \right) \quad (5)$$

ここで C_1 , C_2 は弾性体の物性のみによって決まる定数である。この (5) 式を (4) 式へ代入すると、以下ようになる。ただし L_0 は MPA 初期長さ、 D_0 は MPA 初期直径である。

$$f_{m2} = -P' \frac{dV_b}{dL} + V_r \left\{ C_1 \left(\frac{2L}{L_0^2} - \frac{2L}{D_0^2 n^2 \pi^2} - \frac{2L_0^2 D_0^2 n^2 \pi^2 (b^2 - 2L^2)}{L^3 (b^2 - L^2)^2} \right) + C_2 \left(-\frac{2L_0^2}{L^3} + \frac{2D_0^2 n^2 \pi^2 L}{(b^2 - L^2)^2} + \frac{2Lb^2 - 4L^3}{L_0^2 D_0^2 n^2 \pi^2} \right) \right\} \quad (6)$$

ここで (6) 式の右辺第一項には、MPA 圧力 P' が一定の場合には (1) 式が、空気弁が閉じられている場合には (3) 式が適用される。

以上のようにして導出されたこの MPA モデルは、空気圧とゴム弾性によって発生する張力を MPA 長さ L と MPA 圧力 P' の二つを変数として表現している。これにより、ロボットモデルに MPA を適用した際に幾何的な解析が可能となり、議論の容易化を図ることができる。なお、(6) 式のモデルについては、一定負荷を加えた状態での MPA 収縮長さと MPA 圧力との関係、および弁を閉じた場合の負荷と MPA 収縮長さの関係について、数値解析の結果と実機による測定結果を比較することで、その妥当性を確認している¹²⁾。

2.2 MPA の動的特性

MPA のゴム要素がもつ減衰力 f_v が、MPA の収縮速度 V_{fm}

Fig. 2 Changes of G_e and G_f with respect to the hip position X

$$\begin{aligned}\dot{Z}(t) &= \dot{Y}(t) - \dot{\tilde{Y}}(t) = M(Y) - M(\tilde{Y}) \\ &= (M(\tilde{Y}) + M'(\tilde{Y})(Y - \tilde{Y}) - \dots) - M(\tilde{Y}) \\ &\simeq M'(\tilde{Y})Z(t)\end{aligned}\quad (17)$$

ここでヤコビアン $M'(\tilde{Y})$, および a_1 , a_2 は以下のとおりである.

$$M'(\tilde{Y}) = \left(\frac{\partial M_i}{\partial Y_k} \right)_{i,k=1,2} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_2 & a_1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$a_1 = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial V} \{ G_e(X) f_{me}(P'_e, L_e, V_{fme}) - G_f(X) f_{mf}(P'_f, L_f, V_{fmf}) \} \quad (19)$$

$$a_2 = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial X} \{ G_e(X) f_{me}(P'_e, L_e, V_{fme}) - G_f(X) f_{mf}(P'_f, L_f, V_{fmf}) \} \quad (20)$$

ここで, 平衡点周りでシステムが時不変であるとみなせば, この a_1 , a_2 が負であることが, 誤差システムが漸近安定であるための必要十分条件となる.

3.2 安定性指標 a_1 に関する考察

まず, 一つ目の条件である $a_1 < 0$ について考える. a_1 を書き換えると, 以下ようになる.

$$a_1 = \frac{1}{m} \left(G_e \frac{\partial V_{fme}}{\partial V} \frac{\partial f_{me}}{\partial V_{fme}} - G_f \frac{\partial V_{fmf}}{\partial V} \frac{\partial f_{mf}}{\partial V_{fmf}} \right) \quad (21)$$

ここで G_e , G_f は, モデルが物理的にとりうる姿勢の範囲で正である (Fig. 2(a)). また MPA 収縮方向と脚モデルの変位方向に注意すると, $\frac{\partial V_{fme}}{\partial V}$ は正, $\frac{\partial V_{fmf}}{\partial V}$ は負となる. さらに前章で述べたとおり, 先行研究において MPA の収縮速度依存特性が確認されている^{12), 13)} ことから, $\frac{\partial f_{me}}{\partial V_{fme}}$, $\frac{\partial f_{mf}}{\partial V_{fmf}}$ は負となる. 以上のことから, 今回のモデルにおいてとりうるすべての姿勢において $a_1 < 0$ が成立する.

なお, 上リンクに固定された片持ち梁状の膝蓋を有する脚モデル¹⁷⁾では, G_e が負となる領域が存在する (Fig. 2(b)). この領域においては, $a_1 < 0$ の条件は必ずしも成立しない. この固定膝モデルをもとに製作した実機を用いた実験においても, 立位姿勢の安定性が確認できない領域の存在が確認さ

Fig. 3 Parameters around the knee

Fig. 4 Changes of $\tilde{X}$, a_2 with respect to the combination of two MPA pressures (P'_e and P'_f)

Fig. 5 Changes of P'_f and a_2 with respect to P'_e for $\tilde{X}=800$ mm

れている¹⁷⁾. これらのことから, 二次元脚モデルの立位姿勢安定性に関しては MPA の特性だけではなく, 脚機構の構造自体も重要であるといえる.

3.3 安定性指標 a_2 に関する考察

3.3.1 内外 MPA 圧力と平衡姿勢の関係

まず, 内外 MPA の圧力と平衡姿勢の関係について考察を行なうために, モデルの腰高さ X とアクチュエータ長さ L_e , L_f との関係について考える. モデルの幾何学的関係より外側 MPA 長さ L_e は以下のように X の関数として表わされる. ここで α_3 はプーリに対するワイヤ接触部長さである (Fig. 3). また L_{e0} は外側 MPA 初期長さ (125 mm), α_{30} は初期姿勢 ($X = X_0$) における α_3 のそれである. ただし,

α_1, α_2 は Fig. 3 のとおりである.

$$L_e(X) = r(\alpha_3 - \alpha_{30}) + L_{e0} \quad (22)$$

$$\alpha_3(X) = 2\pi - (\alpha_1 + \alpha_2 + \beta) \quad (23)$$

$$\alpha_1 = \sin^{-1}(l_{Mo}/L_1) \quad (24)$$

$$\alpha_2 = \sin^{-1}(l_{Mu}/L_2) \quad (25)$$

また, 内側 MPA 長さ L_f も以下のように X の関数として表わされる. ここで L_{f0} は内側 MPA 初期長さ (125 mm), l_{Mf0} は初期姿勢における l_{Mf} のそれである.

$$L_f(X) = (l_{Mf} - l_{Mf0}) + L_{f0} \quad (26)$$

以上のことから, 内外 MPA 長さは X の関数であり, モデルの初期姿勢 X_0 , 平衡姿勢 $\tilde{X}$ を決定すれば, そのときの内外アクチュエータ長さが決定する. よって前章で説明した MPA モデルを適用すれば, (9)式よりその平衡姿勢を実現する内外 MPA 圧力 P'_f, P'_e の組を以下のように求めることができる.

$$P'_f = q_1 P'_e + q_2 \quad (27)$$

ただし q_1, q_2 は X によって決まる定数であり, 以下のように表わされる. ここで添字 e はその変数が外側 MPA に関するもの, f は内側に関するものであることを意味している.

$$q_1(X) = \frac{G_e \frac{dV_{be}}{dL_e}}{G_f \frac{dV_{bf}}{dL_f}} \quad (28)$$

$$q_2(X) = \frac{1}{G_f \frac{dV_{bf}}{dL_f}} \left\{ G_f V_{rf} \frac{dW_f}{dL_f} - G_e V_{re} \frac{dW_e}{dL_e} + mg \right\} \quad (29)$$

この式から, ある平衡姿勢を実現する圧力の組合せには自由度が存在することがわかる. 初期姿勢を $X_0 = 800$ mm とした場合に脚モデルがとりうる平衡姿勢 $\tilde{X}$ と, P'_e, P'_f との関係は三次元図にしたものを Fig. 4 (a) に示す.

3.3.2 内外 MPA 圧力と安定性指標 a_2 の関係

つぎに, 内外 MPA の圧力と a_2 の関係について考察を行なう. a_2 に関する (20)式を書き下すと, 以下ようになる.

$$a_2 = \frac{1}{m} \left\{ -P'_e \frac{\partial}{\partial X} \left(G_e \frac{dV_{be}}{dL_e} \right) + P'_f \frac{\partial}{\partial X} \left(G_f \frac{dV_{bf}}{dL_f} \right) + V_{re} \frac{\partial}{\partial X} \left(G_e \frac{dW_e}{dL_e} \right) - V_{rf} \frac{\partial}{\partial X} \left(G_f \frac{dW_f}{dL_f} \right) - G_e \frac{\partial L_e}{\partial X} \frac{\partial P'_e}{\partial L_e} \frac{dV_{be}}{dL_e} + G_f \frac{\partial L_f}{\partial X} \frac{\partial P'_f}{\partial L_f} \frac{dV_{bf}}{dL_f} \right\} \quad (30)$$

ここで, P'_e, P'_f 以外は X によって決定される変数である. また, MPA が定圧条件の場合は $\frac{\partial P'_e}{\partial L_e} = \frac{\partial P'_f}{\partial L_f} = 0$ となり, 閉弁条件の場合には (2)式が適用される. この式より, 平衡姿勢とそれを実現する圧力組 P'_f, P'_e , さらに MPA の条件 (一定圧力条件/閉弁による一定質量条件) を決定すれば, その姿勢, 条件における a_2 の値を求めることができる.

前項同様, 初期姿勢を $X_0 = 800$ mm とした場合の a_2 と P'_e, P'_f の関係を Fig. 4 (b) に示す. Fig. 4 (b) において, 上側の面が一定圧力条件における解析の結果, 下側の面が一定質量条件における解析の結果である. Fig. 4 (b) より, $X_0 = 800$ mm においてとりうるすべての平衡姿勢において安定条件 $a_2 < 0$ が満たされていることがわかる. また一定圧力条件の場合に比べて, 一定質量条件の場合のほうが全体的に a_2 の値が小さいが, これは (30)式中の $\frac{\partial P'_e}{\partial L_e}, \frac{\partial P'_f}{\partial L_f}$ の影響だと考えられる.

また, (27)式と (30)式を連立させることで, 任意の平衡姿勢 $\tilde{X}$ と a_2 の値を実現する圧力組 P'_e, P'_f を求めることができる. 例として Fig. 5 に, $\tilde{X}=800$ mm における P'_e, P'_f の関係および P'_e, a_2 の関係を示す. Fig. 5 (a) は $\tilde{X}=800$ mm を実現する P'_e と P'_f の関係を表わしている. また, Fig. 5 (b) において実線は一定圧力条件, 破線は一定質量条件における P'_e と a_2 の関係を表わしており, それぞれ図中 a_{2open}, a_{2close} のように記述することができる. ここで特筆すべきは, $m \cdot a_2$ を新しい変数 k とおくと, この k [N/m] の大きさは平衡姿勢における関節の弾性, すなわち関節の剛性に相当するということである. よってこの解析の結果を用いれば, 平衡姿勢と関節剛性を独立かつ定量的に制御することが可能であると考えられる.

以上のことから, 二次元脚ロボットの一定姿勢が安定となる条件 $a_2 < 0$ が今回のモデルのとりうる姿勢の範囲で満たされていることを確認した. この結果と 3.3.1 項の結果より, 今回提示した二次元脚ロボットモデルは立位姿勢の安定性を有すると考えられる. さらに解析の結果, MPA 圧力 P'_e, P'_f の組合せおよび空気弁の状態によって脚モデルの姿勢と関節剛性を独立に制御可能であることがわかった.

4. 立位安定性および関節剛性に関する実験検証

前章では, MPA を有する二次元脚モデルの立位姿勢の安定条件が, MPA および脚機構の特性によって満たされていることを確認した. さらに, MPA の圧力の組合せおよび空気弁の条件によって, モデルの平衡姿勢と関節剛性を独立に制御することが可能であることを解析的に示した. 本章では, これらの結果について実験を用いて検証する.

4.1 実験機および実験環境と条件

Fig. 1 のモデルをもとに製作した実験機を Fig. 6 に示す. 上下のリンクは, シャフトを二枚のアルミプレートで挟み込んだものであり, 上下リンクは膝部でベアリングを介し連結されている. 足首, 腰部はシャフト周りに回転自由, 腰部はスライダ機構によって鉛直一次元方向へ運動を制限されている. 膝蓋は膝周りに回転自由なプーリで実現されている (Fig. 6 (b)). また $X=800$ mm を初期姿勢とし, この姿勢で内外 MPA のワイヤが弛まないようにワイヤ長を調節した.

Fig. 7 に実験環境を示す. 圧縮空気は, エアコンプレッサから電空レギュレータを介して MPA へ供給される. MPA の圧力は, PC から指示した値に電空レギュレータによって制御されている. 一定質量条件での実験においては, ハンド

Fig. 6 The 2-dimensional legged robot with MPA

Fig. 7 Schematic explanation of the experimental setup

バルブを閉じた。また、実験機の姿勢（腰部高さ）は腰部に取り付けられたエンコーダによって取得した。

実験では、実験機の外側 MPA の圧力 P'_e 、内側 MPA の圧力 P'_f 、および MPA へ供気の条件（一定圧力条件/閉弁による一定質量条件）をパラメータとした。

4.2 内外 MPA 圧力の組合せと平衡姿勢の関係について

まず、内外 MPA 圧力の組合せと平衡姿勢に関する実験について述べる。この実験では、 P'_e 、 P'_f を 0~5 bar まで 0.5 bar 刻みで変化させ、そのときの平衡姿勢腰部高さを記録することでその関係を調べた。

各 P'_e 、 P'_f の組合せにおける平衡姿勢の腰部高さ $\tilde{X}$ 、および前章の数値解析の結果を Fig. 8 に示す。左側が数値解析の結果、右側が実験結果である。両者を比較すると数値解析の結果と実験結果はおおむね一致していることが確認できる。また、各圧力の組における平衡姿勢の絶対誤差の平均は 6.00 mm であった。この結果から、今回の解析結果は妥当だと考えられる。

4.3 立位姿勢の安定性について

つぎに、立位姿勢の安定性に関する実験について述べる。手順は以下のとおりである。

- (1) P'_e 、 P'_f を 0~5 bar の任意の値に設定し平衡姿勢をつくる。一定質量条件の場合は平衡姿勢をとった段階でハ

Fig. 8 Analytical-experimental comparison of the equilibrium positions $\tilde{X}$

Fig. 9 Convergence to the equilibrium position $\tilde{X}$ after feeding an impulsive force ($P'_e = 4.0$ bar, $P'_f = 3.0$ bar)

ンドバルブを閉じる。

- (2) 機体腰部へ外乱として撃力を加え、姿勢の推移を記録する。撃力は金属製のハンマーを用いて手動により加えた。

例として、Fig. 9 に $P'_e = 4.0$ bar, $P'_f = 3.0$ bar における実験結果を示す。左側が一定圧力条件、右側が一定質量条件における結果である。グラフは、縦軸に腰部高さ X の平衡姿勢 $\tilde{X}$ からの変位量、横軸に時間をとったものである。Fig. 9 より、いずれの条件においても外乱による腰部高さの変位が時間の経過とともに 0（平衡姿勢）へ収束していることが確認できる。また、今回 P'_e 、 P'_f の組合せを 0~5 bar まで 0.5 bar 刻みで変化させて行なったすべての実験において、同様に安定性を確認した。これらの結果から、前節の解析結果は妥当であり、MPA を用いた二次元脚ロボットは立位姿勢に対する安定性を有すると考えられる。

4.4 内外 MPA 圧力の組合せおよび空気弁の条件と関節剛性の関係について

さらに、関節剛性に関する実験の結果について述べる。手順は以下のとおりである。

- (1) ある平衡姿勢を実現する内外 MPA 圧力の関係を、(27)式より求める。
- (2) 求めた関係から、 P'_e 、 $P'_f > 0$ の範囲で圧力組を設定し、平衡姿勢をつくる。一定質量条件の場合は平衡姿勢をとった段階でハンドバルブを閉じる。

Fig. 10 Analytical-experimental comparison of joint stiffness k (experimental results: plot with error bar, analytical results: line); triangles and solid line show the results on constant pressure condition. Circles and broken line show the results on constant weight condition

(3) 腰部に静荷重 (1 kg) を加え、平衡姿勢からの変位より関節剛性を測定する。またほかの圧力の組合せについても同様に測定を行ない、それらの結果と解析の結果とを比較する。

Fig. 10 に、平衡姿勢 $\tilde{X}=780, 790, 800 \text{ mm}$ において行った実験の結果を示す。横軸は外側 MPA の圧力 P'_e 、縦軸は関節剛性 k である。図中の三角印は一定圧力条件における実験結果の平均を表わしている。実線は同条件における解析の結果である、同様に、丸印は一定質量条件における実験結果の平均、破線は同条件における解析の結果である。またエラーバーは各実験結果の 95% 信頼区間を表わしている。Fig. 10 より、実験の結果はばらつきが小さく再現性の高いものであることがわかる。またこれらの結果は解析とおおむね一致していることが確認できる。これらの結果から、前章における解析の結果を用いることで姿勢と関節剛性を独立に、かつ定量的に制御することが可能であると考えられる。

5. 結 言

本研究では、MPA を有するロボットの運動の安定性について、機構や MPA の特性がどのように寄与しているかを明らかにすることを目標としている。

本稿では、MPA を有するプリー膝二次元脚モデルについて、その立位姿勢が安定となる条件について導出を行なった。その結果、MPA の特性、および脚機構の特性によってその安定条件が満たされていることを解析的に示した。また、脚モデルの平衡姿勢、MPA 圧力の組合せと空気弁の条件、また関節剛性の間の関係について解析を行なった。その結果、脚モデルの姿勢に対する内外 MPA 圧力の組合せには冗長性が存在すること、またその冗長性が関節剛性に相当し、姿勢と関節剛性を独立かつ定量的に制御可能であることを示した。さらに、これらの解析結果について実機実験による検証を行ない、その妥当性を確認した。

今後は運動安定性や、さらに自由度の高いモデルに関する安定性解析を行なう予定である。また、安定性についてさらに定量的な解析を行なうために、MPA の動的な特性についても定式化を検討する。

謝 辞 本研究は、日本学術振興会特別研究員奨励費 (A268220)、および内閣府最先端研究開発支援プログラム「健康長寿社会を支える最先端支援技術研究プログラム」の支援により行なわれた。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 則次俊郎：空気圧ソフトアクチュエータと人間親和メカニズ

- ム, 日本機械学会 2003 年度年次大会資料集, 361/362 (2003)
- 2) 山宮, 鈴木, 秋元, 松元: 空気圧アクチュエータを用いた足首関節リハビリユニットの評価実験, 日本機械学会関東支部第1回埼玉ブロック大会 (講演会) 講演論文集, 65/66 (2005)
 - 3) 則次, 高岩, 佐々木, 沼本, 篠原: 積層型空気圧多関節アームを用いた柔軟接触作業 (gs-15 介護とリハビリの為のロボティクス・メカトロニクス), 日本機械学会関西支部講演会講演論文集, 1-43/1-44 (2004)
 - 4) M. Wisse and J. van Frankenhuyzen: Design and Construction of MIKE; A 2-D Autonomous Biped Based on Passive Dynamic Walking, *Adaptive Motion of Animals and Machines*, 143/154, Springer (2006)
 - 5) T. Takuma, K. Hosoda, M. Ogino and M. Asada: Stabilization of quasi-passive pneumatic muscle walker, *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Humanoid Robots*, 627/639 (2004)
 - 6) K. Hosoda, H. Takayama and T. Takuma: Bouncing monopod with bio-mimetic muscular-skeleton system, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3083/3088 (2008)
 - 7) C.-P. Chou and B. Hannaford: Measurement and modeling of mckibben pneumatic artificial muscles, *Robotics and Automation*, **12**-1, 90/102 (1996)
 - 8) B. Tondu and P. Lopez: Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators, *IEEE Control Systems*, **20**-2, 15/38 (2000)
 - 9) G.K. Klute, J.M. Czerniecki and B. Hannaford: Artificial muscles: Actuators for biorobotic systems, *The International Journal of Robotics Research*, **21**-4, 295/309 (2002)
 - 10) 小木曾, 内藤: 負荷に依存するパラメータを用いた mckibben 型空気圧ゴム人工筋の数理モデル, システム制御情報学会論文誌, **26**-7, 269/276 (2013)
 - 11) 浦邊, 石原, 藤田, 内藤, 小木曾, 杉本: McKibben 型空気圧人工筋肉モデルの妥当性, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演論文集, 121-6 (2014)
 - 12) Y. Sugimoto, K. Naniwa, K. Osuka and Y. Sankai: Static and dynamic properties of mckibben pneumatic actuator for self-stability of legged-robot motion, *Advanced Robotics*, **27**-6, 469/480 (2013)
 - 13) 本多, 中西, 杉本, 大須賀, 山海: McKibben 型空気圧アクチュエータの動的特性に関する実験的検証, 第 26 回ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2A2-O01 (2014)
 - 14) 中西, 末岡, 杉本, 大須賀, 山海: McKibben 型空気圧アクチュエータを有する二次元脚ロボットの立位姿勢安定性解析および実機検証, 第 19 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 102/107 (2014)
 - 15) 中西, 末岡, 杉本, 大須賀, 山海: 空気圧人工筋を用いた脚ロボットの関節剛性と立位安定性条件の関係について, 第 26 回ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2A1-Q06 (2014)
 - 16) L.R.G. Treloar: *The Physics of Rubber Elasticity*, Oxford University Press (1958)
 - 17) 中西, 末岡, 杉本, 大須賀, 山海: McKibben 型空気圧アクチュエータを有する二次元脚ロボットの立位姿勢安定領域に関する実機検証, 第 25 回ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2A1-D13 (2013)

[著者紹介]

中西 大 輔

2012 年大阪大学工学部応用理工学科卒業, 2014 年同大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了, 同年同博士課程入学, 現在に至る. 2014 年より日本学術振興会特別研究員. 受動的動歩行, 空気圧人工筋を用いたロボットに関する研究に従事. 日本機械学会の学生会員.

末 岡 裕一郎 (正会員)

2010 年大阪大学工学部応用理工学科卒業, 2012 年同大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了, 2015 年同博士課程修了. 同年大阪大学大学院工学研究科助手となり, 現在に至る. 2013 年から 2015 年まで日本学術振興会特別研究員. マルチエージェントシステム, 自律分散システムの制御の研究に従事. 日本機械学会, 日本ロボット学会, システム制御情報学会の正会員.

杉 本 靖 博 (正会員)

2000 年京都大学工学部物理工学科卒業, 2002 年京都大学大学院情報学研究科修士課程システム科学専攻修了, 2005 年同博士課程修了. 同年, 京都大学大学院工学研究科助手, 2008 年 (株) シンクチュープ勤務, 2009 年大阪大学大学院工学研究科助教を経て, 2014 年大阪大学大学院工学研究科講師となり, 現在に至る. 2006 年日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門 ROBOMECH 表彰, 2006 年日本ロボット学会研究奨励賞を受賞. システム制御情報学会, 日本機械学会, 日本ロボット学会の会員. 博士 (情報学).

大須賀 公 一 (正会員)

1959 年 11 月 16 日生. 84 年大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程修了. 同年 (株) 東芝入社, 総合研究所勤務. 86 年大阪府立大学工学部助手. その後, 講師, 助教授を経て, 98 年京都大学大学院情報学研究科助教授, 2003 年神戸大学工学部教授, 2009 年大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻教授となり現在に至る. ロボティクス, 制御工学, レスキュー工学などの研究に従事. 工学博士.