

Abstract: 現在多くの受動歩行ロボットは自由関節を持ち、自己のダイナミクスと環境との相互作用のみを利用して歩行を実現している。しかしこれは一方で、環境が変わらない限りロボットの挙動を変えることができないことを意味する。そのため自由関節を持つ受動歩行ロボットでは、同じ環境内でその歩行速度を変えることはできない。このようなロボットの歩行速度を変える方法として、関節に弾性を持たせることが提案されており、これまで受動歩行ロボットの腰関節弾性の操作によって歩行速度が変わることがシミュレーション上で確認されている。このような弾性の操作を実際のロボットで実現するには、駆動機構を工夫する必要がある。本稿ではマッキベン型空気圧アクチュエータに用い、これを拮抗に配置して関節を駆動する。マッキベン型アクチュエータはアクチュエータ内に給排気する空気の量によってその弾性を操作することができる。またアクチュエータ内の圧力を一定に保つことで、エネルギーを消費することなく受動的に弾性を維持することができる。このアクチュエータを関節に拮抗に配置することにより、受動的な弾性関節を実現することができる。このような機構で歩行を行った結果、腰関節の弾性を変えることによって歩行速度が変わることが確認された。

Keywords: 受動歩行, 空気圧アクチュエータ, 速度制御

1. はじめに

受動歩行はアクチュエータを一切用いることなく斜面を下ることから、エネルギー効率の良い歩行として近年注目を集めている [1]。これまで受動歩行ロボットにアクチュエータを付加することで、歩行の安定化について改善が見られた [2][3][4]。しかし受動歩行ロボットがエネルギー効率よく自在な歩行を実現するには、依然様々な問題がある。

本稿ではこれらの問題のうち、歩行中のロボットの挙動、特に歩行速度の操作に着目する。受動歩行ロボットは自由関節を持ち、自己のダイナミクスと環境とのインタラクションを利用して歩行を実現する。しかしこれはロボットの挙動がこれらダイナミクスやインタラクションのみに支配されており、能動的に歩行速度を変える余地がないことも意味している。

一方で受動歩行に近いといわれているヒトの歩行を観察すると、その関節は柔軟な筋肉で駆動されており、これらの剛性を変えることで挙動を変えていると考えられる。ロボットの分野でも、腰関節の弾性を調整することで歩行速度が操作可能となることがシミュレーション上で示されている [5]。このような関節を実ロボットで実現するには、弾性が操作できるアクチュエータが必要となる。

これまで弾性が操作できるアクチュエータはいくつか提案されてきたが [6][7]、エネルギー効率の観点から我々は空気圧アクチュエータを用いる。空気圧アクチュエータは空気を注入することで伸縮し、バネの特性を持つ。またその弾性はアクチュエータ内の圧力に応じて変えることができる。そのため、このアクチュエータに適当な時間給気した後弁を閉じると、弁を開けていた時間に応じてその弾性が変わる。また弁を閉じている間エネルギーを消費しないので、その間アクチュエータは受動的な弾性を保つことになる。このアクチュエータを関節に拮抗に配置すると、筋肉と同様関節を駆動し、その弾性を操作することができる。

我々はこのアクチュエータを用いた二足歩行ロボットを試作し、腰関節を自由関節および受動的弾性関節にして歩行を行う。この結果自由関節による歩行では

歩行速度は操作できないが、受動的弾性関節による歩行では歩行速度が操作可能であることが分かった。本稿ではこれについて報告する。

2. 空気圧アクチュエータを用いた歩行ロボットの試作

2.1 ロボットの構成

本稿の目的は、腰関節の弾性を変えることで受動歩行ロボットの挙動、特に歩行速度が変わることを観測することである。そのため関節を駆動するアクチュエータに求められる機能は、弾性を維持するエネルギー消費が少ないこと、さらには弾性の操作が簡単であることである。本稿では拮抗に配置したマッキベン型空気圧アクチュエータ [8][9] を用いて腰関節の弾性を操作する。この弾性操作のメカニズムについては後で述べる。

図 1 に試作した二足歩行ロボット「空脚」を示す。各関節は日立メディコ社製の空気圧アクチュエータを用いている。アクチュエータ内部の圧力が 0.7 MPa のとき、その直径および長さは 0.027 m, 0.15 m となる。またロボットの全長は 0.75 m, 幅は 0.35 m, 重さは約 5.3kg である。また大腿部リンクの長さおよび重量は 0.3 m, 4.3 kg であり、脛部リンクの長さおよび重量は 0.35 m, 0.9 kg である。

自立歩行が可能となるように、ロボットには空気の供給源のための小型高圧ガスポンペを 2 個、電磁弁を駆動するためのバッテリーを 1 個搭載している。ポンペの圧力は高圧のため、実験ではポンペからの供給圧力をレギュレータで調整して 0.55 MPa にして使用した。また電磁弁を操作するために、マイクロコンピュータを搭載している。電磁弁は空気の供給、排気および給排気どちらも行わない三状態に切り替え可能である。足裏は受動歩行に適した円弧状になっており、その半径は 0.125 m, 長さは 0.08 m である。また足裏にはタッチセンサが装着されており、地面への接地を検出する (図 2 参照)。接地時の信号はコントローラに送られ、その後次節で述べるフィードフォワード制御則に則って電磁弁の開閉を行う。



Fig. 1 A 2D biped walker with McKibben pneumatic actuators. The robot is self-contained and has two air bottles with regulators, three-position air valves, a microcomputer board, and an electrical battery.

2.2 関節駆動機構

図2にマッキベン型アクチュエータを拮抗に配置した二足歩行ロボットの構成を示す。アクチュエータに空気が供給されると、アクチュエータは収縮し、引張力を発生する。アクチュエータは非線形バネの特性を有し、圧力の増加とともにバネ係数は増大する[8]。従って各関節の弾性はアクチュエータ内の圧力で決まる。

アクチュエータは電磁弁で駆動されており、弁はマイクロコンピュータからの信号によって給気、排気、給排気両方の弁を閉じる三状態に切り替えることができる。一定時間給気もしくは排気弁を開けた後その弁を閉じることで、アクチュエータは適当な圧力を保つことができ、その結果関節は適当な弾性を保ったまま受動的に運動を行うことができる。またこの給排気する時間を変えることでアクチュエータ内の圧力は変化するため、アクチュエータの弾性は給排気時間を調整することで操作することができる。Wisseらは空気圧アクチュエータを拮抗に配置したロボットで歩行を実現した[10]。しかし給気および排気のみ行う電磁弁を使用したため、弾性を維持したまま受動的に運動することはできない。一方試作したロボットは上述の通りアクチュエータの弾性を操作することができ、その結果関節の弾性も操作することができる。

3. フィードフォワード制御則による歩行

腰関節の受動的弾性が歩行速度に寄与することを確認するため、本稿は二つのフィードフォワード制御則を提案する。ひとつは腰を自由関節にした歩行のための制御則であり、もう一つは腰を受動的弾性関節にした歩行のための制御則である。本稿では各関節のアクチュエータに給排気する時間を調整してフィードフォワード制御則を構築する。弁開閉の手順について以下に示す。

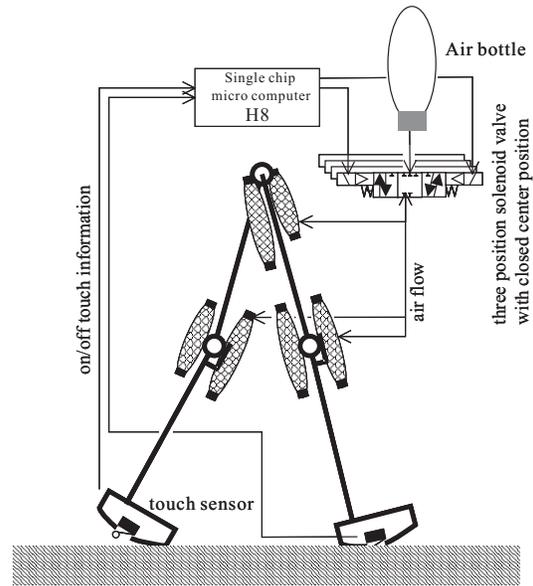


Fig. 2 Architecture of a planar biped walker driven by antagonistic pairs of McKibben pneumatic actuators. The main feature of the walker is the three-position solenoid valve with a closed center position that enables the robot to control joint elasticity.

3.1 自由腰関節による歩行

自由腰関節による受動歩行を行う給排気弁操作手順を以下に示す(図3参照)。以下腰関節を駆動するために拮抗に配置したアクチュエータのうち、前方に配置したアクチュエータを「主動アクチュエータ」と呼び、後方には位置したアクチュエータを「拮抗アクチュエータ」と呼ぶ。

- (i) 脚着地後、主動アクチュエータに給気する弁を一定時間開ける。同時に拮抗アクチュエータから排気する弁を開ける。これにより遊脚は前方に振り出される。
- (ii) 主動アクチュエータに一定時間給気した後給気弁を閉じ、同時に排気弁を開ける。また拮抗アクチュエータは排気を続ける。これにより腰関節は自由回転する。その後脚着地まで両アクチュエータとも排気を続け、着地後遊脚・支持脚を入れ替える。

ここで、主動アクチュエータに給気する時間を T_s とする。試行実験として歩行可能な T_s の値を探索したところ、 T_s がある範囲内であれば歩行可能であることが分かった。

3.2 受動的弾性腰関節による歩行

受動的弾性腰関節による受動歩行を行う給排気弁操作手順を以下に示す(図4参照)：

- (i) 脚着地後、遊脚を前方に振り出すために主動アクチュエータに給気する弁を一定時間開ける。同時に拮抗アクチュエータから排気する弁を一定時間開ける。
- (ii) 一定時間弁を開けた後、その弁を閉じる。これによりアクチュエータ内はある程度の圧力となり、それに応じた弾性を維持しながら腰関節は回転する。

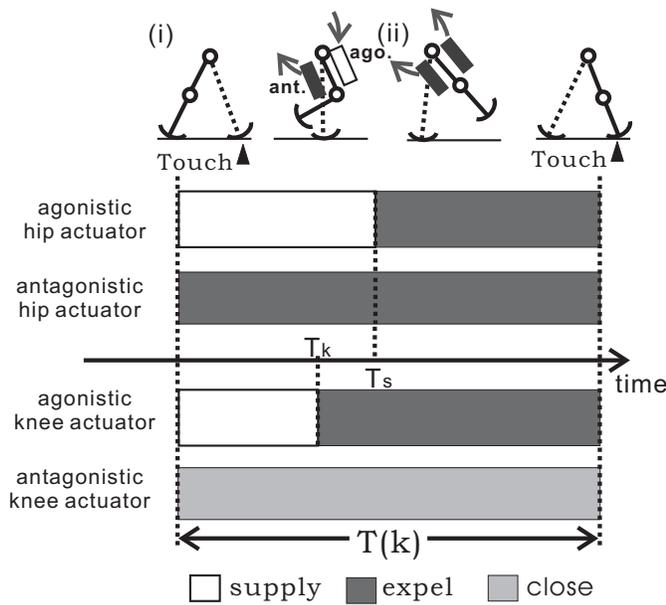


Fig. 3 Schematic diagram of when to actuate and relax the muscles for walking with a free hip joint. The rectangles in the picture indicate the agonistic and antagonistic hip actuators. Note that the supply duration for the agonistic knee actuator T_k is tuned so as to avoid foot collision with the ground.

ここで主動アクチュエータに給気する時間を T_s とし、拮抗アクチュエータから排気する時間を T_e とする。先述の通り腰関節の弾性は給気と排気の時間 T_s, T_e によって決まる。これら二つを歩行パラメタとして試行実験をしてみたところ、先と同じく T_s, T_e がある範囲内であれば歩行が可能であることが分かった。これより T_s, T_e を変えることによって様々な弾性をもって歩行できることが分かった。

腰関節と同様、膝関節も拮抗に配置した二つのアクチュエータによって駆動する。このうち膝主動アクチュエータ（膝の伸展に寄与するアクチュエータ）は歩行前に一定期間空気を入れて弾性をもたせ、膝拮抗アクチュエータ（屈曲に寄与するアクチュエータ）に給気しない間は常に膝が伸展するようにする。ここで遊脚が地面と衝突することを避けるために、脚着地後遊脚膝拮抗アクチュエータに一定時間 T_k （図 3,4 参照）給気し膝を屈曲させる。その後排気し、膝を伸展させる。これらの時間について試行錯誤的に探索した結果、膝主動アクチュエータに歩行前給気する時間は 0.08 s、膝拮抗アクチュエータに脚振出中給気する時間は 0.3 s が適当であることが分かった。脛リンクの重量は全重量に比べて小さく、また膝の関節駆動範囲は微小なため、この運動は歩行の挙動に影響を与えない。

4. 弾性腰関節による歩行速度操作

先の弁操作手順に従って腰関節を自由関節もしくは受動的弾性関節にして歩行を行い、歩行パラメタ T_s, T_e （受動関節の場合は T_s のみ）が歩行速度に与える影響を観察する。歩行速度は一方の脚が着地してからもう一方の脚が着地するまでの間の平均速度とし、周

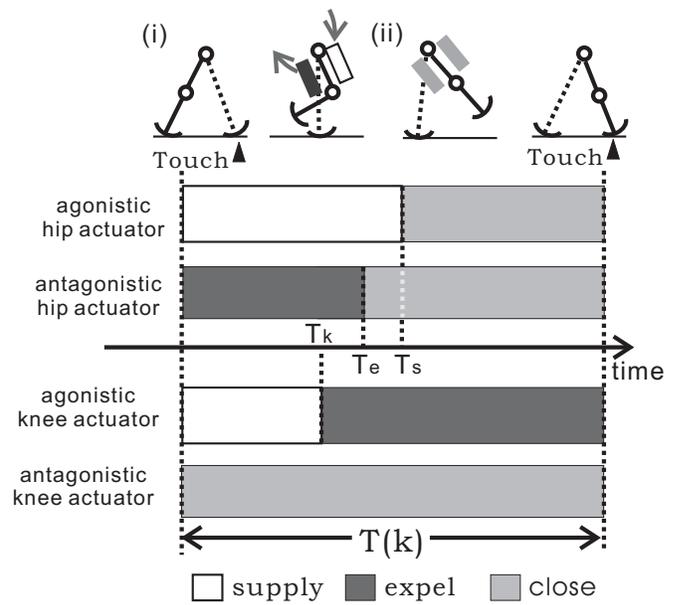


Fig. 4 Valve opening procedure for walking with the compliant hip joint

期的な歩行時の速度を測るために 10 歩目以降の歩行速度を測定した。

4.1 結果 1: 自由腰関節による歩行

図 5 に、腰関節が自由関節のときの給気時間 T_s と歩行速度の関係を示す。ロボットは $0.12 \leq T_s \leq 0.16$ s の範囲で歩行が可能であった。実験を行った結果、図のようにすべてのパラメタで歩行速度はほぼ同じになった。この結果より、腰関節が自由関節のとき、パラメタを変えても歩行速度は操作できないことが分かった。

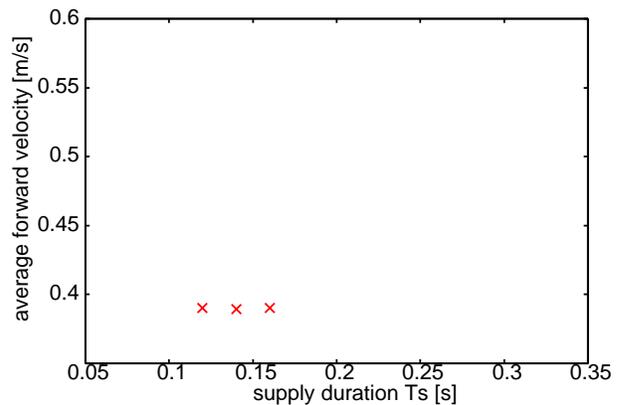


Fig. 5 Relationship between supply duration for the agonistic hip actuator T_s and the average forward velocity when $T_s = 0.12, 0.14$ and 0.16 [s] for the case of walking with a free hip joint

4.2 結果 2: 受動的弾性腰関節による歩行

図 6 に腰関節が受動的弾性関節のときの給気時間 T_s 、排気時間 T_e と歩行速度の関係を示す。図のようにロボットは $0.08 \leq T_s \leq 0.4$ s, $0.22 \leq T_e \leq 0.4$ s の

範囲で歩行が可能であった。これより歩行パラメタによって歩行速度が変わることが分かる。この結果より、歩行速度はパラメタによって操作可能であることが示された。

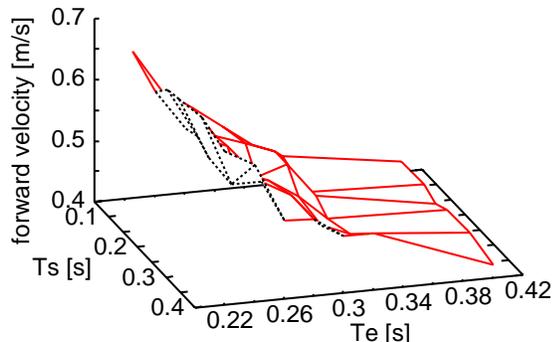


Fig. 6 Relationship between supply duration for agonistic hip actuator T_s , expel duration for antagonistic actuator T_e , and average forward velocity.

図7(a)(b)に図6の一部を示す。(a)は排気時間 $T_e = 0.22, 0.26, 0.3, 0.4$ s のときの給気時間 T_s と歩行速度の関係を示す。図のように T_e が一定のときは T_s を変えても歩行速度が変わらないことが分かる。図7(b)に $T_s = 0.16, 0.2, 0.24$ s のときの T_e と歩行速度の関係を示す。図のように歩行速度は T_e の増加に応じて増大している。これより歩行速度は排気時間 T_e に大きく影響を受け、 T_s に影響を受けないことが分かった。

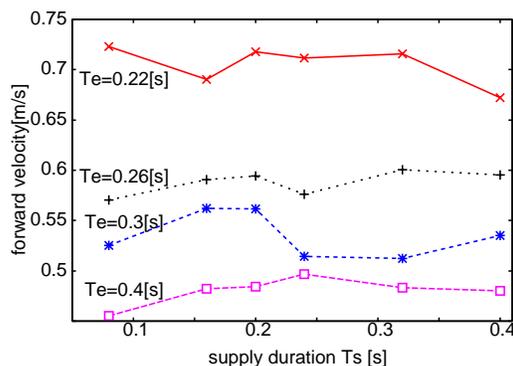
4.3 腰関節の弾性と歩行速度の関係

腰関節の弾性と歩行速度の関係について考察する。ただし歩行中の腰関節の弾性を測定することは難しいため、ここでは脚着地時の腰主動・拮抗アクチュエータの圧力を観察し、これらと歩行速度の関係について考察する。

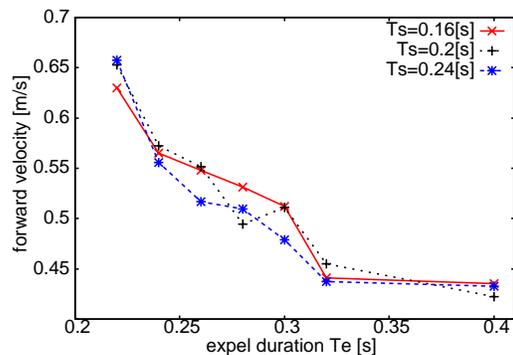
図8に $T_s = 0.2, T_e = 0.28$ s 時の歩行中の主動および拮抗アクチュエータの圧力軌道を示す。図のように給気、排気弁が開いている間はそれぞれ圧力が増加、減少し、これらを閉じた後は圧力がほぼ一定に保たれている。また弁を閉じている間は腰関節は空気を消費せず、受動的弾性をもって運動している。このときの圧力は脚着地時の圧力とほぼ一致し、圧力に応じて腰関節の弾性が決まることから、脚着地時の圧力と腰関節の弾性は密接な関係がある。そこで脚着地時の主動および拮抗アクチュエータの圧力と歩行速度の関係から関節の弾性と歩行速度の関係を推察する。

図9(a)に T_s, T_e と脚着地時の主動アクチュエータの圧力との関係を示す。また(b)に T_s, T_e と脚着地時の拮抗アクチュエータの圧力との関係を示す。図より T_s, T_e に応じて圧力が異なることが分かる。

図6と図9より、腰関節を駆動する主動アクチュエータの圧力、拮抗アクチュエータの圧力と歩行速度の関係を図10に示す。また図11(a)(b)にそれぞれ主動アクチュエータの圧力と歩行速度、拮抗アクチュエータの圧力と歩行速度の関係を示す。図(a)(b)中それぞれ四力所表記されている値は、順に給気時間と排気時間を表す。図(a)(b)より、給気時間を固定すると圧力の増大に応じて歩行速度が大きくなっていることが分かる。[8]より、アクチュエータ内の圧力が増加するとアクチュエータの持つ非線形バネ特性のバネ係数が



(a) T_s and the velocity extracted from Figure 6. The expel duration is fixed as $T_e = 0.24, 0.32, \text{ and } 0.4$ s.



(b) T_e and the velocity extracted from Figure 6. The supply duration is fixed as $T_s = 0.16, 0.2, \text{ and } 0.24$ s.

Fig. 7 Relationship between T_s, T_e , and the walking velocity extracted from Figure 6

増加することが知られており、またアクチュエータの弾性によって関節の弾性が変わることから、腰関節の弾性を調整することで歩行速度が操作されることが分かった。

5. 結論

本稿では弾性可変な空気圧アクチュエータを拮抗に配置した二足歩行ロボットを試作し、提案する二種類のフィードフォワード制御則によって歩行を実現した。二種類の制御則のうち、一つは腰を自由関節して歩行するものであり、もう一つはアクチュエータ内の圧力を調整して腰を受動的弾性関節にして歩行を行うものである。弾性腰関節による歩行ではアクチュエータに空気を給排気した後弁を閉じて圧力を一定に保つため、この間はエネルギーを消費することなく弾道学的に脚を振り出すことができる。

実験では自由腰関節による歩行および受動的弾性腰関節による歩行において、それぞれ歩行可能となる歩行パラメタ T_s, T_e (自由関節時は T_s のみ) の範囲内で歩行速度を測定し、両者の比較を行った。その結果、自由腰関節による歩行ではパラメタを変えても歩行速度に変化が見られなかったのに対し、弾性腰関節による歩行ではパラメタを変えることで歩行速度が操作

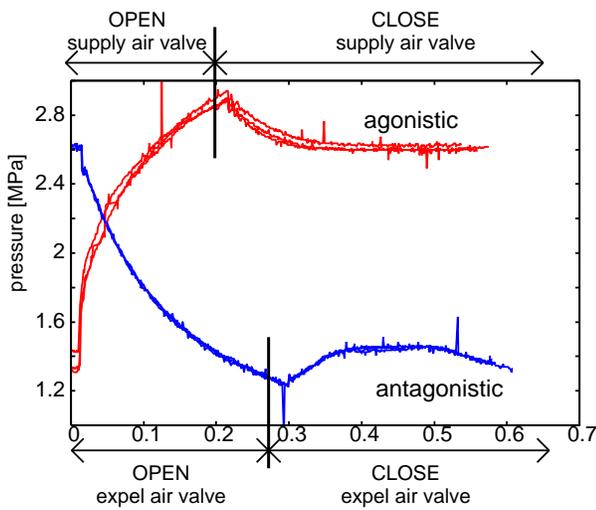


Fig. 8 Pressure trajectory of agonistic and antagonistic actuator for one step. The trajectory whose pressure at heel strike is higher indicates the pressure of agonistic actuator and vice versa.

可能であることが分かった．更に実験では歩行パラメータと脚振出時の圧力の関係と先の結果から，アクチュエータの剛性が高いほど歩行速度が増加することが分かった．

本稿では受動的弾性腰関節による歩行によって歩行速度が操作可能であることを，実験によって示した．しかしいくつかの問題も残った．一つは歩行速度が排気時間 T_e にのみ依存し，給気時間 T_s に依存しなかったことである．また歩行速度を決める物理的な要因についても明らかにならなかった．これらについては今後の研究課題としたい．

REFERENCES

[1] T. McGeer, "Passive Dynamic Walking," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 62-82, 1990

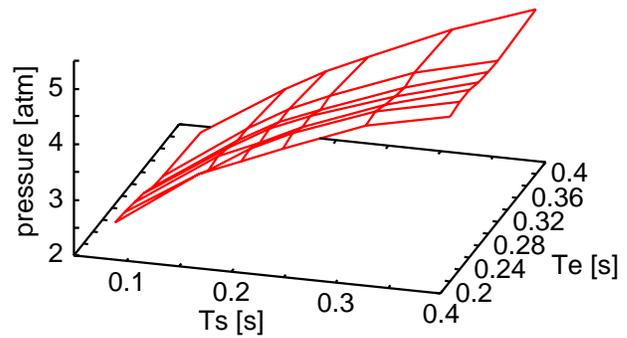
[2] 浅野，羅，山北，力学的エネルギー回復に基づく動的歩容生成と制御，*日本ロボット学会誌*，Vol. 22, No. 1, pp. 130-139, 2004

[3] S. Goswami and B.Espiau and A.Keramane, *Limit cycles and their stability in a passive bipedal gait*, ICRA96, pp. 246-251, 1996

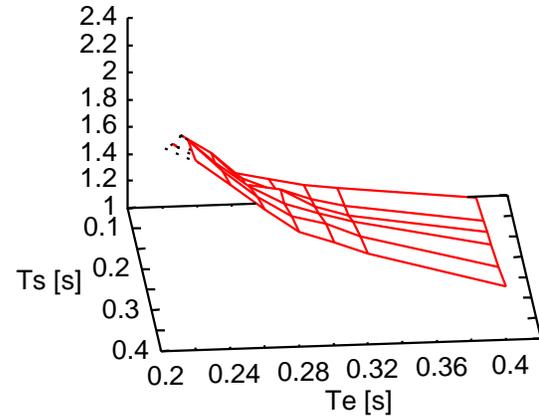
[4] 杉本，大須賀，杉江，連続型遅延フィードバック制御に基づく脚ロボットの準受動的歩行安定化制御，*日本ロボット学会誌*，Vol. 23, No.4, pp.53-60, 2005

[5] A. D. Kuo, *Energetics of actively powered locomotion using the simples walking model*, *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 124, No. 1, pp.113-120, 2002

[6] D. Paluska and H. Herr, *The Effect of Series Elasticity on Actuator Work Output*, *Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (IROS) Workshop on Morphology, Control, and Passive Dynamics*, 2005



(a) Pressure in the agonistic pneumatic actuator at heel strike.



(b) Pressure in the antagonistic pneumatic actuator at heel strike.

Fig. 9 Relationship between walking parameters T_s and T_e and the pressure in the agonistic and antagonistic pressures at heel strike.

[7] , K. Koganezawa and M. Yamazaki, *Mechanical Stiffness Control of Tendon-Driven Joints*, *Proceedings of IEEE/RAS International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, pp818-825, 1999

[8] R. Q. van der Linde, *Design, Analysis, and Control of a Low Power Joint for Walking Robots, by Phasic Activation of McKibben Muscles*, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.15, No.4, pp.599-604, 1999

[9] C. P. Chou and B. Hannaford, *Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscles*, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.12, No.1, pp.90-102, 1996

[10] M. Wisse and J. van Frankenhuyzen, *Design and Construction of MIKE ; 2D autonomous biped based on passive dynamic walking*, *2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM)*, CD-ROM, 2002

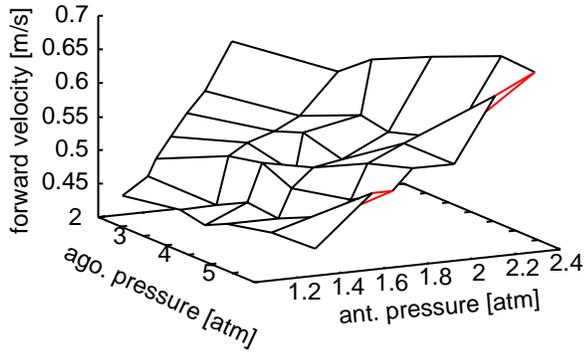
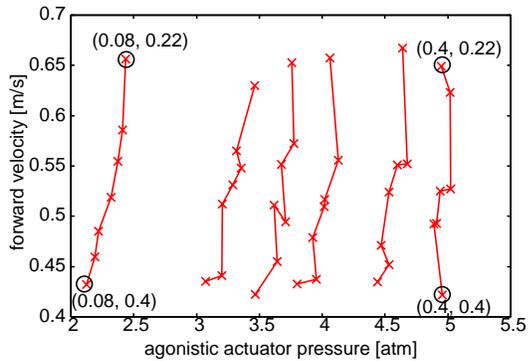
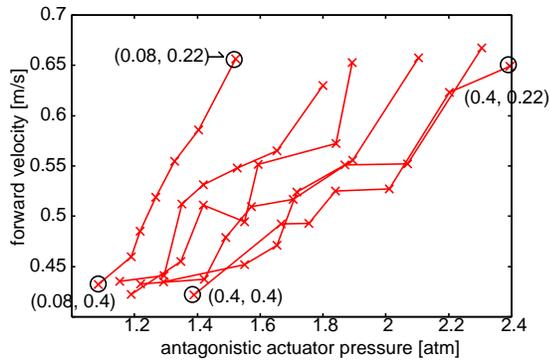


Fig. 10 Relationship between the pressure in the agonistic and antagonistic actuator at heel strike and the forward velocity.



(a) Pressure in the agonistic actuator and the velocity.



(b) Pressure in the antagonistic actuator extracted.

Fig. 11 Relationship between the pressure in the agonistic and antagonistic actuator at heel strike and the forward velocity from Figure 10. Sets of numbers, such as (0.08, 0.22), correspond to the set of the supply and the expel duration (T_s , T_e) in seconds.