

筋骨格ロボットによる走行実現のための筋賦活パターン制御

Muscle Activation Pattern Control for Running of Musculoskeletal Robot

西川 鋭 (東京大学) 正 新山 龍馬 (東京大学) 正 國吉 康夫 (東京大学)

*Satoshi NISHIKAWA, The University of Tokyo, nisikawa@isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp

Ryuma NIYAMA, The University of Tokyo, niyama@isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp

Yasuo KUNIYOSHI, The University of Tokyo, kuniyosh@isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp

Despite the considerable complexity of the human musculoskeletal system, human beings are capable to move with great dexterity and ease even under instable conditions as during running. In order to understand the control mechanisms underlying the generation of such skill-full behaviors, we propose to study running, a highly dynamic motion, using an anthropomorphic bipedal robot. To do so, we propose a method called Muscle Activation Pattern Control based on physiological observations of athlete runners that we apply in a simulation of our running robot. Using this method, we show that the robot can autonomously acquire patterns of running motion over 3m/s.

Key Words: Artificial Musculoskeletal System, Pneumatic Artificial Muscle, Bipedal Robot, Biomechanics, Running Motion

1. 研究背景と目的

ダイナミックな運動の基本である走行を実現するロボットは多く開発されている [1]。これらの多くは電磁モータによる目標軌道追従制御で安定走行を実現している。一方、ヒトは筋骨格系の身体を持ち、非線形性、拮抗制御、2関節筋といった目標軌道追従制御を行にくい性質があるにもかかわらず巧みな運動ができる。こうした運動実現にはヒトの身体の特徴である弾性要素を含んだ筋骨格系が重要な要素であると考えられる。バイオメカニクスにおいてはこうした身体の特徴を活かす知見が多く得られており、これらを踏まえた制御法をロボットに適用することによりヒトに近い運動が得られると考えられる。

以上のことから、ロボットでのヒトに近い走行実現のためにヒトの競技走を規範とした制御法を提案することを本研究の目的とする。方法としては、動力学シミュレータ上でヒトと身体特性が近い筋骨格ロボット [2] の改良型を用いる。

2. 筋賦活パターン制御

2.1 制御の背景

本研究ではヒトを規範として走行制御を行うことを考えるため、ヒトの走行中の筋指令である筋電図に基づいた制御を考える。走行において体幹に近い筋が大きな役割を果たすと考えられるため、本研究では下腿部を除いて考える。ヒトの競技走の筋電図 [3] を図 1 に示す。

図 1 より、筋電値の最大値の 50% に線を引くと、遊脚期の中程、接地 200ms 前から 100ms 前の間に全ての筋において筋電値が線を跨いでいるのが分かる。このことから遊脚は前半、後半で全ての筋電値が同期して切り替わっていると考えられる。また、筋電値は強弱が明確に分かれており、ON/OFF に近く見える。また、運動生理学の分野で、情報量の削減のために指令を離散的にして運動指令表現の単純化をはかることでヒトの運動の軌道と類似した特徴を示すこと [4] が示されている。このことから動作を時間分割したス

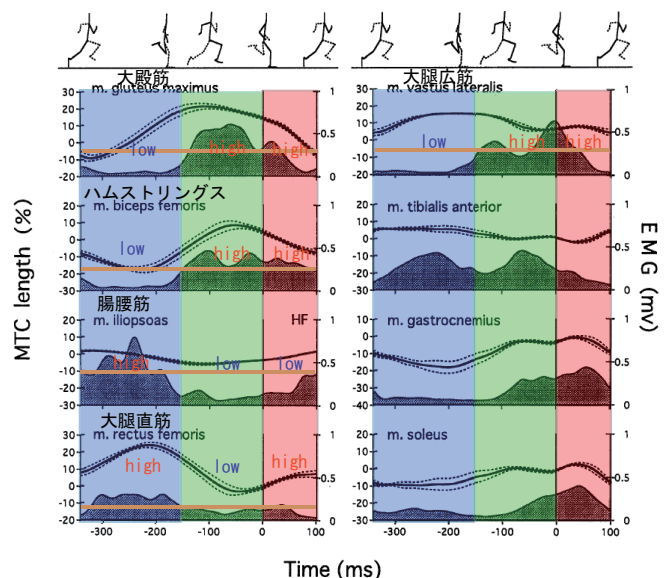


Fig. 1 Human EMG(alter [3])

テップ的な指令の切り替えはヒトの制御に近いと考えられる。さらに、新山らは筋骨格ロボットを使い、指令を一度に複数の筋に与えるだけの制御で動物と類似したジャンプを実現しており [5]、筋骨格系がその機構により生物らしい運動を作り出すことを示している。そのため、機構に制御を委ねる部分を残すことで動物の運動に近づけられると考えられる。以上より、制御に要求される条件として、運動を時間分割し分割したフェーズ毎の指令を決定すること、指令を素早くステップ的に切り替えることの 2 点が挙げられる。

これらの要求を満たす制御としては柿谷らの提案する筋指令切替パターン [6] がある。これは、目標姿勢を平衡状態とする筋指令をステップ的に切り替えてフィードフォワード的に運動を生成する方法である。本研究ではこの手法をベースとするが、この手法は単発の運動しか扱っておらず、周期運動である走行にはそのまま適用できない。そのため、走行に適用できるように改良を加えた手法を提案する。

2.2 制御の概要

提案手法は、基本要素としては、筋賦活パタン、切替タイミングに加えて周期運動を、応用要素としては自律化、最適化だけでなくフィードバックを新たに加えた。

まず、動作を時間分割し、分割したフェーズ毎の指令を決定する。次に、フェーズの切り替えのタイミングを考える。周期運動を扱うため、1周期分の運動を決定し、繰り返すことで運動を生成する。その際にタイミングはダイナミックな運動において重要であると考えられるため、そのまま繰り返すだけでは、誤差がある場合や、実世界に拡張する際に外乱に対応できない。そのため、センサフィードバックにより1周期毎に運動のタイミングを調節する。また、筋賦活パタンと切替タイミングを自律的に獲得、最適化するために運動学習を行うことで人手による要素を減らし、汎用性を高める。提案手法を図解したものを図2に示す。

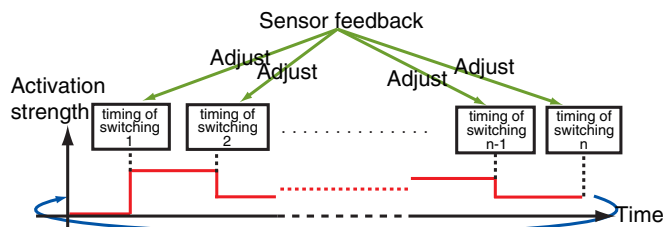


Fig. 2 Proposed method

2.3 走行に用いた筋賦活パタン制御

図1に示すヒトの競技走の筋電図からフェーズの分け方、各フェーズの筋賦活の強弱を決定した。フェーズ分けはまず、加速を得ることができる接地期と遊脚期に分ける。次に筋電図において遊脚期中に筋電値の最大値の50%の線を跨いでいるため、2つに分け、引き付け期、振り下ろし期とした。各フェーズにおいて最大値の50%を越えているものを強 (high)、それ以外を弱 (low) とした。接地期に足先での出力方向 [7] を考えると、体を持ち上げる筋は大殿筋、大腿直筋、大腿広筋となっている。筋電図から決定した筋はこれに体を持ち上げる点では負の効果があるハムストリングスが加わっているが、走行においては前に進むことが重要であるため妥当であると考えられる。

各フェーズの切替タイミングは以下のように決定した。空気圧筋には応答遅れがあるため、接触センサからの情報を得て切り替えたのでは間に合わない。そこで、切替タイミングを決定するのに前サイクルの情報と接地時間の予測を用いた。接地時間は離地時の垂直速度から自由落下で元の位置まで戻ってくる時間を求めることで予測した。鉛直方向速度を v 、重力加速度を g とすると T_a は式 (1) のように求められる。離地時刻を $t_{liftoff}$ 、空中時間を T_a 、接地時間を T_s 、振り下ろし時間を τ として表1のように設定した。ただし、 T_a 、 T_s は離地検知時に更新した。

Table 1 Timing of switching

foot descent	sense liftoff & $t_{liftoff} + T_a - \tau$
thrust	$t_{liftoff} + T_a$
recovery swing	$t_{liftoff} + T_a + T_s$

$$T_a = 2v/g \quad (1)$$

各フェーズの筋指令と切替タイミングを自律的に獲得するために運動学習を行う。運動学習法は少ない時間での筋骨格ロボットの跳躍に成功している柿谷らの手法 [6] を採用する。この手法はランダム探索により広域に解を探索した後に山登り探索により極値周辺の解を探索する手法である。本研究においては、筋電図から決定した各フェーズの筋賦活の強弱から弱としたものをゼロに固定、残りをランダム探索する。そうして得たパタンの最良のものから山登り探索することにより走行を実現するパタンを得る。

3. 動力学シミュレータ上での走行要素別実験

3.1 筋骨格ロボットとシミュレーションモデル

本研究では新山らにより製作された筋骨格ロボット [2] の改良型をモデルとする。ロボットの筋配置を図3に示す。下腿部は受動ばねになっている。シミュレーションモデルでは、大殿筋の強化、大腿筋膜張筋として股関節外側に受動ばねの追加、膝関節可動域の拡大の改良を加えた。空気圧人工筋の特性は以下の式 (2) [8] に基づいて求め、実際に発揮できる力として0.8倍して利用した。 F は筋の張力、 p は筋の内圧、 ϵ は筋の収縮率、 A 、 B は定数である。筋長-張力関係は図4のようになる。応答遅れは0.1sに設定した。動力学シミュレータはOpenHRP3.0.5 [9] を用いた。

$$F = pA(1 - \epsilon)^2 - B \quad (2)$$

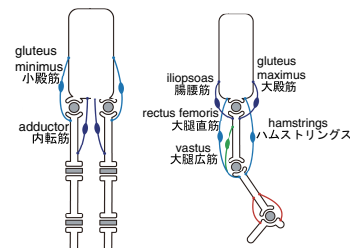


Fig. 3 Muscle alignment of musculoskeletal robot

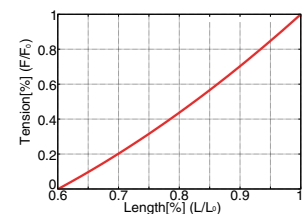


Fig. 4 FL curve of muscle

3.2 蹴り出し実験

走行要素別実験の1つ目として蹴り出し実験を行った。蹴り出すタイミングが離地速度に与える効果について調べた。ロボットを高所から落とし、接地直後に蹴り出したものから0.01sずつずらして蹴り出したもので実験を行った。蹴り出し時間は0.01sとした。結果を図5に示す。

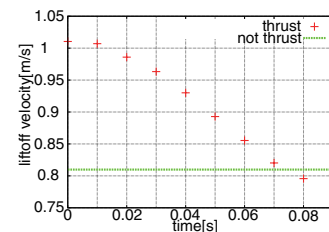


Fig. 5 Liftoff velocity

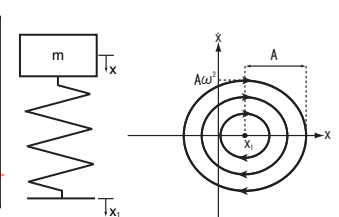


Fig. 6 Spring-mass system

離地速度は接地期前半に蹴り出した方が大きくなっている。これは、蹴り出すことにより、脚全体のばねの平衡位置

がシフトしたためだと考えられる．これを図 6 に示す 1 次元ばね質点系で考える．物体の質量を m ，弾性定数を k ，物体の座標を x ，平衡点の座標を x_1 ，自然長を 0 とするとこの系の運動方程式は式 (3) のように表せる． x_1 一定で解くと，時間 t ， $\omega = \sqrt{k/m}$ ，定数 A として式 (4)，式 (5) となる．

$$m\ddot{x} = -k(x - x_1) \quad (3)$$

$$x = Ae^{i\omega t} + x_1 \quad (4)$$

$$\dot{x} = Ai\omega e^{i\omega t} + x_1 \quad (5)$$

この系の振る舞いを (x, \dot{x}) 平面上で考えると，中心座標 $(x_1, 0)$ ， x 方向半径 A ， \dot{x} 方向半径 $A\omega^2$ の楕円軌道上を時計まわりに進む．この系で，蹴り出しに当たるのはばねの平衡点のシフト，つまり x_1 の移動である．接地期前半に蹴り出した場合，(a) のようにばねのシフトが起こった時に中心が違う赤い楕円弧上を移動し，ばねが戻った際に元の楕円よりも半径の大きな破線で表した楕円弧上を動くため，高い速度が得られる．一方，蹴り出しが遅くなると，(b) のようにばねのシフトが起こると反って中心に近づく側に動いてしまい，速度は何もしないよりも遅くなる．

この結果から，接地直後の方が接地後半に蹴り出すよりも有効であることが示された．これは接地時刻を予測して蹴り出すことの重要性を示唆している．また，ヒトが行う接地期後半の引き付け動作の開始が妥当であると推察される．

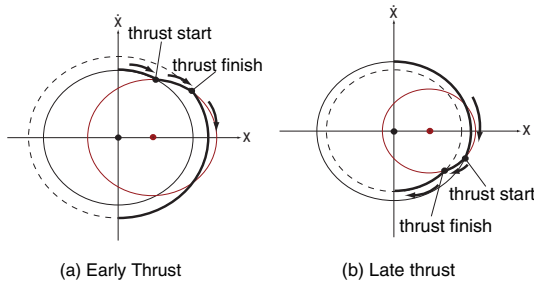


Fig. 7 Shift of spring

3.3 引き付け実験

走行要素別実験の 2 つ目として引き付け実験を行った．この実験では引き付け時の 2 関節筋の役割について考察した．ロボットの胴体を空中に固定して脚を引き付けさせた．

図 8 に示す膝伸展 1 関節筋である大腿広筋と腸腰筋を使った引き付け (1 関節筋のみの引き付け) と図 9 に示す 2 関節筋である大腿直筋と腸腰筋を使った引き付け (2 関節筋を含めた引き付け) の 2 通りについて比較した．赤い筋は使用した筋，青い筋は使用しなかった筋を示す．

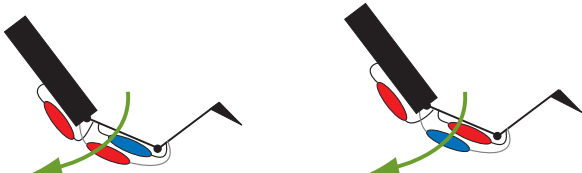


Fig. 8 Only monoarticular muscles Fig. 9 With biarticular muscles

図 10，図 11 に示す股関節角速度より，1 関節筋のみの引き付けでは膝の初期屈曲角が小さいものの方がスウィング速度が速く，2 関節筋を含めた引き付けでは膝の初期屈曲角が大きいものの方がスウィング速度が速くなった．

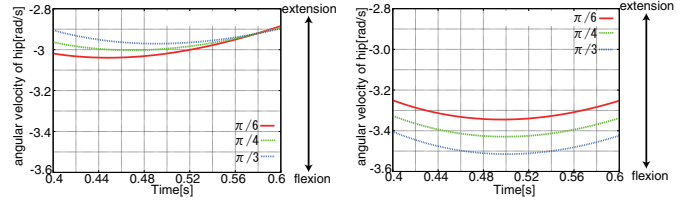


Fig. 10 Only monoarticular muscles Fig. 11 With biarticular muscles

これについては図 4 に示す筋長-張力特性から考察した．引き付け時の膝にかかる筋を図 12，図 13 に示す．(b) のように膝の屈曲角が大きい時，(a) よりも膝にかかる筋は伸びるため筋張力は高くなる．1 関節筋のみでは，膝屈曲角が大きい時，膝関節伸展トルクが上昇する．そのため，その反作用として股関節伸展トルクが強まるため，スウィング速度が遅くなったと考えられる．一方，2 関節筋を含めると，(d) のように膝屈曲角が大きい時，(c) に比べて膝関節伸展トルクが上昇するだけでなく，股関節屈曲トルクも上昇するため，反作用に打ち勝ちスウィング速度が増したと考えられる．

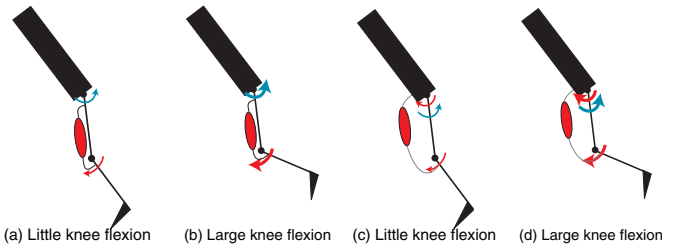


Fig. 12 Only monoarticular muscles Fig. 13 With biarticular muscles

ヒトは接地後大きく膝を曲げて引き付けるが，これは大腿直筋の力を有効に使うためと考えられる．バイオメカニクスにおいて膝の屈曲は脚の慣性モーメントを減少させるためと議論されている [10] が，2 関節筋の特性を考へても，膝の屈曲は素早いスウィングに有効であることが示された．

4. 筋賦活パタンの学習による走行実験

走行要素別実験から，筋賦活の強弱のパタンは，膝の屈曲のための引き付け期初めのハムストリングス，接地期後半の引き付け動作の腸腰筋を追加して図 14 のように決定した．くくってあるものは同じ指令を与えるものである．

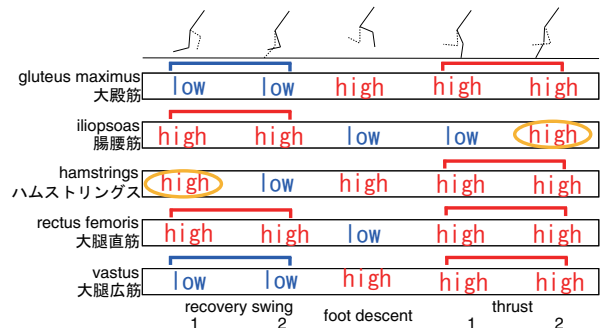


Fig. 14 Strength of muscle activation

筋賦活パタンの詳細は運動学習により決定した．運動学習は次のように行った．評価関数は 5s に進んだ距離とした．まず，筋賦活の強弱のパタンから強のものとして，振り下ろし時間 τ の 12 パラメータをランダム探索して評価値が高く

なるパタンを探索した．左右の筋に関しては，接地期と非接地期のパタンをあらかじめ与えた．次に，ランダム探索の結果のパタンを初期値として，弱の筋，左右の筋も含めた 22 パラメータの山登り探索を行い，走行動作を生成した．山登り探索での探索範囲は，筋の内圧については $\pm 0.2\text{MPa}$ ，時間については $\pm 0.02\text{s}$ とし，その中でランダム探索をした．ランダム探索 300 回の後に行った山登り探索 500 回の 6 回分の学習曲線を図 15 に，生成された筋賦活パタンを図 16 に示す．振り下ろし時間は 0.059s となった．

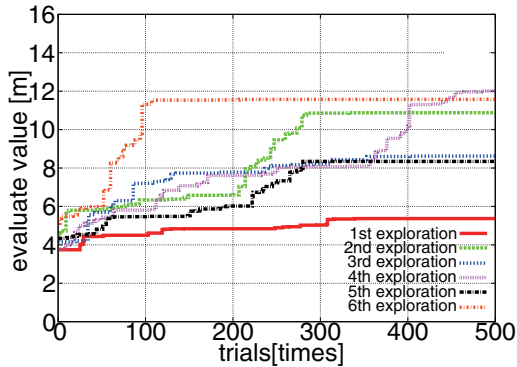


Fig. 15 Learning curve

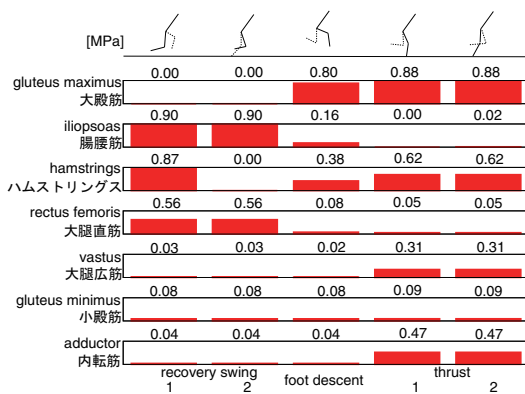


Fig. 16 Muscle activation pattern

生成された走行の様子を図 17 に示す．図 21 のように最高速度が 3m/s を越える 6 歩の走行が実現した．図 18 に示すように関節角度の大きいダイナミックな走行になっている．図 20 のように上方に跳ねすぎていること，図 19 からわかるように関節限界に当たって突発的なトルクがかかってしまっていることは課題である．

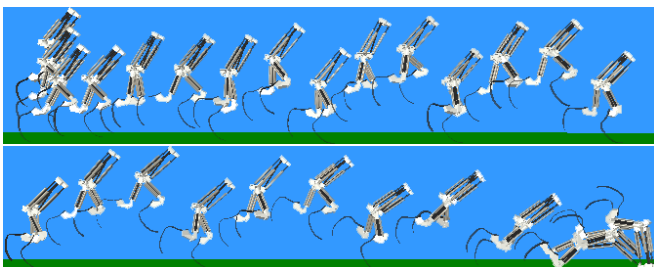


Fig. 17 Spectra per 0.2s (above: before 2.8s, below: after 2.8s)

5. 結論と展望

本研究では，筋骨格ロボットの走行制御法としてヒトの競技走の筋電図に基づいた筋賦活パタン制御を提案した．走

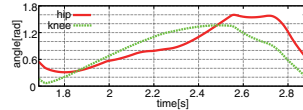


Fig. 18 Angle of joints

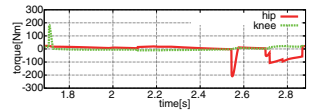


Fig. 19 Torque of joints

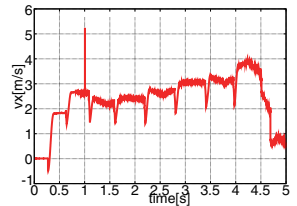
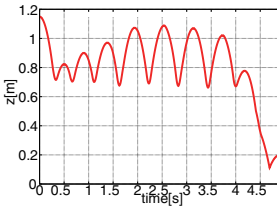


Fig. 20 Position of CoG (vertical) Fig. 21 Velocity of CoG (forward)

行要素別実験では，ばねの有効利用には蹴り出しタイミングが重要なこと，ヒトの引き付けは 2 関節筋を活かす姿勢であることを示した．走行実験では，筋電図に基づく制約を加えた学習で生成した筋賦活パタンにより筋骨格ロボットの動力学シミュレータ上でのダイナミックな走行が実現した．

本研究の課題としては，走行の安定性の低さ，定常走行しかできないことが挙げられる，また，実世界とシミュレーションの違いも克服する必要がある．今後，こうした課題を解決することで実機走行を実現，また，他の運動と組み合わせることで，筋骨格ロボットを筋骨格系の運動の研究の基盤として役立てられることが期待される．

文献

- [1] Toru Takenaka, Takashi Matsumoto, Takahide Yoshiike, and Shinya Shirokura, "Real time motion generation and control for biped robot - 2nd report: running gait pattern generation", In *The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '09)*, pp. 1092–1099, St. Louis, USA, 2009.
- [2] Ryuma Niiyama and Yasuo Kuniyoshi, "Pneumatic biped with an artificial musculoskeletal system", In *Proceedings of 4th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2008)*, 2008.
- [3] 馬場崇豪, 和田幸洋, 伊藤章, "短距離走の筋活動様式", *体育学研究*, Vol. 45, No. 2, pp. 186–200, 2000.
- [4] 坂口豊, 和田克己, "低い時間解像度の運動指令がもたらす手先軌道の性質: 運動指令表現の単純化仮説", *電気情報通信学会論文誌*, Vol. J91-D, No. 9, pp. 2368–2381, 2008.
- [5] Ryuma Niiyama, Akihiko Nagakubo, and Yasuo Kuniyoshi, "Mowgli: A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system", In *Proceedings of the 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2007)*, pp. 2546–2551 (ThC5.2), 2007.
- [6] 柿谷慧, 新山龍馬, 國吉康夫, "筋骨格ロボットを用いた跳躍運動の学習", 第 14 回ロボティクスシンポジウム, 2009.
- [7] T. Oshima, T. Fujikawa, O. Kameyama, and M. Kumamoto, "Robotic analyses of output force distribution developed by human limbs", In *Proceedings of the 2000 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 229–234, Osaka, Japan, 2000.
- [8] Schulte H.F., Adamski D.F., and Pearson J.R., "Characteristics of the braided fluid actuator", *The University of Michigan Medical School Department of Physical Medicine and Rehabilitation Orthotics Research Project*, 1961.
- [9] 中岡慎一郎, 山野辺夏樹, 比留川博久, 山根克, 川角祐一郎, "分散コンポーネント型ロボットシミュレータ openhrp3", *日本ロボット学会誌*, Vol. 26, No. 5, pp. 399–406, 2008.
- [10] 金子公宥, 福永哲夫, "バイオメカニクス—身体運動の科学的基礎—", 杏林書院, 2004.