

抗/従重力の自然な遷移と足首の回内・回外が可能な人型ロボットの複合下腿機構

Lower leg mechanism for humanoid robots that enables natural transition
between resistive/compliant behaviors to gravity and ankle pronation/supination

鈴江 卓也 (阪大) ○正 杉原 知道 (阪大)

Takuya Suzue, Osaka University
Tomomichi Sugihara, Osaka University

A novel lower leg mechanism for humanoid robots is designed. The pronation/supination motion of the ankle is added to an existing planar complex knee-ankle mechanism that enables firm support against gravity and natural swinging by gravity. The increase of total moment of inertia is prevented by a linkage mechanism that remotely rotates the ankle, where the motors are assigned at the knee part. A prototype of the mechanism was designed on 3D CAD.

Key Words: Anthropomorphic lower leg, Variable transmission ratio, Ankle pronation/supination

1 はじめに

人型ロボットは人に似た身体構造と大自由度を有することから、人が普段活動しているような環境に入っていき作業することが期待されている。人の活動環境は複雑で予測できない外乱に満ちており、このような状況下では、ロボットの内部姿勢を正確に制御するだけでなく、外界との相互作用による振舞を適切に制御する必要がある。ロボット表面に柔軟素材を取り付けることで、外界に受動的に働きかけ効果がある程度得られる [1, 2]。しかし、外界に能動的に働きかけ所望の振舞を得るためには、環境とロボットのモータとの間で相互に力をやり取りさせることが必要である [3]。この能力をバックドライバビリティという。外力に抗わずに自然になじむ特性を持たせれば、ロボットが環境に適応することができる。一方で、ロボットが環境に仕事をなす場合は低バックドライバブルである方が小さい駆動力で望んだ姿勢を維持できる。以上から、ロボットのバックドライバビリティは状況に応じて高低を変えられることが望まれる。

これらは相反する要求であり、同時に満たされる性質ではない。人型ロボットにおいてこれらの相反の度合は特に膝関節で大きい。支持脚相では、関節を固くして重力に抗い自重を支えなければならない。一方、足が地面から離れた遊脚相では、着地までの間、脚が重力に従って振り子のように振る舞いながら衝撃をしなやかに吸収することが求められる。これらの抗/従重力特性は状況に応じて遷移する必要がある。これを剛性可変な構造 [4] やクラッチ [2] で実現しようとする機構や制御方式が著しく複雑化する、脚慣性が増加する等の問題があった。

この問題には、膝関節の減速比を変化させ脚の慣性を増減させる方法が有効である。膝関節の要求トルクが膝関節と足首関節の屈曲角と相関があることと利用することで自然な遷移が実現できる。しかし、足首に回内・回外自由度を持たせようとする、足先重量が増え脚の慣性増加が抑えられない。また、足首の屈曲によって下腿と足の角度が変化するため、足首より上に搭載したモータと減速機の入力を足首まで伝達することも容易ではない。本稿では、足首と膝の屈曲角に応じて膝関節の減速比を変化させる特性を備え、足首 2 自由度を遠隔生成する機能を持つ複合下腿機構を提案した。遠隔生成には、脚長調整用の平行 4 節リンクを小型化し、空いた空間に同じく平行 4 節リンクでできた回内・回外伝達機構を配置する。これにより、足首屈曲角を変化させずに膝まで伝達し、下腿の構成部品と遠隔生成機能を一体化し機構の大型化を防いだ。この機構は、先行研究の足首連動膝機構が持つ特性を損なうことなく、足首自由度の増加、足先慣性の低減という要求を満たすことを確認した。

2 足首連動膝機構

膝関節のバックドライバビリティを適切に調整するために、東田 [5, 6] らは膝と足首の屈曲角に応じて減速比が変化する足首連動膝機構を設計し、慣性を変化させる方法をとった。アクチュエータ-減

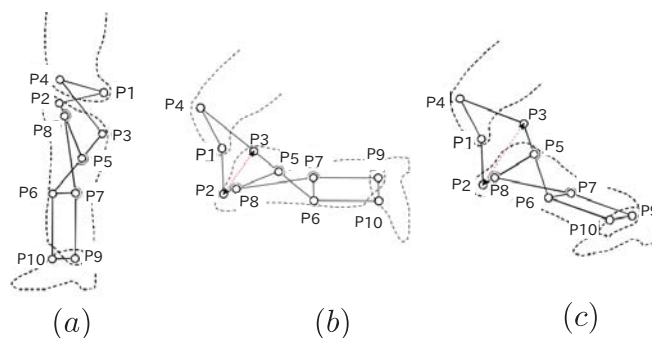


Fig.1 Lower leg mechanism with parallel four-bar link

速機-エフェクタという構成の動力系において、バックドライバビリティを損なう原因は減速機内の摩擦・慣性である。特に慣性は入力から見て減速比の二乗に比例して変化するので、関節の硬さを変化させるには減速比を変化させることが重要になるためである。高剛性が求められる状況においては膝に連動して足首の屈曲角も大きくなることに着目し、接地/非接地を直接検知せず足首関節角度に応じて自動的に上記の性質にあった減速比特性が得られる特徴を実現し、抗/従重力を自然に遷移させた。ただし、望ましい減速比特性を与えるリンク長比がほぼ一意に決まってしまうため、下腿長を増やすためには機構全体を大型化する必要があった。この問題に対して東田らは特許 [6] において、図 1 に示す平行 4 節リンクを用いた下腿部を提案している。(a) は正立、(b) は膝屈曲、(c) は膝屈曲-足首屈曲姿勢を表す。

しかし、人型ロボットの脚に求められる機能を考えた場合、膝・足首関節の屈曲・伸展自由度のみでは脚の動きが平面内に制限される問題がある。人間の足首には回内・回外、背屈・底屈、外転・内転自由度がある [7]。人型ロボットの作業環境では水平でない地形で安定して立位を保つ能力が求められるため [8]、回内・回外自由度が必要である [9]。

3 足首回内・回外の遠隔生成機構

足首連動膝機構の抗/従重力の自然な遷移という特性を保つため、足首に 2 自由度 (屈曲伸展, 回内回外) を有する脚の設計を試みる。しかし、足首に回内・回外自由度を持たせる際に回内・回外軸にモータ、減速機を配置すると、足先重量が増え脚の慣性の増加が抑えられないことが課題となる。足首に回内・回外自由度を与えたいが、足先重量の増加を抑えたいという相反する問題に対して、膝下部に入力要素を集中して配置し、足首に屈曲・伸展、回内・回外運

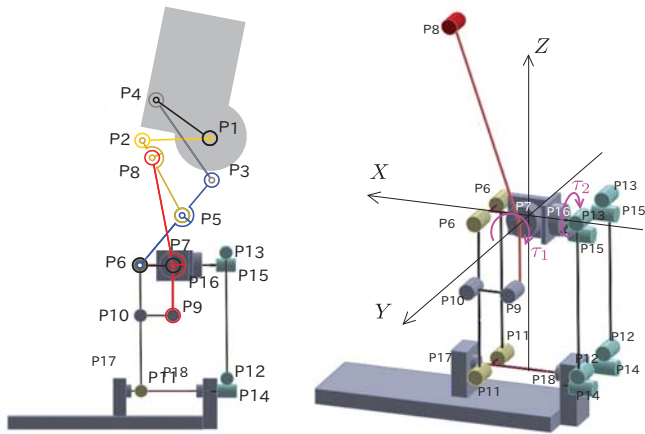


Fig.2 Complex lower leg mechanism that remotely produces pronation/supination of the ankle

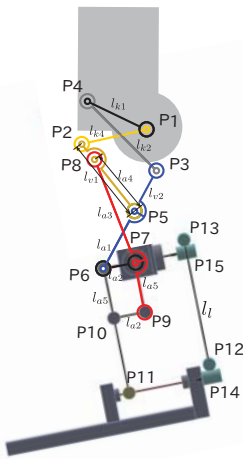


Fig.3 Parameters of the links

動を遠隔生成するという方法が考えられる。そこで平行4節リンクを元にした下腿部を作成することで解決を図る。平行4節リンクならば、長さによらず元の足首連動膝機構の足首屈曲伸入力と延長した新しい足首の屈曲角度が等しくなる。足先を軽くするために、回内回外入力要素も足首屈曲伸入力の近くにまとめて配置し、足首の回内・回外軸まで回転を伝達するという方針を立てた。

この場合、下腿と足首内転外転軸の角度は足首屈曲角に応じて変化することが設計の難点になる。例えば、水平面上での直立時であれば、足首回内回外軸と下腿は垂直であるが、足首を屈曲伸展させると垂直ではなくなる。そのため、東田らの提案した平行4節リンクを用いた下腿や、ベルトやチェーンでの伝達では回内・回外の遠隔生成に対応できない。また、回内・回外の遠隔生成を担う伝達機構を下腿の平行4節リンクとは別に用意すると、下腿部の肥大化・複雑化を招く。

これらの問題を解決するために図2に示す構造を脛に用いた。X,Y,Z軸上の回転軸が固定リンクである。Y軸が左右方向、X軸正方向が正面を表す。足首2自由度の入力要素はX-Y平面に置かれ、この機構によってZ軸負方向の末端に2自由度運動が遠隔生成される。足首屈曲伸展の入力トルクが τ_1 、足首回内回外入力のトルクが τ_2 である。関節P6,P11,P12,P13,P14,P15は左右にあるので呼び分けるときはL,Rをつけることにする。P12-P14,P13-P15はユニバーサル・ジョイントで代用できるが、必ずしも回転軸が直交する必要はない。後述の平行四辺形を維持できれば良いためである。

膝部のリンクパラメータは図3のように設定する。東田らの機構と

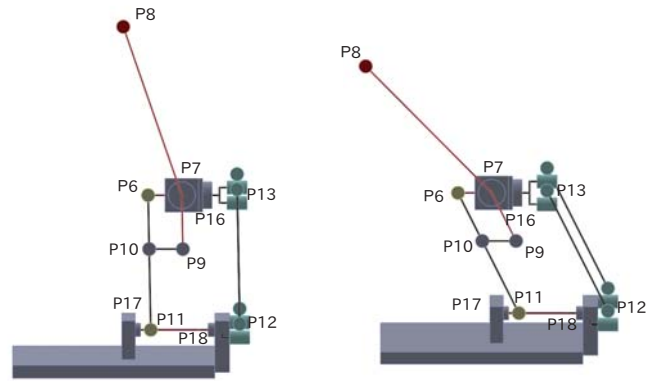


Fig.4 Sagittal plantar flexion movement of the lower leg

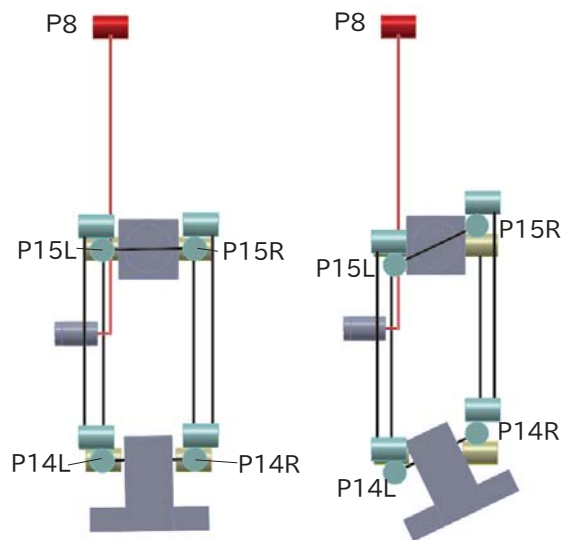


Fig.5 Lateral plantar flexion movement of the lower leg

同じ値 ($l_{k1} = 90, l_{k2} = 135, l_{k4} = 90, l_{v1} = 117, l_{v2} = 63, l_{a1} = 90, l_{a2} = 45, l_{a3} = 153, l_{a4} = 90$) を使用した。下腿部のパラメータは機構の減速比特性に関与しない。 $l_{a5} = 40, l_t = 200$ の二つは所望の下腿長に合わせて変更可能である。下腿部の他のパラメータは、P6-P11-P14-P13, P15(L-R)-P14(L-R)がそれぞれ平行四辺形を構成するように決定する。

図4はY軸正方向からこの機構を見た図である。脚長の調整のために提案されていた平行4節リンクをP6-P10-P9-P7に小型化し、空いた空間に同じく平行4節リンクでできた回内・回外伝達機構P12-P13-P14-P15を配置する。下腿の構成部品と遠隔生成機能を一体化し機構の大型化を防ぐためである。足首屈曲時には、P6-P10-P9-P7とP6-P11-P12-P13がそれぞれ平行4節リンクとして動く。P7に入力された足首屈曲入力は膝側にはP8-P7を通して、足首側にはP6-P10-P9-P7を通して伝達される。足首が回内・回外していても、P6-P11-P12-P13の関係は崩れないため機構が成立する。

図5はX軸負方向からこの機構を見た図である。P15L-P14L-P14R-P15Rが平行4節リンクとして動くため回内・回外を遠隔生成できる。

4 可動範囲

実機の可動範囲を3D CADモデルを使って解析した。図6に可動限界を示す。(a)は正立、(b)は膝屈曲-足首屈曲、(c)は膝屈曲-足首伸展、(d)は回内、回外の可動範囲を表す。また、足首2自

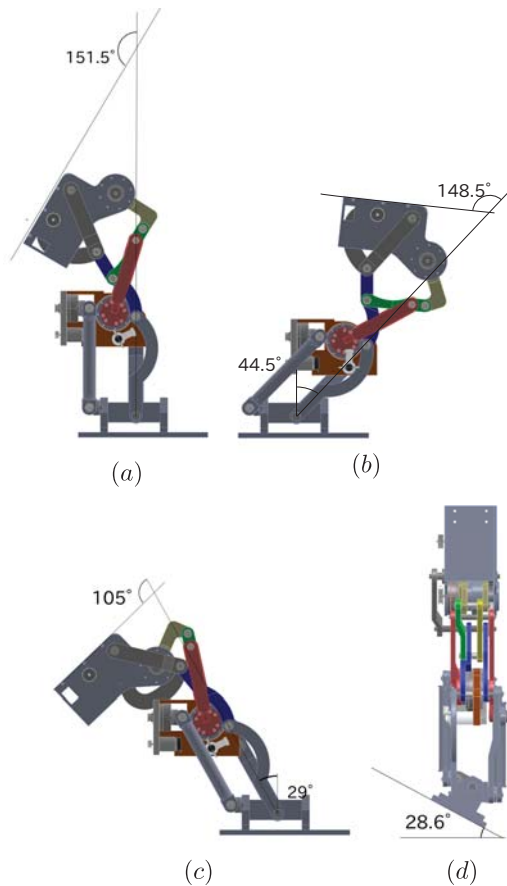


Fig.6 Motion ranges of the joints

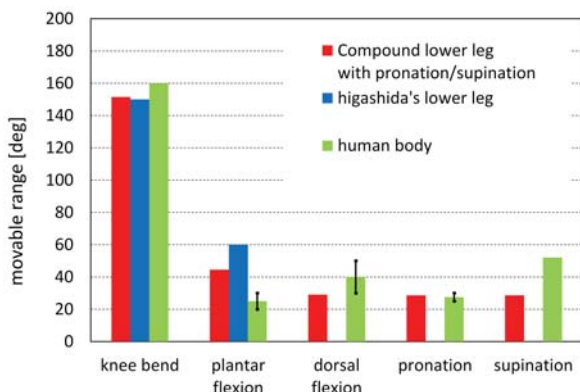


Fig.7 Comparison of joint motion ranges

自由度を備えた複合下腿、東田らの下腿、人体の可動範囲の比較を図7に示す。先行研究である東田の機構は可動範囲こそ明示されていないが、図示されている角度から少なくとも、膝の屈曲は150°、足首屈曲は60°まで曲げることができる。一方、足首の伸展方向には可動しない。本研究で提案した足首2自由度を備えた複合下腿と比較すると、膝の可動範囲は同等、足首屈曲可動域は15°ほど狭くなっている。ただし、足首の伸展方向に29°の可動域があることから、傾斜地形での安定性については向上していると考えられる。文献[10]によると人間の膝関節の屈曲範囲は最大で160°、足首の屈曲範囲は20~30°、伸展の範囲は30~50°、回内は25~30°、回外は52°である。これらの膝の可動域が足首角度によって大きく変動する点、回外の可動範囲を除けば、この試験機は人体に近い可動範囲を持つと言える。

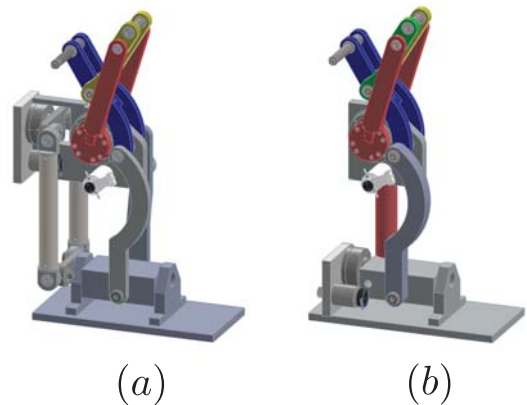


Fig.8 Two types of under-knee mechanisms

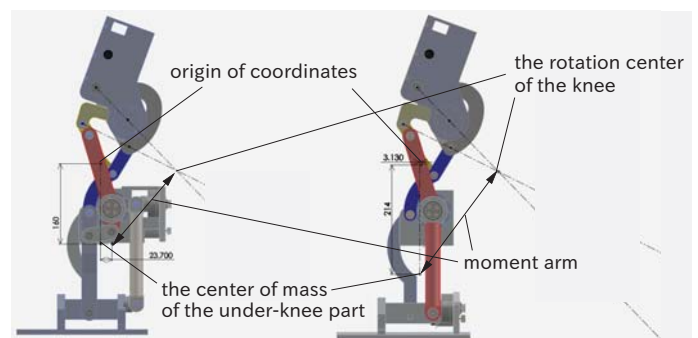


Fig.9 The center of mass of the lower leg and the rotation center of the knee joint

Table 1 Mass of the under-knee part and the moment of inertia around the center of mass calculated by 3D CAD

| 機構 | 質量 (kg) | 重心まわり 慣性モーメント (kg · m ²) |
|------|---------|---|
| 機構 A | 5.21 | 5.86×10^{-2} |
| 機構 B | 5.10 | 7.53×10^{-2} |

5 脚慣性

3D CAD を用いて脚慣性を計算し、回内・回外用モータ・減速機の配置による影響を評価する。評価する機構は2種類で、回内回外入力用のモータと減速機を膝下に配置した機構Aと足首に配置した機構Bと比較する。膝部は共通で膝下のみが異なっている。機構Aは図8の(a)、機構Bは(b)のとおりである。機構Bは回内回外の遠隔生成機構が不要なため、下腿リンクは2本のみであるが、機構Aのものと同様の剛性を揃えるためリンクの断面二次モーメントを2倍にしている。

3D CAD モデルを使って膝関節下の重量と重心、重心周りの慣性モーメントを計算した。機構A,Bの重心位置を図9に示す。座標原点の位置は機構A,Bで共通である。膝関節回転中心の位置は膝屈曲角によって変化し、図9では膝屈曲角20°の時の膝関節回転中心を示している。計算結果を表1に示す。

回内・回外運動生成のための可動部がより多い機構Aの方が機構Bより質量が大きい。一方で、重心まわり慣性モーメントは機構Aのほうが小さい。足首屈曲・伸展、回内・回外減速機の位置に質量が集中しているため慣性モーメントを小さく抑えることにつながっている。

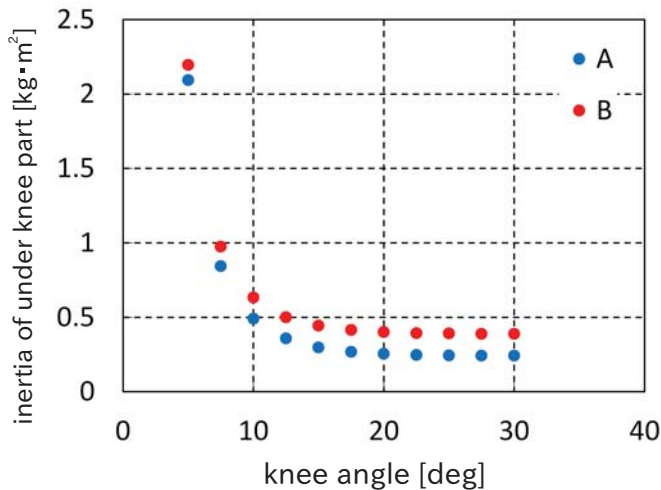


Fig.10 The moment of inertia of the under-knee part about the rotation center of the knee joint

次に、膝の4節リンクの回転中心から重心までの距離と、それを元に計算した膝下の慣性モーメントを図10に示す。膝角度は遊脚時を想定し、膝角度が10度、20度、30度の条件で計算した。3種類どの膝角度においても機構Aのほうが膝下の慣性モーメントが小さいことが示された。つまり、減速機、モータを膝下に配置し、足首回内・回外運動を遠隔生成したほうが遊脚時の慣性モーメント抑制に有利である。

6 脚の抗/従重力の遷移の検証

ロボットが屈伸運動を行なった時、減速比の変化による抗/従重力特性の影響を調査した。膝屈曲角が足首屈曲角 φ の2倍になるように保ちながら、質量Mが30kg、上肢、下肢の長さLが0.3mとして負荷トルク τ を計算した。

$$\tau = MgL \cos(\pi/2 - \varphi)$$

一方、膝関節の出力トルクは、停動トルク1000mNm、減速比50倍の減速機を備えているものとし、通常の回転関節と足首角度に連動して膝減速比の変化する関節を比較した。後者は足首屈曲角度によって減速比のグラフが変化するため、屈伸時の減速比変化を黒点で表した。負荷トルクは膝の屈曲に連れて大きくなるが、通常の膝関節の出力トルクは一定のみであり、屈曲角度の大きい領域ではトルクが不足する。一方、足首角度に連動して膝減速比の変化する関節は、負荷トルクを常に上回りつつも、膝角度が小さい時は減速比を抑え、膝角度が大きい時は減速比を高くしている。Lが大きくなるほど負荷トルクは大きくなるため、負荷トルクの増大に合わせて抗/従重力の自然な遷移が行えることはモータ負荷の緩和に役立つと言える。

7 おわりに

足首2自由を遠隔生成する機能を持つ複合4節リンク機構を提案した。遠隔生成には、脚長の調整のために提案されていた平行4節リンクを小型化し、空いた空間に同じく平行4節リンクでできた回内・回外伝達機構を配置した。これにより、足首屈曲角度を変化させずに膝まで伝達し、下腿の構成部品と遠隔生成機能を一体化し機構の大型化を防いだ。この機構は、先行研究の足首連動膝機構が持つ特性を損なうことなく、足首自由度の増加、足先慣性の低減という要求を満たす。今後の課題としては、リンク形状と材質の最適化による脚慣性の低減、脚の左右を考慮した設計による回外可動域の向上が挙げられる。

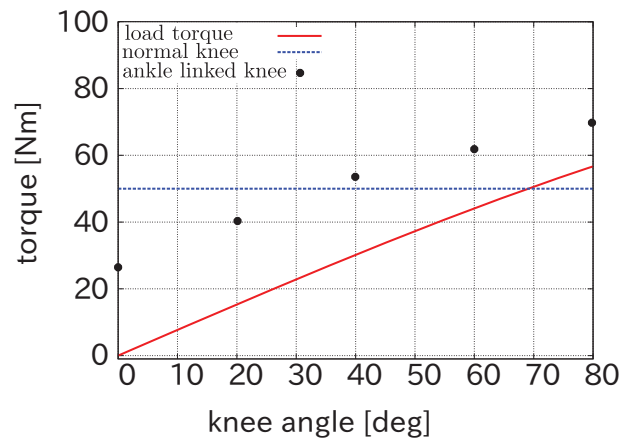


Fig.11 Load torque and stalling torque at knee with respect to the bending angle

参考文献

- [1] 森田寿郎, 鈴木雄一郎, 川崎毅彦, 菅野重樹. 人間共存ロボットマニピュレータの衝突安全設計と制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 1, pp. 102-109, 1998.
- [2] M. Okada, T. Shinohara, T. Gotoh, S. Ban, and Y. Nakamura. Double spherical joint and backlash clutch for lower limbs of humanoid. 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422), Vol. 1, pp. 491-496, 2003.
- [3] 鈴森康一. ロボットとアクチュエータのバックドライバビリティ. 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 6, 2013.
- [4] S. Shirata, A. Konno, and M. Uchiyama. Design and evaluation of a gravity compensation mechanism for a humanoid robot. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3635-3640, 2007.
- [5] 東田直樹, 他. 膝と足首の連動により変速する人型ロボットの足関節機構. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, pp. 2A2-p08.
- [6] 東田直樹, 舛屋賢, 杉原知道. 2 関節連動変速リンク機構, 2015. 特願 2015-098610.
- [7] 銅冶英雄, 村田淳, 浅野由美, 守屋秀繁, 吉永勝訓. 足部運動表示における内がえし (inversion) / 外がえし (eversion) の定義. The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine, Vol. 44, No. 5, pp. 286-292, 2007.
- [8] 庄司道彦, 王志東, 高橋隆行, 中野栄二. 二脚ロボットの佇立能力向上のための足構造. バイオメカニクス学会誌, Vol. 25, No. 1, pp. 36-42, 2001.
- [9] 佐野明人, 古荘純次. 最適レギュレータを用いた二足歩行ロボットの動的制御. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 54, No. 504, pp. 1804-1811, 1988.
- [10] A. I. Kapandji. カパンジー機能解剖学下肢, pp. 124-127. 医歯薬出版, 2010.