

# ヒューマノイドの全身を使った物体持ち上げ動作の実現

## Lifting by Whole Body Motion of Humanoid

○正 有隅 仁, シルバン ミオセック, ジャンレミ シャルドネ, 正 横井一仁 (産総研)

\*Hitoshi ARISUMI, Sylvain MIOSSEC, Jean-Rémy CHARDONNET, Kazuhito YOKOI (AIST/CNRS)  
h-arisumi@aist.go.jp

A motion control method of lifting a heavy object up to a higher position by humanoid robots is developed. Key issue of lifting motion is how to reduce the load on humanoid arms in which lowed power actuators are implemented. The use of singular postures of arms is well-known to avoid actuator saturation of the arms. We propose a motion planner based on optimization method with making better use of actuator's characteristics. By combining two different kinds of humanoid motions such as accelerating an object upward and sliding the body into under the object, we show that the method enables to transit one singular posture of arms to another while lifting the object. We verify the effectiveness of the proposed method for reducing the load on the arms through simulation and experiment

**Key Words:** Humanoid robot, Dynamic whole body manipulation, ZMP, Lifting

### 1. 緒言

ヒューマノイドロボットによる物体持ち上げ動作について、これまでにロボットの姿勢を制御して静的に物体を持ち上げる方法[1]-[3]などが提案されているが、静的に持ち上げることが困難な場合[4]を考慮していない。一方、我々は持ち上げ開始時に系が静的には不安定になる場合を取り上げ、ロボット全身の予備動作による反動を利用して動的に物体を持ち上げる方法を提案している[4]。本論文ではロボットの出力限界により静的には不安定となる物体操作を取り上げる。具体的には、まず、腕などの低出力部の飽和を回避するために特異姿勢の近傍の姿勢を取って外力を受けるロボットの初期・最終姿勢を検討する。次に、アクチュエータの出力特性を効果的に利用して、図 1 に示すように物体の姿勢を反転させながら頭上の高い位置へ物体を動的に持ち上げる動作の実現方法について検討する。

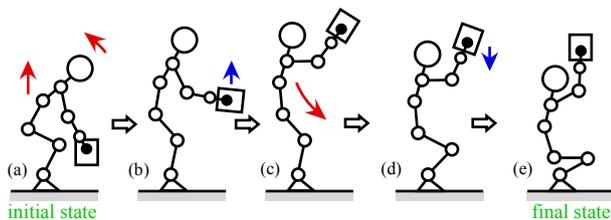


Fig. 1. Target motion

### 2. 運動生成

#### 2.1 モデル

本論文では左右対称となる物体持ち上げ動作を対象とし、ヒューマノイドロボットを鉛直面内を運動する 7 関節 8 リンク機構にモデル化する。図 2 に示すように床面上に  $x$  軸を、両足首中心を通る鉛直面上に  $z$  軸を置く座標系を設定する。また、 $J_i$  は関節  $i$  を、 $\phi_{obj}$  は物体の姿勢で水平線からハンドまでの角度を、 $F_h$  は手先に加わる外力をそれぞれ表す。ロボットと物体の質量を  $m_{rob}$  と  $m_{obj}$ 、重力加速度を  $g$  と表す。なお、物体の質量中心は両把持点の midpoint にあるとする。

#### 2.2 アクチュエータの出力特性

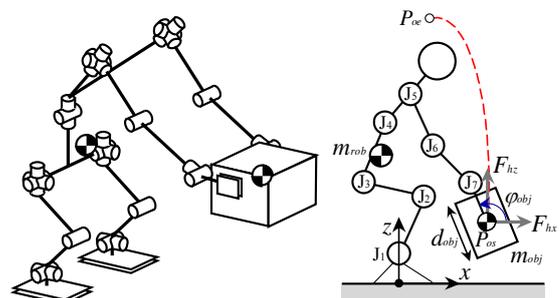
ロボットの関節駆動に広く用いられるアクチュエータとして DC モータを想定したとき、その出力は一般にトルクと回転速度の従属関係によって制限される。具体的には、入力電圧の制限と電機子電流の制限から以下の式によって DC モータ

の出力可能範囲が得られる[5]。

$$|\dot{\theta} / \dot{\theta}_{max} + \tau / \tau_{max}| < 1 \quad (1)$$

$$|\tau| < \tau_{max} \quad (2)$$

ただし、 $\dot{\theta}$  と  $\tau$  はそれぞれ発生回転速度と発生トルクを、 $\dot{\theta}_{max}$  と  $\tau_{max}$  はそれぞれ回転速度とトルクの最大値を示す。なお、一般に DC モータでは出力の最大値を継続的に発生できる時間は極めて短いことに注意されたい。本論文では、最大出力を発生できる継続時間を  $\Delta t_{mot}$  と表す。



(a) 30-d.o.f. model  
(b) 8 link-model  
Fig. 2. Humanoid robot model.

#### 2.3 手先可動領域

物体持ち上げの初期・最終状態では物体を静的に保持する必要がある。ここでは、アクチュエータの出力制限を考慮した静的安定な手先可動領域 SsRS [6]について述べる。

ロボットに一定な外力  $F$  が加わるとき、以下の条件、

- 1) 関節トルクが定格トルク範囲内にある。
- 2) 系全体の重心の床面への射影が安定領域内に含まれる。
- 3) ロボットと物体との幾何学的干渉がない。
- 4) 各関節角が可動範囲に含まれる。

を全て満たす関節角ベクトルが存在する場合の手先位置の集合を手先可動領域 SsRS と定義する。

条件 1)の判定に際しては、外力  $F$  を静的に支える関節トルクを導出する次式を用いる。

$$\tau = G(\theta) - J^T F \quad (3)$$

ここで、 $G(\theta)$  は自重を支えるトルク、 $J$  はヤコビ行列である。式(3)により関節角ベクトル $\theta$ を与えると、外力 $F$ に対するトルク $\tau$ が求まる。なお、物体を静的に保持するためには、導出された関節トルクが式(2)で示す最大値による制限ではなく定格トルクによる制限を満たさなければならないことに注意されたい。物体を静的に把持する手先の初期・最終位置は静的安定な手先可動領域から選ぶことができる。

## 2.4 目標軌道

動的な持ち上げ動作は、関節軌道を適当な関数で表し評価関数を最小とする最適制御法によって導出される。

<動力学モデル>

ヒューマノイドロボット HRP-2 の全身動力学モデルは CAD モデルから得られた機構定数によって構築する。ある関数で表す関節運動を実現する関節トルクは逆運動学により算出する。また、モデルには各関節のクーロン・粘性摩擦が考慮されており、その摩擦係数は実験的に同定した。

<パラメータ>

実行可能な持ち上げ動作は無数にあるため、本論文では関節空間を次式のような B スプライン関数で表現する。

$$\theta_j(p, t) = \sum_{i=0}^{n_b} p_{ij} B_i(t) \quad (4)$$

ここで、 $p$  は B スプライン変数、 $B_i(t)$  は B スプライン基準関数、 $n_b$  は関節に対する B スプライン基準関数の数である。

<制約条件>

節 2.3 で示した制約条件 3), 4)に加えて以下の条件を満たす必要がある。

- 1) 関節トルクが式(1),(2)で与えられる最大トルク範囲内にある。ただし、手首に内蔵された力センサの破壊を防ぐため手首に関しては力センサの許容最大力・トルク範囲内とする。
- 2) 系全体の ZMP が安定領域内に含まれる。
- 3) 初期から最終状態までの動作時間が $\Delta t_{mot}$ 以内である。
- 4) 足底が浮かず、かつ滑らない。

<最適化>

持ち上げ動作において、アクチュエータの電気的なエネルギー消費ならびに力学的エネルギーを最小とすることを考慮して、評価関数を次式で与える。

$$E_{rob} = \int_0^{t_f} \sum c_j \tau_j^2 + \dot{\theta}_j \tau_j dt \quad (5)$$

ここで、 $c_j$  はアクチュエータ特性に関する係数である。以上より評価関数を最小化する最適化問題は次式のように定式化できる。

$$\begin{aligned} \min_{p, t_f} E_{rob}(p, t_f) \\ \text{subject to } & g_{eq}(p, t_f) = 0 \\ & g_{ineq}(p, t_f) < 0 \end{aligned} \quad (6)$$

なお、この制約付き最適化問題に対して内点法を用いたプログラム IPOPT[7]により解を算出する。演算速度を向上させるために、 $p$  と  $t_f$  に関する評価関数と制約条件の勾配の計算をプログラムに組み込んだ。

## 3. シミュレーション

### 3.1 静的安定な手先可動領域

図 1 のように物体を持ち上げる際、手先の姿勢と共に物体の姿勢が上下逆さまになる。最低出力の手首での出力飽和を回避可能な物体の初期・最終姿勢 $\phi_{obj}=90\text{deg}, -90\text{deg}$ について静的安定な手先可動領域 SsRS を求める。節 2.3 で示した方法により求めた結果を図 3 に示す。ただし、高速な全身運動に対する安定性を高めるために、系全体の重心の床面への射影を座標原点に置く。図中の領域は  $m_{obj}$  が 8.36kg、 $d_{obj}$  が 0.3m のときの SsRS を示す。また、上方の領域は $\phi_{obj}=-90\text{deg}$ のとき、下方の領域は $\phi_{obj}=90\text{deg}$ のときの SsRS を表す。また、物体姿勢 $\phi_{obj}=45, 180, -45\text{deg}$  は、初期姿勢から最終姿勢までの間にあるが、これらの姿勢の SsRS を求めると領域が存在しない。したがって、下方領域から上方領域へ物体を反転させながら静的に持ち上げることができないことが分かる。そこで、下方領域から上方領域への動的な物体持ち上げを検討する。

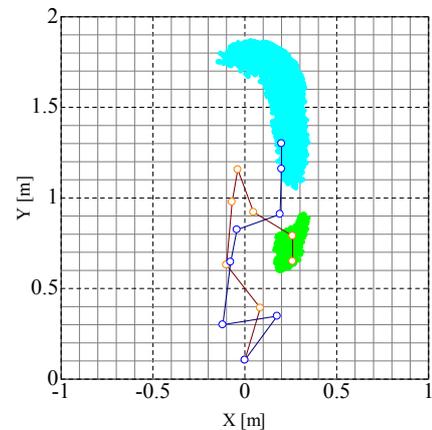


Fig. 3. Static stable reachable space of the robot

### 3.2 動的な物体持ち上げ

ここでは HRP-2 用に開発された動力学シミュレータを用いて動的な物体持ち上げ動作のシミュレーションを行う。前節で求めた図 3 で示す SsRS の中から特異姿勢ならびに出力分配を考慮して、ロボットの初期・最終状態を図 3 のスケルトンのように与える。また、初期・最終状態における関節角速度は全て零とする。なお、手首の力センサの耐性を考慮したときの力の許容値を、x 軸方向に対して 100N、z 軸方向に対して 200N、y 軸まわりのモーメントに対して 5Nm とする。

前章の最適化法によって得られた持ち上げ動作における全関節の出力を図 4 の青色の曲線に示す。同図の横軸は各関節の角速度、縦軸はトルクを示す。また、黒線の多角形は文献[8]が示すデータをもとに式(1),(2)より得られる最大出力範囲を、括弧内の数字は関節番号をそれぞれ示す。同図が示すように、全関節が最大出力範囲内で動作していることが分かる。特に、腕の特異姿勢を利用する戦略をとっているため、手首や肘などの出力が他の関節に比べて小さく抑えられている。なお、持ち上げ動作の稼働時間は 1.68s で制約時間 $\Delta t_{mot} (=2\text{s})$ より小さい値である。以上より、得られた持ち上げ動作では、全関節アクチュエータの出力が飽和しないことが分かった。

次に、物体を持ち上げている間の手先にかかる力とモーメントの時間的な変化を図 5 に示す。図中の赤線は絶対座標系の x,z 軸方向の力  $F_{hx}, F_{hz}$ 、y 軸まわりのモーメント  $M_{hy}$  を示している。また、各グラフ内の 2 本の破線は持ち上げ開始と終了時刻を示している。z 軸方向の力を見ても、約 3.6 秒後から大きく正の方向に変化している。これは持ち上げ開始か

らこの時間までに高出力関節によって物体が上方へ加速されたため、手先の負荷が減少したことを表している。図 5 より  $F_{hx}$ 、 $F_{hz}$ 、 $M_{hy}$  の全てに関して力覚センサの許容値を超えないことが分かる。さらに、ZMP の時間変化を図 6 の赤線に示す。上方の破線は爪先、下方の破線は踵の位置を示す。図示するように ZMP は足底で構成される安定領域内で変化するため、転倒が起きないことが分かる。同図では、ZMP が終端時間あたりで大きく変化している。これは物体を終端位置に静止させるときに受ける撃力による影響であると考えられる。しかし、この影響によるロボットの振動は HRP-2 の安定制御器を用いることによって短期間で収束することが分かる。

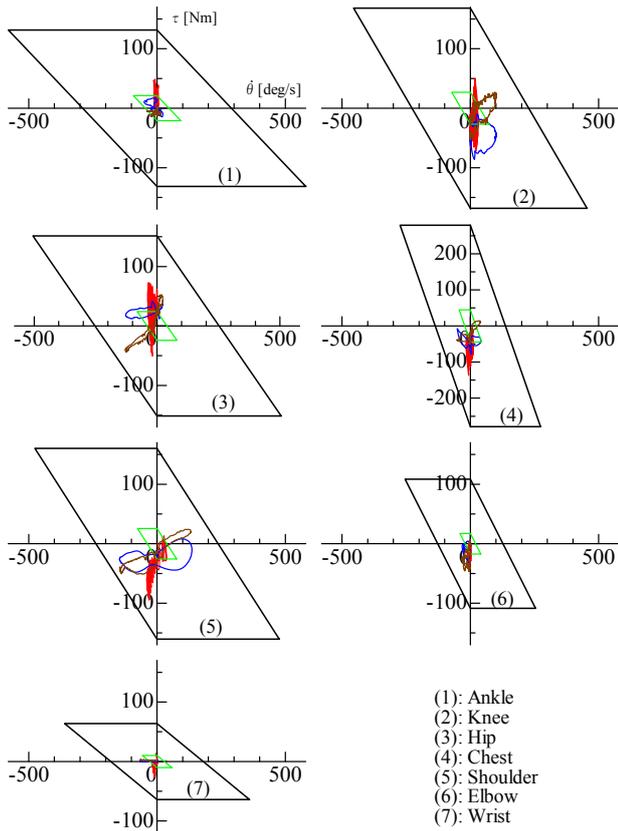


Fig. 4. Angular velocity-torque diagram.

図 7 に動力学シミュレータ[9]を用いて持ち上げ動作のアニメーション結果を示す。同図 1)から 2)までの間にロボットが上後方に動いて物体を上方へ加速し、物体が速度を得た後にロボットが物体の下に潜り込むように移動していることが分かる。また、ロボットは転倒することなく、腕を伸ばした状態に近い最終姿勢に到達していることが分かる。

### 3.3 静的な物体持ち上げ

ここでは、比較のために前節で得た動的な持ち上げ動作を静的に行う。具体的には、動的な動作に用いた軌道の時間軸を5倍に延ばした軌道を実行させる。図 4 の赤線はそのときの各関節アクチュエータの出力を示す。この動作に必要な時間は、アクチュエータの最大出力が発生可能な許容時間  $\Delta t_{mot}$  を超えるため、図 4 の赤線で示す出力曲線は緑線で示す定格出力範囲になければならない。しかし、全ての関節が定格出力範囲を超えているため、アクチュエータの出力飽和が起きていることが分かる。よって、前節で得た動的な持ち上げ動作は静的には実行できないことが示された。

以上より、静的に移動できない領域を動的に移動する提案手法が重量物体の持ち上げに有効であることが示された。

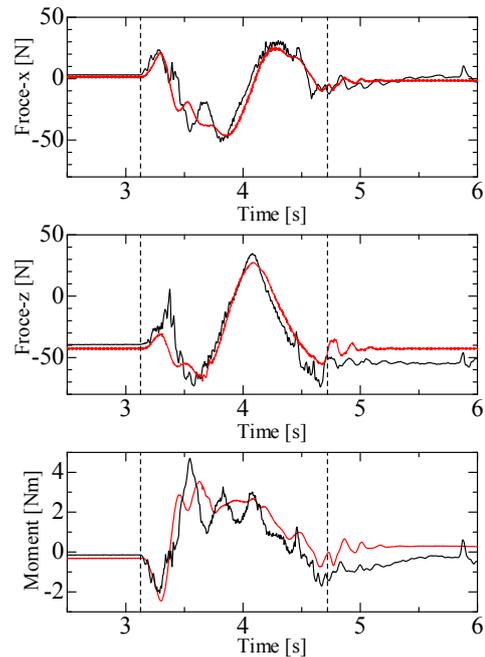


Fig. 5. External force at the hand

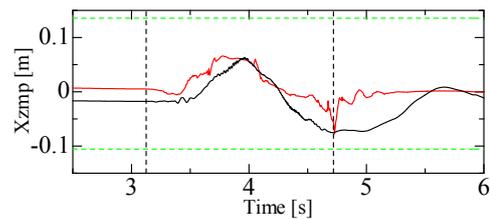


Fig. 6. ZMP of the whole system

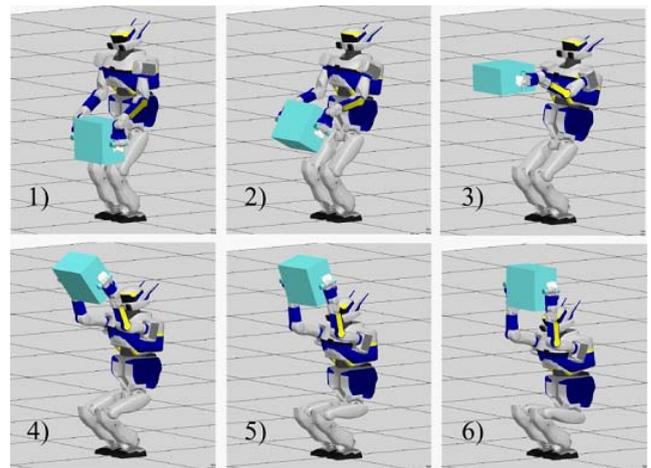


Fig. 7. Animation. 1) initial state, 2) accelerating the object upward, 3) switching motion, 4) sliding into under the object, 5) crouching, 6) final state(sitting)

## 4. 実験

ヒューマノイドロボット HRP-2 (Kawada Inc.) を用いて、シミュレーションと同様の動作を扱う実験を行った。HRP-2

は高さ 1.539m、重さ 55.3kg の 30 自由度ロボットである。図 8 に実験の様子を示す。図 7 に示すアニメーションに類似した動作が実現されていることが分かる。

また、図 4 の茶色の曲線はアクチュエータ出力の実験結果を示している。同図のシミュレーション結果と比較すると、一部が類似した形状ではないが、各関節の出力の大きさの相対的な違いを比較すると、同じような傾向にあることが分かる。特に、手首や肘のような低出力関節の出力は他の関節に比べて小さくなるように制御されている。

図 5 の黒線は手先にかかる力とモーメントの時間的な変化を示している。これらは、手首に内蔵された力センサの情報を手先に変換して得た値である。力センサによるノイズが曲線に現れているが、シミュレーション結果とほぼ一致した変化をしている。図 6 には ZMP の時間的な変化を示す。図示するように、ZMP は爪先と踵で構成する安定領域内で変化している。以上より、物体持ち上げ動作はシミュレーションと類似する結果を伴って実験により実現可能であることが示された。

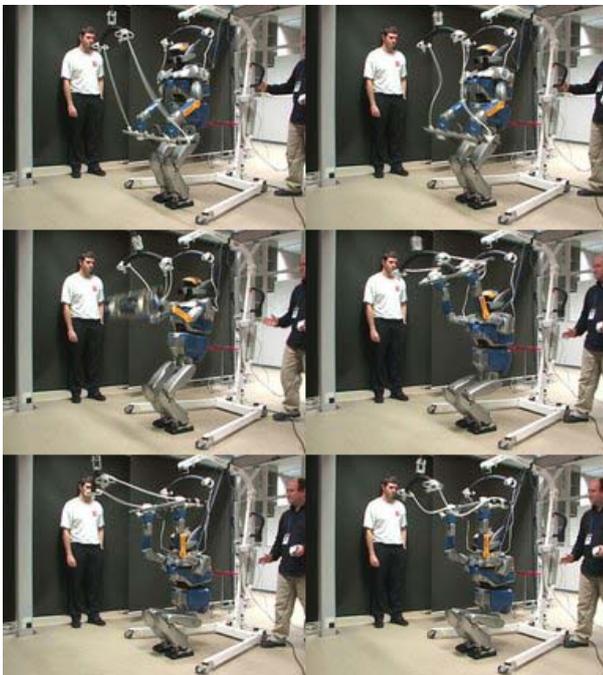


Fig. 8. Dynamic lifting by HRP-2

## 5. 結言

本論文では、低出力部位である腕の負荷を軽減して腕をある特異姿勢近傍から他の特異姿勢近傍へ遷移させることに着目し、重量物をより高い位置へ動的に持ち上げる方法について検討した。まず、アクチュエータの出力限界などの拘束条件から静的に物体を把持できる領域を導出し、特異姿勢と出力分配を考慮して初期・最終姿勢を選ぶ方法を示した。次に、最適化法を用いて出力特性を考慮した動的な持ち上げ動作に関する計画法を示した。さらに、シミュレーションならびに実験により、高出力部位である腰・脚を用いて物体を加速する動作ならびに、ロボットが物体の下に潜り込む動作を組み合わせることで物体の姿勢を反転させながら頭上まで持ち上げる動作を実現した。

## 参考文献

- [1] K. Harada, S. Kajita, H. Saito, M. Morisawa, F. Kanehiro, K. Fujiwara, K. Kaneko, and H. Hirukawa, "A Humanoid Robot Carrying a Heavy Object", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1724-1729, 2005
- [2] M. Onishi, Z.W. Luo, T. Odashima, S. Hirano, K. Tahara, T. Mukai, "Generation of Human Care Behaviors by Human-Interactive Robot RI-MAN," Proc. of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.126-127, April 2007.
- [3] Y. Ohmura, Y. Kuniyoshi, "Humanoid Robot which can Lift a 30kg Box by Whole Body Contact and Tactile Feedback," Proc. of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007.
- [4] 有隅, 横井, "ヒューマノイドによる全身を使った物体の持ち上げ動作", 第12回ロボティクスシンポジウム, pp.14-20, 2007.
- [5] Arisumi, H., Yokoi, K., Komoriya, K., "Dynamic Performance Characterization of Manipulators under Actuator Constraints," Proc. of the International Conference on Recent Advances in Mechatronics (ICRAM'95), pp.1042-1047, 1995
- [6] Arisumi, H., Chardonnet, J-R., Kheddar, A., and Yokoi, K., "Dynamic Lifting Motion of Humanoid Robots," Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'07), pp. 2661- 2667, 2007.
- [7] S. Miossec, K. Yokoi, A. Kheddar, "Development of a software for motion optimization of robots - Application to the kick motion of the HRP-2 robot", Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2006.
- [8] K. Akachi, T. Isozumi, M. Hirata, S. Ohta and M. Ishizaka, "Development of the Humanoid Robot, HRP-2," KAWADA Technical Report, vol.23, pp. 20-25, 2004.
- [9] J-R. Chardonnet, S. Miossec, A. Kheddar, H. Arisumi, H. Hirukawa, F. Pierrot, K. Yokoi, "Dynamic Simulator for Humanoids Using Constraint-Based Method with Static Friction," ROBIO'06, 2006.