

# 人型ロボットによるモーション・フォース制御における 足部の接触条件を考慮した最適化制御

村松雄基 大川涼平 横山遼 金宮好和 佐藤大祐 (東京都市大学)

## 1. 緒言

我々はモーション・フォース制御と重心位置制御に関する研究を行ってきた．モーション・フォース制御は Khatib ら [1] や吉川ら [2] によって研究が進められてきた．我々は、宇宙用浮遊ベースロボットのために開発された反動零空間法 (Reaction Null-Space : RNS) [3] を人型ロボットに応用し、手先部のモーション・フォース制御を実現してきた．

さらに人型ロボットは劣駆動系であることから重心位置や先端部の制御が行われている．それによって関節空間における冗長運動による干渉が発生する可能性が考えられる．この冗長運動を解決するために最適化制御についての研究も行われてきた．過去の研究において、人型ロボットの最適化制御に関しては関節トルクに対する最適化 [4] や ZMP [5] などを用いたバランス制御における最適化 [6]-[8] などについて研究されている．しかし、先端部でのモーション・フォース制御を伴う場合などについては、十分に研究されていない．さらにそのためにはその先端部に影響を与えない制御が必要になる．

そこで本稿では環境との接触条件を制約条件として扱い、足部の力に対して最適化制御を行っていく．さらに作業部に影響を与えないようにするために、足部の力に対する最適化問題によって算出した目標値を用いた分配制御を提案する．そして、人型ロボット HOAP-2 をモデルとしたシミュレーションによって、提案手法の有用性を検証する．

## 2. 人型ロボットのモーション・フォース制御

本稿では、図 1 に示す人型ロボット HOAP-2 のシミュレーションモデルを用いる．図 1 のモデルでは腰部をベース部 (B 部) とし、手先部 (H 部) と足部 (F 部) を各先端部とする独立した固定マニピュレータとして扱う．

### 2.1 人型ロボットの運動方程式

人型ロボットの全身における運動方程式を次式に示す．

$$\begin{bmatrix} M_B & M_{Bl} \\ M_{Bl}^T & M_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_B \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_B \\ c_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_B \\ g_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_B \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_F \\ J_F^T \end{bmatrix} F_F + \begin{bmatrix} P_H \\ J_H^T \end{bmatrix} F_H \quad (1)$$

各項について次に示す．

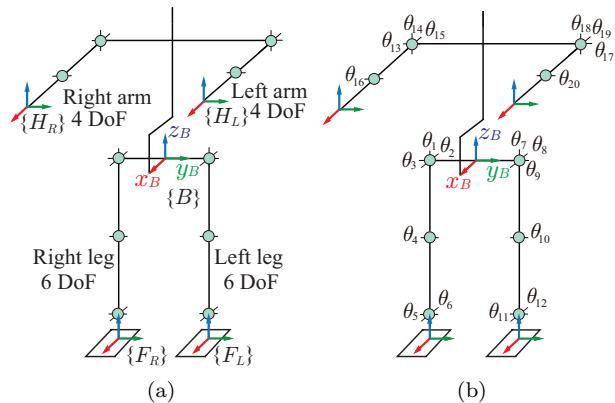


図 1 シミュレーションモデル (HOAP-2)

$M_B$	$\in \mathbb{R}^{6 \times 6}$	: B 部回りの系全体の慣性行列
$M_l$	$\in \mathbb{R}^{20 \times 20}$	: リンク部の慣性行列
$M_{Bl}$	$\in \mathbb{R}^{6 \times 20}$	: B 部とリンク部の干渉慣性行列
$C_B$	$\in \mathbb{R}^6$	: B 部回りの系全体の非線形項
$c_l$	$\in \mathbb{R}^{20}$	: リンク部の非線形項
$g_B$	$\in \mathbb{R}^6$	: B 部回りの系全体の重力項
$g_l$	$\in \mathbb{R}^{20}$	: リンク部の重力項
$v_B$	$\in \mathbb{R}^6$	: B 部のツイスト
$\theta$	$\in \mathbb{R}^{20}$	: リンク部の関節角度
$F_B$	$\in \mathbb{R}^6$	: B 部に加わる力とモーメント
$F_F$	$\in \mathbb{R}^{12}$	: F 部に加わる力とモーメント
$F_H$	$\in \mathbb{R}^{12}$	: H 部に加わる力とモーメント
$J_F$	$\in \mathbb{R}^{12 \times 20}$	: B 部から F 部までのヤコビ行列
$J_H$	$\in \mathbb{R}^{12 \times 20}$	: B 部から H 部までのヤコビ行列

次に B 部と各先端部にかかる力の関係を示す Pose Matrix を以下に示す． $P_{if}$ , ( $i = F, H$ ) は  $i$  部にかかる力を B 部へ変換する行列,  $P_{im}$  は  $i$  部にかかるモーメントを B 部へ変換する行列である．

$$P_{if} = \begin{bmatrix} I_3 & I_3 \\ r_{iR}^\times & r_{iL}^\times \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}, \quad P_{im} = \begin{bmatrix} 0_3 & 0_3 \\ I_3 & I_3 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$$

式中,  $r_{iR}$ ,  $r_{iL}$  は B 部から ( $i$ ) 部のそれぞれ右側と左側への位置ベクトル,  $(\circ)^\times$  は歪み対称行列,  $I_j \in \mathbb{R}^{j \times j}$  は単位行列とする．そして今回利用する行列を以下に示す．

$$\begin{aligned} P_F &= [P_{Ff} \ P_{Fm}] \in \mathbb{R}^{6 \times 12} \\ P_f &= [P_{Ff} \ P_{Hf}] \in \mathbb{R}^{6 \times 12} \\ P_m &= [P_{Fm} \ P_{Hm}] \in \mathbb{R}^{6 \times 12} \end{aligned}$$

### 2.2 運動量変化率を用いた重心位置制御

重心位置制御を行っていくために、運動量とベース部回りの角運動量を制御に用いる．式中,  $M_{BBl} =$

$[M_B \ M_{Bl}] \in \mathbb{R}^{6 \times 26}$  として,  $[\dot{\mathbf{v}}_B^T \ \ddot{\boldsymbol{\theta}}^T]^T$  の指令値を求める.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_B^{ref} \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}}^{ref} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{BBl}^+ (\dot{\mathcal{L}}^{ref} - \mathcal{C}_B + \mathcal{F}_B) + (\mathbf{I}_{26} - \mathbf{M}_{BBl}^+ \mathbf{M}_{BBl}) \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_{Bn} \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}}_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $(\circ)^+$  は擬似逆行列を示し,  $\mathcal{L} = [\mathbf{p}^T \ \mathbf{l}_b^T]^T \in \mathbb{R}^6$  とし,  $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$  は並進運動量,  $\mathbf{l}_b \in \mathbb{R}^3$  はベース部回りの角運動量とする. また  $\dot{\mathbf{v}}_{Bn} \in \mathbb{R}^6$  は  $B$  部のツイストに関する任意のベクトル,  $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_n \in \mathbb{R}^{20}$  は関節角加速度に関する任意のベクトルとする. 次に運動量変化率および  $B$  部回りの角運動量変化率の指令値  $\dot{\mathbf{p}}^{ref}$ ,  $\dot{\mathbf{l}}_b^{ref}$  について示す. ただし  $B$  部回りの角運動量は運動量に依存するため, 運動量と  $B$  部回りの角運動量を独立に制御することができない. このことから, 重心回りの角運動量を用いてフィードバックを行う.

$$\dot{\mathbf{p}}^{ref} = m\ddot{\mathbf{r}}_c^{des} + m\mathbf{K}_{dv}\dot{\mathbf{r}}_c^{err} + m\mathbf{K}_{pv}\mathbf{r}_c^{err} \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{l}}_b^{ref} = \dot{\mathbf{l}}_c^{des} + \mathbf{K}_{d\omega}\dot{\mathbf{l}}_c^{err} + m\dot{\mathbf{r}}_{bc} \times \dot{\mathbf{r}}_c + m\mathbf{r}_{bc} \times \ddot{\mathbf{r}}_c \quad (4)$$

式中,  $m$  はロボットの質量,  $\mathbf{r}_c$  は重心位置,  $\mathbf{r}_{bc}$  はベース部から見た重心位置,  $\mathbf{l}_c \in \mathbb{R}^3$  は重心回りの角運動量とし,  $(\circ)^{err} \in \mathbb{R}^3$  は  $(\circ)$  の目標値  $(\circ)^{des}$  と現在値  $(\circ)$  の誤差を,  $\mathbf{K}_{dv}$ ,  $\mathbf{K}_{pv}$ ,  $\mathbf{K}_{d\omega} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  はゲイン行列をそれぞれ示す.

### 2.3 対象物に対するモーション・フォース制御

本節では人型ロボットに作業を行わせるための対象物への力制御について示す. 現手法で力制御をするためには内力および内モーメントを用いる. ここでは, 内力および内モーメントを, 各先端部に作用する力およびモーメントにおいてベース部に影響を与えない成分とする. 各先端部の力およびモーメントと内力および内モーメントの関係を次式に示す [9][10].

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_{FH} \\ \mathbf{m}_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_f^+ & \mathbf{E} & -\mathbf{P}_f^+ \mathbf{P}_m \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{F}_{imp} \\ \mathbf{f}_I \\ \mathbf{m}_I \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{f}_I \in \mathbb{R}^6$  は内力,  $\mathbf{m}_I \in \mathbb{R}^{12}$  は内モーメント,  $\mathcal{F}_{imp} \in \mathbb{R}^6$  は各先端部から  $B$  部に対する合力および合モーメント,  $\mathbf{f}_{FH}, \mathbf{m}_F \in \mathbb{R}^{12}$  は先端部にかかる力とモーメント,  $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{12 \times 6}$  は各先端部の内力の関係を示す行列をそれぞれ示す. ここで,  $\mathcal{F}_{imp}$  は  $B$  部における運動量および角運動量変化率と重力項を補償していると考えられるため,  $\mathcal{F}_{imp} = \dot{\mathcal{L}}^{ref} + \mathcal{G}_B$  と変換できる.  $\mathbf{f}_I, \mathbf{m}_I$  を用い, 次式によって  $H$  部の力制御を実現する.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_I^{ref} \\ \mathbf{m}_I^{ref} \end{bmatrix} = \mathbf{G}_H^+ \left\{ \mathbf{S}_H \mathcal{F}_H^{ref} - \left[ \mathbf{P}_f^+ (\dot{\mathcal{L}}^{ref} + \mathcal{G}_B) \right]_H \right\} + (\mathbf{I}_{12} - \mathbf{G}_H^+ \mathbf{G}_H) \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{In} \\ \mathbf{m}_{In} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathcal{F}_H^{ref} = \mathcal{F}_H^{des} + \mathbf{K}_{Hf}(\mathcal{F}_H^{des} - \mathcal{F}_H)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & -\mathbf{P}_f^+ \mathbf{P}_m \end{bmatrix}$$

式中,  $\mathbf{f}_{In}$  は内力に関する任意のベクトル,  $\mathbf{m}_{In}$  は内モーメントに関する任意のベクトルとする. また  $\mathbf{S}_H \in \mathbb{R}^{12 \times 12}$  により,  $H$  部の運動と力の制御軸を直交化している.  $[\circ]_H$  は  $[\circ]$  から  $H$  部に関する項を抜き出した行列およびベクトルである. 式 (5) に式 (6) を代入することで, 各先端部の力とモーメントを求める. また先端部の運動は, 式 (2) における右辺第二項の  $\mathbf{M}_{BBl}$  の零空間の項を用いて制御する.

$$\dot{\mathbf{v}}_{Bn}^{ref} = \mathbf{0} \quad (7)$$

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_n^{ref} = \mathbf{M}_l^{-1} \mathbf{J}_H^T \mathbf{S}_H^\perp \mathbf{M}_H \dot{\mathbf{v}}_H^{ref} - \mathbf{K}_d \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{v}}_H^{ref} = \dot{\mathbf{v}}_H^{des} + \mathbf{K}_{Hv} \mathbf{v}_H^{err} + \mathbf{K}_{Hp} \mathbf{x}_H^{err}$$

$$\mathbf{M}_H = (\mathbf{J}_H \mathbf{M}_l^{-1} \mathbf{J}_H^T)^{-1}$$

式中,  $\mathbf{v}_H \in \mathbb{R}^6$  は  $H$  部のツイスト,  $\mathbf{x}_H \in \mathbb{R}^6$  は  $H$  部の位置,  $\mathbf{K}_{Hv}$ ,  $\mathbf{K}_{Hp} \in \mathbb{R}^{12 \times 12}$  および  $\mathbf{K}_d \in \mathbb{R}^{20 \times 20}$  はゲイン行列をそれぞれ示す. 以上により, バランス制御に対するサブタスクとして, 先端部の制御を実現する. そして, この得られた各先端部の力と, 式 (2) によって得られた指令値と, 式 (1) 中のリンク部の運動方程式から, 次式に示すように関節トルク指令値を算出する.

$$\boldsymbol{\tau}^{ref} = \mathbf{M}_{Bl}^T \dot{\mathbf{v}}_B^{ref} + \mathbf{M}_l \ddot{\boldsymbol{\theta}}^{ref} + \mathbf{c}_l + \mathbf{g}_l - \mathbf{J}_F^T \mathcal{F}_F^{ref} - \mathbf{J}_H^T \mathcal{F}_H^{ref} \quad (9)$$

## 3. 足部の力の最適化制御

### 3.1 力の分配制御

本節では, 後述する最小化問題によって算出した力の目標値を用いた分配制御について述べる. そのため, 式 (6) において  $\mathbf{m}_{In} = \mathbf{0}$  とする. 足部の力の分配制御を行う際に, ベース部および作業を行う手先部に影響を与えてはならない. そのため, 式 (6) における  $\mathbf{G}_H$  に関する零空間の項を用いて, 第二のサブタスクとして足部の力に対して補償するようにして分配制御を行う. はじめに式 (6) の第二項を除いて算出した内力および内モーメントを  $\mathbf{f}_I^{nd}$ ,  $\mathbf{m}_I^{nd}$  とし,  $\mathbf{f}_I^{nd}$  は最小化問題によって目標値  $\mathbf{f}_I^{des}$  を算出するために用いる. そして, 次式より新たに指令値を算出する.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_{FH}^{ref} \\ \mathbf{m}_F^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{FH}^{nd} \\ \mathbf{m}_F^{nd} \end{bmatrix} + (\mathbf{I}_{12} - \mathbf{G}_H^+ \mathbf{G}_H) \begin{bmatrix} \mathbf{E}_F^+ (\mathbf{f}_F^{des} - \mathbf{f}_F^{nd}) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

式中,  $\mathbf{E}_F \in \mathbb{R}^{6 \times 12}$  は  $\mathbf{E}$  の足部に関する項を取り出した行列を示す.

### 3.2 非線形制約付き最小化問題による力目標値の算出

本節では, 力の分配制御を行うために用いる目標値の算出方法について示す. 本手法では, 足部と接触面との間の接触条件を考慮して, 反復法を用いた最小化問題を解くことによって目標値を算出する. ただし, 今回は水平方向の接触面における接触条件のみを考慮する. 次式に最小化問題で用いる目的関数と制約条件を示す.

## 目的関数

$$f(f_F) = f_F^T f_F \quad (10)$$

## 制約条件

$$g(f_F) = f_{FR} + f_{FL} - (f_{FcR} + f_{FcL}) = \mathbf{0} \quad (11)$$

$$h(f_F) = [h_1(f_{FR}), h_2(f_{FL})]^T \quad (12)$$

$$h_i(f_{F_k}) = \sqrt{f_{F_{kx}}^2 + f_{F_{ky}}^2} - \mu_s f_{F_{kz}} \leq 0$$

式中,  $i = 1, 2$ ,  $k = R, L$ ,  $\mu_s$  は静止摩擦係数を示す. また時刻  $t$  として,  $f_F$  について反復計算の開始時は,  $t = 0$  の時  $f_F = f_F^{nd}$  とし, それ以外は 1 サンプリグ時間前に算出した  $f_F^{des}$  を用いる.  $f_{FR}$  および  $f_{FL}$  はすべての時間において  $f_F^{nd}$  を用いる. 人型ロボットの制御のようにサンプリグ時間が小さい制御において急激な変化を伴う動作を行わない場合, 1 サンプリグ時間前のデータと現時刻の指令値が大きく変化しないと仮定できる. これにより, 反復計算の回数を減らした場合でも最適解に収束することができる.

次に上記の条件式を用いる最小化問題の解法を示す [11]. 式 (10)-(12) に対し, 以下のラグランジュ関数を定義する.

$$L(x) = f(f_F) + \lambda_g^T g(f_F) + \lambda_h^T h(f_F) \quad (13)$$

式中,  $\lambda_g \in \mathbb{R}^3$ ,  $\lambda_h \in \mathbb{R}^2$  は式 (11) および式 (12) の制約条件に対するラグランジュ乗数を示し,  $x = [f_F^T, \lambda_g^T, \lambda_h^T]^T$  とする. これを定義したとき, ラグランジュ関数の最適性に示す条件 (Karush-Kuhn-Tucker 条件: KKT 条件) を満たす点 (KKT 点) が制約付き最小化問題の最適解と一致する. KKT 条件のうち, 等式のみを抜き出したものを次式に示す.

$$\begin{bmatrix} \nabla_{f_F} L(x) \\ g(f_F) \\ \Lambda_h h(f_F) - \mu_b e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中,  $\mu_b > 0$  はバリア・パラメータ,  $e = [1, 1]^T$ ,  $\Lambda_h = \text{diag}(\lambda_{h1}, \lambda_{h2})$  をそれぞれ示す. 式 (14) の上段および中段は前述したラグランジュ関数における  $f_F$ ,  $\lambda_g$  に関するそれぞれの勾配を, 下段は  $i = 1, 2$  として式 (12) の制約条件における相補性条件  $\lambda_{h_i} h_i(f_F) = 0$  を  $\lambda_{h_i} h_i(f_F) = \mu_b$  に置き換えたものをそれぞれ示す.  $\mu_b \rightarrow 0$  のとき,  $x$  が KKT 点に近づく. この条件を満たす  $x$  を効率よく算出するために, 次式に示すニュートン方程式を用いて近似解の探索方向を求める.

$$\begin{bmatrix} \nabla_{f_F}^2 L(x) & \nabla g(f_F) & \nabla h(f_F) \\ \nabla g(f_F)^T & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \Lambda_h \nabla h(f_F)^T & \mathbf{0} & \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta f_F \\ \delta \lambda_g \\ \delta \lambda_h \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla_{f_F} L(x) \\ g(f_F) \\ \Lambda_h h(f_F) - \mu_b e \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中,  $\mathbf{H} = \text{diag}(h_1, h_2)$  とする. この探索方向  $\delta x = [\delta f_F^T, \delta \lambda_g^T, \delta \lambda_h^T]^T$  を用いて新たな近似解を算出する. 以上を繰り返し, 閾値  $\epsilon$  に対して  $\mu_b \leq \epsilon$  となった場合, 求めた  $f_F$  を目標値  $f_F^{des}$  として力の分配制御に用い

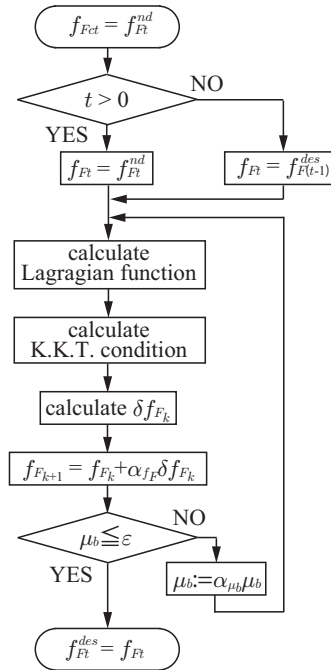


図2 力目標値の算出のフローチャート

る. そうでないなら  $0 < \alpha_{\mu_b} < 1$  として  $\mu_b := \alpha_{\mu_b} \mu_b$  において再度計算する. また, 反復の  $k$  回目において次の近似解  $(\circ)_{k+1}$  を算出するには, 探索方向を用いて次式より求める.

$$f_{F_{k+1}} = f_{F_k} + \alpha_{f_F} \delta f_{F_k} \quad (16)$$

$$\lambda_{g_{k+1}} = \lambda_{g_k} + \delta \lambda_{g_k} \quad (17)$$

$$\lambda_{h_{k+1}} = \lambda_{h_k} + \delta \lambda_{h_k} \quad (18)$$

式中のステップ幅  $\alpha_{f_F}$  の適切な値を求めるには, 直線探索の基準として Armijo 条件を用いる. 今回の最小化問題における Armijo 条件を次式に示す.

$$f(f_{F_k} + \delta f_{F_k}) \leq f(f_{F_k}) + \xi \alpha_{f_F} \nabla f(f_{F_k})^T \delta f_{F_k} \quad (19)$$

式中, 定数  $\xi$  は  $0 < \xi < 1$  とする. 以上のフローチャートを図2に示す. 図中,  $(\circ)_t$  は時刻  $t$  における各データ,  $(\circ)_k$  は反復回数  $k$  における各データを示す.

#### 4. シミュレーション

提案手法による力の分配制御および重心位置制御の有用性を表1に示す性能の計算機にてシミュレーションで検証する. 条件として, シミュレーション時間を 14 s, シミュレーションにおける積分刻み幅を 1 ms とし, 図3に示す初期姿勢とした. その状態において両手先部で  $x$  軸方向に力を加える作業を行わせた. また, 両手先部は壁面と接触していることを模擬するために, 力を加える  $x$  軸方向に対して仮想のばねを設定して反力が発生するようにした.  $F$  部についてはシミュレーション上では床面との摩擦が十分に大きいとし, それによって  $F$  部が動かないと仮定して, ラグランジュの未定乗数法による拘束力を加えた. ただし, 提案手法にて用いる制約条件における静止摩擦係数は後述する値で設定し, 制約条件を満たしているかによってすべりの検証を行う. 慣性座標系は初期姿勢における  $B$  部の座標系と一致するようにした.

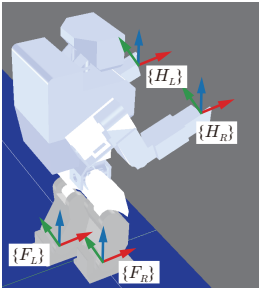


図 3 シミュレーションの初期姿勢

表 1 計算機のパフォーマンス

プロセッサ	メモリ
Intel(R) Core(TM)2 Quad Q9550	4GB

各手先の位置は  $y$  軸および  $z$  軸方向で初期位置にとどまるようにし、各手先の力は  $x$  軸方向に  $0\text{ s}$  から  $8\text{ s}$  の間で  $0\text{ N}$  から  $4.0\text{ N}$  になるように五次補間のスプライン関数の軌道をそれぞれ与え、 $8\text{ s}$  から  $14\text{ s}$  の間は  $4.0\text{ N}$  にそれぞれとどまるようにした。重心位置についても初期値にとどまるように目標値を与えた。また、 $\mu_s = 0.15$ 、初期  $\mu_b = 1.0 \times 10^{-5}$ 、 $\epsilon = 1.0 \times 10^{-5}$ 、 $\xi = 0.5$  とする。最適化制御を行わない場合と行う場合を比較する。

4.1 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 4 に示す。図 4 において (a), (c), (e), (g) は最適化なしの結果、(b), (d), (f), (h) は最適化ありの結果をそれぞれ示す。また、(a), (b) より最適化なしの場合にて不等式制約条件  $h(f_F) \leq 0$  を満たしていない範囲において、最適化ありの場合では条件を満たしていることが確認できる。また、(g), (h) より反復法による実行時間の増加は小さいことが確認できる。以上のことから、提案手法は有用であると言える。

5. 結言

本稿では、人型ロボットによるモーション・フォース制御において、足部の力の最適化制御についてのアプローチを述べた。また、シミュレーションによってその有用性を確認した。しかし、足部のモーメントに対しては考慮しておらず、過大なモーメントが発生した場合はロボットが転倒する危険性が考えられる。今後の課題として、足部にかかるモーメントを考慮した制御に拡張していく。また、実機実験により提案手法を検証していく。

参考文献

[1] O. Khatib: “A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation,” IEEE J. Robot. Autom., vol.3, no.1, pp.43–53, 1987.

[2] T. Yoshikawa: “Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators—description of hand constraints and calculation of joint driving force,” IEEE J. Robot. Autom., vol.3, no.5, pp.386–392, 1987.

[3] D. Nenchev, K. Yoshida, and Y. Umetan: “Introduction of redundant arms for manipulation in space,” in IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots, pp.679–684, 1988.

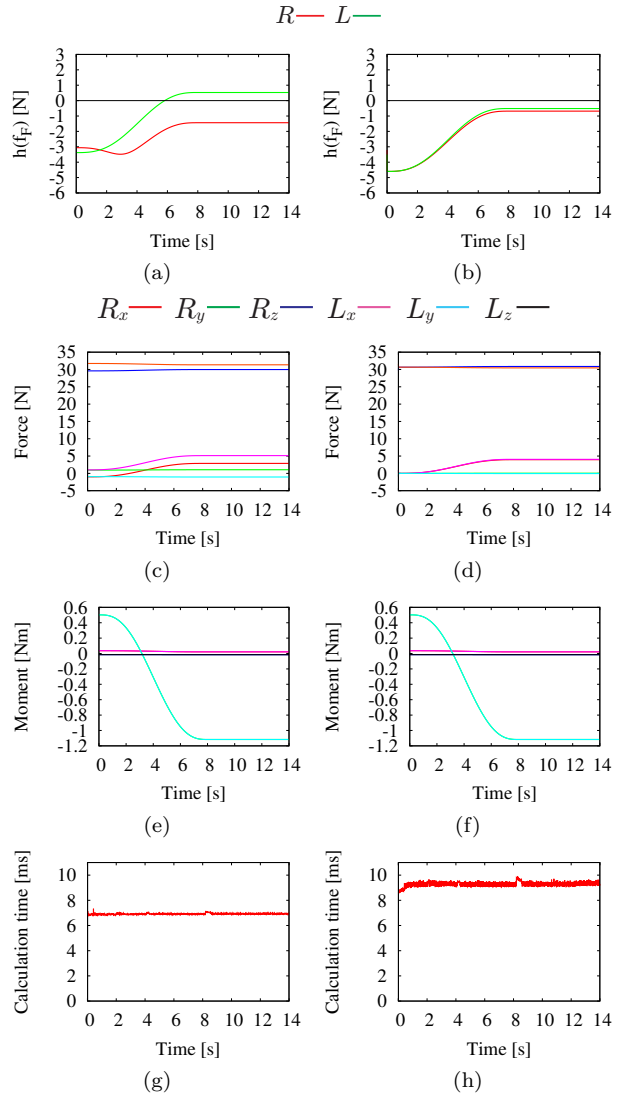


図 4 シミュレーション結果：(a), (b) 不等式制約条件、(c), (d) 足部の力、(e), (f) 足部のモーメント、(g), (h) 実行時間

[4] L. Righetti, J. Buchli, M. Mistry, M. Kalakrishnan, and S. Schaal: “Optimal distribution of contact forces with inverse-dynamics control,” The Int J. Robot. Research, vol.32, no.3, pp.280–298, 2013.

[5] M. Vukobratović and J. Stepanenko: “On the stability of anthropomorphic systems,” Mathematical Biosciences, vol.15, no.1, pp.1–37, 1972.

[6] 玄相晃: “複数の接地部分と冗長関節を有するヒューマノイドロボットの受動性に基づく最適接触力制御,” 日本ロボット学会誌, vol.27, no.2, pp.178–187, 2009.

[7] C. Ott, M. A. Roa, and G. Hirzinger: “Posture and balance control for biped robots based on contact force optimization,” in Humanoid Robots (Humanoids), 2011 11th IEEE-RAS International Conference on. IEEE, pp.26–33, 2011.

[8] S.-H. Lee and A. Goswami: “A momentum-based balance controller for humanoid robots on non-level and non-stationary ground,” Autonomous Robots, vol.33, no.4, pp.399–414, 2012.

[9] D. Williams and O. Khatib: “The virtual linkage: A model for internal forces in multi-grasp manipulation,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp.1025–1030, 1993.

[10] T. Yoshikawa and K. Nagai: “Manipulating and grasping forces in manipulation by multifingered robot hands,” IEEE Trans. Robot. Autom., vol.7, no.1, pp.67–77, 1991.

[11] 矢部 博: “工学基礎 最適化とその応用”, 数理工学社, 2008.