

繰り返し順変換を用いた立脚ロボットにおける持ち上げ動作生成

張 勤 稲葉 昭夫 関 啓明* 足津 正利* 神谷 好承*

Lift-up Motion Generation for Stance Robot using Repeatedly Direct Kinematics

Qin ZHANG Akio INABA Hiroaki SEKI* Masatoshi HIKIZU* Yoshitsugu KAMIYA*

あらまし 多関節構造を有する立脚ロボットのような機械においては、まずロボット本体が転倒しないように、また全関節にかかる負荷トルクができるだけ小さくなるリンク姿勢を選択することが可能である。本研究では立脚ロボットの持ち上げ動作を一例として取り上げ、ロボットが平面から持ち上げ動作、あるいは斜面から持ち上げ動作の生成に伴う各関節の軌道生成に関する考察を試みる。本研究では立脚ロボット（5自由度）のモデルを考察の対象とし、ロボットが転倒しなく、かつ全関節にかかる負荷トルクをできるだけ小さくする姿勢を繰り返し順変換を用いて逐次選択することによりロボットにおける荷物の持ち上げ動作生成を試みる。

キーワード 立脚ロボット, 繰り返し順変換, 持ち上げ動作生成, 負荷トルク

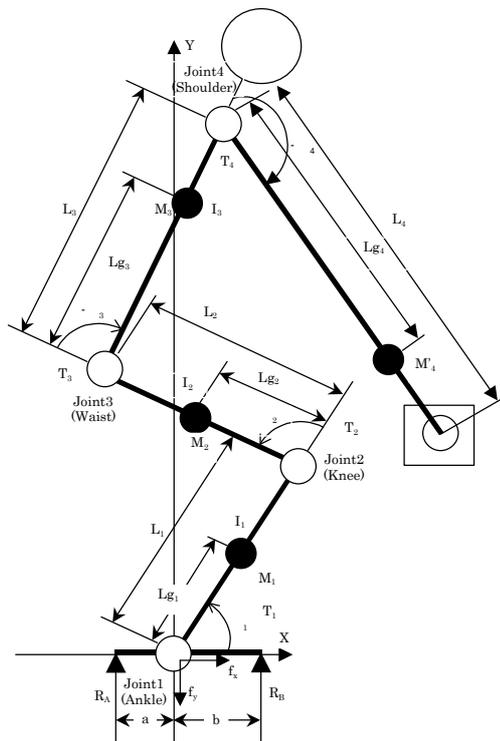
1. はじめに

多関節構造を有する立脚ロボットにおいては、そのリンク姿勢を巧みに操作することにより所望の動作が得られる。立脚ロボットを用いた荷物の持ち上げ作業に関しては、まず、荷物の持ち上げ動作時にロボットが転倒しないこと、そして各関節に作用する関節負荷トルクをできるだけ小さくすることなどが求められる。これらは荷物の持ち上げ動作中のロボットの各関節の曲げ角の与え方に依存している。ロボットにおける各関節の軌道生成手法として遺伝的アルゴリズムを用いた研究がこれまでも数多くなされているが、遺伝的アルゴリズムでは軌道生成の評価に用いる適合度関数の与え方には多様性があり、適合度関数中の重み係数は計算結果を見ながら与えることが多い。本研究では関節負荷トルクや関節曲げ角における幾何学的拘束などの多様な評価を設けることのできる最適化のためのアルゴリズムとして繰り返し順変換を用いることとし、立脚型ロボットにおける荷物の持ち上げ動作の生成を試みる。

2. 繰り返し順変換を用いた持ち上げ動作生成のアルゴリズム

2.1 立脚型ロボットのモデル

本研究では図1に示すような立脚ロボットを考察の



Joint	1	2	3	4
M(kg)	9.6	14.4	36	30
L(mm)	463	450	787	700
Lg(mm)	180	252	311	600
i(deg)	60	90	-80	-90

図1 立脚ロボットのモデル

* 金沢大学 工学部

対象とする。図1のロボットは5つの自由度(4つの関節と前後移動)を持ち、リンク L_1 とリンク L_2 が人間の脚部に、リンク L_3 、 L_4 が人間の上半部と腕に対応している。立脚ロボットの場合、各関節は減速機つきモータで駆動されることが多いため、本研究では十分にゆっくりとした立脚型ロボットの運動を扱うことを前提とする。このため、各リンクの持つ慣性力の影響を無視し、ロボットの持つ静力学的性質に基づいて議論する。このとき、立脚型ロボットがその姿勢を維持するために各関節に作用する関節トルク(T_1, T_2, T_3, T_4)と足底部のつま先とかかとに作用する床反力(R_A, R_B)は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} T_4 &= M'_4 L_{g4} g \cos(\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_3 + \mathbf{q}_4) \\ T_3 &= (M_3 L_{g3} + M'_4 L_3) g \cos(\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_3) + T_4 \\ T_2 &= \{M_2 L_{g2} + (M_3 + M'_4) L_2\} g \cos(\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2) + T_3 \\ T_1 &= \{M_1 L_{g1} + (M_2 + M_3 + M'_4) L_1\} g \cos \mathbf{q}_1 + T_2 \\ R_A &= \frac{T_1 + b(M_1 + M_2 + M_3 + M'_4)g}{a + b} \\ R_B &= \frac{-T_1 + a(M_1 + M_2 + M_3 + M'_4)g}{a + b} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここでロボットが転倒しないためには $R_A > 0$ かつ $R_B > 0$ であることが必要である。これよりロボットが転倒しないためには足首部の関節に発生させ得るトルク(T_1)には限界が存在することになる。

$$-b(M_1 + M_2 + M_3 + M'_4)g \leq T_1 \leq a(M_1 + M_2 + M_3 + M'_4)g \quad (2)$$

関節トルク T_2, T_3 と T_4 については任意に発生トルクの限界値を設定することができる。本研究では以下のような発生トルクの範囲を設けた場合を一つの基準として扱うこととする。

$$\left. \begin{aligned} |T_2| &\leq 300 \text{ Nm} \\ |T_3| &\leq 350 \text{ Nm} \\ |T_4| &\leq 200 \text{ Nm} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

以上の議論をふまえて、本研究では、上式(1)に基づいた立脚型ロボットにおける各関節の軌道生成を試みる。

2.2 繰り返し順変換による持ち上げ動作生成のアルゴリズム

本研究では各関節軌道の生成に用いる評価内容が力学的により直接的に与えられるように繰り返し順変換の手法を用いて解析することとする。これはロボットにおける順運動学を繰り返し解き、そのとき用いる評価内容に最も適した解としての各関節の曲げ角を逐次選択していく手法であり、比較的容易に最終的なロボット姿勢を生成できる単純なアルゴリズムである。

以下に繰り返し順変換を用いた動作生成アルゴリズムの概略を示す。

発生可能な各関節でのトルク範囲 $T_{i\max}$ ($i=1 \sim 4$)を設定する。

4つの関節、1つの移動(足の前進・後退)それぞれについて($-T_{i\max}, 0, +T_{i\max}$) ($i=1 \sim 5$)だけの微小増分を加えることにより、その姿勢近傍に 3^5 通りのロボット姿勢を得る。

ロボットの肩位置が上昇するロボット姿勢を選択。このときにすべての解が $R_A \cdot R_B < 0$ の場合にはロボットが転倒することになるため、負である R_A あるいは R_B がより大きくなるロボット姿勢を選択し(このときロボットは荷物を持ち上げることはできない)へ戻る。

$R_A > 0$ かつ $R_B > 0$ の姿勢を選択する。条件を満たしたロボット姿勢の各関節の負荷トルク T_i を求め、次に $H_i (= T_i / T_{i\max})$ $i=1 \sim 4$ を求める。 H_i の最大値 $H_{i\max}$ をそれぞれの姿勢で比較し、その中で $H_{i\max}$ が最も小さい姿勢を選択し、へ戻る。

ロボットの肩位置が上昇しない時、荷物を持ち上げたとし、プログラムが終了する。

上述のアルゴリズムは、基本的には、あるロボット姿勢における4つの関節の中で最もつらい関節に対して最も余裕を持たせようとする考え方である。

3. シミュレーション事例

3.1 荷物の持ち上げ動作

上述のアルゴリズムを用いて計算した荷物の持ち上げ動作のシミュレーション結果を図2に示す。ロボットが30kgの荷物を持ち上げようとするが足底反力が転倒条件に入っているため荷物の方へロボットが近づき、その後で荷物の持ち上げ動作に移っている。図2(a)はロボットの前進の様子、(b)は持ち上げ動作時の各関節の曲げ角の様子、(c)は各関節のトルクの様子、(d)は各関節の H_i の様子、(e)に足底床反力、(f)にロボットのZMPの位置を示す。

3.2 立ち上がり動作

ロボットが荷物を持たない、腕に自重(3kg)だけを与える場合、ロボットの立ち上がり動作のシミュレーション結果を図3に示す。図2と比較すると、立ち上がる場合より、持ち上げる場合の方が、膝にかかるトルクが大きいことがわかる。

3.3 斜面における荷物の持ち上げ動作

立脚ロボットが斜面上で荷物を持ち上げるとき、転倒しやすくなる。ロボットが斜面上で荷物を持ち上げるときの動作シミュレーション結果を図4に示す。

3.4 斜面における立ち上がり動作

手荷物が無い場合、腕の姿勢が立ち上がる動作に与える影響が小さくなる。腕の姿勢は立ち上がり動作中はフリーである。シミュレーション結果を図5に示す。

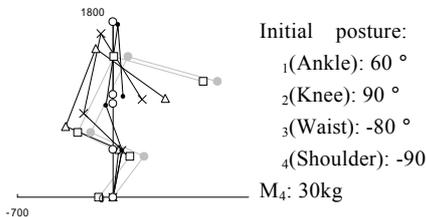
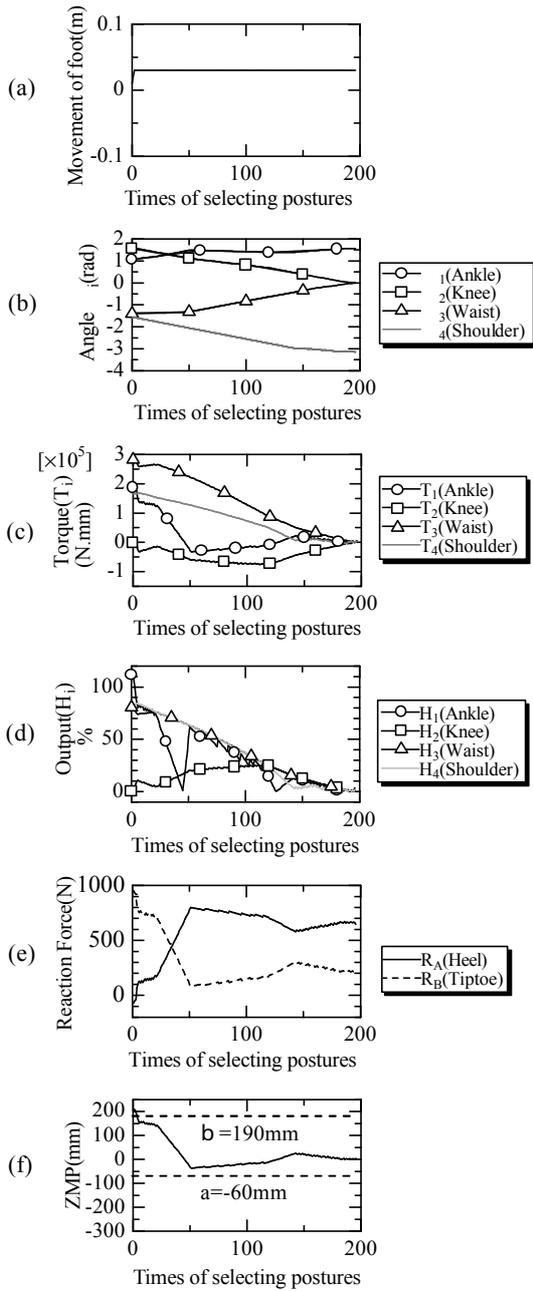


図2 持ち上げ動作の生成

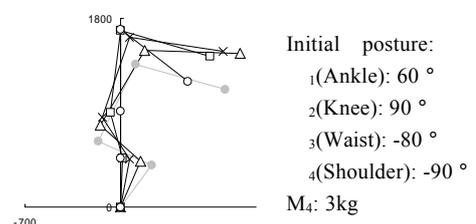
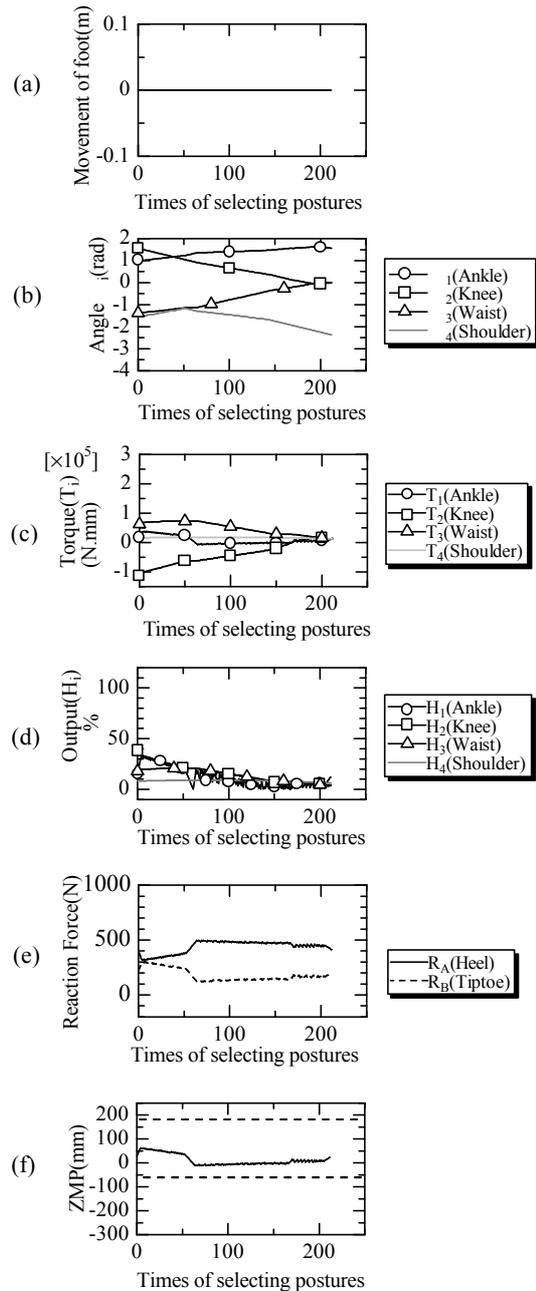


図3 立ち上がり動作の生成

4. 結 言

本研究では繰り返し順変換の手法を用いて多関節構造を有する機械の一つである立脚型ロボットにおける荷物の持ち上げ動作の軌道生成を試みた。本研究を通して得られた結論をまとめて以下に述べる。

- (1) 繰り返し順変換の中でロボットが転倒しなく、かつ全関節にかかる負荷トルクをできるだけ小さくする姿勢を逐次選択していくことにより、立脚ロボットにおける荷物の持ち上げ動作を生成した。
- (2) 今後は本アルゴリズムを用いて福祉機器における手すりの効果について発展させていく予定である。

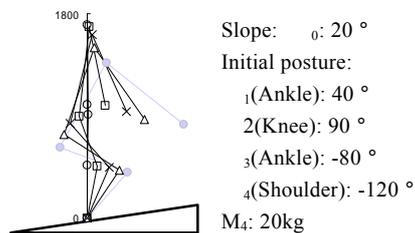
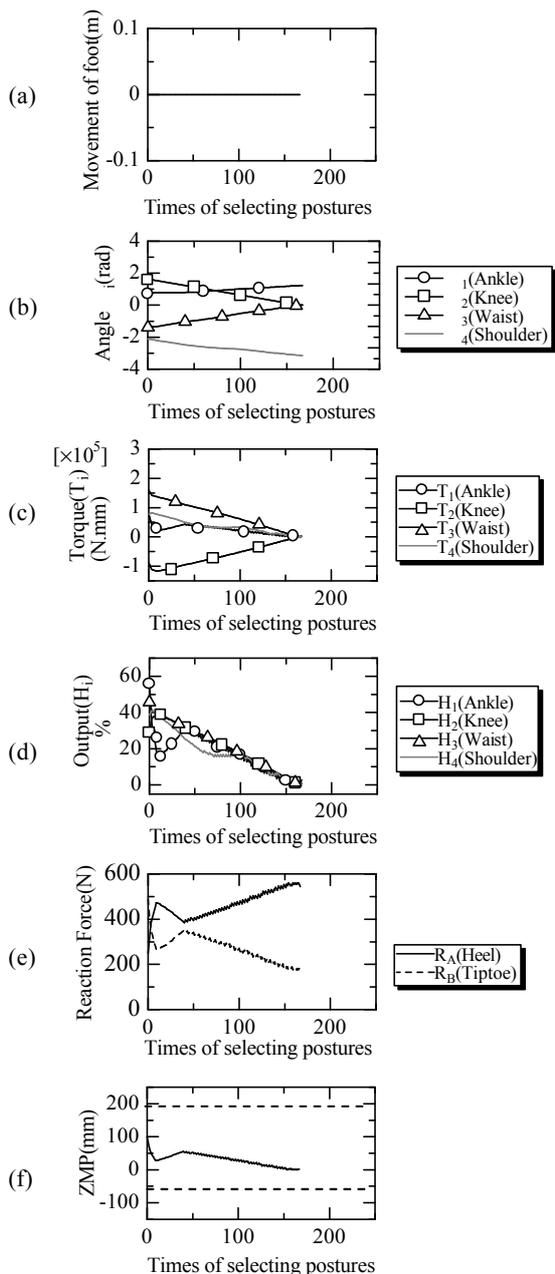


図4 斜面における持ち上げ動作の生成

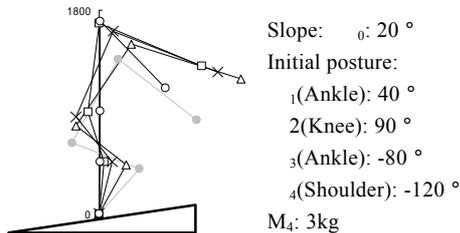
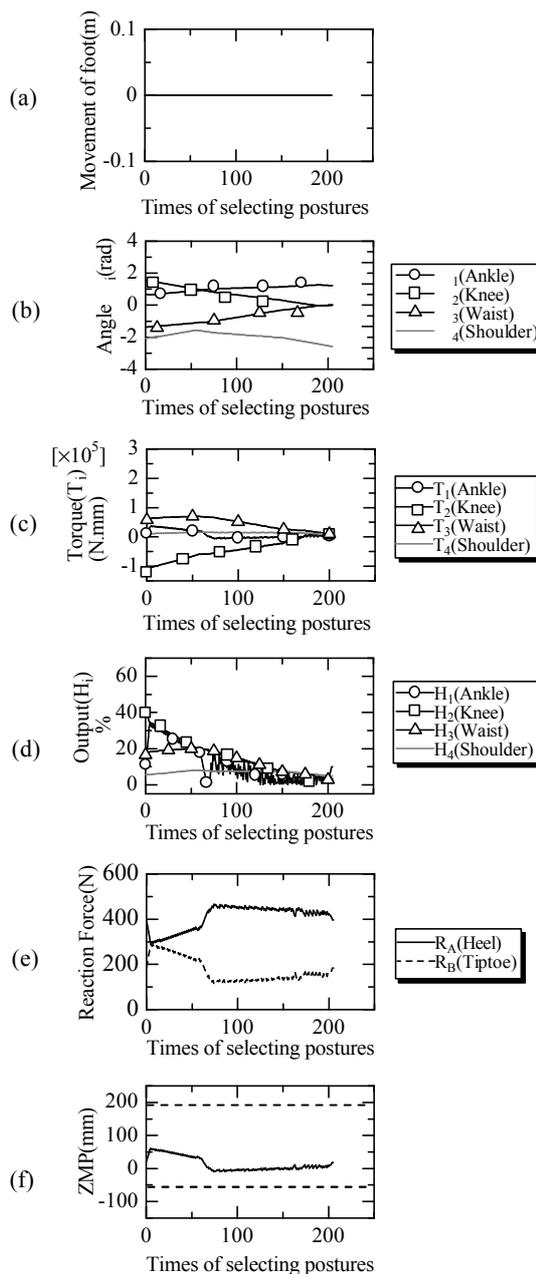


図5 斜面における立ち上がり動作の生成

文献

- [1] 神谷好承, 久保哲也, 青柳誠司, 岡部佐規一, “繰り返し順変換によるロボットの運動制御”, 日本機械学会論文集(C編), vol.59, No.564, pp.125-130, 1993.
- [2] 小栗健一郎, 宮田なつき, 太田順, “個人差を有する人間動作のモデル化, (第2報) 動作全体に対する評価関数を用いた持ち上げ動作生成”, 日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会, 2002.
- [3] 宋祿波, 神谷好承, 張勤, “多関節構造有する機械の軌道生成に関する考察”, 精密工学会誌, vol.67, No.12, pp.1966-1969, 2001.