

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：34412

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760218

研究課題名(和文) ヒューマノイドの高安定移動を可能にする摺足動作の実現と実環境での適応的摺足制御

研究課題名(英文) Adaptive Slip Motion Control with High Stability for Humanoid Robots

研究代表者

小枝 正直 (Koeda, Masanao)

大阪電気通信大学・総合情報学部・准教授

研究者番号：10411232

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：ヒューマノイドの摺足移動は高安定で狭領域・劣姿勢移動に向いている。我々の従来の摺足移動は経験的で根拠が薄く、定点方向転換や短距離並進移動のみであった。そこで、ヒトの摺足定点方向転換時の脚主要筋の活動を計測し、回転初期の臀部筋活動と全期間の脛・脛脛の筋活動の活性を確認した。本結果を動力学シミュレータで検証し、実際と同様の回転・最終姿勢が得られ、摺足方向転換のヒップピッチ軸回転の重要性を確認した。また摺足移動中の胴体角調節による移動方向変更の可能性を発見した。これを応用し、現在位置・姿勢に応じた胴体角へのフィードバック制御により、目標位置・姿勢への自由な方向転換と移動を摺足動作のみで実現した。

研究成果の概要(英文)：Slip motion of a humanoid is stable, useful and suitable in narrow spaces under constrained postures. However, it was not clear how it was controlled. We measured muscle activities in the leg of a human performing a slip turning motion with electromyograph. The results indicated that hip joints had important function in slip turning. We also verified results using a dynamic simulator, and we confirmed that the virtual robot was turned as much as a real human by controlling rolling hip and knee pitch joints using a proportional controller. By using the same simulator, we also found that by slip moving direction was controlled by body tilt angle. Then, we designed a feedback controller which controls body tilt angle comparing between current position/direction and target position/direction. We conducted experiments by using this controller, and the results showed that this controller worked effectively and long range motion was performed by only slipping motions.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ヒューマノイドロボット 摺足 歩行 制御 安定性

1. 研究開始当初の背景

狭領域・劣姿勢移動は、一般的な作業において多発する。例えばキッチンでは、作業者はシンク付近の狭領域で短距離移動をしつつ、前屈や屈伸姿勢で作業を行う。自動車製造ラインでは、狭い作業領域で短距離の移動を繰り返し、手にしたパーツを腰を曲げた姿勢で組み込んでゆく。介護現場においては、介護者は要介護者を不自由な姿勢でベッドから抱え上げ、その場で転回して車椅子へ搬送する。プラント内作業では、多数の配管が配置された狭い空間での移動が必要で、ここでも狭領域・劣姿勢移動が発生する。

現在のヒューマノイドロボットの大半は足踏みを繰り返して移動しているが、この動作は短距離移動には不向きであり、狭領域・劣姿勢（前屈や屈伸等）での移動は困難で安定性に難がある（図1）。我々はこれまでにヒューマノイドロボットの移動に関して、図2に示す状態遷移をコンセプトにして、特に摺足に注目して研究を進めてきた。

従来のヒューマノイドロボットは「停止」「足踏み」の2つの状態遷移で移動している。中・長距離移動には向いているが、脚の上下動と前後左右動により移動するため、安定性が低いという欠点を持つ。またエネルギー効率も悪い。新たに追加した「摺足」の状態では、常に両脚が接地した状態での移動であり、脚上下ではなく脚回転により移動が実現される。移動距離は短いですが、安定性が高く、狭領域・劣姿勢での移動が可能になる。

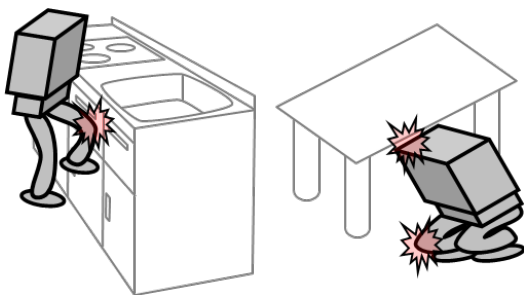


図1 狭領域・劣姿勢での移動

提案手法

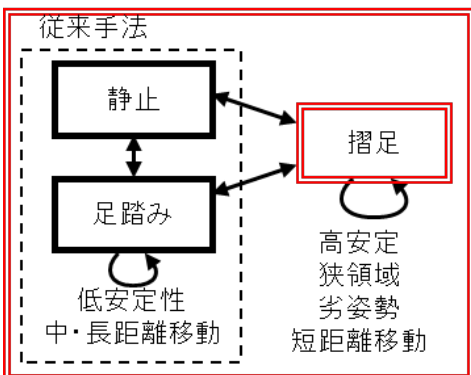


図2 ヒューマノイドの状態遷移

2. 研究の目的

高い安定性を有し、狭領域・劣姿勢移動を得意とする摺足移動をヒトの運動計測とシミュレーションの両面から調査し、ヒューマノイドロボットの行動範囲拡大を実現することを目的とする。

通常、我々が行う「回れ右」動作は、踵・つま先に重心を置き、ここを中心として回転している。しかし本動作中の関節や筋肉の動きは不明確で回転力発生メカニズムは詳細には分かっていない。本研究では、まずこの点について調査する。

次に、様々な状況下で柔軟に摺足移動を実現するための制御方策について調査する。従来の摺足移動に関する研究では、その場での小角度の旋回動作や短距離の移動しか実現されていなかった。そこで本研究では摺足移動の制御方策について調査し、摺足による大きな移動を実現する。

3. 研究の方法

(1) ヒトの運動計測

ヒトの摺足定点旋回動作時の下半身の動作を本学 JIAMS（先端マルチメディア合同研究所）内にあるモーションキャプチャ装置 VICON システムを用いて計測した（図3）。また脚の主要な筋に筋電計測装置を取り付け、下半身の筋活動も計測する。筋電の計測には追坂電子機器社製表面筋電位計測装置 P-EMG plus を使用した。センサは図4のように左脚の8箇所貼り付け、表1の筋肉の活動を計測した。



図3 計測の様子

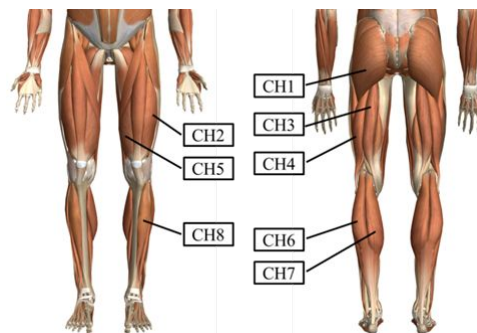


図4 EMG計測位置

表 1 計測部位

CH	筋肉
1	大腿筋膜張筋
2	大腿四頭筋 外側広筋
3	大腿二頭筋
4	半腱様筋
5	大腿四頭筋 内側広筋
6	下腿三頭筋 腓腹筋 外側頭
7	下腿三頭筋 腓腹筋 内側頭
8	前脛骨筋

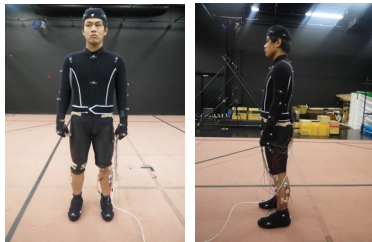


図 5 被験者の様子

被験者は本学学生(21歳,男子,身長170cm,体重65kg)である(図5)。左約45度の摺足定点旋回を直立状態(上体・膝を真っ直ぐに伸ばした状態)と屈脚状態(上体を傾けずに膝関節を60度程度に曲げた状態)で行った。この動作時の筋電計測結果が図6,7である。図中のグラフは上から順にCH1,...,8である。また黄の縦線は左から計測開始時,旋回中頃,旋回終了時を示す。

直立と屈脚のどちらの姿勢での旋回においてもCH1,2,7,8が強い信号を発生しており,ヒップ関節のトルクが摺足旋回に重要であると考えられる。その他の筋も多少の信号が検出されているが,これらは身体のバランスを保つために出力されたもので,摺足方向転換自体には大きな影響がないものと推測する。

(2) シミュレーションによる検証

動力学ライブラリODE(Ver.0.11-1, Double precision)を用いて,等身大ヒューマノイドシミュレータを構築した。モデルの単純化のため下半身にのみ関節を配置し,各脚6自由度,全体で12自由度とした。関節配置は図8に示す通りである。書籍「日本人の人体計測データ1992-1994」を参考に,被験者の性別,年齢と同等になるよう,各リンク長や重量配分を決定した。シミュレータの各種パラメータは表2の通りである。

筋電計測結果を検証するために,本シミュレータのヒューマノイドモデルに対して,ヒップ関節の各軸にトルクを与え,その動作を観察した。床面の動摩擦係数は現実環境を考慮して実験的に0.2と設定した。初期姿勢は,筋電計測実験と同様に直立と屈脚との2状態で行った。

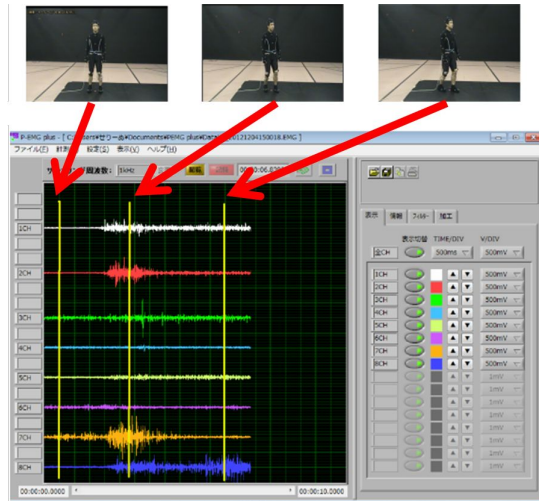


図 6 筋電計測結果(直立姿勢)

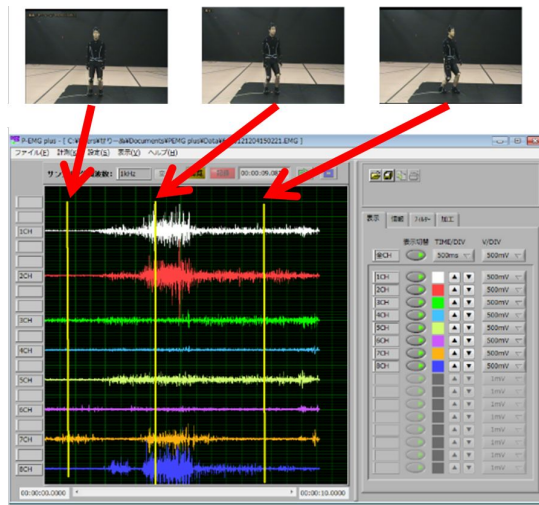


図 7 筋電計測結果(屈脚姿勢)

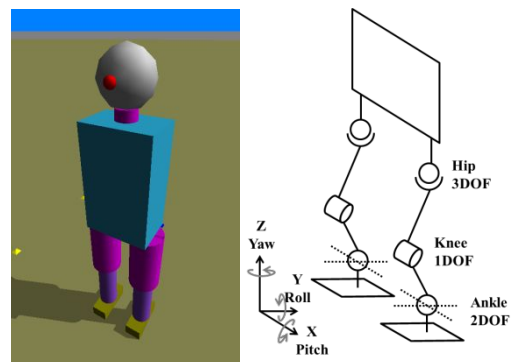
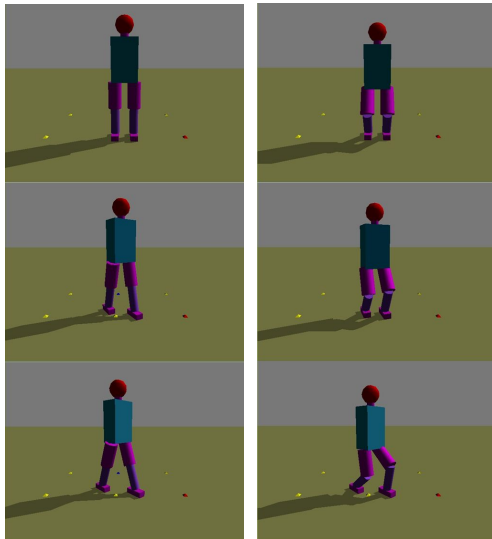


図 8 等身大ヒューマノイドシミュレータ

表 2 モデルパラメータ

身長	1706.0[mm]
膝下高	429.6[mm]
股下高	759.7[mm]
頸側点高	1440.0[mm]
ヒップ幅	340.3[mm]
臀部厚径	255.3[mm]
大腿囲	536.4[mm]
下腿最大囲	366.8[mm]
足長	249.4[mm]
足幅	96.3[mm]
足囲	247.8[mm]
座位頸椎高	653.2[mm]
全頭高	237.1[mm]
体重	64.9[kg]
片脚	10.0[kg]



(a) 直立姿勢 (b) 屈脚姿勢

図 9 シミュレーションによる検証

直立姿勢ではヒップ関節，膝関節，足首関節ともに 0 度を初期値とした .45 度の摺足方向転換を行うために，ヒップ関節各軸をそれぞれ 0.2 度ずつ 100 シミュレーションループ動作させ，20 度まで回転させた．足首関節は水平面と常に平行を保つように制御した．屈脚姿勢では，ヒップ関節のピッチ軸 30 度，膝関節 60 度，足首関節のピッチ軸 30 度を初期値とし，動作中の関節制御は直立姿勢と同じである．

シミュレーション結果を図 9 に示す．この時，摺足方向転換中も安定性を保ち，転倒することなく回転を終えた．また最終的な姿勢は実際にヒトが行った摺足と同様の姿勢となっており，我々の予想の妥当性を示唆している．

(3) 摺足移動のための制御方策

足裏角度と脚ヨー軸回転を適切に制御しながら，図 10 左のようなハの字摺足を連続的に行うことで，横方向に並進移動することができる．足裏角度を適切に制御することにより足裏に掛かる圧力分布を変化させ，脚ヨー軸回転時の支点となる角を調整できる．

左方向への並進移動のための各関節目標角度を図 10 右に示す．足裏ピッチ角を反転させることで右方向への並進移動になる．

試行錯誤の結果，上体の前傾・後傾を加えることで，進行方向を調整できることを発見した．ロボットの初期位置を原点，初期姿勢を Y 軸負方向，前傾・後傾角度の調整は鉛直軸から ± 5 [deg] として，移動量，方向変化量を確認する実験を行った．図 10 右の 2 状態を 1 ステップとして，20 ステップ分の動作を左右各方向に並進移動させた．このときのロボットの移動軌跡と移動方向の変化をまとめてグラフ化したものが図 11 である．20 ステップで 1[m] 程度の並進移動と，90 [deg] 程度の方向転換が発生することを確認した．

次に，前傾・後傾角度 θ をフィードバック制御して目標位置・姿勢への移動を行った．実験は以下の 3 条件とした．最終目標位置を (x_d, y_d) [m]，最終目標姿勢 g_d [deg] として，

条件 1 :

$$(x_d, y_d) = (3, 1)$$

$$g_d = 0$$

条件 2 :

$$(x_d, y_d) = (3, 0)$$

$$g_d = 0$$

条件 3 :

$$(x_d, y_d) = (3, -1)$$

$$g_d = 0$$

である．

本実験ではロボットは左方向に並進移動し続け，現在位置の x 座標 x_c が $x_c > x_d$ となった時点で終了とした．始点位置・姿勢および目標位置・姿勢を滑らかに結ぶ 3 次曲線

$$y = \left(\frac{(g_a x_d - 2y_d)x + (-g_a x_d + 3y_d)x_d}{x_d^3} \right) x^2$$

とその導関数から x_c での目標姿勢 g_{cd} を算出する．現在姿勢 g_c と g_{cd} との差 $d = g_{cd} - g_c$ から $\theta = K_p \cdot d$ でフィードバックした K_p は比例ゲインで実験的に $K_p = 0.1$ とした．ただし過大な前傾・後傾による転倒を防ぐため， $-5 \leq \theta \leq 5$ に制約した．

本実験の結果を図 12 に示す．図 12(a)の移動軌跡を見ると，条件 2 で目標位置との差がやや大きいですが，条件 1,3 ではほぼ正確に到達していることが分かる．図 12(b)の方向変化も同様で条件 1,3 において，目標角度に常時追従して制御できているが，条件 2 では定常差が発生した．条件 2 で誤差が発生した原因は， θ を単純な比例制御即で制御したためで，PI もしくは PID 制御とすれば解決すると考えられる．

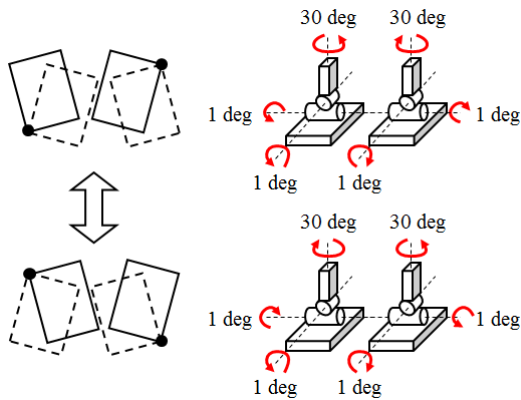
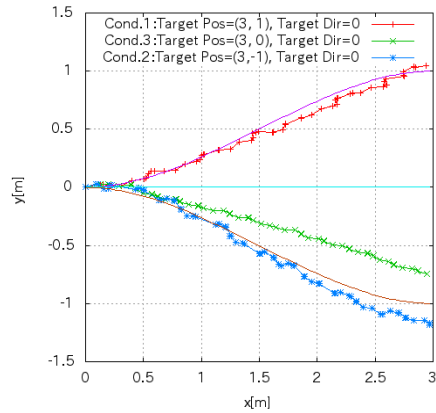
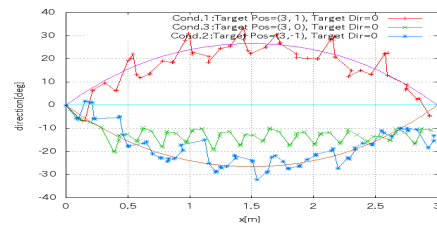


図 10 摺足並進移動



(a) 移動軌跡

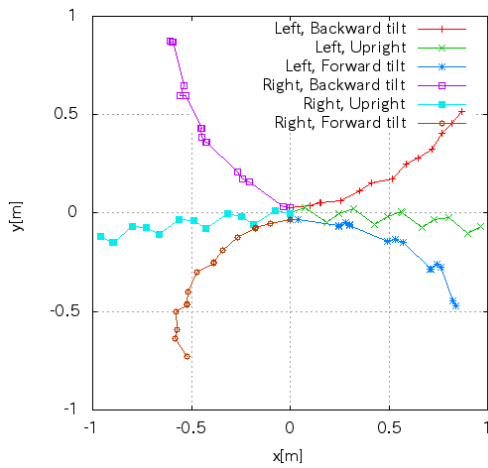


(b) 方向変化

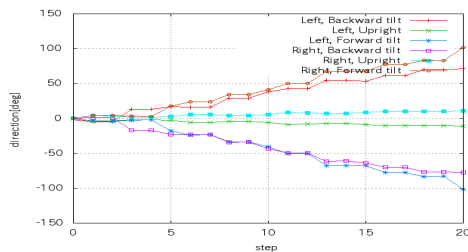
図 12 目標位置姿勢を与えた摺足並進移動制御

(4) 能舞の計測

東京理科大学 竹村裕氏と奈良工業高等専門学校 上田悦子氏が行った能舞の計測実験に参画した．能舞では摺足が多用される．様々な感情表現の際の独特な脚動作を慣性センサ式モーションキャプチャと床面分布圧センサで計測した．取得したデータは現在，解析中である．



(a) 移動軌跡



(b) 方向変化

図 11 前傾・後傾角度 5[deg]での摺足並進移動の方向変化



図 13 能舞の計測

4. 研究成果

(1) ヒトの摺足定点旋回動作中における脚の筋活動を計測し、動作中に活発に活動する筋を特定した。また人体モデルに則した等身大ヒューマノイドロボットシミュレータを構築し、筋電計測結果に基づいて摺足方向転換シミュレーションを行ったところ、ヒップ関節のピッチ軸方向の関節トルク制御のみで摺足方向転換が実現され、この動作は実際の動作にかなり近いことが確認できた。

(2) ヒューマノイドロボットの摺足横移動中に上体の前傾・後傾角度を調節することにより、進行方向を柔軟に変更できることを発見した。動力学シミュレータを用いて確認したところ、20 ステップで 1[m]程度の並進移動と、90[deg]程度の方向転換が認められた。

(3) ヒューマノイドロボットの摺足移動制御法を提案した。本制御手法により、摺足のみで目標地点、目標姿勢へ到達可能であることを動力学シミュレータで確認した。

(4) 摺足による中距離移動と進行方向の自由な制御が実現され、ヒューマノイドロボットの行動範囲が拡大された。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計4件)

- (1) 小枝 正直, 植野 真行, 芹澤 敬之: "ヒューマノイドロボットの摺足移動制御シミュレーション", 情報処理学会 第76回全国大会 (IPSJ76), 2F-7, pp.441-442, 2014.3.11.
- (2) Masanao Koeda, Masayuki Ueno and Takayuki Serizawa: "Shuffle Parallel Translation and Pivot Turn of Humanoid Robot in Dynamics Simulator", In Proceedings of the First International Conference on Artificial Intelligence, Modelling & Simulation (AIMS2013), pp. 189-192, Sabah, Malaysia, 2013.12.3.
- (3) Masanao Koeda, Takayuki Serizawa and Yuta Matsui: "Shuffle Turn of Humanoid Robot Simulation Based on EMG Measurement", In Proceedings of the 16th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR2013), pp. 571-577, Sydney, Australia, 2013.7.16.
- (4) 芹澤 敬之, 小枝 正直, 松井 佑太: "筋電計測結果に基づくヒューマノイドロボットの摺足移動シミュレーション", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 (ROBOMECH2013), 2P1-A10, 2013.5.24.

〔図書〕(計1件)

- (1) Masanao Koeda, Takayuki Serizawa and Yuta Matsui: "Shuffle Turn of Humanoid Robot Simulation Based on EMG Measurement", NATURE-INSPIRED MOBILE ROBOTICS, World Scientific, ISBN978-981-4525-52-7, pp. 571-577, 2013. (collectively-written)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.osakac.ac.jp/labs/koeda/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小枝 正直 (KOEDA MASANA0)
大阪電気通信大学・総合情報学部
准教授
研究者番号: 10411232

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

小笠原 司 (OGASAWARA, Tsukasa)
奈良先端科学技術大学院大学・
情報科学研究科・教授
研究者番号: 30304158

上田 悦子 (UEDA, Etsuko)
奈良工業高等専門学校・
電子制御工学科・教授
研究者番号: 90379529