

二足歩行のデジタルヒューマンウェア

Digital Human Modeling on Bipedal Locomotion Function

加賀美 聡¹⁾ カフナー ジェームズ²⁾
Satoshi KAGAMI James J. KUFFNER

- 1) 産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究ラボ
(〒135-0064 東京都江東区青海 2-41-6. E-mail: s.kagami@aist.go.jp)
- 2) 東京大学大学院 工学系研究科 機械情報工学専攻
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1. E-mail: kuffner@jsk.t.u-tokyo.ac.jp)

ABSTRACT. This paper describes our digital human-ware of bipedal locomotion. From the given data of bipedal locomotion, this method calculates dynamical stable bipedal locomotion trajectory by using torso horizontal motion with ZMP (zero moment point) criteria. We confirmed soundness of the method by using motion capture data of walking of human being, and applied it to the humanoid robot so that bipedal locomotion was achieved.

1 背景

人間の機能を計算機上で実現するデジタル・ヒューマン技術により仮想環境で人間の a) 生理・解剖的な, b) 運動・機械的な, c) 心理・認知的な, 動きをシミュレートすることが可能になり, さまざまな応用が期待されている. これらの目的のためにはさまざまなレベルでの人間のモデリングの技術とモデルの利用法の研究が欠かせない. 最近, デジタル・ヒューマン技術としてこれらの3つの分野の研究が盛んに行われている. 運動・機械的なモデリングや心理・認知的なモデリングに関してはさまざまな計測技術にもとづくモデル手法と動作生成手法およびその評価法が一貫した形で存在しないために, 仮想環境上での人間の運動の生成が不可能であった. 人間の運動を力学的に正しい形で計測し, 計測したデータを用いて仮想環境上でさまざまな行動をさせる運動・機械的なモデリングが可能となれば, 人間工学的な製品の設計・評価, 建築や都市環境の設計・評価, 医学応用などが可能になると期待される.

運動・機械的なモデリングのための基礎技術はさまざまな分野において研究が進められている. 人間工学の分野においては, マーキングなどを施すことにより歩行における全身の各点の変位や床反力の計測の研究が行われている. 画像処理の分野では, 変形しない物体の形状を精密に計測する手法について主に研究が行われている. またコンピュータグラフィックス工学の分野では人間の三次元形状のモデリングの研究や, アニメーションのための簡易力学シミュレーションツールが発表されてきている. ロボット工学の分野においては三次元形状モデルに基づくモーションプランニングの研究や二足歩行の力学的に安定な歩行軌道生成の研究が行われてきている. 視覚処理の研究においては物体計測の研究が行われている.

しかし, これまで人間の三次元形状・力学モデルの計測可能なソフトウェアも, 歩行などの人間のおこなう動作を力学的に安定な軌道として生成可能なソフトウェアも存在していなかった. この問題の背景には, 計測・生成・評価を行う一貫したシステムが存在しないために, 計測されたデータや生成された軌道の妥当性の評価が難しいことがあげられる.

このような背景を踏まえ, 本テーマは二足歩行における形状と力学にもとづくデジタル・ヒューマン技術に着目し, 人間の歩行動作の計測による形状・力学モデリングと, 獲得したモデルを用いた任意の力学的に安定な歩行軌道生成手法, 生成した歩行動作の評価, を一貫して可能とするソフトウェアの開発を目的とする.

本テーマによりさまざまな体格の人の歩行におけるデジタル・ヒューマンモデルの獲得と, 獲得したモデルを用いた計算機上で力学的に安定な歩行をシミュレーションすることにより, その動作の検証が可能となる. 力学を含んだ歩行モデルがあれば, 関節に発生している力を計算することや, さまざまな体格・条件での歩行を評価することが可能となる. これにより例えば子供からお年寄りまで幅広い年齢のさまざまな体格の人が動きやすい, 疲れにくいなどのさまざまな指標において生活しやすい住宅や都市環境をシミュレーションすることが可能となると期待される.

これからの少子・高齢化社会に向けて, より人にやさしい機械・建築・環境の開発技術が必要となってくる. 人間の歩行に基づくシミュレーションが可能になれば, さまざまな産業応用および生活改善が可能になると考えられ, この技術の波及効果は極めて大きいと考えられる.

2 目的

本テーマはデジタル・ヒューマン技術において力学的に安定な二足歩行を可能とするための観測・生成ソフトウェアの作成を目的とする. 開発するソフトウェアは主として, (1)人間の構造的・形状的・力学的なデジタル・ヒューマン表現ソフトウェア, (2)モーションキャプチャシステムによる人間の歩行データの取得, (3)任意の体形の人間の力学的に安定な二足歩行軌道の生成, (4)生成した歩行軌道のシミュレーション・表示環境, (5)ヒューマノイドロボットによる実証環境, の5つである. 本テーマで開発するソフトウェアにより人間の歩行をモデル化し, デジタル・ヒューマンモデルを利用して製品の開発や規格の作成に利用することが可能となると期待される.

はじめに(1)デジタルヒューマン技術の基礎となる人間を構造的・形状的・力学的なモデルとして表現するデジタル・ヒューマンソフトウェアを作成する. 本システムは

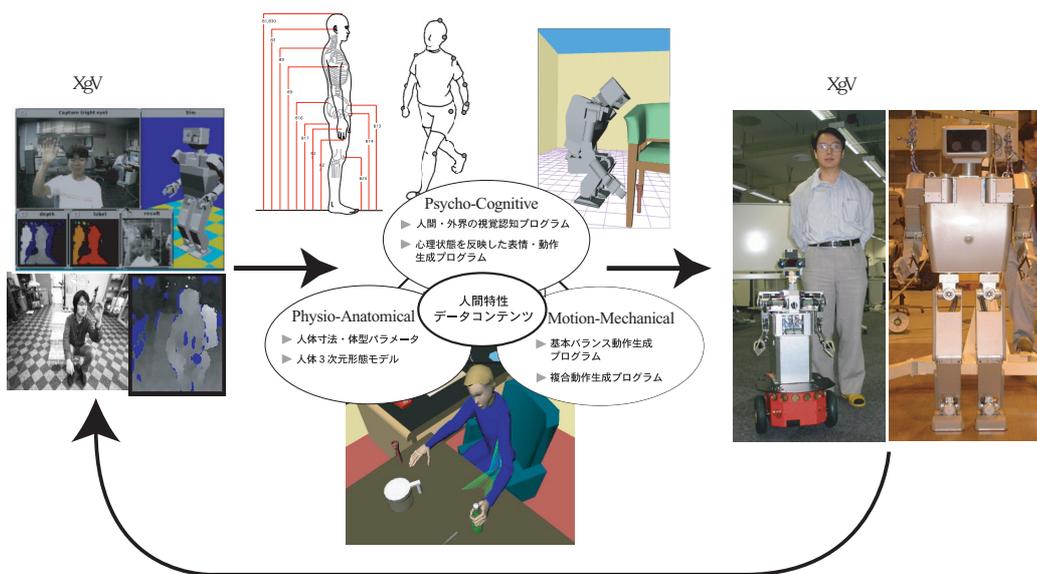


図 1: デジタルヒューマンモデルの枠組み

さまざまな体形の人間の特性を表現し、任意の運動を記述可能なものである。

次に(2)においてはモーションキャプチャシステムにより歩行する人間を計測しデジタル・ヒューマンモデルに基いて観測点の軌跡から運動を記述する。モデル化するデータは体格などの形状の情報と、歩行動作における各関節の軌道である。しかしこの時点で得られたデータは、動力学的には正しくない。

そこで(3)においては、(2)で得られた三次元形状モデルおよび物理モデルから、提案者が研究してきた体幹補償および全身補償による動力学的に安定な歩行軌道生成を用いて、さまざまな歩行軌道の生成を可能とする。これにより(2)で得られたモデルから任意の歩幅や周期で歩行する動力学的に安定な軌道が生成可能となる。

(4)においては(3)で作成した運動を検証し提示するためのシミュレーション環境を作成する。このシミュレーション環境の中で歩行させることにより、関節、骨、筋肉、足裏などに発生している力を計算したり、転倒するかどうかの安定余裕の計算が可能になる。また荷物を持った状態や、上体が運動している上体での歩行時の力学も計算することが可能となる。

最後に(5)においては生成した歩行軌道の妥当性を示すためにヒューマノイドロボットにより実証する。ヒューマノイドロボットは提案者が研究してきた爪先関節を持ったものを採用することにより、人間に近い動作が可能となる。ヒューマノイドロボットを用いることにより開発してきたシステムの評価と改良を行うことができ、システムの妥当性を示すことができると考えている。これによりヒューマノイドロボットの人間に近い自然な歩行も可能になるなどロボティクスにも効果を与えられられる。

本システムを用いることにより動力学的にも形状的にも妥当な人間の歩行の計測と、仮想世界での生成が可能となり、関節に発生している力を計算することや、さまざまな体格・条件での歩行を評価することが可能となる。

3 二足歩行のデジタルヒューマンウェア

3.1 人間の機構的・幾何学的・動力学的デジタルヒューマン表現

人間の二足歩行におけるデジタルヒューマンモデルを構成するにおいてアニメーションやロボットの分野で行われているような剛体の多リンク機構としてモデル化を行う。実際の人間は例えば膝関節においてワールド座標のロール軸やヨー軸周りにそれぞれ数度の自由度を持つことが知られているが、ここでは主たる関節軸として股関節 3 自由度、膝 1 自由度、足首 2 自由度の合計 6 自由度の脚と、同様に 6 自由度の腕、2 自由度の頭部でモデル化を行うこととする。

このデジタルヒューマンモデルは自由度が高く、また幾何学的な形状も複雑であるだけではなく、動力学的にも複雑な系であるために、動作を計画するモーションプランニングにとり扱うことの困難な対象である。

3.2 歩行データの取得

モーションキャプチャはマーカを人体の各部に取り付けて人間の運動を計測し、そのマーカの移動から人体の運動を推定するものである。本手法は近年非常に高速に精度よくデータを取得することができるようになってきたが、取り付け点が皮膚の上であるために運動中に動く可能性があること、計測する人体の基本寸法等が既知ではないこと、などの問題により計測されたデータが力学的に正確であるとは言えなかった。そこで本研究開発では以下に述べる手法により、入力された歩行のデータを力学的に安定な手法に変換する。

3.3 ZMP 導出の線形・非干渉化、離散化による二足歩行の動力学的安定軌道的高速生成

二足歩行における動作生成の際には、その動力学的安定性を考慮する必要がある。しかし、多リンク系で記述されるデジタルヒューマンモデルにおいては、動力学的安定な運動軌道を解析的に求めることは困難である。

ここでは、動力学的安定の規範として、ZMP (Zero Moment Point) を採用し、初期軌道と目標とする ZMP 軌道を与えた際に、運動が目標 ZMP 軌道を実現するよう初期軌道を修正する方法として、ZMP と各リンクの運動との

関係式の特性を利用し、目標 ZMP 軌道をみたく運動軌道を高速に導出する方法を提案する。また、それを利用したデジタルヒューマンモデルのための歩行生成システムを紹介する。

3.3.1 目標 ZMP 追従運動軌道の高速生成法

目標 ZMP 追従型動作生成 一般に、多リンクモデルの運動軌道から ZMP 軌道を解析的に求めることはできるが、その逆問題である、ある ZMP 軌道を満たす運動軌道を求めることは、非線形で、干渉のある 2 階微分方程式を解くこととなり、解の冗長性、関節による各リンクの運動の拘束等の問題もあり、困難である。そこで、従来、目標 ZMP 軌道を満たす運動軌道を生成するために、遺伝的アルゴリズムや最急降下法等、探索手法に基づく方法が採用されてきた。また、運動軌道と ZMP の関係式を近似的に解く手法としては、近似により、線形・非干渉化した後にフーリエ級数展開により微分方程式を解く手法 [1] が提案・実装されている。

ZMP 導出式の線形・非干渉化 多リンクモデルの運動状態から ZMP 位置を求める式は、床面が x - y 平面となる座標系で ZMP 位置を $P = (x_p, y_p, 0)^T$ とすれば、多リンクモデルのリンク i の位置、質量、慣性テンソル、角速度ベクトルをそれぞれ $r_i = (x_i, y_i, z_i)^T, m_i, I_i, \omega_i$ 、重力加速度を g として、

$$x_p = \frac{\sum m_i z_i \ddot{x}_i - \sum \{m_i (\ddot{z}_i + g)x_i + (0, 1, 0)^T I_i \dot{\omega}_i\}}{-\sum m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (1)$$

と表される (y_p についても同様)。

デジタルヒューマンの運動軌道が、次式のように表されるとする。

$$A(t) = \begin{pmatrix} x_1(t), y_1(t), z_1(t), \theta_1(t), \phi_1(t), \psi_1(t), \\ \dots, x_n(t), y_n(t), z_n(t), \theta_n(t), \phi_n(t), \psi_n(t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

すると、式 (1) を用いて、この運動軌道による ZMP 軌跡 $P_A(t) = (x_{p_a}(t), y_{p_a}(t), 0)^T$ が求められる。このとき、目標とする ZMP 軌跡 $P_A^*(t)$ を $A(t)$ の $x_i(t), y_i(t)$ のみを $x'_i(t), y'_i(t)$ に変更することにより実現することを考える。すなわち、

$$x_p^* = \frac{\sum m_i z_i \ddot{x}'_i - \sum \{m_i (\ddot{z}_i + g)x'_i + (0, 1, 0)^T I_i \dot{\omega}'_i\}}{-\sum m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (3)$$

を満たす x'_i を求めればよい。 (y'_i についても同様。)

式 (1)–式 (3) は、

$$x_p^e = \frac{\sum m_i z_i \ddot{x}_i^e - \sum m_i (\ddot{z}_i + g)x_i^e}{-\sum m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (4)$$

但し、 $x_p^e = x_p^* - x_{p_a}$ 、 $x_i^e = x'_i - x_i$ である。

ここで、式 (4) を解くために、 $x_i^e = x^e$ とすることを考える。すなわち、式 (4) の解は無数に存在するため、各リンクの各時刻の位置を水平並進方向に同量だけ変更する場合の変更量を求めることとする。実際には、幾何拘束により接地動作においてこのような運動は、不可能であるが、例えば、歩行において、上体 (体幹・腕・頭) を並進方向に修正するような場合には、このように近似できる。上体を並進方向に修正する場合には上体部リンクについては、並進方向に同量変位する。脚部リンクについては、対象としている脚が 6 自由度の非冗長系であるため、上体を水平方向に変位させた場合の、垂直変位、回転変位は小さく、水平変位に関しては、上体の水平変位にほぼ比例する。

微分方程式の数値求解 式 (4) に、 $x_i^e = x^e$ を代入すると、

$$-\frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i (\ddot{z}_i + g)} \ddot{x}^e + x^e = x_p^e \quad (5)$$

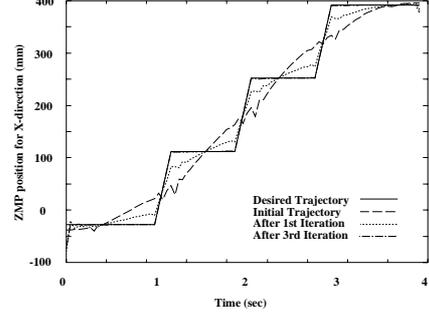


図 2: ZMP 軌道の目標への追従の様子 (x 方向)

となるが、時刻を $0, \dots, t_m$ に間隔 Δt で、離散化し、各時刻における加速度 \ddot{x}^e を

$$\ddot{x}^e(t_i) = \frac{x^e(t_{i+1}) - 2x^e(t_i) + x^e(t_{i-1}))}{\Delta t^2} \quad (6)$$

として求めれば、 $x^e(t_i)$ に関する 3 項方程式として、解くことができる。(このとき、境界条件として、始終点における変位量 $x^e(0), x^e(t_m) = 0$ を与え、 $i = 1$ から $m - 1$ について、上式を解く。) この結果より、目標 ZMP 軌道 $P_A^*(T)$ を満たす運動軌道を求めることができる。

3.4 ヒューマノイドロボットへの応用

3.4.1 歩行軌道高速生成システムの実装

前節で述べた、目標 ZMP 追従動作軌道の高速生成法を用いて、ヒューマノイド H7[2] のための歩行軌道生成システムを作成した。

歩行軌道生成システムは、各足の一步ずつの接地姿勢を与えることにより、歩行軌道を生成するシステムであり、具体的には以下のような手順で安定歩行軌道を生成する。

1) 初期姿勢、初期速度、最終姿勢、最終速度、腕の運動軌道、各足の一步毎の接地姿勢、遊脚期、両脚支持期の時間及び、支持脚交換時における体幹の姿勢 (水平成分は目標 ZMP を満たすよう変更される) を指定する。2) これらを元に、高速生成手法に与える全身の初期軌道及び、転倒しないための目標 ZMP 軌道を生成する。3) 前節で述べた、手法により初期軌道から上体の水平位置を変更することにより、目標 ZMP 軌道を満たす運動軌道を生成する。運動軌道を与えた際の ZMP 軌道の算出等の動力学演算には、動力学演算ライブラリ「Z-DYNAFORM」[3] を用いた。

前節でも言及したとおり、上体位置を水平面内で修正することは、全リンクを水平面内で同量並進させることの近似であること、離散化による加速度計算誤差などにより、得られる運動軌道を評価すると目標 ZMP 軌道から誤差がある。(次節で取り上げる歩行パターンにおいて、離散化した制御点での平均誤差 3.41[mm]、最大誤差 19.0[mm])

そこで、前節の計算により得られる修正量に $K (< 1)$ を乗じて運動軌道を修正することとし、前節の手法による運動軌道の修正を離散点における目標 ZMP 軌道からの誤差の平均が設定した値以下 (1mm を採用) となるまで、繰り返すこととした。

3.4.2 H7 の歩行生成における本手法の評価

前節で述べた、歩行システムにより、水平面内前進 4 歩 (遊脚期 0.8[s]、中間の両脚支持期 0.2[s]、中間歩の 1 歩 280mm) の歩行軌道を作成し、評価した。前節で述べたパラメータ K は、0.6、離散化の時間間隔は、50[ms] とした。5 回の計算の後、目標 ZMP からの平均誤差が 1mm 以下となり、計算を打ち切った。その際、ZMP 軌道が目標軌道に収束していく様子を、図 2、図 3 に示す。離散化された各制御点における、目標 ZMP からの誤差は、初期軌道、1 回目の修正後、計算打ち切り後で、平均それぞ

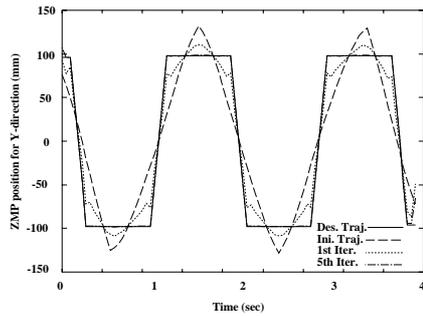


図 3: ZMP 軌道の目標への追従の様子 (y 方向)

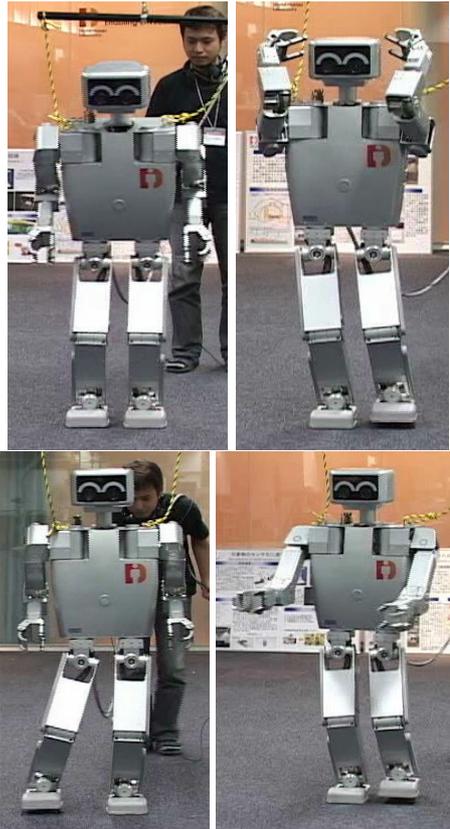


図 4: ヒューマノイドロボットによる実証実験

れ, 28.0[mm], 11.8 [mm], 0.46[mm], 最大ではそれぞれ, 83.3[mm], 31.6[mm], 2.1[mm] であった。この歩行軌道生成にかかった時間は, 594[msec] (Pentium III 733MHz, Linux 2.2.14, gcc 2.95) であった。

3.5 おわりに

デジタル・ヒューマン技術の運動・機械的なモデリングの分野に関しては, さまざまな計測技術にもとづくモデル手法, 動作生成手法, およびその評価法の3つが一貫した形で存在しないために, 仮想環境上での人間の運動の生成が不可能であった。人間の運動を力学的に正しい形で計測し, 計測したデータを用いて仮想環境上でさまざまな行動をさせる運動・機械的なモデリングが可能となれば, その人間工学的, 医学的な側面から, さまざまな分野での応用が期待できる。

人間工学の分野では製品の設計・評価において応用が可能である。例えばさまざまな条件での歩行時における発生する力を計算できることから, 子供からお年寄りまで幅広い年齢のさまざまな体格の人が動きやすい, 疲れにくいな

どのさまざまな指標において生活しやすい住宅や都市環境をシミュレーションすることが可能となる。具体的には子供から高齢者まで歩きやすい階段の設計などがあげられる。また靴, 鞆, 服装などの設計においても荷物を持ったときなど, さまざまな条件の歩行による体への負荷の計算, が可能となり体格や運動に応じたシミュレーションが可能になる。

医学的には, さまざまな条件での歩行運動に応じた筋肉・関節に作用する力がシミュレートできることから障害や病気からの回復のためのリハビリの解析や運動の設計に応用が可能であると考えている。また人工関節や義足などの設計・評価にも応用が可能である。また近年, 高齢者の転倒による骨折が大きな問題となっているが, このような運動状態での骨にかかる力をシミュレートすることも可能である。

コンピュータグラフィックスの分野では, 力学的に正しい人間やキャラクタのアニメーションが可能となり, ゲームを初めとする産業応用が期待できる。すでにいくつかの単純化されたモデルによるシミュレーション環境はこれまでも存在し, 近年は近似的に動力学的に安定な歩行動作の生成の研究も米国を中心として行われている。しかし, これらの手法のリアリティーを増すためには, 本テーマで提案するような一貫したシステムによって評価する必要があるため, 本テーマによる影響は大きいと考えられる。

次に例えば能や歌舞伎などの伝統技能や, スポーツにおける運動などのさまざまな歩行のモデリングと記録が可能になる。現在は画像でしか保存できない個人の記録を力学モデルを含めてデジタルなライブラリに保存することができれば, 後世への財産を作ることが可能になる。

最後にロボット工学の分野では, ヒューマノイドロボットは人間と人間の生活する環境への親和性, 機能性の両面で, いわゆる専用のロボットとは一線を画し, その汎用性から将来の社会, 生活, 産業に大きな影響力があると期待されている。本テーマはこれまでの物理モデルに従った動作生成とは異なり, 人間からのデータ収集にもとづく手法であり, ヒューマノイドロボット研究の新たな一面を開くことと考えている。また本テーマにより実現される力学的に安定な歩行軌道生成や動力学シミュレーション環境は直接利用が可能であり, 効率的なヒューマノイドロボット開発のためのシミュレーションや, 実際のロボットの運用が可能になる。

4 参加企業及び機関

有限会社アールラボ

本プロジェクトの管理会社であり, 人間の機構的・幾何学的・力学的なデジタル表現モデルのサブテーマを担当した。

参考文献

- [1] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎. 上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 4, pp. 581-586, 1993.
- [2] S. Kagami, K. Nishiwaki, J. J. Kuffner, Y. Kuniyoshi, M. Inaba, and H. Inoue. Design and implementation of software research platform for humanoid robotics: H7. In *Proceedings of the 2001 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, p. 253.
- [3] 杉原知道, 西脇光一, 稲葉雅幸, 井上博允. 汎用多リンク系動力学演算ライブラリ「Z-DYNAFORM」の開発. 第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1139-1140, 2000.