

研究内容

ヒューマノイドロボット・デザインと運動性進化(中村グループ)

(1) 実施の内容

メカトロニクス技術の発達による小型・高性能のセンサ, アクチュエータ, モータドライバの開発に伴って, ヒューマノイドロボットの機構も発達してきた. ヒューマノイドロボットの運動性進化のためには, 自由度を増やすことが挙げられる. しかし, これは小型化, 軽量化といった観点から, 多くの設計技術を要する. 本研究では, ヒューマノイドロボットの機構に着目し,

- 関節配置による運動性能の向上
- 高トルク伝達特性と零トルク伝達の実現

を目指した機構の開発を行った.

従来のヒューマノイドロボットの機構では, 特異姿勢の回避, 重心の制御性向上を目的とし, 膝を曲げた運動が実現されてる. しかし, 膝を曲げた姿勢は多くのエネルギー消費と膝への大型アクチュエータ配置を必要とするため, これを避けることを目的とした腰関節の導入が近年のヒューマノイドロボットでは行われている [1]. 腰関節の導入は運動性向上の重要な要因である.

一方, これまでのヒューマノイドロボットの関節は, ロボットの身体と環境との力学的な相互作用を許さない. 関節はハイゲインなフィードバックコントローラで制御され, 減速比の高いギアによって構成されるため, バックドライバビリティは低いものとなっている. これに対し, 人間の自然な歩行やダンスなどの動的な動きは環境との動的な接触によって生まれる. センサ信号としてのみではなく, 身体の力学的な現象として重力を感じ, 知能的なセンサリモータマップを構成する. ヒューマノイドロボットの運動は人間の運動の見まねではなく, 身体と環境との力学的な相互作用によって自分の運動を獲得するものである. 例えば, McGeer らのパッシブウォークはこれらの現象がみられている [2].

これより, 本研究ではヒューマノイドロボットの運動性向上を目的とした2つの機構を開発した. 二重球面ジョイントは6自由度を持つ関節機構で, 全ての軸の回転中心が一点で交わったものである. この機構を用いた股関節機構はアクチュエータを増やすことなく腰関節機構の役割も持つ. バックラッシュクラッチはモータと関節の駆動伝達機構であり, 高トルク伝達特性と零トルク伝達(フリー)の両方を実現するメカニカルなクラッチである. この機構をヒューマノイドロボットの膝関節に使い, この関節の制御方法を開発した. また, 最後に二重球面ジョイントを用いた股関節, バックラッシュクラッチを用いた膝関節, サイバネティックショルダ [3] を用いた肩関節によるヒューマノイドロボットを開発し, その有効性を基礎的な実験によって検証した.

一方, これまでに開発されたヒューマノイドロボットは1[m]を超えるものが多く, その運動能力は過酷な実環境に対してあまりに脆弱である. 実環境を自在に移動す

る高機動性を実現するための運動制御は中途段階にあり，基礎理論の構築を一層押し進める必要がある。そのためにも小型・計量で実験を円滑に行うことができるヒューマノイドロボットの開発が必要であろう。そこで本件研究では，新たに小型なヒューマノイド実験環境を提供するロボットの設計を行った。これについて，詳細を述べる。

ヒューマノイドロボット UT- θ の開発

1. 二重球面股関節機構 図1に従来のヒューマノイドロボットの股関節機構を示す。この機構では，2つの球面ジョイントによって6自由度が実現されている。脚部

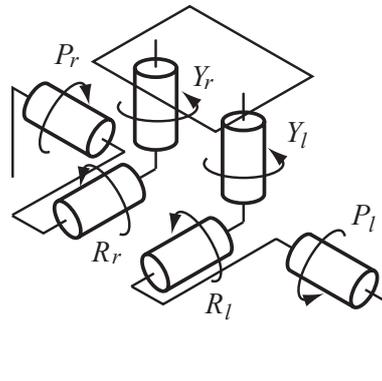


図 1: 従来の股関節機構

のロール，ピッチ，ヨー回転が独立で，その運動学的計算が容易である。図2はこの機構を用いたときの，ヒューマノイドロボットの上半身の自由度を表す。膝を曲げた状態では6自由度を有するが，膝を伸ばした状態は特異姿勢となり，右側に示された4つの自由度が残る。上半身の重心を移動して，直立姿勢を行おうとする場

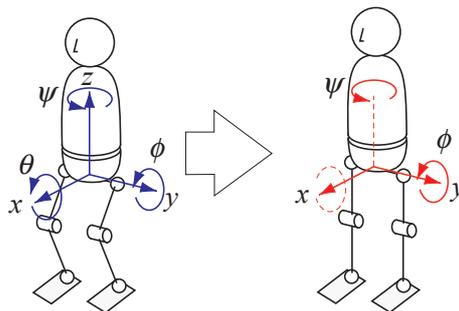


図 2: 従来機構による上半身の自由度配置

合， x 軸方向の移動には x の直動と ϕ の回転によって実現している。これに対し， y 軸方向の移動は y の直動のみによって実現可能である。この運動は図3によって実現されるが，ここでは，足首関節にも股関節と同様のトルクが働くため，大きなアク

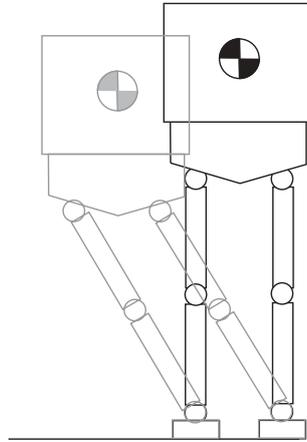


図 3: y 軸に沿った上半身の重心移動

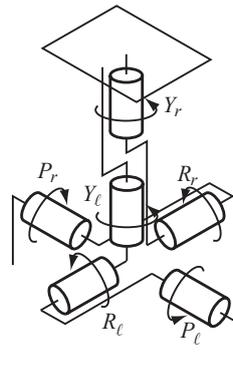


図 4: 二重球面ジョイントを用いた股関節機構

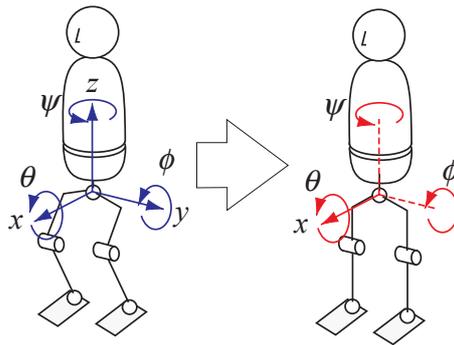


図 5: 二重球面ジョイントを用いた場合の上半身の自由度配置

チュエータが必要となる．また，膝を曲げた姿勢における ψ 回転も，脚の干渉が起
こり，その可動範囲は小さなものとなる．

これに対し，図4は提案する二重球面ジョイントを用いた股関節機構である．こ
の機構は従来のものと自由度の数は等しい． $[]_r$ や $[]_l$ で表された関節がセットに
なってそれぞれ球面ジョイントを構成している．この2つの球面ジョイントの回転
中心が一点で交わっている．

図5はこの機構を用いたときの，ヒューマノイドロボットの上半身の自由度を表
す．従来の機構と同様，膝を曲げた状態では6自由度を有するが，膝を伸ばした状
態は特異姿勢となり，右側に示された4つの自由度が残る．これは，従来の機構と
異なった自由度配置となっている．これにより， y 軸方向の重心移動が θ の回転に
よって実現されるため，足首関節に大きなトルクとを必要とせず重心移動が可能
となる．また， ψ の回転も可動範囲が大きい．ここで実現した θ 回転と大きな可動
範囲を持つ ψ 回転は腰関節機構の役割を果たしているといえる．また，この運動の
実現により，ヒューマノイドロボットは膝を曲げる必要なく，素早く重心の移動が
できるため，膝を伸ばした歩行運動が実現できるようになる．

図6は設計した二重球面股関節である．モータは，可動範囲が大きくなるように

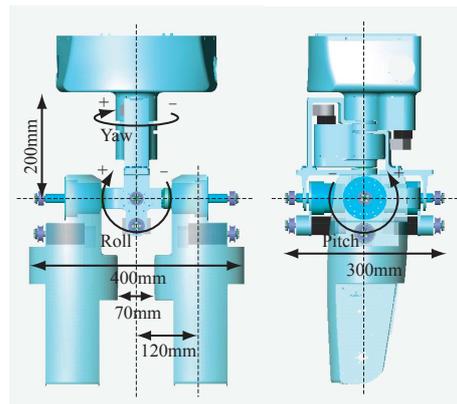


図6: 二重球面股関節の設計

配置した．図7に製作した股関節の写真を示す．90[W]，150[W]のDCサーボモ
ータと1:100のギア比を持つハーモニックギアによって各関節を構成した．この機構
の可動範囲を表1に示す．比較として，人間の股関節の可動範囲も同時に示す．人
間と同じ可動範囲が得られている様子が分かる．

2. 膝関節の設計 歩行における非接地の脚は床を蹴り上げた後，フリーな状態と
なる．この運動を図8に示す．下腿は重力に従い，膝はトルクを発生しない．この運
動は，パッシブウォークにもみられ [2]，省エネルギーで人間近い運動が生成されて
いることが知られている．小さなバッテリーによる軽量化という観点からも，外力
を利用したヒューマノイドロボットの運動生成が必要である．零トルク伝達関節を
実現する方法として，クラッチを用いる方法が挙げられる．しかし，ヒューマノイ

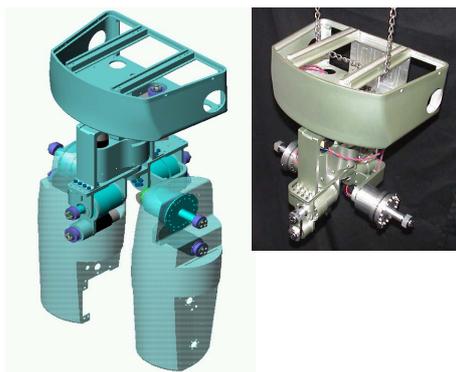


図 7: 二重球面股関節

表 1: 二重球面股関節と人間の股関節の可動範囲

	Double spherical joint	Human
Yaw	-35~35[degree]	-35~35[degree]
Roll	-50~50[degree]	-20~35[degree]
Pitch	-120~30[degree]	-135~90[degree]

ドロボットの膝関節は、屈伸運動などで大変大きなトルク伝達特性を必要とし、一般の摩擦を利用したクラッチでは不十分である。

この観点から、本研究ではバックラッシュクラッチを設計した。この機構を図9に示す。この機構は3つの部品から構成される。部品 a は上腿 A 上にあり、モータによって回転させられる。部品 b は下腿 B に固定されている。ギャップ $d=0$ のとき、モータのトルクは一方向について、 B へ伝えられる。ギャップ d が一定値になるようにモータを制御することで、フリーな状態が実現され、 $d=0$ のときに、高トルク伝達を実現する。

図10はバックラッシュクラッチのコンポーネントを示す。 a, b は図9の a, b と同じものを表している。衝撃吸収剤としてゴムを取り付けている。

バックラッシュクラッチを用いた膝関節機構を図11に示す。アクチュエータとし

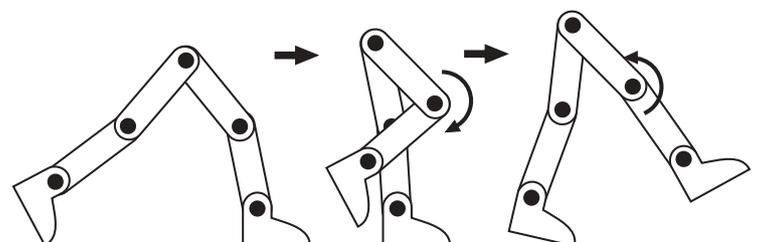


図 8: 歩行運動における膝関節のフリー状態

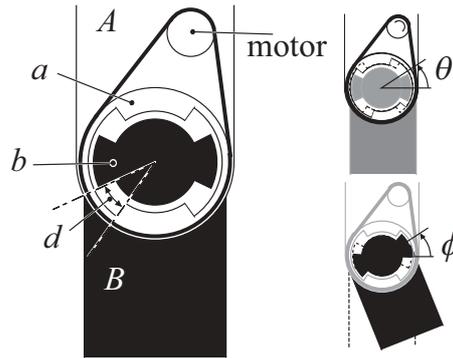


図 9: バックラッシュクラッチ

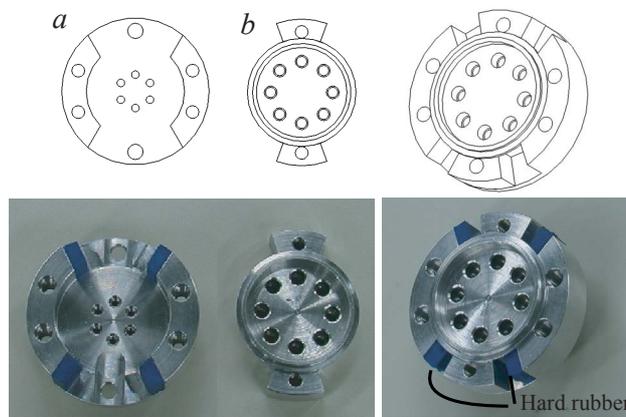


図 10: Components of backlash clutch

て、150[W] DC サーボモータと 1:100 の減速比を持つハーモニックドライブギアを用いた。図 9 の回転角 θ はモータに取り付けられたエンコーダによって計測し、 ϕ は別に取り付けたエンコーダによって計測した。

3. ヒューマノイドロボットの設計 二重球面ジョイントによる股関節機構、バックラッシュクラッチを用いた膝関節機構を用いて、ヒューマノイドロボット UT- θ を設計した。図 12 はその全身を示す。高さは約 150[cm]、重さは約 50[kg] である。頭機構を図 13 に示す。首には 3 自由度を有し、2 つの白黒プログレスシブカメラ、1 つのカラー CCD カメラを持つ。また、肩機構を図 14 に示す。大きな可動範囲、人間らしい動きを実現することを目的とし、ここではサイバネティックショルダ [3] を用いた。胴体はマグネシウム合金による鋳造によって設計し、高い剛性と軽量化を図った。

図 15 に脚機構を示す。この機構は膝に 1 自由度、足首に 2 自由度を有し、図 16 のように膝の内部にバックラッシュクラッチが設置されている。

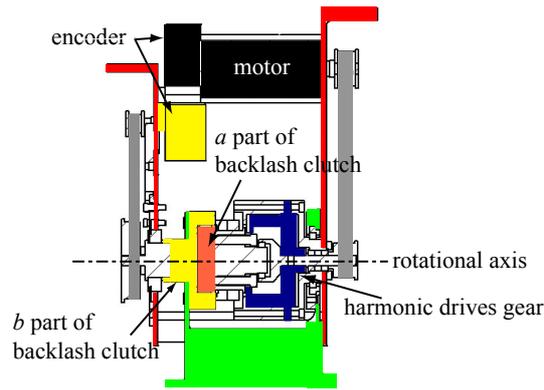


図 11: 膝関節の設計

4. バックラッシュクラッチの制御 ここでは、バックラッシュクラッチの制御について述べる。バックラッシュクラッチの状態は次の3つの制御モードに分けられる。

モード 1 零トルク伝達

モード 2 高トルク伝達

モード 3 モード 1 からモード 2 への遷移

これらの制御モードを実現するため、ここでは図 17 のブロック線図に表されるモデルマッチング問題による 2 自由度制御系を改良した制御アルゴリズムを開発した。ここで、 P はギア付きモータの伝達関数、 K はフィードバックコントローラ、 G は θ の希望の応答を実現する伝達関数である。 r_1, r_2 は参照入力で、制御モードによってこれを変える。応答のオーバーシュートをなくすため、 G は零点を持たないように設計した。オーバーシュートによってバックラッシュクラッチの a 部と b 部は激しく衝突し、クラッチをつなぐことができなくなる。

r_1 と r_2 を制御モードによって以下のように変えた。

モード 1 r_1 と r_2 を以下のように設定する。

$$r_1 = 0, \quad r_2 = \phi \quad (1)$$

これにより θ は、 d が一定値になるようになるように制御される。

モード 2 r_1 と r_2 を以下のように設定する。

$$r_1 = \phi_{ref}(\text{reference angle of } \phi), \quad r_2 = 0 \quad (2)$$

これにより、 $t \rightarrow \infty$ でこのコントローラは一般のフィードバックコントローラとして働く。

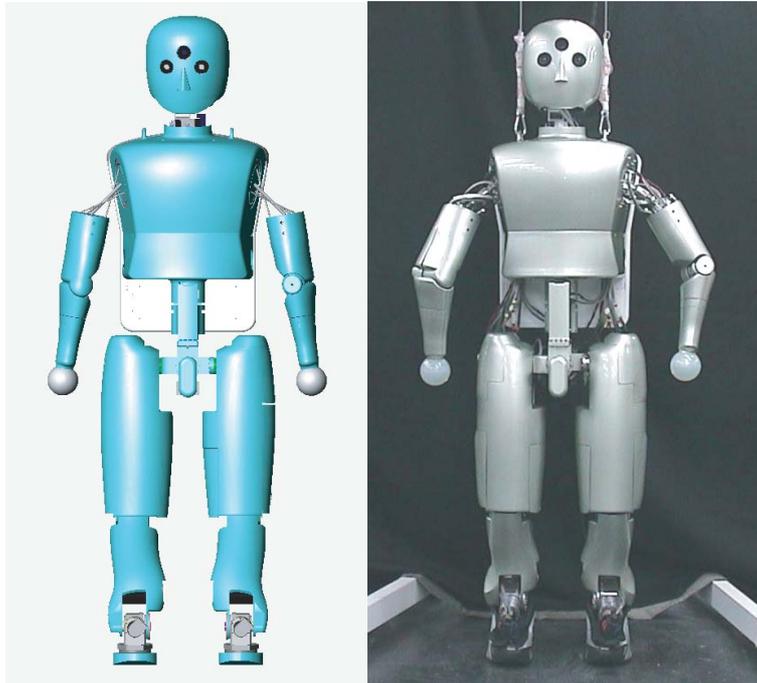


図 12: ヒューマノイドロボット UT-θ

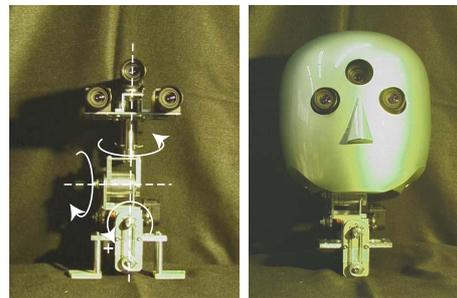


図 13: 頭機構



図 14: 肩機構

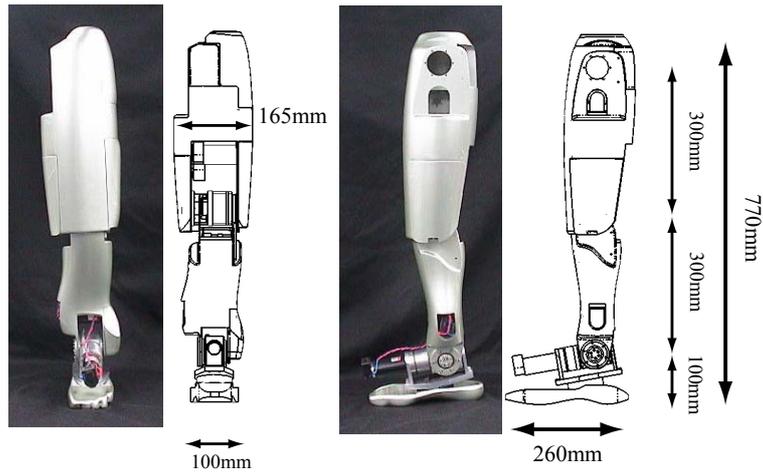


図 15: ヒューマノイドロボットの脚機構

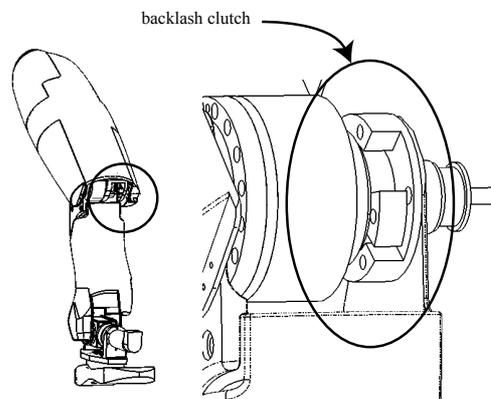


図 16: バックラッシュクラッチの設置

モード 3 r_1 と r_2 を以下のようにする .

$$r_1 = \phi_{ref}, \quad r_2 = \phi \quad (3)$$

2 自由度制御系において, G が零点を持たないように設計されるため, a 部は b 部に滑らかに衝突する .

この制御アルゴリズムを用いてモード 1 を実現し, フリーな関節を実現した . 図 18 に実験結果を示す .

上図は θ と ϕ の応答を示す . 下図はバックラッシュのギャップ $d(=\theta - \phi)$ を示す . このバックラッシュクラッチのギャップは約 3[degree] で設計されており, ギャップの最大値は約 ± 2 [degree] であるため, フリーモードが実現可能である . 図 19 は制御モードを変化させたときの膝関節の動きである . 6 軸トルクセンサによって足裏の接地を検出し, 以下のように制御モードを変更した .

- 0~0.8[sec] : モード 1

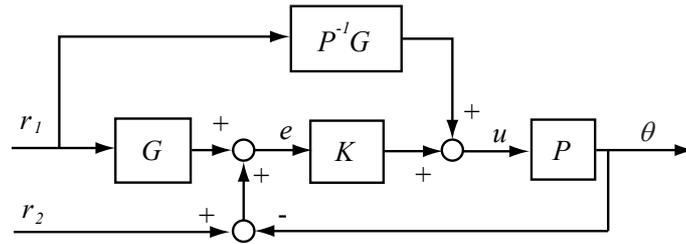


図 17: 2 自由度制御系

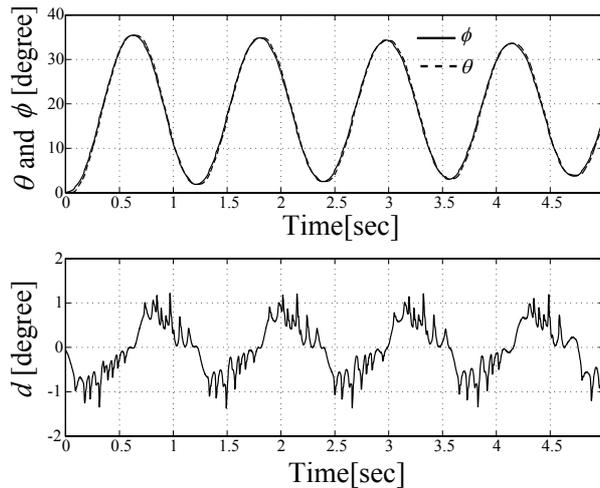


図 18: フリーモードの実現

- 0.8~1.6[sec] : モード 3
- 1.6~5.6[sec] : モード 2 に設定し , その後膝を曲げた .
- 5.6~6.6[sec] : モード 2
- 6.6~ : モード 1

フリーモード , ハイゲインコントローラによる膝の制御 , モード 1 からモード 2 へのスムーズな遷移が実現されている .

高機動性獲得に向けた小型ヒューマノイドロボット UT- μ の開発

5. 運動制御実験のための小型高機動ヒューマノイドロボットの開発 本研究では , 小型・軽量で実験を円滑に行うことができ , 人間と同サイズのロボット制御において有意な知見を得られる信頼性の高いヒューマノイドロボットを開発した .

開発したヒューマノイドロボットの全身外観と関節配置 , およびサイズ等のスペックを図 20 に示す . 全関節ともアクチュエータにコアレス DC モータ (MAXON) , 減速器にハーモニックドライブを採用し , 主要な関節のモータ出力は 11[W] とするこ

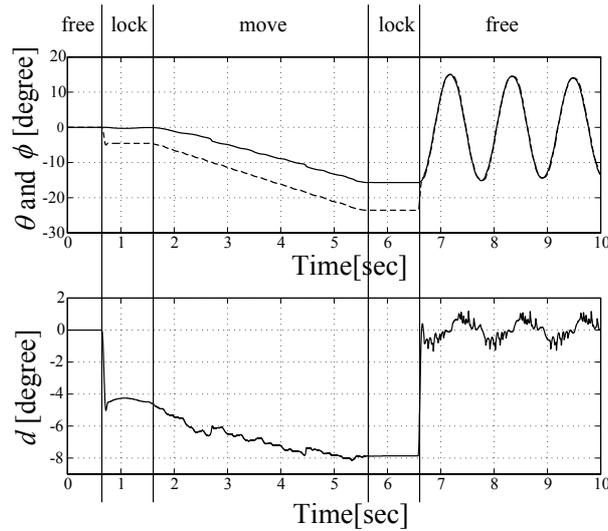


図 19: 制御モードの変化による膝関節の回転角

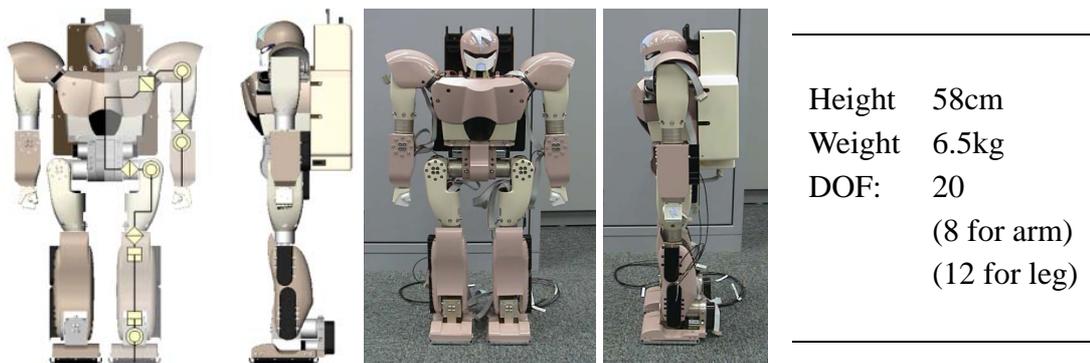


図 20: ロボットの外観と仕様

とによって高い制御精度とトルク出力を実現した。他の同サイズクラスのロボットよりも関節部の総重量は若干大きめとなるが、主構造材にマグネシウム合金を用い、曲面を多用した鋳造による筒型の薄肉外殻で各々の関節を連結した構成とすることで、重量の増加を抑え、剛性の高い構造を実現した。また各関節を直交二軸ユニットとしてモジュール化することで部品点数の削減とメンテナンス性の向上、設計時間の短縮といった効果も得られている。

関節配置には次のような特徴を有する。

i) 股関節

図 21 のように、股関節の前後左右方向、特に開脚方向への十分な可動範囲を確保することを狙いとした配置となっている。またこの結果大きくなった左右股関節間の距離を股関節に対して膝関節を内側に配置することで相殺し、運動中の左右への揺動を抑える(図 21.a)。

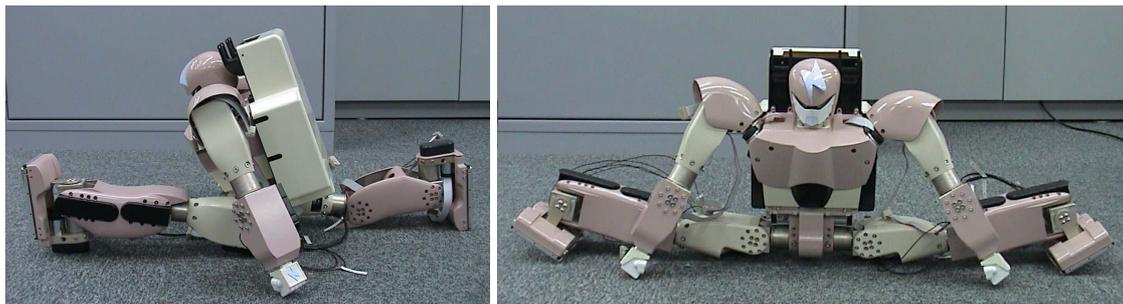
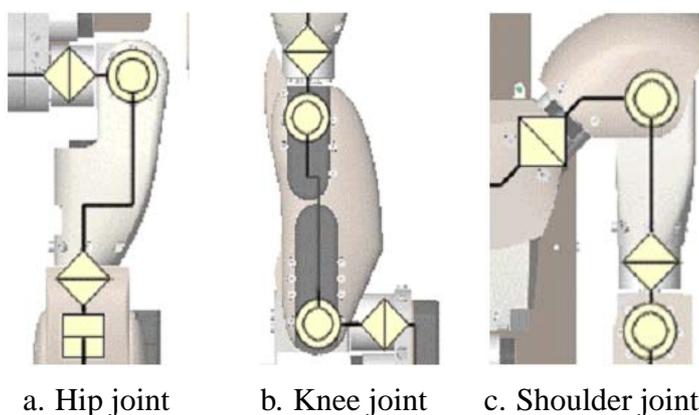


図 21: 股関節機構



a. Hip joint

b. Knee joint

c. Shoulder joint

図 22: 関節配置



図 23: 手をあげた姿勢

ii) 脚前後方向回転関節

足首前後方向関節軸を股関節・膝関節よりも後方に配置し(図 21.b), 直立時に特異姿勢となることを回避する.

iii) 肩関節

肩付け根部の関節を斜め上方に向けて取り付け(図 21.c), 人間の肩部のように前後・左右方向の回転を干渉させた滑らかな運動を行わせる(図 23).

図 24 にハードウェアシステムの構成を示す. 運動の障害となる外部との接続ケーブルを排除し, 制御PC, バッテリーを内蔵した自立システムとした. プロセッサボードは CPU に Geode GX1(National Semiconductor) を搭載した CARD-PCI/GX(EPSON) と I/O ボード(富士通オートメーション)とのユニットを採用している. PC は無線 LAN(Melco) によってインターネットに接続しており, 遠隔オペレーションが可能である. また小型 USB Hub(Sanwa) を用いて USB による体内 LAN を構築し, アクチュエータ及びセンサとの通信制御を行う. アクチュエータは, コアレス DC モータをモータコントローラ iMCs01+モータドライバ iMDs03(iXs リサーチ) によって制御する. センサ類は, 角速度計測ジャイロ MG2(MicroStone) 及び加速度計 MA3(Microstone), 3 軸力センサ PicoForce(NITTA) を搭載し, A/D コンバータには iMCs03(iXs リサー

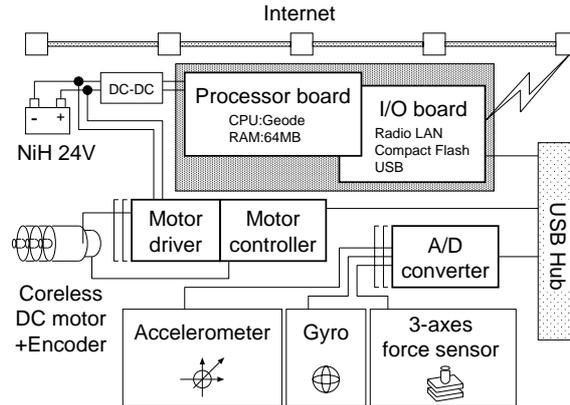


図 24: ロボットのハードウェアシステム

チ)を用いる。3軸力センサは左右各足に4個ずつ配置し、偶力を合成することによって足全体に作用する等価6軸力を計算することができる。左右手首にも1個ずつ取り付けており、手先に発生した力を計測することができる。

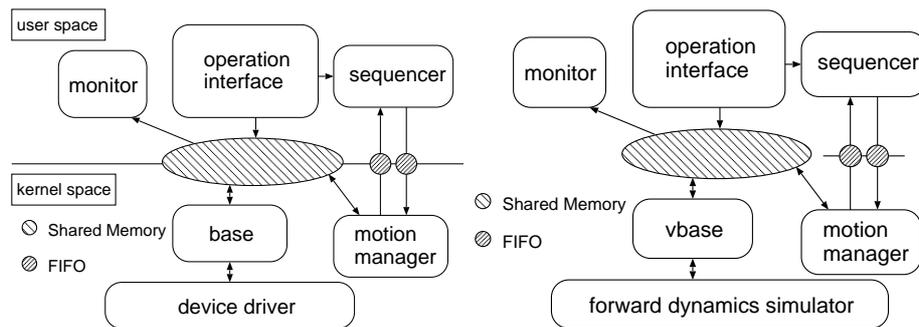


図 25: Z-REVICHS のソフトウェアシステム

実ロボットを用いた実験における危険性・コストを低減するためシミュレーションを併用することが有効だが、それによって作成したソフトウェアを可能な限り変更することなしに実ロボットへと適用できることが望ましい。このような要求の下に開発した制御ソフトウェアシステム Z-REVICHS の構成を図 25 に示す。これはシミュレータ内の仮想ロボットと RTLinux 上で動作する実ロボットとを統一的に制御するシステムであり、シミュレータとの通信モジュールとロボットのデバイスドライバを直接管理するモジュールのみを入れ替えることによってシミュレーション上で検証された制御アルゴリズムの実機システムへの実装を効率的に行うことができる。

6. 倒立振り子モデルに基づいた反力操作によるヒューマノイドロボットの高機動化制御 力学系としてのヒューマノイドは、

1. 通常 20 ~ 50 の関節を持つ大自由度系である。

2. 慣性系に固定点を持たない劣駆動系であり，関節に働くトルク (内力) を接地点を介して環境に作用させ，その反作用として受ける外力によって初めて運動が可能になる．
3. 運動に伴い接地状態が次々に変化し，環境と一種の構造可変系を成す．

といった三つの特徴を持つ強い非線形系である．このため，制御の問題には原理的に閉じた解が存在しない．一方でヒューマノイドロボットに求められているのは人間との形態類似性を活かし複雑な環境下で様々なニーズに応える我々の生活支援活動であるが，実環境は予測不可能な要素に富み問題を一層困難なものにしている．

上に記してある通りヒューマノイドの運動制御の鍵となるのは環境から受ける外力の操作である．i) 目的とする運動を遂行するためにどのような外力を得るべきか，ii) どのようにしてその外力を得ればよいか，基本となる運動能力を備えるための問題はこの二点に集約される．本研究ではこれらを解決するために次のような考え方に基づく．

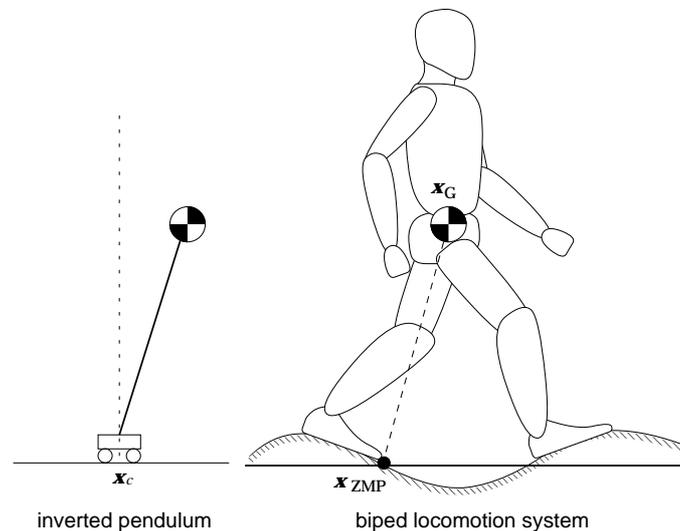


図 26: 倒立振子と二足歩行モデル

極めて複雑なヒューマノイドの運動も図 26 に示すような重心と外力との関係を抽出した比較的単純なモデルによってその本質的力学特性を表すことができる．ここで，外力の作用点重心の回りに発生するモーメントの水平成分がゼロとなる(このことから，この点は ZMP, Zero Moment Point と呼ばれる)ことに注意すると，これは重心を先端質量，ZMP を支持点とした倒立振子にモデル化できる．倒立振子は制御理論の検証モデルとして古くから用いられており，様々な制御方法が提案されている．これより，系に与えるべき外力の決定問題は倒立振子の制御と同じ方法を適用することで解決される．

また，この考えに従って決定した外力と等価な内力をどのように計算するかという問題は，倒立振子でモデル化された簡易モデルと多自由度系である実際のヒューマノイドモデルとの間のギャップをどのように補間するかという問題に帰着される．

ここで加えられるべき外力によって発生すると考えられる重心加速度は陽に計算できるので、それと等価な全身関節角加速度を計算することができればこの問題は解ける。しかし、多自由度系であるヒューマノイドの厳密な運動方程式はサイズが大きな行列とベクトルによって表されるため、そのまま用いたのでは計算コストが高くなってしまおうという実装上の問題が生じる。そこでこれを一階積分し、系全体に作用する力積と運動量との関係式で置き換える。これは各リンクの局所的なダイナミクスを無視することで計算量を低減しながら系全体の大局的なダイナミクスを確実に捉えようというアプローチである。系の運動量は単純に重心速度にロボットの全重量を乗じたものとなるので重心速度を操作できれば運動方程式に基づいた外力操作の適当な近似となる。本研究では重心速度と全関節角速度とを関係づける重心ヤコビアン的高速な計算法を考案し、これを用いて目標となる重心速度を全関節角速度に分解できることを示した。この分解された目標角速度に従って各関節を制御する。

以上の方法に基づき、次に挙げる三つの制御法を開発した。

1. 二重時間型外乱吸収法

活動する環境についての情報が既知であるという条件の下で全身関節の軌道を予め決定し、それに対応する外力の軌道を力学計算によって求めるという方法を採用すればバラエティに富んだ動きや綿密なパスプランニングに基づいた動きを比較的容易に実現することができる。しかし、環境やロボットのモデル化誤差等に起因する外乱によって計画軌道からのずれが生じるため、これを補償する安定化制御が必要である。脚ロボットにおける安定化では接地状態を維持するための外力軌道誤差吸収と目的動作遂行のための関節軌道誤差吸収という二つの競合する事項を共に達成しなければならない。しかし、前者に対して後者は比較的遅いタイムスパンで考慮してもよい。この点に着目して多重な時間オーダーの下に両者を解決する二重時間型外乱吸収法を開発した。図 27 は同方法によって生成した歩行運動の様子を示したスナップショットである。

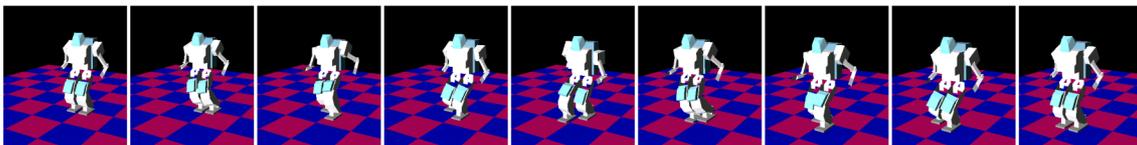


図 27: 二重時間型外乱吸収法による歩行運動

2. 倒立振り子モデル型重心制御

前述の方法は環境がほぼ既知であり、かつ外乱が十分小さいことを仮定している。実際の環境は他の移動物や地形の変化などの未知要素に富むためそれらを速やかに回避したり衝撃を柔軟に吸収したりするなど、敏捷性の高い運動が求められる。こ

れを実現するために、関節角の軌道を陽に計画するのではなく、操縦者が重心と足先のおよその目標速度だけを与え倒立振り子制御及びマニピュレータ制御に用いられる速度分解法と同様の方法によって全身運動を制御する方法を開発した。図 28 は同方法を用い、踏み換え運動中に横方向に受けた衝撃を吸収する様子を示したスナップショットである。

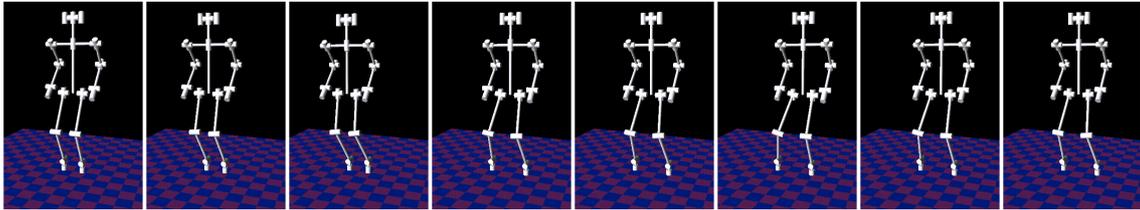


図 28: 踏み換え運動中の衝撃吸収

3. インピーダンススイッチングによる接地状態遷移

倒立振り子は支持点の水平位置を操作するものであり重力方向の運動はあまり考慮されない。また、支持点が常に地面との接触を維持するということが前提条件となる。しかし、より大きな衝撃に対し柔軟に振る舞わせる、動作のパラエティを更に充実させる、踏破可能な行動範囲を拡大するためには重力方向の運動制御、特に無接地期間を経由するような運動である跳躍や走行を実現することが求められる。そこで、提案してきた倒立振り子モデルを拡張し、軸部分に仮想的なインピーダンス要素を付加した。特に、このインピーダンスを様々な値に切り換えることで系全体の重力方向力学的エネルギーを制御することができるため、十分なポテンシャルエネルギーを発生させて跳躍させたりコンプライアンス特性を与えて着床時の衝撃を吸収したりすることが可能となった。図 28 は同方法によって跳躍運動を実現する様子を示したスナップショットである。

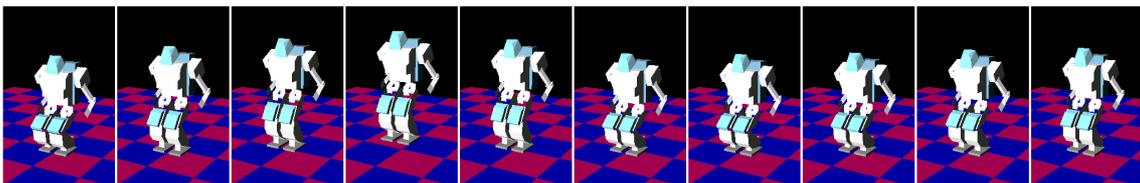


図 29: インピーダンスの変更による跳躍動作

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

本研究では、二重面ジョイントとバックラッシュクラッチを開発し、これらを用いた股関節機構、膝関節機構を設計・試作した。これらの機構を用いることで以下の結果を得た。

1. 二重球面ジョイントを用いた股関節機構は従来の機構と同様の自由度範囲で腰関節機構の機能を有する。これにより、二重球面ジョイントによる股関節機構を用いたヒューマノイドロボットは膝を曲げる必要なく上半身の重心を制御でき、膝を曲げない歩行運動が実現可能である。
2. バックラッシュクラッチを用いた膝関節機構は、零トルク伝達特性(フリー状態)と高トルク伝達特性の両方を実現する。これにより、この膝関節機構はロボットの身体と環境との力学的な相互作用を可能とし、重力の運動に従った省エネルギーな運動、身体の力学に従った独自の運動を実現可能である。
3. 2自由度制御系を用いることで、バックラッシュクラッチの制御アルゴリズムを提案した。目標入力の切り替えにより、3つの制御モードの切り替えを行い、クラッチオン/オフのスムーズな切り替えを実現した。
4. 提案した2つの機構に加え、これまでに開発してきたサイバネティックショルダを用いることで全身型ヒューマノイドロボットを開発した。このヒューマノイドロボットは機構的な特徴のみならず、身体にマグネシウム合金による鋳造部品を用いることで、軽量化・高剛性化を実現している。

また、運動制御実験のための小型高機動ヒューマノイドロボットを開発し、倒立振子モデルを用いた制御法について述べた。

参考文献

- [1] K. Kaneko, S. Kajita, F. Kanehiro, K. Yokoi, K. Fujiwara and H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirota and T. Isozumi : Design of Advanced Leg Module for Humanoid Robotics Project of METI, Proc. of Int. Conference on Robotics and Automation, pp.38–45, 2002.
- [2] T.McGeer : Passive Walking with Knees, Proc. of IEEE Robotics and Automation Conference, pp.1640–1645, 1990.
- [3] M.Okada, Y.Nakamura and S.Hoshino : Development of the Cybernetic Shoulder –A Three DOF Mechanism that Imitates Biological Shoulder-Motion –, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS'99), pp.543–548, 1999.