

人間動作の写像によるアンドロイドの人間らしい動作生成

Generating Android's Natural Motion by Mapping Human Motion

松井 大輔[†] 港 隆史[†] Karl F. MacDorman[†] 石黒 浩[†]

Daisuke Matsui Takashi Minato Karl F. MacDorman Hiroshi Ishiguro

1 はじめに

近年、日常活動型ロボットの研究開発が盛んになってきているが、その中でも特にヒューマノイドロボットが注目を集めている。産業ロボットの形態がその機能から決定されているのと同様に、ヒューマノイドロボットの人間の姿にもいくつかの機能がある。その中でも人型の姿をもってしかなしえないタスクは、人間の日常生活の中での人間との自然なコミュニケーションである。すなわち人間と自然なコミュニケーションを行うことができる存在であるということに、ヒューマノイドロボットの大きな存在意義がある。

人間との自然なコミュニケーションを実現するためには、ロボットの動作だけではなく、その形態もまた問題となる。これまで種々のヒューマノイドロボットが開発されているが、機械らしい見かけがよいのか、人間にできるだけ近い見かけがよいのかという問題については研究されていない。我々はその答えとして、自然なコミュニケーションをもたらす究極の存在は、人間にできるだけ近い姿、動作を有するロボットにあると考える。逆に、人を人と認識するための要素が明らかになれば、自然なコミュニケーションをもたらす形態が明らかになると考えられる。本研究ではこの問題を明らかにするべく、人間として認識される究極のヒューマノイドロボットの実現を目指して研究を行っている。

人間に酷似したロボットを作るためには、人間の運動機構と等価な運動が可能な機構を作成することが考えられる。しかし人間の筋骨格を完全に実現する機構を追究すると、人間に酷似した見かけの実現との両立が困難となる。本研究ではこれまでに、見かけを可能な限り人間に近づけ、かつその制約の下で多自由度の関節を有するヒューマノイドロボットを開発した。本研究ではこのロボットをアンドロイドと呼んでいる。このアンドロイドが人間として認識されるためには、どのようにして人間が自然と感じる動作を生成するかが問題となる。

動作を生成するためには、各関節位置軌道を与えなければならないが、多自由度ロボットにおいてはそれらをすべて手動で設計するのは困難である。従って、低次元パラメータ空間での動作の設計が必要となる。マニピュレータの軌道生成においては、例えば¹⁾のように人間の動作特性を解析し、その特性に従った評価関数に基づく軌道生成手法などが提案されている。また運動計測装置(モーションキャプチャ)で計測した人間の運動データをロボットにマッピングして動作を

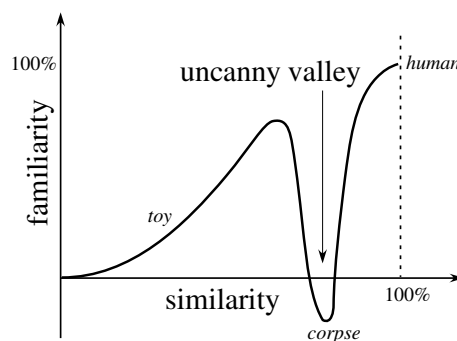


Fig.1 Uncanny valley

生成する手法が考えられる。そのためには自由度の異なる人間とロボットの関節角空間のマッピングが必要となる。合志ら²⁾は超多自由度の人間筋骨格モデルの姿勢と低自由度ロボットの姿勢の間の写像を求める手法を提案している。しかしこれらの研究では、実際の多自由度ヒューマノイドロボットの動きの自然さを評価するまでには至っていない。

また自然さの実現に関して、機械的な外観を持つヒューマノイドロボットと異なり、アンドロイドには「不気味の谷」³⁾という問題がある。これは森が示したロボットの性質で、Fig.1に示すように、ロボットの見かけおよび動作が人間のそれに近づくと、人間に与える親近感が増加するが、人間とわずかに違う部分では不気味さを与えるというものである。従来のヒューマノイドロボットでは谷の左側に位置すると考えられるが、人間と酷似した見かけを持つアンドロイドでは谷底から右側に位置すると考えられる。この不気味の谷の存在により、従来研究の評価がそのままアンドロイドにも適用できるとは限らない。従って実際にアンドロイドを用いた評価が必要である。

そこで本研究では、自然な動作という評価に基づいて、運動計測装置で計測した人間の動作をアンドロイドに写像することにより動作を生成する手法を提案する。以下では、開発したアンドロイドを紹介し、動作の写像における問題点と、それを解決するための考えについて述べる。そして写像における問題点、および提案した写像の実現可能性を示すための予備実験を行った結果を示す。

2 開発したアンドロイド

開発したアンドロイド(Repliee Q1)をFig.2に示す。見かけは成人女性で、上半身の見えている部分はすべてシリコン製の皮膚で覆われている。上半身に

[†] 大阪大学, Osaka University



Fig.2 Android “Repliee Q1”

Table 1 Degree of freedom

	Degree of freedom
Eyes	5
Mouth	1
Neck	3
Arms	(Shoulder 5+Elbow 2+Wrist 2)×2
Torso	4

31 自由度 (Table 1) の関節を有しており、それらは全てエアークチュエータにより駆動される。またエアークチュエータはダンピング特性があり、コンプライアンス制御なしに柔らかな制御が実現できる。この特性は実際にアンドロイドと触れ合うコミュニケーションにおいて有効である。センサとしてピエゾ素子を利用した高感度皮膚センサを上半身の 11 カ所の皮下に備える。このセンサは素子の変形速度に応じた値を出力するため、皮膚を強く叩く、軽く触れるなどを識別することができる。アンドロイドの制御は外部コンピュータから各関節の位置を指令することにより行う。アクチュエータは回転型、直道型が混在しており、また回転 - 直動変換機構が多数使われているため、多くの関節で指令値が関節角度に比例しない。

3 人間の動作写像

人間の動作をロボットに写像する研究は以前からされている。その一般的な方法としてはロボットの関節角構造を人間に仮定し、その関節角構造に基づいて人が動作していると見なす。そして運動計測装置を用いて計測した人間の動作からその関節角を計算し、その人間の動作の関節角度をロボットの入力角データに写像する事により動作の写像を試みる。これは人間の身体特徴がロボットのものとは違うためにその差異を消去する必要性があり、関節角度という無次元数を媒介に使うことによりそれを可能とするためである。

3.1 写像の問題点

しかしこの方法では今研究において問題点が存在する。

まず関節角度で動作を扱う点である。一般的にヒューマノイドロボットは人間の構造に似せて作られているが、あくまで類似的な構造であってその構造を人間に仮定したとしても確実に当てはまるわけではない。そのためにアンドロイドの関節角構造に対応する関節角度を動作データから正確に取得するのが困難である。また、アンドロイドは関節角度が入力データに対して比例しない自由度が存在するため、関節角度を用いて写像する方法は大変扱いにくい。

さらに、本研究では評価基準は動作の人間らしい自然さであるが、人間がある動きを人間らしいと見なすのは関節の動きではなく体表面の動きである。従って関節角度ではなく体表面の動きを使用した方が人間らしさを評価しやすいと考える。そこで次のような手法を提案する。

3.2 提案する手法

前節の関節角度を使用する問題点を解決する方法として、体表面の動きのデータの使用を提案する。具体的には人間のみならずアンドロイドの三次元データも運動計測装置を用いて取得し、それらの値を用いて写像を評価する。もしアンドロイドとほとんど同じ体型をした人間のある動作を写像した時に、その動作の三次元データとアンドロイドに写像された動作の三次元データが同様になれば、それは体表面の動きが同じであるので写像された動作は人間らしいはずである。よって、人間動作の体表面の三次元座標データを十分な精度でロボットの体表面の三次元座標データに適用できたならばその動作は人間らしさを有していると考えられるため、本手法ではいかに精度よく動作を写像するかを考慮している。

3.2.1 基本姿勢

本手法の基本姿勢を示す。人間動作をアンドロイド動作に写像する方法としてフィードバック誤差学習⁴⁾を使用する。その入力人間動作の三次元座標データ、出力はアンドロイド動作の三次元座標データとし、フィードフォワードの運動指令部分はアンドロイドの制御変数を適用する。また人間動作を大まかな動作と細かな動作に分割し写像することにより、精度の向上を目指す。具体的には次より述べる。

3.2.2 フィードバック誤差学習

人間の動作をアンドロイドの動作に適用させ制御する方法について大まかな流れを示す。

1. 人間動作の三次元データを重みが設定されたニューラルネットワークでアンドロイドの制御データに写像する。
2. その制御データによりアンドロイドを動作させる。
3. そのアンドロイド動作の三次元座標データを得る。
4. アンドロイド三次元座標データと人間三次元座標データとの誤差(フィードバックエラー)を得る。
5. その誤差を修正する制御データを得る。

6. その制御データで再び人間動作をニューラルネットワークで学習させることにより誤差が縮まる。

7. 2に戻る

これを繰り返し、一つの動作に対してニューラルネットワークによる写像を収束させる。その動作の収束後次の動作を同じニューラルネットワークに学習させる。(上記1番)その動作に対しても2~7番を繰り返し収束させる。この様にさまざまな動作に対して学習を行わせることにより任意の動作の写像が可能になると考える。概略としてブロック線図をFig.3に示す。それぞれの番号は上記の手法の適用順番に一致する。

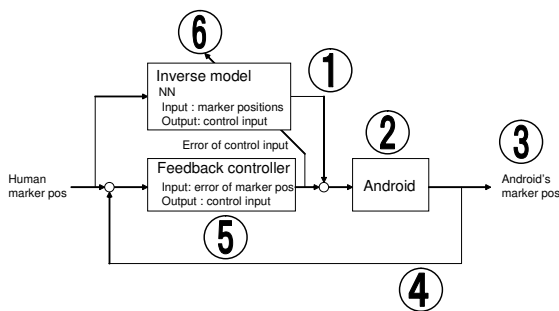


Fig.3 feedback error learning

3.2.3 動作の分割化

次に写像するにあたり一つの提案を示す。

一般的に人間の一つの動きは二種類の動作に分けられる。一つ目は動きの意義を示すための大きな動作。二つ目は人間が無意識で行う様な微細な動作である。手を振る運動を例に挙げて考える。手を振る動き自体が一つ目の動作、呼吸などによる肩の上下運動などを二つ目の動作とみなせる。

動作を二つに分ける意義であるが、運動計測装置によって得られるデータ精度としては微細な動作を認識するに十分だが、一つ目の大きな動作のデータの値の値域に対して二つ目のデータの振幅が小さすぎるため、写像において二つ目の動作は一つ目の動作に吸収される可能性がある。つまりそのままでは大まかな動作のみが写像され、微細な動作は消えてしまうと考え。その微細な動きの中に人間の自然さが含まれている動作が存在する可能性も考えられるため、この微細な動作が写像に伴い消去されてしまうのは問題だと考える。そこで今回一つの動作を大まかな動きと微細な動きとに分割し、それぞれの動作を写像する事により十分な精度での写像が可能になると考え、人間らしい動作をアンドロイドにさせることが可能になると考える。

また、この例では呼吸をあげたが、二つ目の動作に関して必ず無意識で行うものである必要はなく、全体的な大きな動きの中の小さな動きをそれと見なせる。反対に一つ目の動きに関して大きな無意識な動きも存在するため、大まかな動きのことをそれとする。つまり、単純に動きの大きさで分割する。しかし、その分割方法に関しては単純に動作の大きさで分割するのは困難だと考えられるので、そういった意識的である

か、無意識な動作であるか、に分割のヒントがある可能性も考えられる。

3.2.4 具体的手法について

3.1節、3.2節に大まかな方針を示した。この二つの考案を重ね合わせたものを本研究の手法とする。大まかな動きと微細な動きとの両方に対してフィードバック誤差学習によるニューラルネットワークを適用し、その結果を足し合わせることによって一つの動作を写像できると考えた。

4 実験

今回上記の手法について検証するために以下の予備実験を行った。

4.1 シミュレーション実験

まずニューラルネットワークの学習能力を検証するために次の基本的な条件を考えた。

- 1: 写像元データ: アンドロイドの三次元データ
- 2: 写像先データ: アンドロイドの制御関節角データ
- 3: 以上二つを結びつける写像関数をニューラルネットワークで実現

本研究では最終的にはアンドロイドの可動範囲である上半身全体の運動の写像を実現したいが、今回実験的に右腕のみの写像をシミュレーションで試みた。シミュレーションではあるが、実際のアンドロイドの仕様とは異なる点が存在する。その条件は上記に加え、

- 4: 右腕の三次元データ取得ポイントは肩に3点、肘に3点、手首に2点および指先に1点の計9点
- 5: アンドロイド制御は関節角度で可能とし、実際の制御関節データは使用しない

- 6: それに伴いニューラルネットの写像先データはアンドロイドの制御データではなく関節角度とする
- 7: アンドロイドを可動範囲内のランダムな関節角度で制御し、出来上がる姿勢に対するアンドロイドの三次元データをニューラルネットワークの入力データとする
- 8: 教師データはランダムに入力する関節角度
- 9: 実物のアンドロイドにおいてあまり使用することのない自由度である手首の二つの関節を固定
- 10: アンドロイドの体を剛体で仮定しデータ所得ポイント間の距離は一定とする

結果入力データは 9×3 の27次元、出力データは右腕の自由度から手首の自由度を引いた7次元となる。その実験結果をFig.4に示す。この図はニューラルネットを十分学習させた後のテストデータに対する結果である。学習点はランダムに与えつづけ、のべ約100万点の姿勢データを与えた時点で学習を終えた。縦軸がニューラルネットの出力データと教師データとの誤差(単位: 度)、横軸がデータの番号を示し、グラフはそれぞれ一つの自由度を示す。

ここで単位が度であるためそれぞれの誤差は十分小さいとみなせる。1自由度のみ少し誤差が大きいこれは腕の回転角度であり動作にあまり影響しない自由度であるため学習させにくい、また逆に影響しないためにその誤差についても十分な収束とみなせる。

これらよりニューラルネットワークは、人間とアンドロイドとの差異は存在するが三次元データから関節

角度への写像を可能にするだけの学習能力を持っていると期待できる。

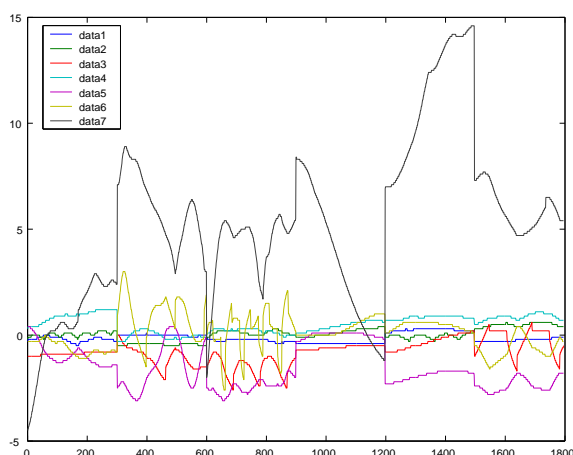


Fig.4 The result of simulation experiment

4.2 フィードバック誤差学習の必要性

そこでこのシミュレーションの結果をそのまま実際のアンドロイドに適用できれば良いが、アンドロイドに対する様々な仮定のためにそれは無意味である。また目標は右手のみならず上半身全体の動きの写像であるため、十分な精度で写像するためには普通のニューラルネットワークではなく先ほど提案した手法による更に強力な学習に必要性を見出せる。

また、シミュレーションであるために学習点をのべ約 100 万点も与えることが可能であったが、実際に人間の動作の三次元データをそのような膨大な数だけ取得することは困難である。実際そのデータを正確に取る際には人間の動作がアンドロイドの可動範囲を越えてはいけなないので、既存のアンドロイドの動作から特徴的な姿勢を抽出し、その姿勢を人間がまねをしそのデータを採取する、といった作業を逐一行わなければならない。現実的なデータ数としても 1000 点が限度である。シミュレーションの 100 万点はランダムに与えたため同じ姿勢が何度か含まれているが、それでも 1000 点を超越するだけの姿勢データを学習させているのは間違いないと考えられる。また、ニューラルネットワークの次元を考慮すると 100 万点も要しない可能性もあるが、それでも 1000 点を超越するだけの姿勢データを学習させる必要性はあると考えられる。よってシミュレーションでなく現実の実験としては普通のニューラルネットワークだけで学習するのは学習点の数において不可能だと考える。そこで今回この点においても、通常のニューラルネットワークよりも収束が早く、現実的な学習データ数で収束されると期待されるフィードバック誤差学習に必要性を見いだせる。

5 おわりに

本研究ではロボットを人間に近づけるために人間らしい動作の作成方法について、人間の動作をロボットに適用する手法の一つを提案し、その予備実験を行い提案手法の実現可能性を示した。今回写像方法の詳細には触れていないが、予備実験の結果よりフィード

バック誤差学習におけるニューラルネットワークの学習能力で実現可能だと考えた。

これからの課題としては大きな動作と微細な動作の分割手法の考案、フィードバックエラーの計算方法、およびそのエラーの学習方法の開発などがあげられ、詳細はまだ未定な部分が多いが、これらを含めて全体の動作写像システムを開発する予定である。

参考文献

- 1) 加島正, 石動善久. ヒトの運動軌道を目指したマニピュレータの軌道計画. 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 8, pp. 1131-1137, 1998.
- 2) 合志剣之助, 中村仁彦, 岡田昌史. 低自由度ヒューマンフィギュアとの双方向変換を用いた大自由度人体筋骨格モデルの運動制御. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, pp. 2P1-3F-C5, 2003.
- 3) 森政弘. 不気味の谷. *Energy*, Vol. 7, No. 4, pp. 33-35, 1970.
- 4) 五味裕章, 川人光男. フィードバック誤差学習による閉ループシステム学習制御. システム制御情報学会論文誌, Vol. 4, pp. 37-47, 1991.