人体模倣筋骨格ヒューマノイド隼志郎の全身設計

Design Concept of Detail Musculoskeletal Humanoid 'Kenshiro'

○ 中西 雄飛 (東大)

学 上月 豊隆 (東大)

学 浅野 悠紀 (東大)

浦田 順一 (東大)

学 長田 将彦 (東大)

溝口 弘悟 (東大)

白井 琢磨 (東大)

正 稲葉 雅幸 (東大)

Yuto Nakanishi, The Univ. of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo.
 Masahiko Osada, Toyotaka Kozuki, Hironori Mizoguchi, Yuki Asano, Takuma Shirai, Junichi Urata, Masayuki Inaba, The Univ. of Tokyo

We have been developed and studied musculoskeletal humanoids. Our goal is to realize a more human-like humanoid as a real human simulator, which have the same muscle and joint arrangement as humans and can do natural and dynamic motions as well as humans. Especially, it is very challenging to design musculoskeletal structure which can contain a large number of high powered muscles. Now, we design new fullbody musculoskeletal humanoid Kenshiro. This paper presents the concepts of this new robot and also shows the outline of our latest results Kenshiro, which is the succeeding version of our previous Kojiro and Kenzoh.

Key Words: Tendon-Driven, Musculoskeletal Humanoid, Human Simulator

1 はじめに

近年ロボティクス技術の発展により、詳細な実世界人体シミュレータとして人型ロボットを用いた人間の運動機能・運動制御を構成論的に解明する研究が多くなされている。Kondo らは人体同様の骨格長さ・重量比率を有する等身大ヒューマノイドを開発し、歩行支援器具を再現性の高いロボットを用いることで正確に評価する試みを進めている [1]。また Morimoto らは人体に極めて近い関節配置と可動域を有する等身大ヒューマノイドをサルの脳とブレインマシンインタフェース技術を用いて直接接続し、脳内ニューロン活動から歩行運動パターンを再構成する実験を通して脳内運動処理の解明を試みている [2]。ただしこれらの研究におけるヒューマノイドは、運動制御性の確保を第一に設計されており、脊椎や肩甲骨のような複雑複合関節や、全身冗長多数の筋は再現しておらず、詳細人体シミュレータとしての再現度は不十分であると考えられる。

一方で人間の認知発達プロセスを解明する上では、身体性が人間に近いことが重要という立場から、人体筋骨格構造の再現を第一としたヒューマノイド開発も行われており実際に脊椎構造や肩甲骨構造を再現した筋骨格ヒューマノイド ECCE[3] や、人体の脚部の 2 関節筋構造に着目した筋骨格ヒューマノイド Pneumat-BS[4] など、より人体に近い筋骨格ヒューマノイドが近年開発されてきているが、いずれも筋関節配置が人体に比べると単純化されており、人体再現には多くの改善の余地が残っている。同様の立場から、我々の研究グループにおいても、全身に 100 以上の筋アクチュエータと 70 近くの関節自由度を有する複雑度の非常に高い筋骨格ヒューマノイド開発を行い [5, 6, 7]、比較的簡単な行動例としてバランス動作・足踏み動作の実現を達成してきているが、実装上の制約から、筋配置や骨格形状を人体と変更せざるをえず、人体シミュレータとしては不完全な状態であった。

Fig. 1: Musculoskeletal humanoid Kenshiro

そこでこうした問題を解決すべく、新たな骨格形状設計と筋駆動機構を考案することで、従来の筋骨格ヒューマノイドと比較して、

- 質量バランス, サイズ
- 筋配置, 関節自由度配置
- 筋出力

において人体再現度の高い、詳細人体シミュレータとしての運用が可能な実筋骨格ヒューマノイド「隼志郎」(図.1)の開発に現在着手している。本稿では、隼志郎の設計仕様及び、それを実現するための要素技術、基本要素技術が集約されている体幹部における基礎動作検証について述べる。

Fig. 2: Specification of Kenshiro as a detail human simulator robot

2 詳細人体シミュレータ健志郎の設計仕様

健志郎の仕様を図2に示す。特に人体筋配置・関節配置を可能な限り再現しつつ、全身運動可能な出力を両立することを主眼としている。現時点で決定した仕様に基づき、主要体幹部である肩甲骨部・胸郭・脊椎部・骨盤部・大腿部・下腿部の設計及び実装が完成している。

2.1 人体の質量バランス、サイズの再現

健志郎は、新規アクチュエータを全身 100 本程度搭載可能な最も低いサイズを目標身長としており、各リンク長は、経済産業省の人体寸法・形状データ (size-JPN 2004-2006)¹ の 20-24 歳の日本人男子 170cm 想定寸法における各部位のサイズデータを、目標身長に比例変換することで各部位のサイズを決定した。また各骨格リンクの質量配分も [8] に準じて人体に準じるように仕様を決定し、実際にその範囲内に収まるように設計が成されている。結果として健志郎の身長は 158cm、体重は 50kg を想定しており、これは文科省による学校保健統計調査² によると、およそ中学 2 年男子の平均サイズに相当する。

2.2 人体関節自由度配置の再現

関節自由度及びその配置を図2に示すように、ハンドの指関節を除いて 64 自由度³となる。このうち今まで我々が

開発してきた筋骨格ヒューマノイドと大きく異なる関節構造として、体幹脊椎部と膝部が挙げられる。

脊椎部は従来、1 節が 3 自由度球体関節から構成される 3 節から 10 節の多節構造として近似していたが、実際の人体体幹可動域は、胸椎 12 節で Roll 軸 $\pm 20[\text{deg}]$, Pitch 軸 $+45[\text{deg}] \sim -40[\text{deg}]$, Yaw 軸 $\pm 35[\text{deg}]$ を、腰椎 5 節で Roll 軸 $\pm 20[\text{deg}]$, Pitch 軸 $+60[\text{deg}] \sim -20[\text{deg}]$, Yaw 軸 $\pm 5[\text{deg}]$ を有し [9]、腰椎部は Yaw 軸運動には寄与していないといえる。そこで健志郎脊椎体幹では、腰椎を Roll 軸及び Pitch 軸方向のみに動く Yaw 軸拘束 2 自由度球関節 5 節構造、胸郭を可動しない一体構造⁴、胸郭と腰椎間に Yaw 軸周りに動く 1 自由度軸関節によって近似を行った。なお体幹全体としては、人体の腰椎及び胸椎を合わせた可動域を実現可能としている。

また、従来膝関節は単純な 1 軸関節や転がり関節によって簡略化されていたが、健志郎においては、十字靭帯を模した Pitch 軸リンク構造や膝蓋骨機構、膝 Pitch 姿勢に応じて Yaw 軸可動域が変化する終末強制回旋機構を備えた人体膝関節に近い複雑な構造を採用することで、より人体に近い筋関節構造の再現を行っている。

⁴ 胸郭内部には腕部、体幹、頸椎を駆動する 30 近い筋が搭載されるため、胸椎が動いてしまうとこれらのアクチュエータと干渉を起こす可能性が高いため、胸郭自由度を拘束している。ただし、後述するように健志郎胸郭は 9 節の肋骨椎骨よりなる多関節構造によって構成されており、これらが動かないように機械的拘束を付与することで一体としており、今後自由度を追加可能な構成として設計を進めている。

¹ <http://www.meti.go.jp/press/20071001007/20071001007.html>

² http://www.mext.go.jp/b_menu/toukei/chousa05/hoken/kekka/kdetail/1303380.htm

³ 頸部 (13), 腕部 (13x2), 脚部 (7x2), 脊椎体幹 (11)

Fig. 3: Bone structures of Kenshiro

2.3 人体筋配置の再現

筋配置は図.2 に示すように人体の代表的な筋の起始点停止点を再現しており、筋と骨格間の干渉も可能な限り人体を再現するべく筋経路に関わる骨格形状については、人体を近似するよう設計を行っている。筋駆動アクチュエータは全身 102 本 (頭部、ハンド指部を除く)、総筋本数は 160 本⁵であり、従来開発した筋骨格ロボットを大きく上回る複雑度及び人体再現度を達成している。なお、駆動アクチュエータ数と筋本数が一致しないのは、主に体幹部・肩関節部において動滑車を用いた面状筋機構に似た動きを行う複数筋を単一のアクチュエータによって駆動する方式を隼志郎は採用しているためである。

2.4 全身運動実現を目指した出力向上

手首駆動筋以外の全 94 筋を MAXON 製 100WAC モータによって構成し、総定格出力は 10000[W]、質量当たり出力は 200[W/kg] を予定しており、これは小次郎の総定格出力の約 5 倍、質量当たり出力は約 3 倍となり、大幅な出力強化を達成している。隼志郎の膝関節出力を例に挙げると、発揮トルクは連続 116[Nm]、無負荷回転数は 19.6[rpm] であり、これは既存の歩行を可能としている等身大軸駆動ロボットの軸出力と比較して遜色ない出力となる。こうした出力改善に基づき従来我々が開発した等身大筋骨格ヒューマノイドでは困難であった背骨を用いた歩行動作の実現、胡坐や正座状態からの立ち上がり動作といった全身運動を実現し、その際のアクチュエータ付加を計測することで、歩容の与える筋への負荷影響評価を行っていく。

3 隼志郎開発における鍵要素技術

ここでは 2 で挙げた隼志郎の設計仕様を実際に実現可能とした鍵となる要素技術を紹介する。

3.1 人体骨格形状を近似した骨格設計

2.3 で前述したように、人体の起始点停止点だけでなく途中の筋経路を含めて人体を再現していくためには、筋と

⁵脚部 50 本、体幹部 76 本、肩頸椎部 102 本、腕部 22 本

Fig. 4: Spine structure of Kenshiro

骨格が干渉する部位の骨格形状を再現する必要がある。基本的に人体においては、駆動筋は骨格構造外面を纏わりつくように接触干渉しているため、結果として骨格外面形状を近似した骨格を構成する必要がある。一方、従来我々が開発してきたロボットにおいては、自由で複雑な曲面形状の実現が容易なラビッドプロトタイプ製法による ABS 樹脂やナイロン系樹脂骨格を用いていたが、強度不足を補うために骨格を肉厚化する必要があり、突起部や薄板形状の多い人体骨格構造を再現することが困難であった。

そこで、隼志郎では ABS やナイロン樹脂よりも剛性及び強度に優れた金属 (アルミ合金、鋼) や CFRP 素材によって骨格を構成することで、人体に近い骨格形状の実現を可能としている。ただし、従来の RP 方式と異なり、こうした高強度素材を複雑形状で実装するにはコストがかかるため、骨格部位形状によって加工製法を適宜変更することで加工コストの低減を図っている。図.3 が実際の隼志郎骨格の例である。例えば、部品点数が多く複雑な 3 次元形状の多い肋骨構造はロストワックスアルミ casting によって、複雑な自由曲面であるが凸曲面によって構成される骨盤はアルミ切削によって、自由曲面からなる細長構造である鎖骨は CFRP 材によって開発を行っている⁶。また、椎骨部のように、本来一体である骨格を突起部と関節部に分けてそれぞれを比較的加工容易なシンプルな構造に近似することで、加工コストの削減を行うことで、RP 製法による加工コストを大幅に超えない範囲での開発が可能となっている。

3.2 強力バネと面状筋機構による体幹駆動筋数の低減

人体体幹は骨格構造としては胸椎 12 節、腰椎 5 椎の計 17 節からなる超多関節構造であるが、骨盤に対する頸部下端 (胸郭最上部) の能動制御自由度は 6 から 9 自由度程度であると考えられる⁷。

そこでまず、隼志郎の体幹 6 節全てにおいて異形線強力押しバネを椎間板部に挟み込み直立姿勢への復元力を発生させることで、全脊椎関節を能動筋で拘束せずとも、骨盤—胸郭間に駆動筋を張るだけでも脊椎姿勢を安定化可能な設計とした (図.4)。なお、椎間板部押しバネのバネ定数は 45[kgf/mm] であり、これは胸郭・頭部・腕部の想定重量である 20kg を

⁶CFRP 鎖骨については、隼志郎ではなく前バージョンの隼志郎用のものを試作し強度検討を行っている。

⁷例えば途中の椎骨を独立に Yaw 軸周りに回転制御することは事実上不可能であることから、ヒトは自身の全 17 関節全ての自由度を独立に制御できるわけではない、といえる。

Fig. 5: Spine movement of Kenshiro(Pitch:upper, Roll:middle, Yaw:lower)

駆動筋なしでも支えることが可能な十分強力なバネを選定している。

体幹部を駆動する筋としては、腹直筋、内腹斜筋、外腹斜筋、脊柱起立筋、大腰筋の5種類で左右10筋を再現している⁸。これらの駆動筋は、それぞれ単一の駆動筋を動滑車にて折り返すことで、従来我々が開発してきた筋骨格ロボットのように線状ではなく人体の筋のように面状の筋構造として再現されている。脊椎駆動筋アクチュエータ数は前述した通り10本であるが、見かけの筋本数は、このような面状筋機構[10]を採用することで80本となり、これら膨大な筋をスリーブで包むことで、別途ゴムやウレタンフォームなどの外装部品を追加することなく、柔らかな腹部を実現することが可能である。

結果として、小次郎など今までの筋骨格ロボットと同様の脊椎関節自由度を有しながらも、腱志郎は駆動筋本数を強力バネと面状筋機構によって低減することに成功し(小次郎24筋に対し、腱志郎は10筋)、その分、従来人体を再現する上では不足していた股関節駆動筋や肩関節駆動筋を骨盤や胸部により多く搭載することが可能となり、詳細人体筋骨格シミュレータ腱志郎の設計仕様コンセプトを実現している。

図5は実際に腱志郎体幹部のみの運動の様子を示している。駆動筋を減らしてもRoll軸、Pitch軸、Yaw軸運動が問題なく行っていることが確認できる。

⁸ 人体の体幹駆動筋として存在するが腱志郎に存在しない筋として、腰方形筋は取り付け部分がほぼ同じとなる脊柱起立筋に含め、広背筋は取り付け点が腕であるため体幹部の筋肉として数えておらず、腹横筋は内・外腹斜筋に含めて考えている。

4 おわりに

本稿では、将来的に人体詳細実筋骨格シミュレータとしての運用を目的とした全身筋骨格ヒューマノイド腱志郎の全身設計について紹介した。強力バネ及び面状筋による体幹駆動筋の低減化と、人体骨格形状を模した金属やCFRP製強力骨格設計といった要素技術を提案することで、従来よりも大幅に筋関節配置の人体再現度を増した全身運動可能な出力を有する筋骨格ロボットの実現が可能となった。今後は実際に開発した腱志郎により、人間らしい脊椎を用いた歩行動作や上肢・体幹・下肢全てを協調させた投球などの全身運動動作を実現可能なソフトウェアシステムを構築するとともに、動作実現時の筋負荷評価を行っていく予定である。

5 謝辞

CFRP 鎖骨の開発では、NiKKiFronの皆様にお世話になりました。感謝いたします。ありがとうございました。

文献

- [1] Hideki Kondo, Yu Ogura, Hiroyuki Aikawa, Kazushi Shimomura, Akitoshi Morishima, Hun ok Lim, and Atsuo Takanishi. Biped humanoid robot capable of being used as human motion simulator. In *Proceedings of the 10th International Symposium on Experimental Robotics(ISER'06)*, pp. 523-531, 2006.
- [2] Jun Morimoto. Biped walking control of a humanoid robot by using monkey's brain activity. In *Workshop of International Conference on Robotics and Automation*, 2009.
- [3] Owen Holland and Rob Knight. The Anthropomorphic Principle. In *Proceedings of the AISB06 Symposium on Biologically Inspired Robotics*, 2006.
- [4] Keita Ogawa, Kenichi Narioka, and Koh Hosoda. Development of Whole-body Humanoid "Pneumat-BS" with Pneumatic Musculoskeletal System. In *Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, pp. 4838-4843, 2011.
- [5] Ikuo Mizuuchi, Tomoaki Yoshikai, Yoshinao Sodeyama, Yuto Nakanishi, Akihiko Miyadera, Taichi Yamamoto, Tuomas Niemelä, Marika Hayashi, Junichi Urata, Yuta Namiki, Tamaki Nishino, and Masayuki Inaba. Development of musculoskeletal humanoid kotaro. In *Proceedings of The 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2006.
- [6] Ikuo Mizuuchi, Yuto Nakanishi, Yoshinao Sodeyama, Yuta Namiki, Tamaki Nishino, Naoya Muramatsu, Junichi Urata, Kazuo Hongo, Tomoaki Yoshikai, and Masayuki Inaba. An Advanced Musculoskeletal Humanoid Kojiro. In *Proceedings of International Conference on Humanoid Robots(Humanoids'07)*, 12 2007.
- [7] Yuto Nakanishi, Tamon Izawa, Masahiko Osada, Nobuyuki Ito, Shigeki Ohta, Junichi Urata, and Masayuki Inaba. Development of musculoskeletal humanoid kenzoh with mechanical compliance changeable tendons by nonlinear spring unit. In *Proceedings of The 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics(IEEE-ROBIO2011)*, Dec 2011.
- [8] 小原 二郎. 人間工学からの発想. 講談社, 1982.
- [9] I. A. Kapandji. カパンディ関節の生理学 III 体幹・脊柱. 医歯薬出版株式会社, 1986.
- [10] Masahiko Osada, Hironori Mizoguchi, Yuki Asano, Toyotaka Kozuki, Junichi Urata, Yuto Nakanishi, Kei Okada, and Masayuki Inaba. Design of humanoid body trunk with multiple spine structure and planar-muscle-driven system for achievement of humanlike powerful and lithe motion. In *Proceedings of The 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics(IEEE-ROBIO2011)*, Dec 2011.