

遠隔操作アンドロイドヘッドの 頸部関節機構とその操作性に関する検討

Study on a cervical mechanism for a tele-operated android head and its operability

真栄田健太^{1*} 仲田佳弘¹ 中村泰¹ 石黒浩¹

Kenta Maeda¹ Yoshihiro Nakata¹ Yutaka Nakamura¹ Hiroshi Ishiguro¹

¹ 大阪大学

¹ Osaka University

Abstract: One of applications of the human-like android robots is using as a telecommunication medium. It is expected that an android with an ability of realizing human-like motion seems to contribute to increase operability of the system. This paper presents a cervical mechanism for human-like head motion of tele-operated androids and evaluation of its operability employing a prototype robot and tele-operation system. The developed mechanism has a structure with multiple spherical joints similar to the human cervical spine. The operability of the mechanism is compared with one with three independent axes of rotation. Through a subjective experiment, we confirmed that the operability of the proposed mechanism was better than the mechanism with three independent axes.

1 緒言

ロボットによる円滑なコミュニケーションにとって、頭部や体幹の動作によって引き起こされる視線や姿勢の変化などに基づく非言語情報の伝達は重要である[1]。遠隔操作型アンドロイドは、人に酷似した外見を持つロボットで、遠隔地にいる人との対話を可能にするコミュニケーションメディアである。このロボットを操作者の動きに同期して動作させる場合、操作者に提示する映像の視点の動きはロボットの操作性に大きな影響を与えると考えられる。本研究では、人に近い構造を持つ遠隔操作型アンドロイドが操作者の操作性を向上させるという仮説を検証するため、人に近い頸部動作を実現する頸部機構を開発・実装し、被験者実験を通じて操作性への影響を調べる。

人の頸部機構を模倣した構造による人に近い頸部動作は、東京大学の開発した健志郎[2]やDLRの開発した頭部ロボット[3]において実現されている。これらのロボットでは、人の頸椎の形状を模した特殊な部品や、柔軟なシリコン製ロッドが用いられている。我々は、量産部品を使用した簡素な構造と駆動装置によって、堅牢性とメンテナンス性に優れた遠隔操作型アンドロイドのための頸部機構を開発する。

本稿では、提案する頸部機構とその駆動、および設計・開発した試作機について述べる。また、加速度センサを搭載したヘッドマウントディスプレイを用い、操作者とロボットが視界と頭部動作を共有できる遠隔操作システムについて説明する。本遠隔操作環境において、ロボットの頸部機構の違いが操作性に与える影響を調べるため、首の3つの回転（前後屈・側屈・回旋）をそれぞれ1つの関節で実現した頸部機構を用意し、2つの機構を持つロボットをそれぞれ遠隔操作する被験者実験を実施した。被験者が、提示される目標物に視線を合わせるまでの時間とロボットの操作性に関する主観評価から、人の頸部機構を模した機構を有する遠隔操作ロボットの有効性について考察したので報告する。

2 多重関節頸部機構の開発

本研究では、遠隔操作アンドロイドヘッドの人に近い頸部動作を実現するため、人の頸椎構造を模倣した複数の関節によって構成される頸部機構（多重関節頸部機構）を開発する。

*連絡先：大阪大学基礎工学研究科システム創成専攻
〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-3
E-mail: maeda.kenta@irl.sys.es.osaka-u.ac.jp

2.1 人の頸椎構造

人の頸部の骨格は図1に示すように頭部側から順に第1頸椎から第7頸椎と呼ばれる7つの頸椎から構成されている。第1頸椎は環椎とも呼ばれ、他の頸椎とは異なり椎体や棘突起を持たないリングのような形状を持つ。第2頸椎は軸椎とも呼ばれ、大きく伸びた歯突起を持つ。第1頸椎と第2頸椎による関節は環軸関節と呼ばれ、頭部を回旋させる働きを持つ(図2)。矢状面および冠状面上での運動は、これらの頸椎による複数の関節により、頸部が全体として大きく屈曲することによって実現される。一方、横断面上での運動は、主に環軸関節により、頭部が回旋することによって実現される[4]。

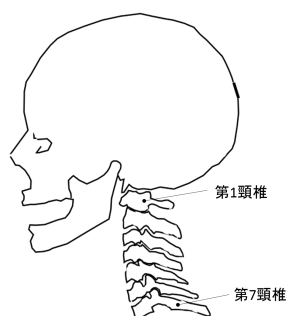


図1: 人の頸部の骨格

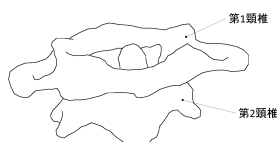


図2: 環軸関節

2.2 設計方針

ここでは、開発した頸部機構の設計方針について述べる。

- 人の頸部を模した複数の関節からなる構造
人に近い頸部動作を実現するため、人の頸椎のように複数の関節からなる頸部機構を開発する。頸椎を模した部品の間には軟骨を模した機械ばねを挿入することにより、複数の関節が協調し、全体として屈曲する。
- 人の頸部と同程度の可動域

前後屈、側屈および回旋の各軸で人と同程度の可動域を実現する。表1に人の頸部の参考可動域角度を示す。

表1: 頸部の参考可動域角度 [5]

運動方向		可動域角度	参考図
屈曲(前屈)		60	
伸展(後屈)		50	
側屈	左側屈	50	
	右側屈	50	
回旋	左回旋	60	
	右回旋	60	

- 市販の量産部品によって構成
特殊な設計を必要とせず、高い耐久性とメンテナンス性を有する機構を開発する。

2.3 機構の設計と開発

2.2の設計方針に従い、遠隔操作アンドロイドヘッドの頸部機構を開発した。5つの球面軸受を直列に連結することにより、矢状面および冠状面上にそれぞれ屈曲を行うことができる機構を開発した(図3)。さらに各関節間にばねを取り付けることにより、アクチュエータの出力のない場合に直立姿勢を維持できるようにした。ばねによって屈曲する際には、各関節が同程度に屈曲し、頸部機構が全体として大きく屈曲する。機構の上部にベアリングを取り付けることにより、環軸関節による頭部の回旋を模倣した。

人の頸部の筋肉である胸鎖乳突筋および板状筋を参考に、図3のように4本のワイヤを配置し、それぞれサーボモータによって引っ張ることで構造を動作させる。表3に各動作を行う際に引っ張るワイヤの組を示す。

実際に製作した機構を図4に示す。頭部にはステレオカメラ(Ovrvision Pro, しのびや.com)を取り付けた。

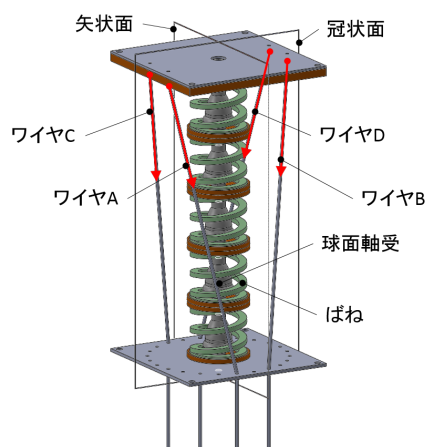


図 3: 設計した頸部機構

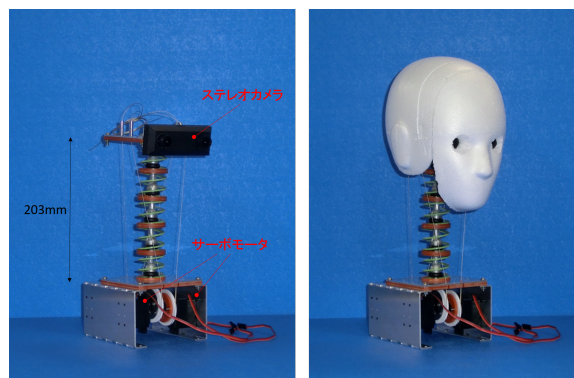


図 4: 多重関節頸部機構

2.4 性能評価

サーボモータの可動域から開発機構の可動域を算出し、実際に製作した機構で求めた姿勢が取れることを確認した。表 3 に達成可動域を示す。表 3 から、目標の可動域が満たされていることが確認できる。

3 操作性評価実験

被験者実験により、開発した頸部機構を有する遠隔操作ロボットの操作性の評価を行う。

実験に使用する遠隔操作システムを開発した。本システムで、操作者はロボット上部に搭載されたカメラの映像をヘッドマウントディスプレイ（Oculus Rift DK2, Oculus VR, LLC）によって見ることができる。また、カメラが搭載されたロボットの上部平板の各軸回転角度が、ヘッドマウントディスプレイに搭載された加速度センサで計測した操作者の頭部角度に一致するように制御される。操作者の頭部角度にロボットの角度を一致させたとしても、操作者に提示されるカメラの視

表 2: 各動作と引っ張るワイヤの関係

運動方向		ワイヤ	参考図
屈曲 (前屈)		A,B	
伸展 (後屈)		C,D	
側屈	左側屈	B,D	
	右側屈	A,C	
回旋	左回旋	B,C	
	右回旋	A,D	

表 3: 製作した頸部機構の可動域

運動方向		達成可動域	目標可動域
屈曲 (前屈)		60	60
伸展 (後屈)		60	50
側屈	左側屈	60	50
	右側屈	60	50
回旋	左回旋	60	60
	右回旋	60	60

界の変化は頸部機構によって異なる。その際、人により近い動作が可能な頸部機構を持つロボットであれば、他の機構と比較して操作がしやすいと考えられる。そこで、頸部機構を模した提案頸部機構の遠隔操作性が、人型ロボットで良く用いられる、各軸の回転を1つの関節で実現する頸部機構よりも優れることを確認する。

図 5 に比較に用いた頸部機構（単関節頸部機構）を示す。この機構は、開発した多重関節頸部機構の直立時と等しい頸部長を持つが、首の3つの回転はそれぞれ1つの回転軸で行われる。本機構の駆動は、多重関節頸部機構と同じく4本のワイヤによって行われる。本機構においても、上部平板の角度を操作者の頭部角度に一致するように制御を行った。

なお、遠隔操作時に操作者の頭部角速度が、サーボモータによって実現される速度を超過しないことを事前に確認している。

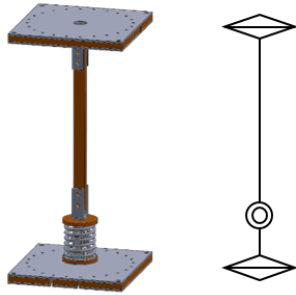


図 5: 単関節頸部機構

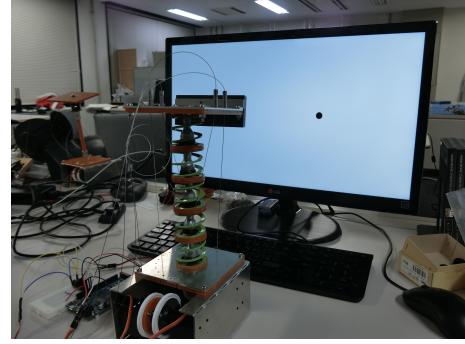


図 6: 実験の様子

3.1 実験方法

4名の被験者（20～24歳，男性）に対し，多重関節頸部機構と単関節頸部機構を遠隔操作する実験を実施した．実験中の被験者の頭部角度の変化を計測するとともに，実験後に操作性に関するアンケートを行った．実験は操作する機構を変えて2回行った．被験者と操作する頸部機構の順序の関係を表4に示す．

表 4: 被験者と頸部機構の順序の対応

被験者	1回目	2回目
1	単関節頸部機構	多重関節頸部機構
2	単関節頸部機構	多重関節頸部機構
3	多重関節頸部機構	単関節頸部機構
4	多重関節頸部機構	単関節頸部機構

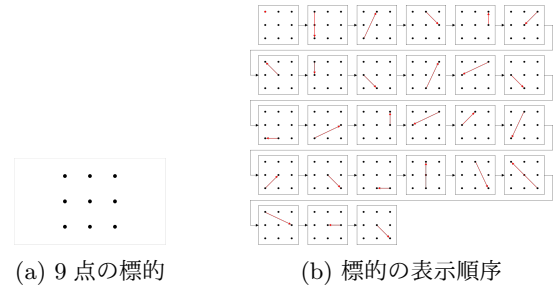
● 実験

被験者にヘッドマウントディスプレイを装着させ，遠隔操作ロボットを操作させる実験を実施した．遠隔操作ロボットの正面に液晶パネルを置き（図6），標的（黒い丸）を表示した．標的の表示位置は図7(a)に示す9か所であり，図7(b)に示す順に表示される．

被験者は，頭を動かすことで，ロボットを操作して標的の方向を向けさせ，標的を視界の中央に捉えるタスクを行う．タスクは，2回の実験でそれぞれ27回行った．

● アンケート

実験の後，それぞれの機構の操作性について「1. とても操作しにくかった」「2. 操作しにくかった」「3. やや操作しにくかった」「4. どちらともいえない」「5. やや操作しやすかった」「6. 操作しやすかった」「7. とても操作しやすかった」の7段階で評価をもらった．



(a) 9点の標的

(b) 標的の表示順序

図 7: 画面に表示される標的

3.2 実験結果

被験者の動き始めから動き終わりまでの時間を，操作者が標的を認識してから視界の中心に捉えるまでにかかった時間と仮定して，多重関節頸部機構と単関節頸部機構について求めた．その結果を図8に示す．

2つの機構の操作性を評価するために，同一被験者の同一試行について，単関節頸部機構を操作したときの動き始めから動き終わりまでの時間を多重関節頸部機構を操作したときの動き始めから動き終わりまでの時間で割り，その比の対数を取った．求めた比の対数の平均は0.333(> 0)となった．この平均が0になるという帰無仮説を立ててt検体を行ったところ，優位水準5%で棄却された（標準偏差 0.675, $t = 5.13, p = 1.29 \times 10^{-6}$ ）．したがって，多重関節頸部機構は単関節頸部機構と比較して，動き始めから動き終わりまでの時間が短いと言える．

また，アンケートの結果を表5に示す．

表 5: 被験者毎の頸部機構の操作性の評価（7段階）

被験者	単関節頸部機構	多重関節頸部機構
1	6	5
2	5	7
3	3	6
4	4	6

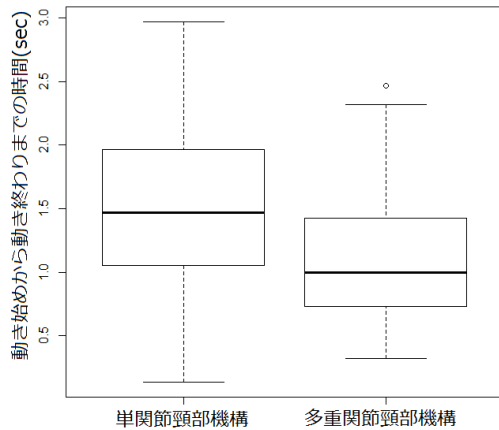


図 8: 各機構の動き始めから動き終わりまでの時間

3.3 考察

得られた結果から操作者が標的に視線を合わせたと判断し、頭部を静止させるまでの時間は多重関節頸部機構の方が短いことが分かる。また、アンケートにおいても被験者の4名中3名が多重関節頸部機構の方が操作しやすいと感じたことが分かる。操作者が頭部を動かして、各機構を操作した場合、視線(ロボットではカメラの光軸の向き)の移動が単関節頸部機構と多重関節頸部機構、そして人体ではそれぞれ異なり、その結果、頭部が同じ角度でも視線の空間上の位置が異なる。そのため、人が自身の目で標的を見ようと頭部を動かしても、機構上のカメラの光軸上に標的を捉えられない。これを解決するためには、人が視覚情報に基づいて自身の頭部動作を補正しなければならない。実験の結果、多重関節頸部機構を操作したときの方が、静止するまでの時間が短かったのは、多重関節頸部機構ではこの補正量が小さいからであると考えられる。

4 結言

本研究では、遠隔操作型アンドロイドの操作性の向上を目的として、人の頸椎構造を模倣した構造を持ち、人に近い動作を行うことができる多重関節頸部機構を開発した。開発した機構を人型ロボットに多く用いられる各運動面上の動作が1軸関節で実現される頸部機構と比較したところ、多重関節頸部機構の方が短時間で標的に視線を向けられることが分かった。このことから、操作者とロボットが視界と頭部動作を共有するような遠隔操作環境では、人に近い構造の方が操作がしやすいと考えられる。

本研究では頸部機構と遠隔操作性についての調査を行ったが、今後は、操作者が頸部機構を持つロボットを自分の身体のように感じることができるかという没入感や、実際に頸部機構を用いて遠隔対話を行った際のコミュニケーションの質に対して、頸部機構が与える影響について調査していく。

参考文献

- [1] 田中一晶, 中西英之, 石黒浩: 実体で身体動作を提示するロボット会議によるソーシャルテレプレゼンスの強化, 情報処理学会 インタラクシオン, pp. 125-132(2013)
- [2] Toyotaka Kozuki, Motegi Yotaro, Koji Kawasaki, Yuki Asano, Takuma Shirai, Soichiro Okubo, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba: Development of Musculoskeletal Spine Structure that Fulfills Great Force Requirements in Upper Body Kinematics, in *Proceeding of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2768-2773 (2015)
- [3] Jens Reinecke, Bastian Deutschmann, David Fehrenbach: A Structurally Flexible Humanoid Spine based on a Tendon-Driven Elastic Continuum, in *Proceeding of the International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4714-4721 (2016)
- [4] 嶋田智明, 平田総一郎: 筋骨格系のキネシオロジー, 医歯薬出版株式会社, 東京, 第3部, 2005
- [5] 米本恭三, 石上重信, 近藤徹: 関節可動域表示ならびに測定法, リハビリテーション医学, Vol. 32, No. 4, pp. 207-217(1995)