

# ミニチュアヒューマノイドの高精度ワイヤ駆動制御

## High Fidelity Wire-Drive Control for Miniature Humanoid

佐藤豊, 多田隈理一郎, 妻木勇一

Yutaka Sato, Riichiro Tadakuma, Yuichi Tsumaki

山形大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

キーワード: コミュニケーション (Human communication), 相互テレグジスタンス (Mutual telexistence), テレコミュニケーター (Telecommunicator), モーションキャプチャ (Motion capture), ワイヤ駆動 (Wire-drive)

連絡先: 〒992-8510 山形県米沢市城南四丁目3-16 山形大学大学院 理工学研究科  
機械システム工学専攻 妻木研究室

佐藤豊, Tel & Fax: 0238-26-3252, E-mail: tcf56894@st.yamagata-u.ac.jp

### 1. 緒言

ワイヤ駆動は多くの機器に採用されており, ロボットにも応用されている. バレットテクノロジー社が開発したバレットアーム<sup>1)</sup>は代表例であり, 様々なロボットハンド<sup>2)</sup>や内視鏡下手術で使用される医療用鉗子<sup>3)</sup>などにも利用されている. 関節に直接モータを取り付ける場合と比べ, ワイヤ駆動はプーリなどを介してモータを操作対象から離れた場所に置くことで, 操作対象を軽量化し, 慣性を小さくできる. さらに, ワイヤそのものに柔軟性を持っているため, 人間と関わるような作業において安全を確保することも期待できる. しかし, ワイヤ自身の伸び縮みや, ワイヤとプーリあるいはワイヤ同士の摩擦などによって, 特性が変化し正確な動作を実現することは難しい. 一方, 捻り関節を持つロボットアームでは, ワ

イヤの経路長を変化させない機構は複雑になるため, 小型化が困難である. このため, 小型化するためには, 制御によりワイヤの持つ非線形性を考慮しなくてはならない.

これまで我々はワイヤ駆動型のウェアラブルミニチュアヒューマノイドロボットを開発してきた<sup>4)~5)</sup>. 外装を取り付けたときのミニチュアヒューマノイドロボットの外観図をFig. 1に示す. 本ロボットは, 全高176 mmの大きさで4自由度の腕部を2本備えている. しかし, 小型化するためにワイヤ同士の干渉が避けられない構造となっている. モータ角度とロボットの関節角度の関係をキャリブレーションにより求めているが, 精度よく動かすことはできなかった.

そこで, 本論文では, 光学式のモーションキャプチャシステムを外部センサーとして用いることで, ロボットの関節レベルにおける

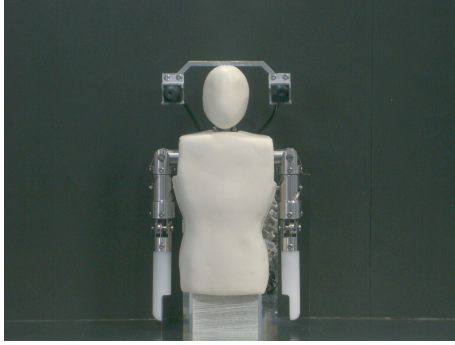


Fig. 1 Overview of the prototype model with exterior-equipments

フィードバック制御を行い，動作精度を向上させるためのシステムを構築した．また，動作実験を行いシステムの有効性を検証した．

## 2. ミニチュアヒューマノイドロボット

ミニチュアヒューマノイドロボットは，片腕4自由度の両腕と3自由度の頭部からなる全11自由度のロボットである．自由度の配置図をFig. 2に示す．頭部にはカメラを左右に2台備えており，ロボット頭部の動きに合わせたステレオ視も可能である．駆動系にはワイヤ駆動を用いることで，ロボット本体の小型化を実現している．各ワイヤはロボットの関節部，胴体内部を通してロボット本体の外に設置されたモータに繋がっている．

しかし，腕部を駆動させると，ワイヤの干渉やねじり関節部におけるワイヤ経路長の予測不可能な変化などといった問題が生じる．そこで，既知の姿勢にロボットの腕を固定することができる姿勢位置決め治具を用いて，各姿勢に固定した際のモータの角度をエンコーダを用いて測定し，最小二乗法を用いてモータ角度とロボットの関節角度の関係を求め，キャリブレーション行列を導出している．しかし，

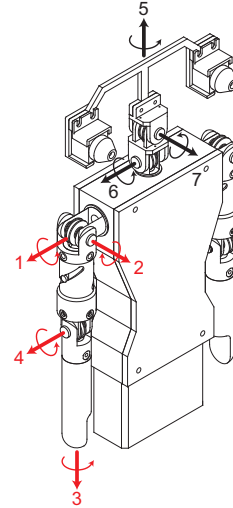


Fig. 2 Distribution of degrees of freedom

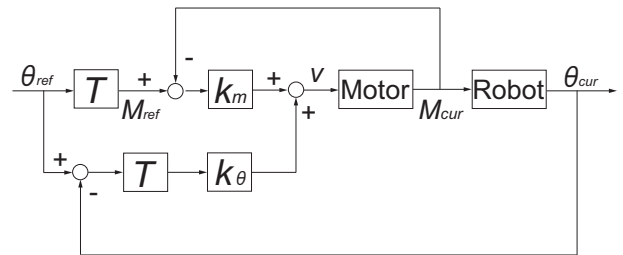


Fig. 3 Block diagram

目標関節角度とロボットの関節角度との間の誤差は比較的大きく，操作者の動作を正確にロボット上を実現することが困難であった．

## 3. 外部センサを用いたフィードバック制御

ワイヤ駆動を採用しているため，現在のシステムではロボットの各関節角度や手先の位置・姿勢を直接測定することはできない．しかし，光学式のモーションキャプチャシステムなどの外部センサを導入し，ロボット手先の位置や姿勢を取得できるようにすれば，手先の位置と姿勢から各関節角度を算出できる．外部センサにより求めたロボット腕部の関節角

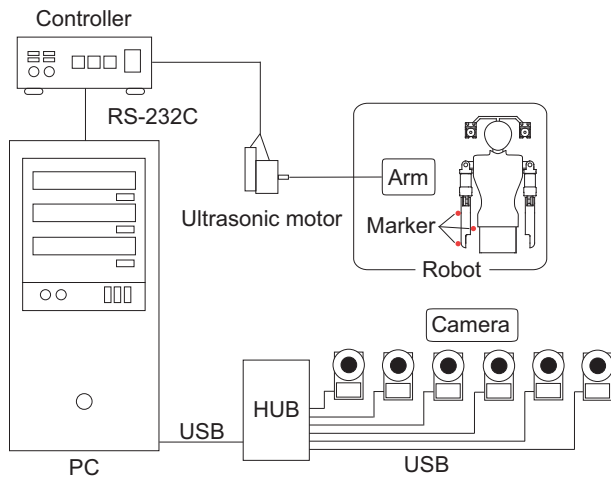


Fig. 4 Overview of the system

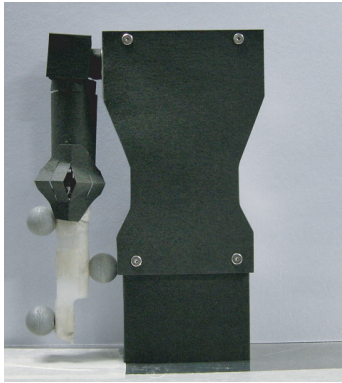


Fig. 5 Front view

度を利用して，以下のフィードバック制御が可能となる．

$$v_a = k_m(T\theta_{ref} - M_{cur}) \quad (1)$$

$$v_b = k_m(T\theta_{ref} - M_{cur}) + k_\theta(T(\theta_{ref} - \theta_{cur})) \quad (2)$$

ここで，式(1)は従来<sup>5)</sup>の方法であり，式(2)が今回導入した外部センサによるフィードバックを行った場合である．

$v_a$ は従来<sup>5)</sup>の方法における目標速度， $v_b$ は外部センサを用いたフィードバック制御における目標速度である．また， $k_m$ 、 $k_\theta$ はゲイン， $T$

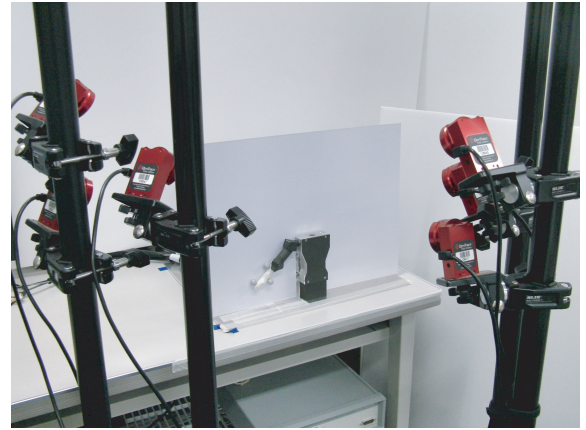


Fig. 6 Overview of the experimental set-up

はモータ角度とロボットの関節角度の関係を表すキャリブレーション行列， $\theta_{ref}$ は目標関節角度， $M_{cur}$ はエンコーダから得られるモータ角度， $\theta_{cur}$ は外部センサを利用して得られるロボットの関節角度である．Fig. 3にシステムのブロック線図を示す．

#### 4. 実験システム

全体のシステム図をFig. 4に示す．

光学式モーションキャプチャシステムとして，NaturalPoint Inc. 製のOptiTrackを使用している．OptiTrackは，対象物に赤外線反射マーカーを取り付け，IR LEDからの赤外線を反射したものを複数のカメラで撮影して，解析することでリアルタイムに剛体の位置と姿勢を測定することができるシステムである．カメラはOptiTrack FLEX:V100R2を使用し，秒間100フレームでキャプチャでき，OptiTrack専用のソフトウェアであるArenaを用いることで，100Hzでストリーミングすることが可能である．腕部を駆動させる範囲において，腕部に取り付けた3個のマーカーで認識される剛体を6台のカメラで捉えられるようにカメラを配置する．カメラはUSBのHUBを介してPCに接続

する。

また、OptiTrackはマーカー以外に赤外線を反射する物体があると、マーカーの誤認識を起こす。ミニチュアヒューマノイドでも、アルミやステンレス部品が赤外線を反射してマーカーと誤認識してしまう問題が発生した。そこで、赤外線を反射しないようにロボット本体を画用紙で覆った。これによって、必要なマーカーのみを認識することができる。画用紙で覆った状態の外観図を Fig. 5 に、実験装置の全体図を Fig. 6 に示す。

腕部を駆動するには、外部センサからデータを取得し関節角度を算出すると同時に超音波モータを制御する必要がある。このため、マルチスレッドを用いて制御システムを構築した。スレッドは2つあり、1つ目は外部センサからデータを取得し関節角度を算出するSensorスレッド、もう1つは超音波モータを制御するServoスレッドである。各スレッドの周期は、Sensorスレッドは約10 msec、Servoスレッドが約74 msecである。また、OSはMicrosoft Windows XP Professional Version 2002 Service Pack 3、CPUはIntel Core i5 750(2.67GHz)、プログラム作成にはMicrosoft Visual C++ 2008 Express Editionを使用している。

## 5. 実験

従来の制御方法と比較実験を行った。

Table 1 Desired joint angle(deg)

	Pose 1	Pose 2	Pose 3	Pose 4
$\theta_1$	90	90	0	0
$\theta_2$	90	45	0	60
$\theta_3$	-30	0	30	0
$\theta_4$	90	0	90	0

Table 2 Final errors

	Without feedback	With feedback
Pose 1	25.6	18.3
Pose 2	5.4	1.6
Pose 3	7.3	5.4
Pose 4	5.2	2.0

実験には、Fig. 2 の第1関節から第4関節を使用した。姿勢1から姿勢4までの4パターンの目標関節角度を与えて、各姿勢における関節の誤差と全体の誤差を求めた。

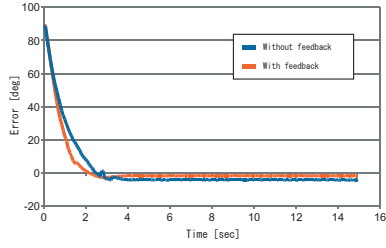
各姿勢における目標関節角度をTable 1 に、最終的な誤差をTable 2 に示す。また、Fig. 7 とFig. 8 はそれぞれ、姿勢1と姿勢2のときの各関節の誤差とその誤差の2乗平均を用いて求めた全体の誤差を示している。誤差は目標関節角度と外部センサを用いて得られたロボットの関節角度の差である。図の青い線が従来の方で、赤い線が外部センサを用いたフィードバック制御の結果である。

図から、全ての姿勢において、従来の方よりもフィードバックを用いた方法の方が最終的に誤差が小さくなることが分かった。しかし、Table 2 から腕部を大きく動かしたとき、特に関節3と関節4を動かしたとき、まだ誤差が大きく残ることがわかった。これは、関節3と関節4が関節1と関節2よりワイヤの干渉の影響を受けやすいからだと考えられる。

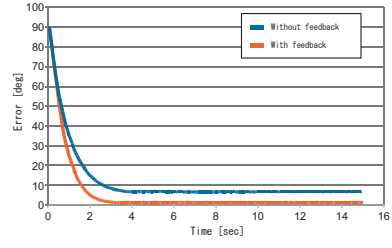
## 6. 結言

ミニチュアヒューマノイドロボットの動作精度を向上させるために、外部センサとして光学式モーションキャプチャシステムを用いて、フィードバック制御を行うシステムを開発した。また、有効性を検証するために、駆動実

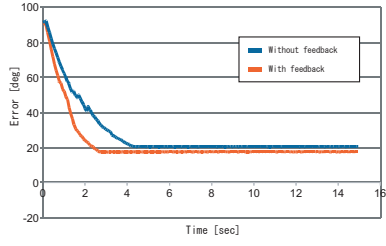




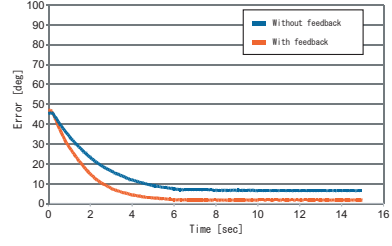
(a) 1



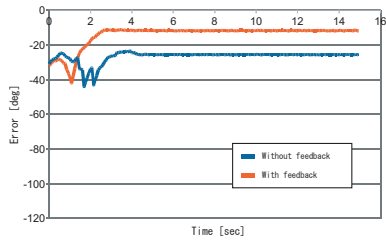
(a) 1



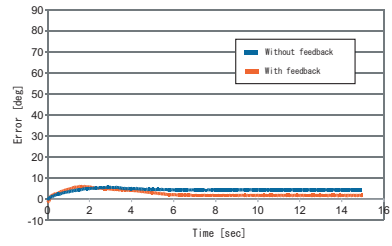
(b) 2



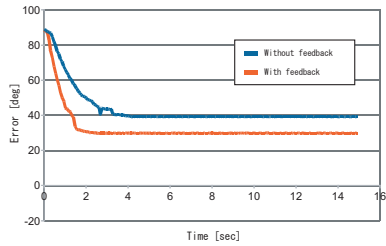
(b) 2



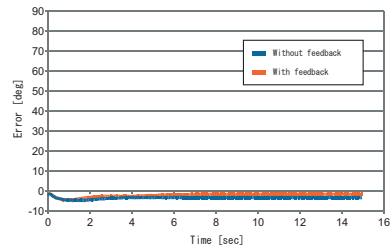
(c) 3



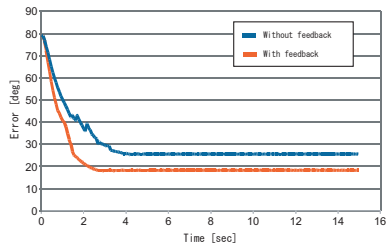
(c) 3



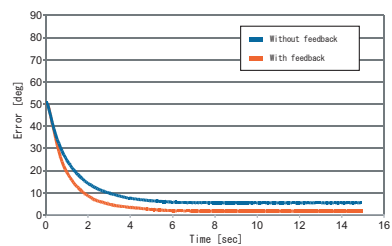
(d) 4



(d) 4



(e) Total errors



(e) Total errors

Fig. 7 Experimental results (Pose 1)

Fig. 8 Experimental results (Pose 2)

験を行った。その結果，動作精度を向上させることができた。しかし，まだ誤差が大きい姿勢があるため，これをコミュニケーションに影響を与えない程度にまで減少させることが今後の課題である。

## 参考文献

- 1) Barrett Technology Inc., “ The Barrett Arm,”  
<http://www.barrett.com/robot/products-arm.htm>
- 2) 栗田雄一，小野泰寛，池田篤俊，小笠原司: 手首での着脱機構を持つ人間サイズの多指ロボットハンドの開発，日本機械学会[No. 09-4]ロボティクス・メカトロニクス講演会'09 講演論文集，2A2-B11, (2009) .
- 3) 福島清暁，友師悟，杉田直彦，石丸哲也，岩中督，光石衛: 小児外科手術支援のための極細径多自由度鉗子の開発，日本機械学会[No. 09-4]ロボティクス・メカトロニクス講演会'09 講演論文集，2A1-L10, (2009) .
- 4) 井上順博，妻木勇一: ウェアラブルミニチュアヒューマノイドロボットの開発，日本機械学会[No. 08-4]ロボティクス・メカトロニクス講演会'08 講演論文集，2A1-B21, (2008) .
- 5) 妻木勇一，井上順博，葛西昭治，福田眞: ウェアラブルミニチュアヒューマノイドロボットの運動制御，日本機械学会[No. 09-4]ロボティクス・メカトロニクス講演会'09 講演論文集，1P1-F01, (2009) .