

低剛性の弾性腱による腱駆動ロボットアームの機構と制御

Mechanism and control of an elastic tendon driven robot arm

○関友洋*, 富樫淳輝*, 水戸部和久*

○Tomohiro Seki*, Junki Togashi*, Kazuhisa Mitobe*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード: 腱駆動 (Tendon driven),
ロボットアーム (Robot arm), 操作インタフェース (Operation interface),
画像処理 (Image processing)

連絡先: 〒992-8510山形県米沢市城南4-3-16

山形大学工学部機械システム工学科 6-501 水戸部研究室

水戸部和久, Tel.: (0238)26-3230, Fax.: (0238)26-3205, E-mail: mitobe@yz.yamagata-u.ac.jp

1. 緒言

近年, ロボットによる自動化は製造分野のみならず医療, サービス, 農水産業など多岐にわたる分野で求められている¹⁾²⁾. そして将来的に非製造分野におけるロボットの需要は製造分野での需要を追い越すと予想されている³⁾. 非製造分野の多くでは作業対象が柔らかい場合や人間に対する接触作業を行う場合の安全性, さらに未知の作業環境への適応性が要求される. また, ロボットは人間の作業の代替, 自動化の他に, 遠隔地との新しいコミュニケーションツールとしても研究されている⁴⁾⁵⁾. 人間の環境で運用されるロボットには高度な安全性が求められる. 本研究は低剛性の腱駆動方式により低コストでの高い安全性の実現を目指す.

試作したシステムでは画像処理とマーカを用いてロボットアームの関節角度を取得する. これにより関節の角度センサを用いな

い簡易なアームの設計を行った. また, Kinect を用いたマスタスレーブ方式の操作インタフェースの開発によりロボットアームの直感的な操作が可能となった.

本研究は低剛性の腱駆動ロボットアームで重量が未知の対象物を把持しながらの位置制御を問題とする. そのため柔軟腱の巻取装置を改良し, 巻取量の増大を図った. 巻取量を大きくすることにより, 低い剛性の腱でも最大手先発生力を大きくできる. したがって, 同じ可搬重量に対して, より低剛性のロボットが容易に実現できる. また, 位置および力の制御系への目標を与えるインタフェースとして, 片腕がふさがるマスタスレーブ方式では入力用デバイスが必要となるため, 手先位置の指定を画像上で行うものを開発した. また, このカメラ画像から把持物体の重量を推定することにした.

2. ロボットアームの操作インタフェース

2.1. ロボットアームの概要

ロボットアームは Fig.1 に示すような、上部の巻取装置から弾性腱で吊るされた構造になっている。また、環境への適応性を得るため Fig.2 に示すように関節も弾性腱で構成している。関節角度は外部カメラとマーカによって取得し、アームへの電氣的な配線を行っていない。

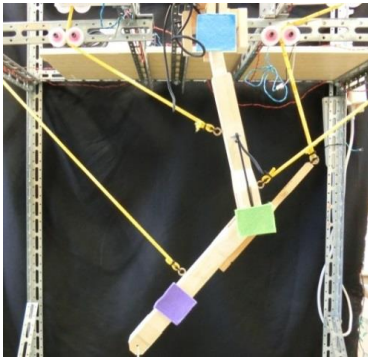


Fig.1 Tendon driven robot arm



Fig.2 Elbow joint

2.2. 関節角度の取得

関節角度の取得は Fig.1 に示したようにアームに取り付けられた 3 色のマーカと、外部に取り付けられたカメラを用いる。Fig.3 に示すように RGB 画像を HSV 画像に変換後、色相(Hue)、彩度(Saturation)、明度(Value)のそれぞれに対し閾値処理で色領域を抽出する。この処理は OpenCV により行った。抽出したそれぞれの色領域の色重心を求めて関節座標とする。肩関節を原点としたそれぞれのマーカから関節角度と手先位置を算出する。関節角度の算出は、肩関節座標を原点とし、肩関節角度 θ_0 ($-90^\circ \sim 90^\circ$) と肘関節角度 θ_1 ($0^\circ \sim 180^\circ$) をそれぞれ幾何学的に求める。画像の取り込みは 150[ms]周期で行っている。

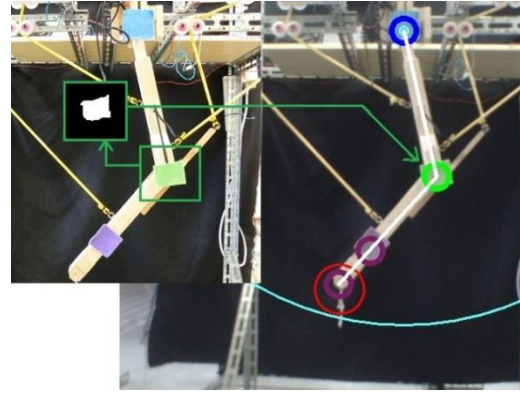


Fig.3 Position acquisition from camera image

2.3. 目標関節角度の算出

今回開発した操作インタフェースは、PC 画面のカメラ画像上で目標位置をクリックすることでアームの操作を行うものである。カーソルの座標を画像上 (ΣP) での座標系から肩関節を原点とした座標系 (ΣA) に変換する。次に逆運動学で目標手先座標から目標関節角度を求める。

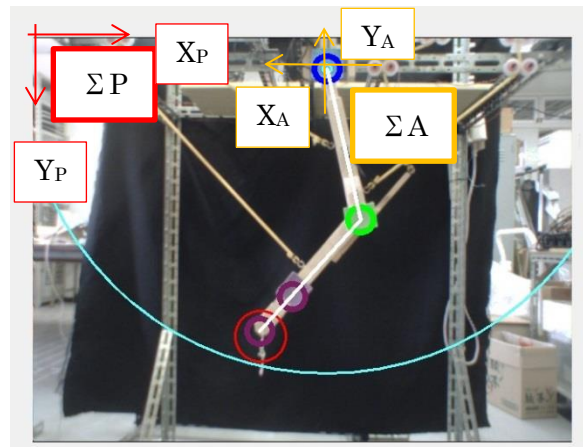


Fig.4 Coordinate systems

2.4. 腱張力の算出

アームの模式図を Fig.5 に示す。

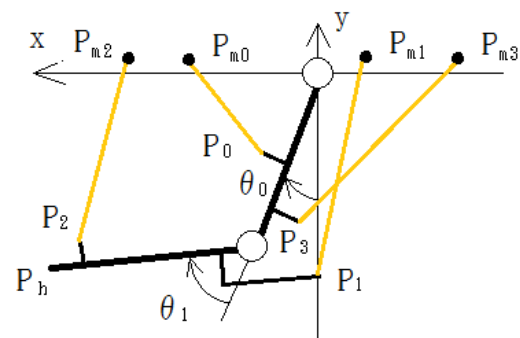


Fig.5 Model of the arm

腱の伸びがない場合、巻取装置の回転角度はアーム長 L_i 、アーム上の腱取付点 P_i 、腱巻取点 P_{mi} 、腱の自然長によって幾何学的に求められる。腱の伸びと張力を考慮すれば、手先力 F_h 、各リンクへの重力 F_{gi} 、各腱に働く張力 F_{ti} の間の静力学の関係は次式で表される。

$$J_{ph}^T F_h + J_{gi}^T F_{gi} + J_{pi}^T F_{ti} = 0$$

ここで、 J_{ph} 、 J_{gi} 、 J_{pi} は手先位置、各リンク重心位置、腱の取り付け位置と関節角度をそれぞれ関係づけるヤコビ行列である。本関係より手先に必要な力を発生させるための腱張力を静学的に算出できる。

例えば、2本の腱（腱2および腱3）を用いて手先力 F_h を発生させる張力 t_2 、 t_3 は、

$$(t_2 \ t_3)^T = -(J_{p2}^T v_2 \ J_{p3}^T v_3)^{-1} (J_{ph}^T F_h + J_{gi}^T F_{gi})$$

で与えられる。ここで、ベクトル v_i は腱方向の単位ベクトルであり、腱取付点と腱巻取点 P_i 、 P_{mi} から

$$v_i = \frac{\overrightarrow{P_i P_{mi}}}{|P_i P_{mi}|}$$

で与えられる。ただし、張力は正の組み合わせである必要がある。

2.5. 巻取角度の指令

腱の弾性を利用して張力を操作するために腱の剛性値が必要である。そこで、腱に100[g]ずつ1000[g]になるまで錘を吊るして腱長と荷重の関係調べた。Fig.6のようになる。

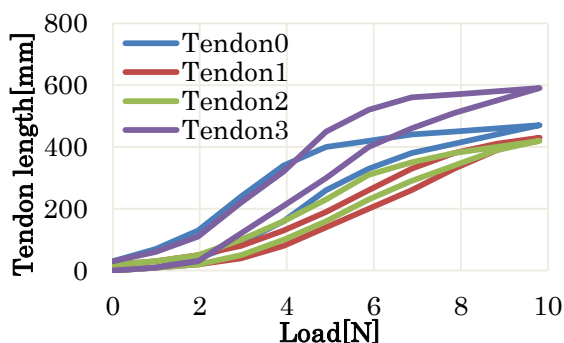


Fig.6 Change of tendon length

今回使用する腱の剛性は平均で0.017[N/mm]から0.028[N/mm]と非常に小さいが、ヒステリシスを含む非線形性がある。したがって精密な力制御の為には非線形性を考慮して巻取角度を決定する必要がある。

2.6. 手先質量の算出

カメラ画像から求めた関節角度を θ_{ri} とすると、 θ_{ri} から手先位置 P_{hri} 、腱取付位置 P_{ri} 、重心位置 P_{gri} を算出できる。巻取装置角度 θ_{mi} と腱巻取点 P_{mi} は変わらないので、腱張力はバネ定数 K_i 、巻取装置半径 r を用いて

$$F_{tri} = K_i (|P_{ri} P_{mi}| + r \theta_{mi} - |P_{i0} P_{mi0}|) \frac{\overrightarrow{P_{ri} P_{mi}}}{|P_{ri} P_{mi}|}$$

となる。ここで P_{i0} 、 P_{mi0} はそれぞれ初期姿勢 ($\theta_0 = \theta_1 = 0$) における P_i 、 P_{mi} である。 P_{hri} 、 P_{ri} 、 P_{gri} と θ_{ri} を関係づけるヤコビ行列をそれぞれ J_{prh} 、 J_{gri} 、 J_{pri} 、手先荷重を F_{gh} とすると、静学的には

$$J_{prh}^T (F_h + F_{gh}) + J_{gri}^T F_{gi} + J_{pri}^T F_{tri} = 0$$

が成り立つ。したがって

$$F_{gh} = -(J_{prh}^T)^{-1} (J_{gri}^T F_{gi} + J_{pri}^T F_{tri}) - F_h$$

より手先荷重を求めることが出来る。

3. 巻取装置

3.1. 装置概要

開発した巻取装置を Fig.7 に示す。装置は直径100[mm]の螺旋状にプーリを配置した構造になっており、1.5周分腱を巻き取れるようになっている。

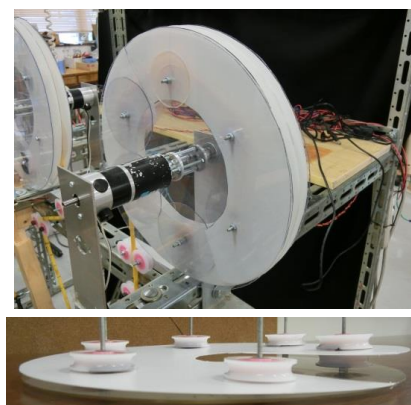


Fig.7 Winding drum

3.2. システム概要

開発した巻取装置のシステムの構成図を Fig.8 に示す. PC 側のプログラムの開発環境は Visual Studio 2010 を用いる. また, マイコン側のプログラムの開発環境は MPLAB を用いる.

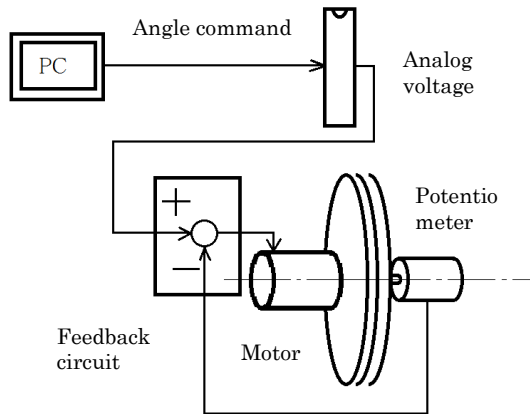


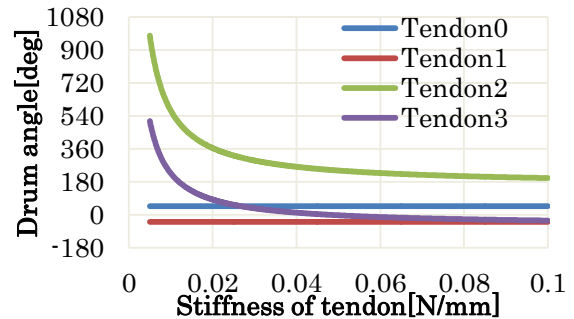
Fig.8 Winder control system

3.3. 巻取量

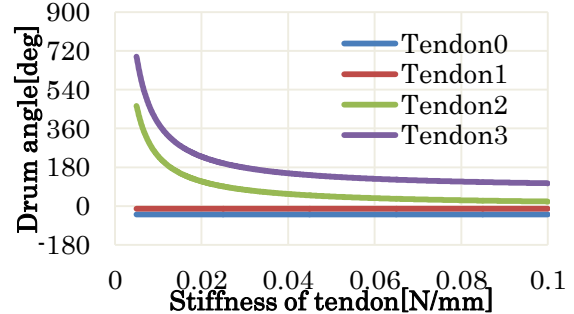
今回製作した巻取装置は回転角度が $-180^{\circ} \sim +360^{\circ}$ となっている. 従来の動作範囲が $-180^{\circ} \sim +180^{\circ}$ の場合と比べ, 同じ可搬重量に対しどの程度腱の剛性を低く設計出来るか確認する. 目標姿勢は (a) $\theta_0 = 30^{\circ}$, $\theta_1 = 30^{\circ}$, (b) $\theta_0 = -30^{\circ}$, $\theta_1 = 60^{\circ}$ とする. 目標手先力は物を持ち上げる場合を想定し y 方向に 3[N] とする. 腱剛性を変数として 0.005[N/mm] から 0.1[N/mm] まで与える. それぞれの腱剛性に対し, 目標姿勢, 目標手先力を満たすために必要な巻取装置の巻取角度を算出する. 結果は Fig.9 に示す.

今回選択した二つの姿勢は, どちらも張力のかかる腱として腱 2, 腱 3 が選択されているが, (a) では腱 2 に, (b) では腱 3 に主に負荷が掛かると分かる. (a) において巻取量が 180° までの場合, 腱剛性が 0.1[N/mm] となっても手先力を実現不可能である. 巻取量が 360° まで有ればおよそ 0.02[N/mm] で実現可能であり, 巻取量増加の効果が顕著に見取れる. (b) では巻取量 180° でも 0.03[N/mm]

程度でも十分に手先力を実現可能である. ただし巻取量 360° ならおよそ 0.01[N/mm] で実現できるため巻取量が多い方が柔軟な腱を用いることが可能だと分かる.



(a) $\theta_0 = 30^{\circ}$, $\theta_1 = 30^{\circ}$



(b) $\theta_0 = -30^{\circ}$, $\theta_1 = 60^{\circ}$

Fig.9 Required drum angle

4. 動作検証

4.1 巻取装置検証

巻取装置はプーリの外周部が 100[mm] の円周に接するように, 60° 毎に配置している. そのため, 厳密には巻胴外周は円ではない. そこで実際に腱を巻き取って巻取装置の半径を確認する. 腱をアームから外し, 腱に 100[g] の錘を吊るして -120° から 240° まで 30° ずつ装置を回転させ腱の巻取を行う. 巻取点から錘までの腱長を巻き取りと巻き戻しの 2 通りで測定し, 巻胴が円であると仮定して算出した半径と巻き角の関係を Fig.10 に示す.

算出した半径はほぼ定数だが 100[mm] よりもわずかに小さい. これは巻取装置のプーリが六角形状に配置されているためである. 平均の半径は 94[mm] となるので巻取角度の算出にはこれを用いる.

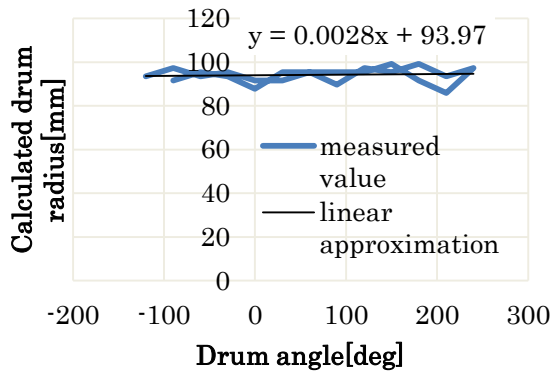


Fig.10 Winder test

4.2 動作検証

アームの目標姿勢をステップ状に変化させて位置制御を行った。実験の条件として無負荷状態での位置決め制御(a), 無負荷でアームの自重を補償した位置決め制御(b), 手先に 200[g]の錘を吊り下げた状態でアームに対する重力のみ補償した位置決め制御(c), 手先に 200[g]の錘を吊り下げた状態でアームとおもりの重力を補償した位置決め制御(d)をそれぞれ行う。なお錘以外の条件を可能な限り等しくするため, 検証は目標関節角度を直接与えて行う。 $\theta_0 = 0^\circ$, $\theta_1 = 0^\circ$ を初期姿勢とし $\theta_0 = -45^\circ$, $\theta_1 = 45^\circ \rightarrow \theta_0 = -30^\circ$, $\theta_1 = 60^\circ \rightarrow \theta_0 = 0^\circ$, $\theta_1 = 45^\circ \rightarrow \theta_0 = 30^\circ$, $\theta_1 = 60^\circ$ と 6 秒間隔で変化させる。結果を Fig.11 に示す。

初期姿勢において θ_1 が 10° 程度となっているのは腱 1 の巻取位置によるものである。(a)は重力の影響を受けて下方向に誤差が出ている。(b)は(a)に比べ重力による誤差が小さくなっており重力補償の効果が確認できる。(c)と(b)の比較から手先質量の影響が分かる。手先に対する 200[g]の荷重はこのアームにとって無視出来ない。(c)も(a)のようにアームが下側に偏っているが, その誤差は(a)よりも大きい。動作後に振動が発生しているが, これは錘が手先に吊るされているからである。(d)と(c)の比較から手先にかかる負荷を補償出来ていることが分かる。完全

に目標に一致しないのは, 腱の伸びが大きくなると計算上の腱剛性と実際の腱剛性の差が無視出来なくなるためだと考えられる。

4.3. 手先質量推定検証

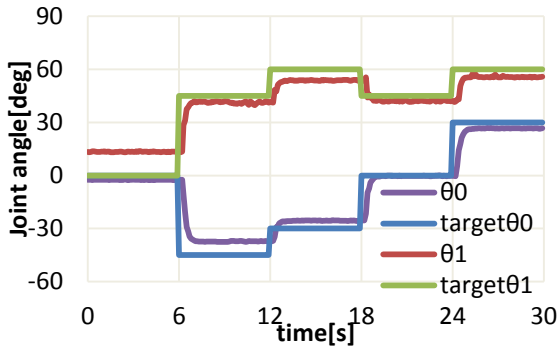
カメラの画像より手先にかかる物体の重力の推定を行った。条件(a)では 100[g]を, 条件(b)では 200[g]を与えた。目標関節角度とカメラ画像から得た関節角度を Fig.12 に, 手先質量の算出結果を Fig.13 に示す。

目標姿勢はステップ状に与えているため, 目標姿勢が変わる瞬間に大きな質量が検出されている。質量推定の関係式は静力学的にしか成り立たないため, 動作中のデータは扱うことが出来ない。また, 初期姿勢は $\theta_0 = 0^\circ$, $\theta_1 = 0^\circ$ なので y 方向の力を算出することは出来ない。ただし初期姿勢のずれから -170[g]と算出されている。推定の誤差は最大で実際の手先質量の ± 50 [g]程度となっている。この誤差の原因も腱の剛性の算出値と実際値の差によるものと考えられる。また, 肩関節がアームに与える力を考慮していないこと, カメラ画像から算出した関節角度の精度も誤差の原因として考えられる。

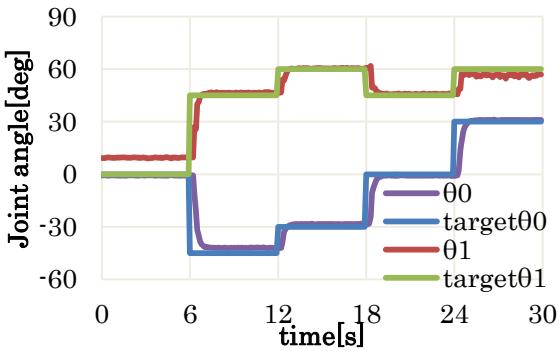
5. 結言

改良した巻取装置を用いたロボットアームの動作検証を行った。位置決め制御において予想した十分な精度が出せることを確認した。また, 把持物体の質量が分かっている場合, あらかじめ手先力として与えることで補償出来ることを確認した。カメラ画像より質量の推定も可能であるが, 現状では姿勢によっては大きな誤差が出てしまう。

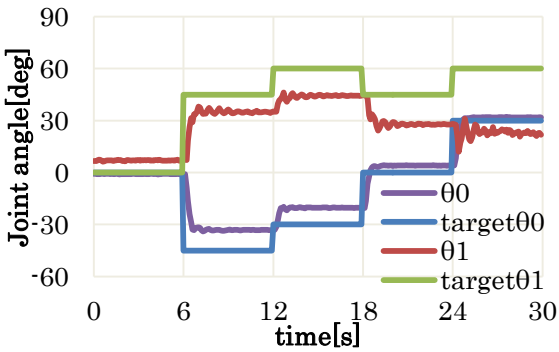
課題としては, 腱の負荷が大きくなった際の精度の低さが挙げられる。腱の非線形性への対策が必要である。また, 開発したインタフェースは現状手先力をキーボードから与える必要があり, 直感的とは言えない。直感的な操作を可能とする操作インタフェースや操作デバイスを開発する必要がある。



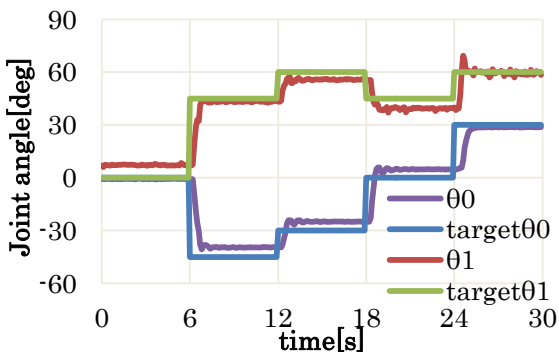
(a) Position control without gravity compensation



(b) Position control under gravity compensation

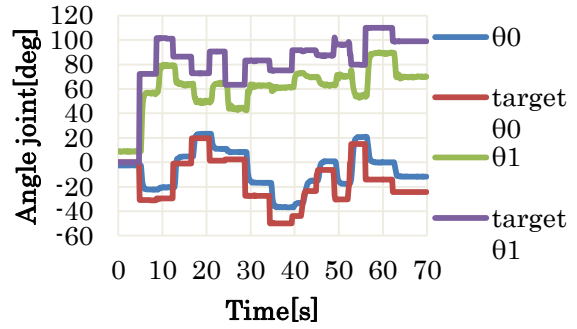


(c) With weights, position control under gravity of arm compensation

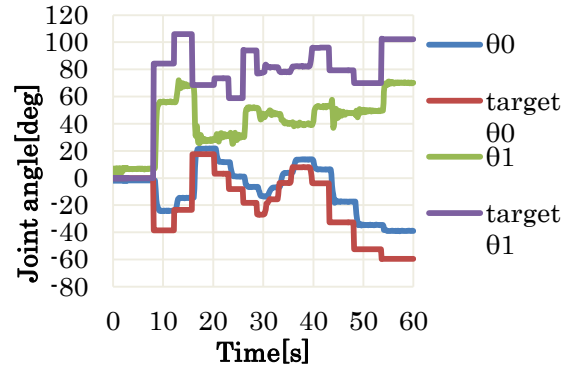


(d) With weights, position control under gravity of arm and weights compensation

Fig.11 Operation verification

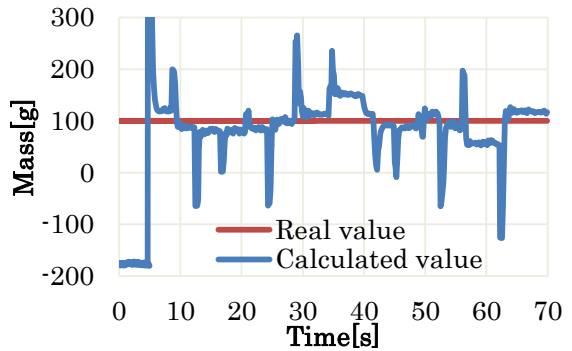


(a) With 100[g]

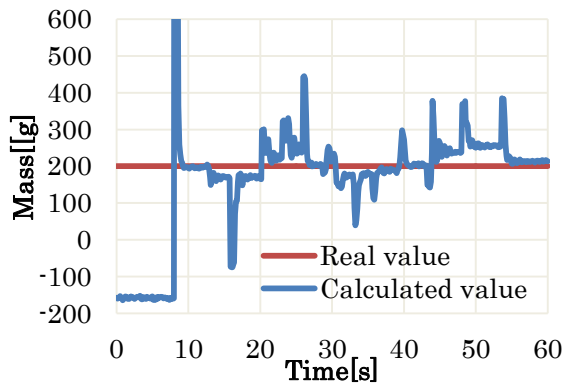


(b) With 200[g]

Fig.12 Target angle



(a) With 100[g]



(b) With 200[g]

Fig.13 Calculated mass

参考文献

- 1)中村 仁彦, 川上 洋生, 岡田 昌史: 低侵襲心臓外科手術を支援する臓器運動補償型手術ロボットシステム, 日本ロボット学会誌, 18-6, 873-881(2000)
- 2)津川 定之: 自動車の自動運転ーその特長と課題ー, 研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL), 51-9, 1-8(2009)
- 3)経済産業省産業機械課: 2012 年ロボット産業の市場動向, 17-19(2013)
- 4)妻木 勇一: ヒューマンインターフェースにおけるウェアラブルロボット技術, 日本ロボット学会誌, 32-8, 709-712(2014)
- 5) 和田 侑也, 田中 一品, 中西 英之: 遠隔握手: ビデオ会議と触覚提示デバイスの一体化によるソーシャルテレプレゼンスの強化, 情報処理学会論文誌, 56-4, 1228-1236(2015)