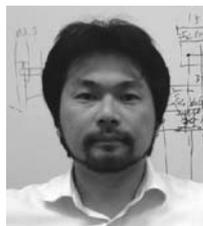


空気圧人工筋の受動性を利用した頑健な外力・ 姿勢変化推定機構の開発

Development of the Estimation Mechanism of the External Force and Displacement of the
Joint utilizing the Passivity of the Artificial Muscle

2011011



研究代表者

大阪工業大学 工学部

講師

田熊隆史

[研究の目的]

ヒトや物体と接触するロボットに求められる機能のひとつは、対象者・対象物と常に接しながら力の調和をとって作業を遂行することである。力・姿勢計測において、これまで多くの研究では対象との接触面や接触による関節などの姿勢変化箇所にはセンサを配置してそれらを直接測定してきた。しかしこの手法ではセンサに直接外力が加えられるためセンサの破損が避けられず、実用化が難しい。

申請者はこれまで、マッキベン型空気圧人工筋（以下空気圧人工筋）によって駆動する二脚ロボットやロボットハンドを扱ってきた。空気圧人工筋は圧縮空気の供給弁を閉気後、外力を加えてアクチュエータを伸展させると、空気を給排気していないにもかかわらず内部の圧力が受動的に変化するという特徴を有する。申請者は空気圧人工筋のこのような特徴に着目し、人工筋で駆動するロボットハンドに外力を加え、それに伴う空気圧人工筋内の圧力変化から外力および変化した各関節の角度の推定を試みた。この結果、一部の関節の姿勢については推定可能であったが、その他の関節および外力は十分な精度で推定できなかった。

正確な推定が難しい原因の一つは、圧力変化から外力や変化した関節角度を求めるモデルが

適切でなかったことであり、もう一つは加えた力の影響が人工筋の圧力変化にダイレクトに伝えられなかった（バックドライバビリティが低かった）ことが考えられる。平成23年度はバックドライバビリティの高い関節機構の設計開発および、圧力と外力・関節に関するより正確なモデルの導出を目指した。

[研究の内容・成果]

正確なモデルを導出するにあたり、平成22年度で扱っていた多関節機構ではモデルが複雑になることが分かった。そこで対象を、1関節を拮抗配置した空気圧人工筋で姿勢維持する機構に変更した。またバックドライバビリティ向上のため新たに関節機構を設計し、小さい外力であっても空気圧人工筋が伸展できる、不感帯の小さい機構を試作した（図1参照）。

人工筋の圧力と外力・関節確度変化の関係については、平成22年度はニューラルネットを用いたモデルや、線形近似したモデルが考案された。しかし両モデルとも正確な外力や関節角度推定には至らなかった。そこで厳密な非線形モデルを構築し、そこから圧力と外力・確度の関係を導いた。図2左に力を加える前の関節の状態、右に力を加えたあとの関節の状態を示す。図2右における両人工筋の幾何拘束条件、力の



図1 試作した1関節機構

釣り合い、および力を加える前後での両人工筋におけるボイルの法則（圧力と体積の積一定）を用い、外力 F と角度 θ を次の式のように、人工筋内の圧力で表現した。

$$F = \frac{rk_R(l_{R0}L_R^2 - l_{R0}^3)\cos(\theta - \alpha_R)(P_{R0} - P_R)}{r_F(L_R^2 - 3l_{R0}^2)} - \frac{rk_L(l_{L0}L_L^2 - l_{L0}^3)\cos(\theta + \alpha_L)(P_{L0} - P_L)}{r_F(L_L^2 - 3l_{L0}^2)}$$

$$\theta = \sin^{-1}(\xi)$$

$$\xi = \frac{l_{L0}^2L_L^2 - l_{L0}^4}{2rh(L_L^2 - 3l_{L0}^2)}\left(\frac{P_{L0}}{P_L} - 1\right) + \frac{l_{R0}^2L_R^2 - l_{R0}^4}{2rh(L_R^2 - 3l_{R0}^2)}\left(\frac{P_{R0}}{P_R} - 1\right) + \frac{l_{R0}^2 - l_{L0}^2}{4rh}$$

ここで l_{L0} , l_{R0} はそれぞれ図2左側、右側の人工筋の、力を加える前の長さを表す。また L_L , L_R は両人工筋を覆うナイロンスリーブの繊維長、 k_L , k_R はそれぞれの人工筋固有の値を表す。 h は土台から空気圧人工筋上部付着位置までの高さ、 r , r_F はそれぞれ、回転関節から筋付着位置および外力を加える位置までの距離（モーメントアーム長）を表す。また P_{L0} , P_{R0} は外力を加える前の左側・右側人工筋内の圧力を表し、 P_L , P_R は外力を加えた後の両圧力を表す（図2参照）。 α_L , α_R は人工筋の傾きであり、以下のように表される。

$$\alpha_L = \tan^{-1}\left(\frac{r - r \cos \theta}{h - r \sin \theta}\right)$$

$$\alpha_R = \tan^{-1}\left(\frac{r - r \cos \theta}{h + r \sin \theta}\right)$$

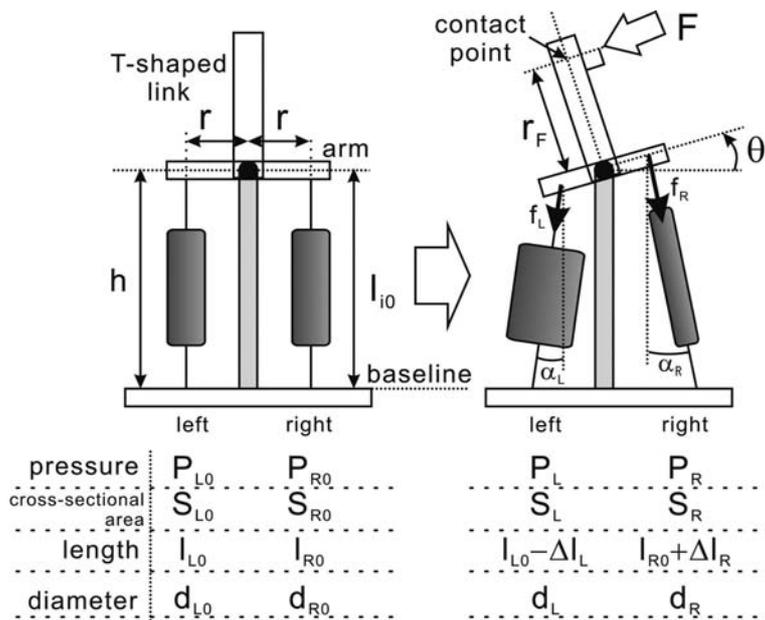


図2 外力を加える前後の人工筋の圧力、断面積、長さ、直径

これらの非線形式より、力を加える前後の圧力を測定することで外力および関節角度の計算は可能であることが分かる。しかし l_{L0} などの長さを正確に測定することは困難であるため、上式を以下のような式に置き換え、複数の観測結果から最小自乗法を用いて係数 $\beta_{\theta L}$, $\beta_{\theta R}$, $\beta_{\theta C}$ および β_{FL} , β_{FR} を求める。

$$\sin \theta = \beta_{\theta L} \frac{P_{L0}}{P_L} + \beta_{\theta R} \frac{P_{R0}}{P_R} + \beta_{\theta C}$$

$$F = \beta_{FL} \cos(\theta + \alpha_L)(P_{L0} - P_L) + \beta_{FR} \cos(\theta - \alpha_R)(P_{R0} - P_R)$$

ただし α_L , α_R は θ の情報が必要なため、最初に θ に関する推定式の係数 $\beta_{\theta L}$, $\beta_{\theta R}$, $\beta_{\theta C}$ を求め、その推定式を元に人工筋内の圧力値から α_L , α_R を計算して、係数 β_{FL} , β_{FR} を求める。

係数は 108 セットの観測値（外力、角度、外力を加える前および後の人工筋の圧力）から求めた。これにより得られた角度および力の推定式の精度を検証するために、更に 24 セットの観測値を用意し、推定式から得られた角度、力と実測値の比較を行った。比較結果を図 3 および図 4 に示す。各図とも横軸は観測した角度もしくは力を示しており、縦軸は推定した値を示している。図中の対角線は観測値と推定値が一致したときの点集合を表している。図のように角度および力ともに、観測値に近い値を推定できていることが分かる。なお以前考案したニューラルネットや線形近似のモデルでは、大きな力で関節を回転させたとき正確に推定でき

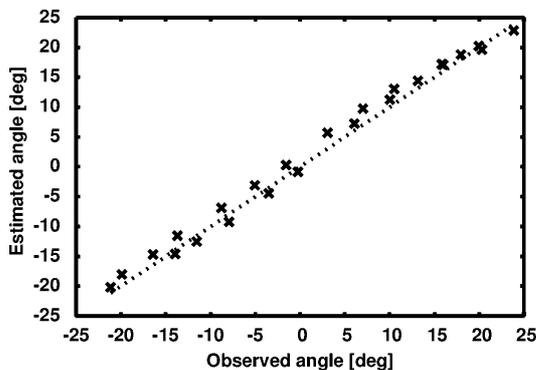


図 3 角度推定結果

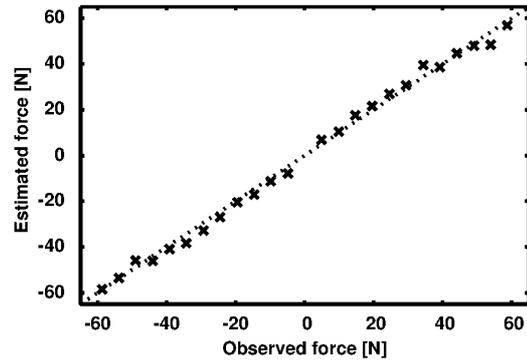


図 4 外力推定結果

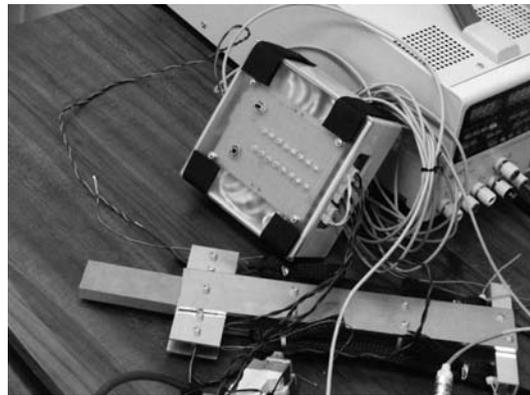


図 5 デモ機（ボックス内にマイコン搭載）

ないことも確認した。

以上の結果より、提案した外力およびそれに伴う関節角度変化の推定モデルを用いることで、外力の加わる接触点および関節に直接センサを取り付けることなくこれらが推定可能であることが分かった。推定式は大変単純なものであり、マイコンのような単純なプロセッサでも瞬時に計算可能である。そこで図 5 に示すような、AVR マイコンを搭載した持ち運び可能なデモ機を製作した。

[今後の研究の方向・課題]

平成 23 年度の成果として、一関節を有する機構への外力の大きさとそれによる関節の変化を、直接センサにより測定することなく推定可能であることが示された。今後は本研究を発展させ、二つの課題に取り組むことを考えている。一つはこの関節機構を用いて、未知物体の弾性

を推定することである。本研究で扱った関節機構は、外力およびそれにより受動的に回転した関節角度が推定可能である。よってこの関節機構を未知物体に押しつけて外力と関節角度を推定すれば、接触部にセンサを取り付けることなく弾性が推定可能であると考えられる。

もう一つ課題は、二つもしくはヒトと同様三つの関節機構に対して外力と関節角度の関係を求めることである。図2に示すように、本研究で扱った一関節機構では、力を加える向きがリンクに対して垂直でなければならなかった。そのため加えた力の大きさは推定できても、力の向きについては推定することができなかった。複数の関節を取り付け、垂直以外の成分でも関節が受動的に回転するようになれば、力の向きも推定可能であると考えられる。現在図6に示すような二関節機構を試作し、人工筋内の圧力と力の大きさ、関節角度に加えて力の大きさの関係を求めているところである。

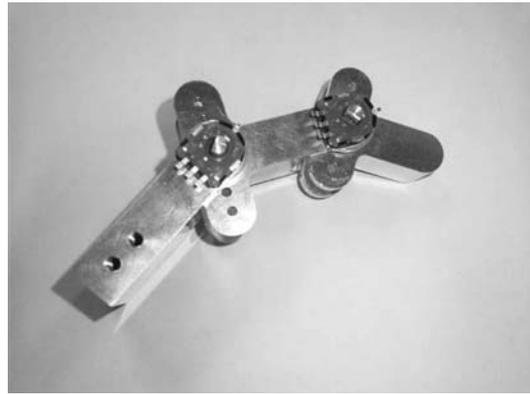


図6 二つの関節を有する機構

【成果の発表・論文等】

- 高峰 健, 田熊隆史, 増田達也: 「拮抗筋駆動関節モデルを利用した対象物接触情報の推定」, 第56回システム制御情報学会研究発表講演会
- K. Takamine, T. Takuma, and T. Masuda, "Robust Estimation of Contact Information for Recognition of the Physical Properties of an Object", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (投稿中)