

機械的に剛性を変化できる力作業用スカル型ロボットアーム

金沢大学 小野 篤彦, 関 啓明, 神谷 好承, 足津 正利

SCARA Robot Arm with Variable Compliance Joints

Kanazawa University Atsuhiko Ono, Hiroaki Seki, Yoshitsugu Kamiya, Masatoshi Hikizu

There are few assembly robots with force control in factories, because force control tends to be unstable and its motion is slow. The flexible joint that can change its compliance mechanically by rotating leaf spring is developed to solve this problem. This mechanism is simple to change compliance quickly with good stability. This robot can do both positioning control and force control. We also develop the SCARA robot equipped with this flexible joints for assembly task.

1. 緒言

従来から力制御のできるロボットアームが研究されているが、位置制御ロボットと比べ、工場内での生産現場への導入事例は非常に限られている。その原因としては、力制御は不安定になりやすく制御パラメータの設定が難しいこと、安定な力制御のパラメータではアームの動作が非常に遅くなる事が挙げられる。これらを解決するためには、機械的に剛性を変化できるロボットアームが有効である 1)。本質的に安定で衝撃等に対する応答性も良く、位置制御型のロボットにも適用できる。そこで、本研究では、位置制御と力制御の両方が必要な組立作業用のロボットアームとして板バネを開節に組み込んで剛性を変えられるスカル型アームの開発を行う。

2. 板バネにより剛性を変化できる開節

バネはその曲げの方向を変えると大きく剛性を変える性質がある。水平 ($\theta = 0^\circ$) にして力を加えたときの剛性は低く大きいたわみ、垂直方向 ($\theta = 90^\circ$) に力をかけたときは、高い剛性を示しあまり変形しない。開節の一部に板バネを回転できる機構を組み込むことによって機械的に剛性を変化させる(図 1)。接続部を回転させると、その変位は板バネを介して手先へと伝えられる。板バネの角度が $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ではその中間の剛性が得られる。板バネの幅 w 、厚さ t 、ヤング率 E 、長さ L とし、開節の曲げ q 、トルク T とすると開節の剛性 K は次式で表される 2)。

$$K = \frac{w t E}{12 L} (w^2 \sin^2 q + t^2 \cos^2 q) = \frac{t}{b} \quad (1)$$

3. 開節ユニットの設計

図 2 のように板バネを内蔵した開節ユニットの設計を行った。開節は、開節軸を中空円筒にし、大き目のベアリングで支持して減速機付きの AC サーボモータで直接回転させるガタの少ない構造にした。この中空円筒内部に板バネを配し手先のアームへと変位を伝えるようにしてある。板バネはステッピングモータによってウォームギアを介して回転させるため、板バネに捩りトルクが発生しても逆に回転できない構造になっている。板バネの逆端は、スライドロータリーベアリングを用いることで、開節の曲げから生じるバネの捩りトルクやスラスト荷重を逃がすことができる。

4. 開節剛性の測定

試作した開節を固定し板バネの角度を変え、アーム先端に荷重をかけて実際の開節剛性を測定した。また、厚さや幅が異なる板バネを試した。代表的な測定結果と理論値を図 4 に示す。実測値と理論値では大きく異なっているが、板バネの厚さ t と幅 w を変更すると実測値に近似できる。板バネの厚さが薄い場合は捩れによる影響が大きくなるので必ずしも比例しない。ある程度以上の厚さ t ならば、任意の開節剛性 K を与えられる板バネの角度 θ を得られる。

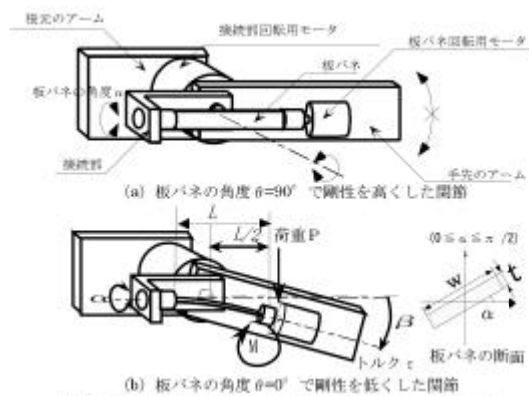


図 1 剛性を変化させる開節機構

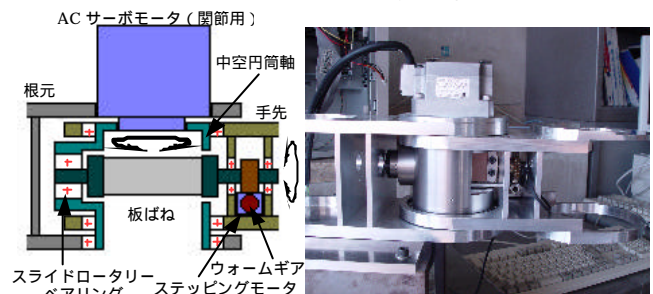


図 2 開節ユニットの構造と外観

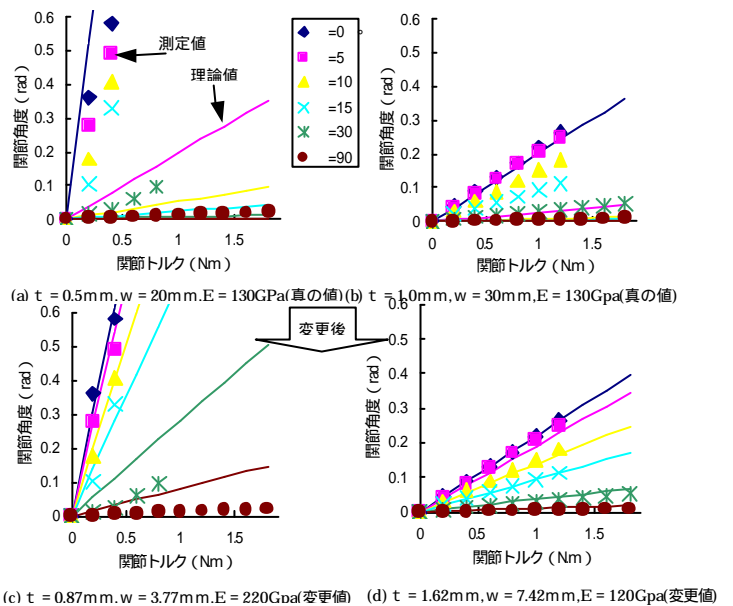


図 3 開節剛性の測定 (t 、 w 、 E)

5. 剛性を変化できる4自由度スカラ型ロボット

平面内で手先の剛性(k_x, k_y, k_θ)を変化できるスカラ型ロボットを実現するには、手先の位置(x, y)を同時に指定することも考えると、理論上は5自由度必要である。ただし、手先のハンドの真上に剛性を変えられる関節を1つ設けるとハンドの回転剛性 k と姿勢を変えることができる。以後、残りの並進方向の剛性のみを議論する。すなわち、位置(x, y)を決めるのに2自由度、剛性(k_x, k_y)を決めるのに2自由度必要である。合計4自由度必要であるが、スカラ型ロボットアームを実現する上では、自由度は少ないほうが好ましい。そこで、剛性を変えられる3自由度の関節(k_1, k_2, k_3)で、どの程度手先の剛性(k_x, k_y)を制御できるかを検討する。

ヤコビ行列 $J(2 \times 3$ 行列)を用いると手先の剛性 K と各関節の剛性 K_j の関係式は次式で表される。

$$K_j = J^T K J \quad (2)$$

また、手先座標系の x, y 方向の剛性を k_x, k_y 、座標系の角度をとると手先の剛性 K は、次のように求められる。

$$K = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos f & \sin f \\ -\sin f & \cos f \end{bmatrix} \quad (3)$$

(3)式を(2)式に代入すると手先の剛性 K を実現する K_j は各成分に値が存在するが、 K_j は各関節の剛性を表しているので実際には対角成分しかない。

$$K_j = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

そこで、 K から求めた K_j の対角成分のみを各関節の剛性として、指定した剛性 K と実現できる剛性 ($J K_j J^T$) は異なる(図5)。手先が x 軸上にあるときに様々な手先剛性が実現できれば第1関節を回転させることで任意の手先位置(x, y)でも実現できる。そこで、手先が x 軸上のいくつかの位置にある時、指定した剛性と実現できる剛性の違いを調べた。その結果を表1に示す。このとき、指定した剛性の楕円(手先に大きさ1の力をかけた時に生じる変位の範囲)の軸方向(手先の座標系の x, y 方向)に3番目のリンク l_3 がくるようにアームの姿勢を $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ を選んだ。また、そのアームの姿勢の中で最も指定した剛性に近いものが実現できるものを表示した。これを見ると指定した剛性に近い手先の剛性が実現できているのがわかる。

6. 4自由度スカラ型ロボットアームの試作

剛性を変えられる4関節のロボットアームを試作した(図6)。ステッピングモータを垂直に配置することによって全ての関節をコンパクトにすることができた。ハンドの上下移動はステッピングモータとすべりネジで行い、この部分にも剛性を変化できる機構を組み込んでいる。

7. 結言

角度を変えられる板バネを中空円筒状の関節軸に内蔵することにより、剛性を変えられるコンパクトでガタの少ない関節を設計することができた。この関節を用いて4自由度スカラ型ロボットを製作し、ある程度指定した剛性に近い手先剛性を実現できることを確認した。

参考文献

- 1) T. Morita, S. Sugano: "Development of One-D.O.F. Robot Arm equipped with Mechanical Impedance Adjuster", Proc. of 1995 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.407-412, (1995).
- 2) 高田他: "ホームロボット用の剛性を変えられる柔軟関節の開発", 1998年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.553-554, (1998)

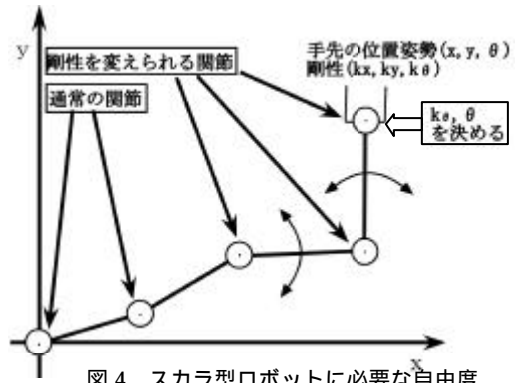


図4 スカラ型ロボットに必要な自由度

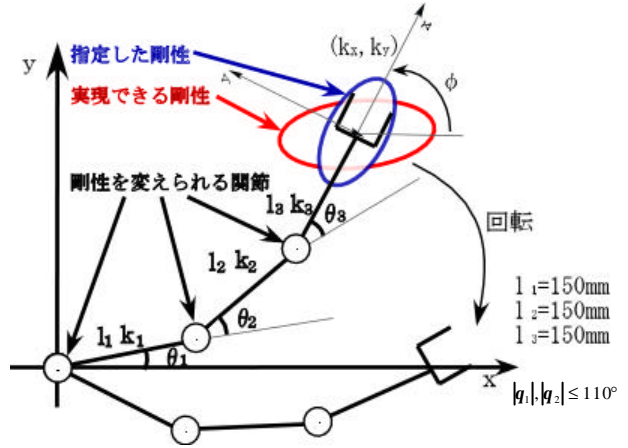


図5 3自由度モデル

表1 ある手先位置で指定した剛性と実現できる剛性

(x, y) [mm]	指定した剛性 [°] (k_x, k_y) [N/m]	実現できる剛性 [°] (k_x, k_y) [N/m]	(k_1, k_2, k_3) [N·m/rad] ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) [rad]
(250, 0)	0 (100, 100)	-32.0 (81.7, 144)	(12.0, 6.37, 2.49) (-0.778, 0.476, 1.87)
(250, 0)	0 (100, 1000)	-5.21 (104.530)	(62.5, 21.6, 2.49) (-0.778, 0.476, 1.87)
(250, 0)	45 (100, 1000)	52.3 (73.5, 1375)	(44.2, 21.8, 2.49) (1.57, -1.86, -0.488)
(350, 0)	45 (100, 1000)	53.1 (80.5, 1223)	(86.6, 28.2, 2.49) (0.891, -0.961, -0.715)

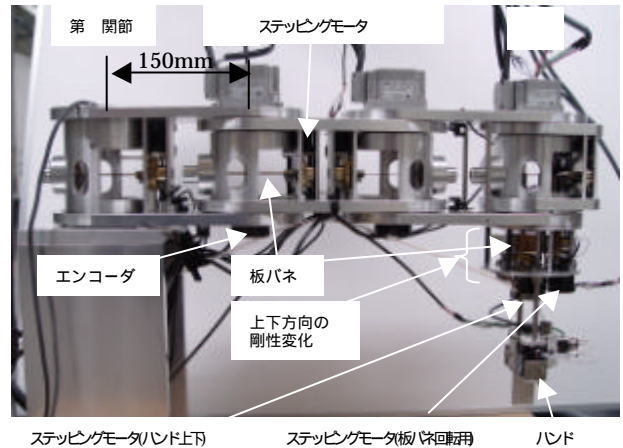


図6 試作した剛性を変えられる4自由度スカラ型ロボットアーム