マニピュレータの回り込み作業性の評価* (ギヤードリンク機構を用いたマニピュレータの場合)

島 地 重 幸^{*1}, 渡 辺 浩 二^{*2}

Evaluations of Go-Round Operations of Manipulator (On a Geared Link Manipulator)

Shigeyuki SHIMACHI and Kouji WATANABE

A robotic manipulator usually operates its end effector on a front face of the object. However, sometimes the end effector of the manipulator has to go round behind obstacles to carry out painting, assembling or welding. Evaluations of the go-round performances are required especially in developing a new manipulator mechanism whose degrees of freedom are limited. This paper proposes two methods for evaluating the reaching ability of the end effector compared with the room required for moving the manipulator body. The first method is for an orthogonal reach direction to the robot-object line. Another method is for a turn-back reach direction to it. These methods are applied to serial types of geared link mechanisms which have one bending degree of freedom and of which root links are driven not rotationally but parallelly. The link lengths and the gear ratios which enable optimum performance are investigated.

Key Words: Robotics, Manipulator, Evaluation of Operation, Go-Round Operation, Geared Link Mechanism

1. 緒 言

産業用ロボットマニピュレータには作業目的に応じたさまざまな構造のものが存在する。しかし、これまで用いられてきた産業用ロボットマニピュレータでは十分に行いにくい作業が存在する。そのような作業の一つとして、ここで取り上げるのがマニピュレータ先端部により、回り込んでの作業である。マニピュレータのエンドエフェクタが対象物を回り込んで作業するような場合や、あるいは曲がった穴に進入して作業するような場合が、組立、塗装、溶接等各種の場合にあり、その改善が望まれている。

直列多関節形で自由度を増せば回り込んでの作業性は改善できようが、自由度を多くするほど剛性の点で不利である。現在多く用いられている産業用ロボットは六自由度であるが、最小限の自由度の追加増で回り込んでの作業性を改善することが要求されている。

マニピュレータの機構設計では、機構の作業性を評価することが不可欠である。従来の評価の代表的なものにエンドエフェクタの到達領域の広がり⁽¹⁾、ヤコビ

行列との関係から求められる可操作だ円体の大きさと形などがある⁽²⁾⁽³⁾。多指機構の作業性と自由度との関係を扱ったもの⁽⁴⁾⁽⁵⁾、もう少し具体的な作業と結びついたものとしては、2本指の作業空間と作業性⁽⁶⁾⁽⁷⁾などさまざまな評価がなされている。これらは障害物のない空間での作業を前提としているが、障害物環境下での可操作だ円体に注目したものもある⁽⁸⁾。しかし、障害物環境下での可到達空間に対応するかと思うが、障害物を回り込んでの作業性の評価を試みたものを著者らは知らない。

本研究では、問題設定の比較的容易な二次元空間内の作業場におけるマニピュレータ回り込み作業について、2種類の評価、すなわち入口障害壁面の奥端で横方向に回り込んでの作業に対する評価、その奥端で壁面の裏側にU字形に折返して挿入口方向に逆に回り込んでの作業に対する評価を試みる。

また、本研究では、自由度の追加増は少ないことが要求されるので、多関節工業用六自由度ロボットの先端に、歯車とリンクを一体化した自由度が1であるギヤードリンク機構を取付け、その根元リンクが本体ロボットにより平行平面運動を与えられる場合を想定する。そして、ギヤ速度比、リンク長さ比などの機構パラメータに対して上述の作業性を評価する。さらにギヤ

* 原稿受付 1995年3月2日。

^{*1} 正員、岩手大学工学部 (〒020 盛岡市上田4-3-5)。

^{*2} 岩手大学学生。

ードリンク機構のギヤを変速度比歯車とする場合の作業性についても調べる。

取扱うギヤードリンク機構は、機構の交替という見方からすれば、乗用車に用いられているひし形の概観をもつジャッキ機構と同じである。

2. ギヤードリンク機構

ギヤードリンク機構の構成およびその運動軌跡の一例を図1に示す。これは歯車AとBによる一対のギヤードリンクで構成される2-ギヤードリンク機構である。歯車AとBをともに大きくして、図1に示されている中間歯車を除くこともできるが、マニピュレータの腕を細くするために、この図では中間歯車を用いている。この機構では歯車Aをリンク L_0 に固定し、リンク L_1 を歯車Aの中心 O_A 回りに回転させること

Fig. 1 2-g geared link mechanism

Fig. 2 2-g geared link mechanism attached to a manipulator

によって歯車B固定のリンク L_2 も O_B 回りに回転する。歯車A, Bのピッチ円半径を R_A, R_B とし、リンク L_1, L_2 の長さを l_1, l_2 とする。

図2に2-ギヤードリンク機構をロボット先端に取付けた例を示す。また、図3に示すような、2-ギヤードリンク機構を二つつなぎ合せた平面的に3リンクとみなせる機構も取扱う。

以上がギヤードリンク機構の構成であるが、歯車の代わりにベルトやチェーンによる伝動でも同様の運動が得られる。また、回り込み作業評価においてリンク長さは自由に取得すると仮定する。

3. 回り込み作業評価1

(1) 作業空間および評価法1 図4に示すように、作業場所への入口部の障害壁Aの奥端で壁Aに沿う方向に対して直角に回り込んだ先に作業場所がある場合を想定する。また、工業用ロボットの先端に、ギヤードリンク機構のリンク L_0 を固定し、リンク L_0

Fig. 3 3-g geared link mechanism

Fig. 4 Type 1 of go-round operation

Fig. 5 Definition of the room for the type 1 operation

Fig. 6 Generating process of the type 1 room

は平面内を平行移動できるものとする。作業や機構の運動は二次元的に考えるが、リンク L_0 を回転軸とすれば、適用範囲はさらに広げよう。

作業は、ギヤードリンク機構の先端において行う。また、回り込んでからの作業目的は特定せず、リンク先端がどこまで到達できるかを重視した評価を行う。

図5に作業空間1の定義を、また、図6に速度比 $R_A : R_B = 1 : 1$ 、リンク長さ $l_1 = l_2$ のギヤードリンクを用いた作業空間1の形成過程を示す。

作業性の評価式を解析的に定義することは、不可能とはいえないであろうが場合分けが複雑になることが予想されるので、計算手順が簡単で、また計算精度もそれほど必要とされないことから、シミュレータを作り、データを採取することにした。

図6において、ギヤードリンクは、最初はまっすぐな状態にあるとして、次の手順で挿入する。

(i) ジョイント O_A を面 A に、またリンク先端を面 B に接触させながら、ジョイント O_B が B 面におつかるまで挿入する。

(ii) 次に、リンク先端が B 面を離れ、ジョイント O_A を面 A に、またジョイント O_B を面 B に接触させながら進める。このとき面 A からリンク先端の距離は次第に大きくなり、極大位置を通過して減少する。

このような動きにおいて、図5に示すように、開始時のジョイント O_A 点を通る Y 軸方向の破線で示した基準線と A, B, C, D, E の各面で囲まれた、2 個のリンク L_1, L_2 が移動するために必要な最小面積 S を考えることができる。そして、その面積 S を使って、リンク先端が深さ L まで挿入できたことになる。

(a) 2-gear link mechanism (b) 3-gear link mechanism

Fig. 7 Effect of gear ratio

このような回り込み作業に対する機構の一評価として、次の評価値 K を定める。

$$\text{評価値 } K = L^2 / S \quad \dots\dots\dots (1)$$

この K の値が大きいほど回り込み作業に優れていると判断する。

(2) 評価法1における評価結果 評価法1を用い、各種のギヤードリンク機構の評価を行った。図7の縦軸は評価値 K 、横軸は C 面の長さ Q を表している。

図7(a), (b)にそれぞれ、歯車の速度比の異なる2-リンク機構、3-リンク機構の評価値 K の比較を示す。ただし2-リンク機構において $l_1 = l_2$ 、3-リンク機構において $l_1 = l_2 = l_3$ である。また Q の値は、リンク全体の長さ ($l_t = l_1 + l_2$, $l_t = l_1 + l_2 + l_3$) を 200 とした相対的な値である。

図7から、全般的に3-リンク機構は2-リンク機構と比べて、大差がないか劣っている。また機構がシンブルな面からも2-リンク機構の $R_A : R_B = 1 : 1$ か

1:2が有利である。

次に、2-リンク機構においてリンク長さ比に対する評価値 K の影響を調べた。ここでもリンク全体の長さ l を 200 とし、先端リンク L_2 が L_1 リンクに比して短い場合を図 8(a)、それが長い場合を図 8(b) に示した。

図 8 から、リンク長さ l_1 が少し長い場合 ($l_1:l_2=120:80$) が評価値 K の最大値では最良といえるが、より広い範囲での評価値 K で判断をするなら ($l_1:l_2$

$=140:60$), ($l_1:l_2=100:100$) がよいといえよう。

4. 回り込み作業評価 2

(1) 作業空間および評価法 2 評価法 1 は入口壁面の奥端で壁面に直角な方向に曲がった先に広がるすきまでの作業を想定したが、次は図 9 に示すように、入口壁面 A に沿って挿入し、面 A と直角で行き止まりの壁面 B を越さないようにしながら壁面 A の奥端を U 字形に回り返して、壁面 A の裏側に存在するすきまで作業を行うことを想定する。

図 10 に、作業空間 2 を定義する。壁面 A によって、マニピュレータアームの存在する S_1 空間と、ギヤードリンクが回り込む側である S_2 空間とが隔てられているとする。長さ H の間隔を通してギヤードリンクを挿入し、リンク先端が壁面 D に到達したときの、壁面 A の端点 A_E から壁面 D までの距離を回り込み長さ L として定義する。また壁面 C, D の長さをそれぞれ W_C, W_D とし、 S_2 空間の面積を $S = W_C \times W_D$ とする。

Fig. 8 Effect of link length on 2-g geared link mechanism

Fig. 9 Type 2 of go-round operation

Fig. 10 Definition of the room for the type 2 operation

Fig. 11 Generating process of the type 2 room

(a) $R_A : R_B = 1 : 1$ (b) $R_A : R_B = 1 : 2$
Fig. 12 Effect of the entrance width H

図 11 に、作業空間 2 の形成例として $R_A : R_B = 1 : 2$, $l_1 = l_2$ の場合を示す。簡単のためギヤードリンクに接続されたマニピュレータアームは、平面内を x 軸に常に平行に移動するものとする。この回り込み作業は、回り込む側 S_2 空間の面積 S を最小にかつ、回り込み長さ L を最大にするという指針で行われる。ここで S_1 空間の大きさは問わないことにする。以下に手順を示す。

(i) 図 11(1) に示すような場を考え、ギヤードリンク機構は x 軸の負の方向より挿入され、最初リンク先端を壁面 A の端点 A_E に置いたまま、ジョイント O_A あるいは O_B が壁面 B に接触するまで進行する。同図(2)に、壁面 B に接触するまでのようすを示す。

(ii) 次に、同図(3)に示すように、ジョイント O_A あるいは O_B が壁面 B と壁面 A の端点 A_E との 2 点で接触しながら、つまり S_2 空間の面積 S を最小にするように挿入を進める。そうしてリンク先端の位置から壁面 C, D が決定される。

(iii) 面積 S を最小にするという(ii)の条件に従って挿入を進めたとき、やがて同図(4)' のように壁面 D の長さ W_D が極大値を取る。そこで、同図(4), (5)に示すようにリンク上のどこかの点が、その極大値の W_D に到達するまで移動させるものとする。このようにする理由は、 W_D の値を増加させずに作業深さ L を増大させることができるからである。

(iv) (iii)の条件に従って挿入を続けるとやがて先の極大値の W_D を越えねばギヤードリンクの挿入が不可能になり、以後はリンク先端を壁面 A に沿うよう、可能な限り挿入を続ける。同図(6)。

リンクの作業性を考えるとき、空間 S_2 の面積 S はできるだけ小さく、しかもリンク先端の到達距離 L が大きいほうがよい。そこで、評価値 K_P として

$$K_P = L/S \quad \dots\dots\dots (2)$$

を考える。この量は無次元量ではないので、挿入に伴う L と S の関係として示すことになる。評価値 K_P は

Fig. 13 Effect of gear ratio Fig. 14 Effect of link length

小さいほど回り込み作業に優れていると判断できる。

(2) 評価法 2 における評価結果 評価法 2 については、2-リンク機構のみを対象とした。図 12 に、間隔 H をパラメータとして作業深さ L と、 S_2 空間の面積 S との関係を示す。(a) $R_A : R_B = 1 : 1$, (b) $R_A : R_B = 1 : 2$ である。ここでギヤードリンク機構のリンク長さを $l_1 = l_2 = 100$ とした。

この結果から、速度比 $R_A : R_B = 1 : 1$ のほうが $R_A : R_B = 1 : 2$ よりも作業深さ 100 に到達するまでの必要面積は小さくて済むが、最大の作業深さにおいては劣っている。

間隔 H については、同図(a)から $H=70$ の場合には間隔 H が十分であり作業性がよいことが、また逆に $H=10$ の場合には同図(b)に見られるように急激に作業性を悪くしている。そこで、次に、速度比をさらに幅広く変えた場合について調べることにするがその際、間隔 H を 10 と 70 の中間値 40 として調べることにする。

図 13 には、間隔 H を $H=40$ の一定として速度比を変化させた場合の結果を示す。速度比 1:1 を基準として考えると速度比がこれより小さい場合は結果が一致し、速度比が大きくなると L, S はともに増加する。

図 14 はリンク長さ l_1 と l_2 の比を変えた結果である。ただし、歯車の速度比 $R_A : R_B = 1 : 1$, およびリンク全体の長さ $l_t = l_1 + l_2 = 200$ を一定とする。先端側リンク L_2 の長さの割合が増すほど作業面積 S が小さくて済むが、最大作業深さ L も小さくなるといえる。

5. 変速度比歯車のギヤードリンク機構による回り込み作業

近年の加工技術の発展により、変速度比歯車の加工は容易になっている。そこで、ここでは、4 章までに述べた機構例に変速度比歯車を用いることにより、提案した機構評価量が改善されることを示す。

ギヤードリンク機構の歯車決定において、歯車中心

Fig. 15 Type 1 evaluation for the variable gear ratio mechanism

Fig. 16 Type 2 evaluation for the variable gear ratio mechanism

間距離 $L_1 (= O_A O_B)$ を一定

$$L_1 = R_A + R_B = 100$$

として, R_A をその回転角 θ_A に比例する形,

$$R_A = C_1 - C_2 \theta_A$$

で表すものとする。式(3)中の定数 C_1 をパラメータとして与え, それぞれの C_1 に対して C_2 を 0.1 刻みで変化させて, 評価値 K あるいは K_P が最大となる歯車対を求める。

(1) 変速度比歯車を用いた評価法1 変速度比歯車のギヤードリンク機構を用いて, 評価法1のシミュレートを行った。式(3)中で $C_1 = 30, 50, 70, 90$ としたとき,

$$(C_1, C_2) = (30, 0.2), (50, 0.4), (70, 0.6), (90, 0.8)$$

で, それぞれ最大値の評価値 K を得た。この評価結果と $R_A = 90 - 0.8\theta_A$ を用いたギヤードリンク機構の回り込み作業軌跡および, その歯車対を図15に示す。

この結果から, 変速度比歯車を用いることで定速度比の場合 $R_A : R_B = 1 : 1$ ($R_A = R_B = 50$) と比べて, かなり優れた回り込み作業性が実現できることがわかった。

(2) 変速度比歯車を用いた評価法2 次に評価

法2に対してもシミュレートを行った。式(3)中で $C_1 = 50, 60, 70, 80$ としたとき,

$$(C_1, C_2) = (50, 0.1), (60, 0.2), (70, 0.3), (80, 0.4)$$

でそれぞれ最大値の評価値 K_P を得た。この評価結果と $R_A = 80 - 0.4\theta_A$ を用いたギヤードリンク機構の回り込み作業軌跡および, そのときの歯車対を図16に示す。

この結果からも, 変速度比歯車を用いることで, 定速度比の場合 $R_A : R_B = 1 : 1$ ($R_A = R_B = 50$) と比べて, かなり優れた回り込み作業性が実現できることがわかった。

6. 結 言

従来のマニピュレータは, 1方向のみから作業対象に接近したり, すきまに挿入されることを暗黙に了解して製作され, 作業なども計画され, 諸関係が解析されていたように思われる。これに対して, 本研究では,

(1) 障害壁に沿って挿入され, さらに, その壁の奥端で直角に曲がった先のすきまで作業する場合, および障害壁の奥端をU字形に折り返した先の壁裏に広がるすきまで作業する機構の作業性評価方法を提案した。

(2) これらの作業方法を自由度が1のギヤードリンク機構に適用し, 回り込み作業性の優劣を判断した。さらに, この機構におけるギヤを変速比歯車とすることで, 評価値を大幅に改善できることを示した。

文 献

- (1) 例えば, Tsai, Y. and Soni, A., Accessible Region and Synthesis of Robot, Arms, *Trans. ASME J. Mechanical Design*, 103(1981), 803-811.
- (2) 吉川恒夫, ロボットアームの可操作度, 日本ロボット学会誌, 2-1(1984), 63-67.
- (3) 内山勝・清水邦敏・箱守京次郎, ヤコビ行列式によるロボットアームの機構評価, 計測自動制御学会論文集, 21-2(1985), 190-196.
- (4) 山下忠, 操作要素としての指の機能の自由度にもとづく解析, 計測と制御, 2-4(1963), 249-257.
- (5) Salisbury, J. and Craig, J., Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues, *Int. J. Robotics Research*, 1-1(1982), 4-16.
- (6) 島地重幸・沢瀬薫, 人間形2本指機構の動作空間特性: 関節駆動トルクと指の姿勢, 機論, 56-521, C(1990), 94-98.
- (7) 島地重幸・沢瀬薫, 人間形2本指機構の動作空間特性: 指先の立体可動角とつまみ動作, 機論, 56-521, C(1990), 99-103.
- (8) 古荘純次・白井広幸・佐野明人, 障害物の影響を考慮したマニピュレータの可操作度, 日本ロボット学会誌, 6-3(1988), 184-193.