

運動可能性と目標運動達成支援性に基づく 超多自由度ロボットの器用さの評価と最適制御*

松浦大輔*¹, 岩附信行*¹, 岡田昌史*¹

Dexterity Evaluation and Optimization of Hyper Redundant Robots Based on Movability and Assistability

Daisuke MATSUURA*², Nobuyuki IWATSUKI and Masafumi OKADA

*² Department of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

This paper describes a new method to utilize redundancy of hyper redundant robots. To achieve dexterous motion of hyper redundant robot, joint inputs should be determined by taking account of i.e., the contribution of all actuators for the achievement of target motions and capability for unpredictable target motions in future is necessary. Two evaluation indices, the movability index of each link and the assistability index for target motion, are thus formulated with the angle distribution of column vectors of Jacobian matrix for each link. Then joint input to maximize or minimize these indices are derived based on an improved gradient projection method. The physical meaning of the proposed indices is also discussed by comparing with conventional manipulability measure. Motion control simulations and experiments with a planar 10R serial manipulator revealed the effectiveness of the proposed method.

Key Words: Hyper Redundant Robot, Dexterity, Movability, Assistability, Motion Control

1. 結 言

人間をはじめとする生物は体に無数の冗長自由度を有し、これを巧みに用いて未知の環境に柔軟に対応している⁽¹⁾。一方、運動空間の自由度よりはるかに多くの冗長自由度を有する超多自由度ロボットも、複数の目標運動を同時に達成可能なことから器用な動作を実現可能である⁽²⁾。これまでに冗長ロボットの運動制御に関しては、出力リンクの可操作性⁽³⁾、⁽⁴⁾や、これを機構上の複数の関節に適用した回避可操作性⁽⁵⁾、最大特異値⁽⁶⁾、目標運動達成に要する関節入力トルク⁽⁷⁾や消費エネルギー⁽⁸⁾などの評価指標を定め、それらを最大化あるいは最小化させつつ出力リンクの目標運動を達成させる最適運動制御手法が提案されている。しかしこれらの研究では適

用対象の冗長自由度が少なく、超多自由度ロボットの運動制御へ適用するには以下の課題があると考えられる。

- (1) 可操作性に基づく運動性能評価指標は、関節入力に一定の制約を設けた上で、各関節の寄与の総和としての出力リンクが発生し得る運動を評価している。超多自由度ロボットの全関節を積極的に用いて効率的に目標運動を達成しようとするれば、個々の関節の寄与度の詳細な評価が重要となる。
- (2) 非常に多くの冗長自由度を有する超多自由度ロボットにとって、いくつかの出力リンクに設定された複数の目標運動の達成は、もとより可能⁽²⁾⁽⁵⁾である。従って、出力リンクの目標運動の達成効率の最大化だけでは冗長自由度の活用には不十分であり、現在は目標運動が設定されていないリンクについても、将来与えられる目標運動も含めた運動にも留意して冗長自由度を活用すべきである。

これらの課題に対して、これまでに著者らは、超多自由度直列マニピュレータの中間リンクの障害物回避性

* 原稿受付 2007年10月25日。

*¹ 正員, 東京工業大学大学院理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

E-mail: matsura.d.aa@m.titech.ac.jp

能を評価することとし、出力リンクに主目的運動を設定しつつ、中間リンクに障害物を回避する副目的運動を与える場合に、障害物の回避方向と直交する方向にも目標運動を設定すること、ならびに障害物回避を必要としない、出力リンクから離れた中間リンクへも主目的運動を支援する目標運動を設定することにより、多くの関節を主目的運動の達成に寄与させ、主目的運動と副目的運動を同時に達成できることを示した⁹⁾。しかし各関節の主目的運動に対する寄与度を定量的に評価するには至っておらず、環境の変化に応じて将来与えられる未知の目標運動にも対応できていない。そこで本論文では、新たな冗長自由度活用戦略を確立するためのひとつの有効な手法として、まず主目的および副目的とする各目標運動達成への各関節の寄与度を考慮しつつ、未知の環境に柔軟に対応した運動を自律的に生成する能力を超多自由度ロボットの器用さと定め、これを実現するための評価指標として、「各目標運動への達成支援性 (Assistability)」と「各リンクの運動可能性 (Movability)」を各リンクの運動に関するヤコビ行列を構成する列ベクトルを用いて定式化し、これらの評価指標を最適化する関節入力を求めてロボットの運動制御を行う手法を提案する。さらに、以上の手法と従来の可操作度を用いた手法との比較から、その物理的な意味を考察し、シミュレーションと実験で有効性を示す。

2. 冗長自由度活用戦略とその評価

2.1 運動可能性ベクトル $N \gg M$ なる N 自由度 M 出力の超多自由度ロボットを考える。すべてのリンクに目標運動が与えられる可能性を考慮して、ロボットへの関節入力速度 $\dot{\theta} = [\dots \dot{\theta}_j \dots]^T$ と i 番目のリンクの出力速度 \dot{r}_i との関係は、次式で与えられる。

$$\dot{r}_i = J_i \dot{\theta} = \sum_{j=1}^N j_{i,j} \dot{\theta}_j \quad (1)$$

ここで、 J_i および $j_{i,j}$ はそれぞれ $M \times N$ のヤコビ行列とそれを構成する列ベクトルであり、両者の関係は次式で表せる。

$$J_i = [j_{i,1} \quad j_{i,2} \quad \dots \quad j_{i,N}] \quad (2)$$

式(1)より、ベクトル $j_{i,j}$ は関節 j の入力速度によってリンク i に発生可能な出力速度 \dot{r}_i を決定することがわかる。すなわち、出力速度 \dot{r}_i を達成するための関節 j の寄与はベクトル $j_{i,j}$ を用いて評価できるので、以下では $j_{i,j}$ を運動可能性ベクトルと呼び、その分布

を基に冗長自由度活用状況の評価と最適化を行う。

2.2 冗長自由度活用戦略 運動可能性ベクトルを基に、図1に模式的に示す2種類の冗長自由度活用戦略を定める。第一の戦略として、ロボットのあるリンクに目標運動が与えられたとき、全関節にその目標運動の達成を支援させる。ある目標運動の達成を全関節が最大限に支援するためには、その目標運動速度ベクトルとすべての関節の運動可能性ベクトルの方向を揃えれば良い。そこで運動可能性ベクトルと目標運動速度ベクトルの向きの一一致の度合いを、目標運動への達成支援性 (Assistability) と呼び、定量的に評価することを考える。

しかしこの戦略のみでは、既に設定された目標運動の達成しか保証できず、未知の環境への対応能力は向上させることができない。そこで第二の冗長自由度活用戦略として、将来設定され得る未知の目標運動の達成に備えさせるため、すべての運動可能性ベクトルの向きを可能な限り広範囲に、かつ均等に分布させ、対象リンクをあらゆる向きに運動可能とすることで、いかなる目標運動が与えられてもそれを実現する能力を確保する。この戦略は、対象リンクに関する運動可能性ベクトルの方向分布を、運動可能性 (Movability) として評価し、これを最大化することで実現する。以上2種類の戦略を、すべてのリンクとその目標運動に対して適用する。

2.3 目標運動への達成支援性 リンク i に設定された目標運動速度ベクトル \dot{r}_i と、そのリンクの運動可能性ベクトル $j_{i,j}$ の向きの一一致の度合いは内積により評価できる。そこで、 \dot{r}_i への達成支援性評価指標 A_i を、 \dot{r}_i とすべての運動可能性ベクトルとの内積の二乗の総和として、次式により定める。

$$A_i = \sum_{j=1}^N \|\dot{r}_i \cdot j_{i,j}\|^2 = \dot{r}_i^T J_i (J_i^T J_i)^T \quad (3)$$

A_i が大きいほど、目標運動 \dot{r}_i と全ての運動可能性ベクトルの向きが良く一致し、目標運動方向の成分を大きく

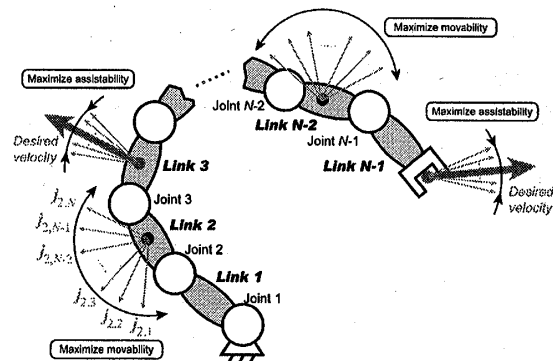


Fig.1 Strategies of redundancy utilization for hyper redundant robots

発生できることから、リンク i に設定された目標運動の達成は容易となる。

2.4 各リンクの運動可能性 各リンクの運動可能性、すなわち全関節の運動可能性ベクトルの向きがどれだけ広く分布しているかを評価する。このためには、向きが一致する、あるいは近い運動可能性ベクトルの組が少ないことを評価すればよい。そこですべての運動可能性ベクトルの組み合わせについて内積をとり、その二乗の総和をリンク i の運動可能性評価指標 Γ_i として次式により定める。

$$\begin{aligned}\Gamma_i &= \sum_{j=1, k=1}^{N, N} \|\mathbf{j}_{i,j} \cdot \mathbf{j}_{i,k}\|^2 \\ &= \frac{1}{2} \text{trace} \left[\mathbf{J}_i^T \left(\sum_{j=1}^N \mathbf{j}_{i,j} \mathbf{j}_{i,j}^T \right) \mathbf{J}_i \right] \\ &= \frac{1}{2} \text{trace} \left(\mathbf{J}_i^T \mathbf{W}_i \mathbf{J}_i \right)\end{aligned}\quad (4)$$

ここで、 \mathbf{W}_i は次式となる。

$$\mathbf{W}_i = \sum_{j=1}^N \mathbf{j}_{i,j} \mathbf{j}_{i,j}^T \quad (5)$$

Γ_i が小さいリンクほど、運動可能性ベクトルの向きが均等分布に近く、運動可能性が高いものと見なす。ベクトルの長さが微小なときも内積は小さくなるが、評価対象がヤコビ行列を構成する列ベクトルであることから、すべてのベクトルが微小となることはあり得ないため、評価の障害とはならないと考えられる。

3. 冗長自由度を活用する最適運動制御

前述の2種類の冗長自由度活用状況評価指標、 A と Γ を最適化し、冗長自由度を最大限に活用可能とする関節入力を求め、ロボットの運動制御へ適用する。

まずロボットに与える目標運動を、必ず達成すべき主目的運動 $\dot{\mathbf{r}}_m$ と可能な限り達成すべき副目的運動 $\dot{\mathbf{r}}_s$ に分け⁽¹⁰⁾、主目的運動を達成する関節入力を次式で得る。

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}_m^{\#} \dot{\mathbf{r}}_m + (\mathbf{I} - \mathbf{J}_m^{\#} \mathbf{J}_m) \dot{\boldsymbol{\theta}}_0 \quad (6)$$

ここで \mathbf{J}_m は主目的運動に対するヤコビ行列であり、各リンクの目標運動のヤコビ行列 \mathbf{J}_i を組合せて設定する。また、添え字#は擬似逆行列を表す。 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_0$ は任意ベクトル

であり、副目的運動を完全に達成させるためには、次式で与えればよい⁽⁷⁾。

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_0 = \dot{\boldsymbol{\theta}}_s = [\mathbf{J}_s (\mathbf{I} - \mathbf{J}_m^{\#} \mathbf{J}_m)]^{\#} (\dot{\mathbf{r}}_s - \mathbf{J}_s \mathbf{J}_m^{\#} \dot{\mathbf{r}}_m) \quad (7)$$

\mathbf{J}_s は副目的運動に対するヤコビ行列であり、やはり各リンクの目標運動のヤコビ行列 \mathbf{J}_i を組合せて設定する。

さらに、冗長ロボットについて目的関数を最大化あるいは最小化する最適制御を行うのに勾配射影法⁽¹¹⁾を用いる。勾配射影法では(6)式における $\dot{\boldsymbol{\theta}}_0$ を目的関数の関節入力の偏微分値で次式のように与えればよい⁽¹¹⁾。

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_0 = k \left[\dots \frac{\partial \phi}{\partial \theta_j} \dots \right]^T \quad (8)$$

ここで ϕ は目的関数、 k は定数であり、目的関数を最大化するときは正定数、最小化するときは負定数とする。

本研究では、冗長自由度活用評価指標を目的関数として関節入力を最適化する。目標運動の達成支援性を最大化するための任意ベクトル $\dot{\boldsymbol{\theta}}_0$ は、式(3)を関節角で偏微分し、正定数 k_A を乗じて次式のように求められる。

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_0 = \dot{\boldsymbol{\theta}}_{A_i} = \left[\dot{\theta}_{A_i,1} \quad \dot{\theta}_{A_i,2} \quad \dots \quad \dot{\theta}_{A_i,N} \right]^T \quad (9)$$

ここで、

$$\dot{\theta}_{A_i,j} = k_A \frac{\partial A_i}{\partial \theta_j} = k_A \dot{\mathbf{r}}_i^T \left(\frac{\partial \mathbf{J}_i}{\partial \theta_j} \right)^T \quad (10)$$

である。各リンクの運動可能性を最大化するための任意ベクトル $\dot{\boldsymbol{\theta}}_0$ も同様に、式(4)を関節角で偏微分し、正定数 k_r を乗じて、次式のように求められる。

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_0 = \dot{\boldsymbol{\theta}}_{\Gamma_i} = \left[\dot{\theta}_{\Gamma_i,1} \quad \dot{\theta}_{\Gamma_i,2} \quad \dots \quad \dot{\theta}_{\Gamma_i,N} \right]^T \quad (11)$$

ここで、

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_{\Gamma_i,j} &= -k_r \frac{\partial \Gamma_i}{\partial \theta_j} = -\frac{1}{2} k_r \text{trace} \left[\left(\frac{\partial \mathbf{J}_i^T}{\partial \theta_j} \mathbf{W}_i \mathbf{J}_i \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(\mathbf{J}_i^T \frac{\partial \mathbf{W}_i}{\partial \theta_j} \mathbf{J}_i \right) + \left(\mathbf{J}_i^T \mathbf{W}_i \frac{\partial \mathbf{J}_i}{\partial \theta_j} \right) \right]\end{aligned}\quad (12)$$

である。式(5)より \mathbf{W}_i は関節角 θ の関数であるが、数値計算の時間間隔が十分短く、 θ の変化は微小であると仮定して定数と見なす。この結果、式(12)の右辺第2項は無視でき、次式が得られる。

$$\dot{\theta}_{\Gamma_i, J_i} = -k_r \text{trace} \left(\frac{\partial J_i}{\partial \theta_j}{}^T W_i J_i \right) \quad (13)$$

以上の副目的運動の達成ならびに目標運動が指定されたリンクの達成支援性および各リンクの運動可能性の最大化を同時に行うように、式(6)における任意ベクトル $\dot{\theta}_0$ を次式で与えることにする。

$$\dot{\theta}_0 = \dot{\theta}_s + \sum_p \dot{\theta}_{Ap} + \sum_q \dot{\theta}_{Gq} \quad (14)$$

ここに p は目標運動が指定されたリンクの番号、 q は運動可能性を考慮するリンクの番号を示す。この式は副目的運動達成の項と冗長自由度活用の評価指標の関節入力偏微分項の和となっており、厳密には勾配射影法とは異なるが、冗長自由度が極めて多ければ、副目的運動の達成と冗長自由度活用のための関節入力の最適化が同時に達成できると期待できる。以上より、最終的な関節入力は次式となる。

$$\begin{aligned} \dot{\theta} = & J_m^{\#} \dot{r}_m \\ & + (I - J_m^{\#} J_m) \left[J_s (I - J_m^{\#} J_m) \right]^{\#} (\dot{r}_s - J_s J_m^{\#} \dot{r}_m) \\ & + (I - J_m^{\#} J_m) \left(\sum_p \dot{\theta}_{Ap} + \sum_q \dot{\theta}_{Gq} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

上式を関節角更新量として計算を繰り返すことにより、冗長自由度を活用するために最適な関節角が得られる。

4. 運動制御シミュレーション

4.1 達成支援性最大化 提案した手法の有効性を、各節長が等しく 0.1m の平面 10R 直列マニピュレータロボット⁽⁹⁾を対象とした運動制御シミュレーションにより検証した。なお、以降ではリンクの運動 r_i を各回転関節の並進変位とし、提案した冗長制御手法を適用する。まず、(0.4, 0.3)に障害物を配置した作業空間内に(0.4, 0.0)を始点および終点とする直径 0.4m の円軌道を設定し、ロボットの手先にこの軌道を2周追従させることを主目的運動、各リンクの障害物回避を副目的運動として目標運動を設定して運動制御を行った。なお障害物回避運動の設定に関しては、次式(16)より障害物 O_k に接近している関節 J_k が障害物から退避する速度 $a_{k,j}$ を多数のリンクと障害物に関して求め、 $\dot{r}_s = (\dots a_{k,j}{}^T \dots)^T$ とまとめて行った⁽⁹⁾。

$$a_{k,j} = \frac{k_a}{\|r_k - O_j\| + 1} \frac{1}{1 + e^{(d_{k,j} - D_0)}} \frac{r_k - O_j}{\|r_k - O_j\|} \quad (16)$$

ここで、 r_k と O_j は対象関節と障害物の位置ベクトル、 k_a は障害物と関節との反発係数、 $d_{k,j} = \|r_k - O_j\|$ は関節と障害物との距離、 D_0 は回避速度を発生させる領域のしきい値である。

式(15)中の $k_A = k_r = 0$ として、一般的な関節角速度最小化を適用した場合と、 $k_A = 1.0 \times 10^3$ 、 $k_r = 0$ として達成支援性最大化を適用した場合の結果を比較した。得られた出力軌跡を、図2に示す。上段は1周目の目標軌道達成時の出力軌跡、下段は2周目の軌跡である。図2(b)の達成支援性最大化の適用時には、同図(a)の非適用時と比べて、特に2周目において手先から静止対偶までの全関節が積極的に運動して目標運動を達成している。これにより、図3に示す達成支援性評価指標 A は非適用時に比べ10%向上し、達成支援性の最大化で手先の軌道追従が容易になったことが確認された。

4.2 運動可能性最大化 運動可能性最大化による運動可能性ベクトルの向きの分布の変化を検証するため、マニピュレータ先端の目標速度を零に固定し、 $k_r = 5.0 \times 10^4$ 、 $k_A = 0$ としてマニピュレータ先端のみの運動可能性最大化を適用して中間リンクの運動を求めた。得られた機構姿勢の変化を図4に示す。図4(a)に示す初期姿勢では、矢印で示した手先の運動可能性ベクトルの多くが同一の方向へ揃っており、多様な出力運動の実現に適していなかったが、運動可能性最大化の適用により図4(b)~(d)へと機構姿勢が変化し、運動可能性ベクトルはその方向角において、初期状態の2倍以上広い範囲にほぼ均等に分布した。この結果、手先の運動可能性評価指標 Γ は図5に示すように初期姿勢の50%に減少し、運動可能性が向上した。

4.3 運動可能性と可操作性的比較 機構の運動能力の評価に一般に用いられる可操作性⁽²⁾との比較より、運動可能性の物理的な意味を考察する。図4の場合と同様に、マニピュレータ先端の目標速度を零に固定し、 $k_r = 5.0 \times 10^4$ 、 $k_A = 0$ とし、すべてのリンクの運動可能性を最大化する場合、すなわち式(15)において $q=1 \sim N$ と設定して提案した制御を行った場合と、すべてのリンクの可操作性を最大化した場合、すなわちすべての関節の可操作度の平均値：

$$\bar{w} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\det(J_i J_i^T)} \quad (17)$$

を目的関数として、勾配射影法により制御を行い最適な姿勢を求めた。図6に、初期姿勢および得られた2種類の最適姿勢を示し、またこれらの姿勢におけるすべての関節の運動可能性評価指標の平均値 $\bar{\Gamma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Gamma_i$ 、可操作度の平均値 \bar{w} および可操作性楕円の長軸と短軸の長さの比の平均値 σ_2/σ_1 を、それぞれ初期姿勢での値を100としたパーセンテージとして表1に示す。ここで、 σ_1 および σ_2 は、各関節のヤコビ行列を次式のように特異値分解して得られる特異値行列 S の対角成分より求めた。

$$J_i = USV^T, \quad S = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

図6の矢印は各関節の可操作性楕円の長軸と短軸の向きと大きさを表している。

表1より、運動可能性の最大化は可操作性の最大化と背反するが、可操作性楕円の長軸と短軸の長さを均一化する効果があることが認められた。この傾向は、対象とするリンクをあらゆる方向へ運動可能とする運動可能性最大化の戦略をよく表している。そこで、図6で得られた機構姿勢において、新たに静止対偶を除く各関節に、副目的運動として方位角が $0 \sim 180^\circ$ の範囲で単位目標速度を設定し、手先の主目的運動の目標速度を零として手先位置を固定しつつ、ロボットがこの副目的運動を達成できるかを調べた。副目的運動を設定する関節は一度に一つとし、第2関節から第10関節まで順に切り替えてシミュレーションを繰り返した。図7に、横軸に目標速度の方位角、縦軸に J_4, J_6, J_8 において得られた出力誤差をパーセンテージでプロットしたグラフを示す。ここでの出力誤差とは、設定された目標速度と逆運動学解析により得た関節入力によりロボットを駆動した際の出力速度との差を指す。出力誤差が発生するのは、主目的により手先が固定された制約下で機構の一部が一直線状の部分的特異姿勢⁹⁾に近づくとき、その部分での副目的運動の達成が保証されなくなるためである。

運動可能性最大化により得られた図6(b)の機構姿勢では、同図(c)の可操作性最大化の場合と比較して、ほぼすべての向きの目標速度で誤差が少なくなり、あらゆる方向の目標運動を達成可能となっていることが確認できた。全関節の出力誤差の平均は、可操作性最大化適用時の56%に対し、運動可能性最大化適用時は34%となり、機構全体で任意の目標運動を達成する能力が向上していることが確かめられた。

4.4 運動可能性と達成支援性の同時最大化

これまでに、達成支援性および運動可能性の最大化により、冗長自由度を活用した目標運動の達成が容易になるこ

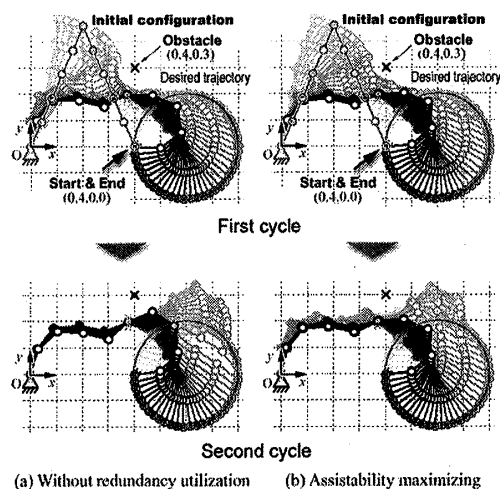


Fig.2 Trajectory tracking while obstacle avoiding

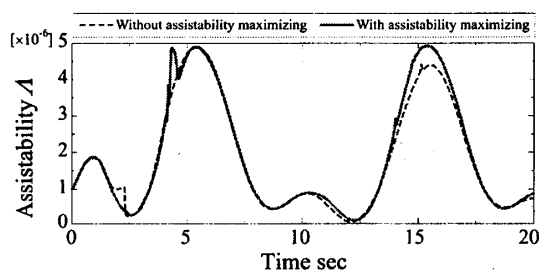


Fig.3 Improvement of assistability

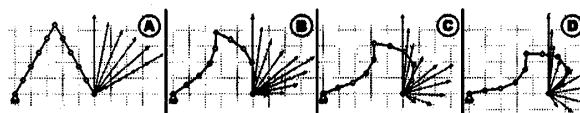


Fig.4 The obtained configuration by maximizing movability of manipulator tip

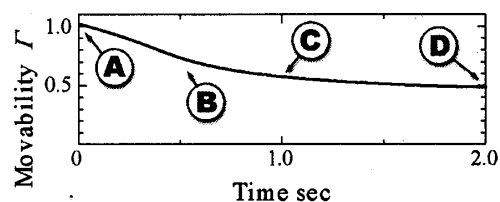


Fig.5 Improvement of movability

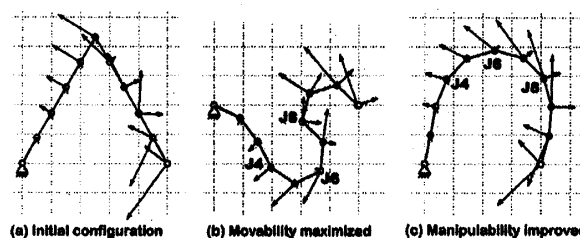


Fig.6 Comparison of the configurations by manipulability ellipsoid

とを示した。最後に、4.1節で行ったロボットの手先に円軌道を追従させる運動制御において、 $k_r=5.0 \times 10^{-5}$ および $k_d=1.0 \times 10^3$ として、手先の主目的運動だけでなく各リンクの障害物回避を含むすべての目標運動への達成支援性を最大化し、さらに全関節の運動可能性の最大化も適用した運動制御を行い、提案した手法の有効性を検証する。シミュレーションで得られた出力軌跡を図8に、また手先の主目的運動の出力誤差の分布を図9に示す。ここでの出力誤差は、目標運動が常に変化していることと機構の部分的特異姿勢への接近により発生するが、4.1節の場合よりすべての時点で低減され、次式(19)で得られる累積誤差は36%低減した。

$$AE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (19)$$

ここで、 $e(t)$ は時刻 t ($0 \leq t \leq T$) での出力誤差である。また図2(b)と図8の出力軌跡の比較より、静止対偶から障害物に最も接近した関節までは、障害物から退避する運動を最も効率良く達成する一直線状、手先付近は図6に示した運動可能性最大化適用時に近い姿勢となり、冗長自由度を最大限に活用して目標運動を達成しつつ未知の目標へ備える機構姿勢が獲得された。

5. 運動制御実験

ロボット実機を対象とした運動制御実験により、提案した手法の有効性を検証した。実験装置は、各節長が等しく0.1mの平面10Rマニピュレータで、出力22.5WのDCモータに減速比159倍の遊星減速器を取り付けたアクチュエータにより駆動する。各アクチュエータには駆動周波数40MHzのマイクロコンピュータユニットを用いたコントローラを接続し、ローカルなサーボ制御を行った。ロボットの出力軌跡は、各アクチュエータに取り付けた光学式エンコーダで得た出力角より求めた。実験では、ロボットに図10に示す障害物配置と初期姿勢および目標軌道を与え、障害物を回避させつつ目標軌道への追従を行わせた。運動可能性の最大化と目標運動の達成支援性の最大化は、すべての関節および目標運動に適用した。

得られた出力軌跡を図11、手先の累積出力誤差を図12にそれぞれ示す。冗長性活用制御を適用しなかった場合、多くの関節が一直線上に乗った初期姿勢のため冗長性を有効に活用できず、図12の破線で示した大きな出力誤差が発生した。これに対して、運動可能性と達成支援性の同時最大化を行った場

Table 1 Comparison of movability and manipulability

	Initial configuration	Movability maximized	Manipulability maximized
Movability index \bar{F}	100%	144%	63%
Manipulability \bar{w}	100%	81%	125%
σ_2/σ_1	56%	59%	48%

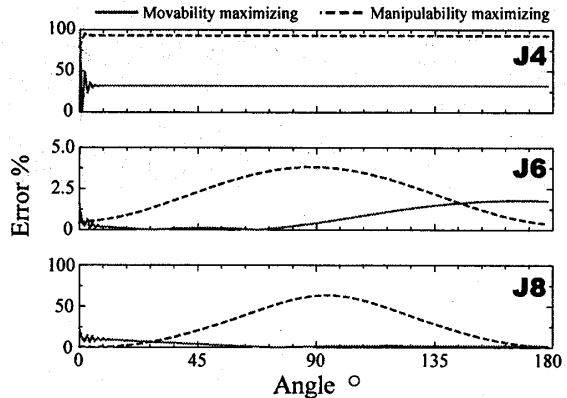


Fig.7 Distribution of output error in 180-degree sweep test

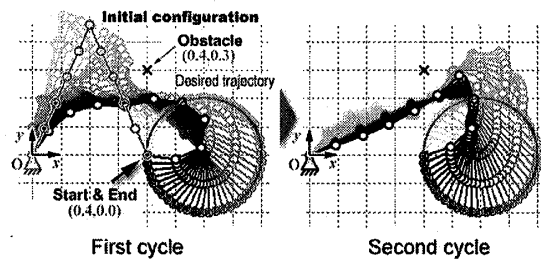


Fig.8 Trajectory tracking while movability and assistability optimizing

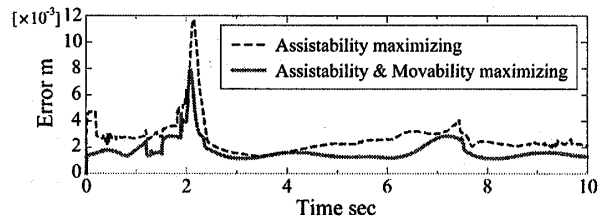


Fig.9 Improve of output error by redundancy utilization

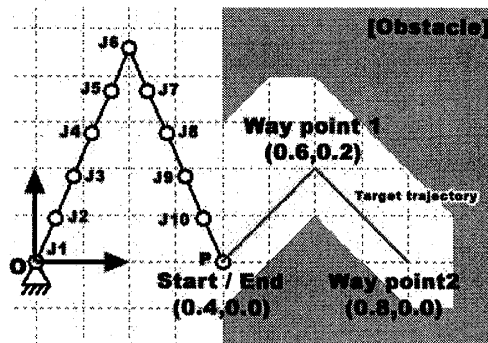


Fig.10 Given environment and the target trajectory

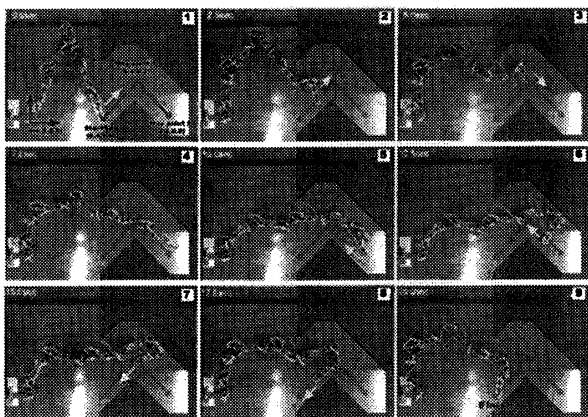


Fig.11 The obtained trajectory with redundancy optimization

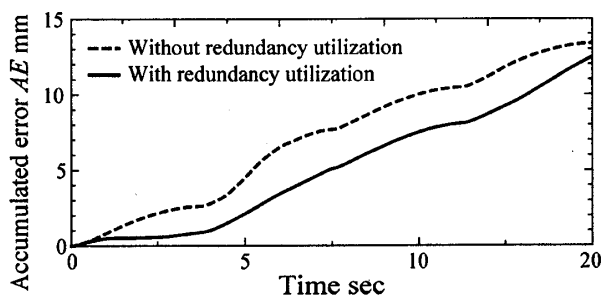


Fig.12 Improvement of output error with redundancy utilization

合には、同図の実線に示すように出力誤差が軽減され、累積誤差 AE は約 8% 減少し、目標軌道の達成効率の向上が確認された。

6. 結 論

本論文では、各関節の目標運動達成への寄与度と将来設定され得る未知の目標運動の達成を考慮した器用な運動の実現のため、達成支援性と運動可能性の最大化に基づく超多自由度ロボットの冗長性活用制御手法を提案し、シミュレーションと実機実験により有効性を示した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 冗長自由度活用状況の評価のため、運動可能性評価指標 Γ と達成支援性評価指標 Λ を、各リンクの速度に関するヤコビ行列の列ベクトルである運動可能性ベクトルと、設定された目標速度ベクトルとの向き的一致に基づき導いた。
- (2) 運動可能性と達成支援性を最大化する関節入力を、副目的達成のための成分と、各評価指標の関節入力の偏微分に係数を乗じた成分との和を主目的運動の補空間に射影することにより求め、運動制御へ適用した。

- (3) 可操作性との比較より、運動可能性の最大化は可操作性の最大化と背反するが出力可能な速度ベクトルを等方にする効果があり、対象リンクをあらゆる方向に運動可能とする運動可能性最大化の戦略と一致していることを示した。
- (4) 直列 10R マニピュレータを対象とした運動制御シミュレーションと実機実験により、超多自由度ロボットの出力誤差の減少を確認し、多数の目標運動を同時に達成する際の達成効率を改善可能であることを確認した。

文 献

- (1) N. A. Bernstein: On dexterity and its development, In M. L. Latash and M. T. Turvey, editors, *Dexterity and its Development*. Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, (1996), pp.3-44.
- (2) N. Iwatsuki, I. Hayashi and T. Ohta: Optimum Motion Control of a Redundant Robot with the Objective Function of Dexterity, *Trans. of the JSME, Ser. C*, 60-574, (1994), pp.2064-2070 (in Japanese).
- (3) T. Yoshikawa: Manipulability of Robotic Mechanisms, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.4, No.2, (1985), pp.3-9.
- (4) C. A. Klein and B. E. Blano: Dexterity Measures for the Design and Control of Kinematically Redundant Manipulators, *Int. J. of Robotics Res.*, (1987), pp.72-83.
- (5) M. Minami, Y. Naitoh and T. Asakura: Avoidance Manipulability for Redundant Manipulators, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.17, No.6, (1999), pp.887-895 (in Japanese).
- (6) R. V. Mayorga, B. Ressa, A. K. C. Wong: A Dexterity Measure for Robot Manipulators, *Proc. of 90 IEEE Int. Conference*, (1990), pp. 656-661.
- (7) S. Ma: Local Torque Minimization of Redundant Manipulators with Considering End-Motion Joint Velocities, *Proc. 1996 IEEE Int. Conf. on Systems, Man., and Cybernetics (SMC'96)*, (1996), pp.1477-1482.
- (8) A. S. Deo and I. D. Walker. Minimum Effort Inverse Kinematics for Redundant Manipulators. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 13, No.5, (1997), pp.767-775.
- (9) D. Matsuura and N. Iwatsuki: Motion Control of Hyper Redundant Robots with Learning Control Based on Linear Combination of Error History and Acquisition of Initial Configuration with Backward Learning, *Trans. of JSME, Ser.C*, 73-732, (2007), pp.2305-2311 (in Japanese).
- (10) Y. Nakamura, H. Hanafusa and T. Yoshikawa: Task-Priority Based Redundancy Control Robot Manipulators, *The Int. Journal of Robotics Research*, Vol.6, No.2, (1987), pp.3-15.
- (11) A. Liegeois: Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms, *IEEE Trans. Syst., Man., Cybernetics*, Vol. SMC-7, (1977), pp.868-871.