

冗長マニピュレータの手先軌道追従 / 回避制御時の 形状変更能力の大域性評価

Global Reconfiguration Capability Evaluation for Redundant Manipulator Tracking Target Trajectory and Avoiding Obstacle Control

小林 洋祐 (岡山大) 正 見浪 護 (岡山大)
正 矢納 陽 (岡山大)

Yosuke KOBAYASHI, Okayama University, kobayashi2@suri.sys.okayama-u.ac.jp
Mamoru MINAMI, Okayama University
Akira YANOU, Okayama University

This paper shows global reconfiguration capability evaluation for redundant manipulator tracking target trajectory and avoiding obstacle control. In this research, one approach for an automation system composed of redundant manipulator and movable camera on-line being able to operate for unknown objects without any preparations is proposed. In a such system, the configuration of the robot should always be prepared to keep the highest avoidance manipulability to evade the object quickly that may appears suddenly in the moving camera view. We evaluated configurations of manipulator by using the index representing Avoidance Manipulability Ellipsoid Shape Index with Potential (AMSIP).

Key Words: Redundant manipulator , Obstacle avoidance , Collision avoidance

1. 緒 言

本研究で考えるシステムは、未知の作業対象物をカメラにより認識し、逐次明らかになる作業対象物の形状からハンドの目標軌道を決定し作業を行う。作業対象物自身が障害物となるような複雑な形状に対して作業する場合においても、迅速な回避行動が行えるようにマニピュレータの回避能力を常に高く維持する必要がある。そこで本報ではポテンシャルを考慮した回避可操作形状値 (AMSIP) を用いてマニピュレータの形状変更能力を評価した。

2. 冗長マニピュレータ

ある作業を行うために最低限必要な自由度以上の自由度を持つマニピュレータを冗長マニピュレータという。3次元空間内で位置と姿勢を決定するために最低限6自由度必要であるが、例えば人間の腕は7自由度を持っており冗長自由度を1つ有することになる。この冗長性により、手先が固定された状態でも腕全体がさまざまな形状をとることができる。このように、冗長性を持つマニピュレータを用いることで、入り組んだ場所での作業や作業対象物自体が障害物になってしまうような複雑な形状に対しても作業を行えると言える。

3. マニピュレータ形状評価指標

3.1 リンク可操作性楕円体

リンク可操作性楕円体は、マニピュレータのハンドにタスクが与えられていない場合、あるリンクの先端がどの方向にどれだけ速度を出せるのかを表すものである。

n リンクマニピュレータを考え、第 i リンク先端の位置・姿勢を表すベクトルを $r_i \in R^m (i = 1, 2, \dots, n; m$ は作業空間の次元; $m < n)$ とする。 r_i は $i > m$ の時、 m 次元空間内の任意なベクトルとなり得る。関節角度を表すベクトルを $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \in R^n$ とする。 \dot{r}_i は \dot{q} の関数として次式で表される。

$$\dot{r}_i = J_i(q)\dot{q} \quad (1)$$

ただし $J_i(q) \in R^{m \times n}$ は、 r_i の q に関するヤコビ行列である。

式 (1) の一般解は以下の様に求まる。

$$\dot{q} = J_i^+ \dot{r}_i + (I_n - J_i^+ J_i)k \quad (2)$$

ただし、 J_i^+ は J_i の疑似逆行列であり、 I_n は $n \times n$ の単位行列、そして k は $k \in R^n$ を満たす任意ベクトルである。

ここで、ユークリッドノルム $\|\dot{q}\| = \sqrt{\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dots + \dot{q}_n^2}$ を考える。式 (2) より、以下の式を得る。

$$\begin{aligned} \|\dot{q}\|^2 &= r_i^T (J_i^+)^T J_i^+ r_i + \|(I - J_i^+ J_i)k\|^2 \\ &\geq r_i^T (J_i^+)^T J_i^+ r_i \end{aligned} \quad (3)$$

ここで $\|\dot{q}\| \leq 1$ と制約をすると、式 (3) は以下の様に求まる。

$$\dot{r}_i^T (J_i^+)^T J_i^+ \dot{r}_i \leq 1, \quad \text{and} \quad \dot{r}_i \in R(J_i) \quad (4)$$

ユークリッドノルム $\|\dot{q}\|$ が $\|\dot{q}\| \leq 1$ を満足するような関節角速度 \dot{q} を用いて実現し得る各リンクの先端速度 \dot{r}_i の全てからなる集合を考えると、それは式 (4) で表され、 $J_i(q)$ の値域空間の次元を持つユークリッド空間内の楕円体となる。ここでは可操作性楕円体^[1]を図.1に示す通り全リンクに定義し、それをリンク可操作性楕円体と呼び式 (4) によって定義する。

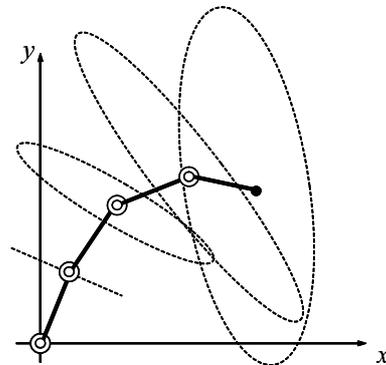


Fig. 1 Manipulability ellipsoids

3.2 回避可操作性楕円体

マニピュレータのハンドにタスクが与えられた場合を考える。その場合のリンク可操作性楕円体のことを回避可操作性楕円体と呼ぶ。回避可操作性楕円体は、完全回避可操作性楕円体と部分回避可操作性楕円体に分けることができる。

ハンドの目標軌道 r_{nd} とハンド目標速度 \dot{r}_{nd} がハンドタスクとして与えられる場合、 \dot{r}_{nd} を実現するための \dot{q} は式 (1) より次式の様に来る。

$$\dot{q} = J_n^+ \dot{r}_{nd} + (I_n - J_n^+ J_n) {}^1l \quad (5)$$

ここで 1l は ${}^1l \in R^n$ の任意ベクトルである。

以下では障害物回避のための第 i リンク ($1 \leq i \leq n-1$)、すなわち中間リンクの回避可操作性について考える。目標軌道追従の次に優先する回避タスクを、第一回避サブタスクと呼び、左肩添え字の“1”で表す。冗長自由度が多い場合には、複数のサブタスクを実行できる可能性がある。第一回避サブタスクが第 i リンクに与えられる場合、その回避要求速度を ${}^1\dot{r}_{id}$ で表す。式 (1) と式 (5) より次式を得る。

$${}^1\dot{r}_{id} = J_i J_n^+ \dot{r}_{nd} + J_i (I_n - J_n^+ J_n) {}^1l \quad (6)$$

ここで、

$${}^1\dot{r}_{id} - J_i J_n^+ \dot{r}_{nd} \triangleq \Delta^1 \dot{r}_{id} \quad (7)$$

$$J_i (I_n - J_n^+ J_n) \triangleq {}^1M_i \quad (8)$$

と定義すると、式 (6) は次式の様に表示る。

$$\Delta^1 \dot{r}_{id} = {}^1M_i {}^1l \quad (9)$$

1M_i は ${}^1M_i \in R^{m \times n}$ を満たす。式 (7) の関係を図.2 に示す。 \dot{r}_{nd} により第 i リンクに発生する速度 $J_i J_n^+ \dot{r}_{nd}$ に対して第一回避要求速度 ${}^1\dot{r}_{id}$ を実現するには、 $\Delta^1 \dot{r}_{id}$ を $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_i$ により発生させる必要がある。

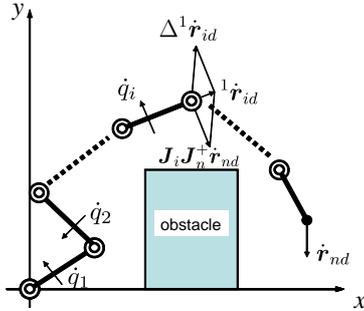


Fig. 2 Obstacle avoidance of intermediate links

1M_i は 1l の射影行列である。 \dot{r}_{nd} が与えられるとき、 $\Delta^1 \dot{r}_{id}$ を通して $\forall \Delta^1 \dot{r}_{id} \in R^m$ を実現できるかどうかは、 1M_i に依存しており、 1M_i により $\forall \Delta^1 \dot{r}_{id}$ の実現の可能性が判定できる。この意味で 1M_i を第 i リンクの第一回避行列と呼ぶ。

式 (9) より $\Delta^1 \dot{r}_{id}$ を実現する 1l を求めると次式となる。

$${}^1l = {}^1M_i^+ \Delta^1 \dot{r}_{id} + (I_n - {}^1M_i^+ {}^1M_i) {}^2l \quad (10)$$

2l は 1l と同様に ${}^2l \in R^n$ を満たす任意ベクトルである。式 (10) より次式が得られる。

$$\begin{aligned} \|{}^1l\|^2 &= \Delta^1 \dot{r}_{id}^T {}^1M_i^+ T^1 M_i^+ \Delta^1 \dot{r}_{id} + \|(I_n - {}^1M_i^+ {}^1M_i) {}^2l\|^2 \\ &\geq \Delta^1 \dot{r}_{id}^T {}^1M_i^+ T^1 M_i^+ \Delta^1 \dot{r}_{id} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで新たな入力 1l が $\|{}^1l\| \leq 1$ なる制約のもとに、 $\Delta^1 \dot{r}_{id}$ が動ける範囲は次式で表される。

$$\Delta^1 \dot{r}_{id}^T ({}^1M_i^+)^T {}^1M_i^+ \Delta^1 \dot{r}_{id} \leq 1 \quad (12)$$

$\forall \Delta^1 \dot{r}_{id} \in R^m$ が第一回避行列 1M_i の張る空間内のベクトル

$$\Delta^1 \dot{r}_{id} \in R({}^1M_i) \quad (13)$$

であることは、式 (9) が常に解 1l をもつことである。またその必要十分条件は

$$\Delta^1 \dot{r}_{id} = {}^1M_i {}^1M_i^+ \Delta^1 \dot{r}_{id} \quad (14)$$

が成り立つことである。このとき式 (12) によって表される m 次元の楕円体を第一完全回避可操作性楕円体と呼ぶ。

一方、 $\forall \Delta^1 \dot{r}_{id} \in R^m$ に対し式 (13) が満たされない場合、つまり $rank({}^1M_i) < m$ となる場合に対して以下に考察する。このとき $\Delta^1 \dot{r}_{id}$ の $R({}^1M_i)$ への直交射影 $\Delta^1 \dot{r}_{id}^*$ は、

$$\Delta^1 \dot{r}_{id}^* = {}^1M_i {}^1M_i^+ \Delta^1 \dot{r}_{id} \quad (15)$$

と与えられ、 $\Delta^1 \dot{r}_{id}^*$ は $\Delta^1 \dot{r}_{id}^* \in R({}^1M_i)$ を満たすので

$$\Delta^1 \dot{r}_{id}^* = {}^1M_i {}^1l \quad (16)$$

を満足する解 1l は存在する。 ${}^1M_i^+ = {}^1M_i^+ {}^1M_i {}^1M_i^+$ を式 (12) に代入すると次式を得る。

$$({}^1M_i^+ {}^1M_i {}^1M_i^+ \Delta^1 \dot{r}_{id})^T {}^1M_i^+ {}^1M_i {}^1M_i^+ \Delta^1 \dot{r}_{id} \leq 1 \quad (17)$$

式 (17) に式 (15) を代入すると次式を得る。

$$(\Delta^1 \dot{r}_{id}^*)^T ({}^1M_i^+)^T {}^1M_i^+ \Delta^1 \dot{r}_{id}^* \leq 1 \quad (18)$$

このとき、式 (18) で定義される m 次元未満の 1M_i の値域空間内に存在する楕円体を第一部分回避可操作性楕円体と呼ぶ。

回避可操作性楕円体を調べることによりマニピュレータの各リンクの回避能力を知ることができるようになる。しかし、軌道追従、障害物回避を行う際には、マニピュレータ全体の回避能力を高く保ちながら作業を行うことが必要となる。

3.3 回避可操作形状値 (AMSI)

マニピュレータ全体の回避可操作性を評価する指標を提案する。第 i リンク ($i = 1, 2, \dots, n$) の回避可操作性楕円体の体積 1V_i は以下の様に表わされる。

$${}^1V_i = c_m \cdot {}^1w_i \quad (19)$$

ただし、 m は作業空間の次元を表している。 c_m と 1w_i は以下のように定義する。

$$c_m = \begin{cases} 2(2\pi)^{(m-1)/2} / [1 \cdot 3 \cdots (m-2)m] & (m: \text{奇数}) \\ (2\pi)^{m/2} / [2 \cdot 4 \cdots (m-2)m] & (m: \text{偶数}) \end{cases} \quad (20)$$

$${}^1w_i = {}^1\sigma_{i1} {}^1\sigma_{i2} \cdots {}^1\sigma_{im} \quad (21)$$

式 (21) における ${}^1\sigma_{i1}, {}^1\sigma_{i2}, \dots, {}^1\sigma_{im}$ は式 (8) で定義される回避行列 1M_i の特異値である。

ここで、図.3 に 4 リンク水平多関節マニピュレータの例を示す。この場合、第 2 リンクの先端に出来る完全回避可操作性楕円体は楕円となり、第 1 リンク及び第 3 リンク先端に出来る部分回避可操作性楕円体は直線となる^[1]。第 1 リンクと第 $(n-1)$ リンクの回避可操作性楕円体は直線となり、面積は 0 となるが、障害物回避という点でこれらの直線の長さも回避能力の一部とする。この 1V_i の値の総和が最大となるマニピュレータの形状を求めれば、回避可操作性の良好なマニピュレータ形状が決定

できる．

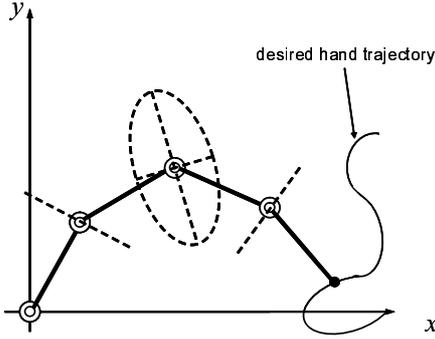


Fig. 3 Avoidance manipulability ellipsoids

以上のことから，マニピュレータ全体の回避可操作性の優劣を決めるため，回避可操作形状値 1E を次の様に定義し，これを AMSI (Avoidance Manipulability Shape Index) と呼ぶことにする．

$${}^1E = \sum_{i=1}^{n-1} a_i {}^1V_i \quad (22)$$

ただし，係数 a_i は次元の異なる 1V_i の次元を一致させる役割を担う．

第 i リンクの回避可操作性楕円体の面積 1V_i は，長軸と短軸の長さが等しい時に最大となり，楕円体が細長くなる場合は，面積 1V_i が減少するので特定の方向に回避しやすく，他の方向に回避しにくいことを示し，その総和である AMSI も低下する．また，マニピュレータのハンドが目標位置に届かない場合は

$${}^1E = 0 \quad (23)$$

とする．この 1E により，ハンドの軌道追従タスクを満たすマニピュレータの回避能力をスカラーとして判断できる．

3.4 ポテンシャル空間

優れた回避可操作性を有するマニピュレータ形状でも作業対象物との距離が近ければ衝突する危険性が高くなる．そこで，作業対象物の周りにポテンシャル空間を設定し，作業対象物とマニピュレータの接近度を考慮する．

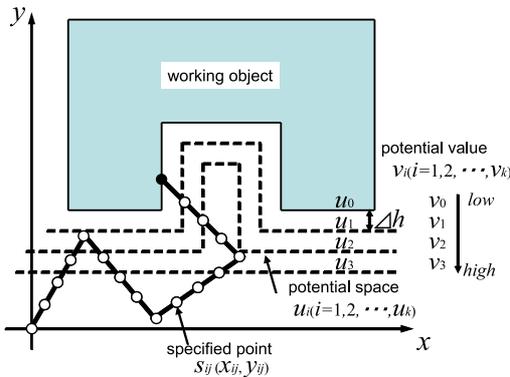


Fig. 4 Camera detects shape of unknown object

凹型の作業対象物の周りに形成されたポテンシャル空間を図.4 に示す．ポテンシャル空間は Δh 間隔で形成され，各ポテンシャル空間 u_k ($k = 0, 1, 2, \dots, l$) における衝突の危険性をスカラー

で表すために，作業対象物から離れるごとにポテンシャル値が高くなるよう $v_0 < v_1 < v_2 < \dots < v_l < 0$ と設定する．作業対象物近くのポテンシャル値を負の大きな値に設定することで，衝突の危険性を表現する．更にマニピュレータの i リンク上に m 個の特徴点を配置し，特徴点の作業空間内における座標を $s_{ij}(x_{ij}, y_{ij})$ [$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$] とする．本節で用いる m は作業空間の次元数ではないことに注意して頂きたい．特徴点 s_{ij} の評価値 $a(s_{ij})$ を以下の様に与える．

$$\begin{cases} a(s_{ij}) = v_k & (\text{if } s_{ij} \in u_k) \\ a(s_{ij}) = 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (24)$$

よって，総ポテンシャル値 U は，

$$U = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a(s_{ij}) \quad (25)$$

で得られ， U が小さいほどマニピュレータは対象物に接近し，大きいほど離れていることを示す．

3.5 ポテンシャルを考慮した回避可操作形状値 (AMSIP)

AMSI を用いることでマニピュレータの回避可操作性を評価することができ，ポテンシャル空間を用いることでマニピュレータと作業対象物との接近度を評価することができた．しかし，回避可操作性とポテンシャルは相反するトレードオフの関係にある．

そこで，ポテンシャルを考慮した回避能力の評価指標を AMSIP (Avoidance Manipulability Shape Index with Potential) と呼び以下の様に定義する．

$${}^1S = k_e {}^1E + k_u U \quad (26)$$

ここで k_e, k_u は重み付けを行う係数であるとともに，無次元の AMSI と次元が存在するポテンシャルという次元の違う値の和をとるため，次元を一致させる役割も担う．また，AMSI, 1E の左肩に添え字 1 が付いている理由は，第 1 サブタスクとして冗長自由度を評価していることによる． 1S も同様である．

4. シミュレーション

本節では冗長マニピュレータの手先軌道追従と回避動作の同時制御を行う上での，マニピュレータの回避能力を考察する．形状評価指標には AMSIP を用いる．冗長マニピュレータは三菱重工業株式会社製の汎用ロボット PA10 をモデル化したものであり，モデル化した PA10 を図.5 に示し，作業対象物と PA10 の位置関係と目標軌道を図.6 に示す．時刻 $t = 0[s]$ で r_1 ， $t = 16[s]$ で r_2 の手先目標位置・姿勢の 5 変数を指定したときの冗長自由度を第 1 リンクと第 2 リンクの関節角度 q_1, q_2 に与え，任意の q_1, q_2 対する S のグラフ (AMSIP 分布) を示す．そのとき実現可能な関節角度を AMSIP 分布の黒色以外の部分で示し，任意の q_1, q_2 をマニピュレータに与えた場合マニピュレータはどのような形状になるか調べる．

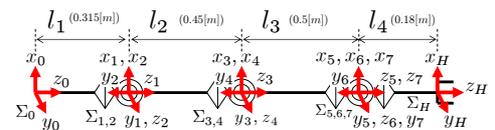


Fig. 5 Coordinate system of PA10

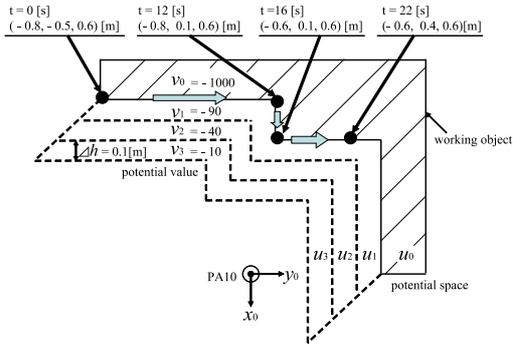


Fig. 6 Top view of working object and potential space

4.1 シミュレーション 1

目標軌道上 $t = 0[s]$ での手先目標位置・姿勢を

$$r_1 = \begin{bmatrix} -0.8[m] \\ -0.5[m] \\ 0.6[m] \\ 0.0 \\ -\frac{\pi}{2} \\ free \end{bmatrix} \quad (27)$$

と設定する．シミュレーション 1 において得られる AMSIP 分布を図.7 に示す．ここで，左下の円を A，右上の円を B とし，円上の各点に番号を付け，各点でのマニピュレータ形状を図.8 に示す．Fig.8 を番号順に見ると A，B とともに同形状で座標系 $\Sigma_{3,4}$ が円を描くような動きをしている．また，AMSIP 分布の 2 つの円はそれぞれ独立しているため，設定した目標位置・姿勢を実現した状態で，お互いそれぞれの円へマニピュレータ形状を変更できない．このような分布を局所的形状変更可能分布と呼ぶことにする．

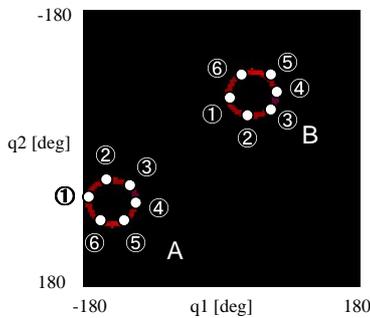


Fig. 7 AMSIP Distribution (r_1)

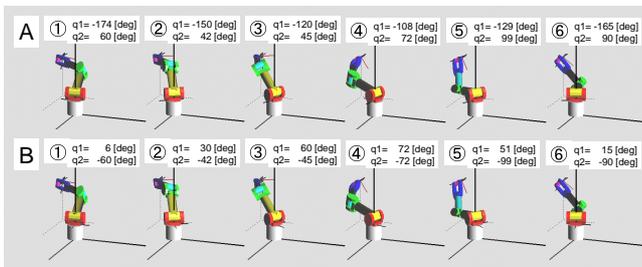


Fig. 8 Shape of Manipulator (r_1)

4.2 シミュレーション 2

目標軌道上 $t = 16[s]$ での手先目標位置・姿勢を

$$r_2 = \begin{bmatrix} -0.8[m] \\ 0.1[m] \\ 0.6[m] \\ -\frac{\pi}{4} \\ \frac{\pi}{2} \\ free \end{bmatrix} \quad (28)$$

と設定した．得られる AMSIP 分布の外観は Fig.9 に示すようになる．シミュレーション 1 の場合は，独立した A，B の円が現れたが，シミュレーション 2 の場合にはそれらが 1 つに繋がったような形状 C が現れた．このことから設定した目標位置・姿勢によって得られる AMSIP 分布も変化することが分かる．また分布形状が C のように 1 つに繋がることから，設定した目標位置・姿勢を実現した状態で，分布に現れる形状全域の q_1, q_2 をとるようなマニピュレータ形状に変更できると考えられる．このような分布を大域的形状変更可能分布と呼ぶことにする．

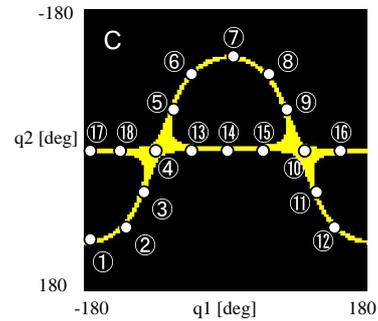


Fig. 9 AMSIP Distribution (r_2)

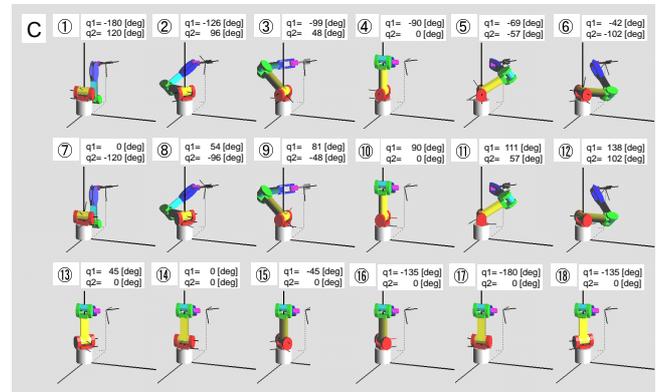


Fig. 10 Shape of Manipulator (r_2)

5. 結 言

AMSIP 分布を用いることで，マニピュレータが目標位置・姿勢を実現した状態で，局所的または大域的な形状変更することができることが分かった．制御を行う上で大域的な形状変更可能分布であるときに形状変更することで作業が実行不能であるような状況を回避することができると考えられる．

文 献

- [1] 吉川 恒夫：“ロボット制御基礎論”，(1988)，コロナ社
- [2] 吉川恒夫，“冗長性を有するロボットの制御”，日本ロボット学会誌，Vol.2, No.2, pp.587-592 (1984)
- [3] 見浪護，内藤康弘，朝倉俊行，“冗長マニピュレータの回避可操作性”，日本ロボット学会誌，Vol.17, No.6, pp.887-895, 1999.
- [4] Leon Zlajpah, Bojan Nemeč, “Kinematic Control Algorithms for On-line Obstacle Avoidance for Redundant Manipulator”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2002, pp.1898-1903.