

手先姿勢誤差の修正量に基づく移動マニピュレータの姿勢評価

山崎 公俊 (筑波大) 友納 正裕 (東洋大) 坪内 孝司 (筑波大) 油田 信一 (筑波大)

Posture Evaluation for a Mobile Manipulator based on Error Recovery

*Kimitoshi Yamazaki (Univ. of Tsukuba), Masahiro Tomono (Toyo Univ.),
Takashi Tsubouchi and Shin'ichi Yuta (Univ. of Tsukuba)

Abstract— In this paper a posture evaluation method for a mobile manipulator is proposed. As a task, grasp a small object on a table is set. The objective of this paper is to present an evaluation method which ensures secure grasp. Our evaluation method is based on manipulator's joint motions which are needed for error recovery of end-effector. The error is mainly caused by mobile base motions. The performance of the proposed method is illustrated by experiments.

Key Words: Mobile Manipulator, Posture Evaluation, Position Error

1. はじめに

本稿は、移動マニピュレータで物体把持を行うとき、その動作の安全度を評価する方法について述べる。ここでの移動マニピュレータは、移動台車にひとつのマニピュレータを搭載したシステムであり、以下では、これを「ロボット」と呼ぶ。また、このロボットを構成する「台車」と「マニピュレータ」を明示的に区別する。

筆者らは、実環境で動作し、物体の運搬作業を行うロボットに興味がある。従来、このような問題設定の研究では、実環境での物体操作の実現や、物体側に情報を持たせることの有用性評価に重きが置かれていた¹⁾²⁾³⁾。そのため、物体の操作方法はあらかじめ与えられることが多く、その物体に対するロボットの操作姿勢をどうとれば良いかについては、あまり議論されてこなかった。

本研究の目的は、物体の把持動作を行う前に、動作の安全度を評価することである。本手法の安全度は、「計画時に得たロボットの姿勢をほぼ変えずに、実際の把持動作を実行できる」ことを保証する尺度とする。この理由は、移動ロボットでの作業には様々な要因で手先姿勢に誤差が入りうるため、計画通りの動作で実際の作業を遂行できるとは限らないためである。そこで、誤差が入りにくく、もし入った場合にそれを修正しやすいロボット姿勢の判別方法を提案する。

従来、マニピュレータの操作性を表す指標として可操作度⁷⁾が提案されている。また、これを移動マニピュレータに応用した台車の作業場所計画が提案されている⁴⁾⁵⁾。これらで設定されていたタスクは手先の軌跡追従であったが、台車の移動が含まれるのにもかかわらず、それに伴うロボットの姿勢誤差については深く議論されていなかった。一方で、本研究では、台車移動などを要因とする誤差が手先姿勢に与える影響を考慮する。具体的には、誤差のない理想的な手先姿勢から、実際に入りうる誤差を見積もった手先姿勢へマニピュレータを動かそうとしたときに、各関節角の動作量が少なければ良いとする。アプローチは以下のようである。まず、誤差を確率分布としてモデル化し、手先が目標姿勢へ到達できる確率を定義する。これにモンテカルロ法を適用し、誤差修正に必要なマニピュレータの動作量を見積もる。この利点は、誤差を相殺するためのマニピュレータの関節動作量が定量的に予測されることである。すなわち、各関節の可動範囲などを容

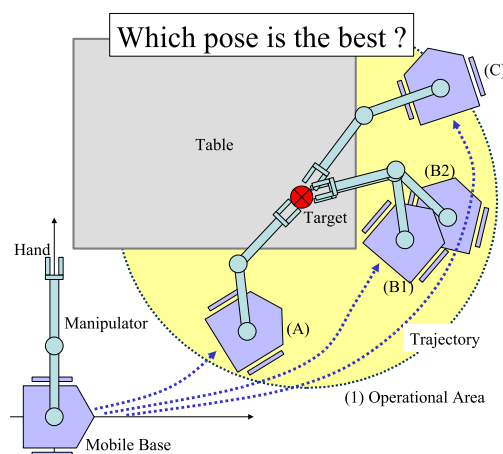


Fig.1 Problem Definition

易に考慮できる。

以下では、2章で本研究の問題設定とアプローチについて述べる。3章では、ロボットの姿勢評価手法について述べ、4章で実験結果を示す。5章はまとめである。

2. 問題設定とアプローチ

2.1 想定タスクと目的

机上に置いてある一つの小型物体を、二次元平面を動くロボットで把持する動作を考える (Fig.1)。机の配置などの情報は人手で与える。簡単のため、物体はどの方向からでも掴めるとする。台車は、二輪駆動方式のノンホロノミックな機構とする。なお、本稿では、位置と方位を合わせて姿勢と呼ぶ。

想定する動作の流れは、以下のようである。

1. ロボットは周囲の環境を観測しながら移動し、事前に持っているモデルを元に把持対象物を発見する。
2. ロボットが取りうる把持姿勢、すなわち台車の位置とマニピュレータの姿勢 (例: Fig.1(A)~(C)) を探索し、姿勢評価を行う。評価が良いロボット姿勢をひとつ選ぶ。
3. 選んだ姿勢を取れる位置まで台車を移動する。その後物体をもう一度観測し、ずれがあった場合は、新しい姿勢を再計算する。

4. 把持を行う

2. の評価が良いロボット姿勢を採用すれば、3. の再計算した姿勢は計画時とほぼ変わらないはずである。本稿では、2. の姿勢評価について述べる。

2.2 課題

ロボットで物体把持を行うときの問題点は、手先の姿勢誤差である。この要因は、台車の姿勢誤差である。一般に、移動台車の姿勢はオドメトリを利用して推定できるが、ここには初期位置のずれやスリップなどの要因で誤差が含まれる。すなわち、課題は、この誤差の影響をなるべく受けないロボット姿勢を探すことである。

一方で、別の問題として、ロボットの冗長自由度がある。本研究では、台車とマニピュレータが持つ自由度の合計が、物体操作に必要な自由度より多いとする。この理由は、ロボットが取りうる姿勢を増やし、かつ手先の操作性を高めるためである。Fig.1は、その例である。(A)~(C)は全てロボット姿勢の候補であり、Fig.1(B1),(B2)に示すように、同じ手先姿勢を示す台車の立ち位置も複数存在する。すなわち、多くの姿勢候補に対してどのように評価を行うかが課題である。

2.3 アプローチ

本手法では、手先の姿勢誤差が小さく、さらにその誤差に対して手先の操作性が高く保てるロボット姿勢を探す。ここでの「操作性が高い」とは、マニピュレータが現在の姿勢から別の姿勢に変位する場合に、各関節角のより少ない動きで目標姿勢に到達できることと定義する。手先の姿勢誤差の要因としては、前述した台車の姿勢誤差に加えて、把持対象物の位置決め誤差を考慮する。物体の位置決めは、ロボットに搭載した外界センサにより自動で行うためである。

本研究では、ロボットが取りうる様々な姿勢を評価しながら、安定した把持が可能なロボット姿勢を見つけたい。そこで、以下のようなアプローチをとる。まず、マニピュレータの手先が物体に届く範囲内で、台車が存在できる領域 (Fig.1(1)) を細かなグリッドに区切る。グリッドの中心を台車位置とし、最も操作性が高くなるマニピュレータの姿勢を、各グリッドごとに求める。すなわち、台車の移動に依存する自由度については、姿勢空間を離散的に区切り、マニピュレータに依存する自由度については、最適化処理を行う。

3. 移動マニピュレータの姿勢評価

台車の目標姿勢がひとつ与えられたとき、ロボットの姿勢を評価する手法を述べる。本稿では、把持を行うときの台車の方角は、常に同じとする。本章で利用する変数の定義は、以下のようである。

- x_h : 台車を基準とした座標系での手先姿勢
- x_b : 台車を基準とした座標系での物体姿勢
- x_H : 世界座標系での手先姿勢
- x_B : 世界座標系での物体姿勢
- x_G : 世界座標系での台車姿勢

まず、台車の目標姿勢 \hat{x}_G と、物体の目標姿勢 \hat{x}_B を与える。ここから手先の目標姿勢 \hat{x}_h を決め、 \hat{x}_h を得る。

3.1 概要

姿勢の評価は、マニピュレータの関節変数を軸とした空間で行う。以後、この空間を関節空間と呼び、ロボットが実際に作業を行う空間を作業空間と呼ぶ。姿

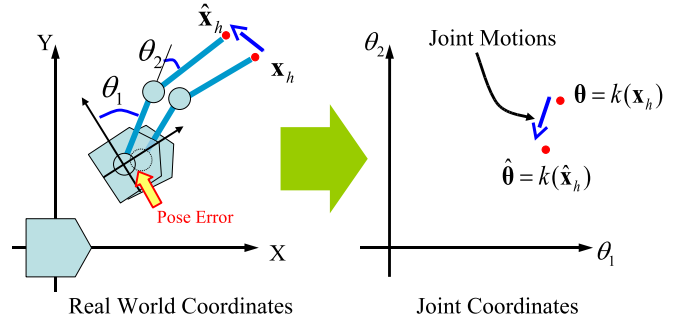


Fig.2 Pose Error

勢の評価式を、以下のように定義する。評価値 C が小さいほど、良い姿勢である。

$$C = \int |k(x_h) - k(\hat{x}_h)| P(x_h) dx_h \quad (1)$$

x_h は、台車を基準とした座標系での手先姿勢であり、 \hat{x}_h は動作計画で決めた手先の目標姿勢である。 $k(x)$ は、手先姿勢 x に対してマニピュレータの逆キネマティクスをとくとき、各関節角 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ を求める関数である。 $P(x_h)$ は、手先姿勢の確率分布である。

式(1)の意味を、平面を動く二自由度マニピュレータの例 (Fig.2) で説明する。誤差がない理想的な状況では、マニピュレータの手先は \hat{x}_h で物体を把持できるが、実際には誤差が入る。そのため、計画通りにマニピュレータを動かしても、Fig.2の x_h のように、目標とずれた姿勢になりうる。本手法の指標では、 \hat{x}_h と x_h の間の姿勢変化で、マニピュレータの各関節の動作量が少なければ良いとする。これは、マニピュレータの関節空間では、Fig.2右に示す $\hat{\theta}$ と θ の間の距離が、小さくなることと等しい。式(1)は、手先姿勢の誤差を確率分布で表現し、その誤差を修正するのに必要な、各関節角の動作量の期待値を求めるものである。

3.2 手先の姿勢誤差

本節では、 x_G と x_B から、 $P(x_h)$ を得る方法を述べる。

3.2.1 オドメトリの誤差分布

世界座標系での台車姿勢 $x_G = (x_G, y_G, \theta_G)^T$ の確率分布 $P(x_G)$ は、オドメトリによる自己位置推定の不確かさを線形近似し、正規分布で表現する。

$$P(x_G) = N(\hat{x}_G, \Sigma_G) \quad (2)$$

\hat{x}_G は x_G の推定値、 Σ_G は x_G の誤差分散行列である。 Σ_G は、ロボットが時刻 t_0 に走り出してから、台車の目標位置に到達するまでの時刻 t_G の間で推定した誤差分散行列である。これを、 $\Sigma_G = \Sigma_p(t_G)$ と表すと、 $\Sigma_p(t_G)$ はサンプリング時間間隔を τ 秒として以下の更新式から得られる⁶⁾。

$$\Sigma_p(t + \tau) = \mathbf{K}_1(t) \Sigma_p(t) \mathbf{K}_1(t)^T + \mathbf{K}_2(t) \Sigma_v(t) \mathbf{K}_2(t)^T + \Delta \mathbf{p} \quad (3)$$

$\Sigma_p(t)$ はロボットの位置 $x(t)$ における誤差の共分散行列、 $\Sigma_v(t)$ はロボットの速度 $v(t)$ における誤差の共分散行列である。 $\mathbf{K}_1(t)$ 、 $\mathbf{K}_2(t)$ はヤコビ行列である。 $\Delta \mathbf{p}$ は、線形近似による誤差である。 T は転値を表す。

3.2.2 手先姿勢の誤差分布

台車を基準とした座標系での手先姿勢の確率分布 $P(x_h)$ は、以下の式から求まる。

$$P(x_h) = \int \int P(x_h | x_B, x_G) P(x_B) P(x_G) dx_B dx_G \quad (4)$$

$P(x_B)$ は、世界座標系での物体姿勢 x_B の確率分布である。推定値 \hat{x}_B と分散 Σ_B として、正規分布 $P(x_B) = N(\hat{x}_B, \Sigma_B)$ で与える。 $P(x_h)$ は手先姿勢の分布を示すものであり、これに従う x_h の分布はモンテカルル法を利用して得る。具体的には、正規分布に従ってサンプリングした x_B 、 x_G を元に、 x_h を求めることを繰り返す。以下に計算方法を述べる。

台車座標系から見た物体姿勢 x_b は、以下の座標変換から求めることができる。

$$x_b = \mathbf{R}_{(x_G)}^T (x_B - \mathbf{T}_{(x_G)}) \quad (5)$$

$\mathbf{R}_{(x_G)}$ は、世界座標系から見た台車姿勢 θ_G による回転行列、 $\mathbf{T}_{(x_G)}$ は平行移動ベクトルである。一方で、 \hat{x}_h は、 \hat{x}_G 、 \hat{x}_H を用いて以下の座標変換から求まる。

$$\hat{x}_h = \mathbf{R}_{(\hat{x}_G)}^T (\hat{x}_H - \mathbf{T}_{(\hat{x}_G)}) \quad (6)$$

最後に、 $P(x_h | x_B, x_G)$ に属する x_h を以下の関係式から算出する。 ϕ_b は台車座標系から見た物体の方位である。

$$x_h - \hat{x}_h = (x_b - \hat{x}_b) + |x_b - \hat{x}_b| \begin{pmatrix} \cos \phi_b - \cos \hat{\phi}_b \\ \sin \phi_b - \sin \hat{\phi}_b \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

3.3 評価値の算出

式(1)の C を求める方針として、 $P(x_G)$ 、 $P(x_B)$ について、それぞれの分布で確率的距離（マハラノビス距離）が一定以上の領域のみを抜き出して考える。二つの分布とも正規分布としたため、以下の式から、楕円体として求まる。

$$\begin{aligned} (x_G - \hat{x}_G)^T \Sigma_G^{-1} (x_G - \hat{x}_G) &= D_1^2 \\ (x_B - \hat{x}_B)^T \Sigma_B^{-1} (x_B - \hat{x}_B) &= D_2^2 \end{aligned} \quad (8)$$

評価値の算出手順は、以下のとおりである。

1. 作業空間内から台車の立ち位置を一つ選び、そこに至るまでの台車姿勢の誤差分布 $P(x_G)$ を求める。次に、式(6)を用いて手先の目標姿勢 \hat{x}_h を求める。
2. \hat{x}_h について逆キネマティクスを解き、マニピュレータの各関節角 $\hat{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ を求める。
3. 以下の処理を、所定の回数繰り返す。
 - (1) 式(8)を満たす楕円体の内部から、 $P(x_B)$ 、 $P(x_G)$ の分布に従う x_G 、 x_B をランダムに選ぶ。
 - (2) これらを式(5)、式(7)に代入し、誤差を含む手先の姿勢 x_h を得る。
 - (3) この x_h から各関節角 θ を求める。
 - (4) $\hat{\theta}$ と θ の差分の絶対値を求め、その値を C に足し込む。

最終的に得られる C の値が小さい場合、その把持姿勢に良い評価を与える。

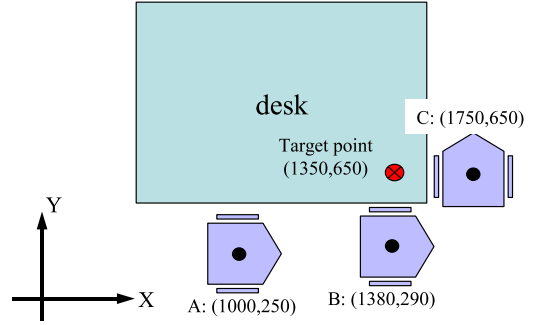


Fig.3 Environment

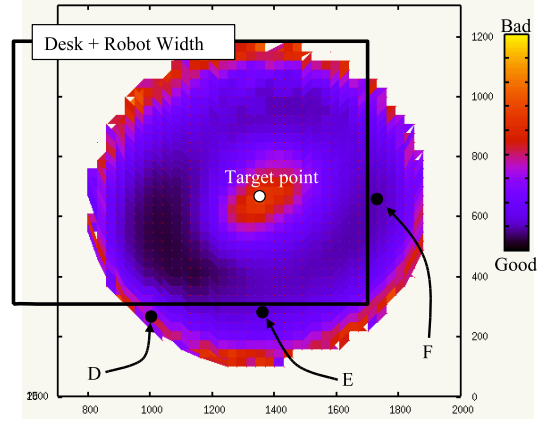


Fig.4 Pose Evaluation

3.4 冗長マニピュレータへの対応

マニピュレータ単体の自由度が物体操作に必要な自由度より多い場合、台車の位置を固定したとしても、逆キネマティクスの解は無数に存在する。そこで、以下の式に従ってマニピュレータの姿勢を最適化し、その結果から得た姿勢について式(1)の評価を行う。これにより、その台車姿勢における最適なロボット姿勢を決めることができる。

$$\theta_{new} = \theta + \lambda (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \frac{\partial q(\theta)}{\partial \theta} \quad (9)$$

\mathbf{J} は、マニピュレータのヤコビ行列であり、 \mathbf{J}^+ は、 \mathbf{J} の疑似逆行列である。 λ は正の定数である。 $q(\theta)$ は、マニピュレータの関節数を n 、モンテカルル法のサンプル数を m とするとき以下のように定義する。

$$q(\theta) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (\Delta \theta_i^j)^2 = \sum_{j=1}^m \{ \mathbf{J}^+ (x_h^j - \hat{x}_h) \}^2 \quad (10)$$

式(11)は、 \hat{x}_h から、任意の x_h^j に手先を動かした場合に、各関節角の動作量の最小ノルム解を求めるものである。 x_h^j は、3.3節で述べた x_h と同様に選ばばよい。

4. 実験

提案手法の検証のために、実験を行った。動作環境を Fig.3 のように設定した。実験機は、独立二輪駆動形式の台車に、全長約 700mm の三自由度マニピュレータを水平に搭載したロボットである。

手先の目標位置を $(x, y) = (1350, 650)$ [mm] に設定し、台車の目標姿勢を、(A): $(x, y) = (1000, 250)$ 、(B): $(x, y) =$

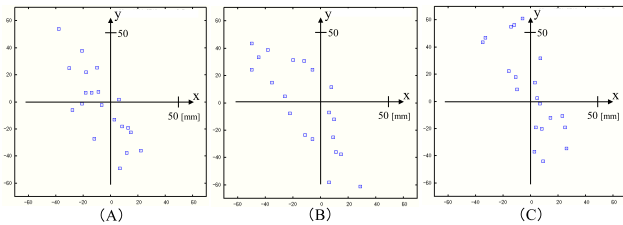


Fig.5 Position Error of End-Effector

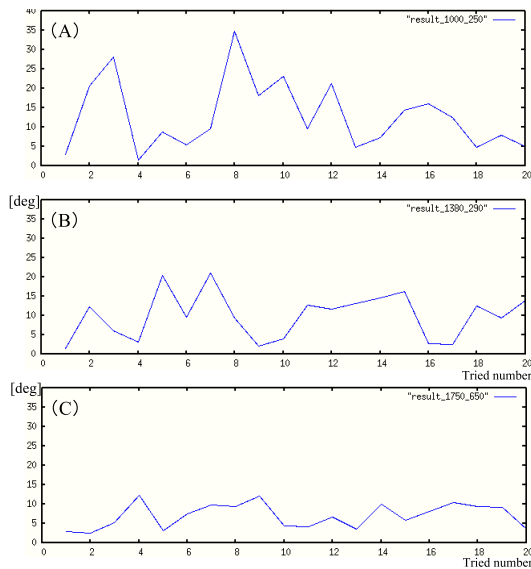


Fig.6 Sum of Three Joint Motions

(1380, 290)、(C): $(x, y) = (1750, 650)$ の三点とした。それぞれで把持姿勢を取った際に、手先姿勢の誤差とその修正に必要なマニピュレータの動作量を調べた。

実験では、台車の初期姿勢に最大 20[mm] の位置誤差、最大 5[deg] の角度誤差をランダムに与えた。台車は $(x, y) = (0, 0)$ からスタートし、(A)~(C) の台車位置に到達した後、把持姿勢をとった。その後、手先姿勢の誤差を測定し、その修正に必要なマニピュレータ各関節の動作量をオフラインで算出した。

Fig.4 は、姿勢評価の分布である。台車の作業空間を一边 50[mm] のグリッドで区切り、各グリッドを台車の位置として評価を行った結果を示している。これより、台車の移動量が少ないところで、良い評価が出やすいことが判る。ただし、手先姿勢の誤差に対してマニピュレータの操作性が保てれば、台車の移動量が多くても比較的良い評価が得られることがある。すなわち、評価値の分布は極値を持つ。また、評価値は全体的に滑らかに分布する。

Fig.4 からは、(C) の台車姿勢で一番良い評価が得られた。Fig.5 は、手先の位置誤差を表示したものである。3 つの誤差はほぼ同様に広がり示している。Fig.6 は、それぞれの誤差を修正するために必要な、各関節の動作量を示したものである。横軸は試行回数、縦軸は各関節の修正量の合計 [deg] である。誤差の広がりには 3 つの台車姿勢でそれほど変化しないのに対し、(C) の姿勢での修正量が一番少なく済むことが判る。Fig.7 は、(A)~(C) でのロボット姿勢を示す。マニピュレータの操作性が高く、かつその方向が誤差楕円の分布とほぼ一致

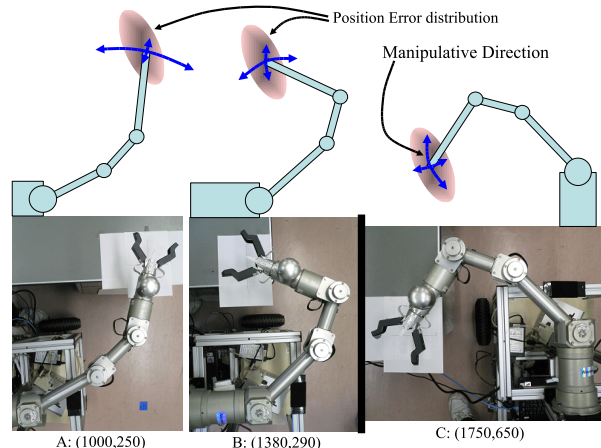


Fig.7 Grasp Poses

している場合に、良い評価が得られた。

5. まとめ

本稿では、小型物体を把持を想定した移動マニピュレータの姿勢評価手法に関して述べた。提案手法では、台車の移動誤差は手先姿勢に影響を与えやすいことに着目し、この誤差を相殺するためのマニピュレータの動作量を評価値とする。この基準の元で、ロボットの姿勢を評価し、同時に良い評価が得られる姿勢を算出する手法を提案した。

今後の課題として、物体を複数とおりの掴み方で把持できるとした場合に、最適なロボット姿勢を決めることがある。また、提案した評価基準に加え、台車の移動距離や障害物との衝突可能性などを考慮して、統合的な動作計画の構築を目指す。

参考文献

- 1) N. Y. Chong and K. Tanie: "Object Directive Manipulation Through RFID", Proc. Int. Conf. on Control, Automation, and Systems, Gyeongju, Korea, Oct. 22-25, 2003.
- 2) R. Katsuki, J. Ohta, T. Mizuta, T. Kito, T. Arai, T. Ueyama and T. Nishiyama: "Design of Artificial Marks to Determine 3D Pose By Monocular Vision", Proc. 2003 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.995-1000, 2003.
- 3) J. Miura, Y. Shirai and N. Shimada: "Development of a Personal Service Robot with User-Friendly Interfaces", 4th Int. Conf. on Field and Service Robotics, pp.293-298, 2003.
- 4) K. Nagatani, T. Hirayama, A. Gofuku and Y. Tanaka: "Motion Planning for Mobile Manipulator with Keeping Manipulability", Proc. of IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1663-1668, 2002.
- 5) D. Shin, B. Hamner, S. Singh and M. Hwangbo: "Motion Planning for a Mobile Manipulator with Imprecise Locomotion", Proc. Int. Conf. on Control, Automation, and Systems, 2003.
- 6) Y. Watanabe und S. Yuta: "Position estimation of mobile robots with internal and external sensors using uncertainly evolution technique, IEEE Int. Conf on Robotics and Automation, Seiten 2011-2016, 1990.
- 7) T. Yoshikawa "Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy", Preprints of 1st Int. Symposium of Robotics Research, 1983.