4 自由度パラレルメカニズム移動ロボット*

山 脇 輔^{*1}, 小 俣 透^{*2}

Four-Degree-of-Freedom Parallel Mechanism Mobile Robots

Tasuku YAMAWAKI^{*3} and Toru OMATA^{*3} Department of Mechanical Systems Engineering, National Defense Academy of Japan,
1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka-shi, Kanagawa, 239-8686 Japan

This paper proposes the parallel mechanism mobile robot whose body is a parallel mechanism. Its notable feature is that it can elevate another mobile robot to a high level to which the latter alone cannot ascend. In serial manipulators, the weight of actuators for distal joints is a load on actuators for proximal joints. On the other hand, actuators support the output platform of a parallel manipulator in parallel. Therefore the parallel mechanism body can elevate a heavier object than a serial manipulator without elevating most of or all of its own actuators. In addition, the output platform can be made wide enough to load another robot. As an example of such a parallel mechanism mobile robot, we develop a four-DOF parallel mechanism mobile robot. Its advantage is that the platform can be kept horizontal in rough terrain. We experimentally verify that the robot can elevate another mobile robot of almost the same weight.

Key Words: Parallel Mechanism, Moving Robot, Mechanism, Manipulator

1. 緒 論

移動ロボットの作業空間の広さは、ロボットが移動できる空間の広さに依存する。よって移動ロボットを単独では到達できない高さまで持上げることができれば、その作業空間は3次元的に拡張される。著者らは、この概念を実現するために平面閉4・閉5リンク系からなるパラレルメカニズムによって胴体部を構成した2台の移動ロボット(閉4リンクロボット, 閉5リンクロボット)を製作した⁽¹⁾。

そこで本論文では、これら2台のロボットを一般化し、胴体部をパラレルメカニズムにより構成したパラレルメカニズム移動ロボットを提案する。まず第2章では、胴体部をパラレルメカニズムによって構成することで得られる機能を明らかにし、パラレルメカニズム移動ロボットの有用性を一般的に示す。また関連研究に対する本研究の違いを明らかにする。つぎに第3章では、パラレルメカニズム移動ロボットの一例として製作した4自由度パラレルメカニズム移動ロボット(図1参照)の機構を示し、運動学解析により特異姿勢についても明らかにする。最後に第4章では、自身と

Fig. 1 Four-DOF parallel mechanism mobile robot

同程度の質量を有するロボットを単独では到達できない高さまで持上げられることを実験により確認する。

2. パラレルメカニズム移動ロボット

パラレルメカニズム移動ロボットとは、移動車体にパラレルメカニズムで構成した胴体部を搭載した移動ロボットである。胴体部をパラレルメカニズムによって構成することで次のような機能が得られる。

1. 胴体部の自由度を変えることにより、種々の機能を持たせることができる。
2. 胴体上部は、複数のリンクにより支持されるために、ロボットや大型物体を搭載するのに十分な広

* 原稿受付 2008 年 3 月 21 日。

^{*1} 正員, 防衛大学校システム工学群(☎ 239-8686 横須賀市走水 1-10-20)。

^{*2} 正員, 東京工業大学大学院総合理工学研究科(☎ 226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)。

E-mail: yamawaki@nda.ac.jp

さを有することができる。

3. 一般的なシリアルマニピュレータでは駆動アクチュエータの質量が負荷になるのに対し、パラレルメカニズムは駆動アクチュエータの多くを持上げずに胴体部の位置・姿勢を制御することが可能で、その点において質量のより大きな物体やロボットを胴体部に搭載できる。

本論文では、この3つの機能を有するパラレルメカニズム移動ロボットの一例として、4自由度パラレルメカニズム移動ロボットを製作する。そして、これらの機能を利用することにより胴体上部に自身と同程度の質量や大きさを有するロボットを搭載し、単独では到達できない高さまで持上げられることを示す。これにより持上げられたロボットの作業空間を3次的に拡張することが可能になる。

移動ロボットにパラレルメカニズムを利用している研究はいくつかある。物体搬送ロボットの高機能化を目的として、パラレルメカニズムによって構成したマニピュレータを搭載した移動ロボットが開発されている⁽²⁾。これはパラレルメカニズムを用いることにより、搬送物体に作用する加速度を補償した安定な搬送が可能になる点に着目しているが、搬送物体の大型化の可能性については議論していない。また傾斜面における物体搬送を安定化機構によって可能にした研究が行われているが⁽⁴⁾、パラレルメカニズムの安定化機構としての有効性を一般的に示していない。一方、移動可能なパラレルメカニズムも開発されているが⁽³⁾、これはロボット単体による作業空間の拡張を目的としており、搬送物体の大型化に伴う複数台による作業空間のさらなる拡張化については述べていない。このようにパラレルメカニズムが移動ロボットの作業空間の拡張に有効であることを指摘した研究は見当たらない。

3. 4自由度パラレルメカニズム移動ロボット

胴体部の自由度を変えることにより、種々の機能を有するパラレルメカニズム移動ロボットが考えられる。機能を実現するために6自由度あれば十分であるが冗長でもある。一方、1自由度では機能は限られる。そこで、本論文では、4自由度の胴体部から構成される4自由度パラレルメカニズム移動ロボットを製作した。なお本ロボットの主として想定する作業環境は、基本的に平らな面が多く存在するものの、段差、傾斜面もあるような人工環境である。

3-1 4自由度パラレルメカニズム 胴体部を構成する4自由度パラレルメカニズムを図2に示す。3本の外側リムと1本の中央リムがプラットフォームと

移動車体を連結している。外側リム i は上部アームと下部アームから構成されており、これら2つのアーム同士はユニバーサルジョイント U_i により結合されている。上部アーム i はプラットフォームとボールジョイント S_i により結合されており、下部アーム i と移動車体は点 P_{ri} で回転関節 R_i により結合されている。中央リムは伸縮可能であるとする。説明を簡略化するために図2では直動機構としているが、実際には3.3節に示すパンタグラフ機構により中央リムを構成している。3つの回転関節 R_i , $i=1,2,3$ と中央リムが駆動関節であり、これらがプラットフォームの姿勢3自由度と高さを制御する。このパラレルメカニズムの特異姿勢については3.4節にて述べる。

Fig. 2 Four-DOF parallel mechanism

この胴体部は、上部のプラットフォームを図3に示すような運動を実現させる⁽⁵⁾。このプラットフォームにはロボットを搭載し、搬送することを目的とした自由度の構成としている。物体をプラットフォームに搭載し、安定して斜面を移動するためには、プラットフォームを水平に保つ必要がある。ゆえにプラットフォームはロール・ピッチ軸回りの姿勢2自由度を必要とする((a), (b)参照)。また単独では搬送困難な大型搬送物を2台のパラレルメカニズム移動ロボットが協調して搬送することも考えられ、そのためにはヨー方向の姿勢1自由度と、プラットフォームの高さの違いを補償するため、垂直方向に並進1自由度が必要となる((c), (d), (e)参照)。もちろん他のロボットを持上げるためにも垂直方向の並進1自由度は必要である。

中央リムと移動車体は点 B においてボールジョイント S_c により結合されている。一方、中央リムとプラットフォームは点 P において固着している(図4(a))。もし結合方法を逆にすると、パラレルメカニズム移動ロボットは容易に転倒してしまう((b))。

上述のように本ロボットは斜面における物体搬送機能を有している。これは、著者らがこれまでに製作したパラレルメカニズム移動ロボット、閉4リンクロボットや閉5リンクロボットとは異なる自由度とすること

Fig. 3 Motions of the parallel mechanism body

Fig. 4 The spherical joint S_c

により得られた新しい機能である。このことは前節で述べた胴体部をパラレルメカニズムで構成して得られる機能1に対応している。また、他の移動ロボットを胴体部に搭載できるだけの大きなプラットフォームを有しており、これは上述の機能2に対応している。最後に自身と同程度の重量のロボットを持上げることが可能である。一般的なシリアルマニピュレータの可搬重量は自重の10%程度であることから、それと比較すると大きな可搬重量を有している。これは上述の機能3に対応している。このように前節で示した胴体部をパラレルメカニズムで構成することにより得られる3つの機能を本ロボットが有していることが分かる。

3.2 シリアルリンク 図5に示すように、胴体部には、他のロボットがプラットフォームに乗り込む際に利用する傾斜面を構成するためのシリアルリンクが搭載されている。シリアルリンクは、プラットフォームの端面と平行な回転軸 θ_4 回りに能動的に回転される。

3.3 中央リム 乗り込むロボットの登坂性能には限界があるため、傾斜面の角度はできる限り小さいほうがよい。そのためには、プラットフォームをより低く下げられるように中央リムをできる限り収縮でき

Fig. 5 Serial link

る機構が望ましい。そこで、本ロボットでは図6(a)に示すパンタグラフ機構により可動範囲が比較的大きな中央リムを実現した。プラットフォームの裏側に取り付けたアクチュエータにより送りねじを駆動することで中央リムを伸縮できる。(このアクチュエータは移動車体には装着できない)。図6(b)において、 $+z$ 方向が中央リムの伸展方向であり、その長さを d とする。ただし中央リムは移動車体とボールジョイントで結合されているため、 $+z$ 方向が移動車体に対する鉛直上向き方向とは限らない。

(a) Mechanism of the central limb

(b) Elevating motion of the central limb

Fig. 6 Central limb

ここで中央リムによって発生できる持上げ力を仮想仕事の原理を利用して算出する。図6(b)に示すように送りねじを回転させることによって並進速度 v_x でナットが移動しているとすれば、プラットフォームの z 方向の速度 d は次式で与えられる。

$$d = \frac{3}{\tan \psi} v_x \quad (1)$$

ただし ψ は下端リンクの開閉角度である。仮想仕事の原理より、送りねじによる開閉力 F_x によって発生

される持上げ力 F_z は,

$$F_z = \frac{\tan \psi}{3} F_x \quad (2)$$

となる. 開閉力 F_x は送りねじの回転トルク τ_f によって次式で与えられる.

$$F_x = k \tau_f \quad (3)$$

ただし

$$k = \frac{\pi d_m - \mu l_{lead}}{l_{lead} + \pi \mu d_m} \times \frac{2}{d_m} \quad (4)$$

l_{lead} : 送りねじのリード

d_m : 送りねじ軸の外径

μ : 送りねじとナット間の摩擦係数.

3.4 運動学解析 図2に示した4自由度パラレルメカニズムの特異姿勢について議論する. ここで図7に示すように中央リムの角速度ベクトルを ω_p , プラットフォーム上の中央リムとの結合点 P からボールジョイント S_i がある点 P_{si} までのベクトルを $\mathbf{u}_i = \overrightarrow{PP_{si}}$ とすると, P_{si} の並進速度は次式で与えられる.

$$\mathbf{v}_i = \omega_p \times (d\mathbf{z} + \mathbf{u}_i) + \mathbf{v}_p \quad (5)$$

ただし $\mathbf{v}_p = \dot{d}\mathbf{z}$ である. また P_{si} の並進速度は, 外側リムの関節角速度を用いても表すことができ,

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{a}_i \dot{\theta}_{1i} \times (\mathbf{l}_{1i} + \mathbf{l}_{2i}) + \omega_i \times \mathbf{l}_{2i} \quad (6)$$

となる. ただし,

$\mathbf{a}_i$: 回転関節 R_i の回転軸ベクトル

θ_{1i} : 回転関節 R_i の角度

$\mathbf{l}_{1i}$, $\mathbf{l}_{2i}$: それぞれ下・上部アームの長手方向ベクトル

ω_i : ユニバーサルジョイント U_i の回転角速度である.

Fig. 7 Symbols for the four-DOF parallel mechanism body

式(5)と式(6)を等しいとして, 両辺に $\mathbf{l}_{2i}$ を乗ずれば,

$$((d\mathbf{z} + \mathbf{u}_i) \times \mathbf{l}_{2i})^T \omega_p + \mathbf{l}_{2i}^T \mathbf{v}_p = (\mathbf{l}_{2i} \times \mathbf{l}_{1i})^T \mathbf{a}_i \dot{\theta}_{1i} \quad (7)$$

が得られる. これを $i = 1 \sim 3$ 全てのボールジョイントについてまとめ行列形式で表すと,

$$J_p \begin{pmatrix} \omega_p \\ \mathbf{v}_p \end{pmatrix} = J_a \begin{pmatrix} \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{12} \\ \dot{\theta}_{13} \\ \dot{d} \end{pmatrix} \quad (8)$$

ただし

$$J_p = \begin{pmatrix} ((d\mathbf{z} + \mathbf{u}_1) \times \mathbf{l}_{21})^T \mathbf{l}_{21}^T \\ ((d\mathbf{z} + \mathbf{u}_2) \times \mathbf{l}_{22})^T \mathbf{l}_{22}^T \\ ((d\mathbf{z} + \mathbf{u}_3) \times \mathbf{l}_{23})^T \mathbf{l}_{23}^T \\ 0_{33} & \mathbf{l}_{33} \end{pmatrix}, \in \mathbb{R}^{6 \times 6} \quad (9)$$

また

$$J_a (\in \mathbb{R}^{6 \times 4}) = \begin{pmatrix} (\mathbf{l}_{21} \times \mathbf{l}_{11})^T \mathbf{a}_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (\mathbf{l}_{22} \times \mathbf{l}_{12})^T \mathbf{a}_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (\mathbf{l}_{23} \times \mathbf{l}_{13})^T \mathbf{a}_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{z} \end{pmatrix} \quad (10)$$

であり, 0_{33} , $\mathbf{l}_{33}$ は3行3列のそれぞれ零行列, 単位行列を表す.

上部アーム i がプラットフォームへ与える力を $\mathbf{f}_i$ とする. この力は, 静的平衡状態を満足しながら非駆動関節であるユニバーサルジョイント U_i を介して伝わる. ゆえに $\mathbf{f}_i$ は次式で書ける.

$$\mathbf{f}_i = f_i \mathbf{l}_{2i} / |\mathbf{l}_{2i}| \quad (11)$$

ただし f_i は力ベクトル $\mathbf{f}_i$ のスカラー量である. 運動学と静力学の双対性より静力学的平衡状態が次式により書ける.

$$J_p^T \begin{pmatrix} \tilde{f}_1 \\ \tilde{f}_2 \\ \tilde{f}_3 \\ \mathbf{f}_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{m}_e \\ \mathbf{f}_e \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$J_a^T \begin{pmatrix} \tilde{f}_1 \\ \tilde{f}_2 \\ \tilde{f}_3 \\ \mathbf{f}_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ f_d \end{pmatrix} \quad (13)$$

ただし,

$$\tilde{f}_i = f_i / |\mathbf{l}_{2i}|$$

f_d : 中央リムにある直動関節の駆動力

$\mathbf{f}_p \in \mathbb{R}^3$: 中央リムによってプラットフォームへ加えられる力であり, $\mathbf{f}_p = \mathbf{z} f_d$

$\mathbf{m}_e$ and $\mathbf{f}_e$: 点 P において, 加えられる外力, 外モーメント

τ_i : 回転関節 R_i によって発生される回転トルク

ここで J_p のランクが低下する順運動学的特異姿勢、及び J_a のランクが低下する逆運動学的特異姿勢に陥るそれぞれの条件を導く。

順運動学的特異姿勢： J_p のランクが低下する必要十分条件は、左上の 3×3 の部分行列

$$J_{p11} = \begin{pmatrix} ((dz + u_1) \times l_{21})^T \\ ((dz + u_2) \times l_{22})^T \\ ((dz + u_3) \times l_{23})^T \end{pmatrix} \in R^{3 \times 3} \quad (14)$$

が特異になることである。 J_{p11} が特異になるのは、(1) 上部アームの長手方向ベクトル l_{21} , l_{22} , l_{23} に沿う 3 本の直線が一点で交わる場合 (図 8(b)), (2) それら 3 本の直線が平行となる場合である。ただし (2) は本ロボットにおいて機構的に起こりえない。

順運動学的特異姿勢に陥った場合、 z 軸回り (中央リム回り) の回転をアクチュエータによって与えることができない。回避策の一つとして、1 本以上の外側リムを新たに付加することが考えられる。本論文では次節で述べるシリアルリンクを用いることによって、特異姿勢に対応する手法を述べる。

逆運動学的特異姿勢：外側リムが伸びきった状態、または折りたたんだ状態では $J_a < 4$ となるために逆運動学的特異姿勢となる。ただし、本ロボットではこのような姿勢をとることはない。

Fig. 8 DK singularity

3.5 ロボットの仕様 製作した 4 自由度パラレルメカニズム移動ロボットの仕様について述べる。胴体部の上部・下部アームの長さは全て等しく 0.155m である。シリアルリンクの長さは 0.35m である。全質量は 9.2kg であった。

表 1 に駆動関節の仕様を示す。表中の記号は、 P_{max} : 関節を駆動する DC モータの最大出力
 ω_{max} , τ_{max} : 減速ギアを介して出力されるの最高関節角速度と最大駆動トルク
 g_r , η : 減速ギアの減速比と効率 (カタログ値)
 ただし τ_{max} は、 $\tau_{max} = 2\tau_{cnt}g_r\eta$ により求められ、 τ_{cnt} は DC モータの最大連続トルクである。瞬時最大駆動

トルクとして、最大連続トルクの 2 倍としている。中央リムの送りねじ及び回転関節 R_i の減速比は、それぞれの最高回転数でプラットフォームを持上げた場合にその速度が同じになるように決定した。送りねじの有効直径は 10.0mm、ピッチ l_{lead} は 1.0mm である。ナット、ねじの材質から摩擦係数 $\mu = 0.2$ とした。

Table 1 Specification of the actuated joints

joint	P_{max} [W]	τ_{max} [Nm]	ω_{max} [deg/s]	g_r (η)
R_1, R_2, R_3	17.5	29.8	38	927.5 (0.5)
Feed screw	17.5	2.1×10^{-1}	1.1×10^4	3.7 (0.9)
θ_4	42.0	28.6	98	343.2 (0.5)

4. 持 上 げ 実 験

4 自由度パラレルメカニズム移動ロボットは 3-1 節で述べたように他のロボットをプラットフォームに搭載することを目的として自由度を配置した。そこで本節では、4 自由度パラレルメカニズム移動ロボットが自分と同じ程度の重さのロボットをプラットフォームに搭載し、単独では到達できない高さまで持上げられることを実験的に示す。さらに特異姿勢を利用した持上げ動作を新たに提案し、それを実験的に確認する。

4.1 持上げ動作 プラットフォームに搭載したロボットを中央リムと 3 本の外側リムによって発生する合力により持上げる。3 本の外側リムがプラットフォームに与える持上げ力は図 8(b) に示した順運動学的特異姿勢のときに最大となる。しかし順運動学的特異姿勢では外側リムは z 軸回りにプラットフォームを回転できないため、プラットフォームが外乱に対して z 軸回りに不安定になる可能性がある。そこで、シリアルリンク先端を床面に押し付けることにより、順運動学的特異姿勢近傍においてもロボットを安定した状態で持上げられることを示す。

以下、持上げ動作のシーケンスについて述べる。

(1) 3 本の外側リムを制御して順運動学的特異姿勢近傍まで姿勢遷移させる。ただしプラットフォームの高さは変えない。外乱に対してプラットフォームが z 軸回りに不安定にならないために、シリアルリンクの先端を床面に押し付ける。なお、シリアルリンクの先端は、図 1 に示したように平板を回転軸 θ_4 と平行に切断した形状となっている。

(2) 3 本の外側リムと中央リムからの持上げ合力により、プラットフォームをロボットを持上げる。(1) の初期姿勢が順運動学的特異姿勢からわずかでもずれていると、次第に順運動学的特異姿勢から遠ざかることになる。そこで z 軸回りにある角度までプラットフォーム

ムが回転してしまったら、手順 (1) に戻り再度順運動学的特異姿勢近傍に戻る。この間、シリアルリンクの先端を床面に押し続け、プラットフォームの安定性を確保する。ただし、順運動学的特異姿勢から遠ざかるにつれ、プラットフォームは z 軸回りに回転するため、その回転をシリアルリンクが阻害しないよう押し付け力を調整した。

Fig. 9 Elevating motion

4.2 実験 前節で述べた持上げ動作を製作した4自由度パラレルメカニズム移動ロボットに適用し、自身と同程度の重量を有する閉5リンクロボット(重量8.2kg)を持上げを確認する。持上げる全質量はプラットフォームの質量1.0kgも含め9.2kgである。プラットフォームの初期高さは、閉5リンクロボットがシリアルリンクをスロープとして利用して乗り込めるように0.2mとし、目標高さは0.3mとした。なお、閉5リンクロボットは上体の重心を変化させることにより、安定した姿勢を保ちスロープを登ることができる。また同じ初期姿勢から回転動作を行わずに中央リムのみで持上げ動作を行った場合についても比較実験として行った。

図10(a), (b), (c)に実験結果を示す。(a)はプラットフォームの高さを表し、中央リムを駆動する送りねじの回転数から算出した。(b)はプラットフォームへの持上げ力(I)~(III)を表している。(I)は3本の外側リムがプラットフォームへ与える持上げ力を表し、アクチュエータへの指令トルクから算出した。(II)は中央リムがプラットフォームへ与える持上げ力を表し、アクチュエータの指令トルクから算出した。(III)は(I), (II)の合力である。(c)は回転動作を行わずに持上げ動作を行った場合のプラットフォームへの持上げ力を表している。図11は持上げ動作を行うパラレルメカニズム移動ロボットである。

図10(a)より、提案した持上げ動作によりプラットフォームを目標高さ0.3mまで持上げていることが分かる。このときの持上げ力を図10(b)に示す。これより合力が図中A点に達すると、プラットフォームは上昇し始める。また特異姿勢に戻さずに実験を行った場合には持上げ動作に失敗した。これは、順運動学的特異姿勢から遠ざかると、図10(b)に示すように持上げ力が急激に低下したためである。

一方、回転動作を行わずに持上げ動作を行った場合

には、図10(a)に示すようにプラットフォームは上昇せず初期高さのままであった。このときの持上げ力を図10(c)に示す。これより提案した持上げ動作と比較して持上げ力は小さく、十分な持上げ力が得られなかったことがわかる。

本実験により、3本の外側リムが与える持上げ力が閉5リンクロボットの持上げ動作において効果的に作用していることが分かった。また順運動学的特異姿勢近傍では3本の外側リムが z 方向に大きな持上げ力を与えることができることが分かった。

(a) The height of the upper plate

(b) z-direction forces exerted by the three arm and the central limb (Applying the proposed elevating motion)

(c) z-direction forces of the elevating motion without rotation (NOT applying the proposed elevating motion)

Fig. 10 Experimental results

Fig. 11 Snapshots of the experiment

4.3 考察 提案した持上げ動作は、シリアルリンクを床面に押し付けることにより摩擦力を発生させ、プラットフォームが順運動学的特異姿勢近傍で回転してしまうことを避けている。よって、シリアルリンクの先端は、摩擦力を調整できる機構が望ましい。例えばゴムを先端に取り付ければ押し付け力に応じて大きな摩擦力を得ることができるため、摩擦力の調整機構の一例と考えられる。ただし、本実験では特に支障がなかったため、アームの先端に特別な機構を取り付けることはしなかったが、適切な機構の検討やセンサ情報に基づく押し付け力の自動調整法については今後の課題である。

また提案したロボットの作業空間は、基本的に平らな面が多く存在する人工環境としたが、上述のようにシリアルリンク先端にゴム等を取り付けることによって、ある程度の凹凸面には対応できると考えられる。

なお、シリアルリンク先端の摩擦力が大きくできれば、つぎのような制御方法も考えられる。すなわち、シリアルリンク先端は床面に対して動かないようにして、逆にクローラを用いて車体部を旋回させることにより、順運動学的特異姿勢において、 z 軸回りに制御できないという問題が回避できる。この方法は今後の課題とする。

5. 結 論

移動車体にパラレルメカニズムで構成した胴体部を搭載したパラレルメカニズム移動ロボットを提案した。その具体化として、4 自由度の胴体部によって構成した4 自由度パラレルメカニズム移動ロボットを製作した。自重と同程度のロボットを搭載し、単独では到達できない高さまで持上げる機能を実験により確認した。今後は、胴体部のパラレルメカニズムを変えることにより目的に合わせた新たなパラレルメカニズム移動ロボットを製作していく。

文 献

- (1) Yamawaki, T., Mori, O. and Omata, T., 4R and 5R Parallel Mechanism Mobile Robots, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 23, No. 2 (2005), pp. 213-219.
- (2) Dang, A.X.H. and Ebert-Uphoff, I., Active Acceleration Compensation for Transport Vehicles Carrying Delicate Objects, *IEEE Transaction on Robotics*, Vol. 20, No. 5 (2004), pp. 830-839.
- (3) Tsai, L.W. and Tahmasebi, F., Synthesis and Analysis of a New Class of Six-Degree-of-Freedom Parallel Minimanipulators, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 10, No. 5 (1993), pp. 561-580.
- (4) Hirose, S. and Sensu, T., The TAQT Carrier: A Practical Terrain Adaptive Quadru-track Carrier Robot, *Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on*

Intelligent Robots and Systems, Vol.3 (1992-7), pp.2068-2073.

- (5) Merlet, J.P., *Parallel Robots*, (2000), pp. 30-34, Kluwer Academic Publishers.