

繰り返し順変換を用いた独立二輪駆動型移動ロボット における移動経路の生成*

関 啓明** 高 正*** 神谷 好承** 疋津 正利** 張 勤+

Trajectory Generation of Wheeled Mobile Robot by Repeatedly Direct Kinematics

Hiroaki SEKI, Zheng GAO, Yoshitsugu KAMIYA, Masatoshi HIKIZU and Qin ZHANG

In all of the two-wheeled mobile robot system, we need the robot get the goal with measured position and orientation (x, y, θ) . As we know, for giving the movements of left and right wheels to control the position and orientation, this system is a typical nonholonomic system. We can't use the general control theory about mobile robots to deal with it. In this paper, based on repeatedly direct kinematics, we describe the design and kinematics of the two-wheeled car mobile system using tiny movements to follow the track from initial configuration to the goal configuration. In this system, we can easily get the best path of two-wheeled mobile robot system even if the mobile robot can't make a center rotation.

Key words: mobile robot, nonholonomic system, repeatedly direct kinematics

1. はじめに

車輪型移動ロボットはそのもつ左右2つの車輪をそれぞれ独立に回転させることにより指定する場所へロボットを移動させることができる。このとき移動ロボットの姿勢も希望とする姿勢をとらせることができる。こうした移動ロボットは独立した左右2つの車輪の回転量を入力(2つの入力)とし、移動ロボットの位置と姿勢を出力(3つの出力)する一つの制御系としてとらえることができる。両車輪の回転量である2つの入力を用いて3つの制御量である移動ロボットの位置と姿勢を制御するシステムであるため車輪型移動ロボットは典型的な非ホロノミックなシステムであり、一般的な制御理論の適用が難しいシステムであると言われている。車輪型移動ロボットに対して一般的な制御理論の適用を試みた事例^{1)~5)}もあるが、必ずしも十分満足できる性能は得られていない。このため移動ロボットのような非ホロノミックなシステムに対してファジィ制御⁶⁾やニューラルネットワーク⁸⁾を用いた研究事例もこれまでに多く見受けられる。ファジィ制御やニューラルネットワークを利用しての移動ロボットの経路生成についてはそれなりの有効な結果が得られてはいるがファジィ制御についてはメンバシップ関数を構成するための多くの実験データが必要であること、ニューラルネットワークについてもその学習に多くの教師データが必要であること等の取り扱いにくさがこれらの手法には含まれる。

これより本研究ではこうした車輪型移動ロボットに対して繰り返し順変換の手法^{10)~12)}を用いることを提案する。繰り返し順変換においては2つの車輪に前進と後退の微動を与え、それぞれの微小移動に対して移動ロボットの順運動学を解き、その結果として得られる移動ロボットの多くの位置および姿勢を評価し、最も適切な両車輪の微動を逐次決定していく手法である。本アルゴリズムは、ファジィ制御やニューラルネットワークのように多くの実験データを用いてメンバシップ関数やニューラルネットワークの重みを決定する必要はなく、ロボットが移動していくゴール位置とその目標姿勢を与えるだけでその途中のロボットの移動経路を生成してくれる。そして、心地旋回が不可能な移動ロボットに対しても移動ロボットの後退、旋回、前進の3動作を自動的に含む非常に効率のよいロボットの経路生成が可能となる。他方、単純に本アルゴリズムを用いた場合、移動ロボットのゴール位置の設定場所によってはゴールである位置・姿勢に移動ロボットが到達できない場合も存在する。これがどのような場合であるかを明らかにすると同時にその場合にはサブゴールを設定することによりそうした問題を克服できることについても言及する。

* 原稿受付 平成16年6月14日
 ** 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)
 *** 学生会員 金沢大学大学院
 + 正会員 岐阜県生産情報技術研究所
 (各務原市須藤町4-179-19)

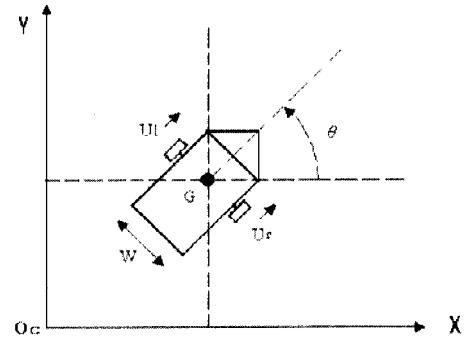


Fig. 1 Model of a wheeled mobile robot

2. 移動ロボットの運動モデルと経路生成のアルゴリズム

2.1 移動ロボットの運動モデル

車輪型移動ロボットの運動モデルを図1に示す。 $\Delta U_l, \Delta U_r$ を左右車輪のそれぞれの微小移動量、 W を両車輪間の幅とし、その中心を G とおく。車輪型移動ロボットの位置を G 点の座標値 $G(x, y)$ で、またその姿勢を x 軸となす角 θ で表わすものとする。左右の車輪の微動 $\Delta U_l, \Delta U_r$ によって $G(x, y, \theta)$ から $G'(x', y', \theta')$ へ移動したときの移動ロボットの位置と姿勢の関係を図2に示す。

このとき $\theta' = \theta + \Delta\theta$, $x' = x + \Delta x$, $y' = y + \Delta y$ とおけば、図2に示される移動ロボットの移動に関する幾何学的関係より

$$\left(|OG| - \frac{W}{2}\right) \cdot \Delta\theta = \Delta U_l \quad \left(|OG| + \frac{W}{2}\right) \cdot \Delta\theta = \Delta U_r \quad (1)$$

なる関係が得られる。これより $\Delta\theta$ と $|OG|$ はそれぞれ式(2)のように表わされる。

$$\Delta\theta = \frac{\Delta U_r - \Delta U_l}{W} \quad |OG| = \frac{W(\Delta U_r + \Delta U_l)}{2(\Delta U_r - \Delta U_l)} \quad (2)$$

他方、 $G'(x', y')$ は $O(O_x, O_y)$ を用いて

$$x' = O_x + |OG| \cdot \sin(\theta + \Delta\theta) \quad (3)$$

$$y' = O_y - |OG| \cdot \cos(\theta + \Delta\theta)$$

の関係が、また $O(O_x, O_y)$ は $G(x, y)$ を用いて

$$O_x = x - |OG| \cdot \sin\theta \quad (4)$$

$$O_y = y + |OG| \cdot \cos\theta$$

のように表わされる。これより移動ロボットにおける G と G' 間の移動 $\Delta x (=x' - x)$, $\Delta y (=y' - y)$ は式(5)のように与えられる。

$$\Delta x = \frac{W(\Delta U_r + \Delta U_l)}{(\Delta U_r - \Delta U_l)} \cdot \cos\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \sin \frac{\Delta\theta}{2}$$

$$\Delta y = \frac{W(\Delta U_r + \Delta U_l)}{(\Delta U_r - \Delta U_l)} \cdot \sin\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \sin \frac{\Delta\theta}{2} \quad (5)$$

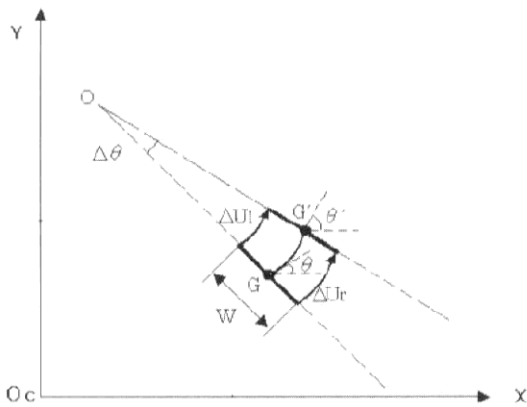


Fig 2 Movements of ΔU_l and ΔU_r

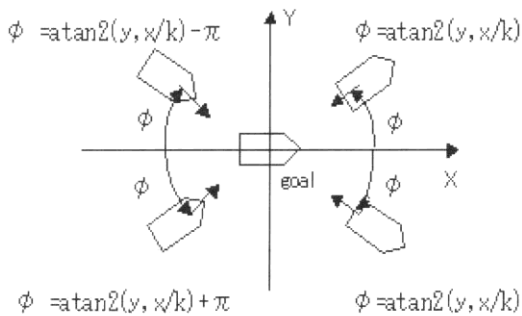


Fig 3 Objective posture of a mobile robot

式(5)は $\Delta U_l \neq \Delta U_r$ でなければならない。 $\Delta U_l = \Delta U_r$ の場合には移動ロボットの姿勢は変化しない。この場合には

$$\Delta x = \frac{\Delta U_r + \Delta U_l}{2} \cdot \cos \theta, \quad \Delta y = \frac{\Delta U_r + \Delta U_l}{2} \cdot \sin \theta \quad (6)$$

で与えられる。

2.2 繰り返し順変換による経路生成のアルゴリズム

移動ロボットがその場で旋回可能であればロボットの制御は非常に容易である。この場合、ロボットを目標点までとにかく移動させ、その後ロボットの姿勢を制御することにより目的を達することができる。これに対して制御が難しいのはその場で旋回できない、すなわち心地旋回が不可能な移動ロボットの場合である。この場合には移動ロボットを目標点へ移動させている途中でロボットの姿勢を目標とする姿勢に近づけなければならない。電動車椅子のような移動ロボットは心地旋回が不可能な構造を持つものが多く、これより本研究ではより高度な制御を必要とする心地旋回が不可能な移動ロボットに対してその移動経路の生成を試みる。

本研究で開発した繰り返し順変換を用いた移動ロボットの経路生成のアルゴリズムを以下に述べる。本アルゴリズムは心地旋回が不可能な移動ロボットに対するアルゴリズムであるため、パラメータ $k (> 1)$ を用いることによりロボットが目標点へ到達するそれ以前にロボットの姿勢を目標姿勢に近づけさせている。パラメータ k の値が大きいくほど移動ロボットは急旋回して目標点へ近づく。

移動ロボットの目標とする座標系の原点へは、移動中にロボットの姿勢を x 軸方向に近づけることを考え、図3に示すような近づき方を与えることとする。第1と第4象限からは移動ロボットは後退により座標系原点へ、第2と第3象限からは前進により座標系原点へ近づけることとする。このとき移動ロボットの目標姿勢 ϕ は移動ロボットの移動中の現在位置 $G(x, y)$ とパラメータ $k (> 1)$ を用いて、第1と第4象限については $\phi = \text{atan2}(y, x/k)$ で、第2象限については $\phi = \text{atan2}(y, x/k) - \pi$ で、第3象限については $\phi = \text{atan2}(y, x/k) + \pi$ で与えることとする。第1象限では $0 < \phi < \pi/2$, 第2象限では $-\pi/2 < \phi < 0$, 第3象限では $0 < \phi < \pi/2$, 第4象限では $-\pi/2 < \phi < 0$ なる範囲の値を目標姿勢として持つことになる。このように目標姿勢を定義した場合、 x 軸近傍に移動ロボットが位置した場合には $\phi = 0$ と

なるが、 y 軸近傍では ϕ の値が $\pm \pi/2$ といった大きく異なる2つ値を目標姿勢として持つてしまうため y 軸近傍に位置する移動ロボットに対しては本アルゴリズムはそのままでは適用できない。この問題に対する解法は後述する。

① まず、車輪型移動ロボットを移動させるその目標位置に座標系原点を設定する。このとき前述の座標系における x 軸方向を車輪型移動ロボットの目標とする姿勢に合わせる。

② 上述のように設定した座標系を基準として移動ロボットのスタート時点での初期位置・姿勢 $G(x_0, y_0, \theta_0)$ を定義する。移動ロボットの目標姿勢としては図3の ϕ を与えることとする。他方、心地旋回が可能な移動ロボットに対してはその目標姿勢をすべて $\phi = \text{atan2}(y, x/k)$ で与えることにより y 軸近傍で ϕ の値が不連続にはならなくなるが、座標系原点近傍でロボットの姿勢が不安定になることもあり、この場合は目標点において本アルゴリズムを少し修正することが必要になる。

③ 2つの車輪それぞれについて微小移動 $(-\Delta U_l, 0, +\Delta U_l)$, $(-\Delta U_r, 0, +\Delta U_r)$ を与え、式(2),(5),(6)を用いた順運動学により移動ロボットのその位置近傍に以下に示す7通りのロボット姿勢を得る。

左輪	$-\Delta U_l$	$-\Delta U_l$	0	0	0	$+\Delta U_l$	$+\Delta U_l$
右輪	$-\Delta U_r$	0	$-\Delta U_r$	0	$+\Delta U_r$	0	$+\Delta U_r$
	後退	左旋回 後退	右旋回 後退	停止	左旋回 前進	右旋回 前進	前進

移動ロボットが心地旋回可能な構造を持てば、さらに次の2通りの微動が加わることになる。

左輪	$-\Delta U_l$	$+\Delta U_l$
右輪	$+\Delta U_r$	$-\Delta U_r$
	左旋回	右旋回

④ ③で得られた7つのロボット姿勢の中から設定した座標系原点に現在値より近づく解を選び出す。心地旋回可能な移動ロボットの場合には9つのロボット姿勢の中から選ぶことになる。

⑤ ④で選り出された解の中から図3で与えた目標とするロボット姿勢 ϕ に最も近い解を選び出す。

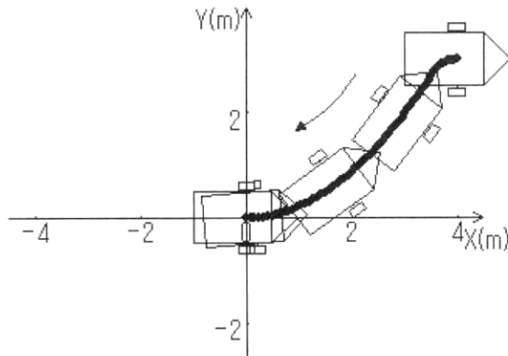
$$(\phi - \theta)^2 \rightarrow \min \quad (7)$$

⑥ 決定された2つの車輪の微小増分をそれぞれの車輪のもつ移動に加えて③に戻る。

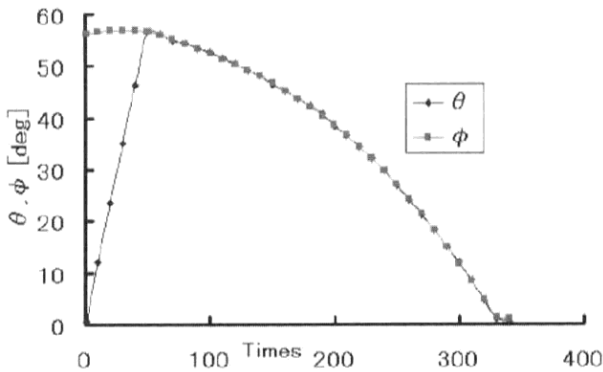
3. 経路生成のシミュレーション事例

本研究で提案する経路生成アルゴリズムの正当性は理論的に証明することが困難なため移動ロボットの初期位置姿勢を多様に変え、その多くのシミュレーション事例を通して本アルゴリズムの有効性を確認した。多くのシミュレーション事例において本アルゴリズムが有効に動作する事例とうまく座標系原点に収束しない動作事例とを比較分析し、うまく機能してくれない動作事例から読み取れる一般的特質を整理した。この特質とその克服については次節で述べる。

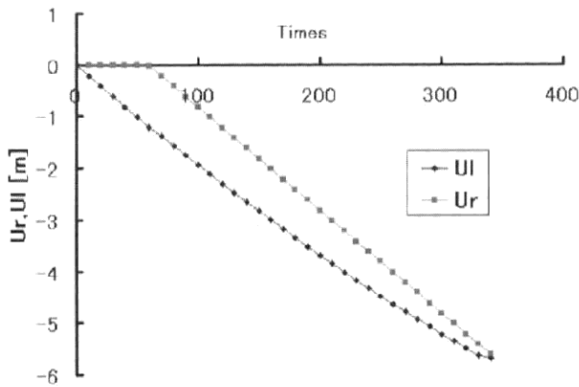
まずは前節で述べた繰り返し順変換を用いて生成した移動ロボットの移動経路シミュレーション事例を示す。図4(a)は移動ロボットにおいてその初期位置 $G(x_0, y_0, \theta_0)$ を $x_0=4m, y_0=3m, \theta_0=0deg$ として与え、座標系原点である目標点へ収束させたときのロボットの移動経路の様子である。移動ロボットの姿勢 θ とその目標姿勢 ϕ の変化の様子、そして両車輪の回転の様子も合わせて示す。移動初期においてロボットは左車輪だけを駆動し、その姿勢を目標姿勢に合わせてその後は目標とする姿勢を保ちながら、後退運動を中心として、原点に向かって移動している。図4(a)はパラメータとして $k=2$ を与えた事例である。パラメータ $k=8$ を与えた事例を図5に示す。パラメータ k を大きく与えることによりロボットは急旋回してより速く x 軸に近づいていくことがわかる。図6はロボットの初期姿勢として $x_0=4m, y_0=3m, \theta_0=180deg$ を与えた場合である。このときロボットは左車輪を多く駆動してしばらく前進してロボットの姿勢 θ を目標姿勢 ϕ に移した後に後退運動により原点へ移動している。移動ロボットが第2象限に位置する $G(x_0=-4m, y_0=3m, \theta_0=180deg)$ 場合のシミュレーション結果を図7に示す。この場合にはロボットはしばらく後退し、



(a) $x_0=4m, y_0=3m, \theta_0=0deg, k=2, W=1m$



(b) Relationship between θ and ϕ



(c) Movements of Ul and Ur

Fig 4 Trajectory generation I

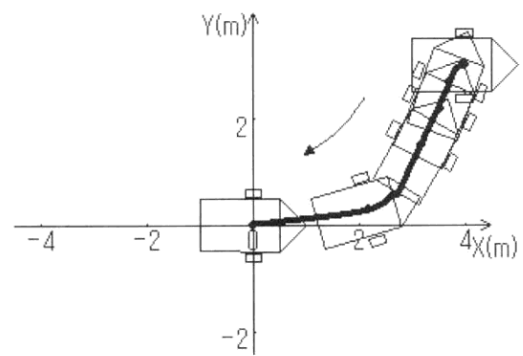
その後は前進運動により原点へ移動している。同様に $G(x_0=-4m, y_0=3m, \theta_0=270deg)$ の場合のシミュレーション結果を図 8(a) に示す。この場合もロボットはしばらく後退し、その後は前進運動により原点へ移動しているがロボットは $270deg$ 回転することになる。図 8(a) の結果はロボットの姿勢 θ とその目標姿勢 ϕ との評価を式 (7) で与えているが下式 (8) で与えることも考えられる。

$$(\phi_i - \theta_i - 2\pi)^2 \rightarrow \min \quad (8)$$

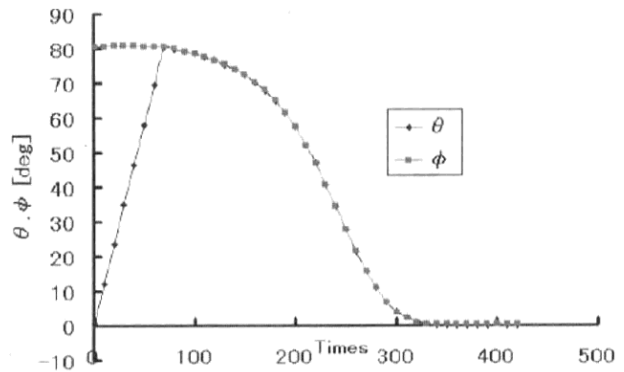
この場合にロボットは $+90deg$ だけ回転して目標とする原点へ移動することになる。このときのシミュレーション結果を図 8(b) に示す。この場合の最終的な移動ロボットは図 8(a) と同じであるが移動ロボットの回転方向と回転量が異なってくる。以上のような移動ロボットの移動経路を見ると、目標の位置と姿勢を与えるだけで移動ロボットの前進、後退、旋回の 3 つの動作を自動的に含み、人が車を操縦するときの動作と非常によく似ており、こうした動作が実現できるアルゴリズムであることがわかる。

4. 本アルゴリズムがもつ問題点とその克服

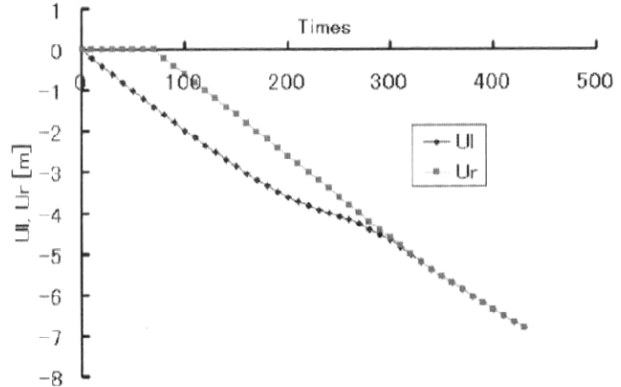
前述した繰り返し順変換を用いたアルゴリズムにおいて、移動経路中のロボットが移動する位置によってはロボットがゴールである原点



(a) $x_0=4m, y_0=3m, \theta_0=0deg, k=8, W=1m$



(b) Relationship between θ and ϕ



(c) Movements of Ul and Ur

Fig 5 Trajectory generation II

に到達できない場合がある。それはロボットが心地旋回できないために移動ロボットには最小回転半径 W が存在しており、このために目標点である原点近傍においてロボットの侵入経路にゴール侵入不可領域が存在するという事実と、それに加えてロボットの目標姿勢が 2 つ存在してしまう y 軸近傍にロボットが位置する場合である。多くのシミュレーション結果より本アルゴリズムがそのままうまく適用できない事例は以上の 2 つの場合に集約される。

移動ロボットには最小回転半径 W が存在しているために図 9 の斜線で示す半径 $W/2$ の 2 つの円の領域内に移動ロボットの中心 G 点が入ってしまった場合にはロボットが最小回転半径 W で旋回してもゴールである原点へ到達することはできない。また y 軸近傍に移動ロボットが位置しその姿勢を変更している間にロボット中心 G 点が y 軸をよぎるような場合にはロボットの目標姿勢 ϕ が大きく変化するために移動ロボットは不安定な自励振動を起してしまう。この 2 つの問題点を克服するために本研究では図 9 中の斜線部を示すようなゴール侵入不可領域と y 軸を挟んでそれと同じ幅の領域を設け、この領域にロボットが入った場合には座標系原点とは別に x 軸上にサブゴールを設けることとする。 x 軸上 $\pm 2W$ あるいは $\pm 3W$ の位置にサブゴールを設け移動ロボットをいったんサブゴールに向かわせ、その後ゴールである座標系原点へ到達させることとする。こうした考え方に基いてサ

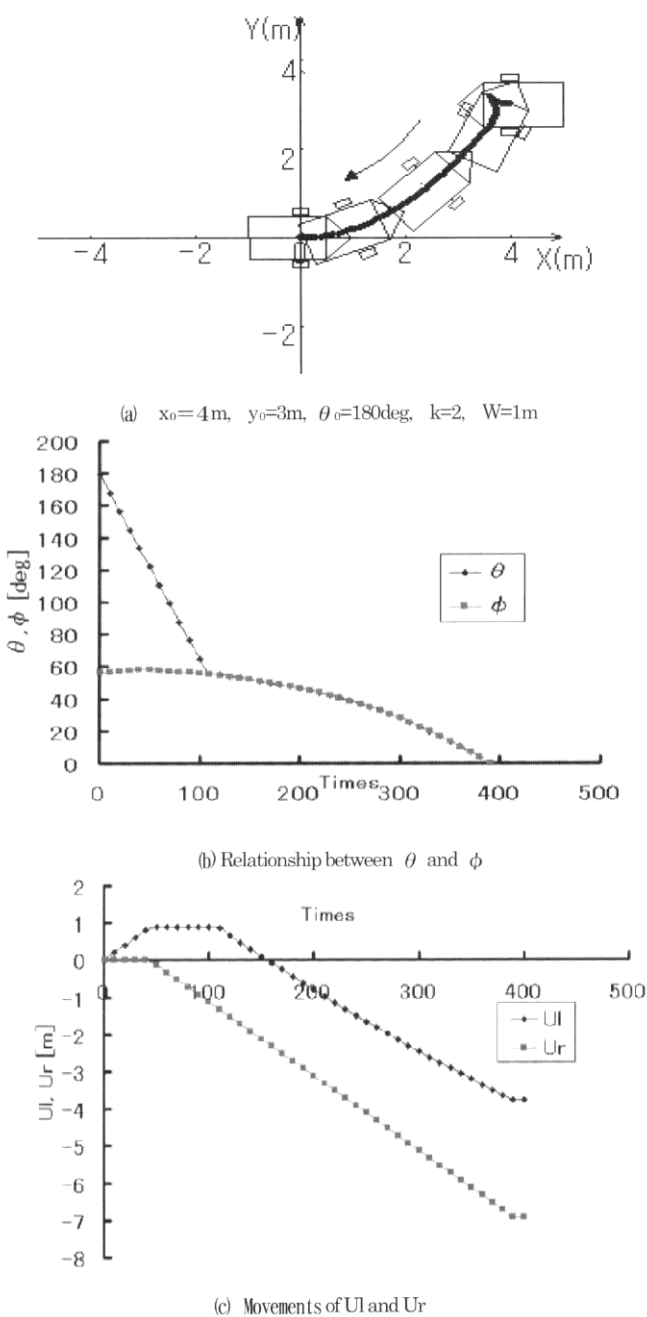


Fig. 6 Trajectory generation III

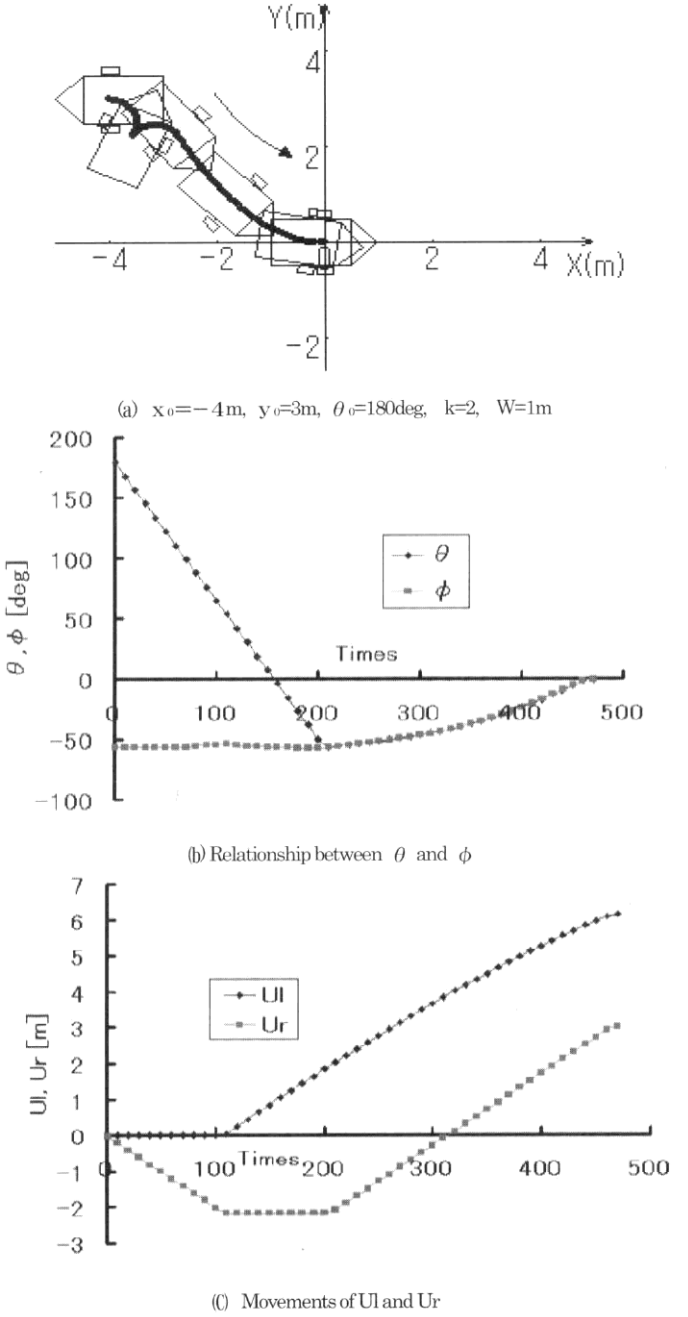


Fig. 7 Trajectory generation IV

サブゴールを設けたときのロボットの経路生成の事例を図 10 に示す。

サブゴールを設ければ y 軸上に位置する移動ロボットであっても容易に座標系原点へ収束させることができる。心地旋回不可能な車輪型移動ロボットに代表させる非ホノミックなシステムにおいては、いったんゴールより遠いサブゴールへ収束させなければならない場合が生じることはよく知られていることであり、このことが一般的な制御理論の適用を難しくしている要因でもある。

5. 考 察

5. 1 心地旋回可能な移動ロボットの場合

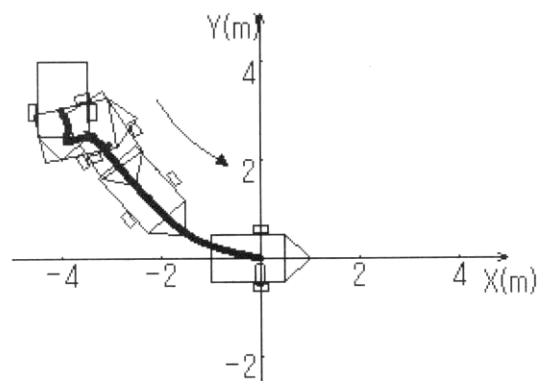
本研究で提案するアルゴリズムは心地旋回可能な移動ロボットに対しても適用可能である。この場合、ロボットの目標姿勢として $\phi = \text{atan2}(y, x/k)$ を与えることによりサブゴールの必要もなく図 11 に示すように y 軸上に位置する移動ロボットに対してもゴールである座標系原点へ収束させられる。この場合まずロボットはその姿勢を目標姿勢である $\phi = \pi/2$ に制御され、その後は後退しながら原点へ移動

している。この場合は原点で目標姿勢 $\phi = 0$ として与え、ロボットの姿勢を x 軸の正方向に合わせる必要がある。この事例からわかるように目標姿勢として $\phi = \text{atan2}(y, x/k)$ を与えることは移動ロボットの姿勢を大きく回転させることになり、決して効率が良いとはいえない。

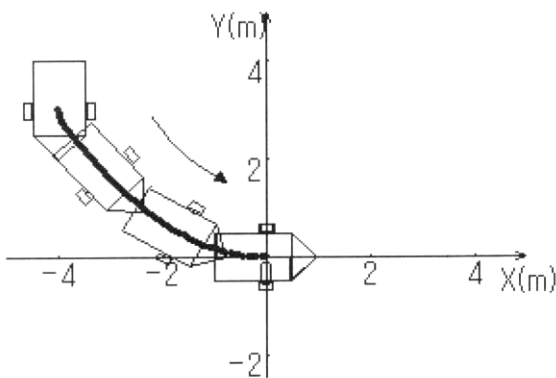
5. 2 移動ロボットの最小回転半径が $2W$ の場合

これまでは移動ロボットのもつ最小回転半径が W の場合を扱ってきた。最小回転半径が W であるとは、一方の駆動輪が回転しているときにもう一方の駆動輪が停止している場合である。移動ロボットを用いた作業の中にはロボットの最小回転半径をより大きく与えることが求められることもある。本研究では次に示すような駆動パターンをとる車輪型移動ロボットについても本研究で提案するアルゴリズムが適用可能であることを示す。

左輪	$-2\Delta U_l$	$-2\Delta U_l$	0	0	0	$+2\Delta U_l$	$+2\Delta U_l$
右輪	$-2\Delta U_r$	0	$-2\Delta U_r$	0	$+2\Delta U_r$	0	$+2\Delta U_r$
	後退	左旋回 後退	右旋回 後退	停止	左旋回 前進	右旋回 前進	前進



$G(x_0 = -4\text{m}, y_0 = 3\text{m}, \theta_0 = 270\text{deg})$
 $(\phi_i - \theta)^2 \rightarrow \min$



$G(x_0 = -4\text{m}, y_0 = 3\text{m}, \theta_0 = 270\text{deg})$
 $(\phi_i - \theta_i - 2\pi)^2 \rightarrow \min$

Fig 8 Two different Trajectories

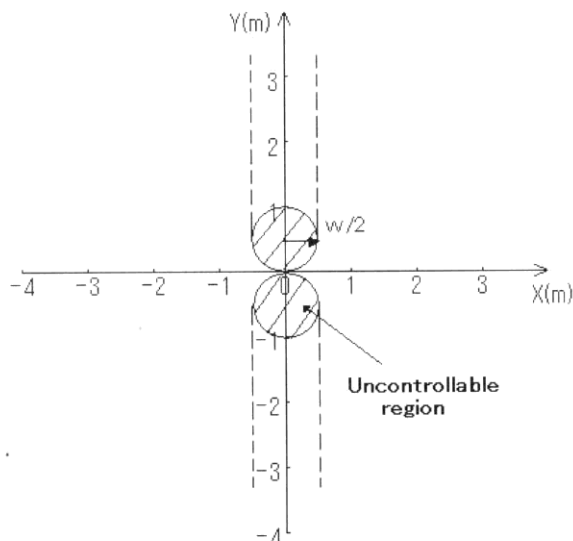


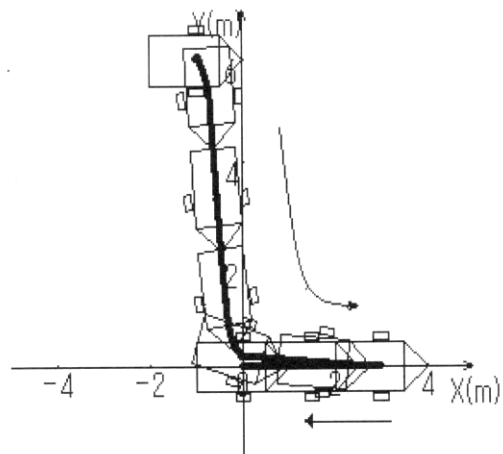
Fig 9 Uncontrollable region of a mobile robot

この一例を図12に示す。移動ロボットの最小回転半径が $2W$ にはなるが、同様の経路が生成できることがわかる。ただし図9で示すゴール侵入不可能領域は半径 W の2つの円領域に拡大される。

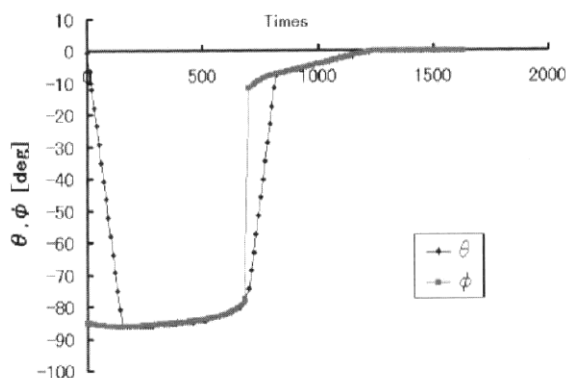
6. 結 言

本研究で得られた結論としては

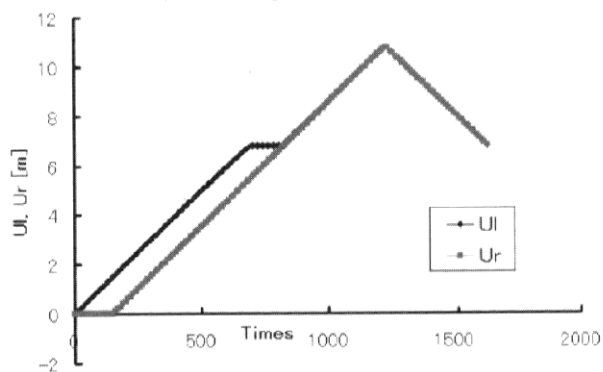
- 1) 非ホロノミックなシステムである独立二輪駆動型移動ロボット



(a) $x_0 = -1\text{m}, y_0 = 6\text{m}, \theta_0 = 0\text{deg}, k=2, W=1$



(b) Relationship between θ and ϕ



(c) Movements of U_i and U_r

Fig 10 Trajectory of mobile robot with sub - goal

に対して、繰り返し順変換という非常に簡単なアルゴリズムを適用することによりロボットの移動経路を生成することができる。

2) 本方法は、心地旋回が可能、不可能にかかわらず移動経路の生成が可能である。

3) 本方法は、最小回転半径に制限がある場合にも移動経路の生成が可能である。

のようにまとめることができる。

他方、車輪型移動ロボットのような非ホロノミックなシステムにおいては、目標点へ到達したときの誤差をその場合でゼロにすることは難しい。従って移動ロボット自身の位置決め誤差はロボットに搭載してあるマニピュレータで補償することが必要になってくるものと思われる。

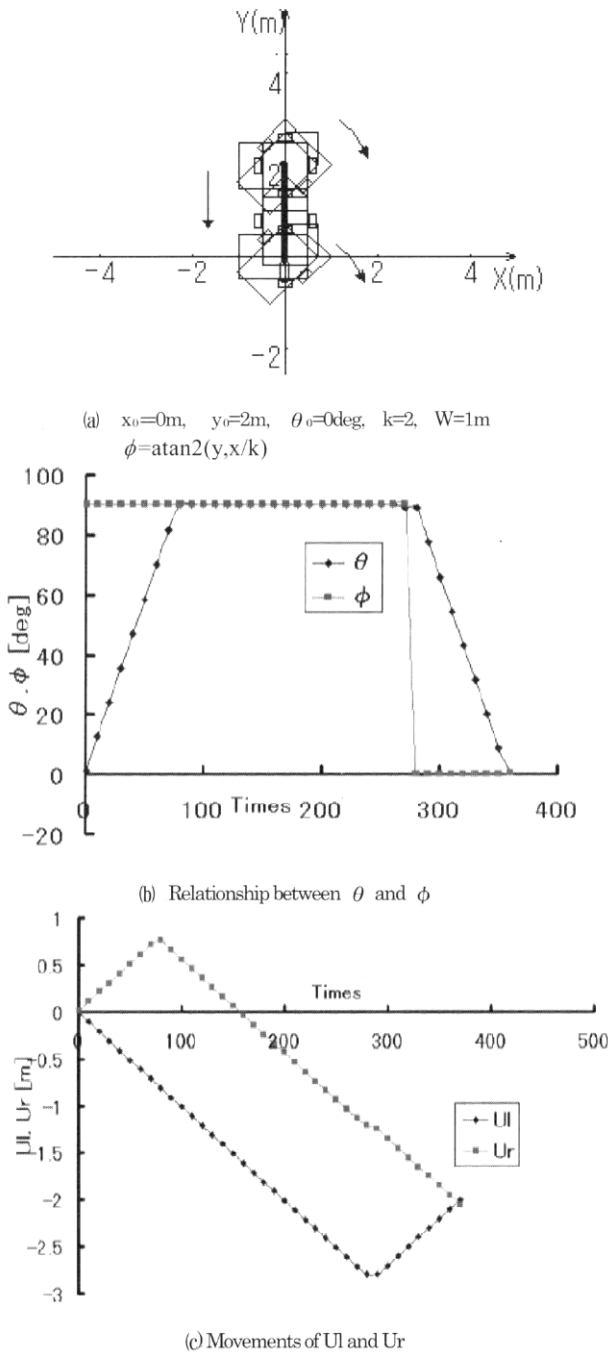


Fig 11 Trajectory of mobile robot that can rotate around its place
 参考文献

- 1) 鈴木昭, 成清辰生, H. D. Tuan, 原進: 未知ダイナミクスを含む非ホロノミック力学系の軌道追従制御, 計測自動制御学会論文集 37, 8, (2001) 763.
- 2) Y.Kanayama, Y.Kimura, F.Miyazaki and T.Noguchi: A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot, IEEE Proc. Robot Automation, (1990) 384.
- 3) G.Walsh, D.Tibury, S.Sastry, R.Murray and J.P. Laumond: Stabilization of Trajectories for Systems with Nonholonomic Constraints, IEEE Trans. Automat. Control, 39-3, (1994) 216.
- 4) R.Fierro and F.L.Lewis: Control of a Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics, IEEE Proc. Decision Contr. (1995) 3805.
- 5) R.Murray and S.Sastry: Nonholonomic Motion Planning: Steering Using Sinusoid, IEEE Trans. Automat. Control, 38-5, (1993) 700.
- 6) T.Hessburg and M. Tomizuka: Fuzzy Logic Control Lateral Vehicle Guidance, IEEE Control Systems Magazine 14, 4, (1994) 55.

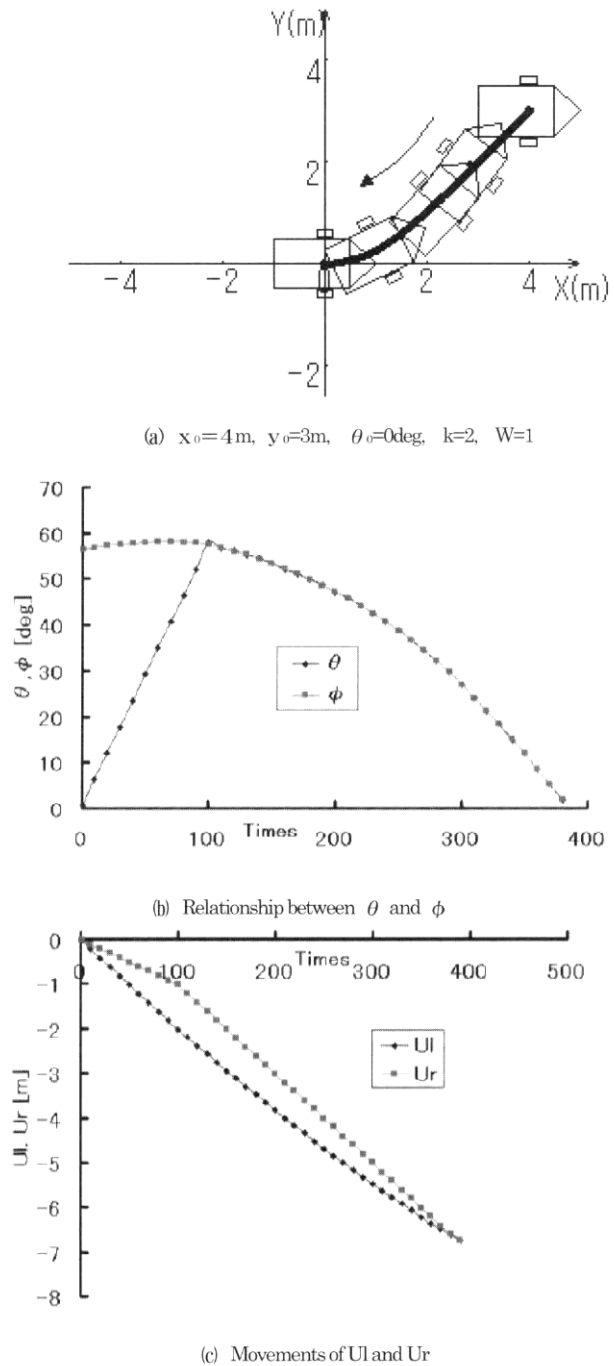


Fig 12 Trajectory generation V (minimum rotating radius=2W)

- 7) T.Shibata and T.Fukuda: Hierarchical Intelligent Control for Robotic Motion, IEEE Trans. on Neural Network 5,5, (1994) 823.
- 8) M.A.Arain, R.Tribe, E.An, and C.Harris: Action Planning for the Collision Avoidance System Using Neural Network, IEEE Proc. the Intelligent Vehicle's 93 Symposium (Tokyo, Japan, July) (1993) 119.
- 9) G.DeMuth and S.Springsteen: Obstacle Avoidance using Neural Network, IEEE Proc. the Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology (Washington, DC), (1990) 213.
- 10) 神谷好承, 久保哲也, 青柳誠司, 岡部左規一: 繰り返し順変換によるロボットの運動制御, 日本機械学会論文集 (c編), 59, 564, (1993) 125.
- 11) 宋祿波, 神谷好承, 関啓明, 疋津正利, 張勤: 繰り返し順変換による多関節型ロボットの逆運動学問題の解, 精密工学会誌, 67, 6, (2001) 971.
- 12) 宋祿波, 神谷好承, 関啓明, 疋津正利, 張勤: 多関節構造型を有する機械の軌道生成に関する考察, 精密工学会誌, 67, 12, (2001) 1966.