



Title	汎用ロボットトラクタのシステム開発に関する研究
Author(s)	木瀬, 道夫
Citation	北海道大学大学院農学研究科邦文紀要, 25(1), 1-60
Issue Date	2003-03-24
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/5614
Type	bulletin (article)
Note	北海道大学博士論文 (2002) Doctorial thesis submitted to the Graduate School of Agriculture, Hokkaido University (2002)
File Information	25(1)_kise.pdf



[Instructions for use](#)

汎用ロボットトラクタのシステム開発に関する研究*

木 瀬 道 夫

(北海道大学農学研究科生物資源生産学専攻生物生産工学講座農用車両システム工学分野)

Development of General-Purpose Robot Tractor*

Michio KISE

(Laboratory of Agricultural Vehicle Systems Engineering, Research Group of Bioproduction Engineering, Division of Bioresources and Product Science, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University)

I. 緒 論

A. 研究の背景

a. 研究の意義

「無人トラクタは必要か？」

他の研究者や農業機械関係者からこのような指摘を受けることがある。「無人トラクタは農家の仕事を奪ってしまうのではないか?」「農業従事者にとってはトラクタの運転こそが一番楽しい作業であり、無人トラクタは彼らの楽しみを奪うことになるのではないのか?」「これは現場のニーズに即した研究といえるのか?」と言うのが彼らの意見である。

ここに幾つか興味深い事例がある。著者は、平成10年度から12年度まで、NEDO 地域コンソーシアム研究開発事業「大規模農業向け精密自律走行作業支援システムの開発研究」との産・官・学共同プロジェクトにおいて、無人トラクタの研究開発に携わった。その一環として、北海道の農家を対象にロボットトラクタに関するアンケートを実施した¹⁾。このうち「無人トラクタを使ってみたいか」、「無人トラクタに求める要素は何か」という問いに対する回答結果を Fig. 1.1 に示した。「無人トラクタを使ってみ

たいか」という問いに対して、「使ってみたい」と答えた人の割合は54%であり、「わからない」まで含めると87%に達した。

これは実に2人に1人以上の農家の人々が、価格などの条件を満たすならば無人トラクタを使ってもよいと考えていることを表わしている。そして「使ってみたい」と回答した人々が挙げた「無人トラクタに求める要素」とは、経済性(価格)、操作性、信頼性、安全性、そして走行精度であった。

また University of Illinois では農業従事者に実際にロボットトラクタを体験してもらうことを試みた²⁾。本試験の被験者は55歳、同大学研究ほ場の管理責任者である。彼はその職業柄、一般の農家よりは研究やコンピュータに関わる機会が多いものの、長年の農業に対する経験から慣行の農作業を好み、またトラクタを運転することに楽しみを感じる農業従事者の一人でもある。被験者はマシンビジョンによる大豆のカルチベータ作業を体験した。マシンビジョンで取得した NIR 画像を用いて作物列を認識し、運転者がハンドルを握ることなく作物列を追従することができる。実験当日、供試ほ場は雑草が繁茂し、人間の目にも雑草と作物を区別するのが困難な状況にあった。

作業開始前、彼は半信半疑であった。熟練者の彼にとっても厳しいと思われる作業を、カメラを用いたシステムで処理することが可能なのか?

*北海道大学博士論文 (2002)

Doctorial thesis submitted to the Graduate School of Agriculture, Hokkaido University (2002)

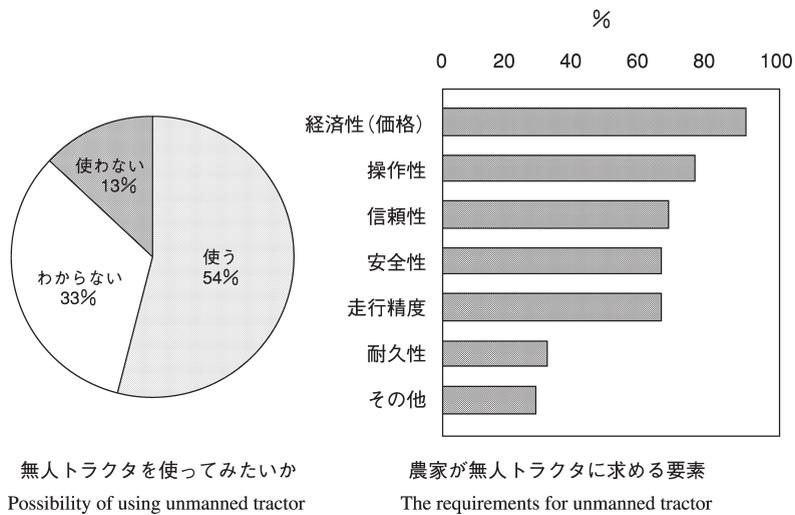


Fig. 1.1 The result of questionnaire on unmanned tractor to farmer

しかし作業が進むにつれ、彼の疑いは驚きへと変わった。彼を乗せたロボットトラクタは、人間の視覚能力では困難と思われた作業を、18 km/hという高速度で完遂してみせたのである。作業終了後、彼は担当者を質問攻めにし、次はぜひ自分一人でやってみたいと言い出したのであった。

これらの事例から幾つかのことがわかる。ロボットトラクタを導入してもよいと考える農家が少なからず存在するという。そうでない農家も、ロボットトラクタによる作業を一度体験することによって、ロボットトラクタに対する考え方が変わる可能性があるということ。つまり既存の農家にロボットトラクタによる新しい農業体系が受け入れられる環境が整備されつつあるといえる。

b. 無人トラクタの利点

先のアンケートで回答者が挙げた「無人トラクタに必要な要素」には、ロボットトラクタの利点がよく反映されている。例えば Reid はロボットトラクタの利点は生産性と安全性の向上にあると述べている³⁾。Reid の言う生産性の向上とは、ロボットトラクタを使うことによって、1) ほ場作業量 (field capacity) が増加する、2) 昼夜・環境を問わず作業できる、3) 複数のトラクタを同時に操作できる、ことにある。

1) のほ場作業量は単位時間あたりに行うことができる作業量を面積で表わしたものであり、これは作業速度と作業幅に比例する。ロボットトラクタは慣行の農作業と比較して高速作業が可能である。また高精度で作業できることから隣接作業において重複幅を小さくできる。これらはいずれもほ場作業量の増加を意味する。

また夜間に作業ができることは、作業に要する期間を短縮することを可能にする。これは例えば天候が変わりやすい春先の播種作業、収穫時期が品質に影響するような作物の収穫作業に対して大きな利点となる。3) の無人トラクタの群管理システムは一人で管理することができるほ場面積の拡大につながり、大規模経営に対応可能となる。また慣行では2人で行う作業、収穫作業におけるコンバインと運搬トラックの運転などの作業を1人で行うことができる。これらはアンケートの結果での「経済性」が無人トラクタによって向上することを意味する。

次に「安全性」についてであるが、農作業中の事故件数は他の産業のそれと比較して格段に多い。北海道における農作業中の死亡事故の割合は、死亡千人率で0.1%に達すると報告もあり、これは北海道の道路交通事故死亡率とほぼ一致する⁴⁾。これらの事故の多くがトラクタの転倒や座席からの転落、または機械に手足を巻き込むことに起因し、大部分の事故がトラク

タと接触することによって発生している⁵⁾。無人トラクタは作業中のトラクタに近づく必要がないため、このような事故は起こり得ない。さらに接触事故だけではなく、薬剤散布作業で農薬を浴びる危険性を回避することもできる。また農作業中の事故で体に障害を負い慣行の農作業に従事することが不可能になった人々でも、ロボットトラクタによって農業の現場に復帰することも可能になると Reid は指摘している。

この他、ロボット技術の一部である枕地旋回機能のみを自動化することにも利点がある。これは次行程への目印が無く、かつ作業幅の大きい播種などの作業に有効である。また全作業における枕地旋回に要する時間の割合は意外に大きい。高速かつ精度の高い旋回を行うことは旋回時間を短縮し、ほ場効率 (field efficiency) を向上させることができる。

完全無人化されたトラクタならばキャabinは不必要となる。これはコスト削減につながり、またキャabinの代わりに薬剤散布のタンクや収穫用のバケットなどを設置することで一回の作業容量を増やすことができる。John Deere 社ではキャabinのない果樹園用の無人トラクタを試作している⁶⁾。

B. 既往の研究

a. 農業用自動走行車両の開発の歴史

Table 1.1 は現在までに農業用に開発された自動走行車両を年代順にまとめたものである。ただし、ここでは無軌道車両のみを扱うものとし、軌道上を走行するガントリーなどは対象外とした。農業用自動走行車両の開発の歴史は古く、1920年代まで遡ることができる。No.1 は1924年に発表されたものであるが、これは畝に沿って転動する第5輪とステアリングホイールをワイヤでつないで操舵することで畝に沿って走ることができ、おそらく世界で初めて開発された農業用自動走行システムである。No.2 は車両に接続したワイヤをほ場の一点に固定し、その点を中心に車両を円旋回させるユニークなシステムであり、必然的に作業領域は円を描く。Fig. 1.2 は No.5 の Agri-Robot であり、これはオランダの農機メーカー、Protec 社から市販化されたプラウ耕専用のロボットである。Agri-

Robot は前後対称構造であり、この写真では Agri-Robot は右から左に向かって作業をしている。枕地まで到達すると進行方向を逆転して往復耕を行う。前後に3つずつ転動輪を有し、それぞれが操舵用、枕地検出用、耕深調整用として機能する。

No.1 から No.7 まではすべて海外のシステムであり、日本での研究が始まるのは1970年代まで待たなくてはならない。日本で最初の農業用自動走行車両は、おそらく No.8 の自動コンバインであると思われる。これはすでに実用化していた自脱型コンバインの条にならった操向機能を横刈り方向にも拡張したものである。トラクタ作業の自動化に関しては、No.9 はイギリスで開発されたシステムを日本に持ち込んで操舵系に改良を加えて実験を行ったものであり、国内で独自に開発された自動走行トラクタは1982年に発表された No.10 のクラブステアリング車の自動耕うんシステムが最初のものである。

1990年代に入ると様々な種類の航法センサが導入され、精度の高い自律走行システムが開発される。No.12 の AGNAV システムは、トラクタの前後に取りつけた発振器が VHF 波を発信し、ほ場の4角に設置したリピーターがそれらの電波を受信して再びトラクタに送信することでほ場におけるトラクタ位置を計測する。No.13 はほ場外に設置した2台の CCD カメラによってトラクタに取りつけたマーカを認識して、あらかじめ設定した座標軸とマーカ間の角度を計測することで、両眼立体視法により位置計測を行う。また No.14 は圧電式振動ジャイロを用いたデットレコニングによる自動直進システムである。

1996年になると GPS (Global Positioning System) を用いたシステムが多く登場する。No.21, 22, 23, 29 に見られるように、その大半が FOG (Fiber Optical Gyroscope) や GDS (Geomagnetic Direction Sensor) などの方位センサと GPS を組み合わせて用いたものであるが、No.16 は4個の GPS をキャabin上部に取りつけて、車両の位置のみならず方位も GPS で算出する。また No.17 は CMU (Carnegie

Table 1.1 Chronology of developing agricultural automatic vehicle

No.	年次	システムの名称もしくは論文タイトル	代表開発者	作業内容	航法システム	備考
1 ⁷⁾	1924	Diagram systems	Wilrodt, F.L.	following furrows	wheel	
2 ⁸⁾	1939	Circle farming system	Sissons, R.	plowing	piano wire	circle farming
3 ⁹⁾	1959	“Automatic pilot” for farm tractors	Richy, C.B.	following rows	mechanical feeler	
4 ¹⁰⁾	1960	An automatic control system for farm tractors	Gilmor, W.D.	following furrows		
5 ¹¹⁾	1962	Agri-Robot	Sieling, C.	plowing	three wheels	
6 ¹²⁾	1966	Tractor “Driver” of the future	Ford		remote control	
7 ¹³⁾	1970	An automatic guidance system for farm tractors	Grovum, M.A.		gyroscope, displacement sensor	
8 ¹⁴⁾	1976	コンバインの自動化	金藤祐治			
9 ¹⁵⁾	1976	トラクタの自動走行	笈田 昭	プラウ耕	機械式センサによる既耕地認識	英国で開発されたものに操舵系の改良を加えた
10 ^{16),17)}	1982	クラブステアリング車による自動耕うん	堀尾尚志	耕うん	光電センサによる既耕地の識別	
11 ¹⁸⁾	1989	自動操向トラクタ	三竿善明	直進作業	マシンビジョン	
12 ¹⁹⁾	1990	Navigational Tractor Guidance System	Choi, C.H.		AGNAV, Wheel-speed	VHF
13 ^{20)–23)}	1993	学習機能を有した自律走行車両	石井一暢		視覚センサ, GDS	
14 ^{24)–26)}	1993	乗用田植機の走行制御	野波和好	田植	圧電式振動ジャイロ	
15 ^{27)–29)}	1996	誘導ケーブル式果樹無人防除機	戸崎紘一	スピードスレーヤ	誘導ケーブル	
16 ³⁰⁾	1996	Automotive tractor guidance using carrier-phase differential GPS	Stanford univ.		carrier-phase GPS	Vehicle heading was calculated by using four GPS antennas.
17 ³¹⁾	1996	Autonomous windrower	CMU	harvesting	vision	Autonomous guidance based on vision system
18 ³²⁾	1996	A robotic system for plant-scale husbandry	Tillet, N.D.		vision, wheel speed, GDS, inclination sensor	automatic guidance with smart sprayer
19 ^{33)–35)}	1998	耕うんロボット	行本 修	耕うん	トータルステーション, GDS	往復耕だけでなく回り耕も行う
20 ³⁶⁾	1998	飼料生産圃場における自律走行トラクタ	石田三佳	施肥・播種	FOG, 超音波ドップラ速度計	デットレコニング
21 ³⁷⁾	1998	Vehicle automation system based on multi-sensor integration	Noguchi, N.		DGPS, GDS, machine vision	Navigation sensors are selected by PDF.
22 ³⁸⁾	1999	自律走行トラクタ	井上慶一	耕うん	DGPS, FOG	カルマンフィルタによるセンサフュージョン
23 ³⁹⁾	1999	自動走行田植機	長坂禎一	田植	RTK-GPS, FOG	自動直進
24 ⁴⁰⁾	1999	Autonomous speed sprayer	Cho, S.I.		machine vision, ultra sonic sensor	obstacles detection by ultra sonic sensor
25 ⁴¹⁾	2000	Vehicle guidance parameter determination from crop row images	Pinto, F. A.C.		machine vision	
26 ⁴²⁾	2001	Machine Vision Based Steering System for Agricultural Combines	Benson, E.R.	Combine harvester	machine vision	
27 ⁴³⁾	2001	自動直進ロボット	水島 晃	自動直進	GDS, ジャイロ	GDS とジャイロのセンサフュージョン
28 ⁴⁴⁾	2001	傾斜草地における自動走行	玉城勝彦	施肥	GDS, 傾斜計, レーダドップラ式速度センサ	履帯車両による傾斜地での広幅施肥
29 ^{45),46)}	2001	RTK-GPS と FOG を用いたほ場作業ロボット	木瀬道夫	ほ場作業全般	RTK-GPS, FOG	



Fig. 1.2 “Agri-Robot”, unmanned plowing robot

Mellon University) が開発した自律走行ウィンドロワーであるが、ビジョンベースのシステムにもかかわらず完全無人作業が可能である。

この年表から、RTK-GPS や DGPS が普及し始めた 1995 年以降、これらの研究の方向性は目的と用途に応じて次の 3 種類に収束する傾向が見て取れる；

- 1) GPS をベースとしたシステム (No.16, 21, 22, 23, 29)
- 2) マシンビジョンを用いた作物列追従システム (No.17, 18, 24, 25, 26)
- 3) ジャイロなどの内界センサを用いたデッドレコニング (No.20, 27, 28)

これは RTK-GPS などの高精度 GPS の性能が、それらの普及する以前に開発された位置計測システムを計測精度や汎用性、利便性など多くの部分で凌駕することによる。例えば No.13 の視覚センサや No.12 の AGNAV はほ場ごとに CCD カメラやリピーターを設置する必要があり、また計測可能距離にも限界がある。No.15 の誘導ケーブル式はほ場にケーブルを埋設する必要があり、果樹園のような狭い環境には適しているが大規模ほ場における作業へ拡張することは困難である。唯一の例外は位置計測システムに自動追尾機能を備えたトータルステーションを採用した No.19 の自動耕うんロボットであるが、トータルステーションは追尾できる距離が 400 m と短く、かつ作業の度に通信システムを備えた基地局の設置を要することから、利便性と汎用性という点で GPS に劣る。

1) のシステムは理論的には 2) と 3) の機能を満たすことができるが、RTK-GPS などの高精度 GPS はマシンビジョンやジャイロなどと比較して高価であり、2) と 3) の研究例も多い。No.25 と No.26 はいずれも University of

Illinois で開発されたマシンビジョンによる自動走行システムであるが、直線 4.7 m/s、曲線 2.8 m/s の走行速度で作物列を追従することができる。No.28 は低コストな自動直進システムの開発を目的とし、GDS とジャイロを複合化することでセンサ精度、直進精度の向上を図った。No.18 はビジョンベースの作物列追従システムであるが、画像情報の更新速度が遅いため内界センサによるデッドレコニングを組み合わせている。また自律走行のみならず、スポット散布機能をも備える。No.21 は航法センサとして DGPS, GDS, マシンビジョンを有し、状況に応じてセンサを切り替えて用いることで信頼性の高い走行が可能である。No.18, No.21 共にセンサフュージョン手法として EKF (Extended Kalman Filter) を用いている。

C. 既往の研究の問題点

前節で紹介した既往の研究には、無人ほ場作業システムとして機能するために解決されなくてはならない課題が幾つか存在する。その課題とは、

- 1) 通年作業に対応できる汎用性
- 2) コストパフォーマンス
- 3) 無人作業中の安全性
- 4) 曲線経路に対する追従精度
- 5) 環境の変化や作業中のトラブルに対するロバスト性
- 6) 誰にでも使える操作性

に関する要素や機能を満たすことにある。これらは先のアンケートで回答者が挙げた「無人トラクタに必要な要素」と共通しており、農家がロボットトラクタに抱く不安と、現状のロボットトラクタが抱える問題点が一致する。

上記 1) と 2) に関して、無人トラクタの購入は農家にとって高価な買い物であり、単一作業だけのための無人作業機では採算があわない。アンケートの「無人トラクタに必要な要素」のうち、最も回答数が多かったのは「経済性」、つまり 2) のコストパフォーマンスの問題であった。ロボットトラクタシステムのハードウェアのうち、トラクタを除いて最も高価な機器は航法センサである。RTK-GPS を使用するシステムにおいては RTK-GPS が最も高価で

あり、無人トラクタのコストダウンには RTK-GPS の市場価格の下落が欠かせない。現在 RTK-GPS を含む GPS 製品はカーナビゲーションシステムなどを筆頭に急速に普及が進んでいる。また現在農協や町村規模でのベースステーション設置や仮想基準局 (VRS: Virtual Reference Station)⁴⁷⁾ といったインフラ整備が進んでおり、ベースステーションを個々に設置する必要がなくなると考えられる。Fig. 1.3 にトリンプル社における RTK-GPS 受信機の価格推移のグラフを表記した。このグラフからも年々 RTK-GPS 製品の価格が下落していく傾向を見て取ることができ、今後さらなる低価格化が予想される。

もう一つの大きな問題点は 3) の安全性である。無人トラクタが周囲の人間や障害物を認識して回避動作を行う機能を具備することは、安全の確保という点で不可欠である。無人トラクタが作業する環境を完全に隔離し、人や他の障害物が存在しない作業環境を整備することが無人作業にとっては一番都合が良いが、現実的には不可能である。

このようなロボットの安全機能は、障害物の認識、危険度の数値化、危険度に基づく回避動作の 3 つに分けて考えることができる。しかし、この分野の研究は特に障害物関知センサの開発の遅れに起因して、位置計測システムや操舵制御アルゴリズムの開発などと比較して遅れているのが現状である。農業機械分野におけるこれ

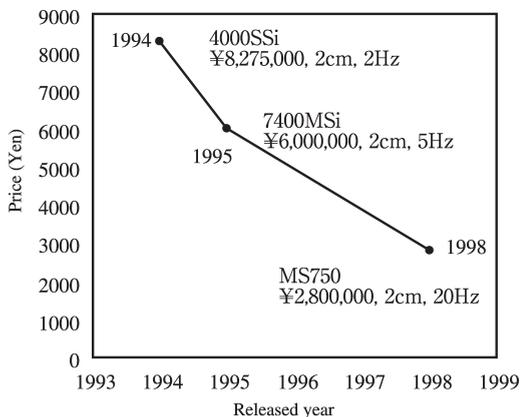


Fig. 1.3 The trend of GPS prices manufactured by Trimble Co. Ltd.

らに関する研究としては、門田らによる農業用ロボットの安全システムの開発^{48),49),50)}がある。ここで想定される環境は、マニピレータ型ロボットと人間が同じ作業空間内に混在し、両者が隣接した場所で協調作業を行う場合であった。門田らは人間とマニピレータの相対速度と距離をパラメータにもつ危険度関数を定義し、危険性の程度を数値化した。また超音波センサと赤外線センサを用いて人間の距離情報及び存在の有無を検出し、これらの情報を融合して背景と人間を区別するアルゴリズムを開発した。門田らの研究と本研究とは想定される状況が異なるが、マニピレータを無人トラクタに置きかえて考えることによって危険度関数の考え方とセンシングシステムを無人トラクタの安全システムとして応用することができる⁵¹⁾。

松尾らが開発した耕うんロボットは障害物への接触時に非常停止する機能を備えている⁵²⁾。ロボットトラクタ前部に装備したバンパスイッチが、障害物に接触すると非常停止機構が動作してエンジンが停止される仕組みである。このような機能は最終安全装置として前述の門田らの安全システムと共にロボットトラクタが具備すべき機能である。

4) に関して、ロボットトラクタが曲線経路への追従を可能にすることは矩形ほ場以外での作業や自由経路を走行させることが可能になり、無人作業システムとしての汎用性が増すことにつながる。さらにロボットトラクタの完成度を高めるためには、5) のシステムの信頼性、6) の操作性に優れたインターフェースを兼ね備えることが重要である。特に GPS を使うシステムでは、衛星を捕捉できない場合の対処法を用意する必要がある。既往の研究ではハードウェアの構築や走行アルゴリズムに関する議論が大半であり、5) や 6) に関する議論はあまりなされていない。しかしロボットトラクタの実用化を考えたとき、それが“誰でも使えるシステム”である必要があり、これら機能の充実と完備は欠かせない。

D. 研究の目的及び範囲

前節で列挙した現状のロボットトラクタの問題点を踏まえ、本システムはその作業対象を耕

うん、播種、管理作業、収穫など農地におけるトラクタ作業すべてに対応することを念頭に置いた。これまでに耕うんロボット、自動田植機など単一作業に限ったロボットシステムはいくつか発表されているが、本研究のように通年作業を対象とした“汎用ロボットシステム”はいまだ報告例がない。

本研究の自律作業システムとしてのキーテクノロジーは以下の5点に集約できる；

- 1) ハードウェアの構築
- 2) RTK-GPS と FOG のセンサフュージョンによる絶対方位の推定
- 3) 作業計画マップによるロボットトラクタの汎用化
- 4) 拘束条件を有した経路生成による枕地旋回精度の向上
- 5) 最適制御理論に基づいた操舵制御による曲線追従精度の向上

第II章では1) のロボットトラクタシステムのハードウェアについて述べる。ロボットトラクタを構成する機器は、ロボット機能を備えたトラクタ、航法センサとしてのRTK-GPS と光ファイバージャイロであるが、これら個々の機器の特徴と原理について詳述する。

第III章では2) のRTK-GPS と FOG のセンサフュージョンによる絶対方位の推定法について述べる。本研究の航法センサ、RTK-GPS と FOG はそれぞれ計測精度は優れているが、FOG は相対方位しか計測できないため、センサフュージョンによって両センサの座標系を一致させる必要がある。本研究では最小二乗法を適用したセンサフュージョンアルゴリズムを開発した。

第IV章は本システムが汎用ロボットシステムとして機能するためのキーテクノロジーである「作業計画マップ」の概念について説明する。作業計画マップは目標経路と共に作業やほ場の情報を合わせ持つ階層構造マップであり、作業の種類に応じてマップを変更することで様々な作業に対応することができる。

第V章では枕地旋回のための経路生成アルゴリズムを考案した。車両の特性に基づいた拘束条件を定義し、それらの拘束条件を満たすよう

に経路をスプライン関数によって生成する。枕地旋回を高精度かつ高効率に行うことは作業所要時間の短縮を可能にし、これはほ場効率の向上につながる。

第VI章は曲線経路の追従精度向上を目的として、最適制御を適用した操舵制御アルゴリズムを開発した。本アルゴリズムでは非線形運動モデルを考慮し、大舵角における運動にも対応できる。

最後にこれまでに実施した各種無人作業の結果について考察する。ここでの結果には研究ほ場である北海道大学北方生物圏フィールド科学センター生物生産研究農場のみならず、一般の農家のほ場で行った作業の結果についても含まれる。作業の精度のみならず、ユーザーインターフェースの操作性や、作業中のトラブルに対する信頼性についても考察し、開発したシステムの総合的な評価を行った。

II. ロボットトラクタのハードウェア

A. はじめに

Fig. 2.1 に本研究で構築したロボットトラクタの外観を、Fig. 2.2 にブロック図を示した。ロボットトラクタは供試車両、航法センサであるRTK-GPS と光ファイバージャイロ、さらにこれらを統括する制御コンピュータによって構成される。以下それぞれを構成する機器について説明する。

B. 供試車両

供試車両は、市販車(㈱クボタ MD77)をベースに㈱クボタがロボット車両用に改造を加えたものである。制御項目として、操舵、前進・停止



Fig. 2.1 The robot tractor

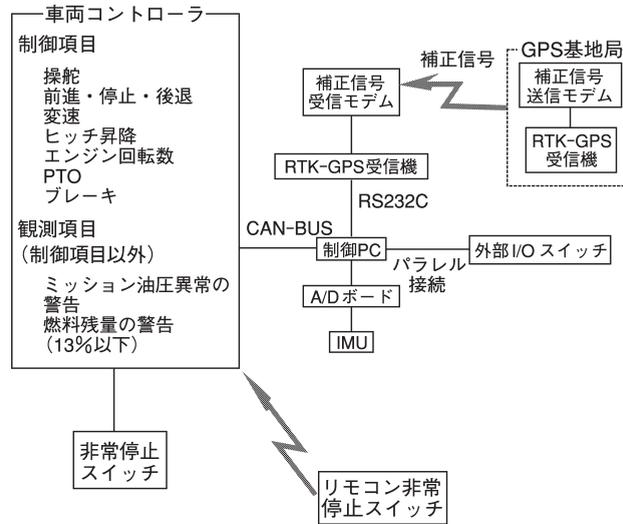


Fig. 2.2 Schematic diagram of the robot tractor

止・後退の切り替え、変速、3点リンクヒッチの昇降、エンジン回転数（8段階）、PTOのオン・オフ、ブレーキのオン・オフがコンピュータでコントロール可能である。またこれらの制御項目はすべて観測でき、その他にミッション油圧異常の警告、燃料が13%以下になると残量警告を発することができる。さらに安全対策として車体外部にエンジン非常停止ボタンを配し、またリモコンでもエンジンを停止することができる。これらの機能はトラクタに搭載された車両コントローラが制御する。車両コントローラはCAN-BUS⁵³⁾によって外部機器と通信されるため、制御コンピュータだけでなく、他のECUによっても制御することができる。

C. Global Positioning System

a. GPSの概要

GPS (Global Positioning System) は1970年代から米国国防総省 (DoD: Depart of Defense) によって軍事目的に開発された衛星測位システムである。GPSは時刻、天候、地域にかかわらず移動体の3次元絶対座標と、極めて正確な時刻同期を連続的に供給することが可能である。現在軍事目的のみならず、民生用としても広く利用されており、その用途は自動車のカーナビゲーションシステム、携帯電話の付加サービス⁵⁴⁾といった日常生活に身近なものから、船舶や航空機のナビゲーション、測量、

地形や自然環境の調査など多岐に渡る。近年無人トラクタのガイダンスシステムや、プレシジョンファーミングのためのGISなど、農業分野においても広く用いられている。

b. GPSの構成と測位原理

1) GPSの構成

Fig. 2.3にGPSの構成図を示した。GPSはスペースセグメント (Space segment)、コントロールセグメント (Control segment)、そしてユーザーセグメント (User segment) の3つの

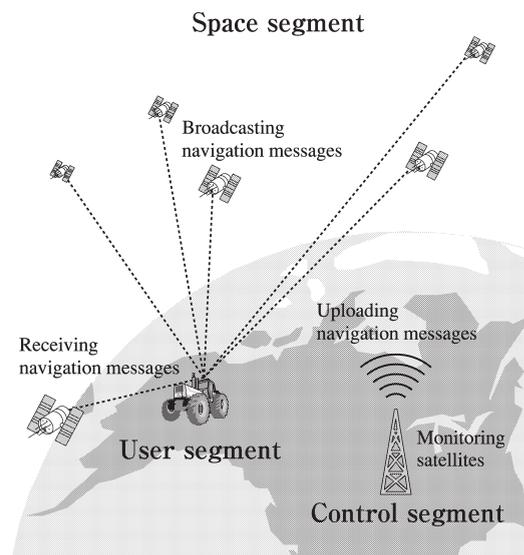


Fig. 2.3 Overview of GPS

システムで構成される。スペースセグメントとは地上 2 万 km の軌道上を周回する GPS 衛星のことを指し、2002 年 1 月現在、28 個の衛星が利用可能である。これらは軌道傾斜角約 55 度の 6 軌道にそれぞれ 4 もしくは 5 機ずつ配置され、その周回周期は 12 恒星時間 (約 11 時間 58 分 2 秒)、そして地球上のどの地点においても常に 4 個以上の衛星を捕捉できる。各衛星は 10.23 MHz の基準発振器を有し、L1 (10.23×154=1575.42 MHz) と L2 (10.23×120=1227.60 MHz) の周波数の異なる 2 種類の電波を地球に向けて発進している。

GPS の計測原理は、擬似距離 (Pseudorange) と呼ばれる衛星-GPS 受信機間の距離を測定することが基本となる。これは 2 つのコード、C/A コード (Coarse/Acquisition-code) と P コード (Precision-code) によって L1, L2 に変調された航法データを利用することで実現する。C/A コードは L1 のみに変調され、民間に使用が許可されている。一方 P コードは L1, L2 両搬送波に変調されているが、米軍と一部の許可されたユーザーのみが使用できる。航法データには衛星の搭載時計と軌道に関する情報の他、電離層補正データや他の衛星の軌道情報なども含まれる⁵⁵⁾。

コントロールセグメントは GPS 衛星を管理・運営する。その主なタスクは、GPS 衛星からの航法メッセージの監視と、新しい航法メッセージのアップロードである。

ユーザーセグメントは利用者側のシステムであり、GPS アンテナと受信機によって構成される。その測位方式の違いによって、単独測位、コード測位型 DGPS、搬送波位相測位型 DGPS など幾つかの種類があるが、これら測位方式の違いは次節で説明する。

2) 単独測位

GPS 測位では、擬似距離と呼ばれる衛星と地上の GPS 受信機間の距離を測定することが基本になることは先に述べた。単独測位は次式に従って擬似距離 R を算出する。

$$R = c(t_R - t^s) \quad (2.1)$$

ここで t_R は受信機が GPS 衛星の電波を受信

した時刻、 t^s は受信機が受信した電波を GPS 衛星が発信した時刻、 c は光速である。

しかし GPS 衛星、GPS 受信機両者の時計には常に誤差が存在する。ゆえに時刻 t における衛星 j と受信機 A 間の擬似距離 $R_A^j(t)$ は以下のように表わされる。

$$R_A^j(t) = \rho_A^j(t) + c\{\delta^j(t) - \delta_A(t)\} \quad (2.2)$$

ここで $\rho_A^j(t)$ は衛星 j と受信機 A 間の真の距離、 $\delta^j(t)$ 、 $\delta_A(t)$ はそれぞれ衛星と受信機時計の誤差である。擬似距離とは、 $R_A^j(t)$ が衛星と受信機の時計の誤差に起因する距離偏差を含むことに由来する。

一方、真の距離 $\rho_A^j(t)$ は次式で表わされる。

$$\rho_A^j(t) = \sqrt{\{X^j(t) - X_A(t)\}^2 + \{Y^j(t) - Y_A(t)\}^2 + \{Z^j(t) - Z_A(t)\}^2} \quad (2.3)$$

ここで $(X_A(t), Y_A(t), Z_A(t))$ は時刻 t のデカルト座標系における受信機座標、 $(X^j(t), Y^j(t), Z^j(t))$ は受信機が受信した衛星電波の発信時刻における衛星座標であり、時刻 t における衛星位置とは異なることに注意する必要がある。式 (2.3) を式 (2.2) に代入すると、次式が得られる。

$$R_A^j(t) = \sqrt{\{X^j(t) - X_A(t)\}^2 + \{Y^j(t) - Y_A(t)\}^2 + \{Z^j(t) - Z_A(t)\}^2} + c\{\delta^j(t) - \delta_A(t)\} \quad (2.4)$$

式 (2.4) には 5 つの未知数、 $X_A(t)$ 、 $Y_A(t)$ 、 $Z_A(t)$ 、 $\delta^j(t)$ 、 $\delta_A(t)$ が含まれるため、方程式が 5 式必要となる。これは複数の衛星を捕捉することで対応するが、捕捉衛星数を増やすごとに衛星時計の誤差 $\delta^j(t)$ の個数も増えるため、常に未知数の数が方程式数を上回ることとなる。そこで単独測位では、航法データに含まれる補正值を用いて $\delta^j(t)$ を次式のように近似する。

$$\delta^j(t) = a_0 + a_1(t - t_c) + a_2(t - t_c)^2 \quad (2.5)$$

a_0 、 a_1 、 a_2 、 t_c は航法データに含まれる補正值である。式 (2.5) を式 (2.4) に代入することによって式 (2.4) に含まれる未知数は 4 個とな

り、衛星を4機以上捕捉することによって解を得ることができる。

以上が単独測位の計測原理である。2年前まで単独測位の計測精度は100 m程度であったが、SAと呼ばれる精度劣化操作が2000年5月に解除されたため、その計測精度は10 mまで向上した。

3) コード測位型 DGPS

単独測位では、SAによる精度劣化操作は解除されたものの、衛星軌道の誤差や、電離層遅延などが測位精度を劣化させる要因となる。DGPS (Differential GPS) は、位置が正確に分かっている定点に受信機をベースステーションとして設置し、ベースステーションからの補正データを基に測位精度向上を図る方式である。このうち本節ではコードに含まれる航法データを利用したDGPSについて説明する。

ベースステーションの受信機をA、測位対象となる移動体の受信機をBとする。するとAと衛星*j*間の時刻 t_0 における擬似距離は、

$$R_A^j(t_0) = \rho_A^j(t_0) + \Delta\rho_A^j(t_0) + c\{\delta^j(t_0) - \delta_A(t_0)\} \quad (2.6)$$

となる。ここで、 $\Delta\rho_A^j(t_0)$ は衛星軌道誤差に起因する誤差である。すると時刻 t_0 におけるAがBに送信する補正データPRC (Pseudorange Correction) は、

$$\begin{aligned} \text{PRC}^j(t_0) &= -R_A^j(t_0) + \rho_A^j(t_0) \\ &= -\Delta\rho_A^j(t_0) - c\{\delta^j(t_0) - \delta_A(t_0)\} \end{aligned} \quad (2.7)$$

で表わされる。一方、任意の時刻 $t(t > t_0)$ のPRCは、式(2.7)にRRC (Range Rate Correction)を考慮することによって、次式で表わすことができる。

$$\begin{aligned} \text{PRC}^j(t) &= \text{PRC}^j(t_0) + \frac{d(\text{PRC}^j(t_0))}{dt}(t - t_0) \\ &= \text{PRC}^j(t_0) + \text{RRC}^j(t_0)(t - t_0) \end{aligned} \quad (2.8)$$

つまり、PRCのみならずRRCを送信データに含ませることによって、補正データの寿命を延長することができる。

一方、時刻 t のBにおける擬似距離は、次式

で表わされる。

$$R_B^j(t) = \rho_B^j(t) + \Delta\rho_B^j(t) + c\{\delta^j(t) - \delta_B(t)\} \quad (2.9)$$

式(2.9)にPRCを適用すると、

$$\begin{aligned} R_B^j(t)_{\text{corr}} &= R_B^j(t) + \text{PRC}^j(t) \\ &= \rho_B^j(t) + \{\Delta\rho_B^j(t) - \Delta\rho_A^j(t)\} \\ &\quad - c\{\delta_B(t) - \delta_A(t)\} \end{aligned} \quad (2.10)$$

となる。この処理によって衛星時計の誤差を相殺することができる。また衛星-受信機間の距離と比較して、両受信機間の距離が非常に短いことから、

$$\Delta\rho_B^j(t) \approx \Delta\rho_A^j(t) \quad (2.11)$$

とみなすことができる。式(2.11)を式(2.10)に代入すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} R_B^j(t)_{\text{corr}} &= \rho_B^j(t) - c\Delta\delta_{AB}(t), \quad \Delta\delta_{AB}(t) \\ &= \delta_B(t) - \delta_A(t) \end{aligned} \quad (2.12)$$

式(2.12)に含まれる未知数は4個であるから、AとBで共通の衛星を4機捕捉することによって、コード測位型DGPSによる測位は可能となる。コード測位型DGPSの測位誤差は約2 mである。

4) 搬送波位相測位型 DGPS

i) 搬送波位相

前節のコード型DGPSが航法メッセージをもとに擬似距離を算出したのに対し、搬送波移相型では搬送波の位相を利用して擬似距離を算出する。搬送波位相を測定することによってmmの分解能が得られ、またL1, L2両搬送波を利用して電離層の補正が行えることから測位誤差は数cmとなり、コード型と比較して格段の測位精度を得ることができる。このうちベースステーションと移動体双方で同時に搬送波位相を観測し、実時間で測位計算を行う方式をRTK-GPS (Real-Time Kinematic GPS)と呼び、本節ではRTK-GPSを念頭に置いてその測位原理を解説する⁵⁰⁾。

時刻 t において、受信機が受信する衛星からの搬送波位相 $\phi^s(t)$ は、

$$\phi^s(t) = f^s t - f^s \frac{\rho}{c} - \phi_0^s \quad (2.13)$$

と表わされる。ここで f^s は搬送波の振動数、 ϕ_0^s は初期位相、 ρ は衛星と受信機間の距離である。

一方、受信機時計（局部発振器）の位相は、

$$\phi_R(t) = f_R t - \phi_{0R} \quad (2.14)$$

で表わされ、 f_R は受信機時計の振動数、 ϕ_{0R} は初期位相である。 ϕ_0^s 、 ϕ_{0R} は両時計の誤差 δ^s 、 δ_R を用いて $\phi_0^s = f^s \delta^s$ 、 $\phi_{0R} = f_R \delta_R$ と表わすことができる。すると両位相の差分 carrier beat phase は、

$$\begin{aligned} \phi_R^s(t) &= \phi^s(t) - \phi_R(t) \\ &= -f^s \frac{\rho}{c} - f^s \delta^s + f_R \delta_R + (f^s - f_R) t \end{aligned} \quad (2.15)$$

となる。ここで $f^s \approx f_R$ とみなすことができ、これを f とおくと、式 (2.15) は、

$$\phi_R^s(t) = -\frac{f}{c} \rho - f(\delta^s - \delta_R) \quad (2.16)$$

と表わせる。以後 $\phi_R^s(t)$ のことを時刻 t における搬送波位相と呼ぶ。

初期時刻 t_0 について考える。このとき観測できる搬送波位相はその小数部であり、整数部 N は未知である。しかし N は連続的に衛星を捕捉するかぎり不変であるから、時刻 t における搬送波位相は、

$$\phi_R^s(t) = \Delta \phi_R^s(t) + N \quad (2.17)$$

と表わすことができる。 $\Delta \phi_R^s(t)$ は時刻 t における搬送波位相の小数部に t_0 からの波数増加分を加えたものであり、実際に観測される搬送波位相となる。また N は位相の整数値バイアスを表わし、アンビギュイティ (ambiguity) と呼ばれる。

$$\Phi = -\Delta \phi_R^s \text{ とおくと、}$$

$$\Phi = \frac{1}{\lambda} \rho + \frac{c}{\lambda} (\delta^s - \delta_R) + N \quad (2.18)$$

となる。ここで λ は搬送波の波長である。式 (2.18) を擬似距離の形で表わすと、

$$\lambda \Phi = \rho + c(\delta^s - \delta_R) + \lambda N \quad (2.19)$$

となる。

ii) 一重位相差と二重位相差

一重位相差では、二つの受信機、ベースステーション A と移動体 B 、そして一つの衛星 j について考える。式 (2.19) からベースステーション A と衛星 j 間の擬似距離は、

$$\begin{aligned} \lambda \Phi_A^j(t) &= \rho_A^j(t) + \Delta \rho_A^j(t) + \lambda N_A^j(t) \\ &\quad - c\{\delta^j(t) - \delta_A(t)\} \end{aligned} \quad (2.20)$$

ただし式 (2.6) 同様衛星軌道誤差 $\Delta \rho_A^j(t)$ を考慮した。また N_A^j は j 、 A 間の搬送波位相のアンビギュイティである。

すると搬送波位相は、以下の様になる。

$$\Phi_A^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_A^j(t) + \frac{1}{\lambda} \Delta \rho_A^j(t) + N_A^j + f\{\delta^j(t) - \delta_A(t)\} \quad (2.21)$$

同様に移動体 B と衛星 j 間の搬送波位相は、

$$\Phi_B^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_B^j(t) + \frac{1}{\lambda} \Delta \rho_B^j(t) + N_B^j + f\{\delta^j(t) - \delta_B(t)\} \quad (2.22)$$

と表わされ、両者の差分が一重位相差 (single-difference) となる。

$$\begin{aligned} \Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t) &= \frac{1}{\lambda} \{\rho_B^j(t) - \rho_A^j(t)\} \\ &\quad + \frac{1}{\lambda} \{\Delta \rho_B^j(t) - \Delta \rho_A^j(t)\} \\ &\quad + N_B^j - N_A^j - f\{\delta_B^j(t) - \delta_A^j(t)\} \end{aligned} \quad (2.23)$$

式 (2.11) と同様の処理を施すと式 (2.23) は、

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j - f \delta_{AB}^j(t) \quad (2.24)$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned} \Phi_{AB}^j(t) &= \Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t) \\ \rho_{AB}^j(t) &= \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t) \\ N_{AB}^j &= N_B^j - N_A^j \\ \delta_{AB}^j(t) &= \delta_B^j(t) - \delta_A^j(t) \end{aligned} \quad (2.25)$$

とおいた。一重位相差によって衛星時計誤差、衛星軌道誤差が相殺された。

次に二重位相差 (double-difference) について考える。ここでは先の受信機 A 、 B と衛星 j に加えて、衛星 k を導入する。すると k に対する一重位相差は式 (2.24) から、

$$\Phi_{AB}^k(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^k(t) + N_{AB}^k - f \delta_{AB}(t) \quad (2.26)$$

と表わされる。 j, k 両者の一重位相差の差分が二重位相差である。

$$\Phi_{AB}^k(t) - \Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \{ \rho_{AB}^k(t) - \rho_{AB}^j(t) \} + N_{AB}^k - N_{AB}^j(t) \quad (2.27)$$

二重位相差によって受信機時計の誤差が相殺された。式 (2.27) に含まれる未知数はアンビギュイティを除けば B の位置 ($X_B(t), Y_B(t), Z_B(t)$) の3個である。両受信機の共通捕捉衛星数を n_j とすると式 (2.27) の二重位相差は $n_j - 1$ 個作れるから、

$$\begin{aligned} n_j - 1 &\geq 3 \\ n_j &\geq 4 \end{aligned} \quad (2.28)$$

となり、RTK-GPS では最低4機の衛星を同時に捕捉することが必要となる⁵⁷⁾。アンビギュイティの決定⁵⁸⁾にはRTK-GPSではOTF (On The Fly) を用いるのが一般的である。OTFでは両搬送波の位相、C/Aコード、Pコードなど衛星から得られるすべての情報を利用してアンビギュイティを決定する。アンビギュイティを実数とみなしたときのアンビギュイティ、及び位置の推定値はfloat解と呼ばれ、アンビギュイティを整数として扱った場合はfix解と呼ばれる。

c. 平面座標系への座標変換

1) 座標変換の種類

GPS受信機から出力される位置情報は緯度・経度 (ϕ, λ) で表わされる。これは地球を楕円体と見なし、その楕円体表面上の点を角度で表現したものである。したがって、GPSをロボットトラクタやほ場マッピングなど実際のアプリケーションに応用するためには、これら楕円体上の点を平面に投影し距離系座標 (X, Y) に変換することが必要となる。

ここで重要なことは、楕円体座標から平面座標への変換のみならず、平面座標から楕円体座標への逆変換も可能にすることである。これらの座標変換について、その用途に応じて幾つかの手法が提案されている。その代表的なものにUTM (Universal Transverse Mercator Grid)

とUPS (Universal Polar Stereographic Grid) がある⁵⁹⁾。両手法共に米軍が採用する手法であり、UTMは北緯84°から南緯80°の範囲で用いられ、両極付近においてはUPSが用いられる。

2) UTM変換

UTMはTransverse Mercator (Gauss-Kruger) と呼ばれる投影手法を採用している。Fig. 2.4 (上図) に Transverse Mercator における楕円体と投影円柱の関係を表わした。一般的なメルカトル図法では、赤道に接する円柱に対して楕円体を投影するのに対し、Transverse Mercatorでは経線に接する円柱に対して投影を行う。つまり Transverse Mercator の投影円柱は、メルカトル図法の投影円柱に対して直交 (transverse) する位置関係にある。これらの投影円柱を平面に展開する際、メルカトル図法の投影誤差が両極に近づくにつれて増大するのと同じように、Transverse Mercatorでは接経線から経度方向に遠ざかるにつれて投影誤差が増

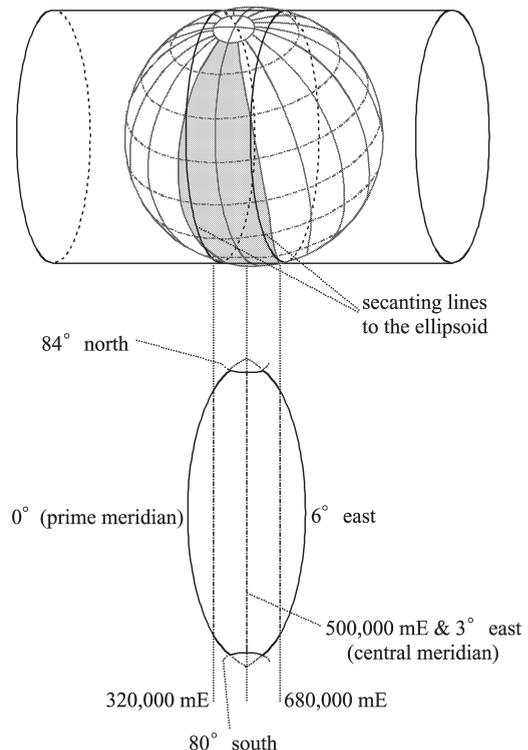


Fig. 2.4 Transverse Mercator projection (upper) and UTM coordinate of zone 1 (0~6° east) (lower)

大する。よって UTM では、Fig. 2.4 上図の着色部分で示した中心経線に対して $\pm 3^\circ$ の範囲を円柱に投影し、ゆえに地球を 60 の領域に分割して座標変換を行うこととなる。グリニッジ子午線（経度 0° ）から東経 6° までの範囲を zone 1 とし、以後東に 6° ずつ、zone 60（西経 $174^\circ \sim 0^\circ$ ）まで zone 番号は増加する。

UTM によって投影された座標系は中心経線を縦軸、赤道を横軸とする右手直交座標系で表わされ、縦軸は northing、横軸は easting と呼ばれる。Fig. 2.4 の下図は UTM 座標の zone 1 を表わしている。zone 1 はそれぞれ経度 0° 、東経 6° 、北緯 84° 、南緯 80° の各線に囲まれた領域となるが、easting には false easting と呼ばれる $500,000 \text{ m}$ (mE) のオフセット量が与えられ、また南半球における northing にも $1,000,000 \text{ m}$ の false northing が加えられる。これによって UTM の座標系はすべて第 1 象限で議論されることとなる。

Transverse Mercator では投影円柱は中心経線と接するが、UTM では Fig. 2.4 上図に示すように中心経線に対して $\pm 180,000 \text{ m}$ の地点において楕円体と交わる。ゆえに Transverse Mercator は中心経線において楕円体と投影図の距離（スケール）が一致し、一方 UTM では中心線に $\pm 180,000 \text{ m}$ 加えた $Y = 320,000 \text{ mE}$ 、 $Y = 680,000 \text{ mE}$ の両線においてスケールが一致する。

UTM では楕円体に WGS-84 を用いる⁶⁰⁾。Table 2.1 に WGS-84 に関するパラメータを記した。これらの値を用いて UTM による楕円体座標 (ϕ, λ) から平面座標 (X, Y) への変換式は、以下の様な開いた形の多項式で表わされる⁶¹⁾。

$$X = F_e + k_0 \left\{ \nu \cos \varphi \Delta \lambda + \frac{1}{6} \nu \cos^3 \varphi (1 - \tan^2 \varphi + \eta^2) \Delta \lambda^3 + \frac{1}{120} \nu \cos^5 \varphi (5 - 18 \tan^2 \varphi + \tan^4 \varphi + 14 \eta^2 - 58 \eta^2 \tan^2 \varphi) \Delta \lambda^5 + \frac{1}{5040} \nu \cos^7 \varphi (61 - 479 \tan^2 \varphi + 179 \tan^4 \varphi - \tan^6 \varphi) \Delta \lambda^7 + \dots \right\} \quad (2.29)$$

$$Y = F_n + k_0 \left\{ R(\varphi) + \frac{\tan \varphi}{2} \nu \cos^2 \varphi \Delta \lambda^2 + \frac{\tan \varphi}{24} \nu \cos^4 \varphi (5 - \tan^2 \varphi + 9 \eta^2 + 4 \eta^4) \Delta \lambda^4 + \frac{\tan \varphi}{720} \nu \cos^6 \varphi (61 - 58 \tan^2 \varphi + \tan^4 \varphi + 270 \eta^2 - 330 \eta^2 \tan^2 \varphi) \Delta \lambda^6 + \frac{\tan \varphi}{40320} \nu \cos^8 \varphi (1385 - 3111 \tan^2 \varphi + 543 \tan^4 \varphi - \tan^6 \varphi) \Delta \lambda^8 + \dots \right\} \quad (2.30)$$

ただし上式で用いた変数は以下のとおりである。

$$k_0 = \begin{cases} 0.9996 & (\text{UTM}) \\ 1.0000 & (\text{Transverse Mercator}) \end{cases} \quad \text{: スケールファクタ}$$

$$F_e = 500,000 \quad \text{: False easting}$$

$$F_n = \begin{cases} 0 & (\text{Northern Hemisphere}) \\ 10,000,000 & (\text{Southern Hemisphere}) \end{cases} \quad \text{: False northing}$$

$$\eta^2 = e'^2 \cos^2 \varphi$$

$$\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0 \quad \text{: 中心経線からの経度}$$

$$\lambda_0 \quad \text{: 中心経線の経度}$$

ν はグリニッジ子午線上の曲率半径を表わす。

Table 2.1 Numerical constants of WGS-84

$a = 6378137.00000 \text{ m}$	semimajor axis of ellipsoid
$b = 6356752.31425 \text{ m}$	semiminor axis of ellipsoid
$f = 3.35281066474 \cdot 10^{-3}$	flattening of ellipsoid
$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = 6.69437999013 \cdot 10^{-3}$	first numerical eccentricity
$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} = 6.73949674226 \cdot 10^{-3}$	second numerical eccentricity

$$\nu = \frac{a^2}{b\sqrt{1+\eta^2}} \quad (2.31)$$

また $R(\varphi)$ は経線方向の弧の長さである。

$$R(\varphi) = \alpha(\varphi + \beta \sin 2\varphi + \gamma \sin 4\varphi + \delta \sin 6\varphi + \varepsilon \sin 8\varphi + \dots) \quad (2.32)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{a+b}{2} \left(1 + \frac{1}{4} \nu^2 + \frac{1}{64} \nu^4 + \dots \right) \\ \beta &= -\frac{3}{2} \nu + \frac{9}{16} \nu^3 - \frac{3}{32} \nu^5 + \dots \\ \gamma &= \frac{15}{16} \nu^2 - \frac{15}{32} \nu^4 + \dots \\ \delta &= \frac{35}{48} \nu^3 + \frac{105}{256} \nu^5 - \dots \\ \varepsilon &= \frac{215}{512} \nu^4 + \dots \\ \nu &= \frac{a-b}{a+b} \end{aligned} \quad (2.33)$$

とする。一方、逆変換は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_f + \frac{\tan \varphi_f}{2\nu_f^2} (-1 - \eta_f^2) \left(\frac{\Delta X}{k_0} \right)^2 \\ &+ \frac{\tan \varphi_f}{24\nu_f^4} (5 + 3 \tan^2 \varphi_f + 6\eta_f^2 - 6\eta_f^2 \tan^2 \varphi_f \\ &\quad - 3\eta_f^4 - 9\eta_f^4 \tan^2 \varphi_f) \left(\frac{\Delta X}{k_0} \right)^4 \\ &+ \frac{\tan \varphi_f}{720\nu_f^6} (-61 - 90 \tan^2 \varphi_f - 45 \tan^4 \varphi_f - 107\eta_f^2 \\ &\quad + 162\eta_f^2 \tan^2 \varphi_f + 45\eta_f^2 \tan^4 \varphi_f) \left(\frac{\Delta X}{k_0} \right)^6 \\ &+ \frac{\tan \varphi_f}{40320\nu_f^8} (1385 + 3633 \tan^2 \varphi_f + 4095 \tan^4 \varphi_f \\ &\quad + 1575 \tan^6 \varphi_f) \left(\frac{\Delta X}{k_0} \right)^8 + \dots \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_0 + \frac{1}{\nu_f \cos \varphi_f} \left(\frac{\Delta X}{k_0} \right) \\ &+ \frac{1}{6\nu_f^3 \cos \varphi_f} (-1 - 2 \tan^2 \varphi_f - \eta_f^2) \left(\frac{\Delta X}{k_0} \right)^3 \\ &+ \frac{1}{120\nu_f^5 \cos \varphi_f} (5 + 28 \tan^2 \varphi_f + 24 \tan^4 \varphi_f + 6\eta_f^2 \\ &\quad + 8\eta_f^2 \tan^2 \varphi_f) \left(\frac{\Delta X}{k_0} \right)^5 \\ &+ \frac{1}{5040\nu_f^7 \cos \varphi_f} (-61 - 662 \tan^2 \varphi_f - 1320 \tan^4 \varphi_f \\ &\quad - 720 \tan^6 \varphi_f) \left(\frac{\Delta X}{k_0} \right)^7 + \dots \end{aligned} \quad (2.35)$$

ここで、 $\Delta X = X - F_e$ である。また φ_f は $(X,$

$Y)$ から中心経線 ($Y = 500,000$ mE) に対して垂線を下ろしたときの緯度を表わし、 ν_f, η_f はそれぞれ ν, η 中の φ を φ_f におき代えたときに得られる値である。

そして φ_f は次式で与えられる。

$$\varphi_f = \bar{Y} + \beta \sin 2\bar{Y} + \gamma \sin 4\bar{Y} + \delta \sin 6\bar{Y} + \varepsilon \sin 8\bar{Y} + \dots \quad (2.36)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= \frac{a+b}{2} \left(1 + \frac{1}{4} \nu^2 + \frac{1}{64} \nu^4 + \dots \right) \\ \bar{\beta} &= \frac{3}{2} \nu - \frac{27}{32} \nu^3 + \frac{269}{512} \nu^5 + \dots \\ \bar{\gamma} &= \frac{21}{16} \nu^2 - \frac{55}{32} \nu^4 + \dots \\ \bar{\delta} &= \frac{151}{96} \nu^3 - \frac{417}{128} \nu^5 + \dots \\ \bar{\varepsilon} &= \frac{1097}{512} \nu^4 + \dots \\ \bar{Y} &= \frac{Y - F_n}{k_0 \bar{\alpha}} \end{aligned} \quad (2.37)$$

以上が UTM による座標変換手法である。UTM (逆) 変換によって生じる変換誤差は数 mm である。

d. 供試 RTK-GPS

供試 RTK-GPS には (株) トリプル製 MS750 を採用した。MS750 は L1, L2 両波の位相、航法メッセージの観測が可能であり、アンビギュイティの同定には OTF を採用している。MS750 の計測精度は 2 cm、サンプリング周波数は 20 Hz である。RTK-GPS で取得したデータは、緯度、経度、位置データの質 (fix 解かどうかを表わす)、走行速度である。Fig. 2.5 に供試 RTK-GPS の外観を示した。

D. 光ファイバージャイロスコープ

a. 計測原理

車両方位計測装置として光ファイバージャイロ (FOG: Fiber optical gyroscope) を採用し

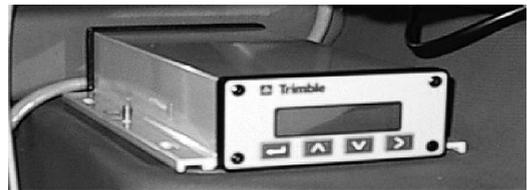


Fig. 2.5 The tested RTK-GPS

た。ジャイロスコープは質量がコリオリ加速度を持つことによって生じる慣性反力を利用してゐる。従来のジャイロスコープはコマの軸と軸受の摩擦や、製作に高精度を要し高価であるなどの多くの欠点が存在するのに対し、FOGはその構造上これらの欠点をすべて克服している⁶²⁾。

Fig. 2.6 に光ファイバージャイロの構造原理を示した。図中の円形光路にビームスプリッタを用いて右回り光及び左回り光を伝搬させる。この光学系が円形光路を含む面内で慣性空間に対し角速度 ω_f で回転すると両光波間に位相差が現れる。ここでビームスプリッタによって光路に導かれてから再びビームスプリッタに到達するまでに要する時間は、右回り光の場合、

$$t_r = \frac{2\pi r_c + r_c \omega_f t_r}{c} \quad (2.38)$$

で表わされ、左回り光の場合、

$$t_l = \frac{2\pi r_c - r_c \omega_f t_l}{c} \quad (2.39)$$

で表わされる。ここで、 r_c は円形光路の半径、 c は光速である。 $r_c \omega_f$ が c よりも十分小さいことを考慮すると、

$$\Delta t = t_r - t_l \approx \frac{4\pi r_c^2}{c^2} \omega_f = \frac{4S_c}{c^2} \omega_f \quad (2.40)$$

なる伝搬時間差が生ずる。位相差 Δf で表わすと、

$$\Delta f = \frac{4k_w S_c}{c} \omega_f = \frac{4\pi L_c r_c}{c\lambda} \omega_f \quad (2.41)$$

と表わすことができる。ここで S_c は光路の囲む面積、 k_w は波数、 L_c は光路の長さ、 λ は光の波

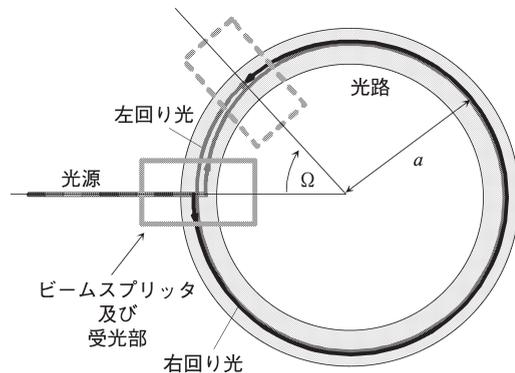


Fig. 2.6 Measurement principle of the FOG

長である。本効果をサグナック (Sagnac) 効果という。

サグナック効果の感度を向上させるには光路 L_c を大きくする必要があり、実際の FOG では光路である光ファイバーを何重にも巻いて L_c を長くとっている。光ファイバーは半径数 cm に巻きも破損せず有意な損失増も見られないことから、半径 r_c を 2~5 cm に保ったまま光路 L_c を数 km までにすることが可能である。適当な光学系を構成して Δf を高精度に測定し、式 (2.41) から ω_f を得るのが FOG の測定原理である。

b. 供試 FOG

供試 FOG (株式会社日本航空電子 JCS-7401A) は光ファイバージャイロと加速度計を 3 個ずつ内蔵した姿勢計測装置 IMU (Inertial Measurement Unit; 慣性計測ユニット) である。IMU の外観を Fig. 2.7 に、主要諸元を Table 2.2 に示した。IMU は 3 軸周りの角度と角速度を計測することができる。IMU から得られる車両の相対方位を自律走行のための航法データとして採用し



Fig. 2.7 The tested IMU

Table 2.2 Specifications of IMU

出力電圧	± 10	VDC
角度計測範囲	± 45	$^{\circ}$
角度計測精度	入力角の 1% + 0.2	$^{\circ}$
角速度計測範囲	± 100	$^{\circ}/s$
3 軸角速度精度	入力角速度の 3% + 0.1	$^{\circ}/s$
角度分解能	0.1	$^{\circ}$
角速度分解能	0.4	$^{\circ}/s$

た。また GPS アンテナをキャビン上部に取りつけたことから GPS データの傾斜補正を行う必要がある⁶³⁾。IMU によって計測される車両のロール角、ピッチ角のデータを用いて、アンテナ位置の傾斜補正を行った。

E. ま と め

本章では構築したロボットトラクタのハードウェアについて説明した。本研究のロボットトラクタは供試車両、航法センサである RTK-GPS と IMU、さらにこれらを統括する制御コンピュータによって構成される。

- 1) 供試車両は操舵、前進・停止・後退の切り替え、変速、3点リンクヒッチの昇降、エンジン回転数（8段階）、PTO のオン・オフ、ブレーキのオン・オフをコンピュータでコントロール可能である。
- 2) 位置計測システムには RTK-GPS を採用した。供試 RTK-GPS には(株)トリプル製 MS750 を採用した。MS750 の計測精度は 2 cm、サンプリング周波数は 20 Hz である。GPS から得られた位置情報は緯度・経度で表されるため、本研究では緯度・経度座標を UTM によって平面座標に変換することで m 単位によって表現された絶対座標を得た。
- 3) 車両方位の計測には 3 軸の FOG である IMU を採用した。IMU は光ファイバージャイロと加速度計を 3 個ずつ内蔵し、3 軸周りの角度と角速度を計測することができる。IMU によって計測される車両の相対方位を航法データとして、ロール角、ピッチ角を GPS アンテナ位置の傾斜補正に用いた。

III. センサフュージョンによる絶対方位の推定

A. 目的及び範囲

本章と次章ではほ場作業システムの中核機能である自律走行機能について報告する。車両の運動制御を行う場合、その運動モデルを構築する必要があるが、これは主に車両の角度と位置に関する情報で表現される⁶⁴⁾。ここで前者は車両の方位や角速度、または舵角などを指し、後者は車両位置や速度などを指す。このような情

報を取得するには位置計測システムと方位センサを組み合わせて用いるのが一般的かつ効果的であり、既存の研究の多くも複数のセンサを航法センサに採用したシステムを構築している。しかし異なるセンサを組み合わせて用いる場合、センサフュージョン⁶⁵⁾によって両センサの座標系を一致させる必要がある。農業機械分野におけるこれらの研究事例をいくつか挙げると、長坂らの自動走行田植機 (Table 1.1 中 No. 23)、行本らによる耕うんロボットシステム (同 No.19)、井上らによる DGPS とジャイロのセンサフュージョン (同 No.22) がある。長坂らの自動走行田植機は航法センサに RTK-GPS と FOG を採用しており、本研究で設定している航法センサの組み合わせと同様である。長坂らのシステムでは GPS アンテナを田植機の機体軸上の前部と後部の 2 点で摺動できる装置を試作し、走行開始前に 2 点間で位置計測を行うことによって FOG の初期値を決定した。

行本らの耕うんロボットは航法センサに光学追尾センサと地磁気方位センサを採用している。作業前にマニュアル走行では場区画を 1 周し、その間の走行軌跡データと方位データを教示データとすることで、両センサの座標系を一致させている。

井上らのシステムは DGPS と FOG のセンサフュージョンを実施している。FOG は地磁気方位センサに比べて計測精度は優れているものの、絶対方位を取得できない、さらにドリフトエラーを発生するという問題を有し、絶対方位が出力される地磁気方位センサと同一の方法を適用することは不可能である。井上らはカルマンフィルタを両センサの出力値に適用することによって、これらの問題を解決するだけでなく、DGPS の精度向上にも寄与させた。カルマンフィルタはノイズを含む観測値から状態量を推定することが可能であり、その利便性から近年様々な分野で応用されている⁶⁶⁾。

本研究ではこのような高精度なセンサのためのフュージョン手法として最小二乗法 (Least Squares Method ; LSM) を適用した手法を考案した。航法センサに RTK-GPS と FOG を用いるものとし、高性能センサを対象としたセン

サフュージョン手法として LSM が適しているかどうかを検討した。本手法の特徴は、既述の井上、長坂の手法と比較して；

- カルマンフィルタを使用しない、
- アンテナ摺動などの特別な装置を必要としない、
- RTK-GPS のデータを利用して FOG の初期オフセットや時間ドリフトの補正を行う、

等の点にある。

B 節では LSM のアルゴリズムについて、C 節ではシステムのシミュレーションを行い、カルマンフィルタとの精度の比較を行った。最後に LSM を適用した走行実験を行い、その走行精度を検討した。

B. センサフュージョンアルゴリズム

本方式の運動モデルを Fig. 3.1 に表した。本モデルは滑りを無視したモデルであり、 (X_k, Y_k) は時刻 k の GPS 座標系における車両の重心位置、 ϕ は北を 0° 、時計周りを正、 $\pm 180^\circ$ で表現される絶対方位、 V は車両速度である。時刻 $(k+1)$ の車両の重心位置 (X_{k+1}, Y_{k+1}) を以下の式で表わす。

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= X_k + \int_k^{k+1} V(t) \sin \phi(t) dt \\ &\approx X_k + \frac{1}{2} V_k \Delta t (\sin \phi_k + \sin \phi_{k+1}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

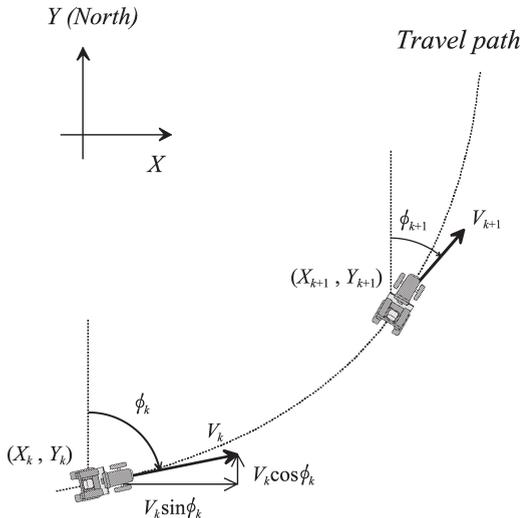


Fig. 3.1 The dynamics model

$$\begin{aligned} Y_{k+1} &= Y_k + \int_k^{k+1} V(t) \cos \phi(t) dt \\ &\approx Y_k + \frac{1}{2} V_k \Delta t (\cos \phi_k + \cos \phi_{k+1}) \end{aligned} \quad (3.2)$$

ここで Δt は時間刻みである。上式中の積分項は時刻 k から $k+1$ において連続時間で積分することを表している。また $V_k \approx V_{k+1}$ と仮定した。

ここで FOG によって計測される角度を ϕ_{fk} とすると ϕ_k は以下の式で表される。

$$\phi_k = \phi_{fk} + b_k \quad (3.3)$$

b_k は FOG バイアスを表し、絶対方位 ϕ_k を算出する上で FOG の初期偏差と時間ドリフトを補償する補正值となる。本研究で提案する手法はこの b_k の値を逐次求めることによって、車両の絶対方位を得ることにある。

さて、上述の運動モデルを用いて評価関数 I_k を以下の式で定義する。

$$\begin{aligned} I_k &= \sum_{i=k-N}^k \left[\left\{ X_i - X_{i-1} - \frac{1}{2} V_i \Delta t (\sin \phi_i + \sin \phi_{i-1}) \right\}^2 \right. \\ &\quad \left. + \left\{ Y_i - Y_{i-1} - \frac{1}{2} V_i \Delta t (\cos \phi_i + \cos \phi_{i-1}) \right\}^2 \right] \end{aligned} \quad (3.4)$$

ここで時刻 k から $k+1$ にかけての GPS 座標系における車両重心位置の運動をベクトルで表わす。

$$e_{P_k} = \begin{pmatrix} X_{k+1} - X_k \\ Y_{k+1} - Y_k \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

$$e_{\phi_k} = \frac{V_k \Delta t}{2} \begin{pmatrix} \sin \phi_k + \sin \phi_{k+1} \\ \cos \phi_k + \cos \phi_{k+1} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

e_{P_k} は位置を元に算出される運動ベクトル、 e_{ϕ_k} は方位を元に算出される運動ベクトルである。式 (3.5)、(3.6) を用いて I_k は以下のように表わすことができる。

$$I_k = \sum_{i=k-N}^k \left\| e_{P_{i-1}} - e_{\phi_{i-1}} \right\|^2 \quad (3.7)$$

つまり I_k は、車両重心位置の運動ベクトルを位置 (RTK-GPS)、方位 (FOG) それぞれを元に算出し、それらのサンプリングステップごとの差分を二乗和したものである。

最小二乗法によって推定される FOG バイア

ス値 b_k は,

$$\frac{dI_k}{db_k} = 0 \quad (3.8)$$

を満たす必要がある。また式 (3.4) 中の N は誤差関数 I_k で考慮するデータ点数であり、これを履歴時間として表わすと $N\Delta t$ となる。式

(3.8) は履歴時間 $N\Delta t$ 間の FOG バイアスを一定と仮定したとき、 I_k を最小にする b_k を求めることを意味する。 $N\Delta t$ は FOG の時間ドリフトに合わせて調整する必要があり、適切な $N\Delta t$ を選定することによって精度の高いバイアス値推定を行うことができる。

式 (3.4) に式 (3.3) を代入すると,

$$I_k = \sum_{i=k-N}^k \{ dX_i^2 + dY_i^2 + S_i^2 + C_i^2 - 2(dX_i S_i + dY_i C_i) \cos b_k + 2(-dX_i C_i + dY_i S_i) \sin b_k \} \quad (3.9)$$

を得る。ただし,

$$dX_i = X_i - X_{i-1} \quad (3.10)$$

$$dY_i = Y_i - Y_{i-1} \quad (3.11)$$

$$S_i = \frac{1}{2} V_i \Delta t (\sin \phi_{f_i} + \sin \phi_{f_{i-1}}) \quad (3.12)$$

$$C_i = \frac{1}{2} V_i \Delta t (\cos \phi_{f_i} + \cos \phi_{f_{i-1}}) \quad (3.13)$$

とおいた。

式 (3.8) に式 (3.9) を代入して,

$$\begin{aligned} \frac{dI_k}{db_k} = & 2 \sin b_k \sum_{i=k-N}^k (dX_i S_i + dY_i C_i) \\ & + 2 \cos b_k \sum_{i=k-N}^k (-dX_i C_i + dY_i S_i) = 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

となり、式 (3.14) から、 b_k は式 (3.15) によって計算することができる。

$$\tan b_k = \frac{\sum_{i=k-N}^k (dX_i C_i - dY_i S_i)}{\sum_{i=k-N}^k (dX_i S_i + dY_i C_i)}$$

$$b_k = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=k-N}^k (dX_i C_i - dY_i S_i)}{\sum_{i=k-N}^k (dX_i S_i + dY_i C_i)} \right) & (k > N) \\ \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=0}^k (dX_i C_i - dY_i S_i)}{\sum_{i=0}^k (dX_i S_i + dY_i C_i)} \right) & (k \leq N) \end{cases} \quad (3.15)$$

C. マニュアル走行データを用いたシミュレーション

a. カルマンフィルタを用いたアルゴリズム

比較対象としてのカルマンフィルタによるセンサフュージョン手法は前述の井上らの運動モデルを踏襲した。以下にそのアルゴリズムを紹介する。

本モデル (以下カルマンモデル) においては時刻 $(k+1)$ の車両位置 (X_{k+1}, Y_{k+1}) は以下の式で表わす。

$$X_{k+1} = X_k + V_k \Delta t \sin \phi_k \quad (3.16)$$

$$Y_{k+1} = Y_k + V_k \Delta t \cos \phi_k \quad (3.17)$$

式 (3.3) をそれぞれ式 (3.16), (3.17) に代入すると、両式は次の様に表わされる。

$$X_{k+1} = X_k + (V_{G_k} + \varepsilon_{V_k}) \Delta t \sin(\phi_{f_k} + b_k) \quad (3.18)$$

$$Y_{k+1} = Y_k + (V_{G_k} + \varepsilon_{V_k}) \Delta t \cos(\phi_{f_k} + b_k) \quad (3.19)$$

ただし V_G は GPS から得られる車両速度の観測値、 ε_V はその誤差である。ここで b_k, ε_{V_k} は十分小さい値とすると式 (3.18), (3.19) は以下で近似される。

$$X_{k+1} \approx X_k + \Delta t \sin(\phi_{f_k}) \varepsilon_{V_k} + V_{G_k} \Delta t \cos(\phi_{f_k}) b_k + V_{G_k} \Delta t \sin(\phi_{f_k}) \quad (3.20)$$

$$Y_{k+1} \approx Y_k + \Delta t \cos(\phi_{f_k}) \varepsilon_{V_k} + V_{G_k} \Delta t \sin(\phi_{f_k}) b_k + V_{G_k} \Delta t \cos(\phi_{f_k}) \quad (3.21)$$

式 (3.20), (3.21) を状態方程式表示すると、

$$\begin{bmatrix} X_{k+1} \\ Y_{k+1} \\ \varepsilon_{V_{k+1}} \\ b_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t \sin(\phi_{f_k}) & V_{G_k} \Delta t \cos(\phi_{f_k}) \\ 0 & 1 & \Delta t \cos(\phi_{f_k}) & V_{G_k} \Delta t \sin(\phi_{f_k}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ \varepsilon_{V_k} \\ b_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{G_k} \Delta t \sin(\phi_{f_k}) \\ V_{G_k} \Delta t \cos(\phi_{f_k}) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \xi_{V_k} \\ \xi_{\phi_k} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

と表される。なお ξ_{V_k} , ξ_{ϕ_k} は速度, 方位に関するガウシアンなシステムノイズである。

以上より, カルマンフィルタアルゴリズムは以下のようにまとめることができる⁶⁷⁾。

システム方程式; $x_{k+1} = A_k x_k + u_k + \omega_k$ (3.23)

観測方程式; $z_k = H x_k + v_k$ (3.24)

フィルタ方程式; $\hat{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k + u_k + K_k (z_k - H \hat{x}_k)$ (3.25)

ただし $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

カルマンゲイン; $K_k = A_k P_k H^T (H P_k H^T + R)^{-1}$ (3.26)

リカッチ方程式; $P_{k+1} = A_k [P_k - P_k H^T (H P_k H^T + R)^{-1} H P_k] A_k^T Q$ (3.27)

\hat{x} は推定値を表わし ω はシステムノイズ, v は観測ノイズであり, 両ノイズ共にガウシアン

を仮定する。 Q, R はそれぞれシステムノイズ, 観測ノイズの共分散行列となる。

b. シミュレーション結果

北海道大学北方生物圏フィールド科学センター生物生産研究農場にて走行データを取得した。直線と旋回を組み合わせた軌跡をマニュアル運転で走行し, その際に取得したデータに対してシミュレーションを行った。バイアス値 b_k を推定するために必要な変数は時刻 t , 位置 (X, Y) , 速度 V , 相対方位 ϕ_f であるが, このうち時刻は PC, 位置と速度は RTK-GPS, 相対方位は FOG からそれぞれ得た。

Fig. 3.2 にシミュレーションに用いたデータの走行軌跡を示した。図中右下から発進し, 約

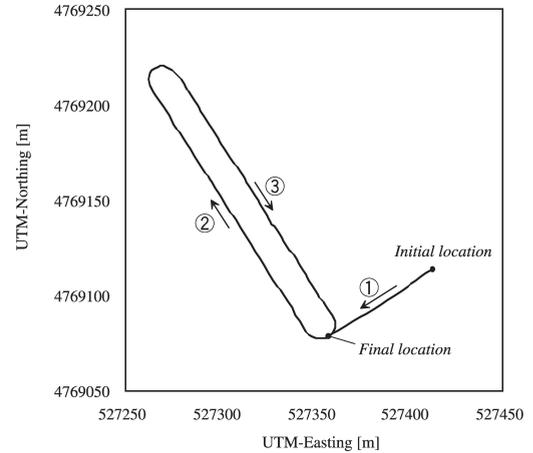


Fig. 3.2 The running trajectory of the simulation

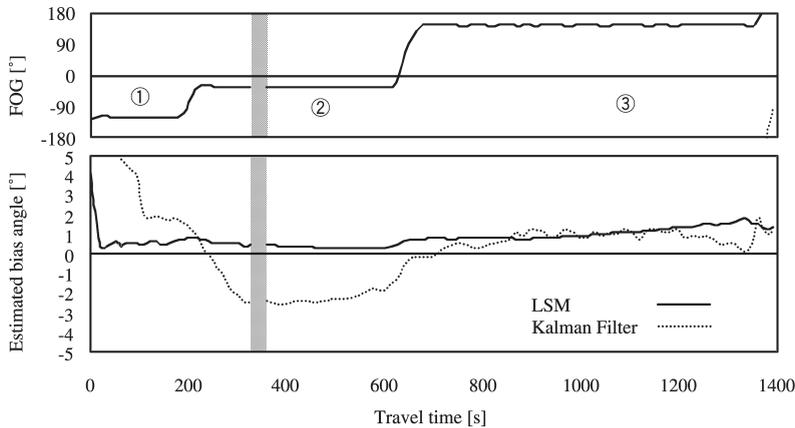


Fig. 3.3 The trajectories of estimated bias angle and FOG angle of the simulation

20×100 m のほ場の外周を1周したものである。本走行は3つの直線と3回の旋回で構成されており、それぞれの直線経路に便宜上①②③と順番をつけた。Fig. 3.3にこのときの走行時に取得したデータを用いたシミュレーション結果を示した。本シミュレーションにおいて $N = 3000$, $\Delta t = 0.1$ とした。LSM とその比較対象としてカルマンフィルタを用いた手法によって推定したバイアス値をそれぞれ表わした。また上図は FOG の実測値の推移であり、①②③の区間は Fig. 3.2 のそれと一致する。FOG の実測値を示したのは、走行軌跡において車両の進行方向が大きく変わった地点を理解するのを助けるためである。軌跡からも明らかのように、本走行では車両の進行方向が3回大きく変化する。また途中 325 秒から 365 秒までのグレイに着色された部分のデータが欠けているのは、GPS が fix 解を得られない場合を想定して計算を停止したことによる。

まず推定バイアス値の収束の速さに注目すると、LSM は走行開始直後 5° あった推定バイアス値が 10 秒後には 1° 付近に収束していることがわかる。一方カルマンフィルタは走行開始直後の推定バイアス値が 20° 近く存在し、3° 以下に収束するまでに 100 秒程要している。

次に車両の進行方向が大きく変化したときの推定バイアス値の挙動に注目してみる。車両の進行方向が大きく変化することは、大舵角における車両の挙動を表しており、運動が非線形となる。LSM, カルマンフィルタともに運動モデルとして滑りを無視したモデルを採用しているため、このときに誤差を生じる可能性が十分にある。本走行では 200 秒付近で 90°, 600 秒付近で 180°, 1300 秒付近で 100° 車両が方位を変えている。LSM においてはこの変化中、あるいは変化後に推定バイアス値に大きな変化は見られなかった。カルマンフィルタに関しては3度目の変化の際に 2° ほどの推定バイアス値の変化が見られる。また本走行において LSM の推定バイアス値と一致するのに約 600 秒要しているが、これは他の走行と比較して格段に遅い。この理由として走行の初期段階、すなわちカルマンフィルタが収束する前に大きく車両方位を変

化させたことが影響していると考えられる。

最後に走行全体に注目する。まず、fix 解が得られない場合を想定して 40 秒間計算を停止させたことに対する影響であるが、これは両システムともに大きな影響は見られなかった。また LSM の推定バイアス値は滑らかにほぼ直線で推移しているのに対し、カルマンモデルには細かなノイズが含まれているのがわかる。これはカルマンフィルタモデルが線形化のための三角関数の近似を行っている分、LSM の運動モデルと比較してモデル誤差が大きくなったことに起因すると予想される。また LSM とカルマンフィルタのバイアス値推定の全体的な傾向の相違は推定精度に起因するが、LSM の方が精度の高い推定が行われていることが明らかとなった。

D. LSM を用いた走行実験

LSM を用いて無人作業を行った。Fig. 3.4 にその時の走行軌跡を示した。播種作業を7行程行い、旋回には後退動作を含む切り返し方式を採用している。このときの設定走行速度は作業中が 0.6 m/s, 旋回中が 0.3 m/s とした。Fig. 3.5 にこのときの LSM による推定バイアス値と FOG の実測値の推移を示した。一連の行程に最大操舵角による旋回と後退動作を有するにもかかわらず、LSM はほぼ 0° 付近で収束

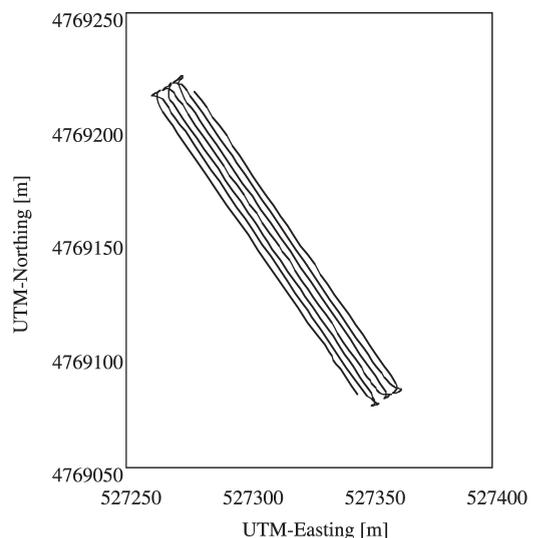


Fig. 3.4 The running trajectory of autonomous planting

している。LSMが計算アルゴリズムで考慮されていない最大操舵角時の非線形運動においても適切に機能したのは、LSMが過去の位置データを使用して積分系として機能するため、それがバッファの役割を果たしたものと推察される。また後退の際にはFOGの値に 180° を加えることで対応した。

推定されたFOGバイアス値の正当性を証明するため、推定車両方位を適用したデッドレコニングによる位置推定のシミュレーションを行った。時刻 k におけるデッドレコニングによる推定車両位置 (\hat{X}_k, \hat{Y}_k) は式(3.1), (3.2)から推定車両方位 $\hat{\phi}$ を用いて以下のように表わされる。

$$\hat{X}_k = X_0 + \frac{1}{2} \Delta t \sum_{i=1}^k (\sin \hat{\phi}_i + \sin \hat{\phi}_{i-1}) V_{i-1} \quad (k \geq 1) \quad (3.28)$$

$$\hat{Y}_k = Y_0 + \frac{1}{2} \Delta t \sum_{i=1}^k (\cos \hat{\phi}_i + \cos \hat{\phi}_{i-1}) V_{i-1} \quad (k \geq 1) \quad (3.29)$$

ただし (X_0, Y_0) はRTK-GPSから得られる車両の初期位置である。式(3.28), (3.29)を用いて推定された車両位置とRTK-GPSで得られた位置との間の距離を位置推定誤差とし、第7行程における位置推定誤差の推移をFig. 3.6に示した。LSMによる車両方位を適用したときの位置推定誤差のみならず、その比較対象として $\hat{\phi}$ バイアス補正なしのFOGの出力値を適用したときの位置推定誤差の推移も合わせて記した。ただしここでの「バイアス補正なしのFOGの出力値」とは、走行開始から1mの間のRTK-GPS位置データから算出した絶対方位を初期方位としてFOGをリセットしたものである。

$$\hat{\phi}_{fk} = \phi_{reset} + \phi_{fk} \quad (3.30)$$

$$\phi_{reset} = \tan^{-1} \left(\frac{X_{1m} - X_0}{Y_{1m} - Y_0} \right)$$

ここで $\hat{\phi}_{fk}$ はバイアス補正なしのFOGの出力値、 (X_{1m}, Y_{1m}) は走行開始から1m地点のRTK-GPS位置データであり、FOGはこの1m

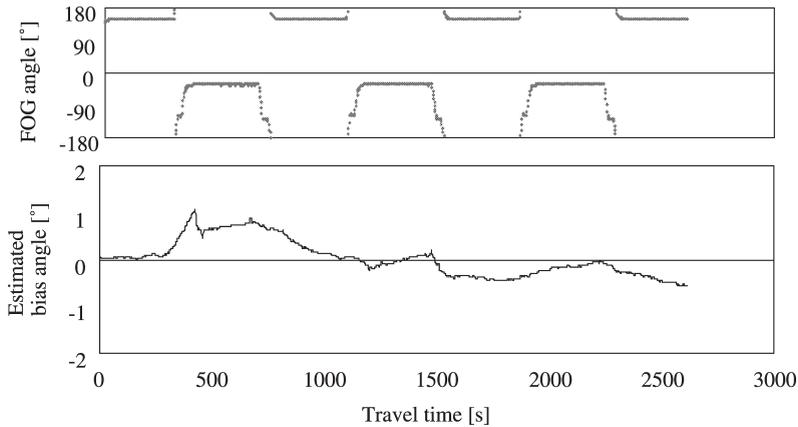


Fig. 3.5 The trajectories of estimated bias angle and FOG angle at autonomous planting

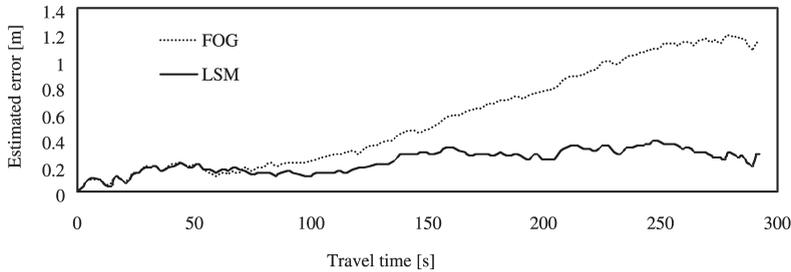


Fig. 3.6 Position errors estimated by dead reckoning method at 7th path

地点でリセットする（出力値を0にする）ものとする。したがってこの値には初期リセットエラーと、走行時間の経過とともに FOG の時間ドリフトによる偏差を含むこととなる。第7行程の開始時刻は走行開始から約46分後であり、当然この間に46分間の時間ドリフトが発生したと考えられる。本図から、FOG バイアス補正なしの推定誤差は、走行するにしたがって比例的に増加する傾向を見ることができる。これは明らかに FOG の時間ドリフトと初期リセットエラーの影響を受けたことが原因である。このとき、バイアス補正なしの最終位置における誤差は1.17 m まで増加した。一方 LSM は走行開始から40秒後付近までに約20 cm の推定誤差を生じているが、その後は比較的安定し最終位置で誤差は31 cm であった。このシミュレーション結果は、LSM による FOG バイアスの推定が時間ドリフトにも対応できたことを証明している。

第7行程の横方向偏差の推移を Fig. 3.7 に示した。縦軸が横方向偏差、横軸が走行時間を表わしている。本図から最初約10 cm あった誤差が次第に小さくなり、最終的には5 cm 以内で推移している様子がわかる。本図は巡回終了直後からの結果を示しており、ゆえに初期の偏差は巡回制御ルーチンに起因する。このときの横方向偏差は r.m.s. で5 cm、最大値は13 cm であった。

最後に全行程の横方向偏差の最大値と r.m.s. 値を行程ごとにまとめ、Table 3.1 に示した。第1行程から第7行程まで約50分要したが、この間ほぼ同程度の走行精度が得られたことがわか

る。また全行程の横方向偏差の r.m.s. は4.5 cm であった。これらのことは LSM が時間ドリフトを含む FOG バイアスを最初から最後まで精度よく推定できたことを示している。最大値についてはいずれの行程も巡回終了地点から2 m 以内で計測されたものであり、これは既述のように巡回制御ルーチンに起因する。

E. ま と め

本章は RTK-GPS、FOG のセンサフュージョンによって、車両の絶対方位を算出する手法を確立することを目的とした。

- 1) その手法として最小二乗法を適用した手法 (LSM) を考案した。LSM は絶対方位に対する FOG のバイアス値を逐次推定することができる。また誤差関数で考慮するデータ点数を調節することによって、ドリフトエラーの補償も可能である。
- 2) 走行データを用いて LSM のシミュレーションを行った。直線のみならず様々な走行経路に対してシミュレーションを行い、精度よくバイアス値を推定できることを確

Table 3.1 Accuracy of autonomous planting

Path #	r.m.s. error [cm]	Max error [cm]
1	3	20
2	4	11
3	4	13
4	6	20
5	4	12
6	5	14
7	5	13
Total	4.5	20

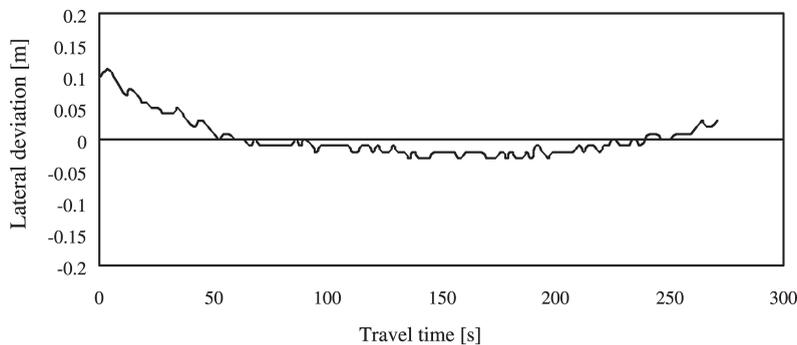


Fig. 3.7 The trajectory of lateral deviation at 7th path

認した。

- 3) LSM を適用してほ場で自律播種作業 7 行程を行った結果、目標経路に対して r.m.s. で 4.5 cm の誤差で作業することができた。50 分間の作業中、横方向偏差が増加する傾向は見られなかった。これは LSM が FOG のドリフトエラーに対しても適切な補正ができたことを表わしている。

IV. 作業計画マップによるほ場作業の自律化

A. 目的及び範囲

本研究がほ場における通年作業に適用可能なシステムの開発を目指していることは既に述べた。1 章で紹介した行本らの耕うんロボット (Table 1.1 の No.19), 井上らの無人トラクタ (同 No.22), 長坂らによる自動走行田植機 (同 No.23), この他にも、マシンビジョンによる作物列追従システム⁶⁸⁾ や、草地における自動走行車両⁶⁹⁾ など単一作業に限ったロボットシステムが、これまでにいくつか発表されている。しかしこれらのロボット・自律走行車両はいずれもある特定の作業を対象に開発されたものであり、このまま他の作業に転用することは困難である。例えばロータリ耕うんは残耕を残さなければどのような経路を走行しようとも基本的に自由であるが、薬剤散布作業など作物列が存在する作業では作物列によって走行経路が制限される。目標経路の生成のみならず、走行速度、3 点リンクヒッチや PTO の操作も作業に合わせて設定・変更する必要がある。耕うんロボットをそのまま薬剤散布作業に適用することはで

きない。逆にマシンビジョンを用いたナビゲーションシステムを作物列のない耕うんや播種などの作業に適用できないことは自明である。

そこで本研究は、作業の種類ごとに目標経路や変速段数などの情報を持つ、「作業計画マップ」を GIS⁷⁰⁾ によって作成することによって、軌道生成と作業計画の 2 つの問題を解決することを試みた。目標経路を点列を用いて表現し、それぞれの点に変速段数や 3 点リンクヒッチ、PTO 操作などを属性として付加することで、作業計画マップの変更によって様々な作業を行うことを可能にした。さらに目標経路が点列で構成されていることから、曲線経路を表現することも可能である。これにより、矩形ほ場以外での作業や格納庫一ほ場間の移動など任意経路の走行も可能となる。また播種時の走行軌跡を次回以降の目標経路とすることによって、さらに精度の高い自律走行も実現できる。以下、開発したシステムのアルゴリズムと無人耕うん作業の結果について報告する。

B. 作業計画マップとロボット制御アルゴリズム

a. 作業計画マップの構成

Fig. 4.1 に作業計画マップの概念図を示した。作業計画マップは 3 次元ユークリッド空間 E^3 の部分集合 Ω として定義される。

$$\Omega = \{\omega_i | \omega_i \in E^3, 0 < i \leq N\} \quad (4.1)$$

ただし $\omega_i = (lat_i, lon_i, code_i)$ は緯度、経度、コードを要素とする点であり、また N はその個数である。

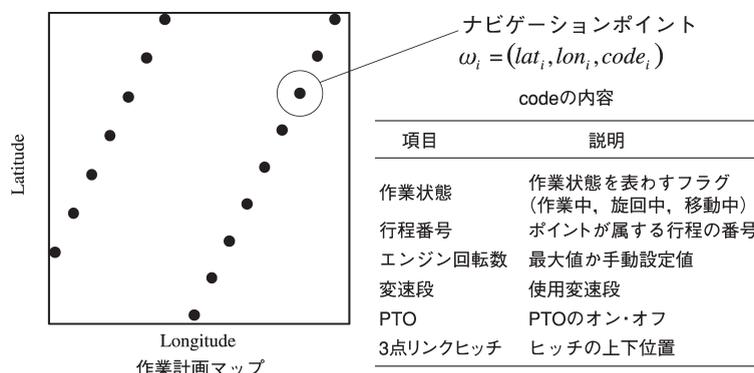


Fig. 4.1 Concept of navigation map

コードは64ビット自然数で表わされる。コードには図中の表に示される6種類のデータがビット単位で記号化されている。作業状態, 行程番号といった作業内容に関する情報は巡回位置の検出と作業計画マップの抽出に用いられている。またスロットル開度, 変速段, PTO, 3点ヒッチはロボットへの動作命令を表わし, 作業に応じてこれらを設定・変更することで多様な作業に対応できる。

b. 作業計画マップの生成

作業計画マップの生成法には2つの方法がある。一つはGISを用いる手法である。これはほ場に作業幅に応じて平行な経路をコンピュータ上で生成することによって行う。本手法は耕うん, 施肥, 播種・移植などの目標経路があらかじめ存在しない作業時に使う。

もう一つは, 実際の走行軌跡を目標経路とする方法である。播種以降の作業は播種時の軌跡を記録して作業計画マップとすることで, さらに精度の高い目標経路を得ることができる。また播種を有で行い, その後の作業にロボットトラクタを使用する場合にも有効である。Fig. 4.2にロータリ耕うん用に生成した作業計画マップを示した。一番右が第一経路であり, 全部で4行程のロータリ耕うん作業である。作業計画マップには巡回のための経路が存在しない。各行程の両端7mのナビゲーションポイントのコードの作業状態データには巡回を表わすフラグが記号化されており, この巡回フラグを復号したときロボットは巡回ルーチンに移行する。本作業計画マップは自作したGISソフトウェアによって生成した。これは第1行程の作業始点と終点を与えることによって, その経路に等間隔で平行な経路を生成することができる。

c. 自律作業アルゴリズム

Fig. 4.3に自律作業のフローチャートを示した。作業計画マップや作業内容の初期設定を行った後, 外部I/Oスイッチの合図によりロボットトラクタは発進する。発進後すぐにセンサフュージョンのための初期化を行う。これは本研究がRTK-GPSとFOGのセンサフュージョンによって絶対方位を算出しているためで

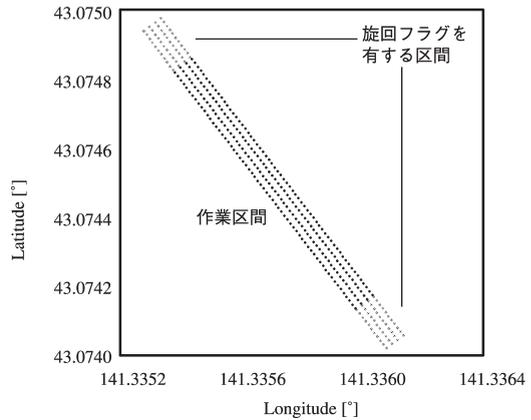


Fig. 4.2 A navigation map for autonomous rotary tillage

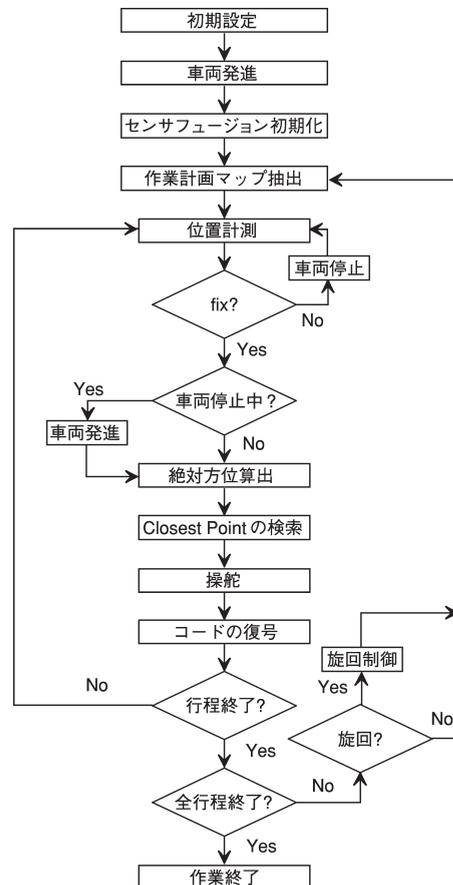


Fig. 4.3 Flowchart of autonomous guidance

ある。この手法については第三章で既述した。次にこれから作業する行程の作業計画マップを, 全行程作業計画マップから抽出する。その

後制御ルーチンに移行する。RTK-GPS と FOG によって車両位置と相対方位を計測する。このとき RTK-GPS から高精度測位を表わす fix 解が得られなければ、ロボットは fix 解が得られるまで作業を停止する。fix 解が得られれば車両の絶対方位を算出する。次に作業計画マップ Ω の中から現在位置に最も近いナビゲーションポイントとなる Closest Point を検索し、後述の方法により目標操舵角を決定、操舵を行う。さらに、ナビゲーションポイントのコードを復号し、復号されたデータに基づいて変速段数、3点リンクの操作などロボットの動作を決定する。さらに現行程の終端位置に到達したかどうかを作業状態フラグによってチェックする。現行程の終了ならば、総行程数と比較して全行程を完了したかどうかを調べる。次行程のある場合は旋回動作に、全行程を完了した場合は作業を終了する。

d. ステアリングコントローラ

車両の操舵制御において、操舵角を目標経路に対する車両の横方向偏差と方位偏差の関数として表わすことが一般的であり⁷¹⁾、本研究でも横方向偏差と方位偏差を制御偏差とする PI 制御を採用した。PI 制御は制御対象の運動モデルを記述する必要がなく、本研究の場合は実際にロボットを走行させて制御ゲインを調節することで比較的容易に制御系を設計できることが特長である。以下に本研究における横方向偏差と方位偏差の定義と、その算出アルゴリズムについて記述する。

1) 横方向偏差

先に定義したナビゲーションポイント ω_i から、コード ($code_i$) を省いた $\omega_i^* = (lat_i, lon_i)$ を再定義し、2次元ユークリッド空間 E^2 の部分集合である作業計画マップ Ω^* を以下のように定義する。

$$\Omega^* = \{ \omega_i^* | \omega_i^* \in E^2, 0 < i \leq N \} \quad (4.2)$$

Fig. 4.4 にステアリングコントローラのアルゴリズムを示した。本図は RTK-GPS による UTM 座標系であり、Y 軸方向が北を指している。 ϕ は Y 軸に対するロボットの絶対方位、 ϕ_d は目標方位、そして $d, \Delta\phi$ がそれぞれ本研究で定義する横方向偏差と方位偏差である。

現在のロボットの位置ベクトルを $\eta \in E^2$ とすると、 η から Ω^* の中の最も近い点 ω_{c1}^* と次に近い点 ω_{c2}^* は以下のように求められる。

$$\omega_{c1}^* = \left\{ \omega_i^* \mid \min_{i=1}^N \|\omega_i^* - \eta\|, \omega_i^* \in \Omega^* \right\} \quad (4.3)$$

$$\omega_{c2}^* = \left\{ \omega_i^* \mid \min_{i=1}^N \|\omega_i^* - \eta\|, \omega_i^* \in \Omega^*, \omega_i^* \neq \omega_{c1}^* \right\} \quad (4.4)$$

ただし $\|\cdot\|$ はベクトルのノルムを表わす。

すると閉空間 $[\omega_{c1}^*, \omega_{c2}^*]$ は以下の式で表わされる。

$$[\omega_{c1}^*, \omega_{c2}^*] = \{ \xi \mid \xi = \lambda \omega_{c1}^* + (1 - \lambda) \omega_{c2}^*, 0 \leq \lambda \leq 1, \xi \in E^2 \} \quad (4.5)$$

ここで ξ は ω_{c1}^* と ω_{c2}^* 間の内分点を表わす。以上から横方向偏差 d は以下の式で求められ

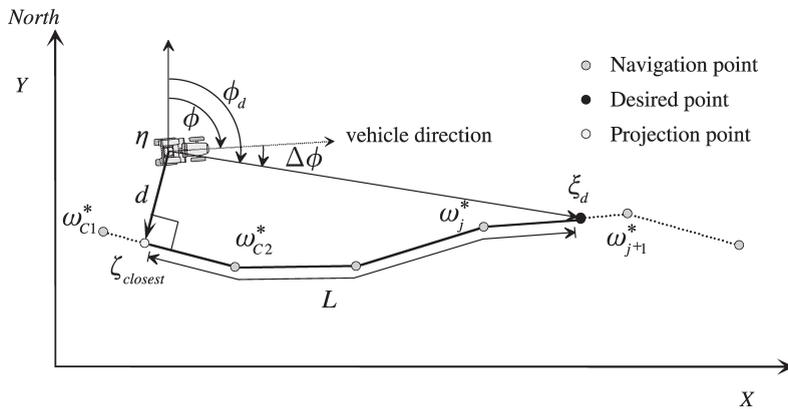


Fig. 4.4 Algorithm of the steering controller

る。

$$d = \min_{\{\omega^*_1, \omega^*_2\}} \|\xi - \eta\| \quad (4.6)$$

2) 方位偏差

方位偏差 $\Delta\phi$ は目標方位と車両の絶対方位の差で定義され、

$$\Delta\phi = \phi - \phi_d \quad (4.7)$$

で与えられる。よって $\Delta\phi$ を得るためにはロボットの目標方位 ϕ_d が必要となる。今作業計画マップの方向が $\omega^*_1 \rightarrow \omega^*_2$ にあると仮定する。式 (4.6) を満たす ξ を $\xi_{closest}$ とし、さらに制御パラメータとなる前方注視距離 L をある既知量として導入して、以下の2式を満たすナビゲーションポイント ω^*_j を Ω^* から検索する。

$$L_1 = \|\omega^*_2 - \xi_{closest}\| + \sum_{i=C2+1}^j \|\omega^*_i - \omega^*_{i-1}\| \leq L \quad (4.8)$$

$$L_2 = \|\omega^*_2 - \xi_{closest}\| + \sum_{i=C2+1}^{j+1} \|\omega^*_i - \omega^*_{i-1}\| \geq L \quad (4.9)$$

すると2点 ω^*_j と ω^*_{j+1} を結ぶ線分上の位置ベクトル ξ の動く範囲は、以下の式で表わされる E^2 の部分空間 Ξ となる。

$$\xi = \{\xi \mid \xi \in E^2, \xi = \lambda\omega^*_j + (1-\lambda)\omega^*_{j+1}, 0 \leq \lambda \leq 1\} \quad (4.10)$$

ここで $\Delta L = L - L_1$ とおくと、以下の式を満たすベクトル $\xi_d \in \Xi$ が、前方注視距離 L を考慮した目標点である。

$$\|\xi_d - \omega^*_j\| = \Delta L \quad (4.11)$$

したがって、目標方位 ϕ_d は、 $(\xi_d - \eta)$ と Y 軸方向ベクトルの内積により計算され、

$$\cos \phi_d = \frac{(\xi_d - \eta) \cdot d_y}{\|\xi_d - \eta\|} \quad (4.12)$$

$$\phi_d = \cos^{-1} \left\{ \frac{(\xi_d - \eta) \cdot d_y}{\|\xi_d - \eta\|} \right\} \quad (4.13)$$

ただし d_y は Y 軸方向の単位ベクトルである。以上から方位偏差 $\Delta\phi$ は式 (4.7) によって求めることができる。

3) 操舵角

操舵角 δ は横方向偏差 d と方位偏差 $\Delta\phi$ を

用いて以下の式によって決定される。

$$\delta = a_1 d + a_2 \Delta\phi \quad (4.14)$$

ここで a_1, a_2 は制御ゲインである。 L, a_1, a_2 を走行速度別に適したルックアップテーブルを用意することで、様々な作業速度に対応できるようにした。今回は1.5 m/s(作業中)と0.2 m/s(旋回後の幅寄せ)の2つの走行速度に対して、それぞれ L, a_1, a_2 の組を用意し、それらの値をTable 4.1に示した。これらの値は走行試験によって試行錯誤的に決定した。

本手法は従来の手法とは異なり、逐次目標点を更新することによって目標方位を修正しながら走行するため、目標経路が直線でも操舵角を計算することができる。

e. 枕地旋回アルゴリズム

Fig. 4.5に旋回アルゴリズムを示した。本手法は繰り返し動作を有した前進と後退を併用した方式であり、本図は左旋回の場合を示している。旋回アルゴリズムは以下の3つのステップで構成される。

- 1) 旋回速度まで減速し、7 m直進したあと最大舵角で車両方位が90度変化するまで左旋回する。

Table 4.1 Lookup table of control parameter

Speed [m/s]	L [m]	a_1	a_2
0.2	3.5	10.0	2.0
1.5	4.5	5.0	1.0

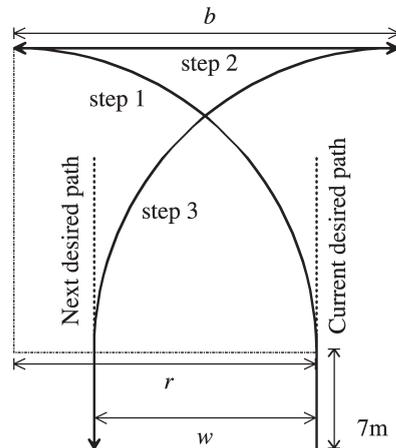


Fig. 4.5 Turning algorithm

2) 以下の式で計算される距離 b 後進する。

$$b=2r-w \quad (4.15)$$

ここで r はステップ 1) で観測される実際の旋回半径, w は行程幅である。

3) 最大舵角で車両方位が 90 度変化するまで左旋回する。

以上の 3 ステップで旋回行程は完了し, 1) と 3) の旋回半径が等しければ理論上は旋回終了位置が次行程の目標経路上の点となる。本方式では実際の旋回半径を再計算し, 後退距離を路面変化に応じて修正している。これにより, 傾斜や路面状態による最小旋回半径の空間的変化を補償できる。作業終了後の直進区間は次行程への幅寄せのために設けたものであるが, 現在その距離に 7 m 要しており, 今後この距離を短縮することが課題である。

C. 作業計画マップを適用した無人作業

北海道大学北方生物圏フィールド科学センター生物生産研究農場において, Fig. 4.2 で示した作業計画マップを適用した無人ロータリ耕うん作業を行った。その作業軌跡を Fig. 4.6 に示した。このとき設定走行速度は, 作業中が 1.5 m/s, 旋回中が 0.2 m/s とし, これらの速度変更は作業計画マップに基づく変速とエンジン回転数の制御によって実現される。本図からの確な位置で旋回を行ったことが分かる。また, 変速や作業機の昇降, PTO のオン・オフが作業計画通りに動作し, 作業計画マップの有効性が確認

できた。

Fig. 4.7 は第 3 行程における旋回終了直後からの横方向偏差と方位偏差の推移である。横軸が走行時間, 縦軸が偏差であり, 着色部分は作業中であることを表わす。旋回終了直後の偏差は 18 cm と大きい。7 m の幅寄せ区間を設けたにもかかわらず, この偏差は作業開始までに完全には収束せず, 作業開始地点で 8 cm の偏差が存在した。しかしその後は偏差が収束し, 安定して走行できた。また車両方位偏差は旋回終了後 10.0° と大きかったが, 作業中の r.m.s. 値は 1.0° となった。以上のことから作業中の直進

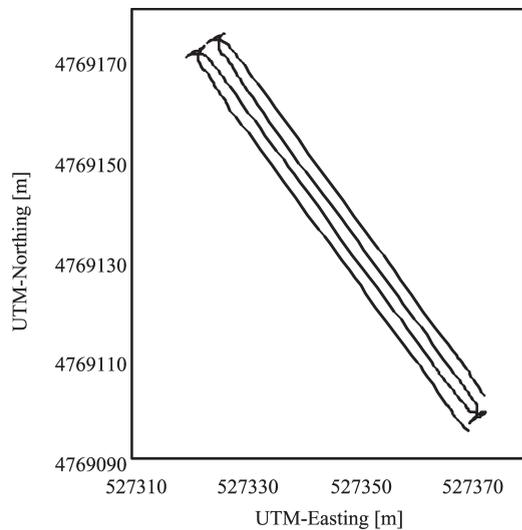


Fig. 4.6 A guidance trajectory of autonomous rotary tillage

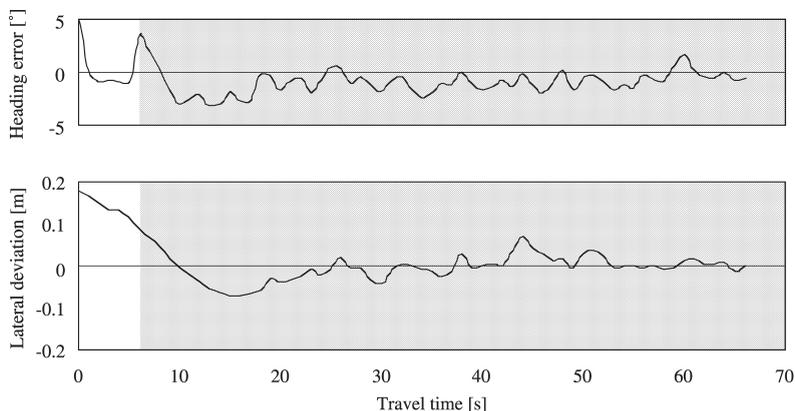


Fig. 4.7 Lateral deviation and heading error in autonomous rotary tillage

Table 4.2 Results of autonomous rotary tillage

Path #	r.m.s. of lateral deviation [cm]	Maximum lateral deviation [cm]	r.m.s. of heading error [°]
1	8	12	1.2
2	7	14	1.0
3	2	8	1.0
4	7	15	1.9
Total	6	15	1.3

性は維持できたことがわかった。

Table 4.2 に各行程の走行精度を示した。一番左の値が目標経路に対する車両の横方向偏差の r.m.s. 値, 2 列目がその最大値, 3 列目が目標経路に対する車両の方位偏差の r.m.s. 値を表わしている。これらは旋回後 7 m を除いた作業中の値を用いて算出した。横方向偏差に関してどの行程も r.m.s. で 8 cm 以下の偏差で走行した。これは従来の有人耕うん作業と比較しても遜色ない精度である。方位偏差に関しても r.m.s. で 2.0° 以下で走行することができ, 高い直進性を得た。しかし, 横方向偏差の最大値はすべて作業開始地点で記録されたものであり, Fig. 4.7 で示された旋回とその後の幅寄せ精度が悪いという問題が, 本表からも明らかとなった。

本試験はロータリ耕うん作業の速度としては速い 1.5 m/s に設定した。これは本システムが耕うん以外の農作業にも応用できる可能性を示すものである。

D. まとめ

本研究は, 畑作・水田作・粗飼料生産作業におけるすべてのトラクタ作業に対応できる汎用性の高いほ場作業ロボットシステムの開発を最終目的とした。

- 1) 「作業計画マップ」と呼ぶ目標経路や変速段数などの情報を持つ作業マップを GIS によって作成した。このシステムによって異なった作業に対しても対応できると考えられる。
- 2) 作業計画マップは緯度, 経度, コードを要素とするナビゲーションポイントの集合で構成される。コードには各ナビゲーションポイントにおけるエンジン回転数, 変速段, PTO, ヒッチ操作といったロボットへの動

作命令や, 行程番号などの作業内容に関する情報が記号化されている。

- 3) 構築したシステムの検証実験を行った。ロータリ耕うん作業を行った結果, 1.5 m/s の作業速度で目標経路からの偏差が r.m.s. 値 6 cm と高い直進性を得た。しかし旋回終了後の偏差が大きく, 7 m の幅寄せ区間を設けたにもかかわらず作業開始までにこの偏差を収束させることができなかった。この問題を解決するには, 新たな旋回法, 幅寄せ法を考案する必要がある。

V. 拘束条件を有した経路生成による枕地旋回精度の向上

A. 目的及び範囲

第IV章までに開発したシステムは, ほ場において概ね満足な精度で無人作業を行うことができたが, 枕地旋回精度の低さに起因して作業開始地点付近で目標経路からの偏差が生じることが明らかとなった。本章ではこの問題を解決するために新しい旋回アルゴリズムを考案した。

前章で採用した枕地旋回アルゴリズムは, 例えば左旋回の場合, 1) 最大舵角で 90° 左旋回する, 2) 舵角 0° で後退する, 3) 最大舵角で 90° 左旋回する, というフィードフォワード制御であった。1) で算出される旋回半径に応じて 2) の後退距離を調節することによって傾斜や路面状態による最小旋回半径の空間的变化を補償し, 理論上は旋回終了位置が次行程の目標経路上の点となる。しかしトラクタの操舵遅れや 2) の後退動作において操舵角を 0° にしたことにより偏差が大きくなったことが原因となって, 旋回終了位置と次行程の目標経路との間に偏差を生じた。すでに枕地旋回アルゴリズムに関しても幾つか研究成果が報告されている。鳥巣ら

は旋回時間を最短にする最適制御問題として定式化した枕地旋回アルゴリズムを考案した^{71)–74)}。この手法は拘束条件として操舵速度に制限を与えた現実的な手法であるが、精度の高い運動方程式を記述する必要がある、また解を数値計算によって得るため解が収束しない場合がある。

そこでスプライン関数によって滑らかな旋回経路を生成することを考えた。トラクタの最小旋回半径と操舵速度に関する拘束条件を設け、生成された経路がこれらの条件を満たさないときには経路を再計算して実現可能な経路を生成する。本手法では前進のみで旋回する手法（前進旋回）と前進と後退によって切り返して旋回する手法（切り返し旋回）の2通りについて考案した。

B. 旋回動作の経路生成

a. スプライン関数

経路生成には、軌道生成⁷⁵⁾ 関数近似⁷⁶⁾、または2点境界値問題⁷⁷⁾などに用いられるスプライン関数を適用した。スプライン関数とは、「分割された区間に対し、それぞれ異なった多項式で構成される、滑らかな区分的多項式関数」と定義される⁷⁸⁾。本研究では3次のスプライン関数を用いた。後述の拘束条件において、経路の曲率が連続関数となることが必要となる。3次以上のスプライン関数は曲率が連続関数となり、また4次以降の項は与える影響が非常に小さいと考えられることから、次数は3に決定した。

3次スプライン関数は定義から、与えられた節点の各区間において、2次までの微係数が連続でかつ節点を通る。区間*i*におけるスプライン曲線 $\Lambda_i(s)$ は、

$$\Lambda_i(s) = \begin{bmatrix} X_i(s) \\ Y_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0^{(i)} + a_1^{(i)}s + a_2^{(i)}s^2 + a_3^{(i)}s^3 \\ b_0^{(i)} + b_1^{(i)}s + b_2^{(i)}s^2 + b_3^{(i)}s^3 \end{bmatrix} \quad (0 \leq s \leq s_i, i=0, \dots, N) \quad (5.1)$$

と表わされる。 $X_i(s)$, $Y_i(s)$ は区間*i*における*X*, *Y*座標, $a_j^{(i)}$, $b_j^{(i)}$ ($j=0, 1, 2, 3$)はスプライン関数の係数, s_i は、

$$s_i = \sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2} \quad (5.2)$$

を満たす各節点間の距離であり、区間ごとに値が異なる。

ここで、スプライン曲線の*s*の1次微分、2次微分を次のように表わす。

$$\begin{bmatrix} \frac{dX_i(s)}{ds} \\ \frac{dY_i(s)}{ds} \end{bmatrix} = \Lambda_i'(s) \quad (5.3)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d^2X_i(s)}{ds^2} \\ \frac{d^2Y_i(s)}{ds^2} \end{bmatrix} = \Lambda_i''(s) \quad (5.4)$$

さらに各節点 $\Lambda_i(0)$ を $\Lambda_i(0) = \Lambda_i$ と表わすとすると、3次スプライン関数の係数は以下の式によって与えられる。

$$\begin{bmatrix} a_0^{(i-1)} \\ b_0^{(i-1)} \end{bmatrix} = \Lambda_{i-1} \quad (5.5)$$

$$\begin{bmatrix} a_1^{(i-1)} \\ b_1^{(i-1)} \end{bmatrix} = \Lambda_{i-1}' \quad (5.6)$$

$$\begin{bmatrix} a_2^{(i-1)} \\ b_2^{(i-1)} \end{bmatrix} = \frac{2}{s_{i-1}^2} (\Lambda_i - \Lambda_{i-1}) - \frac{1}{s_{i-1}} (2\Lambda_{i-1}' + \Lambda_i') \quad (5.7)$$

$$\begin{bmatrix} a_3^{(i-1)} \\ b_3^{(i-1)} \end{bmatrix} = \frac{2}{s_{i-1}^3} (\Lambda_{i-1} - \Lambda_i) + \frac{1}{s_{i-1}^2} (\Lambda_{i-1}' + \Lambda_i') \quad (5.8)$$

また Λ_i は以下の漸化式を満たす。

$$\begin{aligned} \frac{s_{i-1}}{3} \Lambda_{i+1}' + \frac{2s_i + 2s_{i-1}}{3} \Lambda_i' + \frac{s_i}{3} \Lambda_{i-1}' \\ = \frac{s_{i-1}}{s_i} \Lambda_{i+1} + \left(\frac{s_i}{s_{i-1}} - \frac{s_{i-1}}{s_i} \right) \Lambda_i - \frac{s_i}{s_{i-1}} \Lambda_{i-1} \end{aligned} \quad (5.9)$$

式(5.9)は次のように表わすことができる。

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & & 0 \\ q_{10} & q_{11} & q_{12} & & 0 \\ 0 & q_{21} & q_{22} & q_{23} & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & 0 & & q_{n-1,n-2} & q_{n-1,n-1} & q_{n-1,n} \\ 0 & \cdots & & & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda'_0 \\ \Lambda'_1 \\ \Lambda'_2 \\ \vdots \\ \Lambda'_{n-1} \\ \Lambda'_n \end{bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_{n-1} \\ B_n \end{bmatrix} \quad (5.10)
 \end{aligned}$$

q_{ij} : Λ'_j の係数 ($j=i-1, i, i+1$)

B_i : 式 (5.9) の右辺

式 (5.10) は $B_0 = \Lambda'_0$, $B_n = \Lambda'_n$ が与えられれば、左上から順に前進消去、後退代入することによって解くことができる。式 (5.10) から各節点の1次微分 $\Lambda'_0, \Lambda'_1, \dots, \Lambda'_n$ が得られると、式 (5.5)~式 (5.8) に代入して3次スプライン関数の係数 $a_j^{(i)}$, $b_j^{(i)}$ を求めることができる⁷⁹⁾。本システムでは目標経路をナビゲーションポイントとよぶ点の集合で表現する。よってスプライン曲線上の点列を式 (5.1) を用いて算出し、それらの点をナビゲーションポイントとする。

b. 拘束条件

1) 最小旋回半径拘束

スプライン関数によって生成された経路が、トラクタにとって追従可能かどうかを判定するために、「最小旋回半径拘束」、「最大操舵速度拘束」の2つの拘束条件を導入した。最小旋回半径拘束は生成された経路の各ナビゲーションポイント ω_i における曲率半径 $r(\omega_i)$ が

$$r(\omega_i) \leq R_{\min} \quad (0 \leq i \leq N-1) \quad (5.11)$$

R_{\min} : トラクタの最小旋回半径

N : ナビゲーションポイントの数

を満たすことが拘束条件となる。本研究では定常円旋回しているときの旋回半径を操舵角 δ における車両の旋回半径として定義する。また式 (5.11) 中の経路 $(X_i(s), Y_i(s))$ の曲率半

径 $r(\omega_i)$ は以下の式で表わすことができる⁸⁰⁾。

$$r(\omega_i) = \frac{\left\{ \left(\frac{dX_i}{ds} \right)^2 + \left(\frac{dY_i}{ds} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}}{\frac{dX_i}{ds} \cdot \frac{d^2 Y_i}{ds^2} - \frac{dX_i^2}{ds^2} \cdot \frac{dY_i}{ds}} \quad (5.12)$$

3次スプライン関数は2次の微係数まで連続となることから、生成される経路の曲率も連続関数となり、車両が追従しやすい経路が生成される。

2) 最大操舵速度拘束

最大操舵速度拘束は、「 i 番目のナビゲーションポイント ω_i の曲率半径 $r(\omega_i)$ をその地点における車両の旋回半径としたとき、その旋回半径によって決定される操舵角 $\delta_d(\omega_i)$ から、 $i+1$ 番目のそれに移行するために必要な操舵速度 $u_d(\omega_i)$ がトラクタの最大操舵速度 U_{\max} よりも小さい」ことを満たすことが拘束条件となり、これは次式で与えられる。

$$u_d(\omega_i) \leq U_{\max} \quad (0 \leq i \leq N-1) \quad (5.13)$$

ただし、

$$u_d(\omega_i) = \frac{\delta_d(\omega_{i+1}) - \delta_d(\omega_i)}{\Delta t} \quad (5.14)$$

$$\Delta t = \frac{|\omega_{i+1} - \omega_i|}{V} \quad (5.15)$$

ここで Δt は車両が ω_i から ω_{i+1} まで移動するのに要する時間を表わし、 V は走行速度である。

c. 前進旋回の経路生成

前進旋回は枕地旋回を前進のみで行う手法である。主にけん引式の作業機を装着したときの旋回手法であり、アメリカなどの大規模ほ場でよく用いられる。Fig. 5.1 に前進旋回のアロリズムを示した。本図は左旋回の場合を表わし、Aは旋回開始地点(作業終了地点)、Fは旋回終了地点(作業開始地点)である。そして3次スプライン関数に与える節点は、A, B, C, D, Eの5点であり、端点A, Eの微係数はそれぞれ 0° と 180° となる。EF間は直線で結ぶものとし、これはトラクタの姿勢を作業開始前までに安定させるために設けた調整区間である。 w は行程幅、 d_1 は調整区間の距離、 d_2 は現行程の作業終了地点と次行程の作業開始地点の進行方向

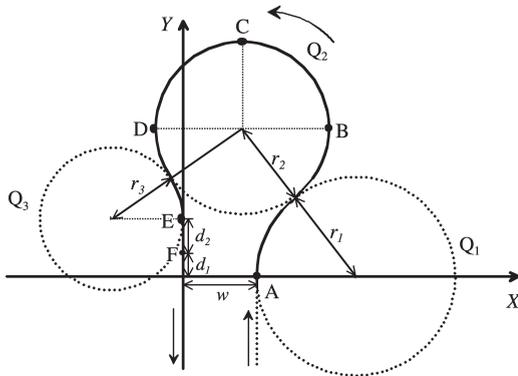


Fig. 5.1 Algorithm of path creation for forward turning

のオフセット量である。

前進旋回のキーワードは「3つの円」である。円 Q_1 は A を通り Y 軸に平行な直線と A で接し、円 Q_3 は Y 軸と E で接し、そして円 Q_2 は Q_1 , Q_2 両円と接する。これら3つの円を拘束条件によって変化させることによって、拘束条件を満足する経路を生成する。まず最小旋回半径拘束を満たさない場合は、そのナビゲーションポイントの属する円の半径を大きくして節点を再設定し経路を再計算する。例えば BC 間のナビゲーションポイントが条件を満たさないときは、 r_2 を大きくして節点を再設定する。一方、最大操舵速度拘束を満たさないときは、 B , C , D の y 座標を大きくして再計算する。これは B から D の区間はほぼ同一円上の点となるため曲率の変化量が小さく、この拘束を満たさない場合が考えられるのは AB 間と DE 間だけであると判断したことによる。

Fig. 5.2 に前進旋回の経路生成フローチャートを示した。まず3円の半径をトラクタの最小旋回半径に設定して節点の座標を計算し、経路を生成する。次に生成された経路に対し最小旋回半径拘束を満たすかどうかを調べる。満たさなければ満たさなかった点の属する円すべての半径を 10 cm 大きくして節点座標を再計算する。もし最小旋回半径拘束を満たせば、最大操舵速度拘束を満たすかどうか調べる。満たさなければ節点 B, C, D の y 座標を 10 cm 大きくして経路生成する。ここで新しく生成された経路は、最小旋回半径拘束から調べなおす。もし最

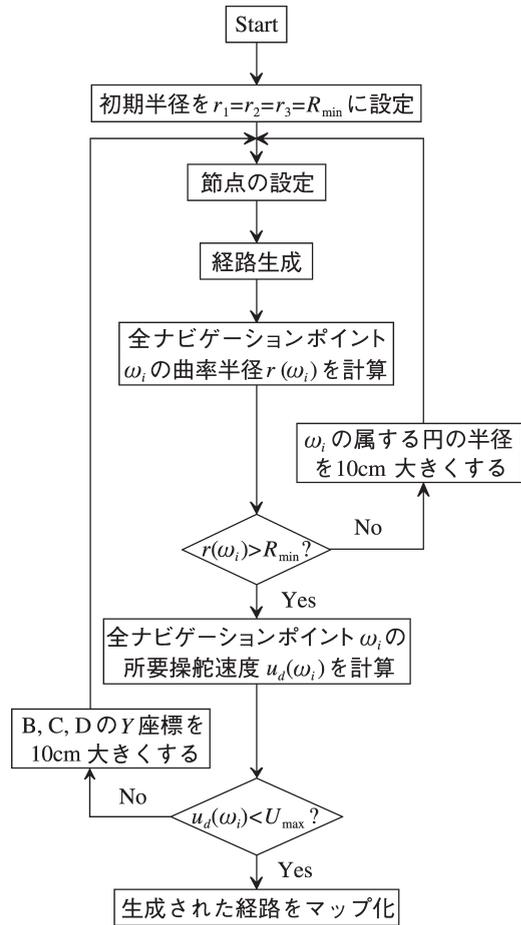


Fig. 5.2 Flowchart of path creation for forward turning

大操舵速度拘束も満たせば生成された経路はトラクタが追従可能な経路であると判断し、作業計画マップへと座標変換する。

d. 繰り返し旋回の経路生成

繰り返し旋回は後退動作を含む枕地旋回手法である。主に直装式の作業機を装着したときの旋回手法であり、前進旋回と比較して枕地部分を小さくできることが利点である。繰り返し旋回のアプローチを Fig. 5.3 に示した。本図は左旋回の場合を表わし、 A が旋回開始地点、 F が旋回終了地点となり、 BC 間は後退区間である。本アルゴリズムではまず CE 間の経路をスプライン関数によって生成する。そして経路が各拘束条件を満足した後、経路を反転させて $A'B$ 間の経路とする。

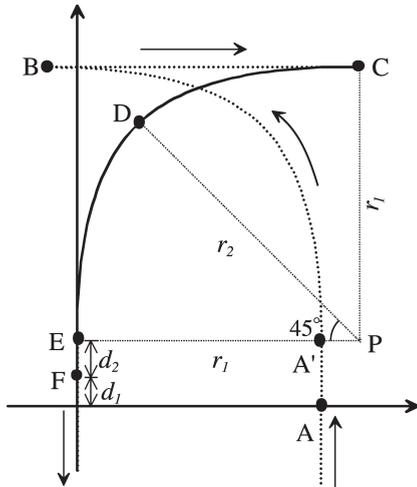


Fig. 5.3 Algorithm of path creation for switch-back turning

CE間の経路生成において、3次スプライン関数に与える節点はC, D, Eの3点とした。初期設定においてはC, D, EはPを中心とする半径 r_1 の円弧上の点であり、Dは角DPEが 45° となる点である。最小旋回半径拘束を満たさない場合は、 r_1 の値を大きくすることで対応する。最大操舵速度拘束を満たさない場合はPDの距離 r_2 を大きくし、C, E付近の曲率半径を大きくする。これは点CとEにおいて操舵角を 0° (曲率半径が無限大)としたため、この付近で要求される操舵量が最も大きくなると判断したことによる。

Fig. 5.4に繰り返し旋回のマップ生成アルゴリズムを示した。これはほぼ前進旋回のそれと同じであり、拘束条件を満たしなかったときの節点の再設定方法が異なるだけである。

C. 経路生成とコンピュータシミュレーション

a. 車両運動制御モデル

本アルゴリズムによって生成された旋回経路を適用した走行シミュレーションを行った。走行シミュレーションの目的は、考察した拘束条件の有効性を確認することが目的である。走行シミュレーションは式(5.16)で表わされる車両の2輪モデル⁸¹⁾と、それに位置を表わす式(5.17)を加えた運動モデルを用いた。

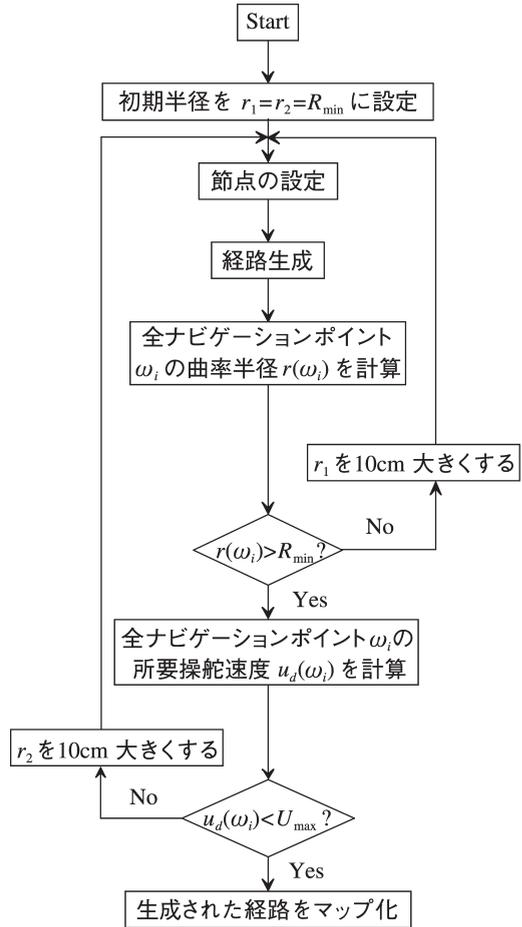


Fig. 5.4 Flowchart of path creation for switch-back turning

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2(K_f + K_r)}{MV} & -1 - \frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{MV^2} & 0 \\ \frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{I} & -\frac{2(l_f^2 K_f - l_r^2 K_r)}{IV} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \\ \phi \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{2K_f}{MV} \\ \frac{2l_f K_f}{I} \\ 0 \end{bmatrix} \delta \quad (5.16)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \sin(\phi + \beta) \\ V \cos(\phi + \beta) \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

β : 車両重心滑り角, γ : ヨー角速度, ϕ : 車両方位角, $[X, Y]^T$: GPS 座標系にお

車両重心位置

ここで K_f, K_r はそれぞれ前輪, 後輪のコーナリングパワー, l_f, l_r は車両の重心から前車軸, 後車軸までの距離, M, I は車両の質量とヨー方向慣性モーメント, V は走行速度である。 δ は操舵角であり, 本システムの入力となる。また操舵角を決定するステアリングコントローラは第IV章で考案した作業計画マップのアルゴリズムを適用した。

両拘束条件を決定するには車両の旋回半径が必要となる。定常円旋回においては $\dot{\beta}=0, \dot{\gamma}=0$ であるから, これらを式 (5.16) に代入すると以下の関係が得られる。

$$\gamma = \left(\frac{1}{1 - \frac{M}{2I^2} \frac{l_f K_f - l_r K_r}{K_f K_r} V^2} \right) \frac{V}{l} \delta \quad (5.18)$$

ここで $l = l_f + l_r, l = l_f + l_r$ であり, 車両の軸距を表わす。すると実舵角 δ における車両の定常円旋回半径 R は

$$R = \frac{V}{\gamma} = (1 - cV^2) \frac{l}{\delta}, \quad c = \frac{M}{2I^2} \frac{l_f K_f - l_r K_r}{K_f K_r} \quad (5.19)$$

で表わされる。 c は車両の旋回半径を決定するパラメータであるが, これは車両パラメータである K_f, K_r などの定数に依存する。シミュレーションでの設定速度を 0.83 m/s とし, この走行速度において後述の Table 5.1 に示す実機の旋回半径と舵角の関係とシミュレーションのそれができるだけ一致するよう車両パラメータを以下の値に決定した。

$$K_f = 500 \text{ N/}^\circ, \quad K_r = 1750 \text{ N/}^\circ, \quad l_f = 1.6 \text{ m}, \\ l_r = 0.7 \text{ m}, \quad M = 3200 \text{ kg}, \quad I = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

Fig. 5.5 に実機による旋回半径 r とシミュレーションによる旋回半径 \hat{r} の関係を示した。横軸がシミュレーションによる旋回半径, 縦軸が実機による旋回半径である。旋回半径が大きくなるにつれて偏差は大きくなり, タイヤ路面間の相互作用が非線形であることが確認された。しかし $r = \hat{r}$ に対して直線回帰を行ったとき $r^2 = 0.987$ という結果が得られ, 本モデルは

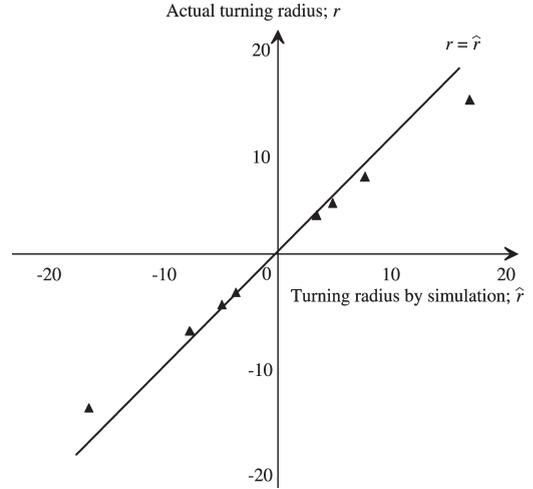


Fig. 5.5 Simulation result of constant steering turning

上述したシミュレーションの目的である設定した拘束条件の有効性を検証するには十分な精度を有していると判断した。

つぎに最大操舵速度拘束の式 (5.14) で必要とする経路の曲率半径 $r(\omega_i)$ によって決定される車両の舵角 $\delta_d(\omega_i)$ は, 式 (5.19) から次のように求められる。

$$\delta_d(\omega_i) = (1 - cV^2) \frac{1}{r(\omega_i)} \quad (5.20)$$

そして時刻 k における操舵速度 u_k を次式にしたがって算出した。

$$u_k = \frac{\delta_{dk} - \hat{\delta}_k}{\Delta t} \quad (5.21)$$

ここで δ_{dk} は作業計画マップから算出される目標操舵角, $\hat{\delta}_k$ は実舵角, Δt は制御インターバルである。式 (5.21) で算出した u_k が設定された最大操舵速度 U_{\max} に対して $|u_k| > U_{\max}$ となった場合, δ_{dk} を次のように修正する。

$$\delta_{dk} = \begin{cases} \hat{\delta}_k + U_{\max} \Delta t & (u_k > 0) \\ \hat{\delta}_k - U_{\max} \Delta t & (u_k < 0) \end{cases} \quad (5.22)$$

b. 前進旋回のシミュレーション

走行シミュレーションは初期設定 (拘束条件なし) の経路, 最小旋回半径拘束のみを満足した経路, 全拘束を満足した経路の3種類の経路に対して行った。Fig. 5.6 に前進旋回のシミュレーションによって得られた走行軌跡を示し

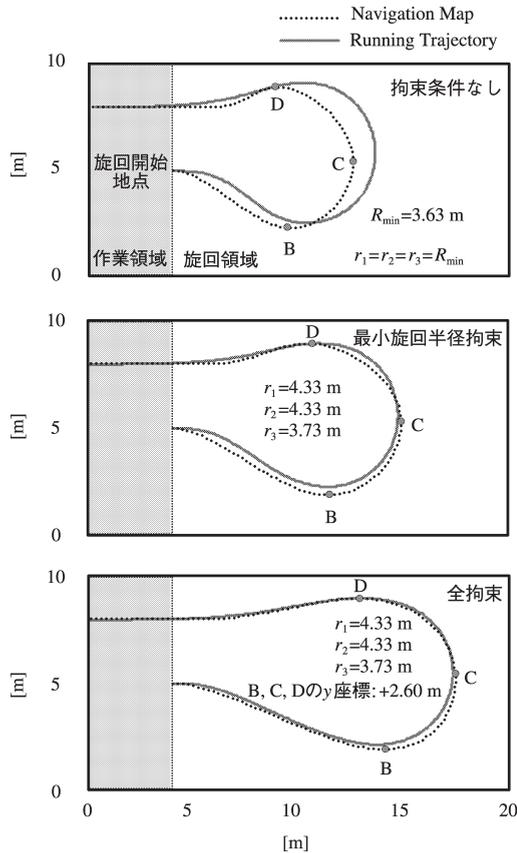


Fig. 5.6 Simulation results of forward turnings

た。本シミュレーションにおいて走行速度 0.83 m/s, 行程幅 3 m, 調整区間の距離 2 m とした。またそれぞれの拘束条件は最小旋回半径 3.63 m, 最大操舵速度 25°/s と設定した。経路生成の結果, 最小旋回半径拘束によって 3 円の半径 r_1 , r_2 , r_3 がそれぞれ $r_1=4.33$ m, $r_2=4.33$ m, $r_3=3.73$ m と変化した。最大操舵速度拘束では 3 円の半径は最小旋回半径拘束から変化しなかったものの, B, C, D の y 座標が 2.6 m 大きくなった。拘束条件なしの経路ではトラクタが経路を追従できずに経路よりも大きな半径で走行している。最小旋回半径拘束と全拘束の走行軌跡を比較すると, BCD 区間ではほぼ変わらないものの, 旋回終了地点付近での収束は全拘束のほうが良い結果を示した。Fig. 5.7 に旋回終了 2 m 手前からの横方向偏差の推移を示した。本図からも全拘束を適用した経路による走行は, 他の 2 走行と比較して旋回終了時の偏差が一番小さ

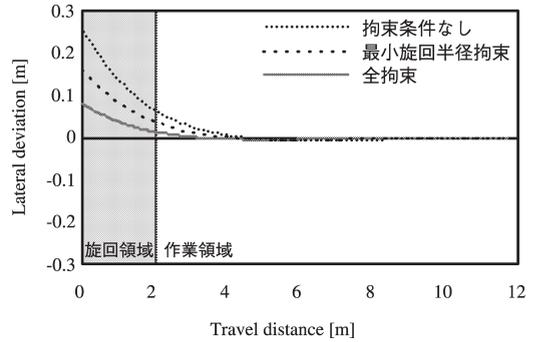


Fig. 5.7 Lateral deviations of forward turnings on simulation

く, その後の収束も最も速いことが明らかである。

c. 切り返し旋回のシミュレーション

Fig. 5.8 に切り返し旋回のシミュレーション結果を示した。各種設定値は前進旋回のとおりと同じである。BC 間の後退区間における操舵制御は, 作業計画マップの手法で制御ゲインを負にすることで対応した。拘束条件なしの走行では, 経路を追従できずに作業開始地点で偏差を有している。それに対し全拘束の走行ではトラクタは経路を精度よく追従し最後の調整区間で偏差が収束できた。これら 3 走行において, 作業開始地点での横方向偏差は拘束条件なしが 31 cm, 最小旋回半径拘束が 9 cm, 全拘束が 5 cm となり, 切り返し旋回でも 2 拘束条件を適用することの有効性が証明された。

D. ほ場での実機実験

a. 車両パラメータの同定

前節のシミュレーションで用いた旋回半径は式 (5.16) で記述される線形モデルをもとに算出されたものであり, 実機に適用することはできない。実機実験を行うに際して, これらに代わって車両特性を同定する式を得るための基礎実験を実施した。舵角を 8 段階 ($-40^\circ, -30^\circ, -20^\circ, -10^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$) において定常円旋回を速度別に行い, そのとき得た軌跡から旋回半径を計算した。走行速度は 4 段階 (0.35 m/s, 0.55 m/s, 0.83 m/s, 1.30 m/s) とし, これ以後旋回はこれらの速度 (変速段) で行うものとする。供試ほ場は北海道大学北方生物圏フィールド科学センター生物生産研究農場小麦

刈り跡地であり、実験当日の土壌は適度に乾燥していた。この結果を Table 5.1 に示した。走行速度の変化による旋回半径の変化はほとんど見られない。左右の旋回半径は若干の違いが見られるが、これは供試車両の操舵機構に起因すると思われる。本表の各速度における $\pm 40^\circ$ の旋回半径が、最小旋回半径拘束に適用する左右の最小旋回半径となる。

最大操舵速度拘束を計算するためには、式 (5.20) のように舵角を旋回半径の関数として表わす必要がある。ここでは Table 5.1 の結果を用い、累乗関数を近似曲線として速度別、左右の旋回別に旋回半径を計算した。また供試車両の最大操舵速度に関しても合わせて実験を行

い、 $U_{\max} = 25^\circ/\text{s}$ という値を得た。

b. 前進旋回の走行結果

上述の 4 種類の走行速度で前進旋回を行った。ほ場に 2 本の平行な経路を生成し、その 2 本を結ぶ旋回経路を生成した。行程幅と調整区間の距離はシミュレーションと同じくそれぞれ 3 m と 2 m に設定した。Fig. 5.9 に走行速度 0.55 m/s のときの走行結果を示した。上図は旋回軌跡と生成された経路を表わす。本走行は左

Table 5.1 Turning radius of tested vehicle

Steering angle [deg]	Travel speed [m/s]			
	0.35	0.55	0.83	1.3
-40	3.50	3.54	3.53	3.52
-30	4.81	4.86	4.86	4.89
-20	7.52	7.58	7.63	7.76
-10	16.18	16.24	16.50	17.08
10	16.75	16.57	16.80	16.37
20	7.60	7.58	7.65	7.68
30	4.79	4.80	4.83	4.93
40	3.45	3.47	3.49	3.60

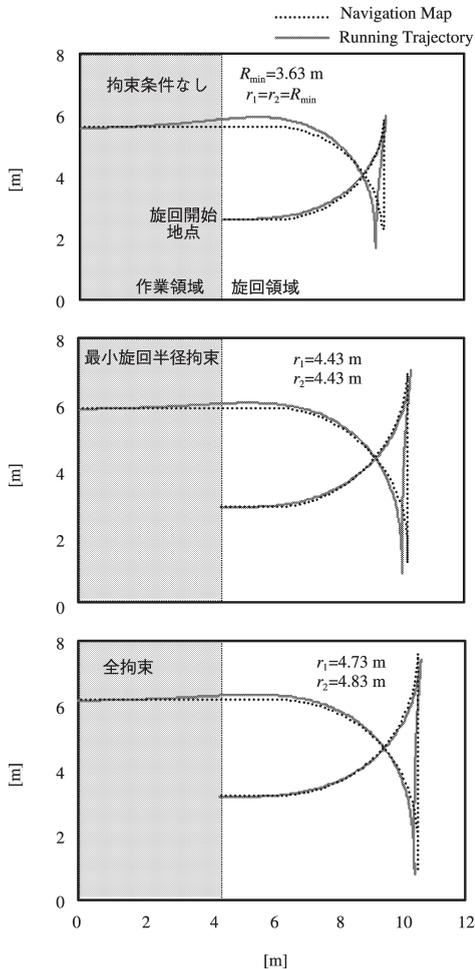


Fig. 5.8 Simulation results of switch-back turnings

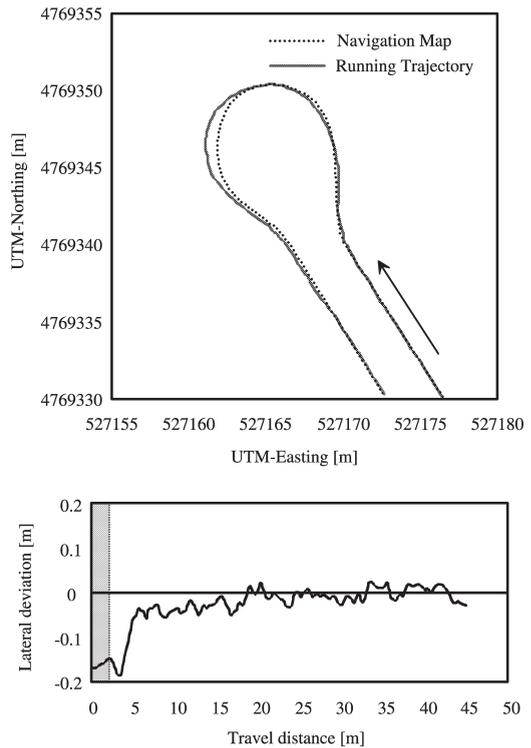


Fig. 5.9 Guidance result of forward turning at 0.55 m/s

旋回であり、実線が走行軌跡、破線が生成された経路を示している。作業開始地点では走行軌跡と目標経路がほぼ重なり精度よく次行程に移行できた。しかし旋回の左上付近で70 cmの偏差が見られた。ここは経路の旋回半径が最も小さい区間であり、ステアリングコントローラが曲線経路に追従しきれなかった可能性がある。本研究で考案したステアリングコントローラは、第IV章で既述したように前方注視距離 L 先の目標点 ξ_a に対して、次式のように操舵角 δ を計算する。

$$\delta = a_1 d + a_2 \Delta\phi \quad (5.23)$$

ここで、 d は目標経路からの横方向偏差、 $\Delta\phi$ は ξ_a に対する車両の方位偏差、 a_1 、 a_2 は制御ゲインである。この式は前方注視距離の長さによって $\Delta\phi$ の大きさが影響を受けることを表している。特に曲線でその影響は大きくなり、 L が長いと車両の追従精度が悪化することが予想される。本研究で用いた L の長さは3.5 mであるが、これ以上 L を短く設定すると算出される操舵角が発散してしまい、経路を追従できなくなるのが走行実験で明らかとなった。このような問題を解決するためには、曲線追従に適したステアリングコントローラを新たに設計する必要がある。下図は横方向偏差の推移である。着色部分は旋回領域を表わし、この部分は2 mの調整区間である。作業開始地点以降僅かに偏差が増加して17 cmを記録したものの、この後は安定して走行することができた。他の3走行についても似たような傾向を示し、これは本手法が走行速度に関らず安定して旋回できることを証明する。Table 5.2 に枕地に要した距離と作業開始地点以降の最大偏差を走行速度別にまと

Table 5.2 Distances of headland and maximum lateral deviations of forward turnings

Travel speed [m/s]	Distance of headland [m]	Lateral deviation at beginning of row [cm]
0.35	11.87	14
0.55	12.12	17
0.83	13.63	20
1.30	15.85	16

めた。最大偏差は走行速度が大きくなってもほとんど差は見られない。枕地の距離も1.3 m/sでは15.85 mと比較的大きくなるものの、0.35 m/sでは11.87 mに抑えることができた。

c. 切り返し旋回の走行結果

切り返し旋回も同じく4種類の走行速度で実験を行った。また比較対象として、第IV章で提案した手法（フィードフォワード旋回）による切り返し旋回(0.55 m/s)も行った。Fig. 5.10に本手法による0.55 m/sでの旋回軌跡と生成された作業計画マップを示した。後退動作中に最大30 cm偏差が生じたものの、旋回全体での偏差のr.m.s.値は20 cmとなり、精度よく経路を追従している。Fig. 5.11にフィードフォワード旋回との走行精度の比較を示した。本図もFig. 5.9と同じく作業開始地点より2 m手前からの横方向偏差の推移を表わしている。本手法によ

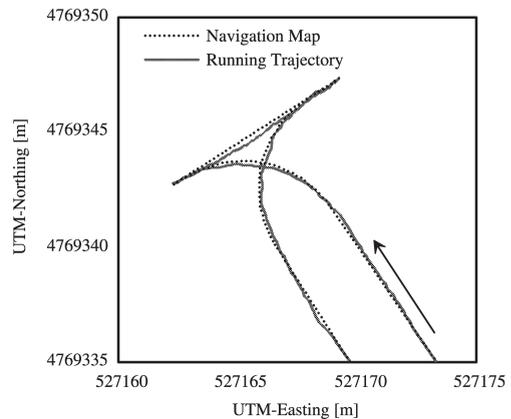


Fig. 5.10 Running trajectory and Navigation map of switch-back turning at 0.55 m/s

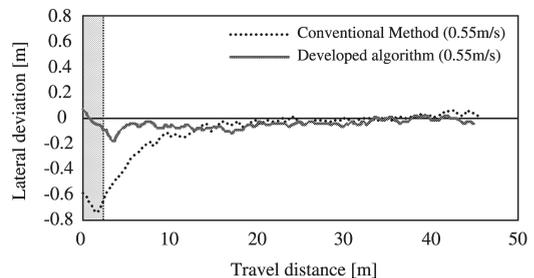


Fig. 5.11 Comparison between conventional switch-back turning and developed algorithm

る旋回では作業開始地点以降偏差が 20 cm 以下に抑えられているのに対し、フィードフォワード旋回では 70 cm 以上の偏差を有し、2 m の調整区間で偏差を 20 cm 以下に収束させることができなかった。Table 5.3 に各走行の枕地の距離と作業開始地点以降の最大偏差を示した。本章の手法は、0.35 m/s、0.55 m/s に関してはほぼ同程度の精度が得られたが、0.83 m/s、1.30 m/s では偏差が約 10 cm 大きくなった。枕地の距離は 4 走行とも同じような結果が得られ、走行速度が増加しても枕地距離を必要としないことがわかった。一方フィードフォワード旋回は枕地の距離が本手法より約 1.3 m 短いものの、偏差は 74 cm と大きい。調整区間の距離をあと 1.3 m 大きくしたとしても約 60 cm の偏差を有することが Fig. 5.11 から明らかであり、本手法の有効性が証明された。

E. まとめ

ロボットトラクタのための枕地旋回の経路を生成する手法を、前進のみ（前進旋回）と、前進と後退（切り返し旋回）を用いて旋回する場合の 2 通りについて提案した。

- 1) 経路生成には 3 次スプライン関数を用いた。トラクタの車両特性に関する拘束条件、「最小旋回半径拘束」と「最大操舵速度拘束」を提案し、生成された経路がこれらの条件を満たさないときには経路を再計算する。
- 2) 生成された経路に対してシミュレーションを行った結果、拘束条件なし、または最小旋回半径拘束のみを適用して生成した経路よりも、最小旋回半径拘束と最大操舵速度

Table 5.3 Distances of headland and maximum lateral deviations of Switch-Back turnings

Travel speed [m/s]	Distance of headland [m]	Lateral deviation at beginning of row [cm]
0.35	6.81	15
0.55	6.88	17
0.83	6.94	28
1.30	6.94	27
0.55*	5.54	74

* Feedforward turning

拘束の 2 つの拘束条件を適用した経路のほうが精度よく経路を追従できた。

- 3) ほ場で実機実験を行った結果、前進旋回では 4 つの走行速度に対して作業開始以降の偏差を 20 cm 以下に抑えることができた。切り返し旋回はフィードフォワード旋回との走行精度の比較を行い、その有効性を確認した。

VI. 最適制御アルゴリズムを適用したステアリングコントローラ

A. 目的及び範囲

農業機械分野においてこれまでに発表された操舵制御のアルゴリズムは、著者らが第 IV 章において開発したものも含めて線形関数で記述されることが多い⁸³⁾。ニューラルネットワーク⁸⁴⁾やファジイ理論⁸⁵⁾、または飽和関数⁸⁶⁾などの非線形制御器を適用した例もあるが、走行経路はいずれも直線を対象としたものばかりである。したがって既往のステアリングコントローラは、運動特性の非線形性が強くなる直角経路や曲線経路の追従に対する能力は未知数である。

これまでに開発したロボットトラクタを用いて、格納庫からは場までの農道移動を含む作業も実施したが、農道が直角に曲がる部分で目標経路に対して約 50 cm の横方向偏差が生じた。また第 V 章で行った実験において、生成された旋回経路に対して曲率半径の最も小さい部分では 70 cm 以上の偏差を有した。これは経路生成の問題というよりも、ステアリングコントローラに問題があったと考える。また、現在のコントローラは走行速度を考慮しておらず、制御ゲインのルックアップテーブルによって広範な走行速度に対応する手法は根本的に限界がある。

そこで、最適制御アルゴリズムを適用したステアリングコントローラを導入することを考えた。非線形な運動モデルをステアリングコントローラに導入することによって、大舵角における運動、すなわち曲線経路に対する追従精度の向上を目的とした。運動モデルに 2 輪モデルを採用し、運動方程式を逐次線形化することで本問題を最適レギュレータ問題として定式化した。

開発されたステアリングコントローラを適用

してほ場で複数の経路に対し実機実験を行った。直角経路，正弦波経路，そして第V章で考案した前進巡回経路に対して，第IV章で開発したPI制御を基礎としたステアリングコントローラとの精度比較を行った。また走行速度3.0 m/sの高速走行の試験も実施して新たに考案したコントローラの優位性も検証した。

B. 最適制御ステアリングコントローラのアルゴリズム

a. 運動モデルの構築

本アルゴリズムの運動モデルを定義する。

Fig. 6.1に運動モデルを示した。作業計画マップの概念を踏襲し，目標経路がナビゲーションポイントの集合として与えられるものとする。そして車両重心位置 (COG) における状態変数を以下のように定義する。

$$x = [d, \beta, \gamma, \phi, \delta]^T \quad (6.1)$$

d : 横方向偏差, β : 車両重心滑り角,
 γ : 角速度, ϕ : 方位偏差, δ : 舵角

本アルゴリズムはレギュレータ問題として解を得るため，次の方法によって目標経路を線形化する。

- 1) ナビゲーションポイント $\omega_i (0 \leq i \leq N$

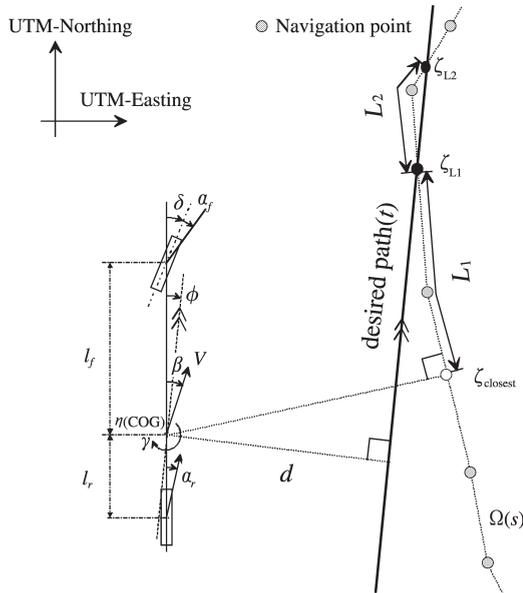


Fig. 6.1 The vehicle dynamic model

$-1, N$: ナビゲーションポイントの数) を直線で結んだ曲線を, $\Omega(s) = [e(s), n(s)]^T$ で定義する。ただし $\Omega(s)$ は UTM 座標系で記述され, $e(s), n(s)$ はそれぞれ UTM-Easting, UTM-Northing を表わす。

- 2) UTM 座標系での COG の位置を η とし, $|\eta - \Omega(s)|$ を最小にする点 $\Omega(s_c) = \xi_{closest}$ を求める。
- 3) $\xi_{closest}$ から $\Omega(s)$ に沿って L_1 進んだ点 $\Omega(s_{L1}) = \xi_{L1}$ を求める。ここで L_1 は前方注視距離として定義される制御パラメータであり, 目標経路は ξ_{L1} における接線となる。
- 4) ξ_{L1} から $\Omega(s)$ に沿って L_2 進んだ点 $\Omega(s_{L2}) = \xi_{L2}$ を求める。

ξ_{L1} と ξ_{L2} を結ぶ直線が時刻 t における目標経路であり, その直線からの偏差を横方向偏差 d と定義する。また ϕ もこの直線に対する車両方位偏差であり, ゆえに本運動モデルの座標系はそれぞれの時刻において変化することになる。目標経路を ξ_{L1} における接線とするには $L_2 \rightarrow 0$ とするのが望ましいが, 算出される経路が発散するのを防ぐために L_2 にはある程度の距離を持たせるものとし, 本研究では $L_1 = 2.0, L_2 = 0.5$ とした。

本モデルにおいて, 前輪に生じる滑り角 α_f は以下で表わされる⁹⁾。

$$\tan \alpha_f \approx \beta + \frac{l_f \gamma}{V} - \delta \quad (6.2)$$

一方, 後輪に生じる滑り角 α_r は,

$$\tan \alpha_r \approx \beta - \frac{l_r \gamma}{V} \quad (6.3)$$

l_f, l_r は COG から前車軸, 後車軸までの距離, V は走行速度である。

式 (6.2), (6.3) に基づく運動モデルは, 前後の両輪が前後軸と車軸の交点にそれぞれ集中させた前後 2 輪の車両とみなせることから 2 輪モデルと呼ばれる。自動車工学の分野では広く使われるが, 操舵角が大きくなるにつれて 3 角関数の近似誤差に起因するモデル誤差が大きくなる。

従来 of 2 輪モデルでは, あるタイヤに働く滑り角 α とそのタイヤに働くコーナリングフォース F との関係性を $F = K\alpha$ の形で表してきた。ここで K はコーナリングパワーと呼ば

れ、 $K = \left. \frac{dF}{d\alpha} \right|_{\alpha=0}$ を用いるのが通常である。しかしこの関係は α が小さいことが前提であり、実際は α が大きくなると F の値は飽和することが知られている⁸⁸⁾。本研究が想定する大蛇角での走行においては α の値が大きくなり、コーナリングフォースを $F = K\alpha$ の形で表わすことによってモデル誤差が増大することが予想される。

つまり、2輪モデルにおいては以下の2つのモデル誤差要因が存在する。

- 1) 車輪の滑り角を線形化する際の三角関数の近似誤差
- 2) 車輪の滑り角とコーナリングフォースの関係の線形化による誤差

本研究ではこの内の2)を解決するために、Fialaの理論から導かれる以下の式⁸⁹⁾を運動方程式に導入する。

$$F = f(\alpha) = K \tan \alpha - \frac{1}{3} \frac{K^2}{\mu W} \tan^2 \alpha + \frac{1}{27} \frac{K^3}{\mu^2 W^2} \tan^3 \alpha \quad (6.4)$$

ここで μ は路面とタイヤのトレッドラバーとの摩擦係数、 W は垂直荷重である。式(6.4)の目的は、 α が大きいときの α と F の非線形性を補償する事によって、従来の2輪モデルより精度の高い運動モデルを記述することにある。

式(6.2)、(6.3)を式(6.4)に代入することによって得られる前後輪に働くコーナリングフォースを F_f , F_r とおくと、力とモーメントのつり合いから以下の2式を得る。

$$MV(\dot{\beta} + \gamma) = 2F_f + 2F_r \quad (6.5)$$

$$I\dot{\gamma} = 2l_f F_f - 2l_r F_r \quad (6.6)$$

M , I は車両の重量とCOG周りのヨー方向慣性モーメントである。以上をまとめると車両の運動方程式は以下のように表わされる。

$$\dot{d} = V \sin(\phi + \beta) \quad (6.7)$$

$$\dot{\beta} = \frac{2}{MV}(F_f + F_r) - \gamma \quad (6.8)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{2l_f}{I} F_f - \frac{2l_r}{I} F_r \quad (6.9)$$

$$\dot{\phi} = \gamma \quad (6.10)$$

$$\dot{\delta} = u \quad (6.11)$$

ここで u は操舵速度 $\dot{\delta}$ であり、本システムの入力を表わす。

式(6.7)~(6.11)で表わされる微分方程式を一般的な最適制御問題として定式化することを考えたとき、解析解を得ることは困難である。よってダイレクト・シュートなど繰り返しを要する数値計算手法⁹⁰⁾によって解を得ることになるが、これは時間を要するだけでなく、適切な初期値を選ばないと解が収束しないといった問題点を有する。供試車両の操舵周期は10 Hz以上であり、数値計算によって解を動的に計算するのは得策ではない。

よって本アルゴリズムは最適レギュレータ問題として解を得るものとする。最適レギュレータは運動方程式が1階の線形微分方程式の形で表わされなくてはならないが、式(6.4)には3次までの $\tan \alpha$ の項を含むため、式(6.8)、

(6.9)は非線形微分方程式となる。よって時刻 t における $(\tan \alpha(t), f(\alpha(t)))$ の近傍で式(6.4)を線形化する。

$\tan \alpha(t) = a(t)$ とおくと、式(6.4)は

$$F(t) = p(t)a(t) + q(t) \quad (6.12)$$

と線形化される。ただし、

$$\begin{aligned} p(t) &= \frac{d}{da} f(\alpha(t)) \\ &= K - \frac{2K^2}{3\mu W} a(t) + \frac{K^3}{9\mu^2 W^2} a^2(t) \end{aligned} \quad (6.13)$$

$$q(t) = f(\alpha(t)) - p(t)a(t) \quad (6.14)$$

とおいた。また車両が経路に追従しているならばその方位偏差 ϕ も小さいと仮定でき、滑り角 β も小さいと仮定すると式(6.7)は次のように線形化できる。

$$\dot{d} = V(\phi + \beta) \quad (6.15)$$

すると運動方程式は以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} \dot{d} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & V & 0 & V & 0 \\ 0 & \frac{-2(p_f + p_r)}{MV} & \frac{-2(p_{rlf} - p_{rlr})}{MV^2} & -1 & 0 \\ 0 & \frac{-2(p_{rlf} - p_{rlr})}{I} & \frac{-2(p_{rlf}^2 + p_{rlr}^2)}{IV} & 0 & \frac{2p_{rl}}{MV} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ \beta \\ \gamma \\ \phi \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-2(q_f + q_r)}{MV} \\ \frac{2(q_{rlf} - q_{rlr})}{I} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

ただし p と q の添え字 f, r はそれぞれ前・後輪を表わす。

式 (6.16) は以下のようなマトリクス形式で表わすことができる。

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + Bu(t) + z(t) \quad (6.17)$$

式 (6.17) の運動方程式で記述される運動モデルを本研究では「拡張 2 輪モデル」と名づけ、一般的な 2 輪モデルと区別するものとする。

b. 最適レギュレータの設計

本システムに搭載される航法センサは RTK-GPS と FOG 姿勢計測装置 (IMU) である。ゆえに式 (6.1) の状態変数のうち観測できる要素は、横方向偏差 d (RTK-GPS)、角速度 γ (IMU)、方位偏差 ϕ (IMU)、舵角 δ (供試車両) の 4 つである。よって、観測方程式は以下のように与えられる。

$$y(t) = Cx(t)$$

$$y = [d, \gamma, \phi, \delta]^T, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

以上を踏まえ、式 (6.17) を終端自由、終端時間固定の最適レギュレータ問題として定式化する。

すると時刻 t における最小にすべき評価関数 $J(t)$ は、

$$\begin{aligned} J(t) &= \int_t^{t+t_f} (y^T(\tau) R_0 y(\tau) + r_2 u^2(\tau)) d\tau + x_f^T R_3 x_f \\ &= \int_t^{t+t_f} (x^T(\tau) R_1 x(\tau) + r_2 u^2(\tau)) d\tau + x_f^T R_3 x_f \\ x_f &= x(t + t_f) \end{aligned} \quad (6.19)$$

と表わされる。 t_f は評価関数で考慮する時間、 R_0, R_3 は対称非不定値行列、 r_2 は正の値でありこれらは重みを表わす。また $R_1 = C^T R_0 C$ である。本研究ではそれぞれ、

$$R_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad r_2 = 4, \quad R_3 = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

とした。したがって、 $R_1 = 0$ となる。この重みづけの目的は、「操舵角の変化量 (制御入力コスト) をできるだけ少なくしながら終端位置での横方向偏差と方位偏差を小さくする」ことにある。つまり、前方注視距離 L_1 以内で横方向偏差、方位偏差をなくすことが目的であり、途中の走行軌跡は考慮しない。また、 $t_f = |\xi_{L_1} - \eta| / V$ とした。

評価関数における時間変数を τ ($t \leq \tau \leq t + t_f$) で表わすと、ハミルトニアン $H(\tau)$ は以下で与えられる。

$$\begin{aligned} H(\tau) &= r_2 u^2(\tau) + \lambda^T(\tau) (A(\tau)x(\tau) \\ &\quad + Bu(\tau) + z(\tau)) \end{aligned} \quad (6.21)$$

ここで $\lambda(\tau)$ は随伴変数であり、5 次のベクトルとなる。

随伴変数の微分方程式は $\dot{\lambda}(\tau) = -\frac{\partial H}{\partial x}$ で表わされることから、

$$\dot{\lambda}(\tau) = -A^T(\tau)\lambda(\tau) \quad (6.22)$$

となり、制御入力の最適性の条件 $\frac{\partial H}{\partial u} = 0$ から、

$$\begin{aligned} 2r_2 u^0(\tau) + B^T \lambda(\tau) &= 0 \\ u^0(\tau) &= -\frac{1}{2r_2} B^T \lambda(\tau) \end{aligned} \quad (6.23)$$

が得られる。ここで、 u^0 は最適解を表わすものとする。

境界条件は初期時刻 t と終端時刻 $t+t_f$ において以下のように表わされる。

$$x(t) = x_0, \quad \lambda_f^T = R_3 x(t+t_f) = R_3 x_f \quad (6.24)$$

以上からこの問題は式 (6.24) を境界条件とする 2 点境界値問題を解くことに帰結する。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}^0(\tau) \\ \dot{\lambda}(\tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(\tau) & -\frac{1}{2J_2} BB^T \\ 0 & -A^T(\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^0(\tau) \\ \lambda(\tau) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z(\tau) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

ただし x^0 は最適入力 u^0 に対応する最適解を表わす。

ここで式 (6.25) の遷移行列 $\Phi(\tau, t)$ を次のように分割する⁹¹⁾。

$$\Phi(\tau, t) = \begin{bmatrix} \Phi_{11}(\tau, t) & \Phi_{12}(\tau, t) \\ 0 & \Phi_{22}(\tau, t) \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

すると、

$$x^0(\tau) = \Phi_{11}(\tau, t+t_f) x_f^0 + \Phi_{12}(\tau, t+t_f) \lambda_f + \int_{t+t_f}^{\tau} \Phi_{11}(T, t+t_f) z(T) dT \quad (6.27)$$

と得られる。式 (6.24) を代入すると、

$$x^0(\tau) = [\Phi_{11}(\tau, t+t_f) + \Phi_{12}(\tau, t+t_f) R_3] x_f^0 + \int_{t+t_f}^{\tau} \Phi_{11}(T, t+t_f) z(T) dT \quad (6.28)$$

となる。同様に、

$$\lambda(\tau) = \Phi_{22}(\tau, t+t_f) R_3 \lambda_f^0 \quad (6.29)$$

が得られ、式 (6.29) に式 (6.28) を代入すると

$$\lambda(\tau) = \Phi_{22}(\tau, t+t_f) R_3 [\Phi_{11}(\tau, t+t_f) + \Phi_{12}(\tau, t+t_f) R_3]^{-1} [x^0(\tau) - S_1] \quad (6.30)$$

が得られる。ただし、

$$S_1 = \int_{t+t_f}^{\tau} \Phi_{11}(T, t+t_f) z(T) dT \quad (6.31)$$

とおいた。式 (6.30) を

$$\lambda(\tau) = P(\tau) x^0(\tau) - P(\tau) S_1 \quad (6.32)$$

$$P(\tau) = \Phi_{22}(\tau, t+t_f) R_3 [\Phi_{11}(\tau, t+t_f) + \Phi_{12}(\tau, t+t_f) R_3]^{-1} \quad (6.33)$$

とおくと、式 (6.33) はリカッチ方程式

$$\dot{P}(\tau) = -A^T(\tau) P(\tau) - P(\tau) A(\tau) + \frac{1}{2J_2} P(\tau) B B^T P(\tau) \quad (6.34)$$

の解として与えられる。

式 (6.34) の境界条件は、

$$P(t+t_f) = R_3 \quad (6.35)$$

と終端で与えられ、逆向きに解くことで解を得られる。

c. 計算アルゴリズム

式 (6.34) のリカッチ方程式と式 (6.31) 中の遷移行列は時間に依存する行列 $A(\tau)$ を含む。 $A(\tau)$ を決定するには時刻 τ における $p(\tau)$, $q(\tau)$ が必要となるが、これらは車輪の滑り角 $\alpha(\tau)$ によって決定される。任意の区間 $t \leq \tau \leq t+t_f$ における時系列データ $\alpha(\tau)$ をあらかじめ得ることは不可能であるから、式 (6.34), (6.32), (6.31), (6.25) を繰り返し計算することで解の収束を試みた。以下にそのアルゴリズムを示す。

Step 0 :

k 番目の繰り返しにおける $A(\tau)$, $P(\tau)$, $\lambda(\tau)$, S_1 をそれぞれ $A^{(k)}(\tau)$, $P^{(k)}(\tau)$, $\lambda^{(k)}(\tau)$, $S_1^{(k)}$ とおく。ただし $A^{(0)}(\tau)$ は $\alpha(\tau) = \alpha(t)$ を代入して得られる値を用いる。

Step 1 :

式 (6.34) のリカッチ方程式

$$\dot{P}^{(k)}(\tau) = -A^{(k)T}(\tau) P^{(k)}(\tau) - P^{(k)}(\tau) A^{(k)}(\tau) + \frac{1}{2J_2} P^{(k)}(\tau) B B^T P^{(k)}(\tau)$$

を式 (6.35) を初期値として、 $\tau = t+t_f$ から $\tau = t$ まで逆向きに解いて $P^{(k)}(\tau)$ を算出する。

Step 2 :

$S_1^{(k)}$ を式 (6.31) を用いて計算する。そして Step 1 で得た $P^{(k)}(t)$ と共に式 (6.32) に代入して $\lambda^{(k)}(t) = \lambda_0^{(k)}$ を求める。

$$\lambda_0^{(k)} = P^{(k)}(t) x_0 - P^{(k)}(t) S_1^{(k)}$$

Step 3 :

$k=5$ のとき一連の繰り返し計算を終了し、最適解として $u^{(5)}(t) = -\frac{1}{2r_2} B^T \lambda_0^{(5)}$ を採用する。この繰り返し回数5という値は後述のシミュレーション結果を考慮して決定した。 $k < 5$ の場合は Step 4 に進む。

Step 4 :

$[x_0, \lambda_0^{(k)}]^T$ を初期値として、式(6.25)を $\tau = t$ から $\tau = t + t_f$ まで前向きに解く。その際 $A^{(k)}(\tau)$ を更新する。そして $k = k + 1$ とし、step 1 に戻る。

以上のアルゴリズムに従って最適解を得る。本アルゴリズムは時系列データ $A^{(k)}(\tau)$ を繰り返し更新することによって適切な随伴変数の初期値 λ_0 を推定し、式(6.25)の2点境界値問題を両端の境界条件を強引に引き合わせることによって解く手法である。

時刻 t における入力 $u(t)$ には $u^0(t)$ を採用し、制御周期毎に解を計算するものとする。つまり本手法は本来 t_f 間の時系列データとして得られる最適解の初期値のみを制御入力として適用しており、これは最適制御という意味では数学的正当性が成立しない。しかし本システムは航法センサから得られる観測データを操舵周期と同速度(10 Hz)で更新することができ、制御周期毎に観測値のフィードバックを行ったほうが有効であると判断したため、このような変則的な手法を採用した。

d. シミュレーション

本アルゴリズムの有効性をシミュレーションによって確認した。Fig. 6.2 はある初期位置 x_0 を与えたとき、算出される最適操舵速度 $u^0(\tau)$ の時系列が本アルゴリズムの繰り返し計算によってどのように変化するかを示したものである。このとき走行速度は1.5 m/s、与えた初期位置は、 $x_0 = [0.91 \text{ m}, 1.3^\circ, 10.5^\circ/\text{s}, -38.1^\circ, 10.1^\circ]^T$ である。繰り返し回数 $k=1$ と $k=2$ では初期値で $1.8^\circ/\text{s}$ の差があり、その後の推移も大きく様子が異なる。しかし $k=2$ からは収束する傾向を示し、 $k=3$ 以降の軌跡はほとんど重なった。本シミュレーションにおいて隣り合う

繰り返し回数の軌跡の偏差の r.m.s. 値は、 $k=1$ と $k=2$ で $26.4^\circ/\text{s}$ 、 $k=2$ と $k=3$ で $2.7^\circ/\text{s}$ 、 $k=3$ と $k=4$ で $0.4^\circ/\text{s}$ 、 $k=4$ と $k=5$ で $0.02^\circ/\text{s}$ となった。この結果はどのような初期値を選んでも似たような傾向を示し、よって5回の繰り返し計算で十分満足な収束を得られると判断した。Fig. 6.3 は $k=5$ における横方向偏差、車両方位、舵角の推移である。このように操舵角の大きい走行においても横方向偏差、車両方位共に終端時刻ではほぼ0になり、本アルゴリズムが正常に機能していることを証明する。

C. 実機実験

a. 車両パラメータの同定

実機実験を行う前に車両パラメータを同定する必要がある。ここで同定すべき車両パラメータとは質量 M 、ヨー方向慣性モーメント I 、重心から前後車軸までの距離 l_f, l_r 、前後輪のコー

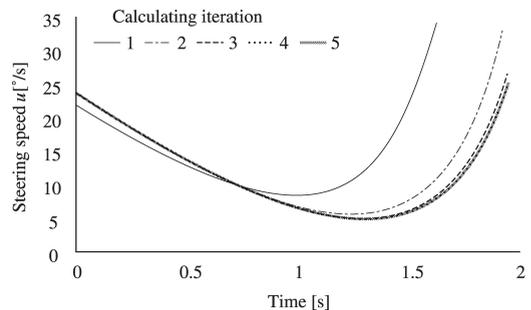


Fig. 6.2 The variation of optimal steering speeds in each iteration of calculation

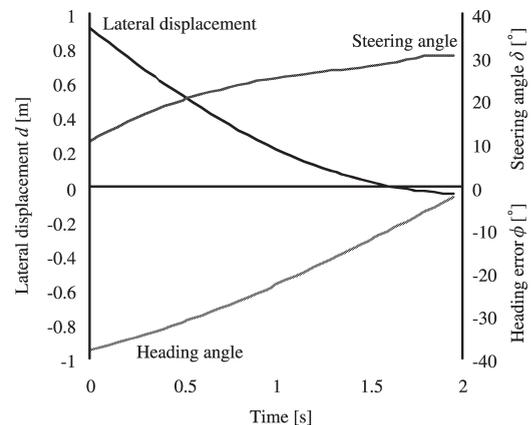


Fig. 6.3 The trajectories of lateral displacement, heading error, and steering angle

ナリングパワー K_f, K_r , 前後輪と路面との間に働く摩擦係数 μ_f, μ_r であるが, M, I, l_f, l_r はメーカーカタログ値を, μ_f, μ_r は農業機械ハンドブック²⁾から引用した。

よってここで実際に求めたパラメータとは K_f と K_r の2つである。ある範囲の K_f と K_r のすべての組み合わせに対して, 式 (6.7) ~ (6.11) の運動方程式を用いて定常円旋回の走行シミュレーションを行い, その旋回半径が実機の旋回半径と最も一致したときの K_f と K_r の組み合わせを採用した。実機実験を行ったのは北海道大学北方生物圏フィールド科学センター生物生産研究農場の牧草刈り跡地であり, 以降の供試ほ場も同様である。定常円旋回は走行速度3段階 (1.0 m/s, 2.0 m/s, 3.0 m/s), 舵角12段階 ($\pm 12^\circ, \pm 16^\circ, \pm 20^\circ, \pm 24^\circ, \pm 28^\circ, \pm 31^\circ$ (最大操舵角)), 計36水準行い, そのときの結果を Table 6.1 に示した。そして, 以下の評価関数を最小にする K_f と K_r の組み合わせを採用した。

$$J_{radius} = \sum_V \sum_\delta \left\{ \frac{(r(V, \delta) - \hat{r}(V, \delta))^2}{r(V, \delta)} \right\} \quad (6.36)$$

ただし $r(V, \delta)$ は速度 V , 舵角 δ のときの実機による旋回半径, $\hat{r}(V, \delta)$ はシミュレーションによる旋回半径である。

以上から $K_f = 166 \text{ N/}^\circ$, $K_r = 270 \text{ N/}^\circ$ が得ら

Table 6.1 Turning radius of tested vehicle

Steering angle [°]	Travel speed [m/s]		
	1.0	2.0	3.0
12	12.37	12.41	12.91
16	8.98	9.03	9.25
20	7.00	7.12	7.52
24	5.72	5.85	6.15
28	4.81	4.96	5.23
31	4.27	4.37	4.69
-12	12.06	12.72	13.29
-16	8.82	9.23	9.8
-20	6.92	7.26	7.53
-24	5.67	6.1	6.33
-28	4.79	5.03	5.35
-31	4.26	4.44	4.69

れ, そのときのシミュレーション結果を Fig. 6.4 に示した。横軸がシミュレーションによる旋回半径, 縦軸が実機による定常円旋回の半径である。ただしステアリング角度が負のときの旋回半径を負で表わした。このとき $r = \hat{r}$ に対して直線回帰を行った結果, 決定係数 0.997 という結果が得られた。このことから, 想定される操舵角と走行速度の範囲において, 同定された車両パラメータを適用した拡張2輪モデルは十分な精度でトラクタの運動を記述できるものと判断される。線形モデルにもかかわらずこのように高い相関が得られた理由として, 式 (6.4) によってタイヤの滑り角とコーナリングフォースの関係の非線形性が補償されたこと, また式 (6.4) はタイヤの滑り角によってコーナリングパワーが変化することを意味し, これによって線形化過程における三角関数の近似誤差がある程度相殺されたのではないかと推察できる。

2輪モデルについても同様のパラメータ同定を行い, 拡張2輪モデルとの比較を行った。Fig. 6.5 は走行速度 3.0 m/s, 舵角 15° 以上のときの実機による旋回半径に対するシミュレーションによる旋回半径の誤差である。走行速度, 舵角共に大きいことから, 運動の非線形性も最も強くなる条件設定である。図から明らかなように, 本条件においてすべての操舵角で拡張2輪モデルの偏差が2輪モデルより小さくなり, 拡張2

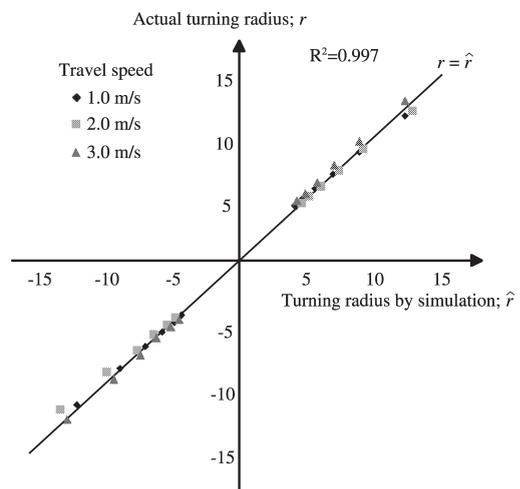


Fig. 6.4 Simulation result of constant circular turning

輪モデルを導入することによって運動モデルの精度が向上することが確認できた。

以上、車両パラメータは以下の様に決定された。

$$M=3200 \text{ kg}, I=1370 \text{ kgm}^2, l_f=1.41 \text{ m}, \\ l_r=0.89 \text{ m}, \mu_f=0.60, \mu_r=0.60, \\ K_f=166 \text{ N/}^\circ, K_r=270 \text{ N/}^\circ$$

b. ほ場での走行実験

1) 直角経路に対する追従

直角経路を含む農道を目標経路として走行実験を行った。Fig. 6.6 にその時の目標経路を示した。本経路は実際に農道を有人で走行したときの走行軌跡を RTK-GPS で記録したものである。この経路に対して本章で開発した手法(レギュレータ)とⅣ章において開発した PI 制御器による手法(従来法)の走行精度を比較した。従来法の制御ゲインは過去にゲインチューニングした値を採用した。なお走行速度は 1.8 m/s とした。

Fig. 6.7 に両走行の横方向偏差と舵角の推移を示した。グレーに着色した部分は 90° 旋回区間を表わしており、Fig. 6.6 のそれと一致する。直線部分での両者の精度は変わらないものの、経路が直角になる部分では従来法は約 50 cm

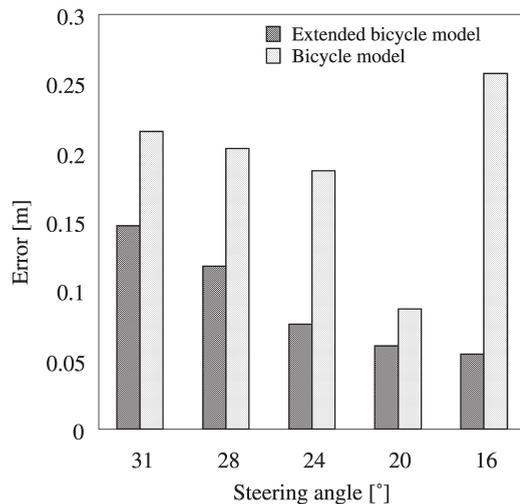


Fig. 6.5 Comparison between Extended bicycle model and bicycle model on simulation of constant circular turning

目標経路の内側を走行しているのに対し、レギュレータは走行を通じてほとんど偏差が一定である。従来法で設定した前方注視距離は 3.5 m であり、これはレギュレータのそれよりも 1.5 m 長い。ゆえに従来法の方がより経路の先を目標点とするため、直角部分でステアリングを切り始めるタイミングがレギュレータよりも早くなり、その結果経路の内側を走ってしまう。Fig. 6.7 の舵角の推移でも直角部分において従来法のほうが早い段階でステアリングを切り始めている。仮に従来法の前注視距離をレギュレータと同じ 2 m に設定したとすると、算出される目標操舵角が発散してしまい、直角経路すら追従できなくなることが過去の実験結果から

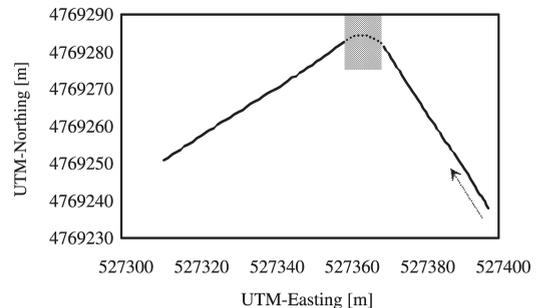


Fig. 6.6 Desired path for transfer including 90 degree turning

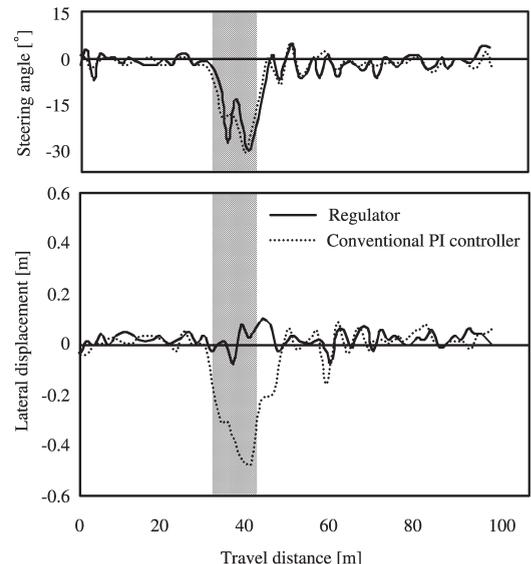


Fig. 6.7 Lateral displacements and steering angle on the transfer path

わかっている。よって本結果はステアリングコントローラに運動モデルを考慮したことによって前方注視距離を短く設定することができ、曲線追従の精度を向上させることができた。

本走行においてレギュレータの最大偏差は16 cm、従来法は50 cmであった。

2) 正弦波経路に対する追従

Fig. 6.8 の曲線部分は振幅 2.5 m、波長 30 m の正弦波であり、この経路を目標経路として試験を行った。走行速度は 1.8 m/s である。Fig. 6.9 はそのときの横方向偏差の推移であり、図中①～⑤は目標経路中に同一数字で示した経路の頂点と一致することを表わしている。従来法ではロボットが常に目標経路の内側を走行し、そ

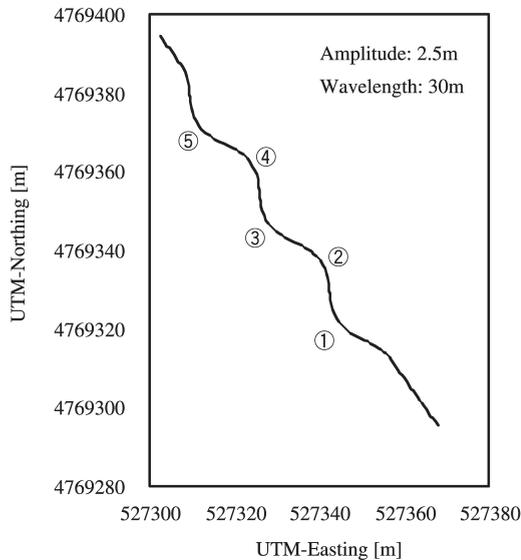


Fig. 6.8 Sinusoidal desired path

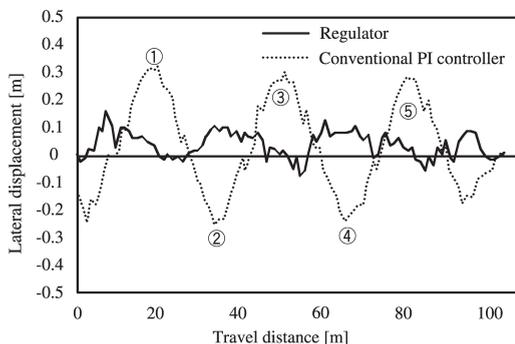


Fig. 6.9 Lateral displacements on sinusoidal path

の偏差は経路の頂点付近で 30 cm にも達する。しかし、レギュレータは経路の頂点付近で僅かに偏差が大きくなるものの、その偏差はすべて 15 cm 以内であり、これは直角経路の追従試験結果の傾向と一致する。本試験において、レギュレータの横方向偏差の最大値は 13 cm、走行全体の r.m.s. 値は 6 cm だったのに対し、従来法ではそれぞれ最大値が 34 cm、r.m.s. 値は 17 cm となり、ここでもレギュレータの優位性が確認された。

3) 前進旋回経路に対する追従

V章の手法を用いて生成した前進旋回の経路に対して試験を行った。走行速度は 1.0 m/s である。Fig. 6.10 にそのときの目標経路と、レギュレータによる走行軌跡を示した。走行軌跡と目標経路がほぼ一致している。Fig. 6.11 に作業開始地点（旋回経路終了地点）2 m 手前から

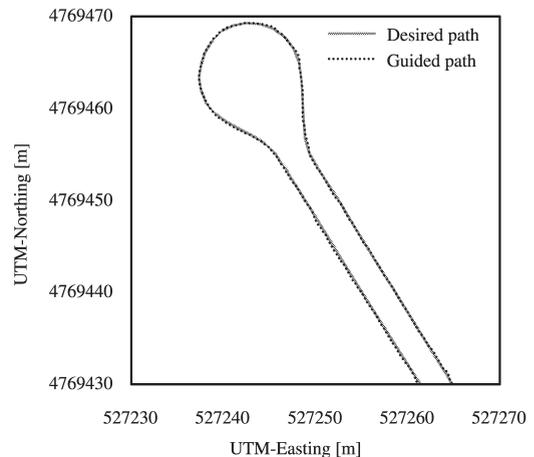


Fig. 6.10 Desired path of forward turning and guided path

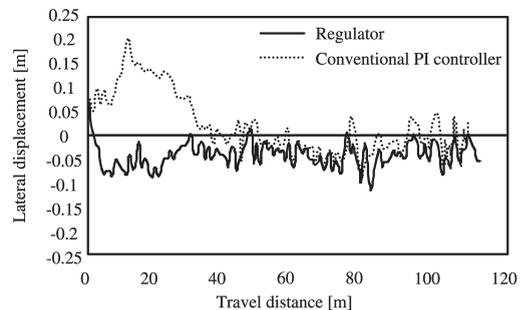


Fig. 6.11 Lateral displacements on forward turning

の横方向偏差の推移を示した。レギュレータは作業開始以降では横方向偏差が15 cm以下に抑えられたのに対して、従来法では最大偏差が25 cmとなり、枕地旋回についても精度の向上が見られた。

4) 高速走行

走行速度3 m/sに設定して試験を行った。目標経路は有人走行によって取得した約80 mの直線経路である。Fig. 6.12に横方向偏差の推移を示した。両走行とも走行を通じてほぼ一定の偏差で走行している。このときレギュレータの横方向偏差の最大値は10.3 cm, r.m.s. 値は3.5 cmであった。一方従来法はそれぞれ最大値が13.8 cm, r.m.s. 値が5.6 cmであり, r.m.s. 誤差で38%精度が向上した。

D. ま と め

本章では最適制御アルゴリズムを適用したステアリングコントローラを開発し、主に目標経路が曲線で表わされるときの追従精度の向上を図った。

- 1) 運動方程式を1階の線形微分方程式で記述することによって、最適レギュレータ問題として定式化した。
- 2) 従来の2輪モデルでは、タイヤに働くコーナリングフォース F をそのタイヤに働く滑り角 α を用いて $F = K\alpha$ の形で表わすのが一般的であるが、実際は α が大きくなると F の値は飽和する。よってFialaの理論から導かれる関係式(式(6.4))を導入して拡張2輪モデルと呼ぶ新しい運動モデルを提案し、 α が大きいときの α と F の非線形性を補償した。

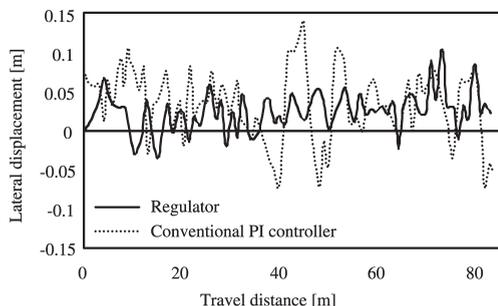


Fig. 6.12 Lateral displacements on high-speed guidance (3.0 m/s)

- 3) ほ場において実機実験を行った。直角経路、正弦波、前進旋回経路といった曲線経路に対する走行試験、また3.0 m/sの高速走行試験を行い、IV章で開発されたコントローラとの精度比較を行った。その結果、すべての試験において本章で開発したコントローラのほうが優れた成績を納めた。

VII. ほ場作業ロボットを適用した農作業

A. 目的及び範囲

開発した無人トラクタの信頼性と精度を確認するため幾つかの農作業を実施した。本章ではその結果について詳述する。作業内訳は、ロータリ耕うん、施肥、中耕除草、そして薬剤散布である。

また本章ではシステムのユーザーインターフェースについても説明する。I章のアンケート結果が示すように、操作性に優れたユーザーインターフェースをユーザーに提供することは重要である。本システムのユーザーインターフェースはWindows上で動くGUIベースのソフトウェアであり、Windowsとトラクタに関する知識が少々あれば誰でも使えるような操作環境の開発を目的とした。

B. ユーザーインターフェース

本システムをユーザーが操作する機会は、作業計画の立案と作業開始前の設定のときである。作業計画の立案とは作業計画マップの生成を指し、本システムでは独自に開発したGISソフトウェアによって行う。これは作業を行うほ場の第1行程の始点と終点の座標を入力することでほ場に平行な経路を生成するか、自ら走行した軌跡を記録してマップとすることもできる。後者においては走行軌跡のみならず、走行時の変速段数やエンジン回転数をコードとして記録することができる。一方、作業開始前の設定ソフトとしてFig. 7.1に示したようなGUIベースのソフトウェアを開発し、マウスをクリックするのみで、作業の設定を行うことができるようにした。作業前に設定するのは、作業計画マップの読み込み、作業行程順の決定、作業種の実行である。

さらにキャビン外部に発進・一時停止スイッ

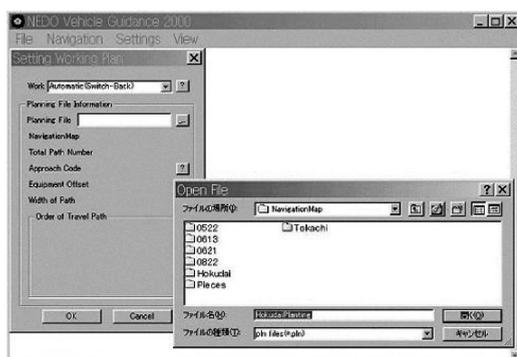


Fig. 7.1 Setting software for autonomous guidance



Fig. 7.2 The start and temporally stop switch (left) and emergency stop switch (right)

チを設け (Fig. 7.2 左), ユーザーが車内で作業設定を終えて下車し, 安全を確保してからロボットを発進できるようにした。また施肥・播種や薬剤散布などの作業では作業中の資材補給が必須である。一時停止スイッチによって, 作業中の資材補給を可能にした。Fig. 7.2 の右の丸いスイッチは非常停止スイッチである。万が一作業中にトラブルが発生した場合このボタンを押すことによってエンジンを緊急停止することができ, これはリモートコントローラでも可能である。

C. 各種農作業の結果

a. ロータリ耕うん作業

Fig. 7.3 に北海道大学北方生物圏フィールド科学センター生物生産研究農場で実施したロータリ耕うん作業の結果について示した。実線が

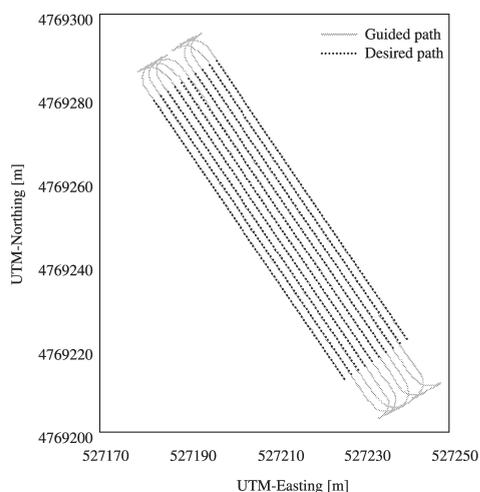


Fig. 7.3 Result of autonomous rotary tillage

走行軌跡, 点列は目標経路であり, それぞれの点はナビゲーションポイントを表わす。作業は全 10 行程, 設定作業速度は作業中が 0.6 m/s, 旋回中が 0.25 m/s とした。

まず作業精度に注目する。作業軌跡と目標経路がほぼ重なり, 本システムの作業精度の高さを証明する。作業全体での目標経路に対するトラクタの横方向偏差は r.m.s. 値で 6 cm, 最大でも 15 cm であった。一例として第 8 行程に置ける横方向偏差の推移を Fig. 7.4 に示した。作業開始から終了まで安定した精度で作業できている。

旋回部分に注目すると, 作業をした行程の順番が不規則であることがわかる。旋回部分を拡大して Fig. 7.5 に示した。目標経路に左 (西) 側から順に①~⑩と番号をつけるとすると, 作業行程順が①④②⑤③⑥⑦⑨⑧⑩となっている。これは供試ほ場の両側に作物が存在し, ①から②の行程に移行するためには切り返し旋回に必要とする後退距離が確保できないことによる。慣行のロータリ耕うん作業では隣接行程の耕うん跡を目標にして作業するためこのような作業は不可能であり, ロボットトラクタならではの作業方法である。

b. 播種作業

Fig. 7.6 に播種作業の目標経路となる作業計画マップを示した。本作業はほ場内作業のみならず格納庫とほ場間の移動を含めた一連の作業

である。本図から明らかなように農道移動経路とは場内の作業経路は接続されていない。ロボットトラクタは格納庫を発進する際に農道経路と第1行程を接続する経路を自ら生成しては場作業へ移行する。帰還の際も最終行程の作業終了と同時に現在位置から農道経路までの接続経路を動的に生成することによって格納庫まで帰還する。また農道移動の経路と作業経路の最終行程が重なっているが、これは供試ほ場が南側からしか進入できない配置になっており、行程数の都合上どうしても南側で作業を終了する必要があったためである。この経路が重複する部分は全く同じ経路を走行することが必要となり、精度の高い走行が要求される。本作業は大豆の播種7行程であり、設定走行速度は、作業中0.4 m/s, 旋回中0.25 m/s, 農道移動は直線部分で1.0 m/s, 直角部分は0.2 m/sとした。

Fig. 7.7 に作業軌跡を示した。農道経路を通り、滑らかに第1行程に移行できている。また最終行程である第7行程の作業軌跡と移動経路の走行軌跡がほとんど重なっていることがわか

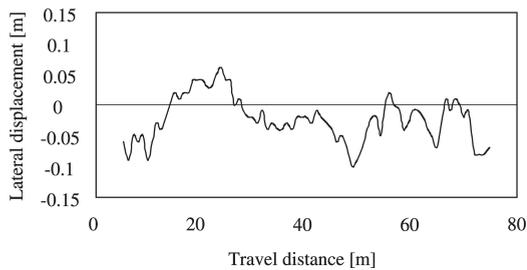


Fig. 7.4 The lateral displacement of autonomous rotary tillage on 7th path

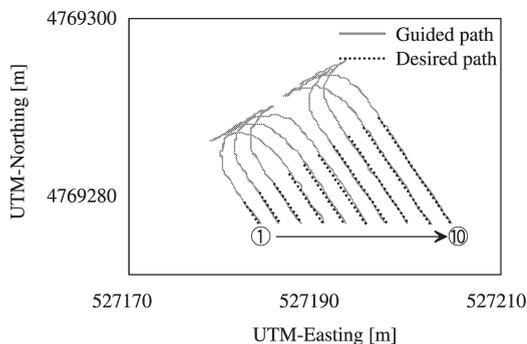


Fig. 7.5 The turning trajectory of autonomous rotary tillage

る。Fig. 7.8 に最終行程とそれと一致する部分の移動経路におけるロボットトラクタの横方向偏差の推移を示した。横軸は第7行程の目標経路と一致する。両経路とも15 cm以内の偏差で走行し、かつ非常に似通った軌跡を描いており、本作業の精度の高さと再現性を表わしている。

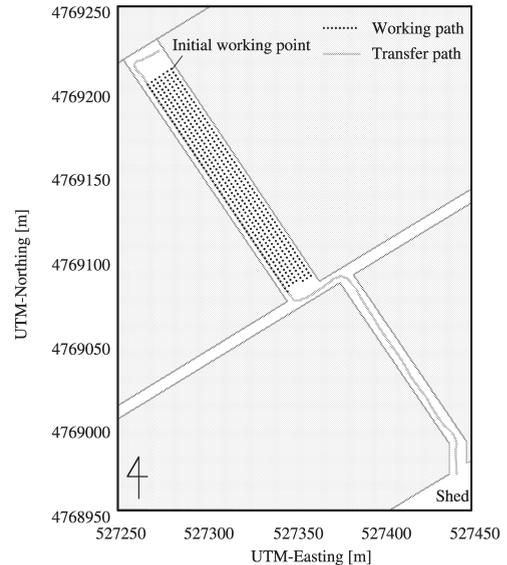


Fig. 7.6 The navigation map of planting with transfer path

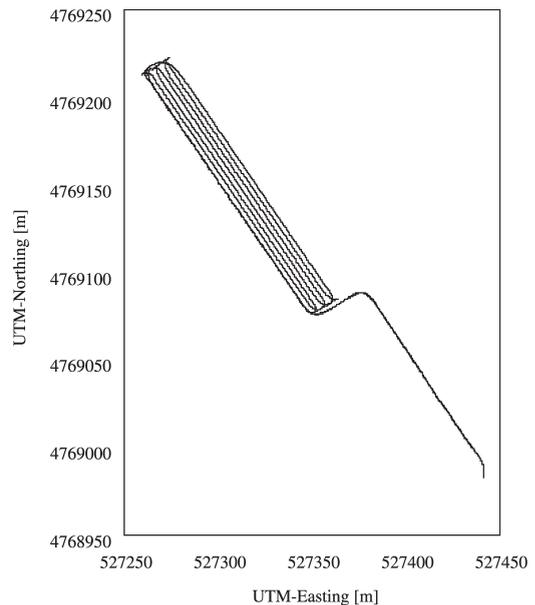


Fig. 7.7 The guided path of planting with transfer

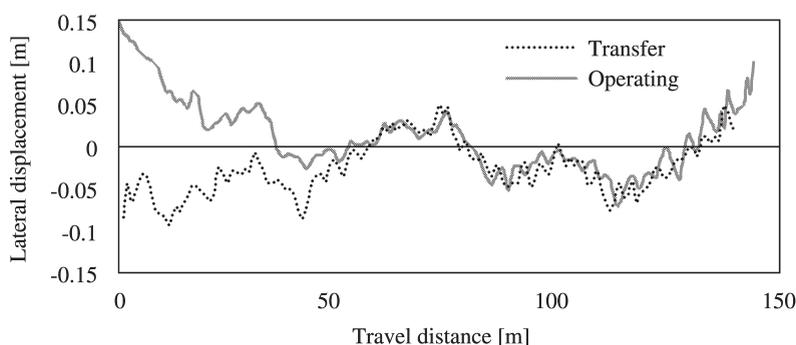


Fig. 7.8 The reproducibility of guided path

本作業において作業全体の横方向偏差の r.m.s. 値は 5.7 cm, 最大偏差は 15 cm であった。

c. 除草作業

次にビートほ場のロータリカルチベータを用いた条間除草の結果について報告する。これは播種を有人で行ったほ場に本システムを適用したものである。したがって作物列は完全な直線ではなく、トラクタは僅かに曲がった経路を追従することを要求される。今回は播種時の走行軌跡を記録していなかったため、一度ほ場を有人で走行してその時の軌跡を記録し目標経路とした。

Fig. 7.9 にその時の作業軌跡を示した。本作業も前作業同様、農道移動から作業に移行している。またロータリ耕うんと同じように行程順が変則的なものとなっているが、これは装着した作業機の都合上必要とされた。作業計画マップのコードには各行程番号が記号化されているためにこのような任意順の経路の走行が可能となった。本作業において作業全体の横方向偏差の r.m.s. 値は 7 cm, 最大偏差は 15 cm であった。目標経路が前 2 作業とは異なって直線ではなかったが、ほぼ同程度の走行精度を得ることができた。

d. 防除作業

最後にスプレーヤによるビートほ場の薬剤散布作業の結果について述べる。供試ほ場として十勝の一般の農家のビートほ場を提供していただいた。Fig. 7.10 に作業軌跡を示した。北側の旋回部分において一部データが欠けているのは、ほ場の北側に防風林が設置されており、GPS 衛星を捕捉できなかったことが原因であ

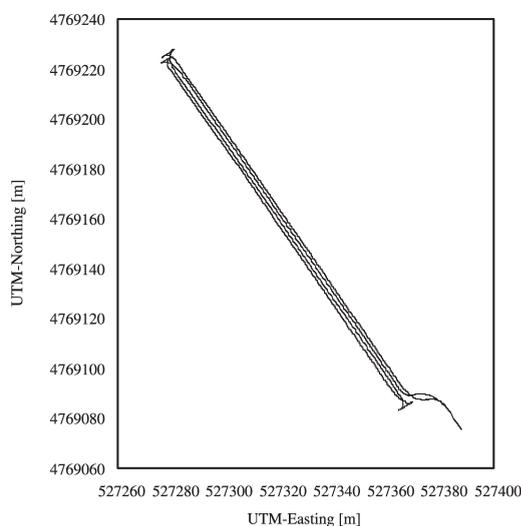


Fig. 7.9 The guided path of cultivating

る。GPS が fix 解を計算できないときロボットトラクタは作業を停止するように設計されている。このような場合、ユーザーは有人走行で GPS 衛星が捕捉できる位置まで移動し、作業再開ボタンを押すことによって作業を再開することができる。本作業はスプレーヤ作業であるため作業途中での薬剤補給が必要となる。ロボットトラクタがほ場南側で旋回を行う際に、車両外部に取りつけた一時停止ボタンによって作業を中断し、薬剤を補給した。Fig. 7.11 にそのときの作業の様子を表わした。

D. まとめ

本章では開発したシステムのインターフェースの内容について説明した。また一年を通してほ場で実施した無人作業のうち 4 作業の結果を解析し、その操作性と信頼性、さらに精度につ

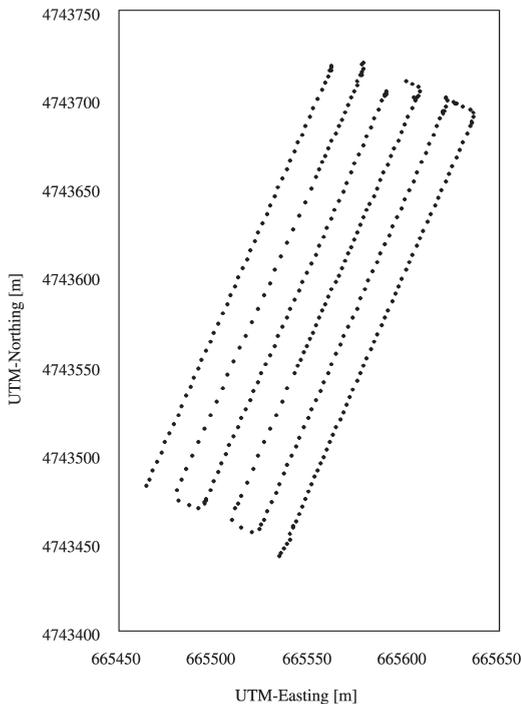


Fig. 7.10 The guided path of spraying



Fig. 7.11 Supplying operation

いて評価を行った。

- 1) 本システムをユーザーが操作する機会は作業計画の立案と作業開始前の設定のときであるが、そのユーザーインターフェースはWindows上で動くGUIベースのソフトウェアであり、Windowsとトラクタに関する知識が少々あれば誰でも使えるような操作環境の開発を目的とした。
- 2) 作業計画マップのコードには各行程番号が

記号化されているため、任意順の経路の走行が可能である。慣行のロータリ耕うん作業では隣接行程の耕うん跡を目標にして作業するためこのような作業は不可能であり、無人トラクタならではの作業方法である。

- 3) ほ場内作業のみならず格納庫とほ場間の移動を含めた一連の作業を実施した。このとき農道移動経路とほ場内の作業経路は接続されていないが、ロボットトラクタは格納庫を発進する際に農道経路と第1行程を接続する経路を自ら生成してほ場作業へ移行する。帰還の際も最終行程の作業終了と同時に現在位置から農道経路までの接続経路を動的に生成することによって格納庫まで帰還することができる。
- 4) ビートほ場のロータリカルチベータを用いた条間除草を行った。これは播種を有人で行ったほ場に本システムを適用したものである。したがって作物列は完全な直線ではなく、トラクタは僅かに曲がった経路を追従することを要求されるが、ロボットトラクタは作物列を踏みつけることなく作業を完了した。
- 5) 最後に十勝の篤農家のほ場で実施したスプレーヤ作業の結果について述べた。供試ほ場には防風林が存在し、十分な数の衛星が捕捉できない場所が存在した。このような場合、ユーザーは有人走行でGPS衛星が捕捉できる位置まで移動し、作業再開ボタンを押すことによって作業を再開することができる。
- 6) スプレーヤ作業は作業途中での薬剤補給が必要となる。ロボットトラクタがほ場端で旋回を行う際に、車両外部に取りつけた一時停止ボタンによって作業を中断し、薬剤を補給した。

VIII. 総 括

本研究はRTK-GPSと光ファイバージャイロ (Fiber Optical Gyroscope ; FOG) を航法センサとする農用ロボットシステムの実用化に資する基盤技術の開発を目的としている。これま

でロボットトラクタに関する研究は、国内外を問わず多く実施されてきた。しかし既往の研究には、無人ほ場作業システムとして機能するために解決されなくてはならない技術的課題が幾つか存在する。その課題とは；

- 通年作業に対応できる汎用性
- 無人作業中の安全性
- 曲線経路に対する追従精度
- 誰にでも使える操作性
- 環境の変化や作業中のトラブルに対するロバスト性

に関する要素や機能を満たすことにある。

上記に列挙した現状のロボットトラクタの問題点を踏まえ、本システムはその作業対象を耕起、播種、管理作業、収穫など農地におけるトラクタ作業すべてとした。これまでに耕うんロボット、自動田植機など単一作業に限ったロボットシステムは発表されているが、本研究のように通年作業を対象とした“汎用ロボットシステム”はいまだ報告例がない。

本研究の自律作業システムとしてのキーテクノロジーは以下の5点に集約できる；

1) ロボットトラクタのハードウェアの構築 (第II章)

本研究のロボットトラクタは供試車両、航法センサであるRTK-GPSとFOG、さらにこれらを統括する制御コンピュータによって構成される。供試車両は操舵、前進・停止・後退の切り替え、変速、3点リンクヒッチの昇降、エンジン回転数、PTOのオン・オフ、ブレーキのオン・オフをコンピュータでコントロール可能である。位置計測システムにはRTK-GPSを採用した。供試RTK-GPSの計測精度は2cm、サンプリング周波数は20Hzである。車両方位の計測には3軸のFOGであるIMUを採用した。IMUは光ファイバージャイロと加速度計を3個ずつ内蔵し、3軸周りの角度と角速度を計測することができる。IMUによって計測される車両のヨー角を航法データとして、ロール角、ピッチ角をGPSアンテナ位置の傾斜補正にそれぞれ用いた。

2) RTK-GPSとFOGのセンサフュージョンによる絶対方位の推定 (第III章)

本研究の航法センサ、RTK-GPSとFOGはそれぞれ計測精度は優れているが、FOGは相対方位しか計測できない、ドリフトエラーを発生するという問題点を有する。これは両センサの座標系が動的に変化することを意味し、センサフュージョンにより両センサの座標系を一致させる必要がある。本研究では、最小二乗法を適用して絶対方位に対するFOGのバイアス値を逐次推定することによって、車両の絶対方位を算出できる方法を開発した。この手法を有人走行で得られた軌跡データに適用してその手法の妥当性を検討した。直線、曲線、旋回など様々な走行軌跡に対してシミュレーションを行った結果、ドリフトエラーを含むFOGのバイアス値の推定が可能であることが明らかとなった。

3) 作業計画マップによるロボットトラクタの汎用化 (第IV章)

第IV章は本システムが汎用ロボットシステムとして機能するためのキーテクノロジーである「作業計画マップ」の概念について述べた。作業計画マップは目標経路と共に作業やほ場の情報を合わせ持つ階層構造マップであり、作業の種類に応じてマップを変更することで様々な作業に対応することができる。作業計画マップは緯度、経度、コードを要素とするナビゲーションポイントと呼ぶ点の集合で構成される。コードには各ナビゲーションポイントにおけるエンジン回転数、変速段、PTO、ヒッチ操作といったロボットへの動作命令や、行程番号などのほ場に関する情報が記号化されている。目標経路が点列で構成されていることから曲線を表現することも可能である。これにより、矩形ほ場以外での作業や格納庫一ほ場間の移動など任意経路の走行も可能となる。また播種時の走行軌跡を次回以降の目標経路とすることによって、さらに精度の高い自律走行も実現できる。実作業に本手法を適用して無人作業を行った結果、目標経路に対してr.m.s.で4.5cmの走行誤差で走行させることができた。

4) 拘束条件を有した経路生成による枕地旋回精度の向上 (第V章)

枕地旋回のための経路生成アルゴリズムを考案した。枕地旋回を高精度かつ高効率に行うことは作業所要時間の短縮を可能にし、ほ場効率の向上につながる。前進のみで旋回する場合、前進と後退を用いて旋回する場合の2種類の旋回法に対して、旋回経路を3次スプライン関数によって生成した。トラクタの最小旋回半径と最大操舵速度に関する拘束条件を設け、これらの拘束条件を満たさない場合は経路を再計算して、走行可能な経路を生成する。

生成された経路に対してシミュレーションを行った結果、拘束条件なし、または最小旋回半径拘束のみを適用した経路よりも、2つの拘束条件を適用した経路のほうが精度よく経路を追従でき、拘束条件の有効性が明らかとなった。

ほ場で実機実験を行った結果、前進旋回では1.35 m/sまでの走行速度に対して、作業開始以降の偏差を20 cm以下に抑えることができた。繰り返し旋回は第IV章で用いた手法と比較して旋回終了地点での精度が50 cm以上向上した。

5) 最適制御理論に基づいた操舵制御による曲線追従精度の向上 (第VI章)

曲線経路の追従精度向上を目的として、最適制御を適用した操舵制御アルゴリズムを開発した。第IV章で開発したPI制御器による手法は主に直線経路を追従させることを目的に開発したものであり、曲線追従の精度を保証するものではない。しかし、ロボットトラクタとして完成度を高めるためには、農道移動や任意経路の走行を可能にする必要があり、曲線追従精度の向上が不可欠である。最適レギュレータを適用した操舵制御アルゴリズムを開発し、第IV章の手法と曲線経路への追従精度の比較を行った。直角経路、正弦波経路、そして前章で考案した前進旋回の経路に対して精度比較を行った結果、すべての経路において第IV章の手法よりも精度よく経路に追従できることが明らかとなった。また3.0 m/sの高速走行の試験も行った結果、第IV章の手法と比較してr.m.s.誤差で38%精度が向上した。

最後に本研究期間中に実施した各種無人作業

の結果について第VII章で考察した。ここでの結果には本学北方生物圏フィールド科学センター生物生産研究農場のみならず、一般の農家のほ場で行った作業の結果についても含まれる。格納庫とほ場間の移動を含めた播種作業や、曲がった作物列に対する除草、またGPS衛星の捕捉が困難なほ場でも作業を実施した。これらすべての作業において目標経路からの横方向偏差がr.m.s.値で7 cm以下となり、満足な作業精度を得た。

作業の精度のみならず、ユーザーインターフェースの操作性や、作業中のトラブルに対する安全性・信頼性についても考察し、開発したシステムの総合的な評価を行った。Windows上で動くGUIベースのユーザーインターフェースを開発し、取り扱いが平易な操作環境を提供した。さらにキャビン外部に一時停止スイッチを設け、施肥・播種や薬剤散布などの作業における資材補給を可能にした。また安全対策として、万が一作業中にトラブルが発生した場合に備えてリモートコントローラによってエンジンを緊急停止することができる機能を付加した。

謝 辞

本研究は1996年4月から2001年12月まで、博士課程の学位請求論文として、北海道大学農学研究科博士課程在学中に行われたものである。研究着手当初より、ご指導、ご鞭撻を賜った農用車両システム工学研究室寺尾日出男教授に感謝の意を表す。本研究の取りまとめにあたり、終始懇切なるご指導と論文の御校閲を賜った作物生産システム工学研究室端俊一教授、研究の企画段階から御指導頂いた野口伸助教授に対し深謝する。また研究・実験に際し有益なご助言、ご協力を頂いた石井一暢助手に謝意を表す。そして実験装置の制作にあたりご協力を頂いた今野繁雄技官、本学北方生物圏フィールド科学センター生物生産研究農場での実験においてご協力頂いた技官の方々、さらに共同研究者として協力頂いた水島晃君、飯塚学君、大島賢彦君、宮本健太郎君、堀岡裕二君をはじめ農用車両システム工学研究室の皆さんに

心から感謝する。

量記号一覧

A	車両運動モデルのシステム行列		w	作業幅	[m]
b	FOG バイアス	[°]	W	垂直荷重	[N]
B	車両運動モデルの制御行列		x	状態変数	
c	光速	[m/s]	X_k	UTM 座標系における車両の重心位置の UTM-Easting	[m]
C	観測行列		Y_k	UTM 座標系における車両の重心位置の UTM-Northing	[m]
$code$	ナビゲーションポイントのコード		y	観測ベクトル	
d	横方向偏差	[m]	L	作業計画マップにおける前方注視距離	[m]
F	コーナリングフォース	[N]	L_i	最適制御における前方注視距離	[m]
f^s	GPS 衛星の搬送波振動数	[Hz]	α_f	前輪に生じる滑り角	[°]
f_R	GPS 受信機の基準発振器振動数	[Hz]	α_r	後輪に生じる滑り角	[°]
H	ハミルトニアン		β	車両重心滑り角	[°]
I	車両重心周りのヨー方向慣性モーメント	[kgm ²]	δ	操舵角	[°]
K_f	前輪のコーナリングパワー	[N/°]	$\delta^j(t)$	エポック t の衛星 j の時計誤差	[s]
K_r	後輪のコーナリングパワー	[N/°]	$\delta_A(t)$	エポック t の受信機 A の時計誤差	[s]
lat	ナビゲーションポイントの緯度	[°]	$\Delta\phi$	方位偏差	[°]
lon	ナビゲーションポイントの経度	[°]	Δt	時間刻み	[s]
l_f	車両重心から前車軸までの距離	[m]	$\Phi_A^j(t)$	エポック t の衛星 j と受信機 A 間の搬 送波位相	
l_r	車両重心から後車軸までの距離	[m]	ϕ	UTM 座標系における車両方位	[°]
M	車両質量	[kg]	ϕ_d	目標方位	[°]
N	ナビゲーションポイントの点数		ϕ_r	FOG によって計測される角度	[°]
N_A^j	衛星 j と受信機 A 間のアンビギュイティ		$\tilde{\phi}_f$	バイアス補正なしの FOG の出力値	[°]
P	リカッチ行列		γ	車両重心ヨー角速度	[°/s]
PRC	Pseudorange Correction	[m]	η	車両の位置ベクトル	
$r(\omega)$	ナビゲーションポイント ω における曲 率半径	[m]	$\Lambda_i(s)$	区間 i におけるスプライン曲線	
R_0	最適レギュレータの評価関数における観 測ベクトルに対する重み		λ	随伴変数	
R_1	最適レギュレータの評価関数における状 態変数に対する重み		μ	路面とタイヤのトレッドラバーとの摩擦 係数	
r_2	最適レギュレータの評価関数における入 力に対する重み		$\rho_A^j(t)$	エポック t の衛星 j と受信機 A 間の真 の距離	[m]
R_3	最適レギュレータの評価関数における終 端位置に対する重み		Ω	ω を要素とする作業計画マップ	
$R_A^j(t)$	エポック t の衛星 j と受信機 A 間の擬 似距離	[m]	Ω^*	ω^* を要素とする作業計画マップ	
RRC	Range Rate Correction	[m/s]	ω	ナビゲーションポイント	
u	操舵速度	[°/s]	ω^*	ナビゲーションポイントからコードを省 いた点	
U_{max}	最大操舵速度	[°/s]	ζ_d	前方注視距離 L を考慮した目標点	
V	車両速度	[m/s]			

参考文献

- 1) 財団法人北海道地域技術振興センター：平成 12 年度第 3 回開発研究委員会資料

- 2) Reid, J.F.: Automated and autonomous systems for agricultural production, Proceedings of the 4th IFAC symposium on Intelligent autonomous vehicles, 20-26, 2001
- 3) Reid, J.F.: Establishing automated vehicle navigation as a reality for production agriculture, Proceedings of 2nd IFAC/CIGR international workshop on Bi-robotics, Information technology and intelligent control for bio production systems, 33-40, 2000
- 4) 高井宗宏：3万余件の農作業事故分析と農機安全工学, 農機誌 (62)1, 4-7, 2000
- 5) 蛭薙利親, 木谷収, 岡本嗣男, 鳥居徹：農作業事故防止エキスパートシステムに関する研究, 農機誌 57(2), 85-92, 1995
- 6) 3) に同じ
- 7) Wilrodt, F.L.: Steering attachment for tractors, U.S. Patent, No 1506706
- 8) Andrew, F.W.: Automatic Tractor Control, U.S. Patent, No 2259193
- 9) Richey, C.B.: "Automatic Pilot" for farm tractors, Agricultural engineering, 78-79, 93, 1959
- 10) Gilmour, W.D.: An automatic control system for farm tractors, Journal of Agricultural engineering research, 5(4), 418-432, 1960
- 11) Anonymous: Self-steering tractor ready for production, Farm mechanization, 282, 1962
- 12) Anonymous: Tractor "driver" of the future?, Agricultural machinery journal, 75, 1966
- 13) Grovum, M.A., Zoerb, G.C.: An automatic guidance system for farm tractors, Transactions of the ASAE, 565-573, 576, 1970
- 14) 金藤祐治：コンバインの自動化研究 (第2報), 農業機械学会第35回年次大会講演要旨, 67, 1976
- 15) 笈田昭, 田野信博：トラクタの自動走行, 農機誌, 38(3), 438-440, 1976
- 16) 堀尾尚志：クラブ・ステアリング車による自動耕うんの研究(第1報), 農機誌, 43(4), 523-531, 1982
- 17) 堀尾尚志：クラブ・ステアリング車による自動耕うんの研究(第2報), 農機誌, 43(4), 523-531, 1982
- 18) 三竿善明：自動操向トラクタの開発 (第1報), 農機誌, 51(1), 21-28, 1989
- 19) Choi, C.H., Erbach, D.C., Smith, R.J.: Navigational tractor guidance system, Transactions of the ASAE, 33(3), 699-706, 1990
- 20) 石井一暢, 寺尾日出男, 野口伸：学習機能を有した自律走行車両に関する研究 (第1報), 農機誌 56(4), 53-60, 1994
- 21) 石井一暢, 寺尾日出男, 野口伸：学習機能を有した自律走行車両に関する研究 (第2報), 農機誌 57(6), 61-67, 1995
- 22) 石井一暢, 寺尾日出男, 野口伸：学習機能を有した自律走行車両に関する研究 (第3報), 農機誌 60(1), 51-58, 1998
- 23) 石井一暢, 寺尾日出男, 野口伸, 木瀬道夫：学習機能を有した自律走行車両に関する研究 (第4報), 農機誌 60(2), 53-58, 1998
- 24) 野波和好, 小松寛, 樋口英夫, 中尾清治, 足立憲一：乗用田植機の走行制御に関する研究(第1報), 農機誌 55(4), 107-114, 1993
- 25) 野波和好, 小松寛, 樋口英夫, 中尾清治, 足立憲一：乗用田植機の走行制御に関する研究(第2報), 農機誌 56(3), 77-84, 1994
- 26) 野波和好, 小松寛, 樋口英夫, 中尾清治：乗用田植機の走行制御に関する研究 (第3報), 農機誌 57(6), 69-75, 1995
- 27) 戸崎紘一, 宮原佳彦, 市川友彦, 水倉泰治：誘導ケーブル式果樹無人防除機の開発 (第1報), 農機誌 58(6), 101-110, 1996
- 28) 戸崎紘一, 宮原佳彦, 市川友彦, 水倉泰治：誘導ケーブル式果樹無人防除機の開発 (第2報), 農機誌 59(4), 87-96, 1997
- 29) 戸崎紘一, 宮原佳彦, 市川友彦, 水倉泰治, 木下雄史：誘導ケーブル式果樹無人防除機の開発 (第3報), 農機誌 60(3), 97-106,

- 1998
- 30) Bell, T.: Automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS, *Computers and electronics in agriculture*, 25(1-2), 53-66, 2000
- 31) Reid, J.F., Zhang, Q., Noguchi, N., Dickson, M.: Agricultural automatic guidance research in North America, *Computers and electronics in agriculture*, 25(1-2), 155-167, 2000
- 32) Tillet, N.D., Hague, T., Marchant, J.A.: A robotic system for plant-scale husbandry, *Journal of agricultural engineering research*, 69(2), 169-178, 1998
- 33) 行本修, 松尾陽介, 野口伸, 鈴木正肚: 耕うんロボットシステムの開発(第1報), *農機誌* 60(3), 37-44, 1998
- 34) 行本修, 松尾陽介, 野口伸, 鈴木正肚: 耕うんロボットシステムの開発(第2報), *農機誌* 60(4), 29-36, 1998
- 35) 行本修, 松尾陽介, 野口伸, 鈴木正肚: 耕うんロボットシステムの開発(第3報), *農機誌* 60(5), 53-61, 1998
- 36) 石田三佳, 芋生憲司, 岡戸敦史, 竹永博: 飼料生産圃場における自律走行トラクタに関する研究, *農機誌* 60(2), 59-66, 1998
- 37) Noguchi, N., Reid, J., Will, J., Benson, E.: Vehicle Automation System Based on Multi-Sensor Integration, 1998 American Society of Agricultural Engineers Meeting, Paper No.983111, 1998
- 38) 井上慶一, 大塚寛治, 杉本光穂, 村上則幸, 黎文: 自律走行のためのGPSとジャイロのカルマンフィルタによるセンサフュージョン技術(第1報), *農機誌* 61(4), 103-114, 1999
- 39) 長坂善禎, 谷脇憲, 大谷隆二, 重田一人, 佐々木泰弘: 自動走行田植機の開発(第1報), *農機誌* 61(6), 179-186, 1999
- 40) Cho, S.I., Ki, N.H.: Autonomous speed sprayer guidance using machine vision and fuzzy logic, *Transactions of the ASAE*, 42(4), 1137-1143, 1999
- 41) Benson, E.R., Reid, J.F., Zhang, Q.: Machine Vision Based Steering System for Agricultural Combines, 2001 ASAE Annual Meeting, Paper number 011159, 2001
- 42) Pinto, F.A.C., Reid, J.F., Zhang, Q., Noguchi, N.: Vehicle guidance parameter determination from crop row images using principal component analysis, *Journal of agricultural engineering research*, 75, 257-264, 2000
- 43) 水島晃, 野口伸, 石井一暢, 寺尾日出男, 行本修, 山本聡史: 地磁気方位センサとジャイロスコープの航法センサ複合化による自動直進アルゴリズム(第1報), *農機誌* 63(4), 96-102, 2001
- 44) 玉城勝彦, 瀬川敬, 渋谷幸憲, 飯嶋渡: 傾斜装置における広幅施肥作業に向けた自動走行制御技術(第1報), *農機誌* 63(5), 109-115, 2001
- 45) 木瀬道夫, 野口伸, 石井一暢, 寺尾日出男: RTK-GPSとFOGを使用したほ場作業ロボット(第1報), *農機誌* 63(5), 74-79, 2001
- 46) 木瀬道夫, 野口伸, 石井一暢, 寺尾日出男: RTK-GPSとFOGを使用したほ場作業ロボット(第2報), *農機誌* 63(5), 80-85, 2001
- 47) 浪江宏宗, 他: 仮想基準局(VRS)方式によるRTK-GPSの評価, *電子情報通信学会論文誌*, J84-B(12), 2082-2091, 2001
- 48) 角田充司, 近藤直: 農業用ロボットのマン・マシン協調システム(第1報), *農機誌* 61(2), 81-90, 1999
- 49) 角田充司, 近藤直: 農業用ロボットのマン・マシン協調システム(第2報), *農機誌* 61(2), 81-90, 1999
- 50) 角田充司, 近藤直: 農業用ロボットのマン・マシン協調システム(第1報), *農機誌* 61(2), 81-90, 1999
- 51) 宮本健太郎, 野口伸, 石井一暢, 寺尾日出男: 農用移動ロボット協調作業のための制御アルゴリズム(第1報), 第60回農業機械学会年次大会講演要旨, 273-274, 2000
- 52) 松尾陽介, 行本修, 入江康夫, 一杉則昭,

- 寺尾日出男, 芳賀泰典: 耕うんロボットの航法技術と作業性能 (第2報), 農機誌 63(3), 122-129, 2001
- 53) 石井一暢, 寺尾日出男, 野口伸: CANバスシステムによる農用車両用データ通信ネットワーク, 第51回農業機械学会北海道支部研究発表会・シンポジウム講演要旨, 40-41, 2000
- 54) 北條晴正: 情報通信端末用GPS技術の概要, GPSシンポジウム2001テキスト, 143-150, 2001
- 55) 安田明生: GPS技術の展望, 電子情報通信学会論文誌, J184-B(12), 2082-2091, 2001
- 56) Hofmann-Wellenhof, B.H., Lichtegger, H., Collins, J.: Global Positioning System Theory and Practice, Springer-Verlag Wien New York, 2000
- 57) 土屋淳, 辻宏道: やさしいGPS測量, 社団法人日本測量協会, 36-113, 1997
- 58) 久保幸弘, 伊藤晶彦, 杉本末雄: GPS搬送波アンビギュイティ決定法への H_{∞} フィルタの適用, 電子情報通信学会論文誌, J84-B(12)
- 59) Defense Mapping Agency (DMA): Datums, Ellipsoids, Grids, and Grid Reference Systems, DMA Technical Manual DMATM8358.1, 1988
- 60) National Imagery and Mapping Agency (NIMA): Department of Defense World Geodetic System 1984, NIMA Technical Report TR8350.2 Third Edition, 2000
- 61) Defense Mapping Agency (DMA): The universal grids: Universal Transverse Mercator (UTM) and Universal Polar Stereographic (UPS), DMA Technical Manual DMATM8358.2, 1989
- 62) 大越孝敬: 光ファイバセンサ, オーム社, 207-252, 1986
- 63) 水島晃, 野口伸, 石井一暢, 寺尾日出男: 自律走行車両のGPS位置計測に関わる傾斜補正, 農機誌 62(4), 146-153, 2000
- 64) Wong, J.: Theory of Ground Vehicles, John Wiley & Sons, Inc., 281-324, 1993
- 65) 23) に同じ
- 66) Rao, K., Narayana, J.: An Approach for a Faster GPS Tracking Extended Kalman Filter, Journal of The Institute of Navigation 42(4), 619-630, 1995
- 67) 片山徹: 新版応用カルマンフィルタ, 朝倉書店, 2000
- 68) Pinto, F., Reid, J.: Heading angle and offset determination using principal component analysis, 1998 American Society of Agricultural Engineers Meeting, Paper No.983113, 1998
- 69) 木瀬道夫, 野口伸, 石井一暢, 寺尾日出男: DGPSを利用した農用移動ロボットのナビゲーション, 農機誌 62(6), 145-153, 2000
- 70) 碓井照子: GISの現状と農学の課題, システム農学会誌 16(2), 89-96, 2000
- 71) 37) に同じ
- 72) 鳥巢諒, 田中健一, 井前讓, 石川隆: 最適制御理論による枕地最短旋回時間問題 (第1報), 農機誌 59(4), 3-10, 1997
- 73) 鳥巢諒, 田中健一, 井前讓: 最適制御理論による枕地最短旋回時間問題 (第2報), 農機誌 60(3), 45-53, 1998
- 74) 武田純一, 鳥巢諒, 田中健一, 井前讓: 人の操舵特性を考慮した枕地の最短旋回時間問題 (第1報), 農機誌 61(2), 147-155, 1999
- 75) 鳥巢諒, 武田純一, 田中健一, 井前讓: 人の操舵特性を考慮した枕地の最短旋回時間問題 (第2報), 農機誌 61(4), 85-93, 1999
- 76) 小森谷清, 谷江和雄: スプライン曲線による車輪移動ロボットの軌道制御, 日本ロボット学会誌(8)2, 133-143, 1989
- 77) 松野文俊, 浅野俊雄, 坂和愛幸: 環境に拘束されたフレキシブル・マニピュレータのモデリングと位置と力の動的なハイブリッド制御, 日本ロボット学会誌(11)3, 419-428, 1993
- 78) 尾崎弘明, 丘華, 林長軍: Bスプラインを用いるマニピュレータの軌道最適化におけるコンプレックス法の適用, 日本ロボット学会誌(14)4, 560-566, 1996

-
- 79) 桜井明, 菅野啓祐, 吉村和美, 高山文雄: Cによるスプライン関数, 東京電機大学出版局, 1-19, 1993
- 80) 小池慎一: Cによる科学技術計算, CQ出版社, 207-244, 1994
- 81) E. ハイラー, G. ワナー, 蟹江幸博: 解析教程, シュプリンガー・フェアクラーク東京株式会社, 140-149, 1997
- 82) 阿部正人: 自動車の運動と制御, 山海堂, 49-66, 1992
- 83) 37) に同じ
- 84) 21) に同じ
- 85) 倉田和彦, 中野和弘, 金子昌彦, 安達仁: 農用自律走行車両の制御に関する研究 (第1報), 農機誌 55(2), 23-32, 1993
- 86) 34) に同じ
- 87) 82) に同じ
- 88) 田中孝, 他: 新版農業動力学, 文永堂出版, 214, 1991
- 89) 社団法人自動車技術学会: 新編自動車工学ハンドブック, 3-40-3-41, 1970
- 90) 加島正, 石動善久: 動作時間を考慮した消費エネルギー最少規範によるマニピレータの軌道計画, 日本ロボット学会誌15(7), 52-58, 1997
- 91) 加藤寛一郎: 最適制御入門, 45-46, 東京大学出版会, 1987
- 92) 農業機械学会: 新版農業機械ハンドブック, 334, 1984
(受付: 2002.12.19 受理: 2003.1.24)

Summary

The final goal of this study is to develop a robot tractor system with RTK-GPS and a Fiber optical gyroscope (FOG) as navigation sensors. Plenty of the study about autonomous agricultural vehicle has been conducted in the world. But past studies have some technical problems awaiting solution for acting unmanned tractor system. Unmanned tractor needs to satisfy below conditions;

- Engaging all operations at field.
- Equipping with safety devices for ensuring safety while unmanned operation.
- Enhancing guidance accuracy on curved path.
- Providing user-friendly interface.
- Robustness against variability of circumstances and troubles in operations.

In consideration for the foregoing problems of the past robot tractor system, the robot tractor developing in this study aimed to automate all field operation including plowing, cultivating, planting, and harvesting. "The general-purpose robot tractor", engaged in all type of operation at field has never been developed, even though a lot of systems that aimed to automate specific operation have been introduced up to now.

Key-technologies of the system developing in this research as autonomous tractor consist of following five contents;

1) Constructing Hardware of the Robot Tractor (Chapter II)

The robot tractor was composed of a tractor, an RTK-GPS and an IMU for acquiring vehicle heading and correction of a GPS antenna mounted at the top of the tractor cabin. The tested tractor (Kubota Co. Ltd., MD77) was modified normal tractor by

the manufacturer to control a most of the functions including steering, transmission, engine speed, and PTO. It has safety devices, an emergency engine stop switch attached on out of the cabin, and a remote controller for emergency engine stop. These functions were controlled by the vehicle controller installed in the cabin. The vehicle controller communicated other ECU through a CAN-BUS.

The RTK-GPS (MS750, Trimble Co. Ltd.) provided a position with 2 cm error in 20 Hz. A position (latitude, longitude), a speed, and a quality of the GPS solution were gotten from the RTK-GPS. The position data was converted to UTM coordinate system. The IMU (JCS-7401A, JAE Co. Ltd.) that outputted a yaw angle with less than 2 deg/min drift error was installed in the cabin.

2) Estimation of Absolute Heading Angle by Sensor-fusion with RTK-GPS and FOG (Chapter III)

To develop a steering controller of a vehicle, description of its dynamics, expressed by position and heading of a vehicle is badly needed. Basically, the dynamics was based on discrete model composed of the position, heading angle, angular velocity, and steering angle. In general, those posture information can be sensed by coupling with positioning systems and gyroscopes. But when a couple of sensors are installed into the vehicle, a sensor fusion technique is required for taking their coordinates matching. Installing a FOG into the system has an advantage of acquiring more accurate angle, compares with Geomagnetic direction sensor (GDS) commonly used. On the other hand,

the FOG arises time drift and is unable to provide absolute angle.

Improvement of sensor performance made rapid process. An RTK-GPS that can measure vehicle position in less than 2 cm error and a FOG with 0.5 deg/h of drift error are already available as commercial products. One of the objective was to develop the sensor fusion algorithm for high performance sensors. The sensor fusion algorithm applied Least Squares Method (LSM) was developed. The algorithm was tested to verify the proper operation using the navigation system high performance sensors.

The developed LSM was examined by simulating with actual data by manual vehicle operation, and it could estimate the FOG bias with satisfied accuracy on all types of paths; straight, curve, and turns. In addition, the guidance system with this method performed automatic planting in a field with 4.5 cm r.m.s. error from the desired path.

3) Autonomous operation by applying navigation map (Chapter IV)

The final goal of this study was to develop the agricultural autonomous tractor engaged in all types of operation at field. Previous researches revealed the robot could automate specific field operation, and it was impossible to make them function as “a general-purpose robot”. For example, the desired path for spraying, which has to follow existing crop rows, is completely different with tillage. Not only desired path, but the operating conditions including travel speed, hitch function, and Power-Take-Off (PTO) has to be changed according to farm operations.

The navigation maps, consisted of a desired path and commands including setting of PTO, transmission, and engine speed were generated by a GIS software for each farm operation. Desired path was represented by

as a subset of the points with commands to a robot. The robot followed the commands in the closest point during the travel. In addition, both a straight path and a curve path could be depicted because desired path were exposed as a set of points.

The developed system could autonomously perform rotary tillage with 6 cm error from predetermined path at 1.5 m/s by applying the navigation map.

4) Enhancement of Turning Accuracy by Creating Path applied with Motion Constraints (Chapter V)

The autonomous tractor engaged in all type of operations at fields was developed in the previous chapter. The developed system adopted an RTK-GPS and a Fiber Optical Gyroscope (FOG) as navigation sensors. That system had performed autonomous operation with less than 10 cm error at field, but more than 70 cm error had been occurred in turning operation.

In this chapter, new turning algorithm for the robot tractor was developed. Two types of turning paths were created by applying third-order Spline function; one was forward turning, and another was switch-back turning. The constraints relating to the tractor characteristics; minimum turning radius and maximum steering speeds, were introduced for creating a feasible turning path. The turning path was regenerated while created path didn't fulfill these constraints.

The developed algorithm was tested by a computer simulation, and it showed that the robot tractor could follow the path fulfilled both constraints more precisely comparing with the path without constraints, or the path only applied the constraint of minimum turning radius.

The developed algorithm was tested in a field with the robot tractor developed in

previous chapter, and it performed autonomous turnings with less than 10 cm error at beginning of next path in various travel speeds.

5) The Steering Controller Applied Optimal Controller (Chapter VI)

This chapter reported new steering control algorithm. The great part of steering control algorithms for agricultural autonomous vehicles reported up to now are described as linear function, including PI controller developed in chapter 4. There are some examples using nonlinear function, neural network, fuzzy logic, and trigonometric function for calculating desired steering angle for vehicle guidance, but all of them were developed for the purpose of following straight path. Therefore, the abilities of these controllers to follow curved path with satisfied accuracy aren't confirmed. But the robot tractor has to have a function to travel along any curved path precisely to expand the validity of the robot.

The steering controller applied optimal control was developed in this chapter. Developed steering controller has intension of controlling a vehicle against curved path by introducing nonlinear vehicle dynamics.

This algorithm was formulated as linear regulator problem by linearizing the equations of motion of the vehicle at every control steps.

The developed algorithm was tested at field against some curved path. The system showed the significant performance comparing to a conventional method using a PI controller. For all types of the paths including a 90 degree turn, a sinusoidal, and a forward turning paths, the developed controller attained high performance. In addition, the controller could perform high-speed guidance at 3.0 m/s as well.

Finally, field tests of various types of field operations by the developed robot tractor were discussed in Chapter 7. Developed system was tested by applying various types of unmanned operations including planting with transfer, cultivating along curved row. Also the system was tested under sever condition on tracking GPS satellites.

The usability, reliability, and accuracy of the system were evaluated through those actual field operations. The user-interface, based on a GUI and working on Windows was developed for aiming to provide the comfortable environment for users.