

農用移動ロボットの枕地旋回について

Headland turning of an agricultural mobile robot

吉田 豊文, 朱 忠祥, 陳 軍, 鳥巢 諒
Toyofumi YOSHIDA, Zhong-xiang ZHU, Jun CHEN, Ryo TORISU

岩手大学
Iwate University

キーワード:最適制御(optimal control), 移動ロボット(mobile robot), 枕地旋回(headland turning)

連絡先: 〒020-8550 盛岡市上田 3-18-8 岩手大学農学部生物機械工学研究室 吉田 豊文,
Tel.: (019)621-6267, E-mail: a3204026@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

ここでは, 耕地を作業機が往復作業する場合の枕地旋回について実験・検証する。ここで枕地とは, 往路から復路へ移行する際の曲線軌道の部分, いわゆる“あぜ”である。このとき復路に侵入する時点で姿勢角, 操舵角とも 0° に近いことが要求される。

本研究で利用した車両運動方程式は非ホロノミックな拘束を受ける非線形システムである。非ホロノミックシステムの制御装置設計においては, 井前らによって提案された手法を利用する。これは, フィードバック制御にのみ頼ることなく, フィードフォワード制御と融合させることにより高機能な制御装置を得ようとする考え方である¹⁾。具体的には目標軌道生成をフィードフォワード制御器で行い, 外乱およびモデル誤差などについてはフィードバック制御器を機能させ対処しようとする手法である。

本研究の目的は, 直線走行をしてきた車両(トラクタ)を $H(m)$ 離れた平行な直線路の同じ距離の点上に逆向きに移動することであ

る。ただし, トラクタの速度 v は一定である。操舵角 α は最大操舵角 α_m を超えない。という 2 つの拘束条件が与えられている。

2. 枕地旋回問題の定式化

対象車両は前輪操舵・後輪駆動のトラクタとし, トラクタは剛体とする。また, トラクタの走行速度は低速で, 遠心力やコーナリングフォース等の外力の影響が無視できるものとする。Fig.1 に示す 2 輪等価モデルで表すと, 運動学的な関係により, 状態方程式として(1)式が得られる。ただし, この場合, ドリフト項は含まれていない。

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{v}{L} \tan \alpha \\ \dot{\alpha} = u \end{cases} \quad (1)$$

ここで,

x, y : 後輪軸中心点の座標 [m]

θ : x 軸を基準としたトラクタの姿勢角 [$^\circ$]

α : トラクタの操舵角 [$^\circ$]

v : 車速 [m/s]
 u : 操舵角 α の角速度 [$^\circ$ /s]
 L : ホイールベース [m]
 であり, θ と α は反時計回りを正とする。

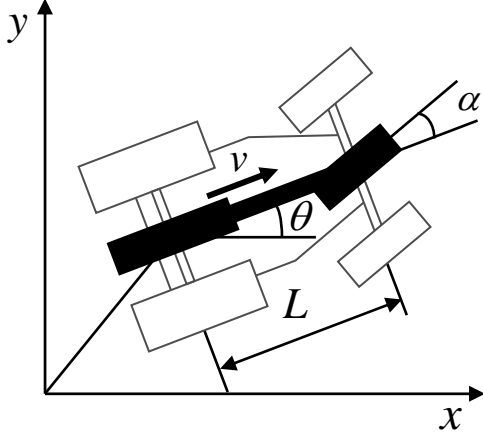


Fig.1 Model of the tractor

3. 基準軌道の生成

本研究の想定コースは直線距離 30(m), 直線間距離 2(m)のコースを往復するものであるが, 曲線軌道である枕地旋回部分のみの基準軌道を生成する。そこで, 準備初期状態 $(x, y, \theta, \alpha) = (0, 0, 0, 0)$ から 終端状態 $(0, 2, 180, 0)$ へ至る(往路から復路への移行時)基準軌道を次のように計算した。

・車両運動方程式

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ v \tan \alpha / L \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (2)$$

・拘束条件 $|\alpha| \leq \alpha_m$

したがって, 状態方程式(2)式と初期状態 $(0, 0, 0, 0)$ のもと, 評価関数

$$J = x^2(T_f) + \{y(T_f) - 2\}^2 + \{\theta - 180\}^2 + \alpha^2(T_f) + \int_0^{T_f} \left(\frac{r_1}{\alpha_m^2 - \alpha^2} \right) dt \quad (3)$$

を最小とする最適制御問題を解くことによ

り, 最適誘導 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\theta}, \bar{\alpha})$ を固定制御区間 $[0, T_f]$ のもとに算出し, そのとき収束条件を

$J \leq 0.0005$ とした。本研究には, 井前らの二次アルゴリズム計算法を用いた最適制御解を得て^{2,3)}, $v = 0.5$ (m/s), $r_1 = 0.0001$ として基準軌道を求めた。また, 直線部分にできるだけ真っ直ぐ進入できるように, 軌道の y 座標の上限を 2.5mとした。

なお, 復路から往路への移行時の軌道は, 往路から復路への移行時に求めた軌道の x, α をそれぞれ $-x, -\alpha, \theta$ を $-180^\circ - \theta$ として求めた。

4. フィードバックゲインの算出

まず, (2)式の線形化を行う。ただし, 今回の実験は x 方向について制御を行わないため, (2)式の線形化式は次式ようになる。

$$\delta \dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & -v \cos \bar{\theta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{v}{L \cdot \cos^2 \bar{\alpha}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \delta X + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \delta U \quad (4)$$

ここで, $\delta X = X - \bar{X}, \delta U = U - \bar{U}$,

$$X = (x, y, \theta, \alpha)^T, U = u$$

(4)式は $\dot{X} = AX + BU$ という線形の形で表されており, X は状態量, U は操作量である。ここで, 各成分は次のようになっている。

$$X = \begin{bmatrix} \delta y \\ \delta \theta \\ \delta \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y - \bar{y} \\ \theta - \bar{\theta} \\ \alpha - \bar{\alpha} \end{bmatrix}, U = \phi - \bar{\phi}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -v \cos \bar{\theta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{v}{L \cdot \cos^2 \bar{\alpha}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

ここで、 $\phi = \dot{\alpha}$ である。

次式の評価関数を加えれば、

$$J(U) = \int_0^{\infty} \{X^T(t)QX(t) + U^T(t)RU(t)\} dt \quad (5)$$

車両運動方程式が線形微分方程式と二次形評価関数で表され、この評価関数を最小化することが目的となる。このとき、積分区間は無限時間をとっている。ここで、 Q, R はそれぞれ(対称で)準正定、(対称で)正定である。

$$Q = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}, \quad R = 1$$

このときリッカチ方程式は以下ようになる。

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (6)$$

最適制御則は、

$$U(t) = -R^{-1}B^T P X(t) \quad (7)$$

となる。ここで、(7)式による状態フィードバックを最適レギュレータと呼ぶ。よって(7)式から、

$$U = -KX \quad (K = R^{-1}B^T P) \quad (8)$$

ここで、 K はフィードバックゲインである。

5. シミュレーション

3, 4 節で求めた基準軌道、フィードバックゲインを使用して、シミュレーションを行った。今回は 0.5 秒ごとに、後輪軸中心点から最も近い基準軌道の点の接線を x 軸とした座標を生成し、その横偏差 Δy を計算し α を制御する手法を使用した。この概念図を Fig.2 に示す。シミュレーションの結果を Fig.3 から Fig.7 に示す。

Fig.3 において、シミュレーションの結果より、枕地部分に要する時間は 44.5 秒で、終端状態の各状態量は $x = -0.054$ (m), $y = 2.014$ (m), $\theta = -179.0$ ($^\circ$), $\alpha = -1.785$ ($^\circ$) である。理想的な状態で直線制御に移行

できることが分かる。Fig.3 における横偏差を Fig.4 に示す。横偏差の最大値は 0.095m で、0.1m 以内にする事ができた。

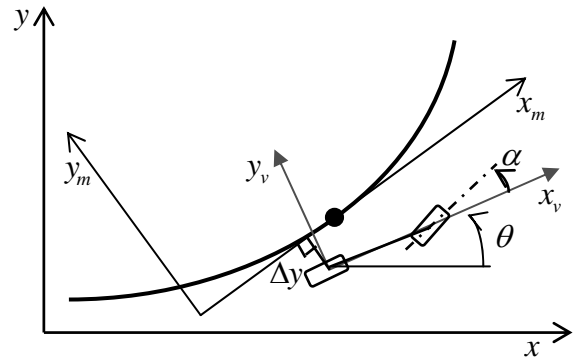


Fig.2 The tracking method

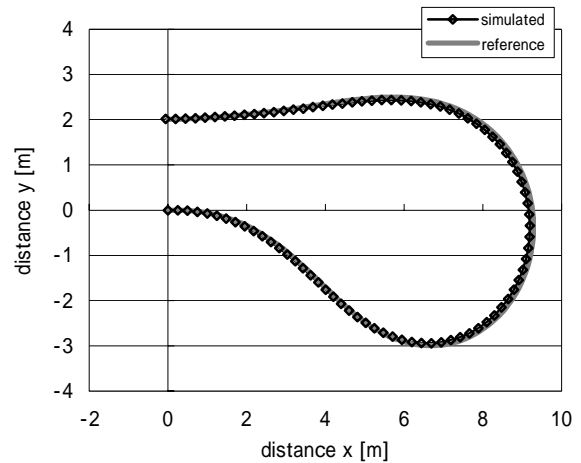


Fig.3 Simulated and reference trajectories

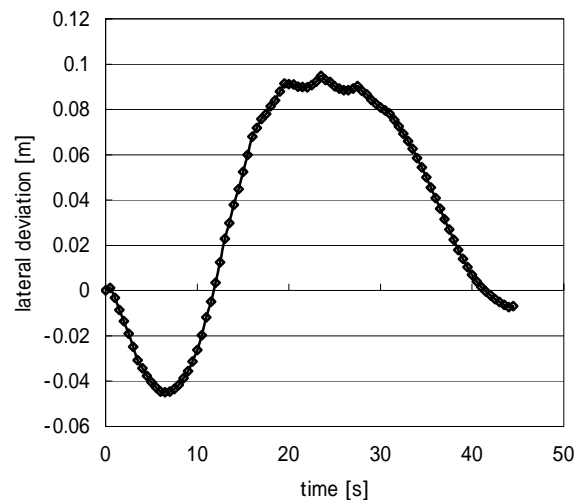


Fig.4 Time history of lateral deviation

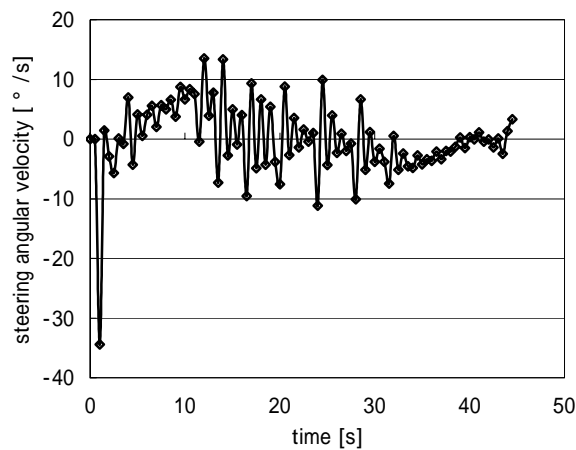


Fig.5 Time history of steering angular velocity

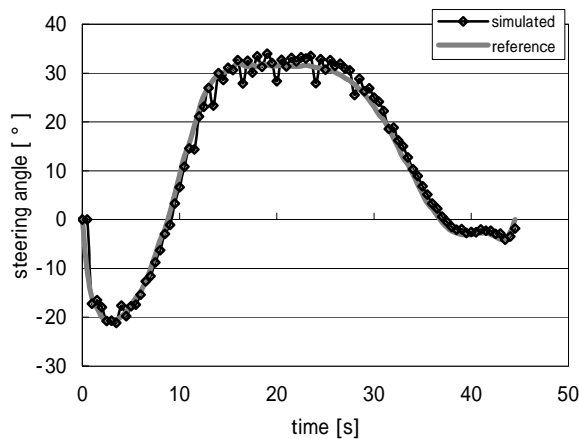


Fig.6 Time histories of simulated and reference steering angle

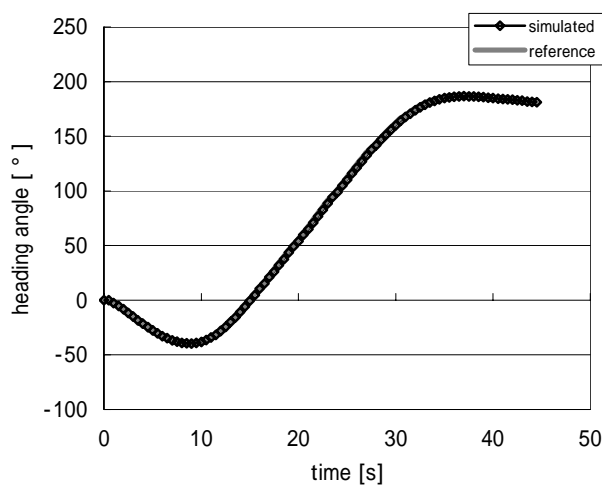


Fig.7 Time histories of simulated and

reference heading angle

Fig.5 は制御量であるハンドル角速度の時間歴を表したものである。シミュレーション開始直後に、ハンドル角速度がトラクタに搭載されている DC モータでは実現できない角速度になっている。これは本システムにハンドル角速度を拘束条件として加えていないため、このような現象が生じてしまう。操舵角の時間歴を示した Fig.6 からも見取れるように、曲線部分ではこまめにハンドルを切り基準軌道に追従しようとしていることが分かる。また、30 秒以降は緩やかな曲線のため、操舵角・角速度とも変化が小さくなり、よく追従できていたことが分かる。また、トラクタの姿勢角の時間歴を示した Fig.7 から、ハンドルの切り返しが多くても、姿勢角はあまり変化せずに基準軌道とよく一致していたことが認められる。

6. 実車実験

実験車両は市販トラクタ(三菱 2501D)を改造したものである。車両方位の計測には FOG(JAE,JG-35FD)を使用した。JG-35FD は時間ドリフト $0.5^\circ/h$ 、分解能 0.01° で車両の相対方位を計測することができる。ハンドル角計測のため変位計 DTP-05MDS(共和)を用い、ハンドル角制御を行うため DC サーボモータ(澤村電気工業)を装着した。そして、このトラクタの位置情報を得るために自動追尾式のトータルステーションを利用し、無線モデムによりデータを送信した。これらのデータの演算および制御を、トラクタに搭載したパソコン上のプログラムによって処理する。

実車実験は、滝沢村にある滝沢農場敷地内のほぼ平坦な草地において行った。速度は一定で $0.5(m/s)$ とし、直線距離 $30(m)$ 、直線間距離 $2(m)$ のコースを 6 往復した。Fig.8 は

6 往復すべての実車実験の軌跡である。基準軌道にほぼ一致していることが見て取れる。とくに、直線部分においては誤差平均が 0.024m, 標準偏差が 0.056 となり, よい結果を得られた。ここからは, 枕地部分について検討・考察する。

Fig.9 は 1 往復目の往路から復路に移行するときの枕地(Fig.8 の右下部分)の軌跡である。制御時間は 50.4 秒, 終端状態での状態量は, 進入時の初期状態量 $x = 50.51$ (m), $y = -0.067$ (m), $\theta = -0.820$ ($^{\circ}$), $\alpha = 8.209$ ($^{\circ}$) に対し, $x = 50.56$ (m), $y = 1.966$ (m), $\theta = -178.1$ ($^{\circ}$), $\alpha = -1.358$ ($^{\circ}$) であり, 進入地点から幅 2m の地点に姿勢角・操舵角ともに 0° に近い状態で到達できた。

全体的にはよく追従できていたが, ところどころ基準軌道との誤差がやや大きい箇所が見受けられる。この横偏差を表したものが Fig.10 であり, 115.2 秒時に最大の 0.329m となった。これは, この制御点と直前の制御点との間のサンプリングタイムが 1.57 秒とかなり大きかったためであり, この原因として, トータルステーションのサンプリングタイムが不均一なことや, 無線モデムの休止時間などが考えられる。また, 横偏差の平均は 0.020m で, 標準偏差は 0.086 であった。

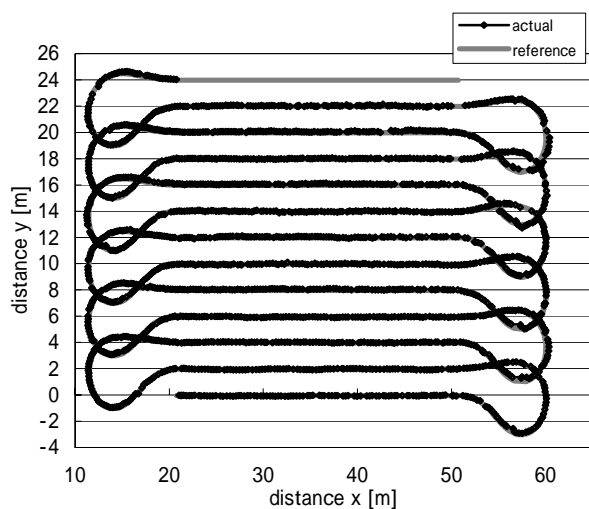


Fig.8 Actual trajectory (6 round trips)

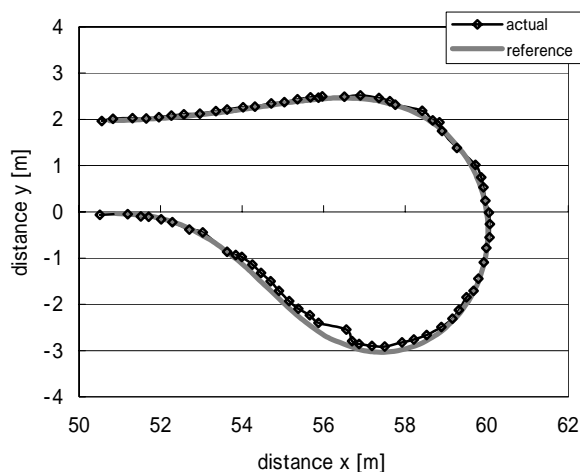


Fig.9 Actual trajectory (head land)

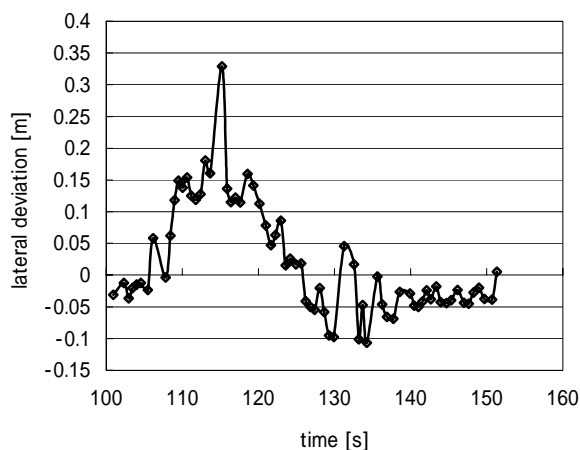


Fig.10 Time history of lateral deviation

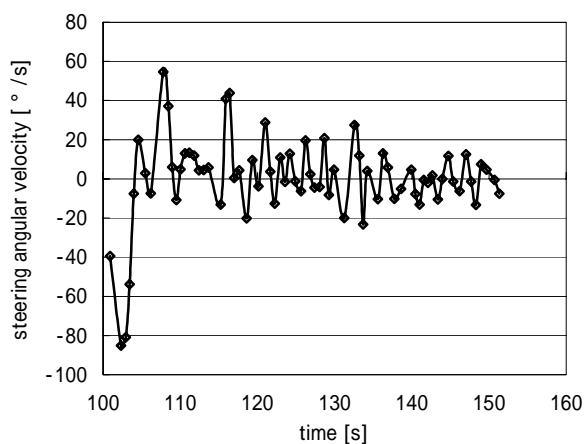


Fig.11 Time history of steering angular velocity

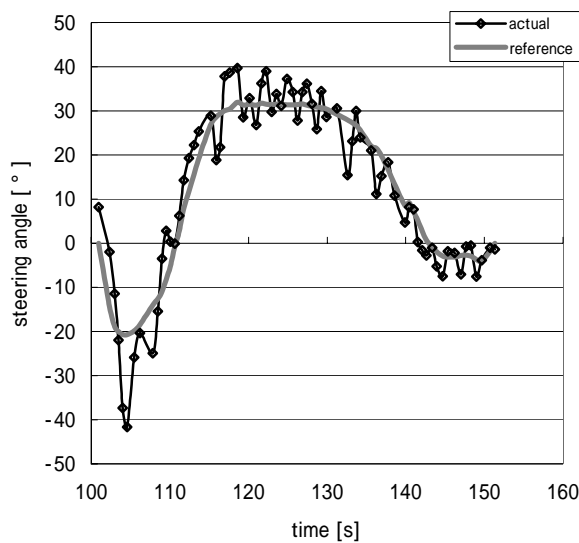


Fig.12 Time histories of actual and reference steering angle

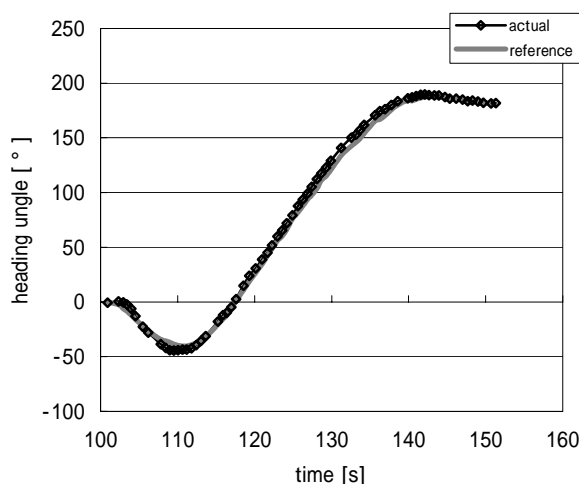


Fig.13 Time histories of actual and reference heading angle

Fig.11 は制御量であるハンドル角速度の時間歴である。ときどきトラクタでは実現できない角速度になっているが、前述と同じく、これは本システムにハンドル角速度を拘束条件として加えていないため、結果としてこのような現象が生じてしまう。

Fig.12, Fig.13 はそれぞれ、操舵角と姿勢角の時間歴を示している。Fig.12 において、初期の操舵角が 8.209° あったために、ハン

ドルを切りすぎて 103.4 秒以降に目標値から大きく外れてしまっているが、その後はばらつきがありながらも目標値に追従した。操舵角の変化が大きいのは、トータルステーションのサンプリング時間が長いことが 1 つの原因である。一方、姿勢角は目標値とほぼ一致していた。

総合的に、実車実験はよい結果を得ることができた。

7.まとめ

本研究では、フィードバック制御とフィードフォワード制御とを融合させる制御法を利用し、枕地旋回について研究した。草地で自立走行実験を行い、その結果、次のような結論が得られた。

1) フィードフォワード制御器で誘導軌道生成を行った。トラクタの車両特性に関する拘束条件「最大操舵角拘束」を導入し、拘束条件付評価関数 J を満足する誘導軌道を求めた。

2) 生成された基準軌道について、フィードバック制御ゲインを求めた。また、シミュレーションを行い、基準軌道に追従させた。

3) 実車実験を行った。枕地旋回部分における終端状態は基準軌道にほぼ一致した。しかし、サンプリング時間が大きかったため、曲線制御時の横偏差が大きくなった。このため、サンプリング時間を短くする必要がある。

参考文献

- 1) 井前 譲, 結城 康浩, 鳥巢 諒: トラクタ作業機系の自動装着のための誘導制御装置設計, シミュレーション 17(2)(1998), 42-133
- 2) 井前 譲, 箱守 京次郎: 最適制御問題に関する 2 次アルゴリズム, SICE 論文集 23-10(1987), 1100-1102
- 3) 鳥巢 諒, 田中 健一, 井前 譲, 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), 農業機械学会誌 59(4)(1997), 3-10