

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 15 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21560475

研究課題名（和文） 脚車輪型移動ロボットの最適脚配置に関する研究

研究課題名（英文） A Study on the optimal wheel allocation for leg/wheel mobile robots

研究代表者

野中 謙一郎（NONAKA KENICHIRO）

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号：30298012

研究成果の概要（和文）：

脚関節によって車輪位置を動的に変更可能な脚車輪型移動ロボットは、高い運動性能と安定性を両立し、障害物などの多い複雑な環境に適応できる。本研究では、計算アルゴリズムと評価関数の工夫により低速な組込み CPU にも実装可能な、実時間モデル予測による移動経路と車輪配置の同時最適化手法を開発した。さらにその手法を 3 軸の SCARA 型関節を有する脚車輪型移動ロボットに適用し、障害物回避制御実験によってその有効性を実証した。

研究成果の概要（英文）：

Leg/wheel mobile robots, equipped with articulated legs which allow dynamic allocation of their wheel positions, are adaptable to the cluttered environments with its high mobility and stability. In this research, a real-time simultaneous model predictive locomotion and wheel allocation method is developed, which can be implemented into low speed embedded CPUs by the usage of the improved computation algorithm and index function. The proposed method is applied to a leg/wheel mobile robot with 3DOF SCARA legs to verify its enhanced performance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：制御理論とその応用

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御システム、非線形制御、最適化計算、組込み CPU、移動ロボット、障害物回避、誘導制御

1. 研究開始当初の背景

(1) 脚車輪型移動ロボットの特長

近年では、多関節脚で車体と車輪を連結したハイブリッド移動ロボットなど多様な機構・運動性能を有する車両が試作・実現されている。車両型ロボットは移動速度が高く、

積載量が大きいため実用性が高い。また脚機構により全方向移動や安定性の改善、隘路への侵入などが可能である。これらの理由から、特に屋内などの障害物の多い複雑な環境において優れた運動を実現することが期待できる。本研究で使用する研究代表者らが製

作した脚車輪型移動ロボットでは、4 個の駆動輪が 3 軸 SCARA 型脚によって車体に連結され、全長・全幅は 240~600mm の範囲で変更できる。このため、脚を伸張すれば高い安定性を得ることができ、逆に脚を収縮すれば隘路への進入が可能になる。また脚は 3 自由度を有するので、可到達範囲内の任意の位置で任意の方向に操舵して全方向移動が可能である。

この様な脚車輪型移動ロボットを屋内などで運用する為の解決すべき課題として、①車輪の最適配置、②障害物を考慮した最適軌道計算、③位置推定と障害物の検出、が挙げられる。以下に詳しく述べる。

(2) 脚車輪型移動ロボットの課題

① 車輪の最適配置

周囲の障害物など、環境や目的に応じて脚関節角度を最適化して車輪を配置する事が好ましいが、車輪操舵角は車輪位置に依存し、関節角度を陽に定めることは困難である。一方で非線形最適化は計算コストが高く、ロボット用組込み CPU に実装する事は容易ではない。

② 障害物を考慮した最適経路の計算

障害物の位置情報とロボットの予測運動モデルに基づいた最適目標経路計算を行う必要がある。ロボット用組込み CPU は計算速度が低いため、ロボットの脚配置計算と同時に最適化することは容易ではない。

③位置推定と障害物の検出

屋内など遮蔽物の多い環境におけるロボットの位置推定は容易ではない。また人間等の障害物の接近を検出する事は不可欠である。これらを解決するためには複数種のセンサを導入する必要がある。

2. 研究の目的

上述の課題①~③を解決するために、本研究の目標を次の(1)~(4)に設定した。

(1) 車輪配置の最適化計算

車輪配置の最適化計算についてモデル予測制御の手法を導入し、周囲の障害物に対して予測計算に基づく最適な障害物回避を実現する車輪位置配置の計算手法を開発する。この際に、組込み CPU に実装可能な効率的な計算速度を実現し、脚車輪型移動ロボットにおいてその有効性を検証する。

(2) 障害物回避経路計算

(1)の車輪配置と同時にリアルタイム計算が可能な、障害物回避軌道計算手法を実現し、(1)と共に脚車輪型移動ロボット制御系に実装して検証実験を行う。

(3) 障害物検出と位置推定

天井設置カメラおよび車載測域センサにより車両位置推定および障害物検出をリアルタイムで実現するシステムを開発する。これを脚・車輪型移動ロボットで障害物回避を

含めた目標軌道・車幅の制御実験に適用する。(4) ロバストな経路追従の実現

障害物回避などにおいて急激な回避運動を行うと車輪に横滑りが発生する。そこで安定性を保証した経路追従制御を実現するためにロバスト経路追従制則を開発する。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために、以下の方法で研究を進める。

(1) 車輪配置の最適化計算

障害物回避を考慮した車輪位置の最適化計算は、まず人口ポテンシャル場法に基づく手法を実現し、次の段階としてモデル予測制御に基づいた手法を実現する。この際には、組込み CPU にも実装可能な程度の計算量になるようにアルゴリズムを工夫する必要がある。

(2) 障害物回避経路の最適化計算

車両が障害物を回避しながら移動する経路の計算は、まず、経路を多項式で表現した場合について係数の最適化計算によって求める。この場合は経路が最適である保証はないが、組込み CPU にも実装可能な程度の計算量になることが期待できる。次に、車輪配置の最適化計算と経路の同時最適化を試みる。この場合は計算量が多くなり、組込み CPU に対するリアルタイム実装は困難と思われるので、非線形項の多項式近似などによる計算量の削減が必要になる。

(3) 脚車輪型移動ロボットの実験機と評価基準

図 1 に研究代表者が開発した脚車輪型移動ロボットの写真を示す。制御用の組込み CPU は周波数が 80MHz と低いため、開発した手法の計算効率を実証する目的に適している。本研究で開発する車輪配置の最適化計算と障害物回避経路計算は、この組込み CPU を実装対象の基準として、その計算速度を評価する。

(4) 天井カメラシステム

図 2 に研究代表者の研究室で現有する天井カメラシステムを示す。カメラによって実験フィールド上の障害物を検出し、誘導制御により障害物回避を行う。測域センサと比較して広い範囲の障害物検出が可能であるが、環境側にカメラを設置する必要がある。本研究では、研究の初期段階での誘導制御に使用する。このシステムでは、画像処理及び通信においてむだ時間が生じるため、その影響も考慮する。

(5) 測域センサシステム

測域センサ(Laser range finder: LRF)は、周囲の物体までのリアルタイム距離計測が可能であり、図 1 に示す、脚車輪型移動ロボットにも搭載が可能で、自律的な移動ロボットの制御を実現できる。モデル予測制御では

ホライズン長までの予測計算を行うことになるので、測域センサの測距範囲をホライズン長にとり、検出された障害物を対象とした障害物回避制御を行うことにする。

(6) ロバストな経路追従制御

高速な障害物回避制御などにおいては、車輪の横滑りと非線形性を考慮したロバスト制御を実現する必要がある。このため、反復数値計算を用いたロバスト経路追従制御則を導出する。また、車輪横滑り角を計測するために、オドメトリによる精度の高い非線形速度推定を実現する必要がある。

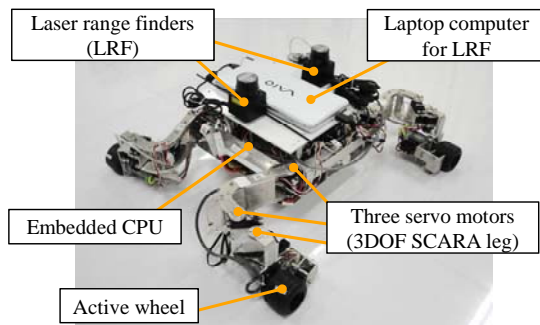


図1 脚車輪型移動ロボット：3軸SCARA型関節を有する4脚の先端に駆動輪を備えている。制御用組込みCPUとして、SH7058F(80MHz)を搭載して脚関節および駆動輪を制御する。また上部にLRFを2台搭載し、自己位置推定と障害物検出が可能である。LRF情報による自己位置推定や障害物位置の計算は、搭載した小型のPCで行うが、障害物回避軌道や車輪位置の最適化計算はすべて組込みCPUのSH7058Fで実装し、制御アルゴリズムの実用性を検証する。

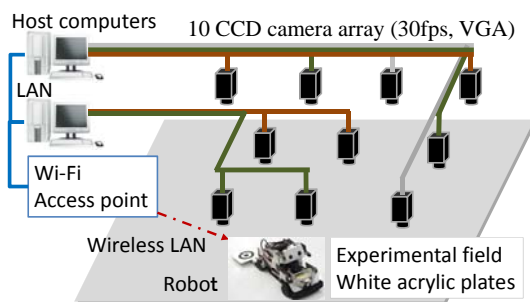


図2 天井設置カメラによる移動ロボットの誘導制御システム。実験フィールドの情報に設置した10台のCCDカメラから7m×5mの範囲の実験フィールドの画像情報を毎秒30フレームの速度でホストPCに取り込み、移動ロボットの位置と方位角度を計測して誘導制御する。

4. 研究成果

本研究を通じて得られた成果を以下に示す。

(1) まず平成21年度に、多項式表現した障害物回避経路に沿った移動における車輪位置を人口ポテンシャル場法に基づいてサンプリングタイムごとに最適化する手法を開発し、画像処理による誘導制御によって、図1の移動ロボットの障害物回避と隘路通過を実現した。人口ポテンシャル場法は障害物回避において広く用いられている手法であるが、脚車輪型移動ロボットの車輪位置のリアルタイム最適化を実現した点に独自性がある。しかし、車輪位置配置が経路全体で最適となることは保証していないという問題点がある。

(2) そこで平成22年度には、車輪位置最適化をモデル予測制御によってリアルタイム最適化する手法を構築し、それを図1の移動ロボットの組込みCPUに実装して、障害物回避制御を実現した。ここでは障害物の検出と自己位置推定には測域センサを用いて自律化した。この研究によって、測域センサの測距範囲内における車輪位置のリアルタイム最適化を実現し、組込みCPUに実装することができた。車輪位置の最適化を実現したこと、および、その計算アルゴリズムが組込みCPUに実装できる計算量であったことに本研究の独自性がある。一方で車体の移動経路は多項式で表されており、最適な経路である保証はなく、車輪位置が荷重バランスの悪いものになる可能性があった。

(3) この問題を踏まえて、平成23年度は、移動ロボット本体の移動経路と車輪位置の両方を含めた評価関数に対するモデル予測制御を構築した。組込みCPUにも実装可能な計算量にするために、障害物に関するペナルティ関数の形式を工夫し、評価関数の低次のテイラー展開により数学関数を近似した。この手法によって、各車輪に対する荷重バランスを前述の方法と比べて大幅に改善することができた。(2)の手法と(3)の手法の比較として、図3,4に経路と車輪位置、図5,6に車輪ごとの荷重比を示す。(3)の手法は(2)と比較して、十分な安全距離を保ちながら、荷重バランスが優れていることが確認できる。このように、脚車輪型移動ロボットにおいて、荷重バランスまで含めた最適化を実現し、かつ組込みCPUに実装していることから、本結果には十分な有用性があると考えられる。

(4) 前述の(1)の画像処理による誘導制御において、画像処理と無線送信におけるむだ時間は制御性能の大きな制約になる。この問題点を改善するために、平成22年度にスミス補償器を用いた経路追従制御の研究を行い、画像による誘導制御の性能向上を実現した。

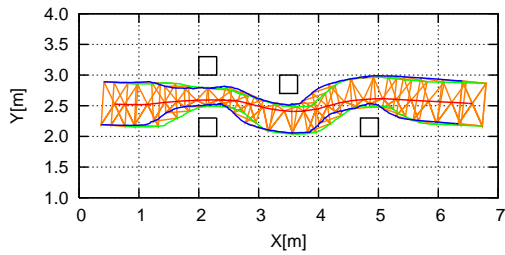


図 3 (2)の手法 (経路を多項式表現, 車輪位置を最適化) による移動経路と車輪位置: 四角は障害物を表す. (2)により障害物回避を実現しているが, 左右の車輪位置のバランスが悪いことが確認できる. $x=2m$ のボトルネックでは, 車輪と障害物の距離が, 安全距離の $0.2m$ より小さくなる瞬間が存在する.

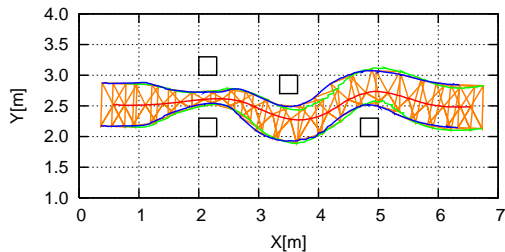


図 4 (3)の手法 (経路と車輪位置の最適化) による移動経路と車輪位置: (2)と同様に障害物回避を実現し, さらに左右の車輪位置のバランスが改善していることが確認できる. $X=2m$ のボトルネックの通過では, (2)より車輪位置が車体に近くなっているが, 車輪からの障害物に対する安全距離の約 $0.2m$ 以上の距離を常に確保している.

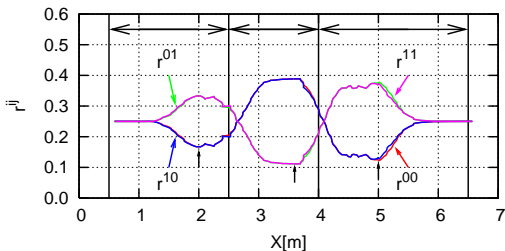


図 5 (2)の手法の各車輪に対する荷重比: 00, 01, 10, 11の順に左前輪, 右前輪, 左後輪, 右後輪を表す. 左右の荷重比が大きく異なっていることが確認できる.

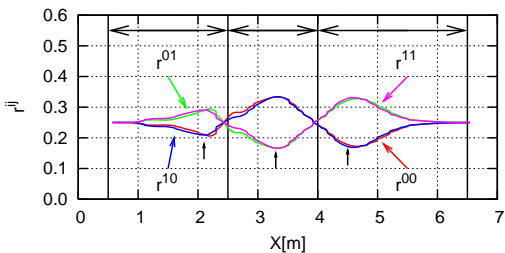


図 6 (3)の手法の各車輪に対する荷重比: 図 5の(2)の手法と比較して, 左右の荷重比の差が小さくなっていることが確認できる.

(5) 高速走行時の障害物回避では, 車輪の横滑り角の影響は無視できないものとなる. このため平成 22 年度に, 反復数値計算を用いたロボト経路追従制御則を提案した. また, 車輪横滑り角を計測するために, オドメトリによる精度の高い速度計測を実現する必要がある. このために, 平成 23 年度には, 拡張 Luenberger オブザーバを用いた非線形速度推定器を提案した.

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

(1) Naoki Takahashi, Kenichiro Nonaka, "Model Predictive Obstacle Avoidance and Wheel Allocation Control of Mobile Robots Using Embedded CPU", Journal of System Design and Dynamics, 査読有, 掲載決定, 2012

(2) 門田啓史, 野中謙一郎, 「むだ時間を考慮した時間軸状態制御形による非ホロノミック車両の経路追従制御」, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 48, No. 1, pp. 2-10, 2012 年 1 月

(3) 大川功, 野中謙一郎, 「経路の道幅を考慮した脚車輪型ロボット車輪位置のモデル予測制御」, 計測自動制御学会産業論文集, 査読有, Vol. 10, No. 23, pp. 190-197, 2011 年 11 月

(4) 栗島佑典, 野中謙一郎, 「反復数値計算による SMC を用いた前輪操舵車の非線形ロボト操舵駆動統合制御」, 日本機械学会論文集 (C 編), 査読有, Vol. 77, No. 782, pp. 3705-3720, 2011 年 10 月

(5) 大川功, 野中謙一郎, 「多関節脚を有する車両のリアルタイムロボト最適化を用いた障害物回避」, 高速信号処理応用技術研究会学会誌, 査読有, Vol. 12, No. 1, pp. 25-30, 2009 年 6 月

[学会発表] (計 25 件)

(1) Yohei Watanabe and Kenichiro Nonaka, "Slip Measurement and Vehicle Control for Leg/Wheel Mobile Robots using Caster Type Odometers", 2011 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, pp. 681-686, September 29, 2011, Denver, USA

(2) Tomoyuki Hosoya and Kenichiro Nonaka, "Experiment of Integrated Steering and Driving Force Controller with Embedded CPU for Front Wheel Steering Vehicles", SICE Annual Conference 2011, pp. 336-341, September 13, 2011, Tokyo, Japan

(3) Naoki Takahashi and Kenichiro Nonaka, "Real-time Model Predictive Obstacle

Avoidance Control with Dynamic Wheel Allocation using an Embedded CPU”, SICE Annual Conference 2011, pp.2660-2665, September 16, 2011, Tokyo, Japan

(4) 細谷 知之, 野中 謙一郎, 「前輪操舵車両の組込みCPUによる操舵・駆動統合制御」, 第28回誘導制御シンポジウム, pp.113-120, 2011年5月13日, 山梨

(5) 高橋直樹, 野中 謙一郎, 「モデル予測制御による脚車輪型ロボットの動的車輪配置と障害物回避」, 第28回誘導制御シンポジウム, pp.121-126, 2011年5月13日, 山梨

(6) 大川功, 野中 謙一郎, 「タイヤ摩擦円を考慮した組込みCPU用モデル予測障害物回避制御」, 第11回計測自動制御学会制御部門大会, 4頁(CDROM), 2011年3月17日, 沖縄

(7) 門田啓史, 野中 謙一郎, 「無駄時間を考慮した時間軸状態制御形による非ホロノミック車両の制御」, 第11回計測自動制御学会制御部門大会, 6頁(CDROM), 2011年3月16日, 沖縄

(8) 渡辺陽平, 野中 謙一郎, 「脚車輪型移動ロボットのスリップ計測システムの構築」, 第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.2239-2242, 2010年12月25日, 仙台

(9) 門田啓史, 野中 謙一郎, 「時間軸状態制御形とスミス法による車両型ロボットの経路追従制御」, 第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.2213-2216, 2010年12月25日, 仙台

(10) 大川功, 野中 謙一郎, 「リアルタイム自己位置推定・障害物検出とモデル予測制御による車両ロボットの障害物回避」, 第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.1670-1673, 2010年12月24日, 仙台

(11) Isao Okawa and Kenichiro Nonaka, “Optimal Online Generation of Obstacle Avoidance Trajectory running on a Low Speed Embedded CPU for Vehicles”, 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, pp.1257-1262, September 9, 2010, Yokohama, Japan

(12) Yusuke Kurishima and Kenichiro Nonaka, “Experiments of Real-time Numerical Sliding Mode Control for Vehicles”, 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, pp.902-907, September 8, 2010, Yokohama, Japan

(13) Keiji Monden and Kenichiro Nonaka, “Analysis of Time Delays for Time-State Control Form Systems applied to Vehicle Motion Control using Visual Feedback”, 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, pp.620-625, September 8, 2010, Yokohama, Japan

(14) 渡辺陽平, 野中 謙一郎, 「マイコンを搭載した脚車輪型移動ロボットの速度フィードバック制御」, 第27回誘導制御シンポジウム, pp.37-44, 2010年5月13日, 東京

(15) 大川功, 野中 謙一郎, 「測域センサを用いた車両型ロボットの組み込みCPUによる障害物回避」, 第10回計測自動制御学会制御部門大会, 2010年3月17日, 福岡

(16) 小林俊也, 野中 謙一郎, 「実時間最適化計算を用いた車両運動制御と障害物回避実験」, 第10回計測自動制御学会制御部門大会, 2010年3月17日, 福岡

(17) 大川功, 野中 謙一郎, 「LRFを用いた移動ロボットの障害物回避軌道生成」, 第10回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.1277-1278, 2009年12月25日, 東京

(18) 大川功, 野中 謙一郎, 「脚車輪型移動ロボットの Receding horizon 制御による車輪位置最適化」, 第11回運動と制御のシンポジウム, pp.195-199, 2009年9月3日, 福岡

(19) 門田啓史, 野中 謙一郎, 「無駄時間を考慮した屋内車両のビジュアルフィードバック制御」, 第11回運動と制御のシンポジウム, pp.191-194, 2009年9月2日, 福岡

(20) 小林俊也, 野中 謙一郎, 「四輪独立操舵駆動車両の最適化計算を用いた運動制御」, 第11回運動と制御のシンポジウム, pp.103-108, 2009年9月2日, 福岡

(21) Keiji Monden and Kenichiro Nonaka, “Development of a Visual Feedback Navigation System using Multiple Image Processing Hosts”, 8th IFAC Symposium on Advances in Control Education, October 22, 2009, Kumamoto, Japan

(22) Shunya Kobayashi and Kenichiro Nonaka, “Real-time Optimized Obstacle Avoidance for Robotic Vehicles: Indoor Experiments”, ICCAS-SICE 2009, pp.3193-3198, August 20, 2009, Fukuoka, Japan

(23) Minoru Yamamoto and Kenichiro Nonaka, “Application and test of sliding mode control for indoor vehicles”, ICCAS-SICE 2009, pp.1273-1278, August 19, 2009, Fukuoka, Japan

(24) 栗島佑典, 野中 謙一郎, 「リアルタイム数値最適化とSMCによるR/C車両制御実験」, 第26回誘導制御シンポジウム, pp.81-88, 2009年5月15日, 横須賀

(25) 大川功, 野中 謙一郎, 「トレッド可変車両の Receding Horizon 制御による障害物回避」, 第26回誘導制御シンポジウム, pp.93-96, 2009年5月15日, 横須賀

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野中 謙一郎 (NONAKA KENICHIRO)

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号：30298012