

Motion Control of an Assistive Mobile Robot Based on Model-based Predictive Control Scheme

著者	王子幼
号	61
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5311号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00122242

氏名	おうしろう 王子幼
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成28年9月26日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) バイオロボティクス専攻
学位論文題目	Motion Control of an Assistive Mobile Robot Based on Model-based Predictive Control Scheme (モデルベース予測制御技術に基づく支援型移動ロボットの運動制御)
指導教員	東北大学教授 小菅 一弘
論文審査委員	主査 東北大学教授 小菅 一弘 東北大学教授 平田 泰久 東北大学教授 田中 真美

論文内容要旨

The increasing shortage and cost of labor threatens the industries of many countries. Robots offer an effective solution to these problems. Automatic robots can ultimately replace human workers in production lines, but they have limited capabilities to carry out many tasks independently. To help human workers in task completion and increase their productivity, many researchers have developed human-assistive robots. Among the various types of robots, mobile robots are often employed in human-robot cooperation tasks because of their considerable working space and motion flexibility. In this research, we developed a human-assistive mobile robot (Fig. 1) that carries parts and tools for human workers in an automobile production line. For convenience, the mobile robot was designed to move in front of the human worker. The design was implemented on a four Alternated-wheeled mobile robot. There is no steering mechanism in the robot but it can move through 360°. Furthermore, the orientation and motion direction of this type of mobile robot can be independently controlled, enabling high motion flexibility.



Fig. 1: Developed mobile robot

The safety and reliability of the omnidirectional mobile robot is deteriorated by hardware limitations: that is, the maximum speed and the nonlinear motion model of the robot are limited. Since our robot precedes the human worker, it cannot know the destination of the worker beforehand. If the motion of the target human exceeds the hardware constraints of the mobile robot, the human and robot may collide, or the human may vanish from the viewing field of the robot. Therefore, the objective of this study was to develop a motion control method for a human-assisting mobile robot that precisely predicts the human's motion. In this new motion control method, the assisting mobile robot keeps tracking and preceding a worker who walks at a speed exceeding its hardware limitations.

The human motion is predicted by a novel hybrid kinematic model that combines the inverted pendulum model with the commonly used constant velocity model. In developing this hybrid kinematic model, we referred to current researches on human walking. The two phases of the walking cycle are replicated by alternating between the two models. The inverted pendulum model calculates the motion of the upper body using the swing motion of the leg, whereas the constant velocity model assumes constant motion of the upper body during the sample time. The nonlinear motion of the inverted pendulum model is estimated by an unscented Kalman filter, whereas the constant velocity model (which is linear) is estimated by a standard Kalman filter. In our research, the current walking phase of the human worker was judged by comparing the swing speeds of the two legs. The effectiveness of the hybrid kinematic model was verified in experiments. The subject walked along a similar path at three different average speeds. The prediction results of the hybrid kinematic model were compared with those of the commonly used constant velocity model. At all three walking speeds, the proposed hybrid model achieved more precise motions than the constant velocity model, so it was chosen as the prediction model in our robot system.

The control framework is based on nonlinear model predictive control (Fig. 2). To achieve the contradictory tasks of preceding humans, avoiding collisions, and continuously tracking the target, a multi-objective cost function was developed (Fig. 3). The function constraints are the nonlinear kinematic model of the omnidirectional mobile robot and the hardware limitations. Infeasibility near the hardware limitations of the mobile robot's motion are avoided by a constraint softening method, which numerically calculates the optimal control input by using a sequential quadratic programming (SQP) algorithm. The calculation accuracy is improved by considering the computational time delay.

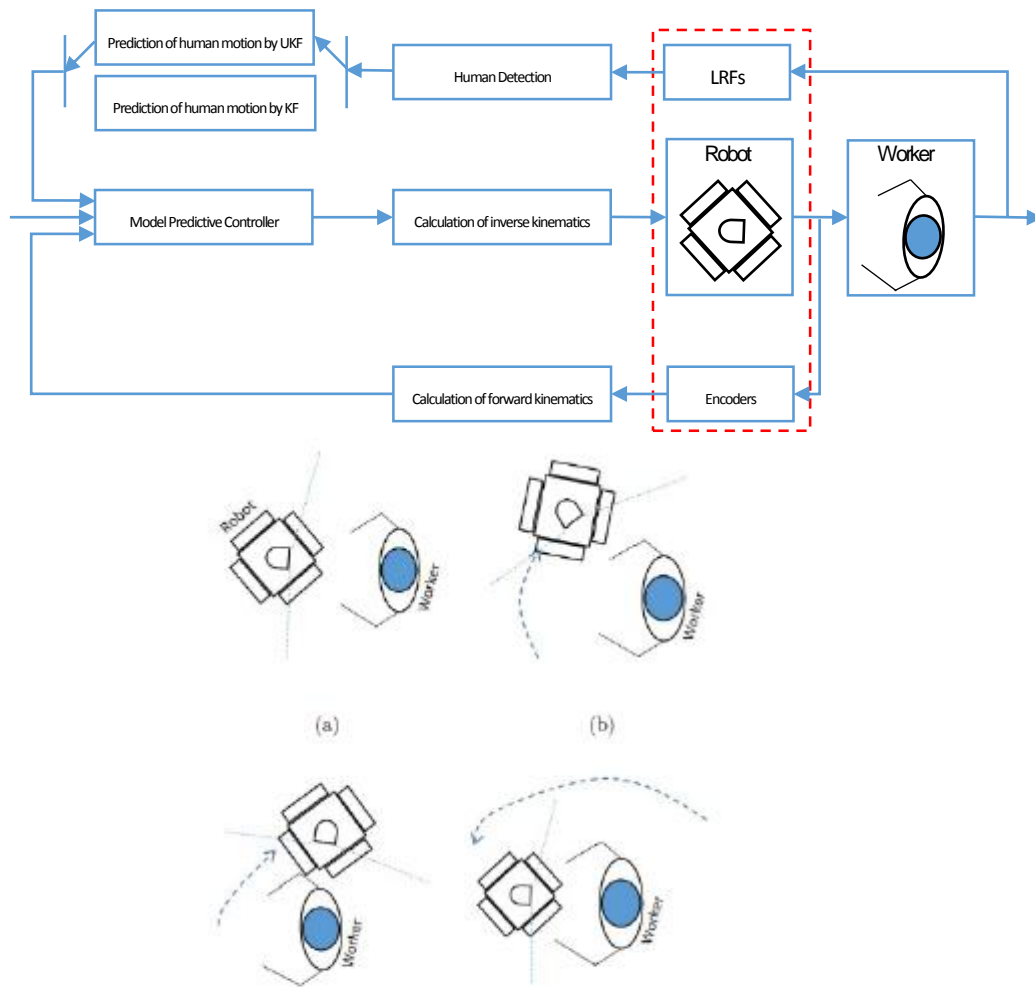


Fig. 3: Proposed strategy

The effectiveness of the proposed controlling strategy was demonstrated in experimental and simulation studies (Fig. 4). The simulation used the human motion data collected in the human motion experiment. In a comparative study of the simulation results, the model predictive control method outperformed the popular virtual spring method. The simulation study was followed by experiments on the real omnidirectional mobile robot. The subject walked along four paths with different shapes. On the final straight -line path, the subject momentarily walked at a speed exceeding the hardware limitation of the mobile robot. In this scenario, our proposed control strategy prevented human-robot collisions and vanishing of the human from the robot's viewing field. When the human's walking speed was within the robot's limitations, the mobile robot moved normally in front of the human.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Fig. 4: S-path motion experiment

論文審査結果の要旨

人と共存し、人の作業を支援するロボットの実用化が期待されており、一部のシステムではあるが、工場に導入され、工場における作業者の作業支援に利用されるようになりつつある。本論文は、工場における作業者の作業支援を目的とした移動ロボットの運動制御に関するもので、作業者を先導し、作業者ととも作業者が意図するように移動が可能な、新しい支援型移動ロボットの運動制御システムを提案しており、全編5章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的および構成について述べている。

第2章は、自動車の最終組立ラインを対象とし、移動ロボットを用いて、作業者に組み付ける部品や作業に必要な工具を届けることで部品や工具の手元化を実現し、作業の効率化を行うことができる、新しい作業支援型移動ロボットシステム概念を提案するとともに、全方向移動ロボットを用いた、概念検証用実験システムの概要について述べている。これは有用な成果である。

第3章では、作業者の運動予測を目的として、作業者の歩行運動を片脚支持期と両脚支持期に分け、それぞれを3次元倒立振り子モデルと定速運動モデルを用いてモデル化することによって、歩行運動の予測の高精度化を可能にする、ハイブリッド型歩行運動予測システムを提案している。また実験によって、ハイブリッド型モデルを用いた予測システムの有効性を確認している。これは重要な成果である。

第4章では、前章で提案したハイブリッド型歩行運動モデルを用いた、非線形モデルベース予測制御システムを提案し、シミュレーションならびに実験を行い、その有効性を確認している。まず、組立作業支援を想定し、作業者の進行方向側に位置し、作業者に対して一定の位置・姿勢を保ち、作業者ととも移動が可能な、モデルベース予測制御系を提案している。本制御系は、非線形ハイブリッド型歩行運動モデルを用いた、多目的評価関数の最適化による、非線形モデルベース予測型制御系である。また、シミュレーションを行い、提案する手法と既存の仮想スプリング法を比較し、提案する手法の有効性を確認している。最後に実験を行い、提案する制御系によって、既存の手法では実現が難しかった、作業者の進行方向前方に位置し、作業者からの一定の位置・姿勢を保ち、作業者を先導するように、作業者ととも移動する移動ロボットシステムの運動制御が実現できる事を示した。これは、重要な結果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、作業支援を目的とした移動ロボットの運動制御問題において、既存の制御手法では実現が難しかった、作業者の進行方向側に位置し、作業者に対して一定の位置・姿勢を保ち、作業者が意図するように、作業者ととも移動することが可能な、全方向移動ロボットのモデルベース予測型制御手法を提案するもので、バイオロボティクスおよび機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。