

(技術資料)

シティークレーンの電子油圧制御式2軸操舵技術

City Crane with Electro-hydraulically Controlled Two Axle Steering Technology



下村耕一*1

Koichi SHIMOMURA



森田孝司*2

Takashi MORITA

This paper describes a new steering feature of a city crane, RKE450. Unlike the conventional mechanism of fully hydraulic steering, a mechanical steering system is used for the front axle, while an electro-hydraulic steering system is used for the rear axles, and the latter steering system is automatically controlled by the front-axle movement. In addition to the safety feature carefully built into the control system, the new steering system also achieves low tire abrasion, better driving stability, and a smaller turning radius. As a result, the crane complies with the European regulations for driving on public roads at speeds as high as 80km/h and has several auxiliary functions for crane actions in the off-road mode at speeds below 25km/h determined by the regulations.

まえがき＝本格的に欧州市場へ投入するシティークレーンの新機種 RKE450 (図 1) を開発するにあたり、操舵機構を欧州規制へ適応することは必須条件であった。国内仕様機において従来採用している油圧式操舵機構では欧州規制には適応できないためである。そこで、新たに前軸を機械式操舵とし、その操舵量に応じて後軸を電子油圧式で自動操舵させるシステムを開発した。

その結果、安全性を十分に配慮した上で、タイヤ摩耗の低減、走行安定性の確保および小回り性の向上を図り、欧州における高速公道走行に対応した操舵システムを確立することができた。以下にその詳細を紹介する。



図 1 RKE450 概観写真
Fig. 1 Photograph of RKE450

1. 国内仕様機における従来の操舵機構

国内で大型特殊自動車として認知されているシティークレーンは、公道走行時に使用する前軸のみで操舵するノーマルモードと、非公道(現場内)走行時に小回り性を向上させるために使用する特殊モード(クランプ/クラブ/リア: 図 2 参照)を標準装備している。また、操

舵を行う運転席は上部旋回体に配置する一方で、最終的な操舵作動する機構部は下部走行体に配置しており、一般的な自動車とは異なる操舵機構の構成上の特徴を有している。そのため、機械的に連結した操舵機構ではなく、全油圧式パワーステアリングコントロールユニットを使用した油圧式操舵システム(図 3)が30年以上前か

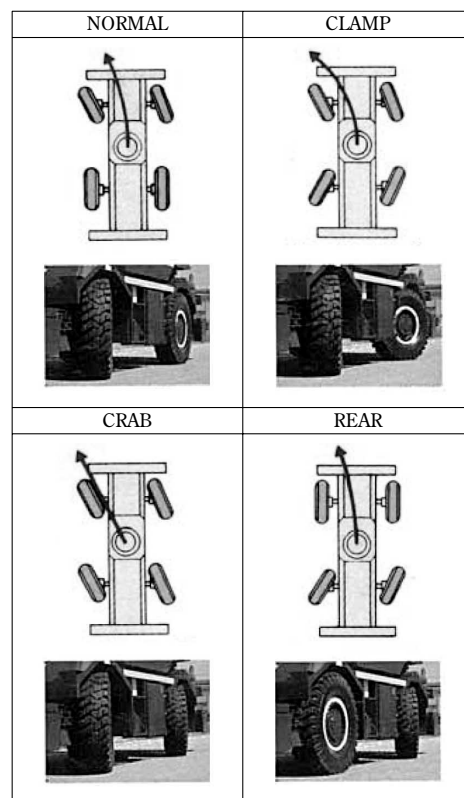


図 2 ステアリングモード
Fig. 2 Steering mode

*1 コベルククレーン(株) 開発本部 要素開発部 *2 技術開発本部 電子技術研究所

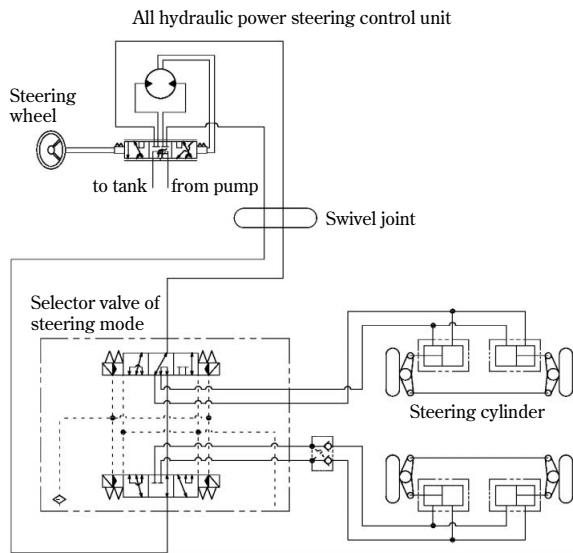


図3 国内機の油圧式操舵システム
Fig. 3 Hydraulic Steerage mechanism

ら採用されている。これは、運転者の操舵が上記油圧式コントロールユニットにより油圧に変換され、上部旋回体から下部走行体にスィベルジョイントを経由して伝達されて最終的にステアリングシリンダを油圧で作動させることにより操舵作動させる構成である。ノーマルモードと特殊モードは、運転者の操作と各種切換条件をコントローラが判断し、電磁切換弁の切換えによって油圧回路を変更して対応する。

ノーマルモードでは前軸のみが作動する（後軸は保持状態）油圧回路となり、特殊モードでは前軸と後軸が連動する油圧回路になって操舵作動する構成である。しかしながら、この構成では公道走行する際の操舵機構が機械的に接続されていないことから堅牢でないとみなされ、欧州で公道走行車に求められる規制には適合しない。

2. 新機種 RKE450 における操舵機構

2.1 操舵機構の構成

新機種 RKE450（以下、本機種という）では、前軸は

運転席から下部操舵機構まで機械的に接続し、運転者の操舵操作がリンク機構を経由して直接伝達する構成とした。他方、後軸（2軸目／3軸目）は電子制御による油圧駆動方式とし、操舵の許可などを行う電磁切替弁（以下、チェック弁という）、および操舵量を調整する電磁比例弁に対してコントローラが指令を行うことによって後軸を駆動する構成とした（図4）。コントローラは、運転者による前軸の操舵量を操舵角度センサにより検出・把握し、各ステアリングモードの条件に対応した後軸の操舵量を自動演算する。さらに、後軸の操舵量も操舵角度センサで検出し、その結果に応じて指令を決定する。

このような構成では、前軸と後軸が機械的にも油圧的にも連結されていないため、後軸操舵動作の自由度が高まり、制御次第でタイヤ摩耗の低減や小回り性の向上等の商品力向上を可能とした。一方で、従来の国内仕様機のように、前軸と後軸が油圧的に連結され、前軸と後軸が必ず一定の関係で同期する構成とは大きく異なる。そのため、電子制御のフェール（誤動作や部品故障）などにより、後軸の操舵作動が前軸の操舵に連動しない危険事象が想定されるため、後述のように従来の国内仕様機以上に安全に対する配慮を徹底し、安全性の強化も図った。

2.2 各操舵モード

本機種は、公道走行用のオンハイウェイモードと非公道走行用のオフロードモードを備える。

オンハイウェイモードでは、80km/h の高速走行に耐え得る走行安定性の確保と後軸のタイヤ摩耗の低減を図るため、国内仕様機では実施していない各軸ごとの操舵制御を行う。2軸目は中立状態に保持し、3軸目を1軸目の操舵角度に追従して自動操舵する（図5）。

車速が10km/h以下の低速域では、操舵時のタイヤ摩耗を最小限に抑制し、かつ小回り性を向上させるために、操舵回転中心が必ず2軸目の軸線の延長線上になるように制御する。この回転中心は、1軸目と3軸目の操舵角度と、コントローラに予め記憶している実機の軸間距離によって一意に決まることから、コントローラは、

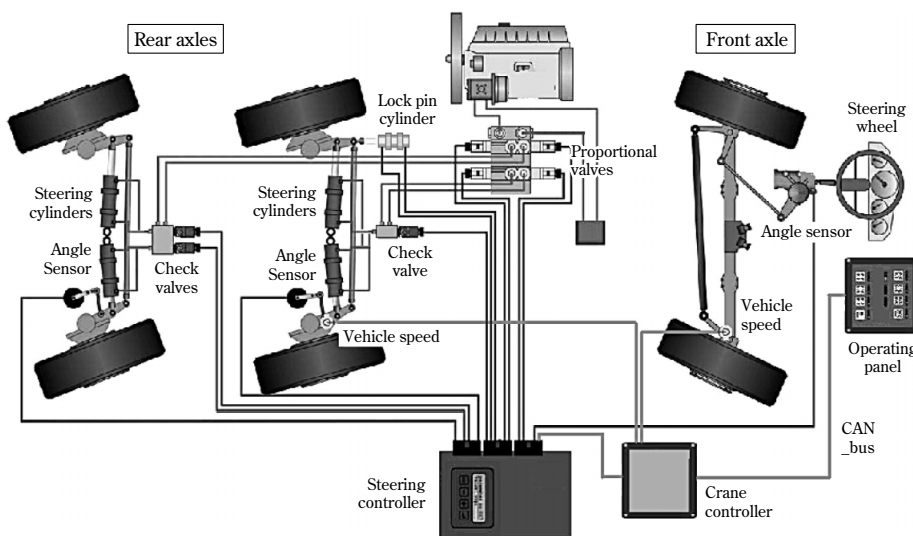


図4 RKE450の操舵システム図
Fig. 4 Diagram of steerage system of RKE450

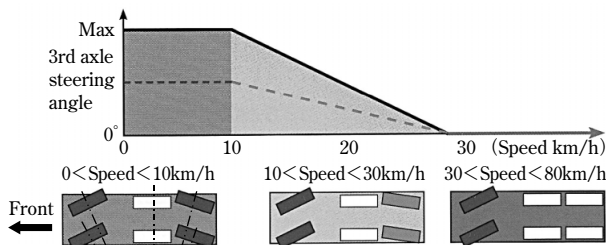


図5 オンハイウェイモード時のステアリング制御
Fig. 5 Steering system in on-highway mode

運転者の操作で常に変化する1軸目の操舵角に基づいて3軸目の操舵角を計算して自動制御する。

また、車速30km/h超の高速域では、走行安定性を重視し、3軸目も2軸目同様に1軸目の操舵角度に関係なく中立状態に保持する。高速域ではタイヤ摩耗の影響が小さいこと、および操舵角度の小さな変化が車体の方向変化(直進安定性など)に大きく影響するという安全面との両面からこの仕様とした。この車速に対応した制御切換えは、閾値が高い方がタイヤ摩耗の抑制に有利なため、欧州で先行する競合他社の仕様(25km/h)を上回りつつ、実機評価にて安全性を十分確保できる車速として30km/hに決定した。

車速10~30km/hの中速域では、低速域で決定した値から高速域に到達するまで車速に応じて3軸目の操舵角を比例的に変化させ、運転者が後軸の操舵作動に違和感が生じないようにした。

オフロードモードでは、欧州規制に基づいて車速を25km/h以下に制限する代わりに、特殊ステアリングとしてオールホイールモード、クラブモード、およびマニュアルモードを装備し、現場内での各種制約条件に応じた機動性を確保した。このモードでは、オンハイウェイモードで常に中立状態に保持していた2軸目も操舵を可能にし、各軸の操舵可能範囲をフルに生かした動作ができるようにした。

オールホイールモードは、操舵回転半径を最小とするために、操舵回転中心が常に車体中心軸の延長線になるように1軸目の操舵角度に基づいて2軸目と3軸目の操舵角度を自動制御する。クラブモードは、幅寄せを最適にするために1軸目の操舵角度に基づいて2軸目と3軸目の操舵角度を同等にするように自動制御する。マニュアルモードは、ステアリングハンドルとは別の後軸操舵用のスイッチによって1軸目の操舵と独立して2軸目と3軸目を操舵できるようにし、各種制約条件に応じて前軸と後軸の位相を個別に作り込めるようにした(図6)。

2.3 安全への配慮

2.3.1 状態検出での配慮

システムの精度や安全性、信頼性を維持するためには各軸の操舵角度の検出が非常に重要になる。とくに安全面においては、操舵角度の検出が実機の状態と整合できていない場合、運転者の操舵操作とは全く連動しない操

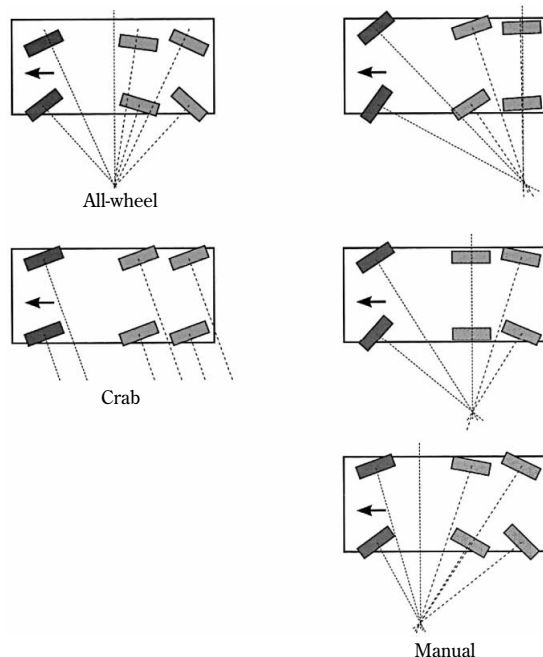


図6 オフロードモード時のステアリング制御
Fig. 6 Steering system in off-road mode

舵作動になる可能性があり、即時に大事故につながるリスクがある。

そこで、操舵角度検出は、従来の国内機の状態検出に比べて、とくに手厚く配慮した。アクセル操作検出などの重要な状態検出と同様に、検出信号を二重化することは当然だが、二重化した信号の双方が同一要因によって同一傾向の誤った値となることを防止するために、クロスセンシングとして冗長化することによってさらに信頼性の向上を図った(図7)。これは、センサ用電源電圧やアースの電位レベルが何らかの原因で正常値を外れた場合や、信号ラインの中途半端な天絡や地絡が発生した場合など、二重化した信号の両方または片方が正常範囲(センサ電圧の上限や下限を超えた故障範囲には至らない範囲)内において実態とは異なる値となった場合においても異常が判断できるよう構成したものである。一方の信号を基準に他方の信号が角度換算した状態で±10%の範囲から外れた場合には異常と判断し、その値は制御には使用せずにフェール処理に移行する。

車速検出センサからの車速信号も、オンハイウェイモ

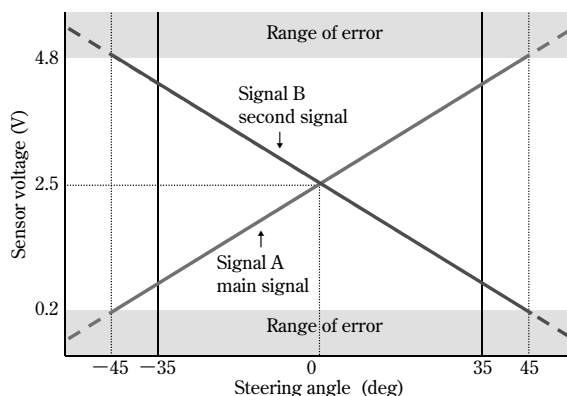


図7 操舵角度センサ信号特性
Fig. 7 Signal of steering angle sensor

ードにおける操舵角度やモード切換条件などの演算に使用しており、非常に重要である。車速信号は操舵制御以外の制御にも用いており、従来、後軸（メイン）と前軸（サブ）の2箇所センサを設けている。操舵制御用コントローラに対しては、後軸はパルス信号を直接入力し、前軸は他の制御系コントローラ経由でCAN通信により間接的に入力して2系統入力を確保した。通常の異常検出とは異なり、操舵角度検出と同様にその2系統の信号を比較して一定値以上の差異が生じた場合には異常と判断し、その値を制御には使用せずにフェール処理に移行させる。

2.3.2 操舵作動での配慮

前述の状態検出が正常であっても、操舵制御用コントローラからの電氣的出力信号やそれを受けて作動する油圧アクチュエータにおいて何らかの異常があった場合にも、運転者の操舵操作とは全く連動しない操舵作動となる可能性がある。このため、電氣的な二重化のみならず油圧的な二重化も含め、手厚く配慮した（図4）。

基本的な考え方として、オンハイウェイモードにおいて後軸が勝手な振舞いを絶対に起こさせないこと（とくに高速域で中立状態に保持すること）を何より優先してシステム構成をした。後軸の操舵作動は2軸目も3軸目もおおの2本のステアリングシリンダのストロークにより決定される構成であり、その作動は操舵制御用コントローラの指令に基づいて作動するステアリング制御弁（比例弁）の出力により決定される。比例弁は制御弁の左右に対向して設け、電氣的出力がない限りは操舵状態は保持されるようにした。すなわち、比例弁の出力が同等（ゼロの場合も含む）の場合には制御弁は中立状態となりステアリングシリンダが保持状態となる構成とした。

さらに、万が一スティック（スプールの固着）や電氣的異常などによりステアリング制御弁（比例弁）の油圧出力が危険側に作動した場合を考慮して油圧回路上で二重の保持構成とした。これにより、操舵制御用コントローラが異常状態を判別し、ステアリングシリンダの前段に設けているチェック弁を回路遮断側に作動させてステアリングシリンダを保持状態にできる。このチェック弁自体も、電気信号が出力された場合に油圧回路を開放してステアリングシリンダを作動可能にする構成とした。なお、このチェック弁は3軸目にはステアリングシリンダごとに設け、一方のチェック弁の不作動時でもステアリングシリンダが作動しないようにした。2軸目は、チェック弁は両方のステアリングシリンダに共通の一つだけしか設けていない。その代わりに、オンハイウェイモードでは常に中立状態保持であることから、油圧保持機構のみでなく、国内仕様機で従来実施している機械的なロック機構（ロックピン）を追加しており、空圧のロックシリンダによってロックピンを作動させ、ステアリングシリンダが作動しないようにした。

電氣的には、国内仕様機同様に比例弁出力のフィードバックを常に監視し、異常時には即時フェール処理へ移行させる。また、チェック弁への電気出力も、ハイサイ

ド（電源供給側）とローサイド（アース側）の双方の出力を操舵制御用コントローラから実施する構成とし、チェック弁が電氣的な理由でステアリングシリンダを保持できなくなる可能性を無視できるレベルまで低くした。

2.3.3 フェール時の処理

状態検出や操舵制御用コントローラの異常、あるいは出力系の異常が発生した場合には、危険事象につながらないようにフェール時の処理を明確に定義した。異常レベルを重要度別に0（軽度）～3（重度）の4段階に分類し、そのレベルに応じて2軸目と3軸目の操舵制御仕様を限定することによって重大な危険事象を抑制するとともに、可能な限り操舵機能を有効にするように配慮した（表1）。

レベル0では通常の制御を継続する。レベル1では、その異常が影響する軸に対してのみ、運転者による操舵操作により中立になった時点でそれ以降は中立を保持する。レベル2では、異常が影響する軸に対してのみ強制的に中立状態へ操舵作動し、それ以降は中立を保持する。レベル3では、異常が影響する軸に対しては即時保持状態とするとともに、直接影響が及ばない軸に対しても運転者による操舵操作により中立状態になった時点でそれ以降は中立を保持する。

2.3.4 安全の検証

従来の開発と同様に、ベンチチェックおよび実機における各制御仕様の確認に加え、故障モード影響度解析（Failure Mode and Effects Analysis, 以下FMEAという）に基づいた各故障モードにおける挙動の確認を徹底することによって制御システムを確立した。代表的な検証内容を以下に紹介する。

システム正常時の作動確認では各操舵モードの性能確認を実施する。その中でも、直進性はとくに重要な項目と位置付け、後軸の中立状態の要求仕様（±0.3°）に対して種々の条件における実機試験を行った結果、±0.15°以内に収まっていることを確認した。

つぎに、最も重要な検証であるフェール時の挙動確認では、蓄積データの有効活用をはじめとする操舵システムメーカーの協力を得ながらFMEAに基づいた検証を実施した。

その中でも、オンハイウェイモードにおけるスイング

表1 フェール時の処理
Table 1 Definition of fail-safe

Error level	Axle2				Axle3			
	No effect	Lock next center	Move to center	Lock actual	No effect	Lock next center	Move to center	Lock actual
System level0	○				○			
System level1		○				○		
System level2			○				○	
System level3				○				○
Axle2 level0	○				○			
Axle2 level1		○			○			
Axle2 level2			○		○			
Axle2 level3				○		○		
Axle3 level0	○				○			
Axle3 level1	○					○		
Axle3 level2	○						○	
Axle3 level3		○						○

アウト試験は、安全上および欧州規制適応の観点からもとくに重要である。これは、3軸目の挙動としてFMEAのワーストケース（操舵制御比例弁ラインの天絡）とした場合に、運転者の操舵操作とは無関係に3軸目の操舵角度が急激に変化して車体後部が横振れ（スイングアウト）する量を確認する試験である。欧州規制は横振れ量が車幅の10%（本機種では約255mm）以内であるが、開発当初の実測では約300mmと許容できない結果となった。このとき、比例弁出力のフェール状態認識から3軸目の操舵作動を停止するためのチェック弁作動までに約220msを要しており、その結果として操舵角度が約5.4°変化していた。その応答時間を調べてみると油圧応答が支配的であった。そこで、この油圧応答性を改善しつつ、正常時の操舵精度を維持するために、チェック弁と比例弁の仕様見直しを実施した。その結果、最終仕様ではスイングアウト試験時の操舵角度を1°程度に抑えることができ、横振れ量も数十mm程度と全く問題ないレベルに上げることができた。

安全上および欧州規制適応の観点から重要なもう一つの試験として、オンハイウェイモードにおける3軸目最大操舵角度でロックした時の退避動作確認試験がある。これは、3軸目を最大操舵していた際に何らかの異常が発生してロック状態となった場合に、車体がある程度走行させて退避できるかを確認するものである。本機種では、オンハイウェイ時の3軸最大操舵角度である19°に固定した状態で1軸目の操舵操作のみで直進走行を実施し、容易な操作ではないものの退避できるレベルとの判断でクリアした（図8）。



図8 退避試験
Fig. 8 Fail test

むすび＝シテークレーンに限らずクローラークレーンも含めた移動式クレーンでは、これからも商品力向上のための高機能・高性能化に対応するためにますます電子制御化が進むことになる。その際にも、本開発での取組み同様にフェール時の安全性・信頼性の確保が絶対条件であることを念頭に置いたシステムの構築および実装上の配慮が必須であると考えます。

今後も、機能・性能と安全性・信頼性のバランスを常に意識した商品を提供し続けることができるように努めたい。