

## fast wireless – inverted pendulum demonstrates new data transfer concepts for 5G

Operating the inverted pendulum which IMMS has created to demonstrate 5G data transfer concepts.  
Photograph: IMMS.

### Objectives and overview

#### Today's mobile radio technology too slow to cope with many future applications

Real-time mobile data transmission is the basis for a variety of new applications. Examples of these applications are car-to-car communication, inter-machine communication and the "tactile Internet". All require the interaction of a large number of participants or, better, of sensors, which must have very short signalling times with delay (known technologically as latency) of only milliseconds, and data and signal connections that are so absolutely reliable that there are no outages. None of today's wireless technologies is up to these requirements. For example, the LTE (Long Term Evolution) standard was developed mainly for high data throughput.

#### "Fast wireless" worked on minimising latency in basic 5G technology

The "fast wireless" project, therefore, explored, developed and evaluated basic technology for fifth generation (5G) mobile communications with minimal latency so that mobile devices and control units can network in real time. A major focus was on developing transmission concepts that allow the principles of low latency and high reliability.

More on

fast wireless at  
[www.imms.de](http://www.imms.de)

Annual Report

© IMMS 2018

IMMS defined the requirements for real-time operating systems that will communicate by 5G, supported the other partners in the project on the specifications of suitable interfaces between the communications layers and developed components which will permit latency-critical elements to be partitioned into their hardware and software elements. The technology developed in the project has been used by IMMS in a demonstration model, applying the algorithms of the project partners.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Contents
- \* Funding

As future machines or robots will be operating in closed-loop regulation systems to achieve process optimisation on the basis of data transferred by 5G, IMMS has cooperated with Dresden University of Technology to create an inverted pendulum demonstrating the principle. The pendulum shows that a 5G wireless signal route with minimal latency is, indeed, essential for such new applications but also that all the hardware and software in the system must be configured to work in real time.

More on  
communications  
solutions at  
[www.imms.de](http://www.imms.de).

### Control of an inverted pendulum with low latency data transfer demonstrates the new principles for 5G

The aim of the system is to maintain the vertical orientation of the pendulum in its state of unstable equilibrium. The pendulum is 9 cm long and stands upright on a 0.2 mm narrow edge on a moving linear axis, see Figure 1. To ensure it stays in its orientation and position, the pendulum is observed by a camera. To keep it actively in balance, its angle is constantly communicated by wireless in real time to the control system of the axis, using the new 5G mobile radio standard. The data would arrive too late if technology currently in use, such as LTE, were used: the pendulum would fall over. The latency of the data transmission in the IMMS demonstrator is with just 100 µs per data packet well below the target of 1 millisecond required for the 5G standard.

IMMS has thus done more than implement a complete prototype system with its new algorithms and communications components; more than show a practical application of low-latency communications in cellular radio. It has also provided a clear demonstration of the significance of low latency for the benefit of an audience unfamiliar with the subject.

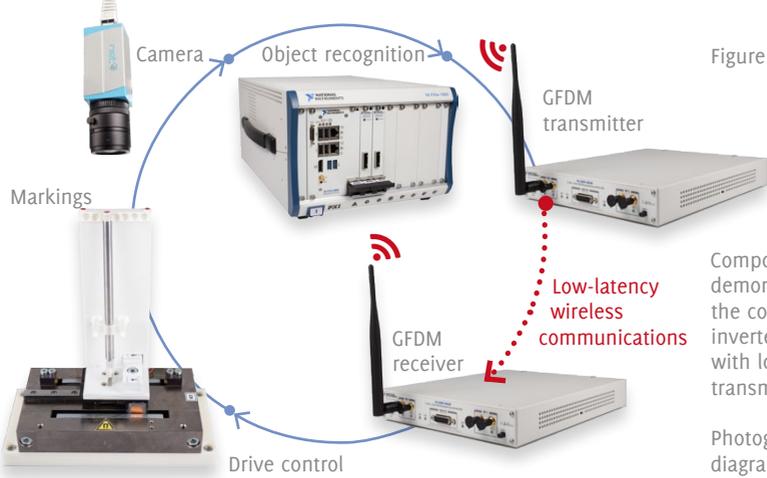


Figure 1:

Components of the demonstrator for the control of an inverted pendulum with low-latency radio transmission.

Photographs and diagram: IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Contents
- \* Funding

## The IMMS solution in detail

### 5G requirements, real-time

Latency, the time that signals spend travelling, is a crucial factor in real-time communications. The latency in UMTS networks (also known as 3G) is around 100 milliseconds and that in LTE networks (4G) around 30 milliseconds. In comparison, the latency to which 5G networks aspire is, at 1 millisecond, extremely brief. This means that if a data packet is sent using 5G on layer 4 (the transport layer) of the OSI reference model for the network protocols (TCP), the data packet must arrive on layer 4 of the target within a single millisecond.

### Design of the demonstrator

As the movable linear drive on which the pendulum is standing freely has the capability to achieve very high acceleration on one of its spatial axes, control of its movement must be appropriately fast. To be able to calculate the angle of the pendulum a red marking was applied to its top and to two other fixed points in its vicinity. The tilt of the pendulum is registered from above by means of a camera. Image data from this camera is transmitted via Gigabit Ethernet to an embedded controller running the object detection algorithms. The tilt angle calculated in this manner is communicated wirelessly to a control unit whose job is to keep the pendulum vertical by moving the linear drive (Figure 1). Two GFDM units (reception and transmission) are used for the wireless transmission of the data. GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing) operates with a waveform similar to that of 5G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Details in: N. Michailow et al., "Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 9, pp. 3045-3061, Sept. 2014, DOI: 10.1109/TCOMM.2014.2345566.

## Latency demands of the demonstrator

The propagation time for the signal, or latency, has a direct influence on the stability of the control system. If the latency is too long, the controller becomes unstable and the equilibrium of the pendulum cannot be maintained. The total latency is composed of various parts: the captured image has to be digitised within the camera, buffered and transmitted to the embedded controller by Gigabit Ethernet. At the controller, the data packets have to be received and the object detected. The result of this computation are the coordinates of the three markings. The coordinates are forwarded to the GFDM transmitter, which is implemented in a programmable hardware component, an FPGA (Field Programmable Gate Array) belonging to the USRP (Universal Software Radio Peripherals). Then the coordinates are transmitted through a wireless link to the second USRP of the receiving unit. After this, the data is transferred by wire to the linear drive controller. To maintain the pendulum in its verticality on the drive being used, a total delay of approx. 22 ms must be kept.

## Real-time operating system

To ensure that the demanding real-time conditions would be met by the demonstrator, a Linux real-time operating system was implemented on the embedded controller. This makes it possible to run all the stages of the communications stack and the various other software components in a deterministic way. Furthermore, using typical methods of a real-time operation system (f.e. tracing), latency measurements were carried out, to characterise and optimise the real-time performance of the embedded controller.

## Object detection

To find a suitable **algorithm** for detecting the pendulum position, IMMS worked from theory and experiment on a variety of standard procedures employed in image processing. The choice fell on the following three variants.

1. **Feature detectors** for example, BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features), ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF), MSER (Maximally stable extremal regions): with these, features extracted from a reference image are found by the algorithm in the current image independently of the difference in coordinate transformation (scaling, rotation, displacement). The position of the pendulum is established from the transformation of the original feature vector as compared with the current image.

2. **Hough circles:** the edges of circular marks in the experimental setup are found by the Hough transform method. Their position serves as the starting point for measuring the pendulum deflection.
3. **Colour filter:** marking points in the same colour at various points in the experimental setup are selected by means of appropriate filters. Their position serves as the starting point for finding the pendulum tilt.

> RoMulus:RFID  
 > Green-ISAS:Test  
 > Green-ISAS:EH  
 > StadtLärm  
 > fast wireless  
 > ADMONT  
 > RoMulus:MEMS  
 > Contents  
 \* Funding

The runtime of these algorithms was empirically determined using various examples. The colour filter algorithm was selected on the basis of the test results and its easy implementation. Only colour markings of the pendulum setup at the points relevant to position and angle detection are required.

For **image data transfer** and camera configuration IMMS used a library from the Aravis project.<sup>2</sup> This library is part of a FOSS (Free and Open Source Software) project providing means to access industrial network cameras made by different manufacturers in a generic way. It proved to be a useful tool for configuring the camera and the image data transfer.

IMMS created a **graphic user interface** for configuring the object detection algorithms. For this the QArv<sup>3</sup> program was used as basis and extended accordingly. Relying on the Aravis library, this program provides access to the camera used for the demonstrator and its parameters. It also allows to apply simple image filter functions, capture single camera frames or record and store the complete video data stream.

Using functions of the OpenCV<sup>4</sup> image processing library, IMMS implemented an add-on filter for QArv which is used to determine the **pendulum position**. The basic steps in getting the position from the colour marking points on the pendulum are as follows:

1. transformation of the camera image from RGB to HSV colour space,
2. filtering of the image content through threshold value (minimum and maximum) filters – on the parameters hue, saturation and value,
3. optional transformation (erode-dilate-erode) to minimise interference.

<sup>2</sup> <https://github.com/AravisProject/aravis>

<sup>3</sup> <http://www.ad-vega.si/en/software/qarv/>

<sup>4</sup> <https://opencv.org/>

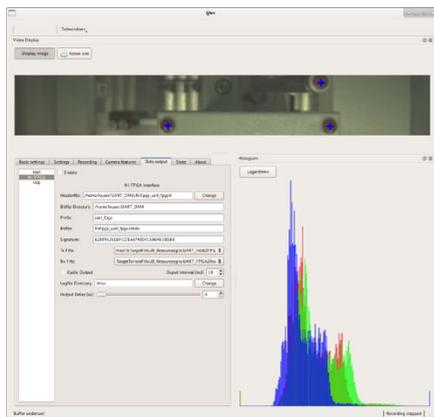


Figure 2: Main QArv window with the coloured markings detected by the filter algorithm. Screenshot: IMMS.

During runtime the parameters for all these stages can be adjusted on the graphical user interface and then stored. This helps for instance to quickly adapt the demonstrators setup under changed lighting conditions. In addition, the live camera feed can be displayed at various interim stages of the image processing. This allows to observe the effects of changes to individual parameters more exactly. Figure 2 shows the main QArv window with the colour markings detected by the filter algorithm.

> RoMulus:RFID  
 > Green-ISAS:Test  
 > Green-ISAS:EH  
 > StadtLärm  
 > fast wireless  
 > ADMONT  
 > RoMulus:MEMS  
 > Contents  
 \* Funding

## System simulation and controller design

In order to establish certain parameters for the mechanical construction and to test whether the timing conditions for the wireless data transfer could be met in theory, the setup was simulated at IMMS as a classic feedback loop model. This simulation was used to calculate the maximum allowed dead time for the controller input values which occur during image processing and image data transfer. Also, the for a stable operation required minimum controller cycle frequency (which corresponds to the cameras frame rate in the demonstrators setup), was calculated using this way.

As the drive has only a short travel distance of 68 mm, it was only possible to use a relatively short pendulum: 90 mm. The result was a pendulum in almost constant movement.

The first step was to correct the geometrical imaging error due to the curvature of the camera lens. This imaging error is computed using a third-order polynomial. Correction computation gives the angle at a resolution of  $\approx 0,04^\circ$ , accurate to  $\pm 0,2^\circ$ .

The **control algorithm** was implemented on a 32-bit fixed-point microcontroller. It was a challenge to establish suitable control parameters for the system. The highly dynamic pendulum and the short travel distance demanded very rapid reaction on the part of the control system on pendulum movement. However, the camera has a relatively low frame rate and so the sampling rate for angle measurement has a maximum frequency of 150 Hz. Also, the latency of 20 ms plus jitter constitutes a considerable impact on the speed of controller reaction.

*More on open/  
 closed-loop  
 controls at  
 www.imms.de.*



Figure 3: Equipment created at IMMS to demonstrate the inverted pendulum, including casing and integration of all control parts. Photograph: IMMS.

Under the conditions here described, the usual methods of designing robust control systems, such as pole placement or linear-quadratic regulation (LQR) could not be applied. Thus an iterative experimental approach to determine the necessary control parameters was used.

### Implementation and setup

The next stage was to implement the radio transmission and test it. These tasks were shared with Dresden University of Technology, a partner in the project. To achieve the necessary start-to-finish short latency, it is also essential to ensure that the radio interface used is one with the lowest possible latency. The framework used must support small data packets and the modulation and demodulation must work with a minimum of delay.

The GFDM implementation developed at Dresden University of Technology operates in a bandwidth of 20 MHz and with packets lasting a mere 16  $\mu$ s. As such it is highly suitable for low-latency transmission.

In contrast to the CP-OFDM wave form of 4G, GFDM supports short symbols, while at the same time greatly reducing out-of-band interference. The increased design space enables waveform parameters to be set for a wide variety of scenarios. The simple modulation and demodulation achieves latency of less than 100  $\mu$ s per data packet and this was sufficient to maintain the pendulum in its state of unstable equilibrium. The GFDM physical layer was implemented in the software-defined radio system (SDR) of National Instruments.

For the physical equipment, a casing was designed and made. To improve illumination, LED lighting was integrated and a domed plexiglass cover under which all the control components were kept was created.

## Conclusions and Outlook

The demonstrator proves that it is feasible to achieve wireless, highly reliable, extremely low-latency communications for applications with a closed-loop control system; in this case maintaining an inverted pendulum in its constant state of unstable equilibrium by means of a movable linear drive, object recognition and suitable control algorithms.

The 5G mobile communications standard will be a vital factor in progress towards smart manufacturing. In this project, IMMS has gained vital knowledge concerning the use of low-latency wireless communications in closed- and open-loop control of machinery and plant. The Institute can now incorporate this knowledge into industrial applications for SMEs and in possible new areas such as agriculture.

**Contact person:** Dipl.-Ing. Sebastian Uziel, [sebastian.uziel@imms.de](mailto:sebastian.uziel@imms.de)

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Contents
- \* Funding

More on  
*fast wireless* at  
[www.imms.de](http://www.imms.de)

*fast wireless*  
publications:  
[www.imms.de](http://www.imms.de)

As part of the *fast* cluster project, the *fast wireless* project is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in its “Twenty20 – Partnership for Innovation” programme under the reference 03ZZ0505J.

SPONSORED BY THE



Federal Ministry  
of Education  
and Research





## fast wireless – Inverses Pendel demonstriert neue Übertragungskonzepte für 5G

Inbetriebnahme des inversen Pendels, das das IMMS zur Demonstration von 5G-Übertragungskonzepten realisiert hat. Foto: IMMS.

### Motivation und Überblick

#### Heutige Mobilfunktechnologien für viele künftige Anwendungen zu langsam

Echtzeitfähige mobile Datenübertragung ist die Grundlage für vielfältige neue Anwendungen, wie z.B. für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen oder zwischen Maschinen sowie für das „taktile Internet“. Für diese Anwendungen müssen sehr viele Teilnehmer bzw. Sensoren mit sehr geringen Signallaufzeiten, sogenannten Latenzzeiten, im Millisekundenbereich kommunizieren und das mit sehr hoher Zuverlässigkeit, sprich Ausfallsicherheit der Daten- und Signalverbindungen. Heutige Funktechnologien können diese Forderungen nicht erfüllen. So wurde z.B. LTE hauptsächlich für hohe Datendurchsätze entwickelt.

#### Fast wireless arbeitete an latenzminimierten Basistechnologien für 5G

Im Projekt fast wireless wurden daher latenzminimierte Basistechnologien für die fünfte Generation im Mobilfunk (5G) erforscht, entwickelt und bewertet, um mobile Geräte und Steuereinheiten echtzeitfähig zu vernetzen. Ein Schwerpunkt lag in der Entwicklung von Übertragungskonzepten, die eine geringe Latenz und eine hohe Zuverlässigkeit erlauben.

Mehr zu

fast wireless:

[www.imms.de](http://www.imms.de)

Jahresbericht

© IMMS 2018

## Beiträge des IMMS für künftige Lösungen, die mit 5G kommunizieren werden

Das IMMS hat Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit von Betriebssystemen künftiger Lösungen erarbeitet, die mit 5G kommunizieren werden, die Projektpartner bei der Definition geeigneter Schnittstellen zwischen den Kommunikationsschichten unterstützt und Komponenten entwickelt, die eine Partitionierung latenzkritischer Elemente in Hard- und Software ermöglichen. Die im Projekt entwickelten Technologien hat das IMMS in einen Demonstrator einfließen lassen und die erarbeiteten Algorithmen der Projektpartner umgesetzt.

Da für Prozessoptimierungen künftig Maschinen oder Roboter in geschlossenen Steuerungssystemen mit per 5G übertragenen Informationen gesteuert und geregelt werden sollen, hat das IMMS gemeinsam mit der TU Dresden ein inverses Pendel als Demonstrator realisiert.

Dieser verdeutlicht, dass eine niedriglatente 5G-Funkstrecke zwar Voraussetzung für neue Anwendungen ist, aber zusätzlich die beteiligte Hard- und Software echtzeitfähig ausgestaltet werden muss.

## Regelung eines inversen Pendels mit niedriglatenter Funkübertragung demonstriert die neuen Übertragungskonzepte für 5G

Ziel ist es, das inverse Pendel in seiner instabilen Ruhelage aufrecht zu halten. Das neun Zentimeter lange Pendel steht frei auf einer 0,2 mm schmalen Kante auf einer bewegten Linearachse, vgl. Abbildung 1. Damit das so bleibt, wird das Pendel von einer Kamera beobachtet. Um es auszubalancieren, wird dessen Winkel permanent mit 5G-Mobilfunk in Echtzeit an die Bewegungssteuerung der Achse gefunkt. Mit heutigen Mobilfunk-Technologien wie LTE würden Informationen zu Abweichungen zu spät ankommen und das Pendel umkippen. Die mit dem Demonstrator realisierten Latenzen liegen mit 100µs pro Datenpaket weit unter der für 5G geforderten Zielgröße von einer Millisekunde.

Damit wurden nicht nur die entwickelten Algorithmen und Kommunikationskomponenten in einem Gesamtsystem prototypisch implementiert und die praktische Anwendung einer niedriglatenten Kommunikation im zellularen Mobilfunk aufgezeigt. Die Bedeutung einer niedriglatenten Kommunikation kann damit auch fachkundigem Publikum verdeutlicht werden.

- > RoMulus:RFID
- > Green-ISAS:Test
- > Green-ISAS:EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus:MEMS
- > Inhalt
- \* Förderung

Mehr zu  
Kommunikationslösungen:  
[www.imms.de](http://www.imms.de)



Abbildung 1:

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- \* Förderung

Komponenten des Demonstrators für die Regelung eines inversen Pendels mit niedriglatenter Funkübertragung.

Grafik/Fotos: IMMS.

## Lösung im Detail

### 5G-Anforderungen und Echtzeit

Entscheidend für eine Kommunikation in Echtzeit sind die Latenzzeiten. Lagen Verzögerungen der Signallaufzeiten in UMTS-Netzen (3G) noch bei rund 100 Millisekunden und für LTE-Netze (4G) bei etwa 30 Millisekunden, ist die im 5G-Netz angestrebte eine Millisekunde Latenz extrem kurz. Wird also über 5G ein Datenpaket auf Schicht 4 des OSI-Referenzmodells für Netzwerkprotokolle(TCP) losgeschickt, muss dieses Paket innerhalb von einer Millisekunde zur Schicht 4 des Ziels gelangen.

### Demonstratoraufbau

Der Linearantrieb, auf dem das Pendel frei steht, ist in der Lage, auf einer Raumachse sehr hohe Beschleunigungen zu erreichen und muss entsprechend schnell geregelt werden. Um den aktuellen Winkel des Pendels erkennen zu können, wurden auf dessen Oberseite und an zwei Fixpunkten in dessen Umfeld rote Markierungen angebracht. Die Auslenkung des Pendels wird von oben über eine Kamera erfasst und die Bilddaten über Gigabit-Ethernet an einen Embedded Controller übertragen, auf dem die Algorithmen zur Objektdetektion realisiert wurden. Der so berechnete Auslenkwinkel wird drahtlos an eine Regelungseinheit übertragen, welche durch Bewegungen des Linearantriebs das Pendel ausbalanciert (Abbildung 1). Für die Funkübertragung der Daten werden zwei GFDM-Sende- bzw. Empfangseinheiten genutzt. GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing) weist eine zu 5G ähnliche Wellenform auf.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Details in: N. Michailow et al., "Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks," in IEEE Transactions on Communications, vol. 62, no. 9, pp. 3045-3061, Sept. 2014, DOI: 10.1109/TCOMM.2014.2345566.

Die Signallaufzeit (Latenz) beeinflusst direkt die Reglerstabilität. Bei zu hoher Latenz wird der Regler instabil und das Pendel kann nicht mehr balanciert werden. Die Gesamtlatenz setzt sich aus verschiedenen Teilen zusammen: Das aufgenommene Bild muss in der Kamera digitalisiert, gepuffert und mittels Gigabit-Ethernet zum Embedded-Controller übertragen werden. Dort müssen die Datenpakete empfangen und die Objektdetektion ausgeführt werden. Deren Ergebnis sind die Koordinaten der drei markierten Punkte. Diese werden an die GFDM-Sendeeinheit weitergeleitet, die in einem programmierbaren Hardware-Baustein FPGA (Field Programmable Gate Array) der USRP (Universal Software Radio Peripherals) implementiert ist. Dann werden die Koordinaten per Funk zur zweiten USRP der Empfangseinheit übertragen. Die Daten werden dann drahtgebunden an den Motorcontroller weitergeleitet. Für das Balancieren des Pendels auf dem genutzten Antrieb ist eine Gesamtverzögerung von ca. 22 ms einzuhalten.

> RoMulus: RFID  
> Green-ISAS: Test  
> Green-ISAS: EH  
> StadtLärm  
> fast wireless  
> ADMONT  
> RoMulus: MEMS  
> Inhalt  
\* Förderung

## Echtzeit-Betriebssystem

Um die hohen Echtzeitanforderungen des Demonstrators zu gewährleisten, wurde auf dem Embedded Controller ein Linux-Echtzeitbetriebssystem implementiert. Hierdurch wird es möglich, die Ausführung des Kommunikationsstacks und die Zusammenarbeit der unterschiedlichen Komponenten in ein deterministisches Zeitverhalten einzuordnen. Darüber hinaus wurden erforderliche Zeitmessungen zur Charakterisierung und Optimierung durchgeführt und dabei auf die durch ein Echtzeitbetriebssystem typischerweise bereitgestellten Messmethodiken (z.B. Tracing) zurückgegriffen.

Mehr zu  
Kommunikationslösungen:  
[www.imms.de](http://www.imms.de)

## Objektdetektion

Um einen geeigneten **Algorithmus** zur Ermittlung der Pendelposition zu finden, hat das IMMS theoretisch und experimentell verschiedene Standardverfahren aus dem Bereich der Bildverarbeitung betrachtet und die folgenden drei Varianten ausgewählt:

1. **Merkmalsdetektoren** z.B. BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features), ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF), MSER (Maximally stable extremal regions): Aus einem Referenzbild extrahierte Merkmale werden vom Algorithmus im aktuellen Bild unabhängig von verschiedenen Koordinatentransformationen (Skalierung, Rotation, Verschiebung) wiedergefunden. Die Pendelposition ergibt sich aus der Transformation des ursprünglichen Merkmalsvektors gegenüber dem aktuellen Bild.

Jahresbericht

© IMMS 2018

2. **Hough-Circles:** Die Ränder von kreisförmigen Markierungen im Aufbau werden über eine Hough-Transformation ermittelt. Deren Position dient als Ausgangspunkt zur Bestimmung der Pendelauslenkung.
3. **Farbfilter:** Gleichfarbige Markierungen an verschiedenen Punkten des Aufbaus werden über eine entsprechende Filterung selektiert. Deren Position dient als Ausgangspunkt für das Bestimmen der Pendelauslenkung.

Mit verschiedenen Beispielen wurde die Laufzeit dieser Algorithmen empirisch ermittelt. Ausgehend von den Testergebnissen und aufgrund der einfachen Umsetzbarkeit wurde der Farbfilter-Algorithmus ausgewählt. Hier muss der Pendelaufbau lediglich an den für die Positions- und Winkelbestimmung relevanten Punkten mit farbig markiert werden.

> RoMulus:RFID  
 > Green-ISAS:Test  
 > Green-ISAS:EH  
 > StadtLärm  
 > fast wireless  
 > ADMONT  
 > RoMulus:MEMS  
 > Inhalt  
 \* Förderung

Für die **Kommunikation** mit der **Kamera** hat das IMMS auf die Bibliothek aus dem Aravis-Projekt<sup>2</sup> zurückgegriffen. Hierbei handelt es sich um ein FOSS-Projekt (Free and Open Source Software) zur generischen Anbindung von Industrie-Netzwerkcameras unterschiedlicher Hersteller. Die Konfiguration der Kamera und die Bilddatenübertragung wurden erfolgreich mit der Aravis-Bibliothek getestet.

Das IMMS erstellte eine **grafische Nutzoberfläche** für die Konfiguration der Objektdetektionsalgorithmen. Als Grundlage dafür wurde das Programm QArv<sup>3</sup> ausgewählt. Dieses bietet bereits mit der Aravis-Bibliothek Zugriff auf die für den Demonstrator eingesetzte Kamera sowie deren Parameter. Ebenso gibt es die Möglichkeit, einfache Filterfunktionen zu verwenden sowie Einzelbilder oder auch den Videodatenstrom der Kamera abzuspeichern.

Die **Positionsbestimmung** des Pendels hat das IMMS mit Funktionen der Bildverarbeitungsbibliothek OpenCV<sup>4</sup> als zuschaltbaren Filter für QArv realisiert. Die grundlegenden Schritte zur Bestimmung der Position von Farbmarkierungen des Pendels bilden hierbei:

1. Transformation des Bildes vom RGB- in den HSV-Farbraum,
2. Filterung des Bildinhaltes über jeweils einen Schwellwertfilter (min und max) anhand der Parameter Sättigung, Helligkeit und Farbwert,
3. Optionale Erode-Dilate-Erode-Transformation, um Störungen zu vermindern.

<sup>2</sup> <https://github.com/AravisProject/aravis>

<sup>3</sup> <http://www.ad-vega.si/en/software/qarv/>

<sup>4</sup> <https://opencv.org/>

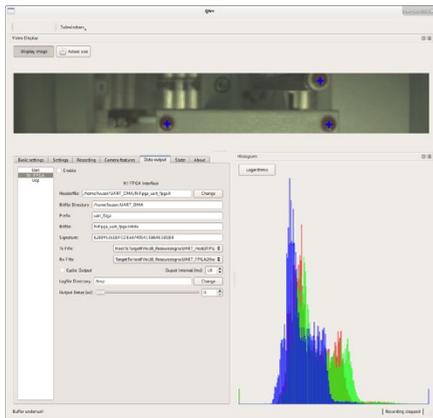


Abbildung 2: Hauptfenster von QArv mit den vom Filteralgorithmus detektierten Farbmarken. Screenshot: IMMS.

Die Parameter der einzelnen Verarbeitungsstufen können hierbei im Betrieb in der Oberfläche angepasst und abgespeichert werden, was ein einfaches Einrichten bei z.B. geänderten Lichtverhältnissen erlaubt. Zudem kann das Live-Bild von verschiedenen Zwischenstufen der Verarbeitung angezeigt werden. Damit kann die Wirkung einzelner Parameteränderungen besser beurteilt werden. Abbildung 2 zeigt das Hauptfenster von QArv mit den vom Filteralgorithmus detektierten Farbmarken.

- > RoMulus:RFID
- > Green-ISAS:Test
- > Green-ISAS:EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus:MEMS
- > Inhalt
- \* Förderung

## Systemsimulation und Reglerentwurf

Um verschiedene Parameter des mechanischen Aufbaus zu ermitteln und die grundsätzliche Realisierbarkeit für die Randbedingungen der Funk-Datenübertragung zu testen, wurde der Aufbau als klassisches Regler-Strecke-Modell am IMMS simuliert. Hierbei wurden die erlaubten und durch die Bildbearbeitungs- und Übertragungslatenzen bedingten Totzeiten sowie die benötigte und durch die erzielbare Framerate der verwendeten Kamera limitierte Taktrate für die Ermittlung der Istwerte ermittelt.

Durch den geringen Bewegungsbereich des Antriebs von 68mm konnte nur ein relativ kurzes Pendel von 90mm verwendet werden. Daraus resultiert eine hohe Pendeldynamik.

In einem ersten Schritt wurde der geometrische Abbildungsfehler infolge der Linsenkrümmung der Kamera korrigiert. Dazu wurde der Abbildungsfehler bestimmt und mittels eines Polynoms 3. Ordnung herausgerechnet. Über eine Korrekturrechnung kann der Winkel mit einer Auflösung von  $\approx 0,04^\circ$  und einer Genauigkeit von  $\pm 0,2^\circ$  berechnet werden.

Der **Regelalgorithmus** ist auf einem 32-Bit-Fixed-point-Mikrocontroller implementiert. Eine Herausforderung bestand darin, geeignete Reglerparameter zu bestimmen. Aufgrund der hohen Pendeldynamik und des kleinen Bewegungsbereichs muss die Steuerung auf Winkelauslenkungen des Pendels schnell reagieren. Die vergleichsweise niedrige Framerate der Kamera und damit Abtastrate der Winkelmessung von maximal 150 Hz sowie die Verzögerung von 20 ms plus Jitter begrenzen die Dyna-

*Mehr zu  
Steuerung und  
Regelung:  
[www.imms.de](http://www.imms.de)*



Abbildung 3:

Am IMMS realisierter Demonstratoraufbau für das inverse Pendel inkl. Gehäuse und Integration aller Steuerungskomponenten. Foto: IMMS.

Die vom Partner TU Dresden entwickelte GFDM-Implementierung arbeitet bei einer Bandbreite von 20 MHz und mit Paketlängen von lediglich 16  $\mu$ s und ist somit für eine niedriglatente Übertragung bestens geeignet.

Im Vergleich zur 4G-Wellenform CP-OFDM unterstützt GFDM kurze Symbole bei gleichzeitig stark verringerter Außerbandstrahlung. Der vergrößerte Design-Space erlaubt die Parametrisierung der Wellenform für verschiedenste Szenarien. Durch einfache Modulation und Demodulation werden Latenzen von unter 100  $\mu$ s pro Paket erreicht, wodurch die Stabilität des Pendels gewährleistet werden konnte. Die Implementierung des GFDM Physical Layers erfolgte auf dem SDR (Software-Defined-Radio)-System von National Instruments.

mik der Steuerung aber substantiell. Die üblichen Methoden für den Entwurf von robusten Steuerungen, wie z.B. Polplatzierung oder LQR-Ausführung, konnten unter diesen Voraussetzungen nicht eingesetzt werden. Daher wurde ein experimenteller Ansatz zur Bestimmung der erforderlichen Reglerparameter gewählt.

### Implementierung und Aufbau

Im nächsten Schritt wurde die Funkübertragung in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner TU Dresden implementiert und getestet. Um die nötige Ende-zu-Ende Latenz im System zu erreichen, muss auch die verwendete Funkschnittstelle eine möglichst geringe Latenz aufweisen. Hierfür muss sowohl die verwendete Rahmenstruktur kurze Paketlängen unterstützen, als auch die Modulation und Demodulation mit möglichst geringer Verzögerung arbeiten.

Für den Demonstratoraufbau, vgl. Abbildung 3, wurde ein Gehäuse entworfen und gefertigt. Zur besseren Ausleuchtung wurde eine LED-Beleuchtung integriert, eine Abdeckhaube aus Plexiglas gefertigt und alle Steuerungskomponenten integriert.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- \* Förderung

## Zusammenfassung und Ausblick

Der entstandene Demonstrator veranschaulicht die Machbarkeit einer drahtlosen, hochzuverlässigen und latenzarmen Kommunikation für Anwendungen im geschlossenen Regelkreis – in diesem Fall ein inverses Pendel, das durch einen Linearantrieb, Objekterkennung und geeignete Regelalgorithmen stabilisiert wird.

Der Mobilfunkstandard 5G gilt als wichtiger Faktor, um die smarte Fabrik entscheidend voranzubringen. Das IMMS hat mit dem Projekt wichtige Kenntnisse im Bereich der Steuerung und Regelung von Maschinen und Anlagen über niedriglatente drahtlose Verbindungen erarbeitet und kann diese nun sowohl für KMU in industrielle Anwendungen bringen als auch in neue Anwendungsbereiche, wie z.B. in die Landwirtschaft, übertragen.

*Mehr zu  
fast wireless:  
[www.imms.de](http://www.imms.de)*

**Kontakt:** Dipl.-Ing. Sebastian Uziel, [sebastian.uziel@imms.de](mailto:sebastian.uziel@imms.de)

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



*fast wireless* wurde als Teil des Cluster-Projekts *fast* im Rahmen der Fördermaßnahme „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 03ZZ0505J gefördert.

*fast-wireless-  
Publikationen:  
[www.imms.de](http://www.imms.de)*