

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer IPA

Vorhabenbezeichnung: Mensch-Maschine-Schnittstelle basierend auf Quantensensoren (QHMI)

Förderkennzeichen: **03ZU1110DA**

Leonardo Gizzi, PhD

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung

Noblestraße 12, 70569

Stuttgart

leonardo.gizzi@ipa.fraunhofer.de

25.05.2025

Teil I: Kurzbericht

Ursprüngliche Aufgabenstellung

Das Projekt Quantum Human-Machine Interface (QHMI) hatte das Ziel, die Machbarkeit von quantenbasierten Mensch-Maschine-Schnittstellen (HMIs) zu bewerten. Traditionelle HMIs basieren überwiegend auf elektrischen Potenzialen, die von erregbaren Zellen im zentralen Nervensystem (z. B. Muskeln oder Gehirn) erzeugt werden. Diese konventionellen Methoden sind jedoch durch die spezifischen Einschränkungen der galvanischen Leitung begrenzt. Insbesondere weisen die elektrischen Potenziale aufgrund der Störungen, die durch Binde- und Fettgewebe sowie die Haut verursacht werden, eine relativ niedrige räumliche und zeitliche Auflösung auf.

Im Gegensatz dazu sind magnetische Felder weitgehend unempfindlich gegenüber nicht-elektromagnetisch aktiven Materialien, was theoretisch eine präzisere Extraktion von Informationen ermöglicht. Diese Eigenschaft impliziert, dass die von Neuronen erzeugten Signale, obwohl sie abgeschwächt sind, unverzerrt bleiben, wenn sie die Sensoren erreichen. Darüber hinaus ist die Amplitude dieser neuronalen Signale im Vergleich zum Hintergrundmagnetfeld, das von der Erde und alltäglichen elektrischen Geräten erzeugt wird, um mehrere Größenordnungen geringer.

Trotz der Vorteile der magnetischen Sensorik zeigt die aktuelle Landschaft, dass nur eine begrenzte Anzahl von quantenbasierten Magnetfeldern in der Lage ist, die geringen Felder zu detektieren, die durch neuronale Aktivität erzeugt werden. Diese Sensoren erfordern typischerweise eine robuste elektromagnetische Abschirmung gegen Hintergrundgeräusche und benötigen oft extreme Temperaturbedingungen für eine optimale Leistung. Beispielsweise arbeiten supraleitende Quanteninterferenzeinrichtungen (SQUIDs) bei kryogenen Temperaturen von etwa -268 °C , während optisch gepumpte Magnetometer (OPMs) bei erhöhten Temperaturen von etwa 150 °C funktionieren. Solche strengen Anforderungen machen diese Technologien für reale Anwendungen in HMIs unpraktisch.

Ein vielversprechender Fortschritt hat sich in Form von Sensoren auf Basis von Stickstoffvacanzen (NV) in dotierten Diamanten ergeben. Diese neuartigen Sensoren bieten das Potenzial, die Einschränkungen ihrer Vorgänger zu überwinden, indem sie genaue Messungen bei Raumtemperatur und ohne die Notwendigkeit umfangreicher Abschirmung ermöglichen.

Das QHMI-Konsortium hat sich aktiv an der gleichzeitigen Entwicklung dieser fortschrittlichen Sensoren und der Implementierung quantenbasierter HMIs beteiligt und nutzt dabei die derzeit verfügbaren Technologien. Innerhalb dieses kollaborativen Ökosystems hat das Fraunhofer IPA eine zentrale Rolle als Projektkoordinator gespielt. Eines seiner Hauptziele war es, die Machbarkeit der Steuerung von Handprothesen durch die Nutzung von Quantensensoren zu demonstrieren und damit den Weg für innovative Anwendungen im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion zu ebnet.

Ablauf des Vorhabens

Das Projekt musste zwei entscheidende Aspekte adressieren: die Entwicklung von Hochsensitivitäts- und Hochdynamikbereichsensoren sowie den praktischen Nachweis, dass magnetische Felder (statt elektrischer Potenziale) zur Steuerung biomechatronischer Geräte verwendet werden können. Das Fraunhofer IPA konzentrierte sich auf Letzteres und nutzte dabei kommerziell verfügbare optisch gepumpte Magnetometer (OPM) und kompensierte deren intrinsische Einschränkungen im Dynamikbereich.

In den ersten zwei Jahren des Projekts wurden vorläufige Tests durchgeführt, um geeignete neuromagnetisch aktive Bereiche zu identifizieren, die funktional Handbewegungen beschreiben könnten, um geeignete Schnittstellen zu erstellen und ein Benchmark-System zu entwickeln, um magnetische und elektrische Sensoren im Kontext von HMIs zu vergleichen. Das letzte Jahr war der Entwicklung einer Verarbeitungs-Pipeline gewidmet, die die Steuerung eines kommerziellen Prothesengeräts mit Quantensensoren ermöglichen sollte.

Wesentliche Ergebnisse

Fraunhofer IPA hat erfolgreich zum ersten Mal die Machbarkeit demonstriert, ein kommerzielles Handprothesengerät mithilfe von handelsüblichen OPM-Sensoren in einer minimal abgeschirmten Umgebung zu steuern. Dies stellt den Grundstein für zukünftige NV-basierte Anwendungen dar.

Das IPA-Team begann mit der Optimierung der mechanischen Unterstützung und Platzierung der Quantensensoren, verglich gründlich deren Leistung mit der von modernen elektromyografischen Sensoren und bestimmte die am wenigsten tragfähige Konfiguration, die die Steuerung von mindestens einem Freiheitsgrad ermöglichte. Anschließend entwickelten sie eine Schnittstelle, die in der Lage ist, die Ergebnisse der Klassifikation der Muskelaktivität in Online-Aktionsbefehle für das Prothesengerät zu übersetzen. Diese Schnittstelle dient als kritische Verbindung zwischen den erfassten neuronalen Signalen und den mechanischen Bewegungen der Prothese, wodurch eine nahtlose Interaktion und Kontrolle ermöglicht wird.

Mit dem aktuellen Setup erreichte das Team eine Klassifikationsgenauigkeit von 93.75% bei einer durchschnittlichen Latenz von $678 \pm 280ms$ über drei Probanden. Diese Leistung ist bemerkenswert, wenn man bedenkt, dass eine Latenz von 300 ms allgemein als untere Grenze für die Benutzerfreundlichkeit von Oberarmprothesen im Alltag angesehen wird, wie in der Forschung von Roche et al. (2014) hervorgehoben. Die bemerkenswerten Ergebnisse wurden mit einem einfachen Klassifikator der linearen Diskriminanzanalyse erzielt, wobei das Modell nur minimal trainiert wurde. Darüber hinaus wurden die Sensoren etwa 1 bis 1,5 cm von der Haut der Probanden entfernt positioniert, und das Setup umfasste bewegliche Abschirmungen zur Minderung von externem Rauschen.

Dieser Erfolg wurde durch die Zusammenarbeit sowohl interner Partner, wie Ottobock und dem Institut für Institut für Signalverarbeitung und Systemtheorie (ISS) an der Universität Stuttgart, als auch externer Partner von der Universität Tübingen ermöglicht. Diese Arbeit ebnet nicht nur den Weg für fortschrittlichere Prothesentechnologien, sondern eröffnet auch neue Möglichkeiten zur Verbesserung der Lebensqualität von Personen, die auf Prothesengeräte angewiesen sind.