

Research note

Wearable Human Movement Instrumentation System

M.I. Mokhlespour Esfahani^{1*}, O. Zobeiri¹, A. Akbari¹, B. Moshiri², M. Parnianpour³

¹ M.Sc., Laboratory of Wearable Technologies and Neuromusculoskeletal Research, School of Mechanical Eng., Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

² Professor, Industrial Automation & Intelligent Information Processing Lab, School of Elec. & Comp. Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, moshiri@ut.ac.ir

³ Adjunct Professor, Laboratory of Wearable Technology and Neuromusculoskeletal Research, School of Mechanical Eng., Sharif University of Technology, Tehran, Iran, parnianpour@sharif.edu

Abstract

Wearable measuring system has major effects on biomechanics of human movements especially in daily activities in order to monitor and analyze the human movements to achieve the most important kinematics parameters. In the recent decade, inertial sensors were utilized by researchers in order to develop a wearable system for instrumentation of human movements. In this study, Sharif-Human Movement Instrumentation System (SHARIF-HMIS) was designed and manufactured. The system consists of inertial measurement units (IMUs), stretchable clothing and data logger. The IMU sensors are installed on the human body. The system can be used at home and also industrial environments. The main features of this system are: low cost, low weight, saving data for ten hours and being wearable. Furthermore, the software was designed for data acquisition of the IMUs.

Key words: Wearable system, measurement system, data fusion, inertial sensor, human movement.

* Corresponding author

Address: Laboratory of Wearable Technologies and Neuromusculoskeletal Research, School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Azadi Ave., Tehran, Iran, Postal Code: 9567-11155.

Tel: +98 21 66165690

Fax: +98 21 66000021

E-mail: mokhlespour@alum.sharif.edu

یادداشت پژوهشی

سامانه پوشیدنی اندازه‌گیری حرکت انسان

محمدایمان مخلص‌پور اصفهانی^{۱*}، امید زبیری^۱، علی اکبری^۱، بهزاد مشیری^۲، محمد پرنیان‌پور^۳

^۱ کارشناسی ارشد، آزمایشگاه پژوهشی عصبی اسکلت عضلانی و تکنولوژی پوشیدنی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

^۲ استاد، آزمایشگاه اتوماسیون صنعتی و ابزار دقیق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
moshiri@ut.ac.ir

^۳ استاد معین، آزمایشگاه پژوهشی عصبی اسکلت عضلانی و تکنولوژی پوشیدنی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
parnianpour@sharif.edu

چکیده

سیستم‌های اندازه‌گیری پوشیدنی تأثیر بسزایی بر بیومکانیک حرکت انسان دارند. این سیستم‌ها قادرند بر حرکات انسان در هنگام فعالیت‌های روزانه نظارت کرده؛ برای بدست آوردن پارامترهای مهم سینماتیک این حرکات را تحلیل کنند. در دهه اخیر محققان برای ساخت سیستم‌های پوشیدنی اندازه‌گیری حرکت انسان از حسگرهای اینرسی کمک گرفته‌اند. در این مقاله سیستم اندازه‌گیری حرکت انسان (SHARIF-HMIS) طراحی و ساخته شده است. این سیستم شامل حسگرهای اینرسی، لباس قابل کشش و واحد ذخیره اطلاعات است. در این سیستم حسگرها و واحد ذخیره اطلاعات بر بدن نصب شده؛ قادر خواهد بود اطلاعات حرکتی انسان را در محیط‌های خانگی و یا صنعتی ذخیره و تحلیل کند. از مهمترین ویژگی‌های این سیستم، قیمت ارزان، وزن کم آن، قابل پوشیدن بودن و زمان طولانی ذخیره اطلاعات (حدود ۸ ساعت) هستند. همچنین نرم‌افزاری مخصوص این سیستم طراحی شده است تا از طریق آن اطلاعات حسگرها در رایانه دریافت، ذخیره و تحلیل شود.

کلیدواژگان: سیستم پوشیدنی، سامانه اندازه‌گیری، ترکیب داده، حسگر اینرسی، حرکت انسان.

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، آزمایشگاه عصبی اسکلت عضلانی و تکنولوژی پوشیدنی کدپستی: ۹۵۶۷-۱۱۱۵۵

تلفن: ۰۲۱-۶۶۱۶۵۵۲۵، دورنگار: ۰۲۱-۶۶۰۰۰۲۱، پیام نگار: mokhlespour@alum.sharif.edu

۱- مقدمه

سیستم‌های قابل حمل برای ثبت و اخذ داده‌های سینماتیک طراحی شوند.

چنین سیستمی علاوه بر دقت زیاد، باید دارای وزن کم، قابلیت نصب به بدن فرد و قابل حمل توسط فرد مورد نظر باشد تا به راحتی بتوان از آن در محیط‌های مختلف استفاده کرد. تاکنون سیستم‌های زیادی بدین منظور ارائه شده‌اند؛ اما عموماً بدلیل نداشتن دقت و همچنین قابل حمل نبودن، برای هر محیطی استفاده نمی‌شوند [۴-۷].

هدف اصلی این پژوهش طراحی و ساخت سیستمی است که بتواند جایگزین سیستم‌های غیر قابل حمل رایج در دنیا برای تشخیص حرکت اندام انسان شود و مشکلات سیستم‌های قبلی را (از قبیل قیمت زیاد و غیرقابل حمل بودن) نداشته باشد.

۲- اجزای تشکیل دهنده سامانه اندازه‌گیری

۲-۱- حسگر اینرسی

دست‌یابی به سیستم ابزار دقیق از مهم‌ترین مباحث مطرح در هر صنعتی است. از مهم‌ترین ملزومات هر سیستم اندازه‌گیری به کار رفته در بخش ابزار دقیق صنایع، حسگرهایی است که بتواند مشخصه‌های مورد نظر را ثبت و اخذ کند.

حسگر اینرسی^۱، از جمله حسگرهایی که در صنایع هوافضا، رباتیک و ناوبری، مهندسی پزشکی، خودرو و صنایع دریایی از آن استفاده می‌شود. حسگرهای اینرسی شامل شتاب‌سنج وژیروسکوپ هستند. با ترکیب اطلاعات^۲ این دو حسگر و نیز با کمک گرفتن از حسگر مغناطیسی به منظور تصحیح خطاهای اندازه‌گیری، می‌توان موقعیت، سرعت و شتاب اشیا را بدست آورد [شکل (۲)].

یکی از روش‌های ساخت حسگر اینرسی، روش میکروماشین است. این روش دارای مزیت‌هایی در مقایسه با روش‌های دیگر است؛ از قبیل:

- اندازه کوچک؛
- سبک بودن؛
- ارزان بودن.

درد مفاصل از شایع‌ترین بیماری‌هایی است که اغلب افراد از آن شکایت می‌کنند و کمتر کسی است که این نوع درد را در زندگی خود تجربه نکرده باشد. دواتچی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ به بررسی دردهای ماهیچه‌ای- اسکلتی در مناطق روستایی و شهری در ایران و کشورهای دیگر پرداخته‌اند [۲، ۱]. درد ناحیه کمری در ایران با ۴۱/۹٪ در اولین رتبه قرار دارد. همچنین این مسأله از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۶، ۲۳/۷٪ رشد داشته است.

هزینه‌های مستقیم و غیر مستقیم ناشی از درد در نواحی مفاصل به ویژه کمر، در کشورهایی همچون هلند، در سال ۲۰۰۲ حدود ۶/۵ میلیارد یورو و در آمریکا، حدود ۲۰ میلیارد دلار در سال ذکر شده است [۳]. در ارتباط با هزینه‌های مستقیم و غیر مستقیم تحمیل شده بر جامعه ایران در اثر درد در مفاصل مختلف افراد، گزارشی ارائه نشده است؛ اما با توجه به مقایسه انجام شده بین شیوع این بیماری در بین ایرانیان و مردم کشورهای دیگر می‌توان پیش‌بینی کرد که هزینه‌های هنگفتی سالانه به دولت تحمیل می‌شود.

به منظور شناخت صحیح مؤلفه‌های فیزیکی حرکت، می‌بایست با مفاهیم کینزولوژی^۱ و بیومکانیک^۲ آشنا بود [شکل (۱)]. این دو گروه نیز خود به چند زیر گروه تقسیم می‌شوند. این تقسیم‌بندی در شکل (۱) نشان داده شده است.

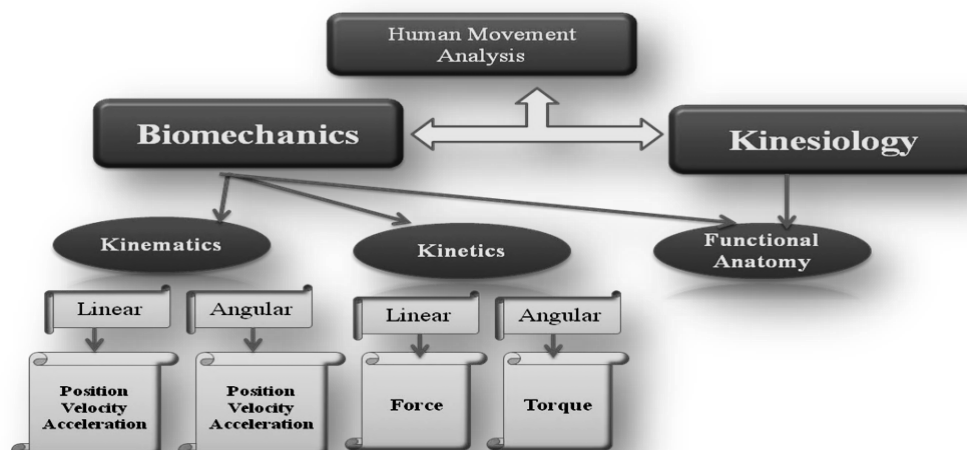
همان‌طور که در شکل (۱) مشهود است، برای تحلیل بیومکانیک حرکت در فعالیت‌های روزانه به منظور جلوگیری از آسیب در نواحی مختلف بدن انسان به ویژه مفاصل، نیاز است نیروها و گشتاورهای اعمالی به اندام‌های بدن انسان تعیین شوند. از آنجایی که توانایی اندازه‌گیری تمام نیروها و گشتاورهای اعمالی به بدن انسان به خصوص نیروها و گشتاورهای داخلی، وجود ندارد؛ لازم است از طریق دینامیک معکوس مسأله را ارزیابی کرد. بدین منظور باید پارامترهای سینماتیک^۳ حرکت انسان در فعالیت‌های روزانه تعیین شوند و سپس با دینامیک معکوس پارامترهای سینتیک^۴ (نیرو و گشتاور در مفاصل) متناظر با آن بدست آیند. لذا نیاز است که

¹Kinesiology
⁵ Inertial Sensor

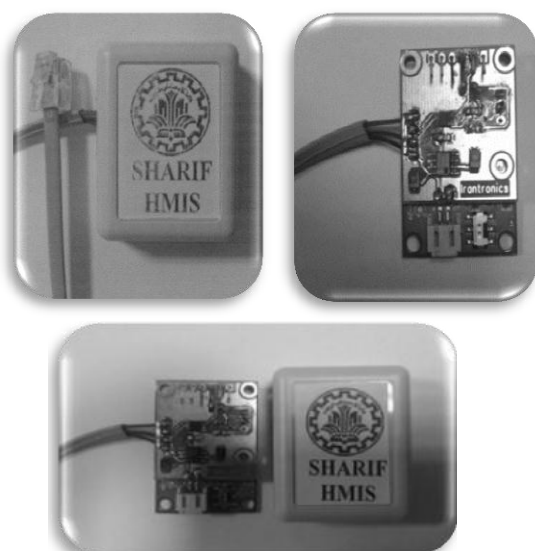
²Biomechanics
⁶ Data Fusion

³Kinematics

⁴Kinetics

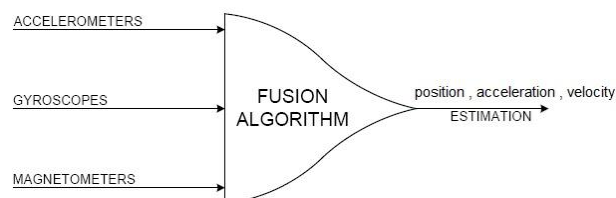


شکل (۱) - تحلیل بیومکانیک حرکت



شکل (۳) - حسگر اینرسی

در سال‌های اخیر برای دستیابی به دقت‌های بیش از ۵ درجه در موقعیت‌یابی، حسگر دیگری نیز به این حسگرها اضافه شده است. این حسگر، حسگر مغناطیسی که در واقع همچون قطب‌نما عمل می‌کند. بنابراین حسگری که تلفیقی از شتاب‌سنج، ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنج است، می‌تواند در صنایعی که به اندازه‌گیری‌های حرکتی نیاز دارند؛ کاربرد وسیعی داشته باشد.

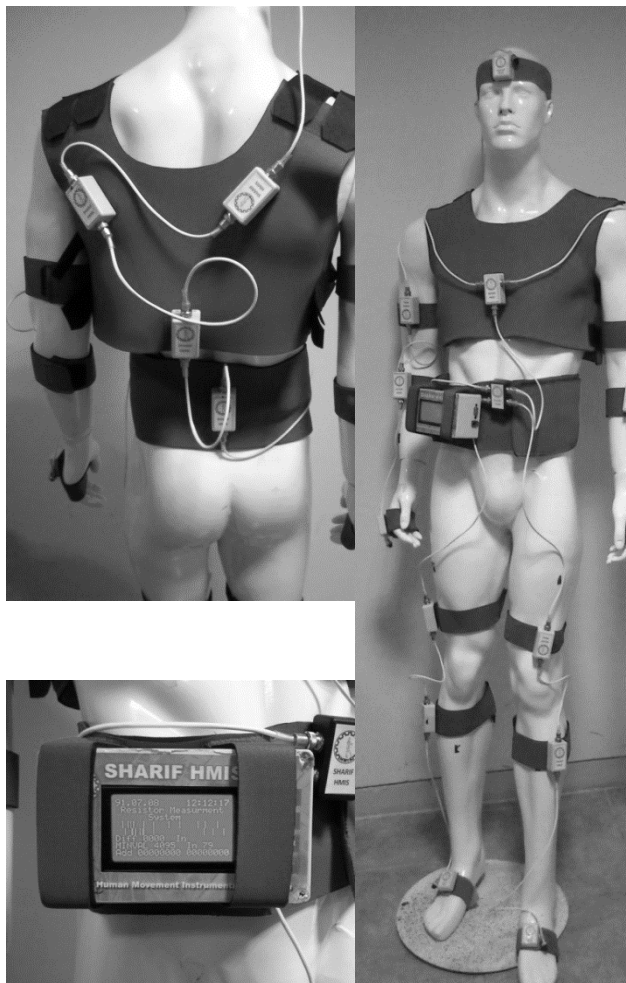


شکل (۲) - نحوه بدست آوردن موقعیت زاویه

۲-۲- کالیبراسیون

فرایند کالیبراسیون برای استخراج پارامترهای مورد نیاز، با کمک میزی دوار واقع در آزمایشگاه ناوبری در دانشکده هوافضای دانشگاه صنعتی شریف، انجام شد. مشخصات کالیبراسیون در جدول (۱) خلاصه شده است.

در این پژوهش یک حسگر اینرسی شامل اجزای شتاب‌سنج (ADXL345)، ژيروسکوپ (ITG-3200) و مغناطیس‌سنج (HMC5883L) سه‌بعدی ساخته شد. داده‌های شتاب‌سنج، ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنج با میکروکنترلر ثبت و اخذ شد. نمایی از این حسگر همراه بسته‌بندی آن در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۴) - نمایی از موقعیت حسگرهای اینرسی بر روی بدن به همراه محل نصب Data Logger بر روی کمر

در سامانه طراحی شده، سیستم جمع‌آوری داده‌ای در نظر گرفته شده است تا بتوان اطلاعات تمام حسگرها را بر طبق فرایند RS485 جمع‌آوری کند. در این فرایند، سیستم جمع‌آوری هر یک از حسگرها را با شماره مشخصه ثبت شده برای هر یک صدا زده؛ در پاسخ اطلاعات مربوط به آن حسگر را گرفته؛ در حافظه یک گیگابایتی خود ذخیره می‌کند. این حافظه اجازه می‌دهد تا اطلاعات حسگرها برای مدت ۸ ساعت قابل ذخیره‌سازی باشند. این داده‌ها را می‌توان از طریق رابط سریال به رایانه انتقال داد. تغذیه سیستم جمع‌آوری داده با یک عدد باتری لیتیومی قابل شارژ تأمین می‌شود که توان حسگرها را نیز فراهم می‌کند. این باتری سیستم را قادر می‌سازد به مدت بیست و چهار ساعت بطور پیوسته اطلاعات حسگرها جمع‌آوری کند. روندنمای مربوط به سیستم

جدول (۱) - مشخصات کالیبراسیون

Roll/Pitch Static accuracy	<0.5 deg
Yaw Static accuracy	<1 deg
Dynamic accuracy (roll, pitch and Yaw)	3 deg RMS
Dynamic range	Pitch ± 90 deg Roll/Yaw ± 180 deg
Acceleration	3 axes
	Range : $\pm 50 \text{ m/s}^2$
Rate of turn	3 axes
	Range : $\pm 2000 \text{ deg/s}$
Magnetic field	3 axes
	Range : $\pm 8 \text{ Gauss}$

۳-۲- ترکیب‌بندی سامانه اندازه‌گیری

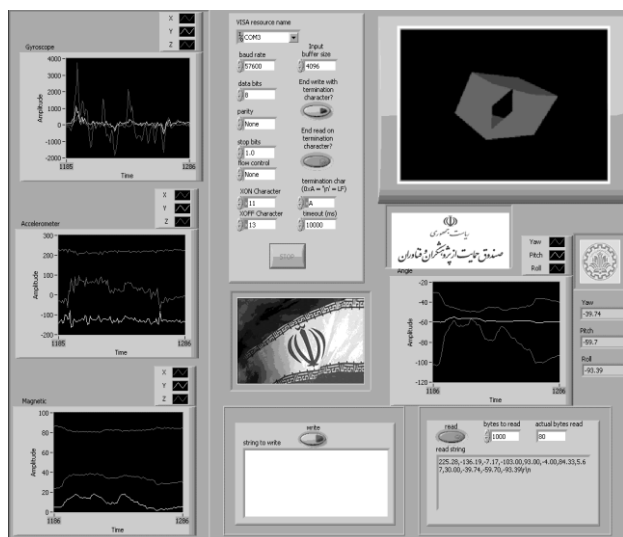
در طراحی ترکیب‌بندی سامانه، مکان قرارگیری حسگرها به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده تا تمام حرکات مهم بدن قابل اندازه‌گیری باشد. این طراحی شامل پنج شاخه از حسگرها است که چهار شاخه از آنها - که شامل ۱۲ عدد حسگر می‌شوند - بر روی دو دست و دو پا قرار گرفته و شاخه پنجم شامل حسگرهایی است که بر روی سر، شانه‌ها و پشت قرار می‌گیرند. دو شاخه‌ای که حسگرهای روی دو دست را تشکیل می‌دهند از طریق حسگر روی سینه به یکدیگر متصل شده و سپس با جعبه رابطی که در قسمت جلوی بدن قرار دارد به دیگر شاخه‌ها متصل می‌شوند. این جعبه رابط ارتباط بین حسگرها و سیستم جمع‌آوری داده را برقرار می‌سازد. این ترکیب‌بندی در شکل (۴) قابل مشاهده است.

۴-۲- سیستم جمع‌آوری داده

با توجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش ارائه سیستمی قابل حمل است که قابلیت ثبت داده‌ها در فعالیت روزانه را دارا باشد؛ لذا به Data Logger برای ثبت و ذخیره داده‌ها نیاز است.

۲-۵- نرم افزار داده برداری بی درنگ

بمنظور داده برداری و نمایش گراف ها برای سیگنال های خروجی حسگرها و همچنین زاویای حاصل از ترکیب داده این سه حسگر، به یک نرم افزار نیاز است. این نرم افزار در محیط Lab View طراحی شد و نمای ظاهری آن در شکل (۷) نمایان است.



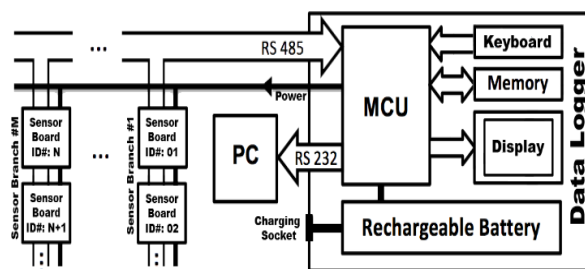
شکل (۷) - نرم افزار داده برداری

۳- ترکیب داده های شتاب سنج، ژيروسکوپ و

مغناطیس سنج برای استخراج زوایای حرکتی

از آنجایی که برای تحلیل حرکت انسان نیازمند پارامترهای سینماتیک هستیم، لازم است با ترکیب کردن خروجی شتاب سنج، ژيروسکوپ و مغناطیس سنج زوایای حرکتی (رول، پیچ و یاو) استخراج شوند. بدین منظور از روش ماتریس کسینوسی جهت^۷ استفاده شده است. شایان ذکر است، روش ایده آل برای ترکیب اطلاعات حسگرهای اینرسی، کالمن فیلتر^۸ است؛ اما محاسبات این روش نیازمند ظرفیتی بسیار زیاده تر از ظرفیت میکروکنترلر AVR است [۸-۱۰]. بنابراین برای اعمال روش ترکیب اطلاعات و استفاده از آن در میکروکنترلر نیاز است که ظرفیت میکروکنترلر در نظر گرفته شود؛ لذا روش کالمن فیلترینگ قابل استفاده برای این نوع از میکروکنترلرها نیست و باید روشی دیگر انتخاب شود. در ادامه به توصیف روشی مناسب می پردازیم.

جمع آوری و همچنین اجزای آن در شکل (۵) قابل مشاهده است. حالت عملکرد دستگاه طوری در نظر گرفته شده است تا تنها اطلاعات مربوط به یکی از حسگرها، اطلاعات زاویه و یا تمامی اطلاعات ممکن ذخیره شود. این حالت با کلیدهای طراحی شده بر روی سیستم قابل انتخاب است. نظارت بر عملکرد سیستم نیز با صفحه نمایشی که بر روی آن قرار دارد انجام می شود.



شکل (۵) - نمایش نمادین Data Logger

مشخصه های فیزیکی عبارتند از:

- مدت زمان داده برداری و ثبت آن حداقل ۸ ساعت
- ابعاد: ۴×۷×۱۴ سانتی متر
- وزن ۴۵۰ گرم

نمایی از این Data Logger در شکل (۶) قابل مشاهده است.



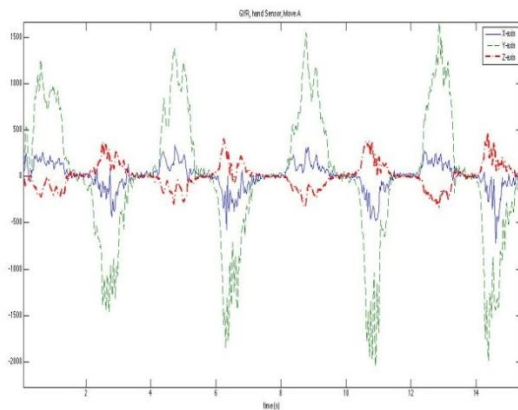
شکل (۶) - نمایی از Data Logger

⁷Direction Cosine Matrix

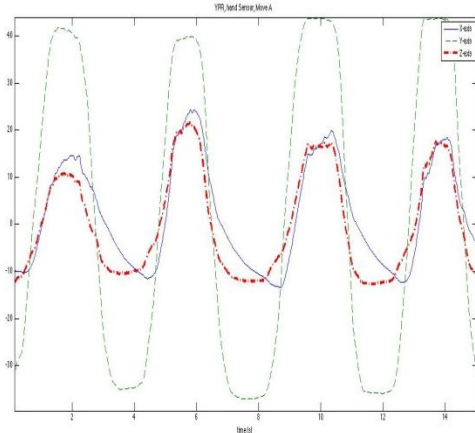
⁸Kalman Filter

۵- نتایج و بحث

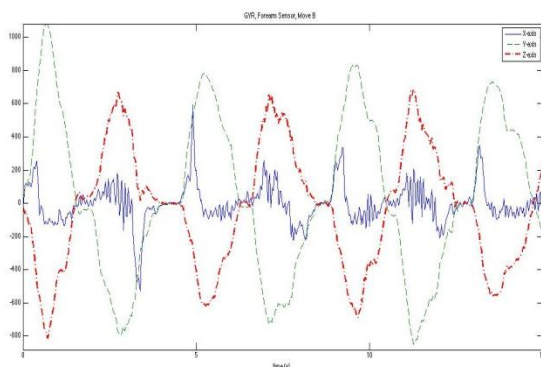
نتایج حاصل از آزمون‌ها در شکل‌های (۱۰) تا (۱۵) ارائه شده است. ابتدا نمودار خروجی ژيروسکوپ و سپس نمودار زاویه‌ای آورده شده است. لازم است ذکر شود که خروجی ژيروسکوپ بر ۰/۰۰۶ تقسیم شده است تا واحد آن به رادیان بر ثانیه تبدیل شود. نتایج اندازه‌گیری حرکت زاویه‌ای مچ دست در اشکال (۱۰) و (۱۱) قابل مشاهده است.



شکل (۱۰)- داده‌های ژيروسکوپ برای آزمون A

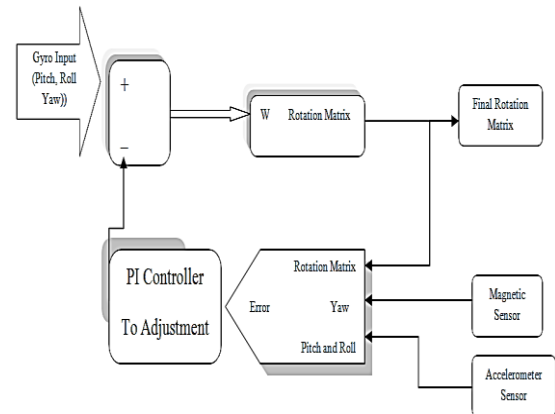


شکل (۱۱)- داده‌های زاویه‌ای برای آزمون A



شکل (۱۲)- داده‌های ژيروسکوپ برای آزمون B

روش ماتریس کسینوسی جهت‌ی را ماهونی^۹ و همکارانش برای تعیین موقعیت هواپیمایی بدون سرنشین^{۱۰} به کار بردند [۱۱]. روندنمای اجرای این روش در شکل (۸) ارائه شده است.

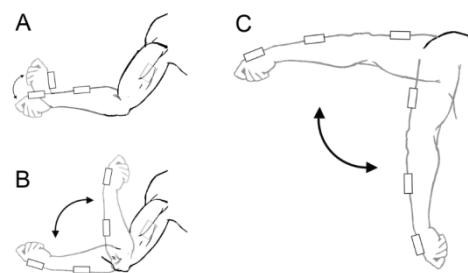


شکل (۸)- روندنمای روش ماتریس کسینوس جهت‌ی

همان طور که در روندنمای فوق دیده می‌شود، ابتدا داده‌های ژيروسکوپ به عنوان مرجع در نظر گرفته شده؛ با انتگرال‌گیری از آنها مؤلفه‌های ماتریس دوران تعیین می‌شوند و سپس با استفاده از داده‌های حسگرهای مغناطیس‌سنج و شتاب‌سنج خطای این ماتریس مشخص شده؛ در نهایت ماتریس دوران به‌روز می‌شود و بر اساس آن زوایای حرکتی (پیچ، رول و یاو) تعیین می‌شوند.

۴- روش ارزیابی سیستم

برای آزمودن کل سیستم و مشاهده عملکرد آن، مجموعه‌ای آزمون انجام شد. مطابق با شکل (۹)، سه حسگر، بر روی مچ، ساعد و بازو قرار گرفتند. این حرکات شامل فلکشن-اکستنشن^{۱۱} مچ و آرنج و همچنین ابداکشن-ادداکشن^{۱۲} شانه هستند.



شکل (۹)- نمایی از محل قرارگیری حسگرها (الف) آزمون مچ

دست، ب) آزمون آرنج، پ) آزمون شانه

^۹Mahony

^{۱۰}Automated Unmanned Vehicle

^{۱۱}Flexion / Extension

^{۱۲} Abduction /Adduction

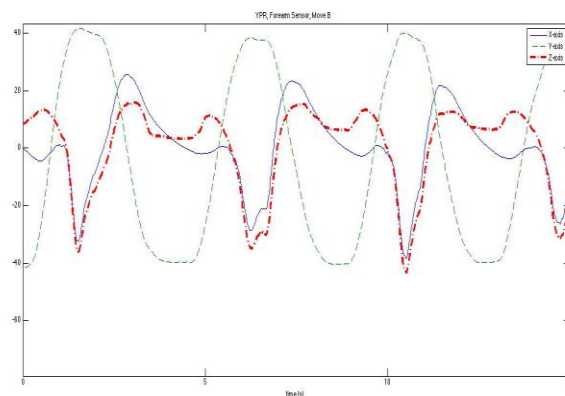
همان طور که در شکل‌های (۱۰) تا (۱۵) دیده می‌شود، با ترکیب اطلاعات، داده‌های ژيروسکوپ اصلاح شده؛ زوایای حرکتی بدست آمدند. همچنین داده‌ها نشان می‌دهند که حرکت‌های انجام شده صرفاً دو بعدی نبوده است و این مسأله در ارتباط با شکل (۱۵) برای شانه به وضوح دیده می‌شود. حرکت فلکشن- اکستنشن مفصل شانه دارای حرکات سه بعدی است که این مسأله در مرجع [۶] بررسی شده است. چنین مسأله‌ای برای بقیه مفاصل نیز می‌تواند صادق باشد.

۶- نتیجه گیری

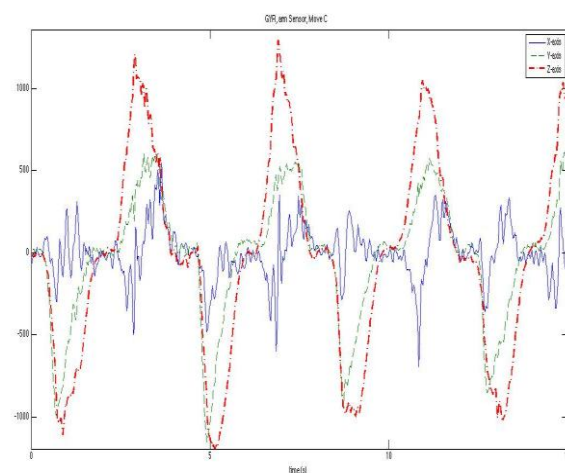
در این مقاله، یک سیستم اندازه‌گیری برای ثبت حرکات انسان به صورت قابل حمل ارائه شد. این سیستم دارای ویژگی‌هایی از قبیل: سبک بودن، قابل حمل بودن، ارزان بودن است. این سیستم شامل حسگرهای اینرسی همراه لباس مخصوص- که کاملاً چسبان است- و همچنین Data Logger است. ترکیب بندی سیستم به گونه‌ای است که حسگرها در کل بدن انسان فقط با یک رشته سیم، داده‌ها را به Data Logger منتقل می‌کنند. فرایند کالیبراسیون برای سیستم انجام شد و خطای این سیستم برای اندازه‌گیری زاویه، برای حرکات دینامیکی حدود ۳ درجه است.

چنین سیستمی می‌تواند جایگزین لباس‌های حساس به تغییر شکل و سیستم‌های مجهز به دوربین‌های گران‌قیمت تحلیل حرکت شود. از این سیستم می‌توان در توان بخشی، تعیین فعالیت‌های خطرناک، تعیین الگوی درمانی برای بیماران، تمایز فرد سالم از ناسالم در مراکز قضایی استفاده کرد.

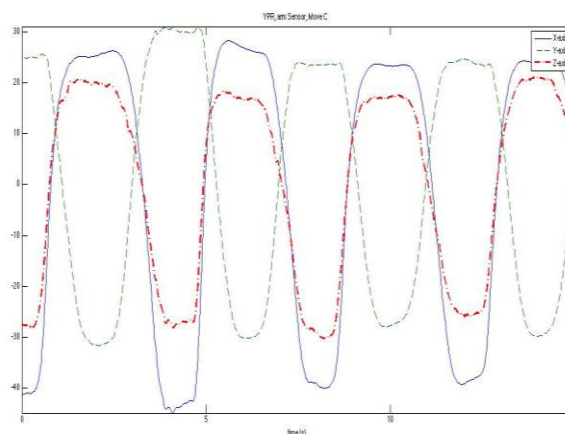
در آینده برای ارتقای سیستم، نیاز است پژوهش‌هایی کاربردی در کلینیک و شرایط محیطی مختلف به کار گرفته شود تا قابلیت اطمینان به کارگیری این سیستم در کلیه شرایط ارزیابی شود. همچنین برای افزایش دقت اندازه‌گیری زاویه تا ۱ درجه باید از روش‌های دیگر ترکیب داده همچون فیلتر کالمن استفاده کرد.



شکل (۱۳)- داده‌های زاویه‌ای برای آزمون B



شکل (۱۴)- داده‌های ژيروسکوپ برای آزمون C



شکل (۱۵)- داده‌های زاویه‌ای برای آزمون C

نتایج اندازه‌گیری حرکت زاویه‌ای آرنج در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) و نتایج اندازه‌گیری حرکت زاویه‌ای شانه در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) آورده شده است.

۷- مراجع

- and movement analysis: A review; Prosthetics and Orthotics International, 2007; 31(1): 62 – 75.
- [6] Mokhlespour M.I., et al., Development of a measuring system for shoulder abduction and adduction; IEEE, ICBME, Isfahan, Iran, 2010
- [7] Patel S., et al., A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation; Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2012; 9:21.
- [8] Roetenberg D., Luinge H.J., Baten C.T.M., Veltink P.H., Compensation of Magnetic disturbance improves inertial and magnetic sensing of human body segment orientation; IEEE Transaction on Neural systems and Rehabilitation Engineering, 2005; 13(3): 395-405.
- [9] Xsense Company, www.xsense.com
- [10] Biosyn System Company, www.biosynsystems.net
- [11] Mahony R., et al., Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group; IEEE transaction on automatic control, 2008; 53(5): 1203-1218.
- [1] Davatchi F., et al., The Prevalence of musculoskeletal complaints in a rural area in Iran: a Who-ILAR COPCORD study (stage 1, rural study) in Iran; Clin Rheumatol, 2009; 28: 1267–1274, DOI 10.1007/s10067-009-1234-8.
- [2] Davatchi F., et al., Who-ILAR COPCORD Study (stage 1, Urban study) in Iran; J Rheumatol, 2008; 35: 1384–1390.
- [3] Dagenais S., et al., A systematic review of low back pain cost of illness studies in the United States and Internationally; Spine J., 2008; 8(1): 8-20.
- [4] Godfrey A., et. Al., Direct measurement of human movement by accelerometry; Medical Engineering & Physics, 2008; 30: 1364–1386.
- [5] Wong W.Y., Wong M.S., Ho Lo K., Clinical applications of sensors for human posture